



José Francisco Gameiro Pelica

Licenciado em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Infraestrutura para um controlador inteligente de energia e conforto num edifício inovador

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Doutor João Murta Pina, Professor Auxiliar,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
NOVA de Lisboa
Co-orientador: Doutora Laura Elena Aelenei,
Laboratório Nacional de Energia e Geologia,

Júri

Presidente: Prof. Rui Neves da Silva
Arguente: Prof. Pedro Pereira
Vogal: Prof. João Pina



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março, 2020

Infraestrutura para um controlador inteligente de energia e conforto num edifício inovador

Copyright © José Francisco Gameiro Pelica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Sometimes you just need to look at things from a different perspective.

AGRADECIMENTOS

Quero expressar os meus mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para a realização da presente dissertação de mestrado.

Primeiramente, ao Professor Doutor João Murta Pina por ter aceitado orientar esta importante fase do meu percurso académico. Agradeço imenso pela sua ajuda, compreensão, confiança e apoio.

À Doutora Laura Aelenei pela sua disponibilidade, conselhos e pela forma calorosa como me recebeu no Solar XXI.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa e a todos os docentes agradeço pelo conhecimento que me transmitiram durante a realização deste curso.

Ao Laboratório Nacional de Energia e Geologia, pelo acolhimento e pela oportunidade de realizar este projeto.

Ao Doutor Jorge Facão e ao Professor Daniel Aelenei, pela vossa disponibilidade e simpatia em ajudar-me com qualquer problema que surgisse.

Aos meus amigos, que apesar de não serem do mesmo sangue são a família que escolhi. Obrigado por me provarem, pelos momentos que vivemos e partilhámos, que não poderia ter escolhido melhor. Remeto ainda um agradecimento especial a um grupo que levo para sempre no coração: Querido, Dani, Borralho, Pipa, Jojo, Urso, Xico, Jota, Kaka, Russo, Adriano, Bagulho e Zainas espero que nunca se cansem de me aturar.

À minha namorada e melhor amiga Diana Querido um agradecimento nunca será suficiente, mesmo assim, agradeço-te pelas experiências e momentos que partilhámos ao longo desta jornada, por me incentivares a ser melhor, pelos objetivos individuais que tornámos nossos e que alcançámos juntos. Muito obrigado por teres estado ao meu lado nos bons momentos, mas também quando mais precisei.

Por fim, quero agradecer a quem está comigo desde o início. A toda a minha família que sempre me apoiou muito, principalmente aos meus avós, ao meu pai, à minha mãe e irmãs muito obrigado, sem vocês este feito não faria qualquer sentido. Quero ainda deixar um agradecimento especial à minha mãe por ser o meu porto seguro, o meu pilar, o meu exemplo. Sempre lutaste pela minha felicidade e meteste a minha vida em primeiro lugar por mais árduo e desgastante que fosse o caminho. Obrigado pelo teu amor.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para que eu me tornasse na pessoa que sou hoje, o meu obrigado.

RESUMO

Os edifícios são responsáveis por uma grande fatia do consumo energético a nível mundial, e visto que a maior parte das nossas vidas é passada no seu interior, é fulcral assegurar um ambiente confortável. Atualmente, os edifícios inovadores são projetados com sistemas de climatização ativos e passivos para manipular o conforto no seu interior. No entanto, esses sistemas quando controlados manualmente, despendem geralmente mais energia do que a necessária para obter níveis de conforto adequados.

Como solução para este dilema, a presente dissertação propõe a instalação de módulos sem fios em locais estratégicos para servirem de suporte a um sistema flexível de monitorização e controlo. Este sistema é baseado num conjunto de regras e visa alcançar um equilíbrio sustentável entre a maximização do conforto do utilizador e a minimização do consumo energético. A solução implementada irá servir como base para um sistema inteligente de monitorização e controlo a desenvolver no futuro.

Nesse âmbito, desenvolveu-se um algoritmo dividido em dois cenários, Verão e Inverno, que foi posteriormente validado numa sala do edifício Solar XXI. Realizaram-se testes para analisar o efeito das estratégias de ventilação, aquecimento e arrefecimento nos parâmetros de conforto térmico e na qualidade do ar da sala.

De um modo geral, os sistemas passivos foram capazes de garantir o conforto do utilizador. Porém, nos dias marcados por temperaturas extremas, os sistemas passivos nem sempre conseguiram colmatar as necessidades de conforto requeridas pelo utilizador, pelo que devem ser complementados com sistemas ativos. Estes por sua vez, tal como seria de esperar, mostraram-se mais eficazes no controlo da temperatura interior.

Quanto à concentração de CO₂, a utilização de estratégias de ventilação passivas revelou-se suficiente para assegurar a qualidade do ar. Paralelamente, em prol da minimização do consumo energético, o algoritmo foi desenvolvido com o intuito de priorizar os sistemas de climatização passivos.

Palavras-chave: Sistema de Monitorização e Controlo, Energia, Conforto, Edifícios Inovadores, Qualidade do Ar, Eficiência Energética, Edifício Solar XXI, Projeto SUDOKET.

ABSTRACT

Buildings are responsible for a large share of energy consumption worldwide, and since most of our lives are spent indoors, it is crucial to ensure a comfortable environment. Nowadays, innovative buildings are designed with active and passive heating and cooling systems to manipulate the indoor comfort. However, these systems, when controlled manually, generally expend more energy than is necessary to obtain adequate comfort levels.

To tackle this challenge, this thesis proposes the installation of wireless modules in strategic locations to support a monitoring and control flexible system. This system is based on a set of rules and aims to achieve a sustainable balance between maximizing user comfort and minimizing energy consumption. The implemented solution will serve as the initial basis for an intelligent monitoring and control system to be developed in the future.

In this context, an algorithm divided into two scenarios, Summer and Winter, was developed and subsequently validated in a Solar XXI building room. Tests were carried out to analyze the effect of ventilation, heating and cooling strategies on the parameters of thermal and visual comfort and air quality in the room. In general, passive systems were able to guarantee user comfort. However, on days marked by extreme temperatures, passive systems have not always been able to meet the comfort needs required by the user, so they must be complemented with active systems. These in turn, proved to be more effective in controlling indoor temperature, as expected.

When it comes to matters of CO₂ concentration, the use of passive ventilation strategies proved to be sufficient to ensure air quality. At the same time, in order to minimize energy consumption, the algorithm was developed to prioritize passive systems.

Keywords: Monitoring and Control System, Energy, Comfort, Innovative Buildings, Air Quality, Energy Efficiency, Solar XXI Building, SUDOKET Project.

ÍNDICE

Lista de Figuras	xv
Lista de Siglas	xix
1 Introdução	1
1.1 Contextualização e Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da Dissertação	3
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 Edifícios Inovadores	5
2.2 Automação	6
2.2.1 Automação Industrial	6
2.2.2 Automação Residencial ou Domótica	7
2.3 Sistemas de Gestão Técnica	8
2.3.1 <i>Building Automation Systems</i> (BAS)	9
2.3.2 <i>Building Energy Management Systems</i> (BEMS)	9
2.4 Controlador Lógico Programável	11
2.4.1 Hardware	12
2.4.2 Funcionamento	13
2.4.3 Softwares de programação	14
2.5 Protocolos de Comunicação	15
2.5.1 ZigBee	16
2.5.2 Modbus	16
2.5.3 BACnet	17
2.5.4 X10	17
2.5.5 KNX	17
3 Sistema de Operação e Controlo	19
3.1 Projeto SUDOKET	19
3.1.1 Controlador Energia-Conforto Inteligente	20
3.2 Metodologia Proposta	21

4	Caso de Estudo	23
4.1	Caracterização da Instalação Alvo	23
4.2	Sistemas de Climatização e Parâmetros de Conforto	25
4.2.1	Sistema 1 - Iluminação e Estores	26
4.2.2	Sistema 2 - Renovação do ar	26
4.2.3	Sistema 3 – BIPV	27
4.2.4	Sistema 4 – Aquecimento	29
4.2.5	Sistema 5 - Ar arrefecido	30
5	Arquitetura e Implementação do Sistema de Monitorização e Controlo	33
5.1	Equipamentos Instalados	33
5.2	Monitorização	40
5.3	Controlo	44
5.3.1	Inverno	44
5.3.2	Verão	46
5.4	Análise de Cenários	50
5.4.1	Cenário Verão – Estratégias de Arrefecimento	51
5.4.2	Cenário Inverno – Estratégias de Aquecimento	53
5.4.3	Análise do Consumo Energético	56
6	Conclusão	57
6.1	Conclusões Gerais	57
6.2	Trabalhos Futuros	59
	Referências Bibliográficas	61
I	Poster apresentado na conferência FACADES19	69

LISTA DE FIGURAS

2.1	Pirâmide dos níveis de automação industrial.	7
2.2	Ilustração de uma casa inteligente e de alguns sistemas automatizáveis.	8
2.3	Exemplo de uma utilização do PME.	10
2.4	Exemplo de uma possível solução <i>Total Building Solutions</i>	11
2.5	Alguns controladores lógicos programáveis existentes no mercado.	12
2.6	Diagrama de blocos ilustrativo da arquitetura de um Controlador Lógico Programável.	13
2.7	Ciclo de <i>scan</i> de um PLC.	14
3.1	Esquema da arquitetura do sistema de controlo inteligente de energia e conforto.	21
3.2	Escala subjetiva do índice de conforto térmico.	21
4.1	Edifício Solar XXI.	24
4.2	Localização dos sensores e dos sistemas de climatização e conforto da TR2.	24
4.3	Luminárias e dispositivos de sombreamento exteriores da sala TR2 que compõe o Sistema 1 – Iluminação e Estores.	26
4.4	Banderias reguláveis do sistema de renovação de ar da TR2.	27
4.5	Esquema ilustrativo do funcionamento das diferentes configurações do sistema de BIPV.	28
4.6	Vista exterior e interior do sistema BIPV implementado por trás dos módulos fotovoltaicos na fachada sul do Solar XXI.	29
4.7	Componentes do sistema de aquecimento central.	30
4.8	Representação do funcionamento do sistema de arrefecimento por tubos enterrados.	30
4.9	Sistema de arrefecimento de ar por tubos enterrados.	31
5.1	Controlador lógico programável, TM241CE24T, instalado na <i>Test Room 2</i>	34
5.2	Interface Homem-Máquina instalada na <i>Test Room 2</i> que permite estabelecer os <i>setpoints</i> dos sistemas de arrefecimento e aquecimento.	34
5.3	Sensor de presença, MTN5510-1419 ARGUS Presence, instalado na <i>Test Room 2</i>	35
5.4	Sensor instalado na <i>Test Room 2</i> , que indica de concentração CO ₂	35

5.5	Sensor instalado no exterior da <i>Test Room 2</i> , que mede a radiação solar incidente na fachada.	36
5.6	Medidor de energia instalado na <i>Test Room 2</i> , que mede o consumo energético dos sistemas de iluminação e tomadas.	36
5.7	Sensor instalado no sistema BIPV da <i>Test Room 2</i> , para medir a velocidade do ar.	37
5.8	Sensor de temperatura instalado em cada registo do sistema BIPV da <i>Test Room 2</i>	37
5.9	Registos instalados que permitem a automatização do sistema BIPV e do sistema de ar arrefecido da <i>Test Room 2</i>	37
5.10	Ventilador instalado no sistema BIPV da <i>Test Room 2</i>	38
5.11	Sensor de temperatura instalado no sistema de aquecimento por radiador da <i>Test Room 2</i>	38
5.12	Sensor de caudal instalado no sistema de aquecimento por radiador da <i>Test Room 2</i>	39
5.13	Válvula que permite a automatização do sistema de aquecimento por radiador da <i>Test Room 2</i>	39
5.14	Sensor de temperatura instalado no sistema de ar arrefecido por tubos enterrados da <i>TR2</i>	39
5.15	Dispositivo que permite variar a velocidade dos ventiladores do sistema de arrefecimento por tubos enterrados da <i>Test Room 2</i>	40
5.16	Ilustração da monitorização dos sistemas de climatização, do ambiente e do consumo energético da <i>TR2</i> na plataforma PME.	41
5.17	Temperatura dos registos do sistema BIPV, na configuração de aquecimento do ar interior, no dia 20 de janeiro de 2019.	41
5.18	Temperatura da água à entrada e à saída do sistema de aquecimento por radiador no dia 20 de dezembro de 2019.	42
5.19	Variâncias das temperaturas interior e exterior de 15 a 30 de Setembro.	42
5.20	Variâncias das temperaturas interior e exterior do mês de outubro.	43
5.21	Variâncias das temperaturas interior e exterior do mês de dezembro.	43
5.22	Excerto do algoritmo, programado em <i>Ladder</i> , relativo ao cenário de inverno.	46
5.23	Excerto do algoritmo, programado em <i>Function Blocks Diagram</i> , relativo ao cenário de verão.	47
5.24	Fluxograma do esquema de funcionamento do controlo da temperatura interior.	48
5.25	Fluxograma do esquema de funcionamento do controlo de iluminância.	49
5.26	Fluxograma do esquema de funcionamento do controlo da concentração de dióxido de carbono.	50
5.27	Representação gráfica do desempenho térmico no cenário Verão, sem a atuação de qualquer sistema de climatização.	52
5.28	Representação gráfica do desempenho térmico no cenário Verão, onde foram utilizados sistemas de climatização passivos.	52

5.29	Representação gráfica do desempenho térmico no cenário Verão, onde foram utilizados sistemas de climatização ativos.	52
5.30	Representação gráfica da concentração de CO ₂ no cenário Verão, onde foram utilizados sistemas de climatização passivos (azul) e ativos (laranja).	53
5.31	Representação gráfica do desempenho térmico, no cenário Inverno, sem a atuação de qualquer sistema de climatização.	54
5.32	Representação gráfica do desempenho térmico no cenário Inverno, onde foram utilizados sistemas de climatização passivos.	54
5.33	Representação gráfica do desempenho térmico no cenário Inverno, onde foram utilizados sistemas de climatização ativos.	54
5.34	Representação gráfica da concentração de CO ₂ no cenário Inverno, onde foram utilizados sistemas de climatização passivos (azul) e ativos (laranja).	55
I.1	Poster apresentado na conferência FACADES19	70

LISTA DE SIGLAS

ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado.
BAS	<i>Building Automation Systems.</i>
BEMS	<i>Building Energy Management Systems.</i>
BIPV	<i>Building Integrated Photovoltaic.</i>
BMS	<i>Building Management Systems.</i>
CPU	<i>Central Processing Unit.</i>
HMI	<i>Human Machine Interface.</i>
KET	<i>Key Enabling Technologies.</i>
KPI	<i>Key Performance Indicators.</i>
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia.
MODICON	<i>Modular Digital Controller.</i>
nZEB	<i>nearly Zero Energy Building.</i>
NZEB	<i>Net-Zero Energy Buildings.</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller.</i>
PME	<i>Power Monitoring Expert.</i>
SGT	Sistemas de Gestão Técnica.
TR2	<i>Test Room 2.</i>

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e Motivação

Cada vez mais as pessoas passam grande parte do seu cotidiano em edifícios. Aproximadamente 90% da nossa vida é passada no interior de edifícios ou de transportes (Shaikh et al., 2013b), assim sendo, é natural que o conforto e qualidade do ar sejam aspectos muito importantes que influenciam a gestão de edifícios. Estes conceitos têm um grande impacto na saúde, moral, produtividade, satisfação, e no geral, na qualidade de vida do ser humano (Shaikh et al., 2013a).

Outro ponto a ter em conta é a eficiência energética. A eficiência energética não é um conceito fácil de calcular, mas pode ser contabilizada através da análise dos chamados indicadores chave de desempenho, ou KPI (*Key Performance Indicator*). A recolha e análise de dados de certos KPI auxilia as tomadas de decisão de um gestor, para que se possa maximizar a poupança de energia elétrica (May et al., 2013). Os KPI podem focar-se na medição do consumo ou do custo de energia num determinado intervalo de tempo, ou ainda na eficiência de equipamentos (Schmidt et al., 2016; Vikhorev et al., 2013).

A relação entre o consumo de energia e o conforto dos habitantes de um edifício é inversamente proporcional, ou seja, para dar uma experiência mais confortável aos ocupantes é necessário utilizar mais energia. Estima-se que, na União Europeia, os edifícios sejam responsáveis por cerca de 40% da energia total consumida e consequentemente 36% das emissões de CO₂ (European Commission, 2018a). Daí o investimento na criação, no desenvolvimento e na implementação de sistemas que visem diminuir os consumos energéticos dos edifícios, por forma a alcançar um equilíbrio sustentável com o conforto dos habitantes e com o meio ambiente.

Para tornar um edifício energeticamente mais eficiente, não só é vantajoso controlar o consumo excedente dos equipamentos, como também é necessário que as pessoas possam avaliar os seus diagramas de consumo de energia. Para tal, a implementação de uma plataforma que monitorize, alerte e corrija os comportamentos e os “maus” hábitos energéticos dos ocupantes de uma instalação é uma mais valia (Gaspar, 2009).

Esta dissertação enquadra-se no projeto SUDOKET. Este projeto da UE promove a aplicação de tecnologias inovadoras conhecidas como KET (*Key Enabling Technologies*) em edifícios inovadores (Sudoe Interreg - Interreg Program Sudoe, 2019b). Como o nome indica, KET são tecnologias chave que promovem o desenvolvimento da indústria e da produção, e estimulam o crescimento da UE e a criação de postos de trabalho. As seis áreas tecnológicas que complementam as KET são: micro e nano eletrónica e fotónica, nanotecnologia, biotecnologia industrial, materiais avançados, tecnologias de manufatura avançada e inteligência artificial (European Commission., 2018). O desenvolvimento e exploração destas tecnologias pode impulsionar a UE, tornando-a um ponto de referência na construção de edifícios mais eficientes, confortáveis e que tenham um impacto ambiental mínimo (Sudoe Interreg - Interreg Program Sudoe, 2019b).

Nesse sentido, nesta dissertação propõe-se a implementação e o desenvolvimento de um sistema de monitorização e controlo baseado num conjunto de regras que antecede a um sistema de controlo inteligente de energia e conforto, a ser desenvolvido numa fase posterior. O sistema de controlo inteligente de energia e conforto foi apresentado e premiado, no formato de poster, na conferência FACADES19¹ que decorreu a 22 de novembro de 2019 na Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa. Em anexo, encontra-se o poster em questão.

1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como principais objetivos:

- Estudar um sistema de monitorização baseado numa rede de sensores e atuadores sem fios instalados numa sala de testes de um edifício inovador;
- Estudar o comportamento de vários sistemas de conforto inovadores de uma sala de testes através da monitorização;
- Recolher e analisar dados experimentais resultantes da monitorização dos sistemas de climatização e de conforto da sala e do seu consumo energético;
- Desenvolver e propor um sistema flexível, baseado num conjunto de regras, centrado no utilizador e que atue sobre o conforto da sala;
- Criar a infraestrutura necessária para desenvolver um sistema de controlo inteligente de energia e conforto.

¹<https://sites.google.com/fct.unl.pt/facades19/home>

1.3 Estrutura da Dissertação

A dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos organizados da seguinte forma:

Capítulo 2 – Apresenta uma introdução à história da automação e ao seu desenvolvimento até aos dias de hoje. Seguidamente, apresenta alguns conceitos necessários à compreensão da temática da dissertação, bem como as tecnologias existentes na área, o hardware, o software e os protocolos de comunicação.

Capítulo 3 – Apresenta o projeto em que esta dissertação está inserida, bem como os seus objetivos. Neste capítulo, também será detalhada a arquitetura e o funcionamento do sistema de controlo inteligente de energia e conforto, e ainda a metodologia proposta para esta dissertação.

Capítulo 4 - Apresenta a estrutura e arquitetura da sala de teste e no funcionamento geral dos sistemas de climatização da mesma. Descreve em seguida os parâmetros de conforto.

Capítulo 5 – Apresenta numa primeira parte a descrição dos dispositivos instalados na sala de teste. De seguida, é referida e apresentada a plataforma de monitorização bem como alguns parâmetros registados. Na segunda parte, são apresentados os cenários criados e o modo como o sistema irá atuar, através de fluxogramas ilustrativos. A última parte do capítulo termina com uma apresentação gráfica e análise de alguns resultados obtidos através dos testes realizados.

Capítulo 6 - Aborda as conclusões gerais e os objetivos cumpridos, bem como os problemas ainda por resolver e sugestões para a resolução dos mesmos. O capítulo termina com algumas propostas para trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Edifícios Inovadores

Atualmente, a maior parte do dia-a-dia da população é passado dentro de edifícios, como tal, o ser humano tem desenvolvido e explorado formas de melhorar o seu estilo de vida no interior. Aproximadamente, 35% dos edifícios da UE têm mais de 50 anos e 75% dos edifícios existentes são energeticamente ineficientes. No entanto, de acordo com o *World Business Council for Sustainable Development*, até 2050 prevê-se uma redução da utilização de energia em edifícios de cerca de 60% (European Commission, 2018a; World Business Council for Sustainable Development, 2009).

O investimento em edifícios inovadores, como por exemplo os edifícios inteligentes e os *Net-Zero Energy Buildings* (NZEB), promove a redução de energia utilizada tentando manter o nível de produtividade e conforto ótimos para os habitantes, demonstrando assim maior eficiência energética.

Um NZEB é definido pela UE como um edifício que tem uma grande eficiência energética, pois necessita de uma ínfima quantidade de energia que deve provir maioritariamente da produção de energia renovável (European Commission, 2018b). Por outro lado, um edifício inteligente é uma estrutura com capacidade de se adaptar às necessidades dos seus ocupantes, assim como à quantidade de energia disponível para manter o edifício operacional, isto é, deve ser capaz de variar o seu estado de funcionamento de modo a responder eficientemente às flutuações na rede (McComb, 2016).

De forma a alcançar uma alta eficiência energética e obter conforto e qualidade do ar no interior destes edifícios, que proporcionam um elevado rendimento aos seus habitantes, são utilizados sistemas de monitorização de dados. A monitorização pressupõe

a recolha de dados de forma frequente, com o auxílio de redes de sensores, que serão posteriormente analisados. Esta análise possibilita a previsão de mudanças no estado de funcionamento da instalação e permite que sistemas de gestão técnica intervenham com antecedência para melhor servir os utilizadores e melhorar o desempenho global do edifício (Walton, 2003).

2.2 Automação

Automação é uma palavra que deriva do latim *automatus* e significa, pelo dicionário, que se move por si próprio, espontâneo ou voluntário (World of Dictionary, 2018). Existem outras definições, mas resumindo, automação é a utilização de máquinas e a aplicação de tecnologias que permitam tornar um processo mais eficiente, fiável e seguro, minimizando, ou até mesmo anulando, a necessidade de intervenção humana (Market Business News, 2019).

2.2.1 Automação Industrial

Desde a pré-história que o Homem já inventava formas de otimizar processos. Diversos sistemas e mecanismos foram desenvolvidos com o intuito de diminuir o esforço necessário na realização de um trabalho, como por exemplo a roda, moinhos de vento ou água, ou até sistemas que tivessem por base o uso de força animal (Saitwal, 2019).

No entanto, a maioria dos historiadores admite que a origem da automação remonta ao início do século XVIII. Foi nesta época que a primeira máquina a vapor foi inventada em Inglaterra despoletando assim a chamada Revolução Industrial. O próximo grande passo deu-se no início do século XX quando a *General Motors* introduziu pela primeira vez uma linha de montagem que permitia a produção em larga escala e reduzia bastante o tempo de montagem de um carro, o que se mostrou muito lucrativo. Em meados do século XX a *General Motors* já possuía máquinas automatizadas por relés.

Por fim, em 1968 a empresa *BedFord Association* foi contratada para desenvolver um dispositivo que substituísse os relés, visto que estes não eram completamente eficientes. Por exemplo, problemas associados ao desgaste devido ao contacto repetitivo, à dificuldade na modificação da lógica de controlo e ao aumento considerável de equipamentos que necessitam de relés de controlo, em fábricas, levou ao desenvolvimento do MODICON (*Modular Digital Controller*) que foi o primeiro Controlador Lógico Programável (CLP), em inglês *Programmable Logic Controller* (PLC) (AutomationDirect.com, 2019; Silveira e Lima, 2003). Na Figura 2.1 pode-se observar a pirâmide dos níveis de automação industrial.

