

IPV - ESTGV |



Instituto Politécnico de Viseu

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu

## AGRADECIMENTOS

Finda-se aqui uma trajetória pleiteada com certos percalços, transpostos por desafios, incertezas, mas também com alegrias e um sentimento de conquista e vitória, momentos em que quase desisti, contudo, uma vera força sempre se fazia presente e me impulsionava a continuar.

Por mais individual que seja a elaboração de uma dissertação de mestrado, nunca estive sozinho, sou permanentemente grato ao empenho, dedicação e paciência do meu orientador, Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida, que com toda sua mestria conduziu-me ao final desse percurso. Aos diversos professores que sem medir esforços compartilharam seus conhecimentos ao longo deste período.

E por fim, dedico primordialmente a pessoa que fez deste sonho realidade, que me completa, a que digo sem pestanejar ser minha alma gémea e que incessantemente esteve presente nos momentos árduos e gloriosos e sempre depositou fé ao longo da minha jornada, à minha esposa Ariane Cristina de Oliveira Ferreira, meus mais sinceros sentimentos de gratidão.

“Quando você quer muito uma coisa, todo o Universo conspira para que você consiga”

“Se você se dedicar a realizar seus sonhos, vai compreender a alma do mundo”

“No final tudo acaba bem. Se não está bem ainda, é porque ainda não acabou”.

Coelho, Paulo- *O alquimista*



## **RESUMO**

Numa época em que as preocupações humanas recaem cada vez mais na compatibilização de aspetos ambientais e económicos, é de suma importância minimizar os impactos gerados por construções não sustentáveis. A construção sustentável tem como objetivo garantir o mínimo impacto ao meio ambiente, sendo na extração da matéria prima, até mesmo no descarte ao fim da vida útil e com isso a diminuição do consumo de recursos, resultando em menos gases lançados a atmosfera.

Por outro lado, o foco terá sempre de estar a melhoria na qualidade de vida das populações. Nos países desenvolvidos, o sector dos edifícios é responsável por cerca de 40% no consumo de energia primaria. Buscando atender a um mercado cada vez mais exigente, novas diretrizes europeias têm sido publicadas na tentativa de homogeneizar os métodos e dar maior ênfase à otimização dos consumos e do desempenho térmico dos edifícios.

Visando maior comodidade e conforto no interior dos edifícios, diversas estratégias de reabilitação energética têm sido utilizadas. Porém em grande parte dos casos, durante a fase de conceção e projeto, não são levados em consideração os valores inerentes não só à implantação, mas também à manutenção e operação de tais projetos. Com base nestes pressupostos, realizou-se um estudo detalhado que vai além da reabilitação energética, não pensando somente em melhorar as condições de conforto, mas também analisar os valores investidos e custos de operação e manutenção ao longo da vida útil do projeto.

Nesse sentido, utilizou-se o software de simulação EnergyPlus com a extensão DesignBuilder, para a modelação do edifício “Casa das Andorinhas”, localizado na cidade de Coimbra. Tendo por base o modelo criado, foram simulados diversos cenários de reabilitação energética e os resultados foram utilizados como suporte à metodologia de Custo Ótimo e de Análise do Custo de Ciclo de Vida (LCC). Através desta metodologia, foi possível selecionar entre diversas alternativas, procurando uma escolha de reabilitação coerente, que melhor atendesse às necessidades, tanto energéticas quanto económicas.

Os resultados mostraram a importância que tem um estudo detalhado sobre a reabilitação térmica de um edifício e como esta pode contribuir para a eficiência do mesmo, visando não somente a economia de energia elétrica, mas também, uma melhor utilização dos recursos como otimizar os consumos com soluções de reabilitação.

## **PALAVRAS CHAVE**

Reabilitação Energética, Simulação Energética, Custo Ótimo, Ciclo de Vida.