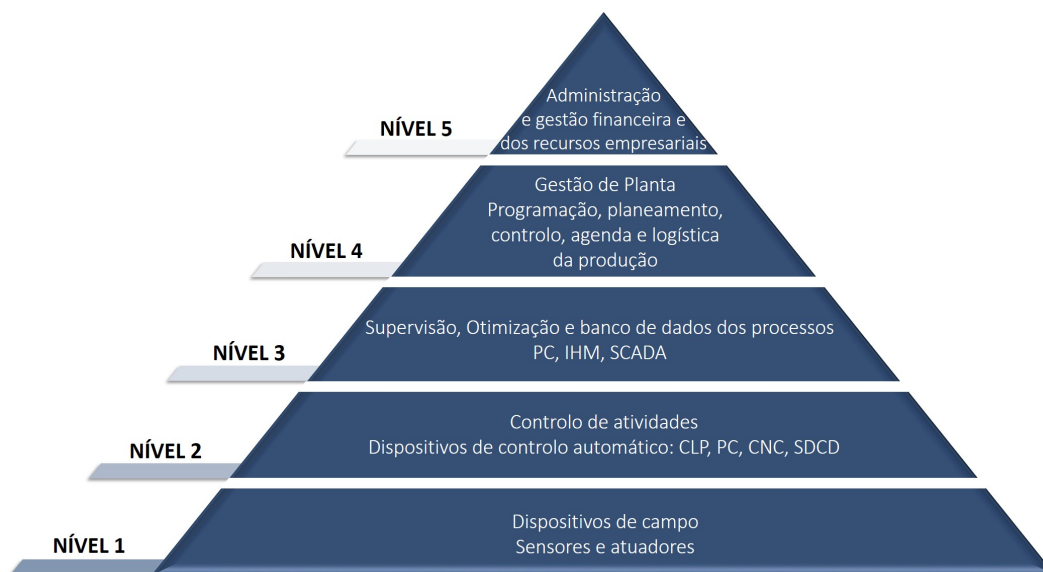


Figura 2.1: Pirâmide dos níveis de automação industrial. (Adaptado de https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-A-Piramide-de-Automacao-Instrumentacao-e-controle-sd_fig19_332775462, consultado em 13/01/2019).

2.2.2 Automação Residencial ou Domótica

Desde sempre, que a procura por uma melhor qualidade de vida faz parte do nosso ADN. A domótica, também conhecida como automação residencial, é um termo resultante da fusão entre as palavras “*domus*”, que significa casa em latim, e robótica. Este conceito tem como base a recolha de dados, por uma rede de sensores, que serão processados e analisados de modo a controlar e automatizar múltiplos sistemas de uma habitação, com o auxílio de uma interface, consoante os gostos, hábitos e as necessidades dos utilizadores (Gill et al., 2009; R. Nunes e Delgado, 1998; Sultan e Nabil, 2016).

Através de um programa previamente implementado é possível gerir, por exemplo, os sistemas de climatização, iluminação, comunicação, som, vídeo, segurança e entretenimento, tudo isto, com o intuito de dar ao utilizador uma experiência cada vez mais personalizada, melhorar a eficiência energética do espaço e, consequentemente, reduzir o impacto ambiental (R. Nunes e Delgado, 1998).

No início de século XX foi inventado o primeiro aspirador, pouco tempo depois, surgiram alguns eletrodomésticos que hoje em dia são essenciais em qualquer casa, tais como, frigoríficos, máquinas de lavar loiça e roupa, torradeiras, etc. O aparecimento destes equipamentos tornou mais fácil e cómoda a realização de tarefas domésticas, melhorando assim a qualidade de vida dos seus utilizadores (Somfy Team, 2018).

Em 1971, com a criação do primeiro microcontrolador a área da automação testemunhou uma queda nos custos, o que tornou esta tecnologia financeiramente mais acessível (Somfy Team, 2018). Poucos anos mais tarde, foi desenvolvido o protocolo aberto de comunicação X10, pela empresa *Pico Electronics*, que tinha como objetivo transmitir dados através da rede de distribuição de energia elétrica de um edifício (Patrício, 2009).

Devido a estas inovações e ao interesse nesta área, a instituição *American Association of House Builders* declarou o termo “*Smart Home*” em 1984. Hoje em dia, a internet e protocolos sem fios permitem-nos controlar diversos sistemas da nossa casa mesmo quando estamos longe da mesma (Somfy Team, 2018). Na figura seguinte, Figura 2.2, encontra-se um exemplo dos vários sistemas que podem ser geridos por um sistema de automação residencial.

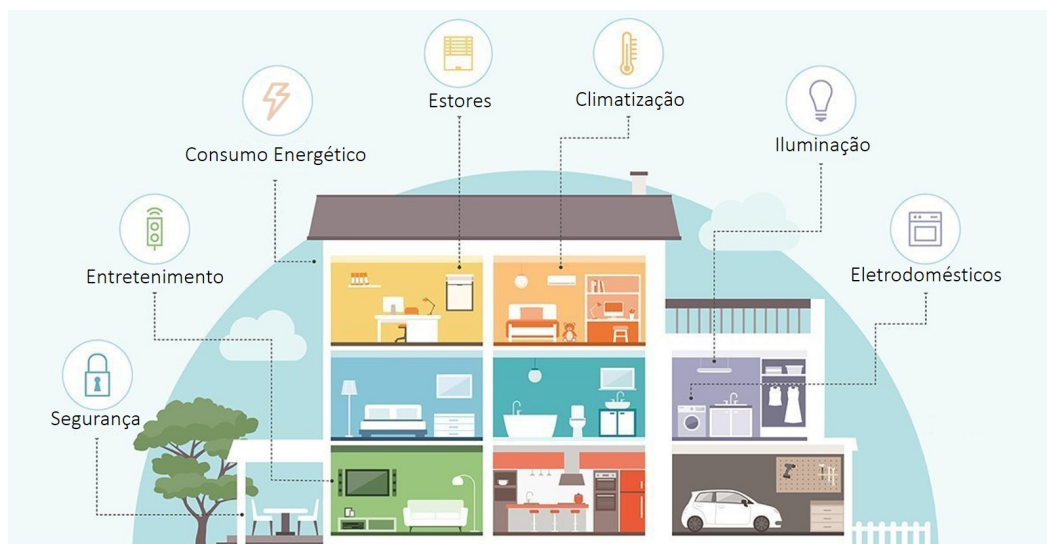


Figura 2.2: Ilustração de uma casa inteligente e de alguns sistemas automatizáveis. (Adaptado de <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/smart-home-or-building>, consultado em 13/01/2019).

2.3 Sistemas de Gestão Técnica

Com o intuito de satisfazer as necessidades operacionais e manter o nível de conforto e qualidade do ar, consumindo o mínimo de energia possível em edifícios, surgiram os Sistemas de Gestão Técnica (SGT). Estes sistemas, suportados por redes de sensores que medem os valores de certos KPI, são responsáveis por gerir e controlar parâmetros do edifício através da implementação de atuadores e controladores. Os subsistemas de climatização, segurança, iluminação, monitorização de energia, aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC), são alguns dos sistemas controlados com o propósito de favorecer o edifício e proporcionar aos seus utilizadores condições de trabalho confortáveis (Kamali et al., 2013; Wang, 2009).

Na literatura é possível encontrar várias estratégias destinadas ao controlo de edifícios, como por exemplo, sistemas *fuzzy*, sistemas que usam conjuntos de regras ou modelos preditivos e adaptativos. No mercado existem vários sistemas de gestão técnica que podem ter diferentes funcionalidades, aplicações, arquiteturas, protocolos e preços (Doukas et al., 2007).

Segue-se a descrição sucinta de dois tipos de SGT, os *Building Automation Systems* (BAS) e os *Building Energy Management Systems* (BEMS). Nem sempre é perceptível a diferença entre os dois, visto que, ambos os sistemas podem operar em conjunto e muitos dos fabricantes já introduzem funcionalidades de um BAS num BEMS e vice-versa. No entanto, um BAS tem como base o controlo dos sistemas de um edifício em tempo real e um BEMS, funciona como um *dashboard*, é considerado uma ferramenta de apoio à decisão que recolhe, analisa e reporta dados de energia (Naya Energy, 2018).

2.3.1 *Building Automation Systems* (BAS)

Os BAS ou *Building Management Systems* (BMS) podem ser descritos como plataformas que monitorizam e controlam as partes mecânicas e elétricas de um edifício. Estes sistemas têm a capacidade de minimizar o consumo de energia de uma instalação, em serviços como, iluminação, elevadores, sistemas mecânicos e elétricos, canalização, prevenção de incêndios, segurança e AVAC. O gestor de um edifício, com a assistência de um BAS, consegue recolher dados sobre os vários sistemas do edifício, analisá-los e assim agir da melhor forma para obter uma maior otimização das instalações e dos seus serviços (Bongiorno et al., 2011; Sun et al., 2015; Tao et al., 2016).

Através da interação com atuadores e controladores em tempo real, consegue-se modular a energia utilizada e influenciar o conforto e qualidade do ar interiores, de acordo com as necessidades do momento. Mais especificamente, é responsável pela implementação de estratégias que passam por assegurar o devido funcionamento dos serviços do edifício, maximizar o conforto dos ocupantes, e minimizar os requisitos de manutenção, os consumos energéticos, os custos operacionais e ainda o impacto ambiental (Oti et al., 2016; Tragos et al., 2015).

2.3.2 *Building Energy Management Systems* (BEMS)

Os BEMS relacionam-se especificamente com sistemas de energia e com as necessidades energéticas do edifício. Estas plataformas são utilizadas com o objetivo de melhorar a eficiência energética das instalações detetando, monitorizando e controlando os consumos de energia e os custos inerentes (Levermore, 2000; Mansson e McIntyre, 1997).

Os BEMS baseiam-se na análise de dados recolhidos pela rede de sensores sem fios implementada no edifício, no comportamento dos ocupantes, em fatores internos ou externos e calculam e encontram soluções que são sugeridas aos utilizadores com o propósito de reduzir os consumos de energia. Este software deve de ser simples e mostrar uma visão geral do consumo de energia com a opção de examinar ao pormenor equipamentos que possam estar defeituosos ou apenas ineficientes (Doukas et al., 2007; Levermore, 2000; Mansson e McIntyre, 1997).

- **Schneider Electric**

O produto *Power Monitoring Expert* (PME) da linha EcoStruxure é um software que a Schneider Electric introduziu no mercado e que providencia monitorização de energia, sistemas de climatização, iluminação e segurança. É uma plataforma tecnológica de *Internet of Things* (IoT) *plug-and-play* simples que permite ao utilizador integrar múltiplos sistemas, e na qual a comunicação entre equipamentos utiliza protocolos *standard*, como o LonWorks, Modbus, BACnet e KNX. O EcoStruxur é definido pela empresa como uma arquitetura de sistemas integrados, compatível, transparente e que beneficia de um software de plataforma aberta (J. M. C. d. Santos, 2014; Schneider Electric Portugal, 2013).

Com este produto é possível otimizar um edifício ao nível da eficiência energética aproveitando a análise detalhada dos dados de energia e conforto que estão disponíveis em tempo real na plataforma PME, Figura 2.3.

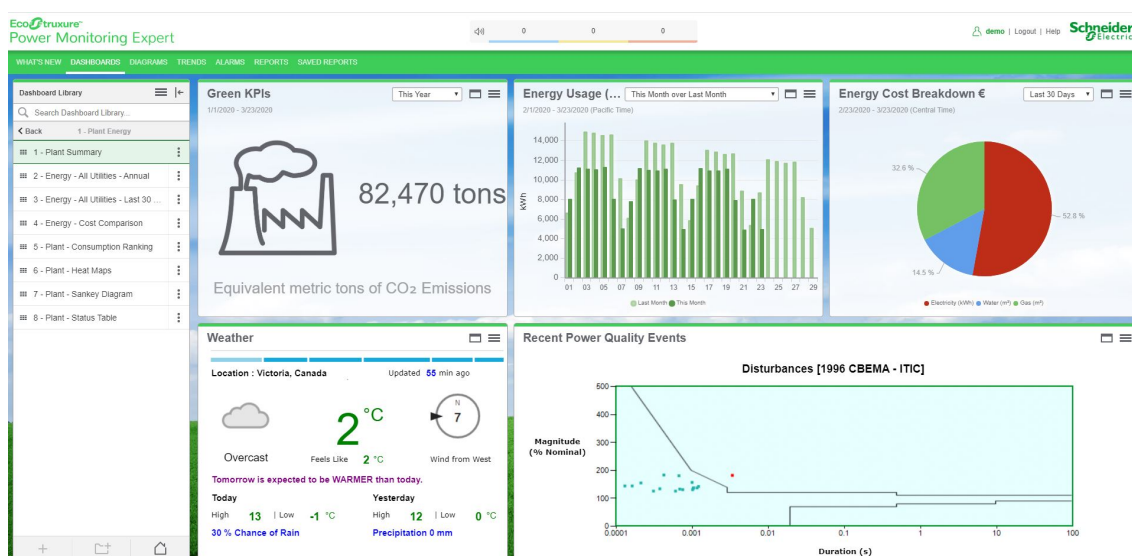


Figura 2.3: Exemplo de uma utilização do PME.

- **Siemens**

À semelhança do EcoStruxure da Schneider Electric, a Siemens desenvolveu a DE-SIGO. Esta solução que se insere no conceito *Total Building Solutions* da Siemens assenta na integração e coordenação dos diversos subsistemas, que são necessários gerir num edifício inteligente, e na otimização energética (Siemens, 2016a).

A implementação de sistemas de segurança eletrónica, proteção contra incêndios e gestão técnica de edifícios, e dos respetivos subsistemas, neste produto traz vantagens para os utilizadores. Esta solução beneficia os utilizadores, nomeadamente por permitir economizar tempo, pela redução de custos, flexibilidade e conforto do

edifício e dos seus sistemas, e ainda minimização de riscos (J. M. C. d. Santos, 2014; Siemens, 2016b).

DESIGO é descrito pelos seus criadores como um software de plataforma aberta e interoperável. A sua compatibilidade com protocolos *standards* e normalizados, como por exemplo ModBUS, LonWorks e KNX, torna esta solução bastante flexível (J. M. C. d. Santos, 2014). Na Figura 2.4, estão representados alguns serviços prestados pelo software *Total Building Solutions* da Siemens e também alguns sistemas que este software permite gerir e controlar.



Figura 2.4: Exemplo de uma possível solução *Total Building Solutions*. (Retirado de Siemens, 2016a).

2.4 Controlador Lógico Programável

Um PLC é definido como um controlador baseado num microprocessador que utiliza uma memória programável para armazenar instruções e para implementar funções lógicas, funções aritméticas, temporizadores e contadores de modo a controlar processos ou máquinas (Bolton, 2015; Vieira, 2018).

Como foi referido anteriormente, os controladores lógicos programáveis foram introduzidos no final da década de 1960 para substituírem os sistemas lógicos de relés (Gonzalez, 2015). Comparando estes dois sistemas de controlo, os PLC são mais flexíveis, visto que, basta reprogramar o PLC para que se altere a sequência de operação do sistema de controlo. Sendo um sistema modular, um PLC pode ser expandido consoante a necessidade dos utilizadores ou das instalações. Uma outra vantagem dos PLC é o facto de conseguirem “sobreviver” em ambientes hostis, suportando condições extremas de temperatura, poeira e humidade. Estes controladores são mais rápidos, fidedignos, compactos

e requerem menor manutenção do que o sistema de controlo ao qual sucedeu (AMCI: Advanced Micro Controls Inc., 2019; Bolton, 2015; Erickson, 1996; Gonzalez, 2015). No entanto, os PLC não são os mais adequados para processar dados com um grau de complexidade maior, como por exemplo, dados em linguagem C++ ou Visual Basic. É também necessário a ligação a uma *Human Machine Interface* (HMI) para que se possa observar os dados de uma forma gráfica e interagir diretamente com o sistema de controlo (Alphonsus e Abdullah, 2016; Gonzalez, 2015).

No mercado existe uma vasta gama de autómatos desenvolvidos por diversas empresas. De seguida, encontram-se alguns exemplos, Figura 2.5:

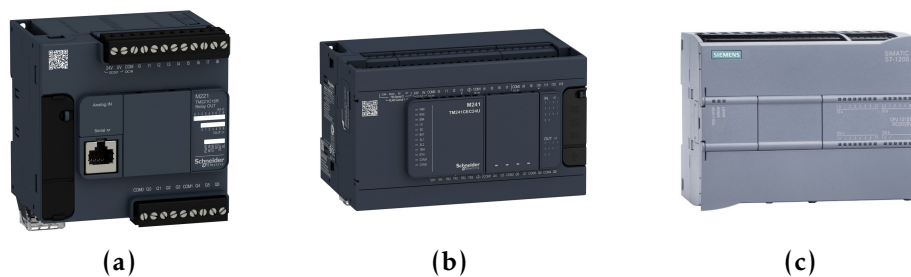


Figura 2.5: Alguns controladores lógicos programáveis existentes no mercado. (a) Schneider M221; (b) Schneider M241; (c) Siemens SIMATIC S7-1200.

2.4.1 Hardware

A *Central Processing Unit* (CPU) contém um processador e pode por isso ser designada como o cérebro do PLC. A CPU interpreta os sinais de entrada e controla as saídas de acordo com o programa feito pelo utilizador guardado na memória do PLC (Alphonsus e Abdullah, 2016; Bolton, 2015). Na memória para além de estar guardado o programa a executar, serão também guardadas informações provenientes dos dispositivos de entrada e saída que normalmente são utilizados no programa (Bolton, 2015; Gonzalez, 2015). Estes dispositivos estão ligados bilateralmente ao PLC através do módulo de entradas e saídas (*Input/Output Module*). Sensores e interruptores são exemplos de aparelhos de entrada, enquanto que válvulas e relés são possíveis dispositivos de saída. Estes dispositivos podem enviar e receber sinais discretos ou digitais (Alphonsus e Abdullah, 2016; Bolton, 2015).

A interface de comunicação permite receber e enviar dados para outros sistemas, comunicar com outro sistema de controlo, nomeadamente outro PLC ou até um sistema de supervisão e aquisição de dados (SCADA) que monitoriza variáveis e dispositivos de sistemas de controlo (Bolton, 2015; Unitronics, 2019).

Os módulos de um PLC estão representados na figura seguinte.

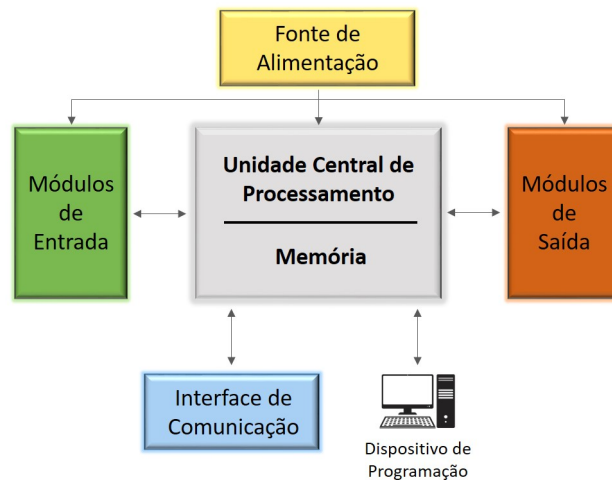


Figura 2.6: Diagrama de blocos ilustrativo da arquitetura de um Controlador Lógico Programável. (Adaptado de https://dSPACE.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68419/F3-BP-2017-Hanak-Miroslav-Advanced_PLC_Programming_Methods.pdf, consultado em 23/01/2019).

2.4.2 Funcionamento

O funcionamento de um PLC é cíclico. Este ciclo é conhecido como o ciclo de varredura ou *scan* e consiste, após a inicialização do mesmo, em quatro passos: leitura das entradas, execução do programa, atualização das saídas e limpeza (Gonzalez, 2015; Vieira, 2018).

No momento em que é ligado, o PLC executa uma série de verificações, no caso de haver algum erro, a nível de hardware ou software, é emitido um aviso e o ciclo reinicia. Quando não é encontrado nenhum erro o PLC passa ao passo seguinte (AMCI: Advanced Micro Controls Inc., 2019; Gonzalez, 2015).

Seguidamente, o PLC cria uma tabela onde guarda o estado dos dispositivos de entrada aquando a inicialização do ciclo para posteriormente usar estes dados no próximo passo. Esta fase torna o processo mais rápido e pode evitar certos casos em que os valores das entradas mudam durante a execução do programa (AMCI: Advanced Micro Controls Inc., 2019; Unitronics, 2019).

O segundo passo após a inicialização é a execução do programa, onde o PLC vai executar o programa implementado pelo utilizador, uma instrução de cada vez. Este processo irá determinar quais as saídas que o PLC deve ligar ou desligar, terminando assim o processo de atualização das saídas, que corresponde ao terceiro passo (AMCI: Advanced Micro Controls Inc., 2019; Gonzalez, 2015; Unitronics, 2019).

Por fim, o último passo consiste num diagnóstico geral, na comunicação com a rede de dispositivos do sistema de controlo e em verificações de erros. O ciclo repete-se voltando assim ao primeiro passo e prossegue até encontrar um erro ou até ser parado pelo utilizador (AMCI: Advanced Micro Controls Inc., 2019). O esquema seguinte ilustra o funcionamento de um PLC, como descrito anteriormente, Figura 2.7.

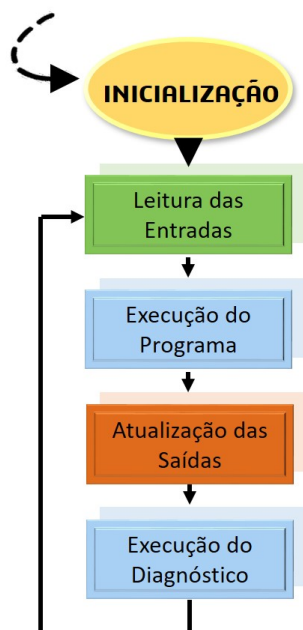


Figura 2.7: Ciclo de *scan* de um PLC. (Adaptado de <http://www.plcmax.com.br/2013/03/o-tempo-de-scan-e-importante.html>, consultado em 23/01/2019).

2.4.3 Softwares de programação

A maior parte das empresas que produzem autómatos, criam também softwares próprios para os programar. O SoMachine é um software de programação de autómatos da Schneider Electric, enquanto que o SIMATIC STEP7 (TIA Portal) foi desenvolvido pela Siemens.

- **SoMachine**

SoMachine é um software de programação, comissionamento e monitorização desenvolvido pela Schneider Electric. Esta plataforma é instalada num computador e utilizada para correr um programa que vai operar e gerir um sistema de controlo, consoante o que for definido pelo utilizador (Grétarsson, 2014; Sahu e Dey, 2016; Schneider Electric, 2010b; Schneider Electric, 2018).

O SoMachine permite programar e gerir não só os seus controladores, mas também a sua HMI e outros dispositivos ligados à sua rede. Para além disso, esta interface realiza o diagnóstico do seu programa e facilita a localização e a correção de erros que possam existir (Grétarsson, 2014; Schneider Electric, 2010b; Schneider Electric, 2018).

Para criar a sua aplicação o programador tem à sua disponibilidade diversas linguagens de programação, entre as quais se destacam *Ladder Diagram* (LD), *Function Block Diagram* (FBD), *Instruction List* (IL) e *Structured Text* (ST) (Schneider Electric, 2010b).

- **SIMATIC STEP 7 (TIA Portal)**

O STEP 7 é semelhante ao SoMachine, através deste software pode-se desenvolver e otimizar um sistema de controlo. Com a sua vasta gama de funções o STEP 7 proporciona aceleração na eficiência de todas as tarefas de automação. Esta ferramenta flexível permite configuração de hardware, estabelecimento de comunicações, teste, simulação, comissionamento, gestão, programação e diagnóstico do sistema de controlo implementado (Berger, 2012; Berger, 2013).

A plataforma da Siemens dispõe de várias linguagens de programação, dependendo do controlador que se pretende programar, como por exemplo *Ladder*, *Function Block Diagram*, *Statement List (STL)* e *Structured Control Language (SCL)* (Berger, 2012; Berger, 2013).

2.5 Protocolos de Comunicação

A comunicação entre dois ou mais elementos de uma rede (*network*) pode ser dividida em duas categorias base, ligações com fio (*wired*) e ligações sem fio (*wireless*). Cada categoria tem as suas vantagens, por exemplo, uma ligação com fio é normalmente uma forma mais segura de transferir dados, enquanto que uma ligação sem fios habitualmente tem custos de instalação e operação mais baixos. No entanto, a escolha da tecnologia depende dos requisitos de cada projeto (Ahmad et al., 2016).

Independentemente do método escolhido, ambos têm protocolos, que podem diferenciar de acordo com o fabricante. Resumidamente, protocolos de comunicação são tipos de linguagem de comunicação, ou seja, conjuntos de regras para trocas de mensagens entre sistemas e equipamentos (Halsall, 1996). Estas regras definem não só como a informação é processada e codificada, como também o seu formato, significado e meios de transmissão da mensagem (Jorge, 2010).

Das várias opções de fabricantes que existem no mercado e aplicações para que os equipamentos e sistemas se destinam, advêm diferentes e variados protocolos de comunicação (H. M. T. d. Santos, 2015). Devido à probabilidade da ocorrência de erros de comunicação que podem originar, caso existam equipamentos numa *network* que tenham protocolos ou versões diferentes, surgiram os chamados protocolos *standard* (Halsall, 1996; Patrício, 2009).

A implementação de protocolos *standard* e de equipamentos modularizados são soluções ideais tanto para os utilizadores como para os fornecedores. A padronização permite que os dispositivos comuniquem bidireccionalmente entre si, independentemente do fabricante, e a modularização facilita a manutenção e contribui para o aumento da flexibilidade da rede (Jorge, 2010; Patrício, 2009). Caso existam dois equipamentos a comunicar entre si, que possuam diferentes protocolos, é necessária a instalação de um

equipamento externo, designado *gateway*, que atua como um tradutor de linguagem de comunicação (Halsall, 1996; Jorge, 2010).

2.5.1 ZigBee

O protocolo ZigBee é baseado no protocolo padronizado IEE 802.15.4, e concebido pela empresa ZigBee Alliance. Este protocolo foi desenvolvido com a intenção de ser implementado em variados ambientes como por exemplo na indústria, no comércio e em habitações. Apesar disso, é geralmente inserido em sistemas de segurança, na automação de edifícios e em leituras remotas de medidores. O protocolo ZigBee permite a implementação de três tipologias de rede: em malha, em estrela e em árvore. As redes são compostas principalmente por um coordenador, *routers* e clientes (Ahmad et al., 2016).

Algumas das características do ZigBee são a sua natureza de curta distância, baixa velocidade de transferência de dados e o facto de consumir pouca energia (Ahmad et al., 2016).

Um sistema baseado no protocolo ZigBee beneficia de uma instalação simples e de baixo custo, dado que o sistema é auto configurável. As conexões entre os dispositivos são bastante seguras, a manutenção necessária e o consumo energético são relativamente baixos. No entanto, o facto de funcionar apenas via rádio é uma desvantagem, visto que podem haver interferências causadas por outros aparelhos que comuniquem por rádio frequências (Saleiro e Ey, s.d.).

2.5.2 Modbus

O Modbus é um protocolo aberto de comunicação utilizado maioritariamente na área de automação industrial, sendo também muito implementado em sistemas de monitorização de edifícios. É um dos primeiros protocolos desenvolvidos para a aquisição de dados de instrumentação e para comandar atuadores em redes de controladores lógicos programáveis (Makhija e Subramanyan, 2003).

Este protocolo foi concebido em 1979 pela Modicon Industrial Automation Systems, atual Schneider Electric, e baseia-se num mecanismo de controlo de acesso do tipo mestre-escravo, ou cliente-servidor. Este mecanismo consiste no envio de mensagens da estação mestre para os escravos, nas quais, o mestre pode solicitar o envio de dados lidos pelos medidores ou enviar ordens de controlo dos atuadores. É de salientar que apenas o mestre pode iniciar a sequência de comunicação (Ahmad et al., 2016). Uma das principais desvantagens do Modbus é que este protocolo não suporta autenticação nem encriptação, o que significa que é mais vulnerável em termos de segurança (Ahmad et al., 2016). Apesar de não ser um protocolo robusto, a sua simplicidade permite não só fácil implementação, mas também grande flexibilidade (Ahmad et al., 2016).

2.5.3 BACnet

BACnet (*Building Automation and Control Networking Protocol*), é um protocolo *standard* americano desenvolvido pela *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, (ASHRAE) para responder às necessidades de automação de um edifício. Este protocolo foi criado com a intenção de facilitar a interoperação entre sistemas de edifícios de diferentes fornecedores (Ahmad et al., 2016).

O BACnet é especialmente utilizado para que múltiplos equipamentos de redes diferentes de um BAS comuniquem entre si. Para tal, foram definidos seis protocolos como modos de transmissão de mensagens: Ethernet, ARCNET, Master-Slave/Token-Passing (MS/TP), LonTalk, Point-To-Point (PTP) e Internet Protocol (IP). Sendo um protocolo tão robusto, é possível distinguir, por exemplo, uma comunicação entre controladores de diferentes subsistemas e uma comunicação entre os componentes de campo, como os sensores e os atuadores (Ferreira, 2010).

2.5.4 X10

Desenvolvido na década de 1970 pela empresa Pico Electronics na Escócia, este protocolo de comunicação aberto permite transmitir dados através da rede de energia elétrica. Este protocolo, pioneiro na área da domótica, apresenta custos baixos, o que o torna líder no mercado residencial Norte Americano e um dos protocolos mais utilizados no mundo (J. P. Nunes, 2009; Patrício, 2009; J. M. C. d. Santos, 2014).

O X10 beneficia de uma instalação simples, pois não é necessário adicionar cabos nem mão de obra especializada, ou seja, pode ser instalado em habitações já existentes pelo próprio morador. O controlo dos dispositivos que utilizam este protocolo é bastante simples e pode ser efetuado pelo computador. Atualmente, os sistemas X10 suportam comunicação via radiofrequência, o que permite a comunicação entre dispositivos sem fios (J. P. Nunes, 2009; Patrício, 2009; J. M. C. d. Santos, 2014).

Contudo, o facto de ser um protocolo lento, que apenas suporta 256 endereços de dispositivos e que possui um número reduzido de comandos torna esta tecnologia pouco segura e robusta (J. P. Nunes, 2009; Patrício, 2009; J. M. C. d. Santos, 2014).

2.5.5 KNX

O protocolo KONNEX (KNX) foi criado em 1999 pela empresa Konnex e resulta da união de três protocolos já existentes, o EHS (*European Home Systems Protocol*), o BatiBUS e o EIB (*European Installation Bus*) (Patrício, 2009; J. M. C. d. Santos, 2014). A sua criação deveu-se à conveniência de ter uma única norma europeia que, permitisse a comunicação entre todos os dispositivos de uma habitação, melhorasse a prestação de serviços nos diferentes meios físicos e introduzisse novos modos de funcionamento, como por exemplo o *Plug & Play* (Castro, 2012; J. P. Nunes, 2009).

Este protocolo tem algumas vantagens. É um protocolo *standard*, que suporta diversos meios físicos de comunicação e, conseqüentemente é mais robusto e seguro quando comparado com o protocolo X10 (Castro, 2012; J. P. Nunes, 2009).

No entanto, a implementação de um sistema KNX deverá ser feita por um técnico especializado, aumentando os custos finais de instalação. Outro problema com esta tecnologia é o facto de não ser simples implementar novas configurações. Por exemplo, se um utilizador quiser alterar uma definição num dispositivo, ou até adicionar um novo dispositivo à rede, terá de reconfigurar todos os dispositivos. Na prática alguns dispositivos domóticos têm de parar de funcionar durante o tempo de reconfiguração, desta forma verifica-se que o KNX é pouco flexível a mudanças. Por fim apesar de ser um protocolo mais robusto e seguro não é imune à ocorrência de problemas na comunicação entre dispositivos (Castro, 2012; J. P. Nunes, 2009). O KNX pode ser configurado em três modos, cada um com diferentes funções: System mode (S-mode), Easy mode (E-mode) ou Automatic mode (A-mode) (Castro, 2012; J. P. Nunes, 2009).

Na configuração S-mode, que é a mais utilizada no KNX, os dispositivos são instalados por profissionais especializados com o auxílio da ferramenta ETS (*Engineering Tool Software*). Isto permite uma melhor adaptação a qualquer habitação e uma implementação de mais funcionalidades, tornando-se numa configuração mais abrangente. Relativamente ao E-mode, os dispositivos são pré-programados pelo fabricante, de modo a realizarem uma determinada função. A configuração destes dispositivos é efetuada de maneira semelhante ao protocolo X10, com um controlador ou através de interruptores nos próprios aparelhos. Por último, a configuração A-mode funciona por *Plug & Play*. Os dispositivos podem ser instalados pelo utilizador sem a necessidade de qualquer configuração. Este modo foi criado para a instalação de dispositivos eletrodomésticos e de entretenimento (Castro, 2012; J. P. Nunes, 2009).

O KNX suporta vários meios de comunicação que facilitam a instalação da rede de comunicação consoante as condições do local. Os meios de comunicação suportados por esta tecnologia são os seguintes (Castro, 2012; J. P. Nunes, 2009; Patrício, 2009):

- Pares entrelaçados TP0 (*twisted pair*) a 4800 bits/s;
- Pares entrelaçados TP1 (*twisted pair*) a 9600 bits/s;
- Rede elétrica PL110, a 110 kHz;
- Rede elétrica PL132, a 132 kHz;
- Radiofrequência a 868 MHz;
- Infravermelhos, limitado a 12 metros;
- Ethernet.

SISTEMA DE OPERAÇÃO E CONTROLO

Este capítulo descreve primeiramente o projeto em que esta dissertação está inserida, e posteriormente as metodologias consideradas para o desenvolvimento de um sistema de monitorização e controlo que permita minimizar os consumos energéticos e maximizar o conforto térmico.

3.1 Projeto SUDOKET

O projeto SUDOKET pertence ao Programa Interreg Sudoe, que por sua vez faz parte do objetivo europeu de cooperação territorial, e é financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), um dos fundos da política regional europeia. O Interreg Sudoe apoia o desenvolvimento regional de países do sudoeste da Europa e promove a cooperação transnacional para encontrar soluções para problemas comuns a estes territórios (Sudoe Interreg - Interreg Program Sudoe, 2019a).

Os projetos que compõem o Interreg Sudoe exploram 5 áreas prioritárias (Sudoe Interreg - Interreg Program Sudoe, 2019a):

- Investigação e inovação;
- Competitividade das pequenas e médias empresas;
- Economia de baixo teor de carbono;
- Combate às alterações climáticas;
- Meio ambiente e eficiência de recursos.

Mais concretamente, o projeto SUDOKET insere-se na área de investigação e inovação. Os seus focos são: o mapeamento, a consolidação, a disseminação e a aplicação de tecnologias inovadoras, conhecidas por KET, que tornem os edifícios mais eficientes em termos energéticos e que garantam uma maior qualidade de vida aos seus utilizadores.

Neste sentido, o SUDOKET desenvolve e fomenta a criação de ligações e de sinergia entre os construtores, fabricantes de produtos, designers e tecnólogos, que influenciam de maneiras diferentes a criação de um edifício inovador (Sudoe Interreg - Interreg Program Sudoe, 2019b).

Em particular, o projeto SUDOKET propõe as seguintes KET para os edifícios inovadores e o desenvolvimento das mesmas no espaço SUDOE:

- KETpedia;
- KETcluster;
- KETedu;
- KEToperation;
- KETsupply;
- KETstorage;
- KETmaterials.

O trabalho desenvolvido nesta tese incide no estudo e desenvolvimento do KEToperation – Demonstração de gestão inteligente de um Edifício Inovador , tendo como caso piloto uma sala de teste do edifício SolarXXI.

3.1.1 Controlador Energia-Conforto Inteligente

O conforto térmico tem um impacto significativo na produtividade dos utilizadores dos edifícios, mas é algo subjetivo, podendo variar de pessoa para pessoa. A maximização do conforto dos habitantes e a minimização dos consumos energéticos são tipicamente aspetos contraditórios. Existem já várias abordagens que pretendem controlar o conforto baseadas no comportamento térmico de edifícios, mas este tipo de abordagem é pouco flexível, pois tem de ser feita para cada caso em particular.

No âmbito do projeto SUDOKET, a Universidade NOVA de Lisboa e o Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) estão a investigar e a desenvolver um sistema, centrado no utilizador, baseado em tecnologias flexíveis, inteligente e facilmente reconfigurável, para controlo de energia e conforto em edifícios. Esta dissertação faz parte dessa investigação que está a decorrer em salas piloto do edifício Solar XXI no LNEG.

Abaixo, pode-se observar a arquitetura deste sistema de controlo inteligente de energia e conforto, Figura 3.1.

O Modelo de Conforto Térmico: Utilizador consiste na perceção de conforto do utilizador do gabinete. O modelo recebe como entradas o estado de ocupação da sala, a temperatura interior, a humidade relativa, etc. Com o suporte destes parâmetros de entrada e do *feedback* do utilizador o sistema irá atuar de maneira a melhorar o conforto do mesmo. Por exemplo, perante uma temperatura interior abaixo de determinado valor, definido pelo utilizador, ligar-se-á o radiador. Evidentemente que primeiro será necessário confirmar se a sala está ocupada para que não haja gastos energéticos desnecessários.

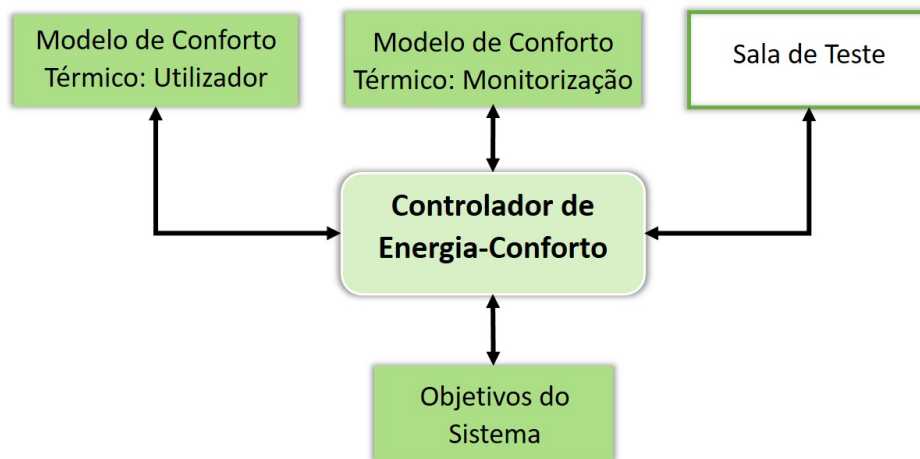


Figura 3.1: Esquema da arquitetura do sistema de controlo inteligente de energia e conforto.

Pode definir-se o índice de conforto térmico (TCi) pela escala apresentada na Figura 3.2.

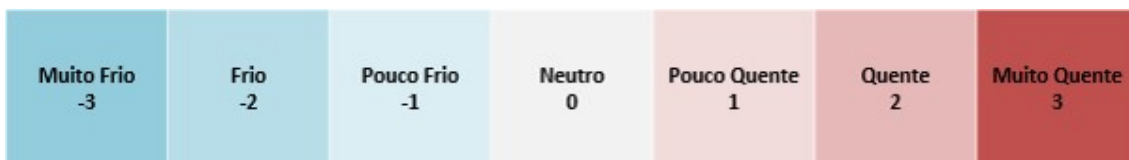


Figura 3.2: Escala subjetiva do índice de conforto térmico.

O valor deste índice depende do conforto térmico perceptível pelo habitante e pode ser definido pelo comportamento habitual do utilizador e pelo seu *feedback*. Conforme o valor do índice no momento, o algoritmo a desenvolver irá atuar de forma a aumentar o conforto da sala da maneira mais eficiente possível, a nível energético.

Quanto ao Modelo de Conforto Térmico: Monitorização, este permitirá deduzir os gastos energéticos que derivam da utilização de sistemas de climatização, e ainda prever as necessidades de conforto térmico dos habitantes com base em previsões meteorológicas e em parâmetros de conforto interiores. Assim, pode-se dar prioridade a estratégias passivas, que não consomem energia, para moderar, por exemplo, a temperatura da sala.

3.2 Metodologia Proposta

Nesta dissertação propõe-se um paradigma baseado num conjunto de regras, flexível e facilmente reconfigurável consoante as preferências do utilizador. O sistema baseado num conjunto de regras servirá como base de um sistema de controlo inteligente de energia e conforto a ser desenvolvido num trabalho futuro.

Através de testes dos sistemas de climatização e do *feedback* do utilizador pretende-se criar uma *pool* de dados para futuramente serem utilizados para treinar redes neuronais. Pretende-se também implementar regras para dois cenários diferentes: Inverno e Verão.

Esta proposta incide na criação do Modelo de Conforto Térmico: Utilizador e, em parte, numa primeira versão do Modelo de Conforto Térmico: Monitorização. Para além disso, o sistema de monitorização e controlo de energia e conforto será desenvolvido e validado numa sala de teste do Solar XXI, um nZEB (*nearly Zero Energy Building*) pertencente ao LNEG, de modo a otimizar a eficiência energética da sala mantendo o conforto dos utentes.

CASO DE ESTUDO

Este capítulo começa por incidir na estrutura, arquitetura e desempenho geral da *Test Room 2* (TR2), que será a sala de teste do sistema de monitorização e controlo a implementar. Seguidamente, os sistemas de climatização e os parâmetros de conforto são descritos e explicados.

4.1 Caracterização da Instalação Alvo

O Edifício Solar XXI, Figura 4.1, inaugurado em 2006 no campus do LNEG em Lisboa, pode ser descrito como um nZEB (Gonçalves, Aelenei et al., 2012).

Desde o início, que o Solar XXI foi projetado com o intuito de ser um edifício de baixo consumo energético através da implementação de sistemas de climatização passivos de arrefecimento e aquecimento, da otimização térmica do seu envolvente, e essencialmente devido à sua arquitetura bioclimática. Para que este edifício seja bioclimático, deve responder aos estímulos do clima local, da cidade de Lisboa, de forma a minimizar as necessidades de energia térmica e elétrica. Lisboa é caracterizada pelo seu clima mediterrâneo, ameno e com uma temperatura média anual de 17°C (Andrade, 2009; Gonçalves, Cabrito e Diniz, 2010).

No piso térreo do Solar XXI existem dois gabinetes de trabalho adjacentes e idênticos que foram remodelados para servirem de salas de teste para projetos de investigação. As salas de teste situam-se na zona sul, de modo a aproveitar a insolação direta para aquecimento no inverno e ainda tirar partido do excelente nível de iluminação natural durante todo o ano.



Figura 4.1: Edifício Solar XXI. (a) Fachadas Sul - Poente; (b) Fachadas Nascente – Norte. (Retirado de Andrade, 2009).

Os sistemas de climatização e conforto das salas foram automatizados e instalaram-se sensores e atuadores de forma a que seja possível monitorizar e controlar todo o ambiente dos gabinetes em prol da maximização do conforto dos seus utilizadores e da minimização consumo energético.

Esta dissertação realizou-se especificamente na sala 1.04 do Solar XXI, denominada por TR2, que está equipada com os seguintes sistemas de climatização e conforto, ilustrados na Figura 4.2:

- 1 - Sistema de Iluminação e Estores;
- 2 - Sistema de Renovação do Ar;
- 3 - Sistema de BIPV (*Building Integrated Photovoltaic*);
- 4 - Sistema de Aquecimento;
- 5 - Sistema de Ar Arrefecido.

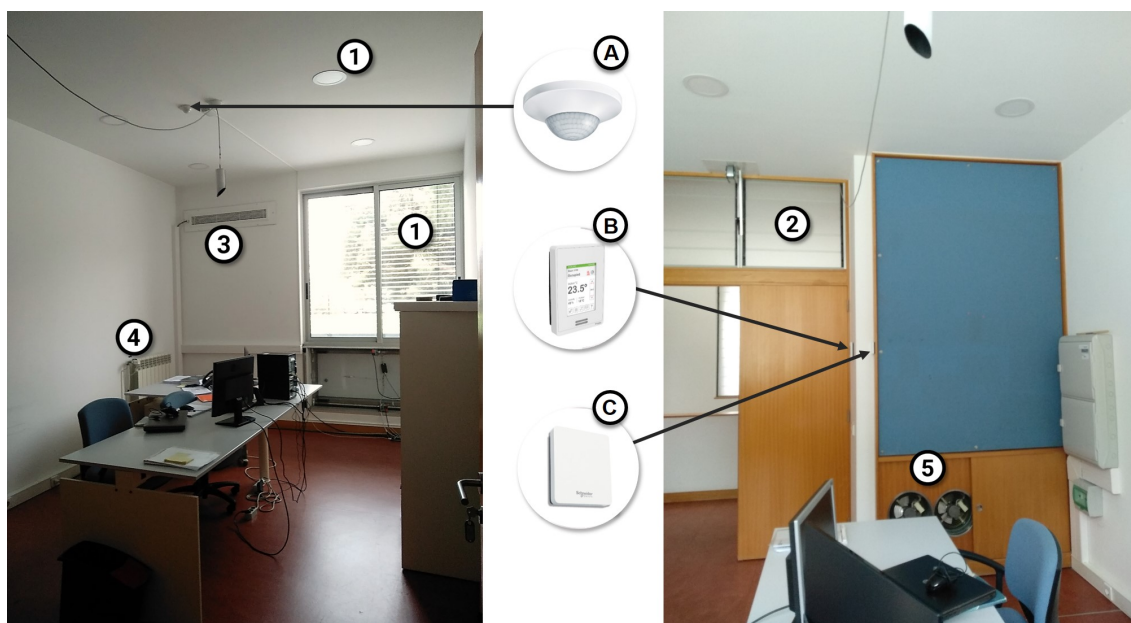


Figura 4.2: Localização dos sensores e dos sistemas de climatização e conforto da TR2. A - Sensor de Presença; B - Sensor de Temperatura e Humidade Relativa; C - Sensor de Concentração de CO₂.

4.2 Sistemas de Climatização e Parâmetros de Conforto

A generalidade dos autores acredita que a percepção de conforto de um ser humano depende de vários fatores, sendo os mais significantes a temperatura, humidade relativa, concentração de CO₂ e iluminância. Várias organizações, como por exemplo a ASHRAE ou a ISO (*International Organization for Standardization*), estabelecem valores mínimos ou intervalos de conforto para a maioria das pessoas, cerca de 80%. Estudos revelam ainda que, caso esses valores não sejam cumpridos, o nosso corpo reage ao desconforto sentido.

Temperatura Interior

O ser humano é sensível a pequenas diferenças de temperatura, o que faz com que esta componente tenha bastante relevância no conforto térmico. A ASHRAE recomenda que a temperatura interior esteja entre os 23°C e os 26°C no verão e entre os 20°C e os 23,5°C no inverno (Canadian Centre for Occupational Health & Safety, 2018).

Se a temperatura interior estiver abaixo do valor de conforto mínimo do utilizador, este pode sentir desconforto devido ao frio e até ter consequências ao nível da saúde, podendo por exemplo contrair uma gripe. Caso a temperatura interior ultrapasse o valor máximo de conforto de um indivíduo, é normal a produção de suor, aumento da desconcentração e diminuição de produtividade (Canadian Centre for Occupational Health & Safety, 2016).

Humidade Relativa

Apesar da variação de temperatura ser facilmente perceptível pelo ser humano, o mesmo não acontece com a variação da humidade relativa. A associação *Health and Safety Executive* do Reino Unido afirma que uma humidade relativa entre os 40% e os 70% não tem impacto significativo no conforto térmico. No entanto, apenas fora do intervalo de 20% a 70% de humidade relativa é que a maioria das pessoas começa a sentir algum desconforto, e como este intervalo de conforto é grande, é invulgar este não ser cumprido (Boduch e Fincher, 2009; Canadian Centre for Occupational Health & Safety, 2018).

Um valor abaixo dos 20% de humidade relativa pode causar desconforto por se sentir os olhos ou as vias respiratórias secas. Enquanto que um valor acima dos 70% torna o ar tão húmido que favorece à produção de suor e poderá levar à formação de bolor ou desenvolvimento de fungos em algumas áreas do edifício (Canadian Centre for Occupational Health & Safety, 2018).

Concentração de CO₂

Tipicamente, a concentração de CO₂ ao ar livre encontra-se entre os 300 ppm e os 500 ppm. A ASHRAE afirma que a concentração de dióxido de carbono acima de 5000 ppm representa um risco de saúde e recomenda que no interior, este parâmetro não ultrapasse a concentração de CO₂ exterior em mais de 700 ppm (ASHRAE, 2016).

Iluminância

Em termos do incumprimento dos valores mínimos de iluminância, a falta de iluminação causa dificuldades visuais para a realização precisa de certas tarefas. O valor recomendado de iluminância para escritórios é de 500 lux (Airfal, 2015; National Optical Astronomy Observatory - NOAO, 2009).