## **ABSTRACT**

The rising demand in the civil construction has been taking great proportions in the political scenario around the world. In an era where human needs depend on the environment and on the economics, it is important that everyone involved in the process takes responsibility to minimize the impacts generated by non-sustainable constructions, in a sector responsible for 40% of the primary energy consume in Portugal. New European guidelines were created to attend a high-demand market and in the attempt to equal the methods and to give more emphasis about the consumption and performance of buildings.

In order to give more comfort in the interior of the buildings, new energy rehabilitation forms are being used, however in the majority of cases, the costs related to implantation and management of these projects are not considered and due to this situation new alternatives are often searched. These situations commonly don't give enough attention if the future costs related with electricity will be in accordance with the invested amount. So, these circumstances led to a detailed energy rehabilitation study, where the purpose was to study the invested amounts and how much it will be deducted over the period.

After all the considerations and with the help of the simulation software EnergyPlus with Design Builder extension, it was possible to recreate the Casa das Andorinhas building that is located in the city of Coimbra, Portugal. Various scenarios of energy rehabilitation were developed, based in the Life Cycle and Cost Optimum methodology and it was possible to reach a better rehabilitation choice that attended all necessities, both energetic and with a low cost.

The essential results are the importance of a detailed study on the rehabilitation of a building and how this can contribute to its efficiency, not only saving electricity, but also a better use of resources and optimizing spending on solutions of rehabilitation.

### **Key Words**

Energy Rehabilitation, Energetic Simulation, Cost Optimum, Life Cycle Cost.

# ÍNDICE GERAL

## Conteúdo

ÍNDICE GERAL .....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE QUADROS.....	viii
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.3 Estrutura do texto.....	2
2. Estado da arte.....	5
2.1 Energia e edifícios .....	5
2.2 Reabilitação energética .....	6
2.3 Soluções passivas na reabilitação .....	7
2.4 Enquadramento normativo e legal.....	10
2.5 Simulação térmica e energética.....	11
2.6 Metodologia do custo ótimo.....	12
2.6.1 Considerações iniciais.....	12
2.6.2 Abordagem ao ciclo de vida.....	13
2.6.3 Análise de custo de ciclo de vida.....	14
2.6.4 Vida útil.....	15
2.6.5 Aplicação da metodologia LCC .....	16
3. Metodologia .....	17
3.1 Fases de estudo .....	18
3.2 Caso de estudo .....	18
3.3 Modelo de simulação .....	19
3.4 Ganhos internos e ventilação.....	24
3.5 Características climáticas do local.....	24
3.6 Cenários de simulação .....	25
3.6.1 Cenário C1.....	26
3.6.2 Cenário C2.....	27