Os sistemas de climatização e conforto existentes podem ser utilizados para influenciar os parâmetros acima descritos de modo a proporcionar ao utilizador um ambiente mais confortável. Nesse sentido, a instalação de sensores e atuadores que permitem monitorizar e controlar os sistemas de climatização e conforto da sala foi necessária para permitir estudar a influência destes sistemas nos parâmetros de conforto.

4.2.1 Sistema 1 - Iluminação e Estores

O Solar XXI está equipado com estores venezianos metálicos motorizados, Figura 4.3b. Estes estores são reguláveis e orientáveis e foram colocados no exterior, o que permite um controlo mais eficiente da incidência da radiação solar e do consequente aquecimento da temperatura interior, o que é bastante importante no verão (Gonçalves, Cabrito e Diniz, 2010). O sistema de iluminação artificial serve para manter o conforto visual dos ocupantes da sala quando a iluminação natural não é suficiente.

Substituíram-se as luminárias anteriores por luminárias LED de intensidade regulável. Estas luminárias, Figura 4.3a, podem acender manualmente, utilizando o interruptor, ou podem ser configuradas para acender quando o sensor de ocupação, instalado no teto, detetar a presença do utilizador.

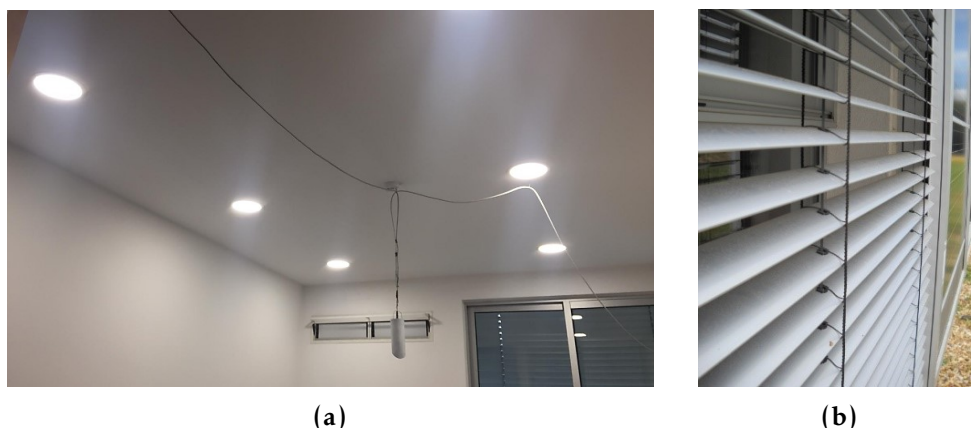


Figura 4.3: Luminárias e dispositivos de sombreamento exteriores da sala TR2 que compõe o Sistema 1 – Iluminação e Estores.

4.2.2 Sistema 2 - Renovação do ar

O sistema de renovação do ar, composto por bandeiras reguláveis, tem como objetivo melhorar os níveis de conforto interior, através da circulação do ar. Esta circulação do ar,

quando feita de maneira eficiente, favorece a diminuição da concentração de CO₂ e pode ter um impacto positivo no conforto térmico (Gonçalves, Cabrito e Diniz, 2010).

A abertura das bandeiras existentes por cima da porta, Figura 4.4, que são agora controladas por um motor, permite a renovação do ar da sala por ventilação natural. Este sistema pode ser complementado com o sistema de BIPV de forma a estabelecer uma “corrente de ar”.



Figura 4.4: Banderias reguláveis do sistema de renovação de ar da TR2.

4.2.3 Sistema 3 – BIPV

Durante o inverno, o sistema BIPV foi projetado para aproveitar o calor gerado dentro dos módulos fotovoltaicos da fachada sul e aquecer o ar da sala por ventilação natural, Figura 4.5a.

Nos meses de meia-estação pode ser utilizada uma configuração do sistema que consiste no pré-aquecimento de ar vindo do exterior, Figura 4.5b. Este ar entra por uma cavidade localizada abaixo do painel fotovoltaico, é aquecido e flui posteriormente para dentro do gabinete através do registo superior interior.

No entanto, o BIPV não foi projetado apenas com a intenção de contribuir para o melhoramento do conforto térmico. No verão, a cavidade entre a parede e os módulos fotovoltaicos pode ser ventilada para tornar a produção de energia elétrica mais eficiente. Neste sentido, deve-se abrir ambos os registos exteriores e manter os interiores fechados, de modo a arrefecer os módulos fotovoltaicos através da extração do calor produzido pelos mesmos, Figura 4.5c.

Outra funcionalidade do BIPV no verão é a remoção do ar quente do interior da sala por efeito chaminé que é possível através da abertura dos registos inferior interior e exterior superior, Figura 4.5d. Esta estratégia aliada à entrada de ar mais “frio” proveniente do lado norte do edifício, através das bandeiras existentes por cima da porta da sala, irá criar uma corrente de ar e favorecer o arrefecimento da temperatura do espaço interior (Gonçalves, Cabrito e Diniz, 2010).

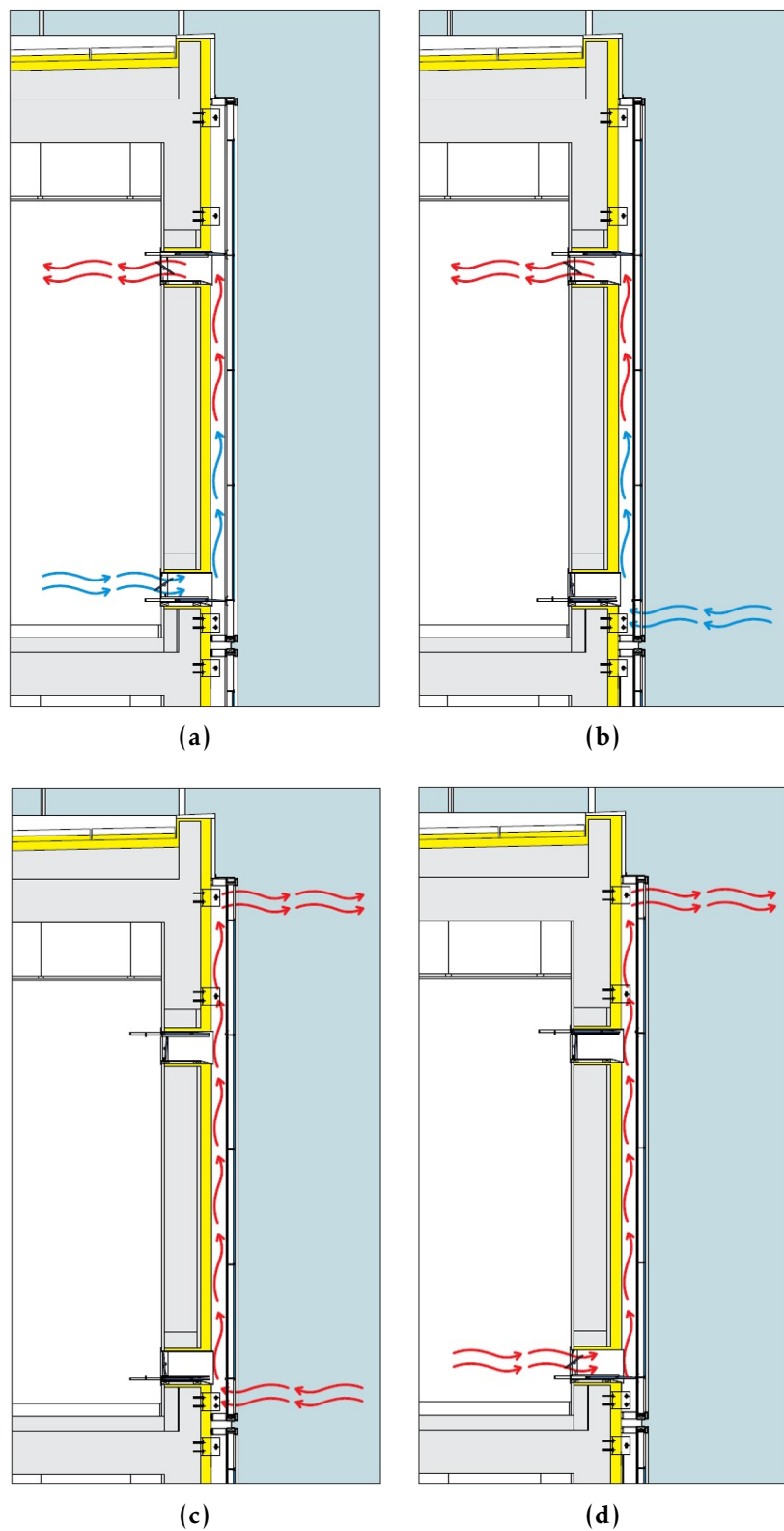


Figura 4.5: Esquema ilustrativo do funcionamento das diferentes configurações do sistema de BIPV. (a) Aquecimento do ar interior; (b) Aquecimento do ar exterior; (c) Extração de calor dos módulos fotovoltaicos; (d) Arrefecimento do ar interior por efeito chaminé. (Retirado de Gonçalves, Cabrito e Diniz, 2010).

O controlo das aberturas interiores e exteriores do sistema BIPV, Figura 4.6, foi automatizado com a introdução de motores e registos. Para monitorizar o funcionamento do sistema instalaram-se sensores de temperatura em cada registo e um anemómetro na cavidade de ar existente entre a fachada do edifício e o módulo fotovoltaico. Instalou-se também um ventilador que, quando ligado, permite insuflar o ar para dentro da sala a uma maior velocidade.

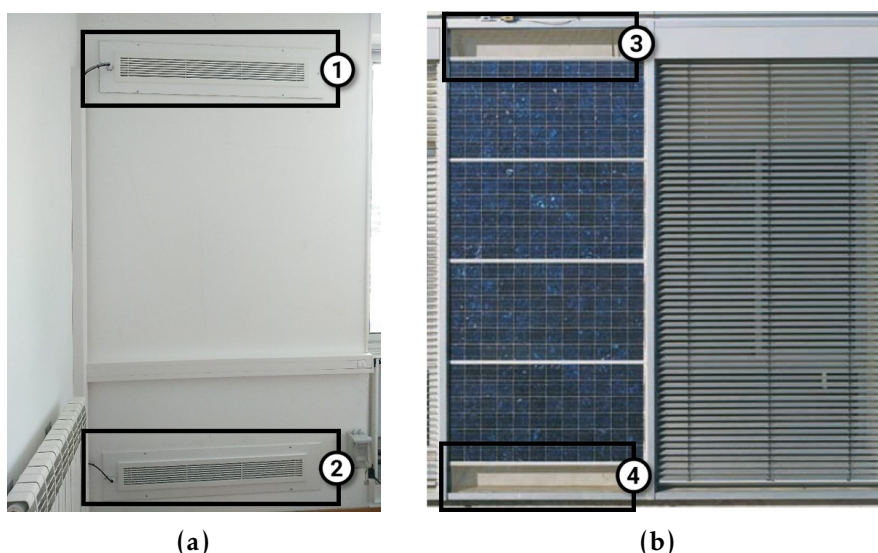


Figura 4.6: Vista exterior e interior do sistema BIPV implementado por trás dos módulos fotovoltaicos na fachada sul do Solar XXI. 1 - Registo superior interior; 2 - Registo inferior interior; 3 - Registo superior exterior; 4 - Registo inferior exterior.

4.2.4 Sistema 4 – Aquecimento

O sistema de aquecimento central é alimentado por um conjunto de coletores solares instalados no telhado do edifício, Figura 4.7a, e assistido por uma caldeira a gás natural, Figura 5.16a, quando a energia solar produzida não é suficiente. Na TR2, este sistema é composto por um radiador controlado automaticamente devido à instalação de uma válvula motorizada, Figura 4.10c (Gonçalves, Cabrito e Diniz, 2010; Salgueiro, 2011).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.7: Componentes do sistema de aquecimento central. (a) Módulos fotovoltaicos situados no telhado do edifício Solar XXI; (b) Caldeira a gás natural; (c) Radiador da sala 1.04. (Retirado de Gonçalves, Cabrito e Diniz, 2010; Salgueiro, 2011).

Foram instalados sensores que indicam a temperatura da água à entrada e à saída do radiador e ainda um sensor de caudal ultrassónico que mede o volume de água utilizada para alimentar o sistema de aquecimento radiador por hora.

4.2.5 Sistema 5 - Ar arrefecido

O sistema de ar arrefecido, Figura 4.8, permite extrair ar do exterior através de um poço, Figura 4.9a. O ar é transportado por tubos de cimento enterrados, que funcionam como permutadores de calor, e posteriormente insuflado para dentro da sala. Apesar da temperatura máxima exterior no verão rondar os 26°C, a temperatura do solo situa-se entre os 14°C e os 18°C, o que favorece o arrefecimento do ar extraído e o consequente arrefecimento da temperatura do ar no interior do gabinete.

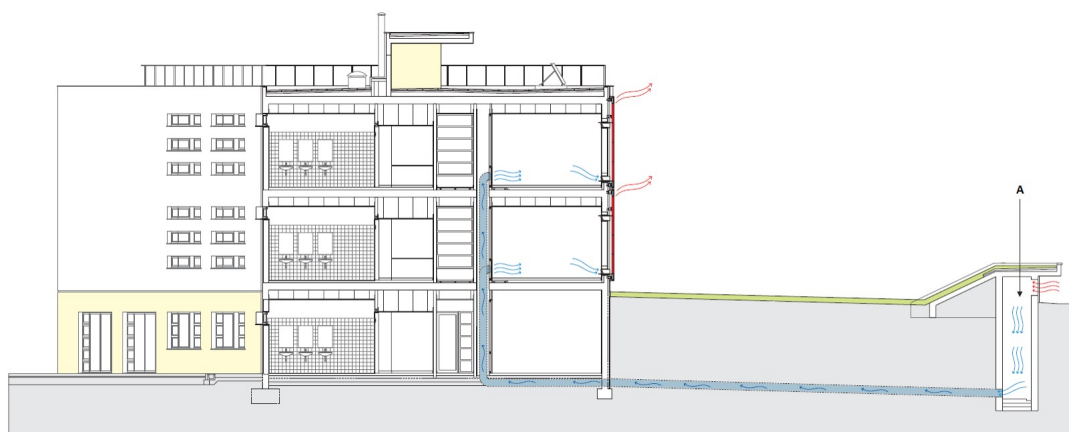


Figura 4.8: Representação do funcionamento do sistema de arrefecimento por tubos enterrados. A - poço de admissão de ar. (Adaptado de Gonçalves e Cabrito, 2005).

O sistema de ar arrefecido é considerado um sistema de climatização passivo caso não se utilize os ventiladores para insuflar o ar, pois não consome energia. Este sistema pode ainda ser complementado com o sistema de BIPV para extrair o ar quente da sala e assim arrefecer a temperatura interior com maior eficiência (Gonçalves, Cabrito e Diniz, 2010; Salgueiro, 2011).

Para otimizar o sistema de ar arrefecido instalaram-se no subsolo registos que permitem abrir e fechar a passagem de ar pelos tubos, e um sensor que indica a temperatura do ar no interior dos tubos. Os ventiladores existentes foram substituídas por ventiladores novos com velocidade variável, Figura 4.9b. O dispositivo que permite variar a velocidade dos ventiladores foi também instalado.



(a)



(b)

Figura 4.9: Sistema de arrefecimento de ar por tubos enterrados. (a) Poço de admissão de ar situado a sul do Solar XXI; (b) Ventiladores situados nos gabinetes. (Retirado de Gonçalves e Cabrito, 2005).

ARQUITETURA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO E CONTROLO

Para se poder vir a estudar o conforto do utilizador da TR2 e o efeito dos vários subsistemas da sala nesse conforto e no seu desempenho energético, foram instalados diversos dispositivos. Para além de sensores e atuadores foi colocado um autómato programável que permite controlar os sistemas de climatização. No subcapítulo 5.1, é descrita a arquitetura do sistema de monitorização e são apresentados alguns dados recolhidos. No subcapítulo 5.2, é abordado e explicado o algoritmo criado. Por fim, no subcapítulo 5.3, analisou-se o desempenho do algoritmo desenvolvido nos cenários de Verão e Inverno.

5.1 Equipamentos Instalados

Após a instalação dos equipamentos, seguiu-se a monitorização não só dos parâmetros de conforto da sala, mas também do comportamento dos sistemas de climatização na resposta a diferentes situações climáticas.

Os dados recolhidos e demonstrados nesta dissertação correspondem a um período de monitorização de cerca de 3 meses entre setembro e dezembro. Os valores são registados a cada 15 minutos, mas apresentados no formato de média horária.

Controlador Lógico Programável

O modelo do autómato a programar é o TM241CE24T que se encontra na Figura 5.1. Este aparelho foi mencionado no capítulo 2, e foi programado utilizando o software SoMachine que está descrito também nesse mesmo capítulo (Schneider Electric, 2019b).

CAPÍTULO 5. ARQUITETURA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO E CONTROLO

O PLC utilizado neste projeto é da linha de produtos Modicon M241 da Schneider Electric e possui 14 entradas digitais, das quais 8 são entradas rápidas, e 10 saídas digitais, sendo 6 saídas digitais rápidas. Acrescentou-se um módulo de expansão de 4 saídas analógicas TM3AQ4 e ainda 3 módulos TM3TI4 que possuem 4 entradas analógicas cada. Nem todas as entradas e saídas, tanto do autómato como dos módulos de expansão, foram aproveitadas. Este PLC contém uma porta de comunicação Ethernet que servirá para ligar a um computador através do qual será programado o autómato para atuar sobre os sistemas de climatização da sala TR2.

Foram instalados vários sensores que permitem a recolha de parâmetros ambientais em tempo real, relevantes para determinar onde, quando e como o sistema deve atuar para manter o conforto térmico do ocupante da sala.



Figura 5.1: Controlador lógico programável, TM241CE24T, instalado na *Test Room 2*. (Retirado de Schneider Electric, 2019b).

Interface Homem-Máquina, Sensor de Temperatura e Humidade Relativa

Este produto da Schneider Electric que consiste numa *Human-Machine Interface* (HMI), como demonstra a Figura 5.2, utiliza o protocolo de comunicação Modbus para comunicar com o autómato.



Figura 5.2: Interface Homem-Máquina instalada na *Test Room 2* que permite estabelecer os *setpoints* dos sistemas de arrefecimento e aquecimento. Funciona também como sensor de temperatura e humidade relativa. (Retirado de Schneider Electric, 2020b).

Das várias funcionalidades deste dispositivo destacam-se a medição da temperatura e humidade relativa, o controlo dos sistemas de AVAC e ainda a possibilidade de o utilizador estabelecer *setpoints*, programando assim o sistema a atuar automaticamente assim que esses valores estabelecidos são atingidos (Schneider Electric, 2020b).

Sensor de Presença

O sensor de presença, demonstrado na Figura 5.3, instalado no teto da sala é o MTN5510-1419 ARGUS Presence e foi configurado para acender a luz sempre que detetar a presença de uma pessoa, sendo que a luz desliga cerca de 40 segundos depois de deixar de detetar a presença de alguém. O sensor comunica com o autómato através do protocolo de comunicação Zigbee (Schneider Electric, 2020a).



Figura 5.3: Sensor de presença, MTN5510-1419 ARGUS Presence, instalado na *Test Room 2*. (Retirado de Schneider Electric, 2020a).

Sensor de CO₂

O dispositivo, representado na Figura 5.4, deteta a quantidade de dióxido de carbono existente na sala em ppm e utiliza o protocolo de comunicação Zigbee. Apesar de apenas esta funcionalidade estar ativa neste sistema, o sensor também pode medir a temperatura em graus Celsius e a humidade relativa em percentagem (Schneider Electric, 2020c).



Figura 5.4: Sensor instalado na *Test Room 2*, que indica de concentração CO₂. (Retirado de Schneider Electric, 2020c).

Piranómetro

O piranómetro corresponde ao modelo PR5334A da empresa PR electronics, Figura 5.5, que mede a radiação solar incidente numa superfície plana em W/m^2 . Neste projeto o piranómetro foi instalado na fachada sul do edifício ao lado do painel fotovoltaico da TR2.



Figura 5.5: Sensor instalado no exterior da *Test Room 2*, que mede a radiação solar incidente na fachada.

Medidor de Energia

Para monitorizar o desempenho da sala a nível energético, foi instalado um dispositivo que mede o consumo energético dos sistemas de iluminação e tomadas da TR2. O aparelho instalado corresponde ao modelo A9MEM3155 produzido pela Schneider Electric, Figura 5.6.



Figura 5.6: Medidor de energia instalado na *Test Room 2*, que mede o consumo energético dos sistemas de iluminação e tomadas. (Retirado de Schneider Electric, 2019a).

BIPV – Anemómetro

O anemómetro é um dispositivo utilizado para medir a velocidade de um fluído em m/s, neste caso o ar, dentro da cavidade do sistema BIPV existente entre a fachada do edifício e o painel fotovoltaico. O anemómetro instalado é o modelo HD29371TO3 produzido pela Delta OHM, Figura 5.7.



Figura 5.7: Sensor instalado no sistema BIPV da *Test Room 2*, para medir a velocidade do ar. (Retirado de Delta OHM, s.d.).

BIPV – Sonda de Temperatura

No sistema BIPV foram instaladas 2 sondas de temperatura PT100 idênticas, uma em cada registo, por forma a registar a temperatura do ar nesses locais. A referência do sensor utilizado é 923736, ilustrado na Figura 5.8.



Figura 5.8: Sensor de temperatura instalado em cada registo do sistema BIPV da *Test Room 2*.

BIPV – Registo

Foram instalados 2 registos no sistema BIPV que podem ser controlados eletronicamente. Quando o utilizador abre um registo interior, ao mesmo tempo fecha a passagem de ar para o exterior e vice-versa. Os registos correspondem ao modelo LF24-SR da Schneider Electric, Figura 5.9.



Figura 5.9: Registos instalados que permitem a automatização do sistema BIPV e do sistema de ar arrefecido da *Test Room 2*. (Retirado de Schneider Electric, 2010a).

BIPV – Ventilador

No sistema BIPV foi também instalado um ventilador, que quando ligado insufla o ar da cavidade para dentro da sala pelo registo superior interior a uma maior velocidade. O modelo do ventilador instalado é o ME80202V1-000U-G99 da empresa SUNON, Figura 5.10.



Figura 5.10: Ventilador instalado no sistema BIPV da *Test Room 2*.

Aquecimento - Sonda de contacto para radiadores

Para medir a temperatura da água à entrada e à saída do radiador utilizam-se dois sensores de temperatura PT100 instalados nesses mesmos locais, Figura 5.11. A referência dos sensores instalados é a 0625 0516-100 fabricado pela empresa B+B Sensors.



Figura 5.11: Sensor de temperatura instalado no sistema de aquecimento por radiador da *Test Room 2*. (Retirado de B+B Sensors, s.d.).

Aquecimento - Sensor de Caudal

No sistema de aquecimento por radiador foi também instalado um caudalímetro eletrónico que mede a quantidade de água que passa para o radiador em m^3/h . O sensor instalado, Figura 5.12, corresponde ao modelo SEM-HZ21WB fabricado pela SAIER.



Figura 5.12: Sensor de caudal instalado no sistema de aquecimento por radiador da *Test Room* 2. (Retirado de Saier, s.d.).

Aquecimento - Válvula para radiador

De modo a possibilitar a automatização deste sistema foi substituída a válvula existente por uma válvula eletrónica. A válvula instalada, Figura 5.13, permite a passagem de água para o radiador quando aberta. Este equipamento é produzido pela Schneider Electric e corresponde ao modelo MR95.



Figura 5.13: Válvula que permite a automatização do sistema de aquecimento por radiador da *Test Room* 2. (Retirado de Schneider Electric, 2016).

Ar Arrefecido – Sonda de Temperatura

No sistema de ar arrefecido por tubos enterrados instalou-se um sensor de temperatura PT100 à prova de água que regista a temperatura do ar dentro dos tubos no subsolo. A referência da sonda de temperatura instalada, Figura 5.14, é a WZP-PT100.



Figura 5.14: Sensor de temperatura instalado no sistema de ar arrefecido por tubos enterrados da *TR2*.

Ar Arrefecido – Registos

Por forma a controlar a passagem de ar nos tubos enterrados, foram instalados também no subsolo 2 registos eletrónicos LF24-SR da Schneider Electric, Figura 5.9.

Ar Arrefecido - Inversor de Frequência

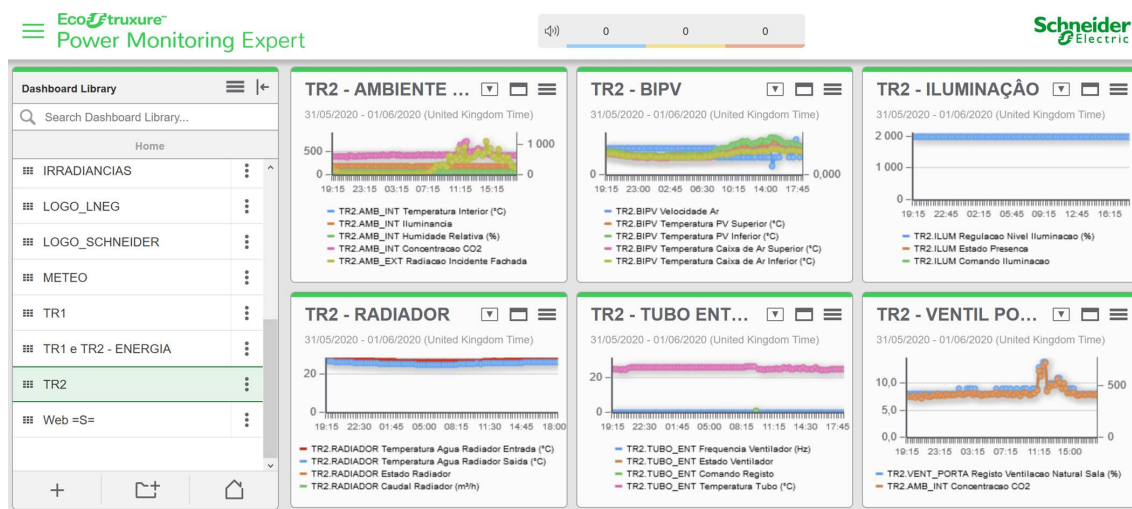
Este dispositivo, ATV12H018M2, representado na Figura 5.15, é utilizado no sistema de arrefecimento de tubos enterrados e funciona como um variador de velocidade dos ventiladores à saída desse sistema, podendo aumentar ou diminuir o fluxo de ar (Schneider Electric, 2015).



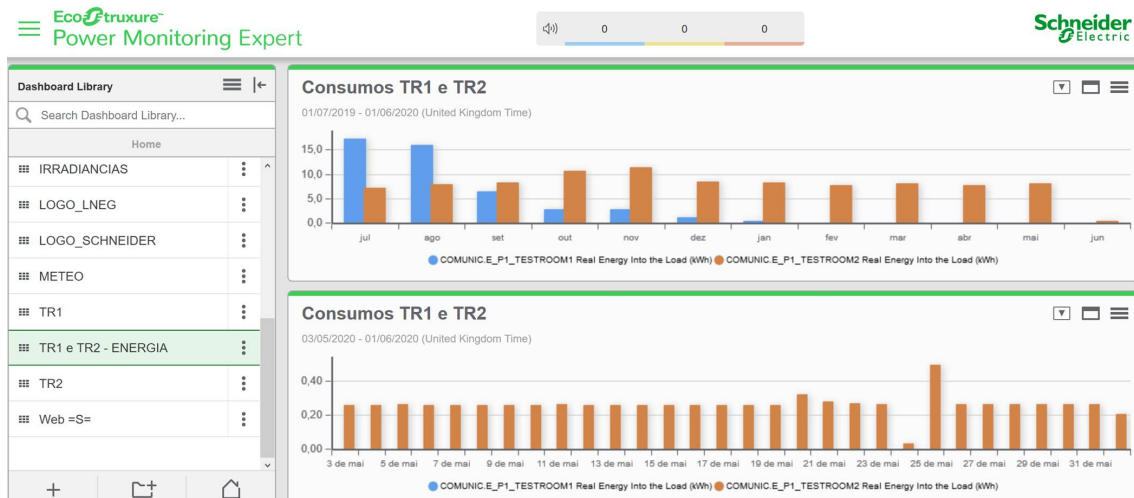
Figura 5.15: Dispositivo que permite variar a velocidade dos ventiladores do sistema de arrefecimento por tubos enterrados da *Test Room 2*. (Retirado de Schneider Electric, 2015).

5.2 Monitorização

A plataforma EcoStruxure Power Monitoring Expert da Schneider, apresentada na Figura 5.16, trata e disponibiliza graficamente os dados medidos pelos sensores em tempo real. Os valores registados são também guardados numa base de dados e podem depois ser analisados para que se possam tomar decisões conscientes e estruturadas para tornar o gabinete mais confortável e energeticamente mais eficiente.



(a)



(b)

Figura 5.16: Ilustração da monitorização dos sistemas de climatização, do ambiente e do consumo energético da TR2 na plataforma PME.

Como se pode observar na figura anterior, cada sistema de climatização e conforto tem uma espécie de separador onde estão representados em gráficos temporais os parâmetros desse sistema, sejam eles medições de sensores ou registos de utilização de atuadores.

Durante o período de monitorização desta dissertação o projeto de remodelação da TR2 encontrava-se ainda numa fase preliminar. Assim, não existem dados de todos os sensores referentes a esse período. Contudo, nas Figuras 5.17 e 5.18 pode-se observar alguns exemplos de gráficos de parâmetros medidos dos sistemas de climatização da TR2, nomeadamente os sistemas de BIPV e de aquecimento por radiador.

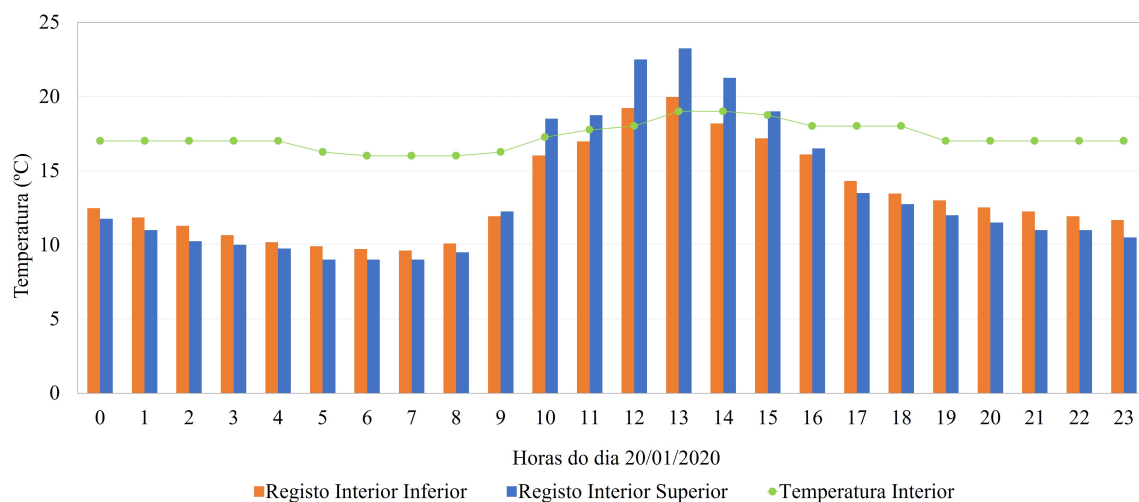


Figura 5.17: Temperatura dos registos do sistema BIPV, na configuração de aquecimento do ar interior, no dia 20 de janeiro de 2019.

CAPÍTULO 5. ARQUITETURA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO E CONTROLO

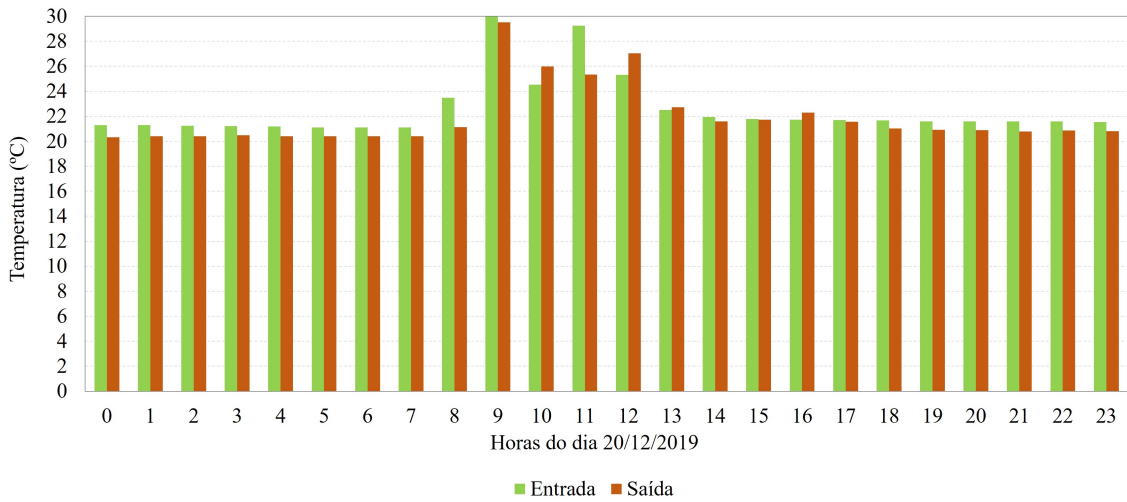


Figura 5.18: Temperatura da água à entrada e à saída do sistema de aquecimento por radiador no dia 20 de dezembro de 2019.

Por forma a melhor entender o comportamento térmico da TR2 e perceber até que ponto a temperatura exterior pode ou não influenciar a temperatura interior, realizou-se um estudo comparativo das variâncias das temperaturas interior e exterior. Este estudo, apresentado nas Figuras 5.19, 5.20 e 5.21, foi feito separadamente para dias em que o algoritmo de controlo estava a ativo e para dias em que não estava. Os dias em que o algoritmo foi utilizado coincidem com dias em que a sala estava ocupada, contrariamente aos dias em que o algoritmo não estava operacional.

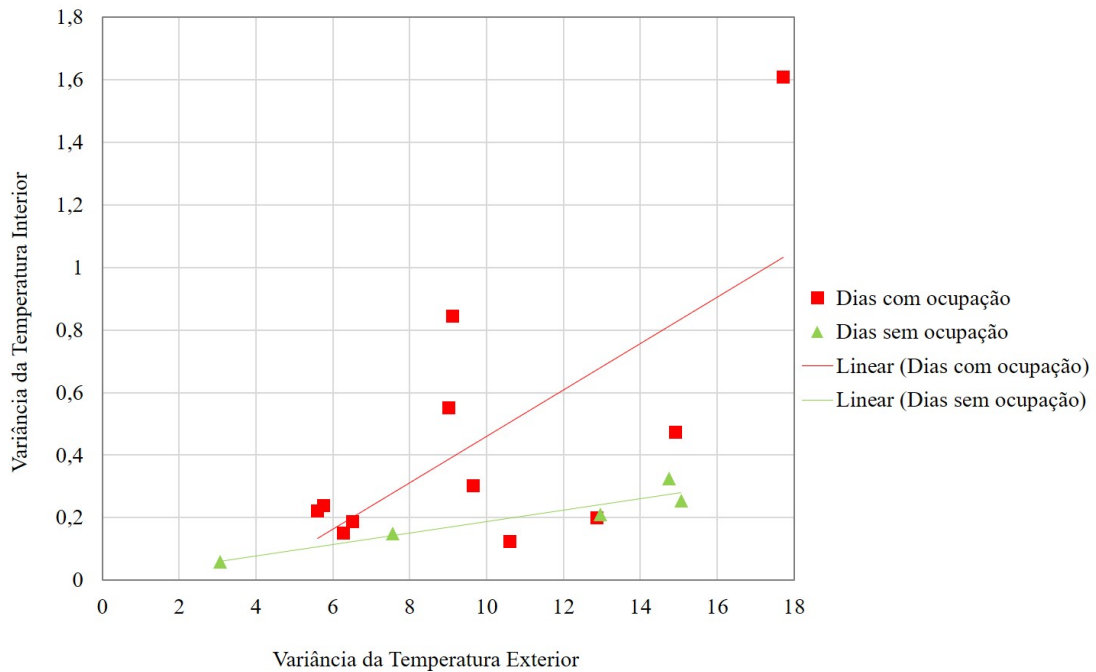


Figura 5.19: Variâncias das temperaturas interior e exterior de 15 a 30 de Setembro.

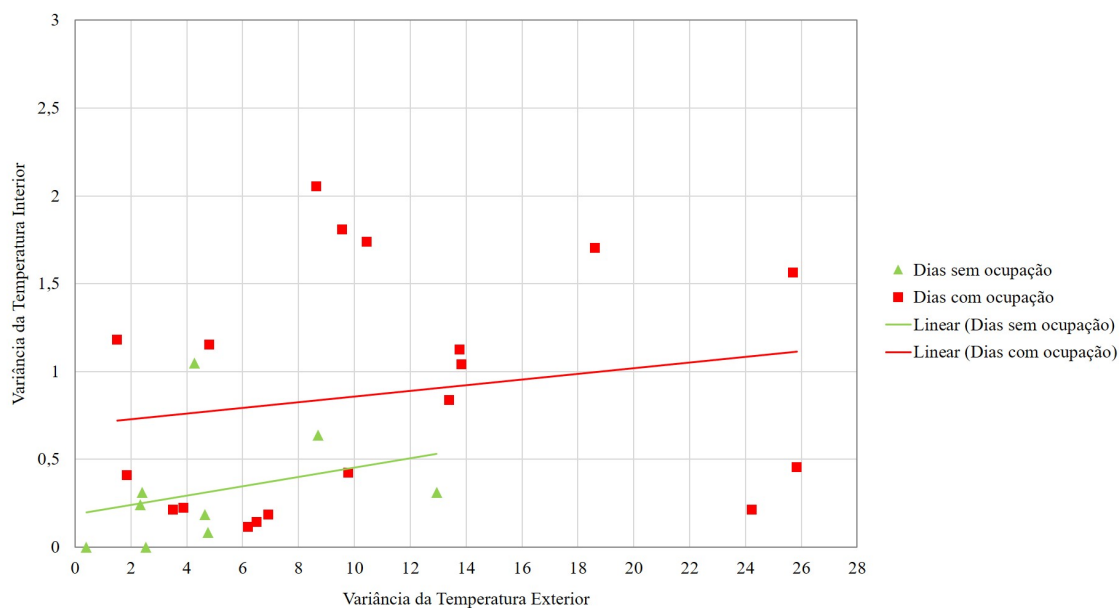


Figura 5.20: Variâncias das temperaturas interior e exterior do mês de outubro.

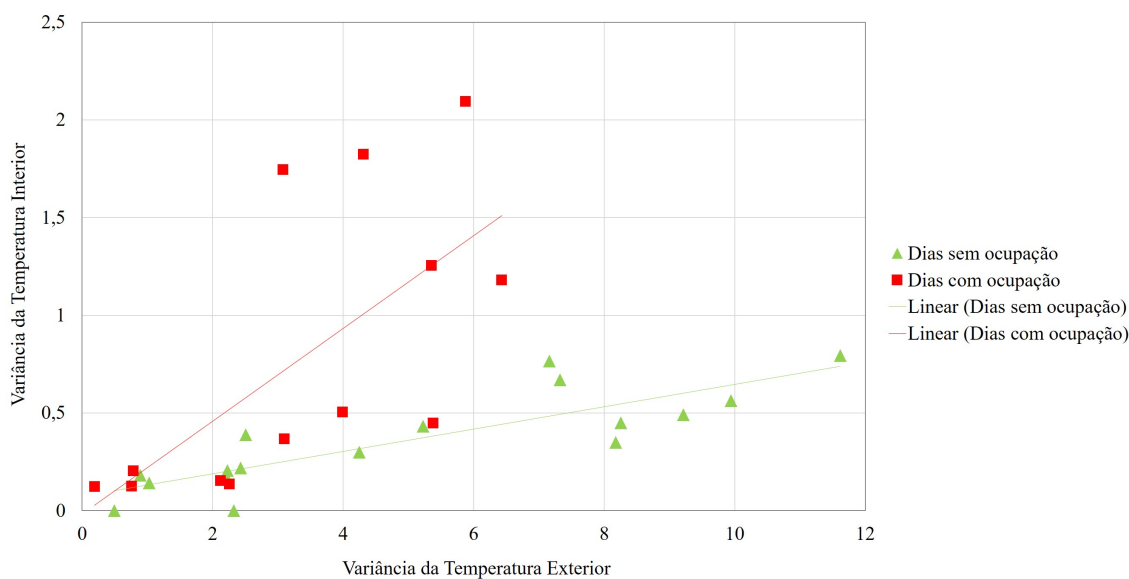


Figura 5.21: Variâncias das temperaturas interior e exterior do mês de dezembro.

Apesar de a amostra de dados existente ser escassa e de não se poderem tirar conclusões com certeza, pode-se observar que a variância da temperatura interior tende a ser superior quando há presença do utilizador. Isto pode ser uma consequência do aumento das cargas térmicas da sala quando esta está ocupada. No entanto, o mesmo não se verificou no mês de outubro, o que poderá querer dizer que o aumento das cargas térmicas foi bem contrariado com estratégias de climatização.

5.3 Controlo

Mesmo sem o processo de remodelação da TR2 ter terminado, procedeu-se ao desenvolvimento do algoritmo de controlo. Decidiu-se dividir o algoritmo de controlo em dois cenários: Inverno e Verão. Esta decisão teve por base o facto destas épocas, no geral, serem extremos opostos no que toca aos valores de alguns parâmetros de conforto, como é o caso da temperatura, da humidade relativa, entre outros. No verão, por exemplo, o calor pode ser desconfortável, enquanto que no inverno o desconforto é normalmente causado pelas baixas temperaturas.

Para além de depender da estação do ano, o sistema de controlo atua de diferente modo para o dia e para a noite, e depende ainda da presença do utilizador. O algoritmo implementado prioriza ainda o uso de sistemas passivos, que não consomem energia, em prol da minimização do consumo energético.

Dos parâmetros interiores monitorizados que afetam o conforto do utilizador, existem apenas 3 que se consegue influenciar diretamente através dos sistemas de climatização instalados na TR2, sendo eles a iluminância, a temperatura interior e a concentração de CO₂. Este último, uma vez que não está dependente da estação do ano ou da hora do dia, foi inserido nos dois cenários, verão e inverno de igual modo. Assim, os *setpoints* definidos para os parâmetros de conforto são os seguintes:

- Temperatura mínima no inverno – 20°C;
- Temperatura máxima no verão – 25°C;
- Concentração de CO₂ máxima – 600ppm;
- Iluminância mínima – 300lux.

Em relação à humidade relativa, apesar de monitorizada, não vai ser controlada por um algoritmo. Isto porque, para além de não existir nenhum sistema de climatização que a influencie diretamente, este parâmetro raramente se encontra fora do seu intervalo de conforto (20% a 70%). De notar que, apesar do sensor de iluminância ainda não estar devidamente instalado, foi na mesma desenvolvido um algoritmo para melhorar o nível de iluminação da TR2.

Nas figuras 5.22 e 5.23 pode-se observar que estes cenários foram programados em duas linguagens diferentes, *Ladder* e *Function Block Diagram*.

5.3.1 Inverno

Na sua generalidade, pode descrever-se a época de inverno em Portugal, e particularmente em Lisboa, como um clima frio, húmido, ventoso, com menor incidência de radiação solar e com dias mais curtos. Todas essas características desta estação do ano causam um impacto no clima interior do edifício e conseqüentemente no conforto dos seus ocupantes.

É natural os utilizadores sentirem desconforto, seja porque a temperatura do ar interior está demasiado baixa ou porque não há iluminância suficiente para realizarem o seu

trabalho. É possível contrariar essas sensações de desconforto, controlando os sistemas de climatização da sala.

As soluções implementadas no algoritmo para manter a temperatura do ar interior nos níveis de conforto definidos pelo utilizador baseiam-se na atuação do sistema de recuperação de calor por BIPV e do sistema de aquecimento por radiador.

O algoritmo desenvolvido, Figura 5.22, verifica o mês atual e caso esse mês corresponda ao período de inverno, definido neste caso entre os meses de outubro a abril, passa ao estado seguinte onde verifica se a temperatura interior é inferior a 20°C e se a sala está ocupada.

Se a temperatura da TR2 for inferior a 17°C, mas a temperatura de um dos registos interiores do sistema de BIPV for igual ou superior a 20°C, então abrir-se-ão ambos os registos interiores e ligar-se-á o ventilador para aquecer a sala. Isto acontece, porque como a temperatura está muito abaixo do valor mínimo de conforto é necessário aquecer rapidamente a sala, daí utilizar-se o ventilador que torna o sistema BIPV um sistema ativo. Passados 30 minutos, se a temperatura interior se mantiver abaixo dos 17°C, ligar-se-á o radiador que é também um sistema ativo, mas como consome mais energia, apenas é utilizado em último recurso.

No caso da temperatura da sala se encontrar entre os 17°C e os 20°, se a temperatura de um dos registos interiores do sistema de BIPV for igual ou superior a 20°C, abrir-se-ão mais uma vez ambos os registos, mas desta vez não se irá ligar ventilador. Assim, através de convecção natural é possível aumentar a temperatura do ar interior até aos 20°C, valor mínimo de conforto estabelecido, apenas utilizando o sistema BIPV no modo passivo. Uma outra regra dita ainda que, se a temperatura do ar da sala e a temperatura de ambos os registos interiores do BIPV forem inferiores a 20°C, é ligado imediatamente o radiador, pois não será possível utilizar o sistema de BIPV para aquecer o ar da sala.

O algoritmo que controla a iluminância verifica também se é inverno e caso seja, confirma se passa das 17:00h, inclusive, e se a iluminância medida pelo sensor é igual ou inferior a 300 lux. No caso de ambas as afirmações estarem corretas, o controlador fecha os estores e acende a luz se o sensor de ocupação detetar alguém. No caso de uma ou ambas as afirmações estarem erradas, abre-se os estores e espera-se 65 segundos antes de se verificar outra vez se a iluminância medida é superior a 300 lux. Se assim for o ciclo recomeça, caso contrário fecha-se os estores e acende-se a luz. Assim, o algoritmo cobre as hipóteses de não haver iluminância suficiente para o utilizador por ter anoitecido ou pelo clima estar nublado.

O algoritmo de controlo da concentração de dióxido de carbono funciona da seguinte forma: se a concentração de CO₂ for inferior a 400 ppm, é fechado o registo de renovação do ar existente por cima da porta da sala e recomeça o ciclo. Se for superior a 900 ppm, ligar-se-á o ventilador do sistema de ar arrefecido por tubos enterrados, mas no caso da concentração de CO₂ estar situada entre os 600 e 900 ppm, abrir-se-ão apenas o registo de renovação de ar. Este funcionamento indica que, caso a concentração de dióxido de carbono seja inferior a 600 ppm, este parâmetro encontra-se dentro dos níveis de conforto.

Se estiver entre os 600 e os 900 ppm, utilizar-se-á um sistema passivo para baixar os níveis da concentração de CO₂, mas no caso em que o valor deste parâmetro ultrapassa os 900 ppm, então é necessário ligar um sistema ativo.

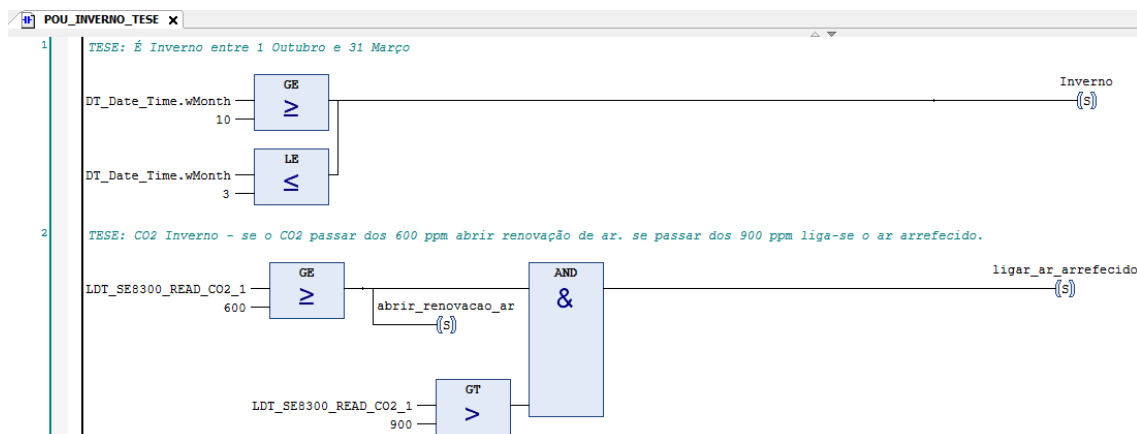


Figura 5.22: Excerto do algoritmo, programado em *Ladder*, relativo ao cenário de inverno.