3.6.3	Cenário C3.....	27
3.6.4	Cenário C4.....	28
3.6.5	Cenário C5.....	28
3.6.6	Cenário C6.....	28
3.6.7	Cenário C7.....	29
4.	Apresentação e discussão dos resultados.....	30
4.1	Considerações iniciais.....	30
4.2	Resultados da Fase 1 .....	31
4.2.1	Cenário C1- Situação atual.....	31
4.2.2	Cenário C2- Isolamento pela cobertura .....	32
4.2.3	Resultados do cenário C3- Isolamento pelo exterior .....	34
4.2.4	Resultados do cenário C4- Isolamento pelo interior.....	35
4.2.5	Resultados do cenário C5- Alteração dos vãos envidraçados .....	37
4.2.6	Resultados do cenário C6- Isolamento no piso da cave e piso do primeiro pavimento .....	38
4.2.7	Resultados do cenário C7– Combinação C4+C5+C6.....	40
4.3	Avaliação do conforto térmico .....	41
4.4	Consumo energético.....	42
4.5	Custos de investimento e manutenção .....	43
4.6	Aplicação da metodologia LCC.....	44
4.7	Resultados da Fase 2.....	45
5.	Conclusões.....	49
5.1	Trabalhos futuros.....	50
	<b>Referências</b> .....	<b>52</b>
	<b>Anexo</b> .....	<b>55</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Percurso do sol ao longo do ano (Gonçalves, H.; Graça, J. Mariz. Conceitos bioclimáticos para os edifícios em Portugal.).....	7
Figura 2- Percurso do sol no inverno.....	8
Figura 3- Análise de custos de ciclo de vida (adaptado de Kreith & Goswami, 2007).....	15
Figura 4-Desempenho de uma edificação (Adaptado da NBR 15575-1, 2013).....	15
Figura 5- Metodologia de investigação.....	17
Figura 6- Alçado principal do edifício Casa das Andorinhas .....	19
Figura 7 – Vista 3D do edifício .....	20
Figura 8- Cave .....	20
Figura 9- Cave modelada .....	20
Figura 10- R/C .....	21
Figura 11- R/C modelado.....	21
Figura 12- Piso 1.....	21
Figura 13- Piso 1 modelado.....	21
Figura 14- Piso 2.....	22
Figura 15- Piso 2 modelado.....	22
Figura 16- Características dos envidraçados .....	23
Figura 17- Temperatura exterior.....	25
Figura 18- Descrição dos elementos do cenário C2 .....	27
Figura 19- Descrição dos elementos do cenário C3 .....	27
Figura 20- Descrição dos elementos do cenário C4 .....	28
Figura 21 – Descrição do Cenário C6 – Cave .....	29
Figura 22- Descrição dos elementos do cenário C6 .....	29
Figura 23- Variação da temperatura no cenário C1 sem aquecimento .....	31
Figura 24- Variação da temperatura no cenário C1 com aquecimento.....	32
Figura 25- Consumo energético do cenário C1 .....	32
Figura 26- Variação da temperatura no cenário C2 sem aquecimento .....	33
Figura 27-Variação da temperatura do cenário C2 com aquecimento.....	33
Figura 28- Consumo energético anual do cenário C2.....	34
Figura 29- Variação da temperatura C3 sem aquecimento .....	34
Figura 30-Variação da temperatura do cenário C3 com aquecimento.....	35
Figura 31- Consumo energético anual do cenário C3.....	35
Figura 32-Variação da temperatura do cenário C4 sem aquecimento .....	36
Figura 33- Variação da temperatura do cenário C4 com aquecimento.....	36
Figura 34- Consumo energético anual do cenário C4.....	37
Figura 35- Variação da temperatura do cenário C5 sem aquecimento .....	37
Figura 36- Variação da temperatura do cenário C5 com aquecimento.....	38
Figura 37- Consumo energético anual do cenário C5.....	38
Figura 38- Variação da temperatura do cenário C6 sem aquecimento .....	39
Figura 39- Variação da temperatura do cenário C6 com aquecimento.....	39

Figura 40- Consumo energético anual do cenário C6.....	40
Figura 41- Variação da temperatura do cenário C7 sem aquecimento .....	40
Figura 42- Variação da temperatura do cenário C7 com aquecimento.....	41
Figura 43- Consumo energético anual do cenário C7.....	41
Figura 44- Custo energético em cada cenário .....	43
Figura 45- Resultados da metodologia LCC fase 1 .....	45
Figura 46- Curva de custo ótimo na otimização do cenário C4 .....	46
Figura 47- Curva custo ótimo na otimização do cenário C7 .....	48

## **Lista de Abreviaturas**

ACCV- Análise do Custo do Ciclo de Vida

AVAC- Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

BEE- Bureau of Energy Efficiency

CEN- Comitê Europeu de Normalização

CCE- Custo da Energia Conservada

EM- Estados-Membros

EPBD-Energy Performance of Buildings Directive

INE- Instituto Nacional de Estatística

IPCC- Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

LCC- Life Cycle Cost

LCC Model- Life Cycle Cost Model

LDA- Life Data Analysis

LNEC- Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MUPV- Modified Present Uniform Value

PIB- Produto Interno Bruto

RCCTE- Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

RQSECE- Regulamento da Qualidade dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