5.3.2 Verão

Contrariamente ao inverno, o clima no verão é mais seco, quente, há uma maior incidência da radiação solar, os dias são mais longos e normalmente é uma altura do ano menos ventosa. Com o verão vem o calor e as temperaturas altas que consequentemente aquecem o interior dos edifícios. O Solar XXI está dotado de sistemas de climatização para combater o desconforto causado pelo aumento da temperatura interior.

O algoritmo de controlo implementado, Figura 5.23, começa por averiguar se a sala está ocupada, se não estiver, o sistema de ar arrefecido por tubos enterrados é desligado e o ciclo recomeça. No entanto, se for detetada a presença do utilizador, abrir-se-ão simultaneamente o registo de renovação de ar situado por cima da porta e o registo inferior interior do sistema de BIPV caso a temperatura interior seja superior a 25°C. Este passo permitirá o arrefecimento da temperatura interior por convecção natural, através do efeito de chaminé, utilizando apenas sistemas de climatização passivos.

No caso de a temperatura interior exceder os 28°C, possivelmente a atuação dos sistemas passivos não será suficiente para arrefecer a sala até uma temperatura confortável para o ocupante da mesma. Nesta situação, entra em ação o sistema de ar arrefecido pelos tubos enterrados, sendo este considerado um sistema ativo.

O controlo da iluminância no verão funciona de um modo semelhante ao seu correspondente no inverno. A única diferença implementada é que, como anoitece mais tarde no Verão, no início do ciclo verifica-se se já passa das 19:00h e não das 17:00h.

A concentração de CO₂ é controlada de igual modo para o inverno e para o verão.

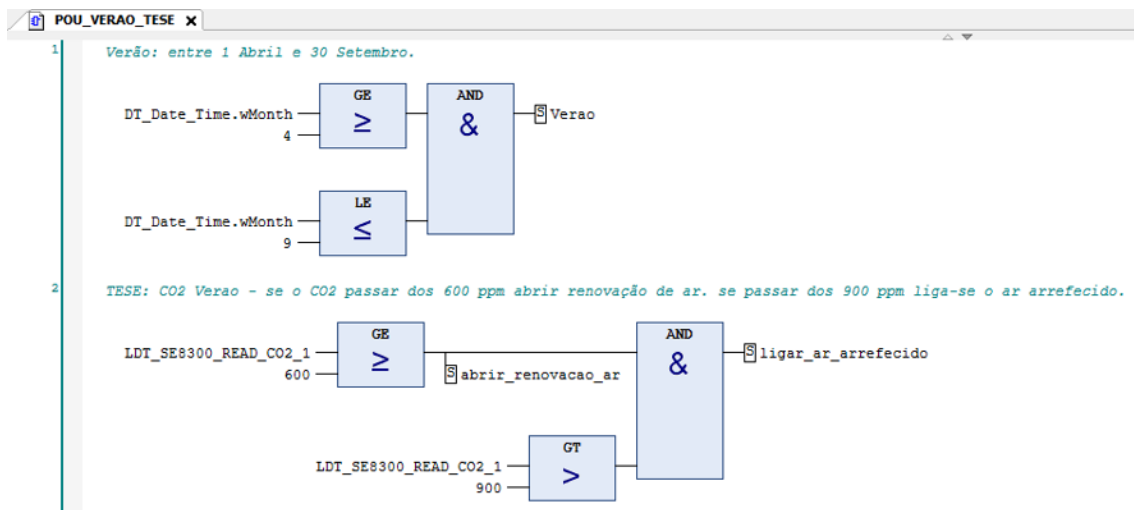


Figura 5.23: Excerto do algoritmo, programado em *Function Block Diagram*, relativo ao cenário de verão.

Enquanto que o algoritmo do sistema de controlo e monitorização foi dividido em 2 cenários, os fluxogramas representativos foram desenhados para cada parâmetro de conforto individual que seja possível de controlar através dos sistemas de climatização. Achou-se que seria mais simples de entender e desenhar desta forma do que fazer um fluxograma para cada estação do ano. Pois, cada um deles teria de conter todos os sistemas de climatização a atuar e os parâmetros de conforto controlados pelos mesmos.

O funcionamento do controlo da temperatura interior, da iluminância e da concentração de CO₂, descritos acima, encontram-se retratados respetivamente na Figura 5.24, 5.25 e 5.26 e são comuns para as estações de inverno e verão.

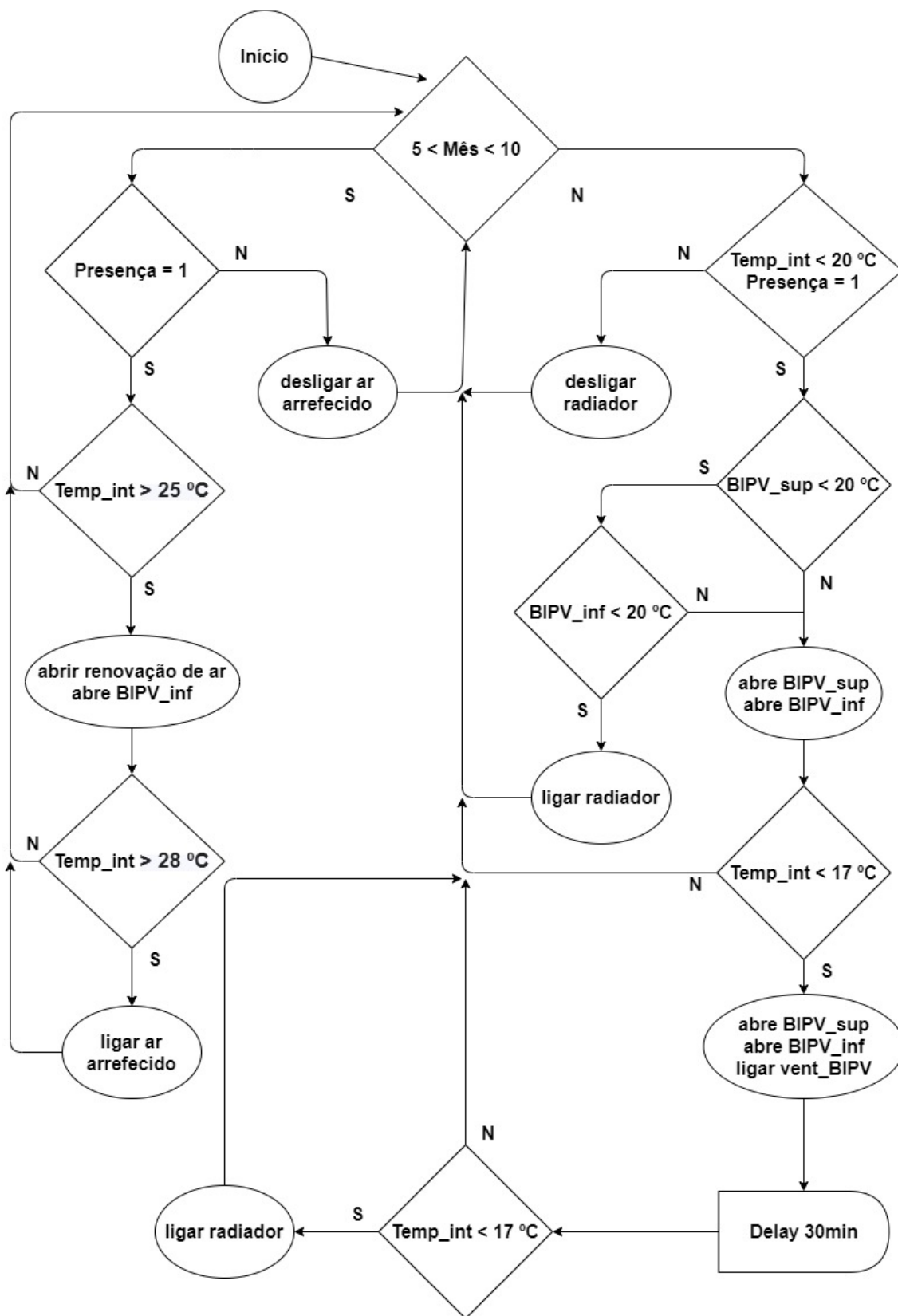


Figura 5.24: Fluxograma do esquema de funcionamento do controlo da temperatura interior.

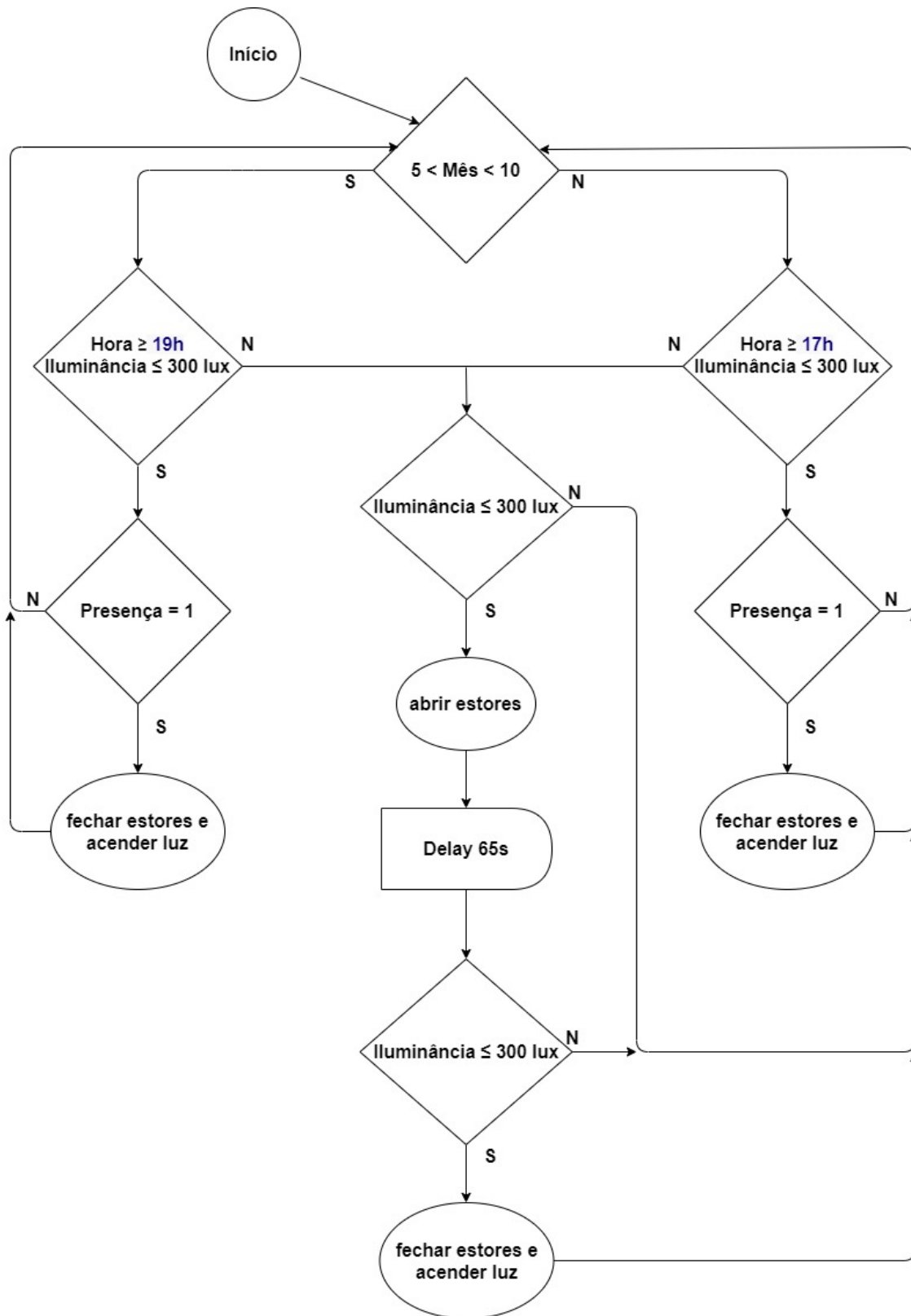


Figura 5.25: Fluxograma do esquema de funcionamento do controlo de iluminância.

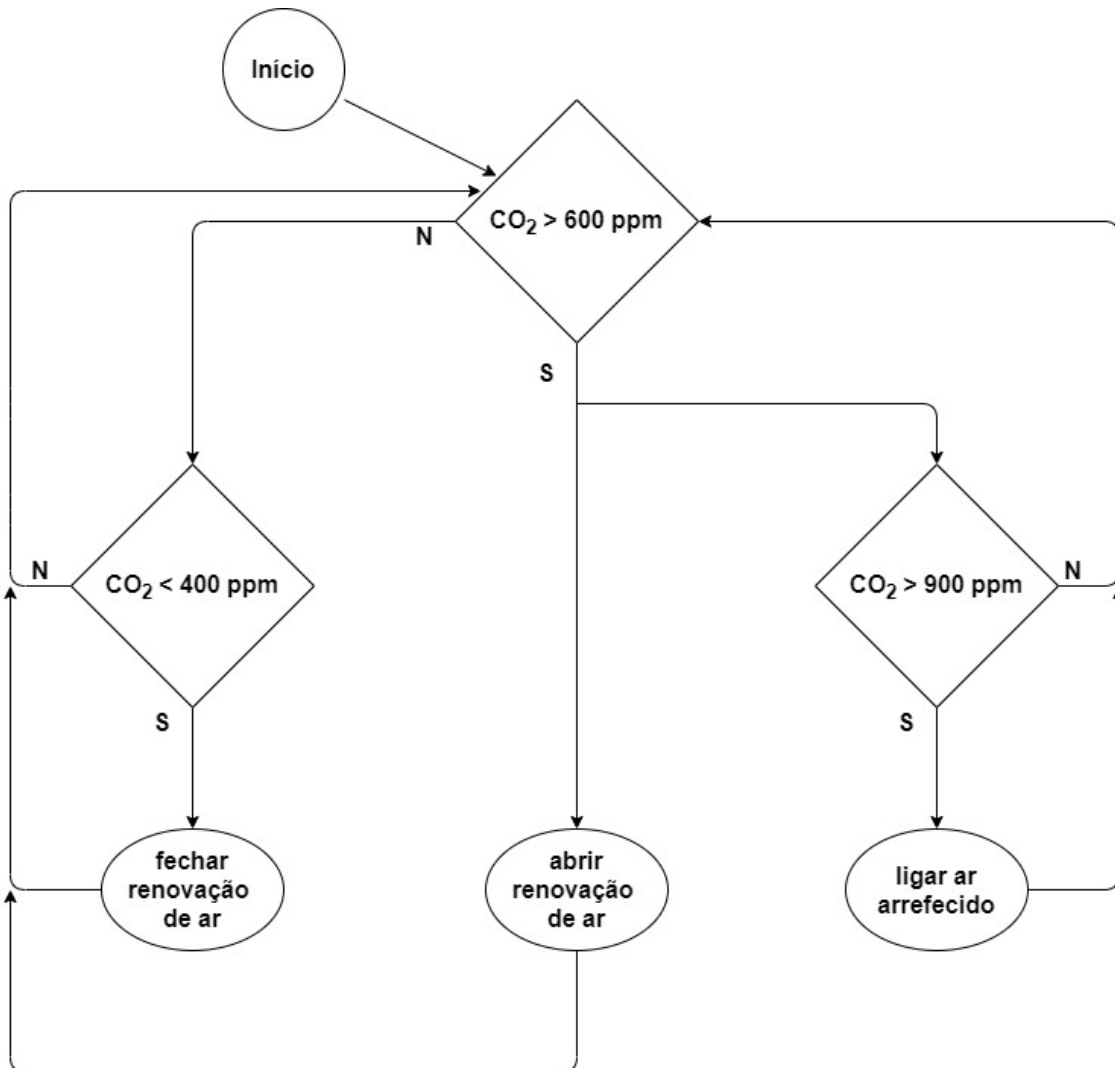


Figura 5.26: Fluxograma do esquema de funcionamento do controlo da concentração de dióxido de carbono.

5.4 Análise de Cenários

Para perceber de que forma as estratégias de aquecimento e arrefecimento influenciam ambientes fechados foram analisadas várias condições de utilização dos sistemas energéticos, na TR2 do Solar XXI. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos de seguida. A análise realizada considera os valores da medição da temperatura interior e exterior, da concentração de dióxido de carbono, da ocupação da sala, e ainda, dos sistemas de climatização usados para manter os parâmetros de ambiente medidos dentro dos intervalos definidos pelo utilizador.

5.4.1 Cenário Verão – Estratégias de Arrefecimento

Primeiramente, foram analisados os dados recolhidos num dia de verão, durante o qual não foram utilizados os sistemas de aquecimento, arrefecimento ou de ventilação natural. Este passo permite avaliar o comportamento térmico da sala, Figura 5.27. No dia 26 de setembro de 2019 a sala não foi ocupada e, portanto, a medição da concentração de CO₂ não é relevante.

O segundo passo desta análise, consiste em utilizar sistemas passivos de modo a perceber se estes são suficientes para manter o conforto do utilizador. Na Figura 5.28, é demonstrado o efeito que o sistema de BIPV e o sistema de renovação do ar têm no conforto térmico TR2. Este teste foi realizado num dia de verão em que o utilizador ocupou a sala entre as 9h e as 16h.

No gráfico da Figura 5.29, pode-se verificar que naquele dia a temperatura máxima exterior foi cerca de 28°C, e a temperatura máxima dentro da sala não ultrapassou os 25°C. Este valor deve-se ao facto de o sistema ativo de ar arrefecido por tubos enterrados ter sido ligado pouco depois das 11h e desligado por volta das 16h. De referir ainda que, no dia 7 de outubro de 2019 a sala esteve ocupada entre as 9h e as 16h.

O gráfico da Figura 5.27 apresenta os dados recolhidos da temperatura exterior e da temperatura interior. A temperatura interior mostra uma variação de 3°C que é significativamente inferior à variação da temperatura exterior de 8,3°C para o mesmo dia. Isto deve-se principalmente à inércia térmica alta do edifício e ao isolamento que foi aplicado pelo exterior. O bom isolamento do edifício dificulta a realização dos testes utilizando os *setpoints* do algoritmo desenvolvido. Como consequência, a maior parte dos testes, para ambos os cenários, foram realizados manualmente através da ativação dos sistemas de climatização ou alteração dos *setpoints* para forçar a ativação dos sistemas.

Como é possível observar na Figura 5.28, a utilização de ambos os sistemas passivos de renovação do ar e de BIPV, este último na configuração de arrefecimento do ar interior por efeito de chaminé, permitiu criar uma corrente de ar e foi o suficiente para manter a temperatura interior constante, face ao aumento de 4,7°C da temperatura exterior. Apesar disso, estes dados não permitem concluir se estes sistemas serão suficientes para controlar a temperatura interior, em dias mais quentes.

Quanto ao desempenho do sistema de ar arrefecido por tubos enterrados, que é um sistema ativo, este permitiu manter a temperatura interior dentro do intervalo de conforto estabelecido pelo utilizador ao longo de todo o dia, independentemente do aumento da temperatura exterior, Figura 5.29.

No dia 1 de outubro de 2019 as estratégias de arrefecimento passivas de BIPV e renovação do ar, também ajudaram a reduzir a concentração de CO₂ para níveis mais apropriados. Tal efeito verifica-se no gráfico da Figura 5.30, onde os sistemas foram utilizados entre as 12h e as 16h. Conforme ilustrado no gráfico, o sistema de arrefecimento ativo utilizado no dia 7 de outubro de 2019 fez diminuir gradualmente o nível da concentração de CO₂ dentro da TR2 até se atingirem níveis adequados de conforto.

CAPÍTULO 5. ARQUITETURA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO E CONTROLO

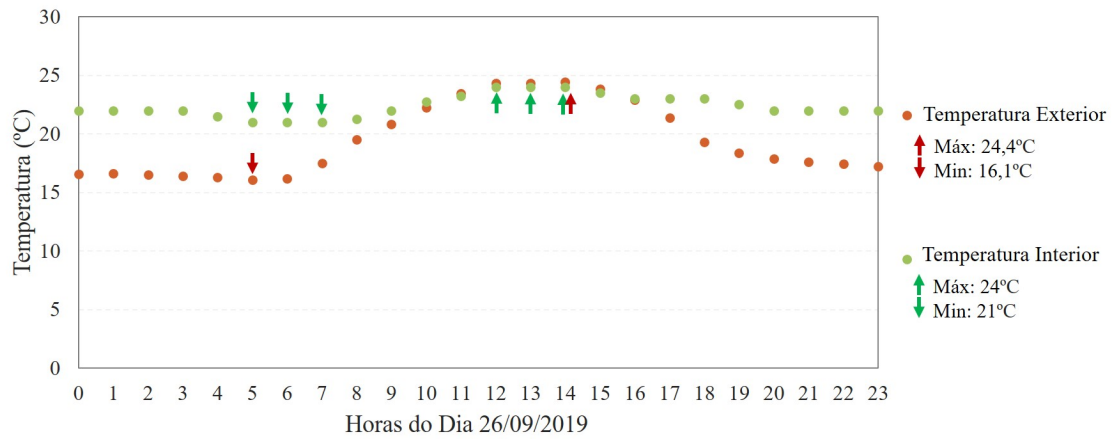


Figura 5.27: Representação gráfica do desempenho térmico no cenário Verão, sem a atuação de qualquer sistema de climatização.

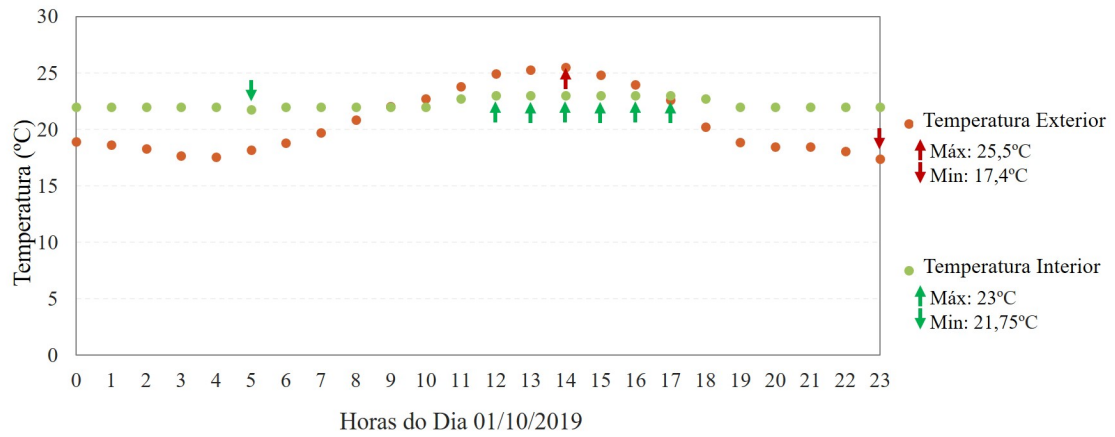


Figura 5.28: Representação gráfica do desempenho térmico no cenário Verão, onde foram utilizados sistemas de climatização passivos.

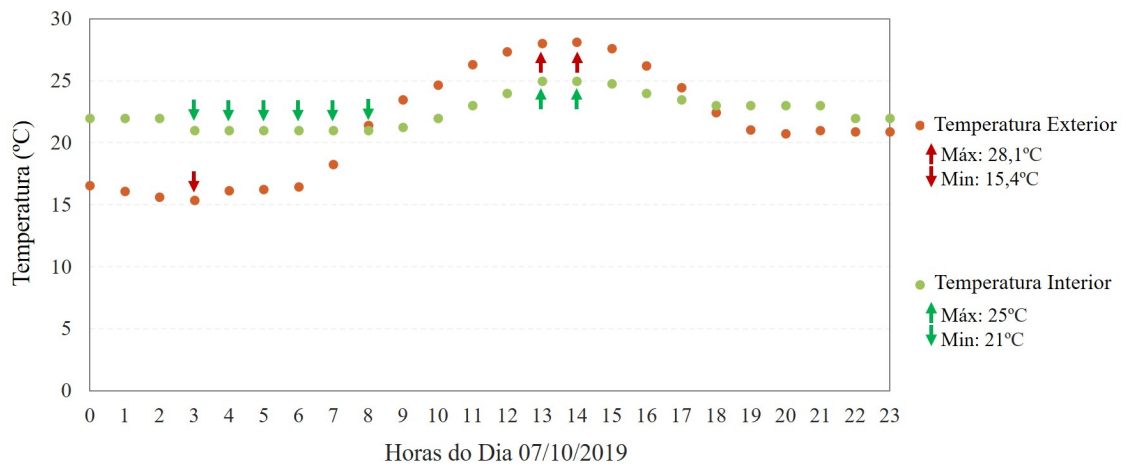


Figura 5.29: Representação gráfica do desempenho térmico no cenário Verão, onde foram utilizados sistemas de climatização ativos.

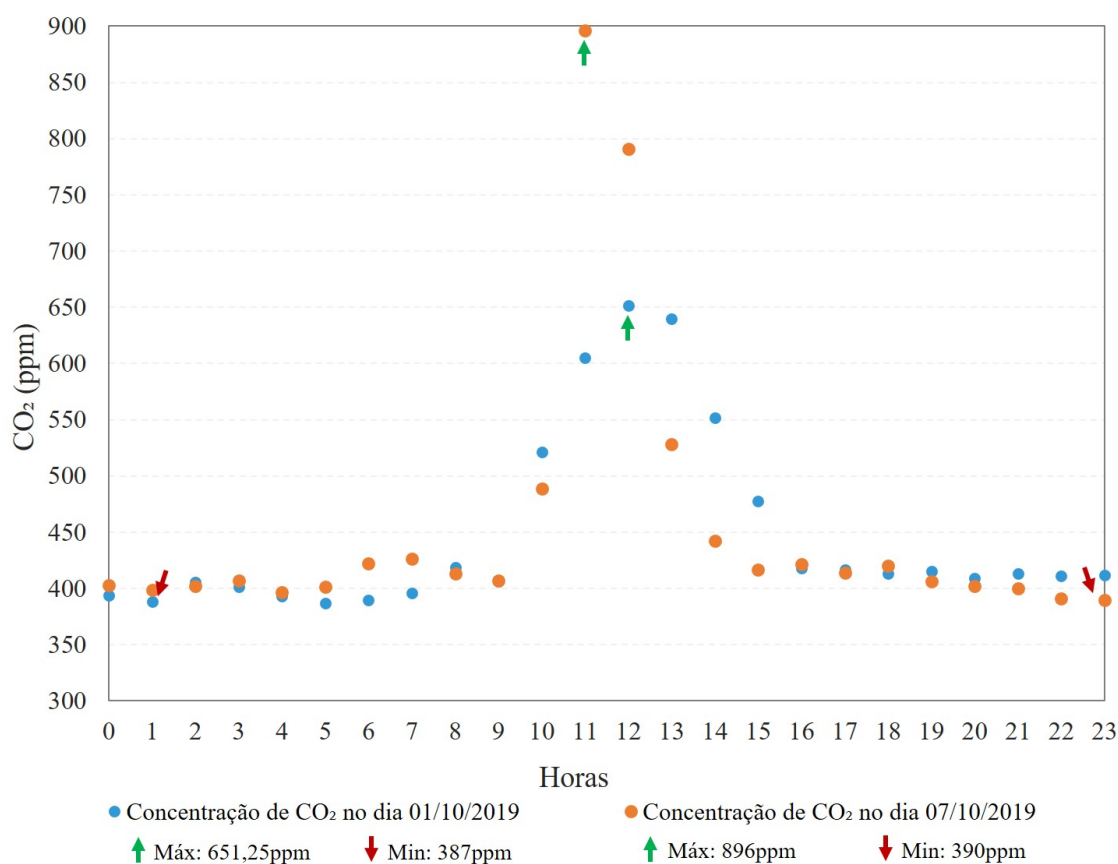


Figura 5.30: Representação gráfica da concentração de CO₂ no cenário Verão, onde foram utilizados sistemas de climatização passivos (azul) e ativos (laranja).

5.4.2 Cenário Inverno – Estratégias de Aquecimento

Analogamente ao cenário Verão, o primeiro passo desta análise é observar os dados obtidos num dia de inverno, onde não foram utilizados quaisquer sistemas de climatização ou ventilação natural e a sala não foi ocupada, Figura 5.31. Neste dia, entre as 7h e as 22h a temperatura exterior máxima registada foi de 14,7°C, enquanto que a mínima foi de 8,4°C, o que implica uma variação de 6,3°C. Quanto à temperatura interior a maior variação foi de apenas 2,5°C, para o mesmo período. Novamente, estes dados confirmam a alta inércia térmica e o bom isolamento do Solar XXI.

De seguida, na Figura 5.32, é demonstrada a influência dos sistemas passivos de renovação do ar e de recuperação de calor pela fachada fotovoltaica. Para isso, estes sistemas foram utilizados das 12h as 16h do dia 20 de janeiro de 2020. O uso de ambos, ajudou a aumentar a temperatura interior até aos 19°C. Neste dia a TR2 esteve ocupada entre as 10h e as 16h.

A fim de combater as baixas temperaturas no dia 23 de outubro de 2019, o sistema de aquecimento por radiador foi ligado por volta das 10h, uma hora depois da entrada do utilizador, e desligado apenas às 18h quando o utilizador saiu da sala, Figura 5.33.

CAPÍTULO 5. ARQUITETURA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO E CONTROLO

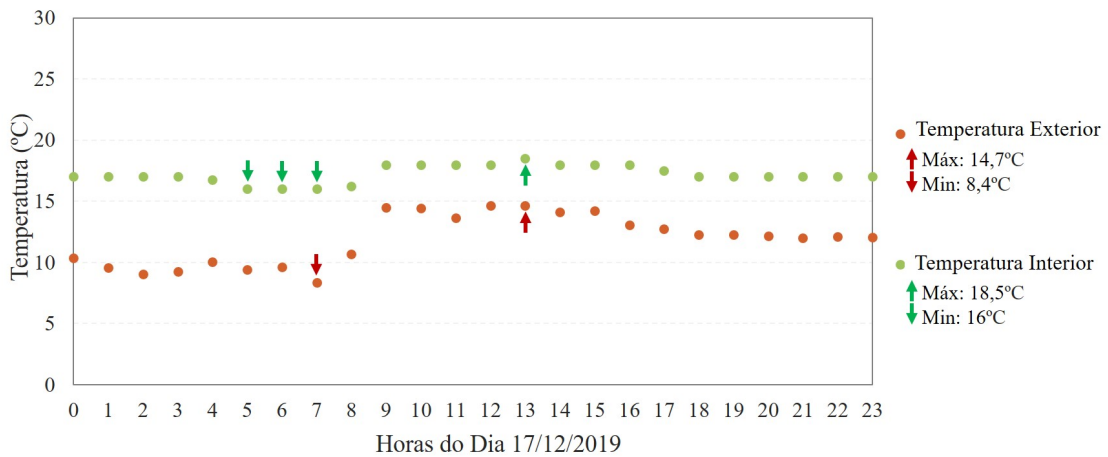


Figura 5.31: Representação gráfica do desempenho térmico, no cenário Inverno, sem a atuação de qualquer sistema de climatização.

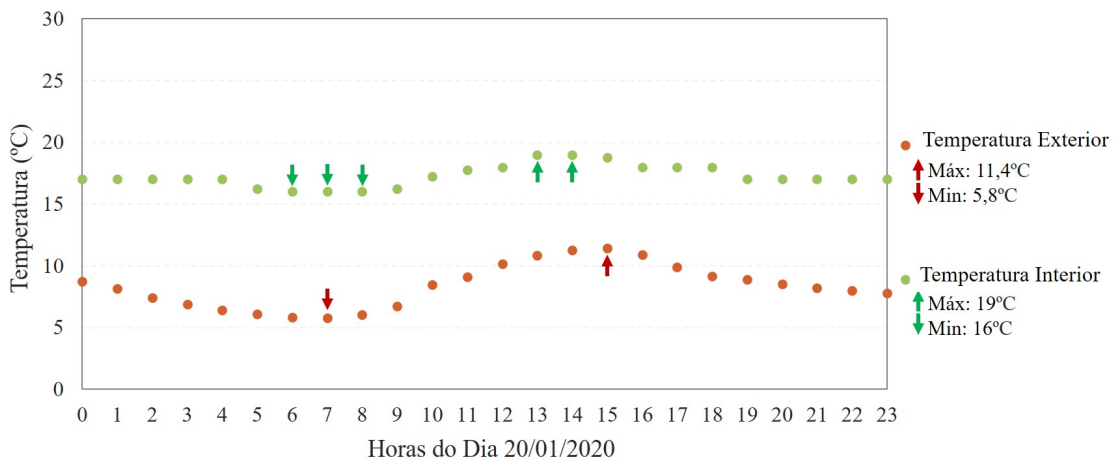


Figura 5.32: Representação gráfica do desempenho térmico no cenário Inverno, onde foram utilizados sistemas de climatização passivos.

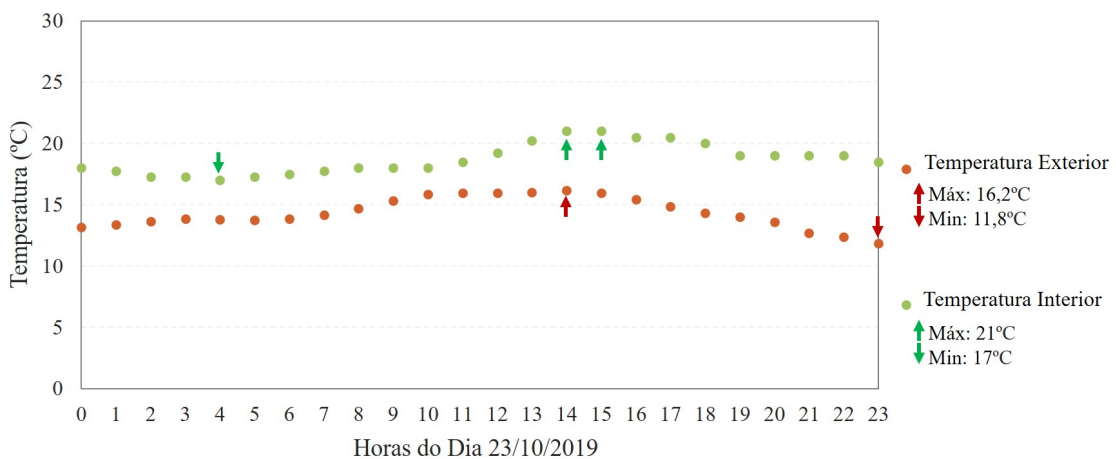


Figura 5.33: Representação gráfica do desempenho térmico no cenário Inverno, onde foram utilizados sistemas de climatização ativos.

No gráfico da Figura 5.32 é possível observar que a temperatura interior não chegou a alcançar o valor mínimo de conforto estabelecido pelo utilizador para a estação de inverno (20°C). Portanto, neste caso as estratégias passivas deveriam ter sido complementadas com o sistema de aquecimento por radiador, que é um sistema ativo.

Este sistema foi por sua vez utilizado no dia 23 de outubro de 2019, Figura 5.33, o que garantiu o aquecimento da temperatura interior em 3°C, das 10h às 14h. Para além disso, permitiu manter uma temperatura interior superior a 20°C entre as 13h e as 18h, ainda que a temperatura exterior tenha diminuído 1,5°C no mesmo intervalo de tempo.

Os dados da Figura 5.34 mostram que as estratégias passivas de circulação do ar utilizadas no dia 20 de janeiro de 2020 são eficientes na diminuição da concentração de CO₂ e podem ser benéficas no controlo da temperatura interior.

No dia 23 de outubro de 2019 o sistema de renovação de ar foi utilizado para diminuir os níveis de concentração de dióxido de carbono entre as 11h e as 12h. Mais tarde, entre as 15h e as 18h o sistema de ar arrefecido foi ligado, pois o nível de concentração de CO₂ era muito elevado (800 ppm). O sistema de ar arrefecido poderá ter contribuído para uma ligeira diminuição da temperatura interior.

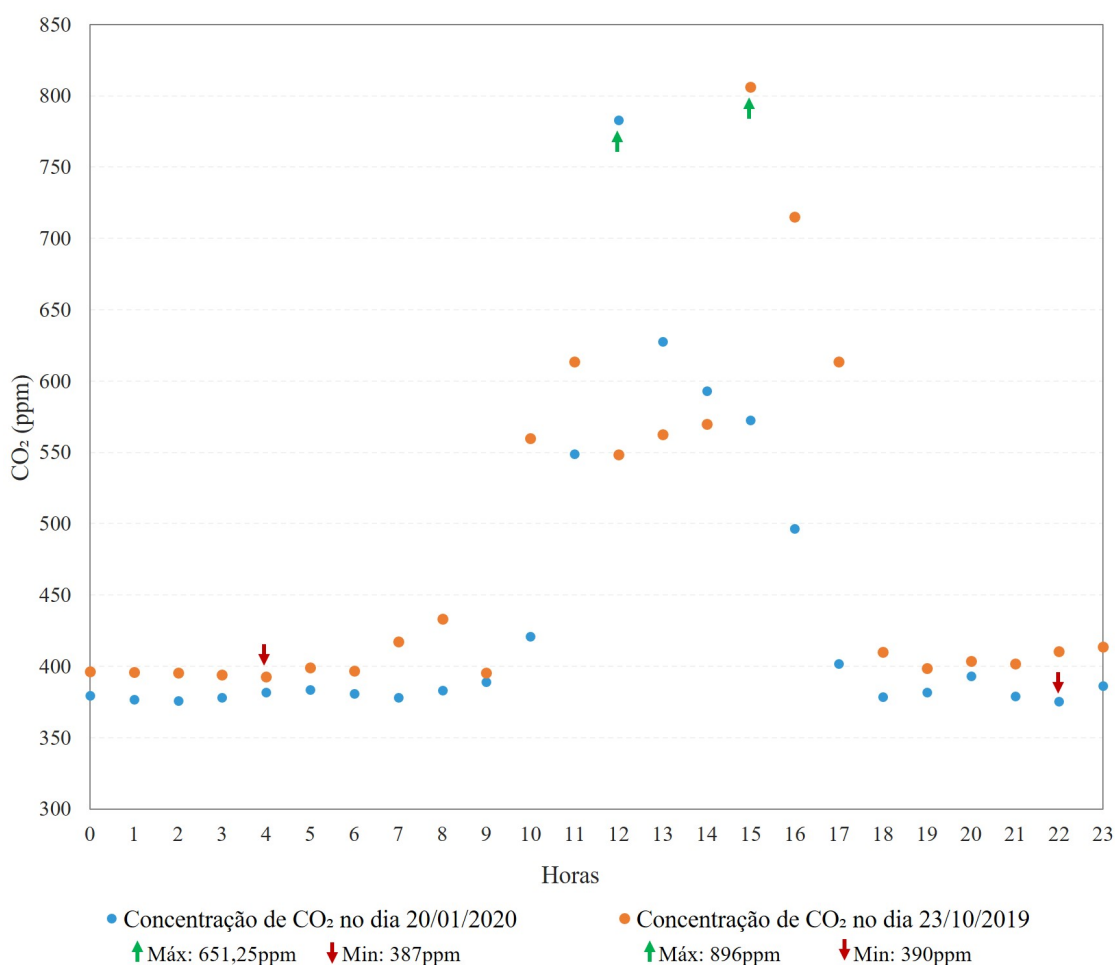


Figura 5.34: Representação gráfica da concentração de CO₂ no cenário Inverno, onde foram utilizados sistemas de climatização passivos (azul) e ativos (laranja).

Teoricamente, segundo a literatura seria de esperar que os sistemas ativos causassem uma maior variação na temperatura interior comparativamente aos passivos (Gonçalves, Cabrito e Diniz, 2010). O expectável foi verificado em parte, visto que os sistemas ativos se mostraram mais eficazes no aumento ou na diminuição da temperatura interior.

De um modo geral, os sistemas passivos foram suficientes para cumprir os *setpoints* de conforto térmico e concentração de CO₂ definidos pelo utilizador. No entanto, não existem dados suficientes para avaliar se os sistemas passivos conseguem assegurar o conforto térmico do utilizador nos dias mais rigorosos de inverno e verão. Porventura, nestas situações poderá ser necessário recorrer à utilização de sistemas ativos, tal como se verificou no dia 20 de janeiro de 2020.

Importa ainda referir que os sistemas de climatização passivos atuam gradualmente no conforto térmico, pelo que, devido ao seu tempo de latência, não têm um efeito imediato nos parâmetros de conforto da sala. Por exemplo, os efeitos do sistema de recuperação de calor pela fachada fotovoltaica no desempenho térmico demoram um certo tempo até serem perceptíveis.

5.4.3 Análise do Consumo Energético

Um dos objetivos principais do projeto do Edifício Solar XXI prende-se com a diminuição do consumo energético. Na prática, pretende-se um aproveitamento consciente da energia através do controlo dos sistemas de climatização por um algoritmo. Desta forma, interessa comparar o consumo de energia na situação em que os sistemas são ativados pelo utilizador, com a situação em que os sistemas são ativados pelo algoritmo implementado. Todavia, uma vez que não se adquiriram dados previamente à implementação do algoritmo, não é possível fazer esse balanço energético.

Para além disso, os dados obtidos do consumo de energia foram recolhidos durante um período de implementação e testes do sistema de monitorização, pelo que não são fidedignos. Neste período, graças ao bom isolamento do edifício, os parâmetros de conforto encontravam-se geralmente dentro dos intervalos definidos no algoritmo. Assim, de modo a testar o efeito dos sistemas no conforto da sala, os intervalos tiveram de ser manipulados. Como tal, foram ativados sistemas que consomem energia quando na realidade o utilizador já se encontrava confortável, pelo que os valores de consumo energético não correspondem à realidade, mas sim a um cenário simulado. Neste panorama, não foi possível analisar a eficiência energética. No entanto, o sistema foi programado com o intuito de funcionar apenas na presença do utilizador e priorizar os sistemas passivos em prol da minimização do consumo energético.

CONCLUSÃO

6.1 Conclusões Gerais

Atualmente, as pessoas passam a maior parte do seu tempo dentro de edifícios. Torna-se, portanto, fulcral assegurar o conforto e qualidade do ar interior, dado ao seu impacto na saúde, bem-estar e produtividade do ser humano. É com base nesta premissa, que o controlo climático se revela de grande importância na gestão de edifícios. Todavia, a gestão do conforto de um edifício tem repercussões no seu consumo energético. De facto, na UE os edifícios são responsáveis por uma grande percentagem do consumo de energia e das emissões de gases com efeito de estufa.

Neste contexto, objetivos como minimizar o consumo de energia e maximizar o conforto térmico entram tipicamente em conflito e devem sempre ser abordados não apenas na fase de projeto, mas também na operação do edifício. Por conseguinte, é fundamental investir na implementação de algoritmos que visem diminuir os consumos energéticos dos edifícios, por forma a alcançar um equilíbrio sustentável com o conforto dos seus ocupantes e com o meio ambiente. Várias abordagens desenvolvidas baseiam-se nos modelos térmicos dos edifícios, porém são pouco flexíveis, pois têm de ser feitas para cada caso em particular. Além disso, aspetos como o conforto térmico são subjetivos, pois variam de utilizador para utilizador.

Para ultrapassar este conflito, na presente dissertação propõe-se a implementação de uma rede de sensores e atuadores que apoiem o desenvolvimento de um sistema de monitorização e controlo baseado num conjunto de regras. Pretende-se que este sistema seja flexível, facilmente reconfigurável, que atue consoante as preferências do utilizador, e otimize simultaneamente o consumo energético do edifício. Esta proposta incide na criação de um Modelo de Conforto Térmico: Utilizador e, em parte, numa primeira versão de um Modelo de Conforto Térmico: Monitorização, que integram um sistema de controlo inteligente de energia e conforto, a ser desenvolvido numa fase posterior.

Face aos objetivos estipulados, desenvolveu-se um programa, dividido em dois cenários distintos, Verão e Inverno, para controlar os parâmetros de conforto da TR2. No entanto, não se implementou um algoritmo para controlar a humidade relativa, uma vez que nenhum sistema de climatização possibilita o seu controlo, e devido à grande amplitude do intervalo de conforto desta variável.

Com o intuito de analisar a influência dos sistemas de climatização no conforto e na qualidade do ar da TR2, realizaram-se simulações e analisaram-se os seus resultados. Verificou-se que o Solar XXI é um edifício bem isolado termicamente, o que dificultou a realização dos testes utilizando o algoritmo implementado. Em alternativa, procedeu-se à realização de testes manuais ou alteraram-se os intervalos de conforto definidos no algoritmo, para que se ativassem automaticamente os sistemas que se pretendia estudar. Apesar do obstáculo encontrado, o modo como se ultrapassou o mesmo demonstra que o sistema de controlo implementado é flexível, pois pode facilmente ajustar-se a um utilizador diferente. Para isso, basta o novo utilizador dar o seu *feedback* e definir os *setpoints* que prefere para cada parâmetro de conforto.

Para atuar sobre o conforto térmico e a concentração de CO₂, o utilizador da TR2 tem à sua disposição sistemas de climatização ativos e passivos, que respetivamente, consomem ou não energia. De um modo geral, os sistemas passivos mostraram-se idóneos e capazes de manter os requisitos mínimos de conforto térmico do utilizador. Contudo, nos dias com temperaturas exteriores mais severas, surge a necessidade de complementar as estratégias passivas com as ativas, a fim de conservar ou melhorar a temperatura interior. Apesar disso, os sistemas de climatização e as estratégias de ventilação passivas mostraram-se eficientes no controlo da concentração de CO₂.

O sensor de iluminância ainda não estava devidamente instalado, no entanto desenvolveu-se um algoritmo para controlar o nível de iluminação da TR2 utilizando sistemas passivos e ativos. Esse algoritmo foi testado, para se certificar que funcionava, através da inserção de *inputs* no código que simulavam a leitura do sensor.

Relativamente à análise do consumo energético, não existem dados anteriores à implementação do algoritmo, pelo que não é possível comparar com os dados obtidos após a implementação do mesmo. Para além disso, os intervalos de conforto foram manipulados para realizar a fase de testes, pelo que, os dados do consumo energético não refletem a realidade das necessidades de conforto do utilizador. Nestas circunstâncias, não se pode concluir se o sistema implementado tornou a TR2 energeticamente mais eficiente. Ainda assim, em prol da minimização do consumo energético, este sistema de controlo foi programado para priorizar os sistemas passivos e apenas atuar na presença do utilizador.

Em suma, o objetivo de implementar uma infraestrutura para um sistema de controlo inteligente de energia e conforto foi cumprido. É de notar ainda, que a implementação de sistemas mais simples pode ser uma solução viável e economicamente mais acessível para um edifício menos complexo, como no caso de uma habitação. Dado o impacto significativo que um sistema simples baseado em regras pode ter no conforto e no consumo energético de uma instalação, este trabalho contribui para a divulgação dos mesmos.

6.2 Trabalhos Futuros

Para complementar este estudo, e suportar o desenvolvimento do sistema inteligente de energia e conforto que o irá suceder, sugerem-se algumas diretrizes para trabalhos futuros.

Para começar, seria benéfico terminar a instalação correta dos sensores existentes e instalar mais sensores, nomeadamente sensores que indiquem a posição dos estores e a velocidade do ar que flui pelas bandeiras situadas por cima da porta. Deste modo, tornar-se-ia possível analisar melhor o impacto dos sistemas de sombreamento e de renovação do ar, no conforto térmico e visual da sala.

Seria importante realizar estudos que ajudem a correlacionar os parâmetros do ambiente e de conforto do utilizador. Como por exemplo o estudo sobre as variâncias das temperaturas exterior e interior, apresentado no capítulo 5.1.2, que deve ser melhorado. De referir também a importância de ter uma maior análise estatística, para que se possam realizar estudos mais sustentados e tirar conclusões mais assertivas sobre quais os sistemas que se devem utilizar em cada situação específica.

As salas TR1 e TR2 dispõem dos mesmos sistemas de climatização e dispositivos de monitorização e controlo, sendo que a única diferença entre ambas é que uma delas utiliza um algoritmo para controlar os sistemas de climatização e a outra não. A fim de perceber se o sistema implementado na TR2 a tornou energeticamente mais eficiente, seria uma mais valia monitorizar em simultâneo o consumo energético de cada sala, para se conseguir uma comparação justa. Para isso, devem ser ambas as salas ocupadas no mesmo horário.

Para auxiliar na tomada de decisão do sistema de controlo inteligente a implementar, sugere-se o desenvolvimento de algoritmos de previsão ocupacional, meteorológica e de produção de energia. O algoritmo de previsão de ocupação permitiria regular o conforto da sala mesmo antes da chegada do utilizador, prevendo assim as horas a que ele entra. Com recurso ao algoritmo de previsão meteorológica seria possível prever as necessidades de conforto térmico dos habitantes. Por fim, o algoritmo de previsão de produção de energia permitiria gerir, de uma maneira mais eficiente, o conforto da sala através de sistemas ativos nos momentos em que há um excedente de energia. Desta forma, não se desperdiçaria a energia renovável produzida em horas de excedente e manter-se-ia o conforto sem quaisquer custos energéticos.

Com a implementação destes algoritmos, seria possível maximizar o conforto do utilizador e minimizar os custos energéticos da instalação, pois a energia utilizada seria maioritariamente renovável e produzida pelos sistemas fotovoltaicos instalados no edifício.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, M. W., M. Mourshed, D. Mundow, M. Sisinni e Y. Rezugui (mai. de 2016). “Building energy metering and environmental monitoring – A state-of-the-art review and directions for future research”. Em: *Energy and Buildings* 120, pp. 85–102. ISSN: 03787788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.03.059. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.059><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778816302158>.
- Airfal (2015). *Recommended lighting levels for offices*. URL: <https://www.airfal.com/en/residential-lighting-news/recommended-lighting-levels-for-offices-4265/> (acedido em 18/02/2020).
- Alphonsus, E. R. e M. O. Abdullah (jul. de 2016). “A review on the applications of programmable logic controllers (PLCs)”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60, pp. 1185–1205. ISSN: 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.025. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.025><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032116000551>.
- AMCI: Advanced Micro Controls Inc. (2019). *What is a PLC?* URL: <https://www.amci.com/industrial-automation-resources/plc-automation-tutorials/what-plc/> (acedido em 02/09/2019).
- Andrade, J. B. (2009). “Avaliação da sustentabilidade do edifício Solar XXI utilizando a metodologia SBTool”. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para a obtenção do grau de mestre em Engenharia do Ambiente. URL: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58269/1/000137353.pdf>.
- ASHRAE (2016). *What is the allowable level of carbon dioxide in an occupied space?* URL: <https://www.ashrae.org/File%20Library/Technical%20Resources/Technical%20FAQs/TC-04.03-FAQ-35.pdf>.
- AutomationDirect.com (2019). *History of the PLC*. URL: <https://library.automationdirect.com/history-of-the-plc/> (acedido em 26/08/2019).
- B+B Sensors (s.d.). *Temperature probe for pipes measurement*. URL: <https://shop.bb-sensors.com/en/Measurement-by-branches/Building-automation/Temperature-probe-for-pipes-measurement-1xPt1000-B-2-tin-plated.html>.
- Berger, H. (2012). *Automating with SIMATIC: controllers, software, programming, data*. 5ª Edição. Publicis.

- Berger, H. (2013). *Automating with SIMATIC S7-400 inside TIA Portal: Configuring, Programming and Testing with STEP 7 Professional*. 1ª Edição. Publicis.
- Boduch, M. e W. Fincher (2009). “Standards of Human Comfort: Relative and Absolute”.
URL: <http://hdl.handle.net/2152/13980>.
- Bolton, W. (2015). *Programmable Logic Controllers*. 6ª Edição. Elsevier.
- Bongiorno, S. D., A. D. Falcone, M. Stroh, J. Holder, J. L. Skilton, J. A. Hinton, N. Gehrels e J. Grube (ago. de 2011). “A NEW TeV BINARY: THE DISCOVERY OF AN ORBITAL PERIOD IN HESS J0632+057”. Em: *The Astrophysical Journal* 737.1, p. L11. ISSN: 2041-8205. DOI: 10.1088/2041-8205/737/1/L11. URL: <http://stacks.iop.org/2041-8205/737/i=1/a=L11?key=crossref.504f225ac1f858ecec925bf9358914ac>.
- Canadian Centre for Occupational Health & Safety (2016). *Hot Environments - Health Effects and First Aid*. URL: https://www.ccohs.ca/oshanswers/phys%7B%5C_%7Dagents/heat%7B%5C_%7Dhealth.html (acedido em 14/02/2020).
- (2018). *Thermal Comfort for Office Work*. URL: https://www.ccohs.ca/oshanswers/phys%7B%5C_%7Dagents/thermal%7B%5C_%7Dcomfort.html (acedido em 12/02/2020).
- Castro, K. (2012). “Domótica - Desenvolvimento de uma solução integradora”. Tese de doutoramento. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica.
- Delta OHM (s.d.). *Temperature, Relative Humidity and Air Speed Transmitters*.
- Doukas, H., K. D. Patlitzianas, K. Iatropoulos e J. Psarras (out. de 2007). “Intelligent building energy management system using rule sets”. Em: *Building and Environment* 42.10, pp. 3562–3569. ISSN: 03601323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.10.024. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036013230600312X>.
- Erickson, K. T. (1996). “Programmable Logic Controllers”. Em: *IEEE Potentials* 15.1, pp. 14–17. URL: https://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1684%7B%5C%7Dcontext=ele%7B%5C_%7Dcomeng%7B%5C_%7Dfacwork.
- European Commission (2018a). *Energy performance of buildings | Energy*. URL: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings> (acedido em 10/01/2019).
- (2018b). *Nearly zero-energy buildings | Energy*. URL: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings/nearly-zero-energy-buildings> (acedido em 10/01/2019).
- European Commission. (2018). *Key Enabling Technologies | Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs*. URL: https://ec.europa.eu/growth/industry/policy/key-enabling-technologies%7B%5C_%7Den (acedido em 18/01/2019).
- Ferreira, F. (2010). “Building Intelligence Open System (BIOS)”. Tese de doutoramento. Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Informática e de Computadores. URL: <http://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/439>.
- Gaspar, C. (2009). *Eficiência Energética na Indústria*.

- Gill, K., S.-H. Yang, F. Yao e X. Lu (2009). “A ZigBee-Based Home Automation System”. Em: *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 55.2, pp. 422–430.
- Gonçalves, H., L. Aelenei e C. Rodrigues (2012). “Solar XXI: A Portuguese Office Building towards Net Zero-Energy Building”. Em: *The REHVA European HVAC Journal*, pp. 34–40. URL: <http://repositorio.lneg.pt/handle/10400.9/1542>.
- Gonçalves, H. e P. Cabrito (2005). *Edifício Solar XXI: Um edifício energeticamente eficiente em Portugal*. Lumiar. URL: <http://hdl.handle.net/10400.9/1321>.
- Gonçalves, H., P. Cabrito e I. Diniz (2010). *Solar XXI: em direcção à energia zero: towards zero energy*. LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia. URL: <http://hdl.handle.net/10400.9/1322>.
- Gonzalez, C. (2015). *Engineering Essentials: What Is a Programmable Logic Controller?* URL: <https://www.machinedesign.com/engineering-essentials/engineering-essentials-what-programmable-logic-controller> (acedido em 25/08/2019).
- Grétarsson, G. A. (2014). “Automated Control System. Selection, Design and Programming of Automated Control System for a Conveyor Belt in Fishing Industry”. Tese de doutoramento. Dissertação apresentada à Universidade da Islândia para a obtenção do grau de doutor em Tecnologia da Engenharia Mecatrônica. Instituto de Tecnologia Keilir.
- Halsall, F. (1996). *Data Communications, Computer Networks, and Open Systems*. 4ª Edição. Pearson, p. 907.
- Jorge, A. (2010). “Eficiência Energética Sistema de Comunicação para Monitorar Consumos de Energia”. Dissertação apresentada à Universidade NOVA de Lisboa para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Kamali, S., G. Khakzar e S. Abdali Hajiabadi (dez. de 2013). “Effect of Building Management System on Energy Saving”. Em: *Advanced Materials Research* 856.July, pp. 333–337. ISSN: 1662-8985. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.856.333. URL: <https://www.scientific.net/AMR.856.333>.
- Levermore, G. (2000). *Building Energy Management Systems: An Application to Heating, Natural Ventilation, Lighting and Occupant Satisfaction*. 2ª Edição. Routledge, p. 306.
- Makhija, J. e L. Subramanyan (2003). “Comparison of protocols used in remote monitoring: DNP 3.0, IEC 870-5-101 \& Modbus”. Em: *Electronics Systems Group, IIT Bombay, India, Tech. Rep.*
- Mansson, L.-G. e D. McIntyre (1997). “Controlling and regulating heating, cooling and ventilation methods and examples”. Em: *International Energy Agency*.
- Market Business News (2019). *What is automation? - Definition and examples - Market Business News*. URL: <https://marketbusinessnews.com/financial-glossary/automation-definition-meaning/> (acedido em 21/08/2019).
- May, G., M. Taisch, V. Prabhu e I. Barletta (2013). “Energy Related Key Performance Indicators – State of the Art , Gaps and Industrial Needs”. Em: *IFIP Advances in*

- Information and Communication* 414, pp. 257–267. DOI: 10.1007/978-3-642-41266-0_32.
- McComb, M. (2016). *Smart Buildings of the Future – EDI Ltd*. URL: <http://ediltd.com/smart-buildings-of-the-future/> (acedido em 17/01/2019).
- National Optical Astronomy Observatory - NOAO (2009). *Recommended Light Levels*. DOI: 10.1201/9781420082364.ch5. URL: https://www.noao.edu/education/QLTkit/ACTIVITY%7B%5C_%7DDocuments/Safety/LightLevels%7B%5C_%7Doutdoor+indoor.pdf.
- Naya Energy (2018). *The Difference Between Energy Management Systems (EMS) & Building Management Systems (BMS)*. (Acedido em 22/01/2019).
- Nunes, J. P. (2009). “Configuração de Sistemas Domóticos”. Tese de doutoramento. Dissertação apresentada à Universidade Técnica de Lisboa para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Informática e de Computadores.
- Nunes, R. e J. Delgado (1998). “An Architecture for a Home Automation System”. Em: *1998 IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems. Surfing the Waves of Science and Technology (Cat. No. 98EX196)*. IEEE. ISBN: 0780350081.
- Oti, A., E. Kurul, F. Cheung e J. Tah (dez. de 2016). “A framework for the utilization of Building Management System data in building information models for building design and operation”. Em: *Automation in Construction* 72, pp. 195–210. ISSN: 09265805. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.08.043. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.043> <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580516301972>.
- Patrício, G. J. H. (2009). “Rede Sem Fios de Microcontroladores com Acesso Remoto Aplicada à Domótica”. Tese de doutoramento. Dissertação apresentada à Universidade NOVA de Lisboa para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Sahu, S. e A. K. Dey (mar. de 2016). “Automated profile cutting machine using PLC”. Em: *2016 International Conference on Advances in Human Machine Interaction (HMI)*. IEEE. ISBN: 978-1-4673-8810-8. DOI: 10.1109/HMI.2016.7449187. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7449187/>.
- Saier (s.d.). *Flow Sensors*. URL: https://saiersensor.en.alibaba.com/product/60655540906-803861114/10%7B%5C_%7D5Q%7B%5C_%7DWater%7B%5C_%7DFlow%7B%5C_%7DSensor%7B%5C_%7DNylon%7B%5C_%7DLiquid%7B%5C_%7DControl%7B%5C_%7DSwitch%7B%5C_%7DHall%7B%5C_%7DEffect%7B%5C_%7DFlowmeter%7B%5C_%7DFluid%7B%5C_%7DMeter%7B%5C_%7DCounter%7B%5C_%7D1%7B%5C_%7D30L%7B%5C_%7DMin.html?spm=a2700.icbuShop.41413.11.30ff1436vJj5Af.
- Saitwal, A. (2019). *Evolution of Automation: To Intelligent Automation and Beyond - DZone AI*. URL: <https://dzone.com/articles/evolution-of-automation-up-to-intelligent-automati> (acedido em 22/08/2019).

- Saleiro, M. e E. Ey (s.d.). *ZigBee - Uma abordagem prática*. URL: https://lusorobotica.com/ficheiros/Introducao%7B%5C_%7Dao%7B%5C_%7DZigbee%7B%5C_%7D-%7B%5C_%7Dpor%7B%5C_%7Dmsaleiro.pdf.
- Salgueiro, A. (2011). “A contribuição de um sistema solar térmico no desempenho energético do do Edifício Solar XXI”. Dissertação apresentada à Universidade NOVA de Lisboa para a obtenção do grau de mestre em Energia e Bioenergia. Faculdade de Ciências e Tecnologia. URL: <https://run.unl.pt/handle/10362/5769>.
- Santos, H. M. T. dos (2015). “Quadros Elétricos Inteligentes Recorrendo a Soluções Comerciais”. Tese de doutoramento. Dissertação apresentada à Universidade NOVA de Lisboa para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Santos, J. M. C. dos (2014). “Optimização da Gestão de Energia e da Segurança de um Edifício baseada num Sistema Técnico Centralizado”. Tese de doutoramento. Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica Perfil Energia, Refrigeração e Climatização. URL: <http://repositorio.ip1.pt/handle/10400.21/4154>.
- Schmidt, C., W. Li, S. Thiede, B. Kornfeld, S. Kara e C. Herrmann (2016). “Implementing Key Performance Indicators for Energy Efficiency in Manufacturing”. Em: *Procedia CIRP* 57, pp. 758–763. ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.131. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.131>.
- Schneider Electric (2010a). *LF24-SR*.
- (2010b). *Schneider Electric SoMachine Software Introduction*. URL: https://stevenengineering.com/tech%7B%5C_%7Dsupport/PDFs/45SOFTWARE%7B%5C_%7DSOMACHINE.pdf.
- (2015). *Variable speed drives Altivar 12*. França. URL: <https://www.se.com/ww/en/product-range/2253-altivar-12/>.
- (2016). *MR95 Radiator Valve Actuator*.
- (2018). *EcoStruxure Machine Expert*. URL: <https://www.se.com/pt/pt/product-range-presentation/2226-ecostruxure-machine-expert/%7B%5C#%7Dtabs-top> (acedido em 05/09/2019).
- (2019a). *A9MEM3155*.
- (2019b). *Modicon M241 Logic controllers*. França. URL: <https://www.se.com/ww/en/product-range/62129-modicon-m241/>.
- (2020a). *MTN5510-1419*. URL: <https://www.se.com/pt/pt/product/MTN5510-1419/argus-presence-master-with-ir%7B%5C%7D2C-1-10-v%7B%5C%7D2C-polar-white/>.
- (2020b). *SE8350U0B11 Fan Coil Unit and Zone controller BACnet - rel humidity - universal output - WH*. URL: <https://www.se.com/ww/en/product/SE8350U0B11/fan-coil-unit-and-zone-controller-bacnet---rel-humidity---universal-output---wh/>.

- Schneider Electric (2020c). *SED-CO2-G-5045*. URL: <https://www.se.com/ww/en/product/SED-CO2-G-5045/ecostruxure-building-expert---wireless-co2-room-sensor---temperature---humidity/>.
- Schneider Electric Portugal (2013). “Arquitetura de Gestão da Energia Ativa da Central à Tomada Elétrica”. URL: https://www.voltimum.com.br/sites/www.voltimum.com.br/files/pdflibrary/arquitetura%7B%5C_%7Dgestao%7B%5C_%7Dde%7B%5C_%7Denergia%7B%5C_%7Dativa.pdf.
- Shaikh, P., N. Nor, P. Nallagownden e I. Elamvazuthi (2013a). “Building Energy Management through a Distributed Fuzzy Inference System”. Em: *International Journal of Engineering and Technology* 5.4, pp. 3236–3242.
- (2013b). “Intelligent Optimized Control System for Energy and Comfort Management in Efficient and Sustainable Buildings”. Em: *Procedia Technology* 11, pp. 99–106. ISSN: 2212-0173. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.167>. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.167>.
- Siemens (2016a). *Certified building solutions - Building Technologies*. URL: <https://www.buildingtechnologies.siemens.com/bt/global/en/building-solutions/total-building-solutions/certified-building-solutions/Pages/certified-building-solutions.aspx%7B%5C#%7Dcontent>.
- (2016b). *Desigo – State-of-the-art building automation system | Building automation and control systems*. URL: <https://new.siemens.com/global/en/products/buildings/automation/desigo.html> (acedido em 05/02/2019).
- Silveira, L. e W. Q. Lima (2003). *Um breve histórico conceitual da Automação Industrial e Redes para Automação Industrial*. Rel. téc. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica.
- Somfy Team (2018). *A Quick History of Home Automation*. URL: <https://www.somfy.com.au/Blog/Post/2018-03-07-a-quick-history-of-home-automation> (acedido em 28/08/2019).
- Sudoe Interreg - Interreg Program Sudoe (2019a). *SUDOKET - Interreg Program Sudoe - About Interreg Sudoe*. URL: <https://www.interreg-sudoe.eu/gbr/programme/about-interreg-sudoe> (acedido em 13/12/2019).
- (2019b). *SUDOKET - Interreg Program Sudoe - Mapping, consolidation and dissemination of Key Enabling Technologies (KETs) for Sudoe building sector*. URL: <https://www.interreg-sudoe.eu/gbr/projects/the-approved-projects/182-mapping-consolidation-and-diss-emin-ation-of-key-enabling-technologies-kets-for-sudoe-building-sector> (acedido em 13/01/2019).
- Sultan, M. e K. Nabil (2016). “Smart to Smarter: Smart Home Systems History, Future and Challenges”. Em: *Future of HBI: Human-Building Interaction Workshop, ACM CHI’16*. IEEE.
- Sun, Y., T.-Y. Wu, G. Zhao e M. Guizani (jun. de 2015). “Efficient Rule Engine for Smart Building Systems”. Em: *IEEE Transactions on Computers* 64.6, pp. 1658–1669. ISSN:

- 0018-9340. DOI: 10.1109/TC.2014.2345385. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6871310/>.
- Tao, F., Y. Wang, Y. Zuo, H. Yang e M. Zhang (mar. de 2016). "Internet of Things in product life-cycle energy management". Em: *Journal of Industrial Information Integration* 1, pp. 26–39. ISSN: 2452414X. DOI: 10.1016/j.jii.2016.03.001. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jii.2016.03.001%20https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2452414X16000030>.
- Tragos, E. Z., M. Foti, M. Surligas, G. Lambropoulos, S. Pournaras, S. Papadakis e V. Angelakis (jun. de 2015). "An IoT based intelligent building management system for ambient assisted living". Em: *2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*. IEEE, pp. 246–252. ISBN: 978-1-4673-6305-1. DOI: 10.1109/ICCW.2015.7247186. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7247186/>.
- Unitronics (2019). *What is the definition of "PLC"?* URL: <https://unitronicspmc.com/what-is-plc-programmable-logic-controller/> (acedido em 03/09/2019).
- Vieira, M. C. d. A. (2018). "Laboratório remoto para o ensino de Automação". Tese de doutoramento. Dissertação apresentada à Universidade do Minho para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores.
- Vikhorev, K., R. Greenough e N. Brown (2013). "An advanced energy management framework to promote energy awareness". Em: *Journal of Cleaner Production* 43, pp. 103–112. ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.12.012. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.012>.
- Walton, T. (2003). *Methods for monitoring the condition of historic places*. Rel. téc. Wellington. URL: <http://www.doc.govt.nz/upload/documents/science-and-technical/docts27.pdf>.
- Wang, S. (dez. de 2009). *Intelligent Buildings and Building Automation*. 1ª Edição. Spon Press. ISBN: 9780203890813. DOI: 10.4324/9780203890813. URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/9780203890813>.
- World Business Council for Sustainable Development (2009). *Energy Efficiency in Buildings - Transforming the Market*. Rel. téc. URL: http://wbcserver.org/wbcserverpublications/cd%7B%5C_%7Dfiles/datas/business-solutions/eeb/pdf/EEB-TransformingTheMarket.pdf.
- World of Dictionary (2018). *Meaning of automatus (automata, automatae, automatam, automatarum, automatas, automati, automator, automatoria, automatiore, automatiorem, automatiores, automatori, automatoria, automatoribus, automatoris, automatorium, automatorum, automatis, auto)*. URL: <https://worldofdictionary.com/dict/latin-english/meaning/automatus> (acedido em 21/08/2019).

A N E X O



**POSTER APRESENTADO NA CONFERÊNCIA
FACADES19**



Architecture and Preliminary Results of a Smart Energy-Comfort Controller for Sustainable Buildings

José Pelica | João Murta-Pina | Laura Aelenei | Daniel Aelenei | João Pedro Oliveira | Jorge Facão
 Email: jf.pelica@campus.fct.unl.pt

Introduction

Buildings are responsible for a large share of energy consumption and greenhouse gas emissions, representing respectively 40% and 36% at the EU level. Also, there is a generalised concern with the well-being of its users, related to their thermal comfort or to the indoor air quality. Yet, goals as minimising energy consumption and improving thermal comfort are typically conflicting and should always be addressed not only in the design stage but also in the operation of the building throughout its whole lifetime. Besides, aspects as thermal comfort are subjective, and thus may change from user to user. In this work, the architecture for a user-centric comfort control system, that simultaneously optimises the associated energy bill is proposed. This system is developed around several **Key Enabling Technologies (KET)**, as Smart Internet-of-Things (IoT) controllers, to address the energy-comfort nexus, machine learning algorithms, advanced optimisation techniques, and IoT sensors and actuators.

Approach

A **plug-n-play paradigm** is foreseen in this work, for which it is mandatory that the system is not only **flexible**, but also **easily reconfigurable**, and **able to learn from the environment**. Thus, the development of proposed system considered:

- i. The use of **black-box, data-driven models**.
- ii. The elaboration of an automated batch/online **learning-based framework**.
- iii. The use of **optimisation techniques** widely used and mature.

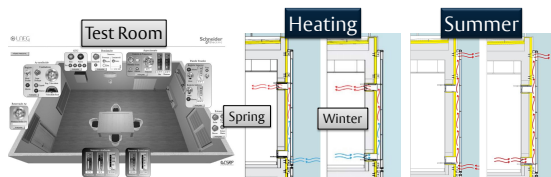
This system will be validated in a test room of a **Nearly Zero Energy Building (NZEB)**, namely the **Solar XXI** building at LNEG.



Test Room and Solar XXI façade

The system will be s in a test room at Solar XXI. Some of the building main characteristics are:

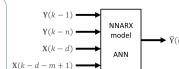
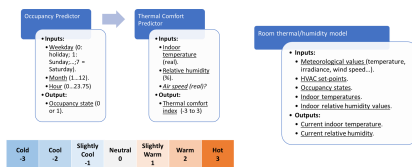
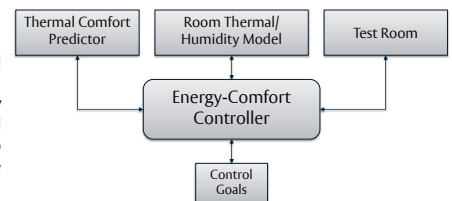
- Optimised thermal characteristics of the façade.
- 12 kWp (100 m²) photovoltaic (PV) system integrated in the façade.
- Heat recovery by natural convection in the building integrated PV for space heating ➡ Motorised control.



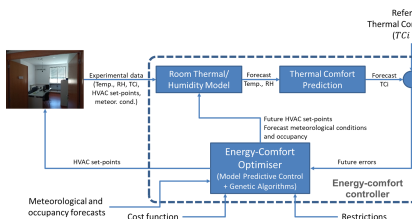
System Architecture

The architecture of the **Smart Energy-Comfort Controller (SECC)** considers two predictors, related to thermal comfort and thermal and humidity conditions of the room.

A **Model Predictive Control (MPC)** strategy is applied to derive the strategy for operating not only the climatization of the space but also other subsystems that influence energy consumption and comfort, e.g. natural light or indoor air renovation. The predictors use **Artificial Neural Networks** to implement the learning algorithms, and the MPC is based on **Genetic Algorithms** to optimise the cost of energy associated to climatization, while preserving thermal comfort.



First Results

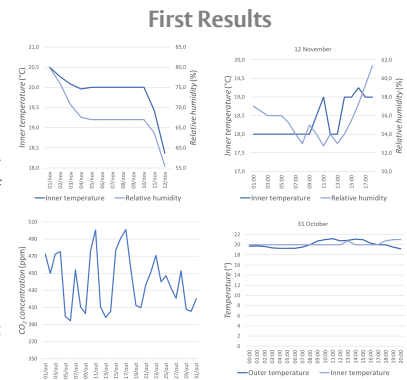


Conclusions

This work is related to a multi-KET approach for optimal operation of Innovative Buildings, addressing:

- Artificial intelligence.
- Micro- and nano-electronics.
- Digital security and connectivity.

A flexible and reconfigurable paradigm is intended, to allow fast deployment and minimum parametrisation requirements.



Sponsored by the SUDOKET - SOE2/P1/E0677 project under the Interreg-Sudoe program

Organizing Partners



Figura I.1: Poster apresentado na conferência FACADES19