RSECE- Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

SCE-Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar nos Edifícios

UPV -Present Uniform Value

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1- Estratégias bioclimáticas (Gonçalves, H.; Graça, J. Mariz. Conceitos bioclimáticos para os edifícios em Portugal.) .....	9
Quadro 2- Características dos materiais.....	23
Quadro 3- Características do clima de Coimbra.....	25
Quadro 4 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de acordo com o DL 95/2019 .....	26
Quadro 5- Fase 1, cenários C1 a C7 .....	26
Quadro 6- Percentagem de desconforto térmico .....	42
Quadro 7- Custos anuais com eletricidade .....	42
Quadro 8 - Custos iniciais e de manutenção .....	43
Quadro 9- Resultados da aplicação da metodologia LCC.....	44
Quadro 10- Resultados da aplicação da metodologia LCC na otimização do cenário C4.....	46
Quadro 11- Resultados da aplicação da metodologia LCC na otimização do cenário C7.....	47

# 1. Introdução

## 1.1 Enquadramento

A sustentabilidade ambiental tem sido um dos temas mais abordados dos últimos anos. A preocupação com o consumo energético e suas fontes de extração tem sido muito debatida nos países mais desenvolvidos.

Estas preocupações na esfera política, conduziram à criação e implementação de normas associadas à eficiência energética dos edifícios. Trata-se de um assunto especialmente relevante na medida em que os edifícios se englobam entre os setores que mais consomem recursos naturais. Neste contexto, a preocupação com a eficiência energética nas edificações surge como uma necessidade eminente, tanto no projeto de novas edificações, quanto na reabilitação de edifícios existentes.

As exigências crescentes dos utilizadores dos edifícios, juntamente com as inovações no domínio das tecnologias na construção, fazem com que haja cada vez mais atenção no quesito conforto térmico. Essas exigências vêm causando o aumento na implementação de sistemas de climatização em edifícios residenciais e comerciais, o que confirma a necessidade de pensar em edifícios economicamente sustentáveis, associando o conforto térmico e a uma minimização dos consumos energéticos.

Em contexto de reabilitação, o desafio é ainda mais complexo e exige da parte dos técnicos uma abordagem holística que combine as componentes económica e técnica. Nesse sentido, a utilização a Análise de Custos de Ciclo de Vida (LCC), como ferramenta de apoio na tomada de decisão, é uma alternativa cada vez mais procurada.

## 1.2 Objetivos

Devido a necessidade em minimizar o desconforto térmico em construções, cada vez mais produtos e tecnologias são desenvolvidas com o intuito de proporcionar aos utentes maior comodidade e bem-estar em edificações, com isso o gasto com consumos energéticos atingem valores cada vez mais elevados ao longo das últimas décadas. Investimentos significativos na reabilitação que por vezes, acabam por não terem o devido retorno económico ao longo dos anos.

Este trabalho tem por objetivo analisar diferentes possibilidades de reabilitação energética de um edifício existente, tendo por base uma análise custo-benefício das soluções alternativas. Pretende-se minimizar os consumos com aquecimento, visando um investimento coerente e preciso, que ao longo de um período possa ter um retorno económico, isto é, um equilíbrio entre o valor investido e a poupança conseguida ao longo de um determinado período. Para tal, são realizadas simulações energéticas do cenário atual e de cenários de reabilitação. Por outras palavras, pretende-se um estudo de viabilidade técnico-económica de um projeto de reabilitação energética. Nesse sentido, serão realizadas as seguintes tarefas:

- Simulação energética da situação atual do edifício (cenário base);
- Compilação de soluções de reabilitação energética e definição dos cenários de reabilitação;
- Simulação energética dos cenários de reabilitação;
- Análise técnico-económica dos cenários de reabilitação.

## 1.3 Estrutura do texto

Este trabalho está dividido em cinco capítulos.

Capítulo 1 – Introdução. Neste capítulo é realizada uma breve abordagem no cenário de conforto térmico em Portugal, que aponta para um estudo sobre o desempenho das reabilitações energéticas;

Capítulo 2 – Estado da arte. Foram reunidas ideias de diferentes autores através de pesquisa bibliográfica numa compilação de fatores que veem a contribuir para a eficiência de uma reabilitação energética com a utilização das metodologias inerentes;

Capítulo 3 – Metodologia. São discutidas diversas possibilidades de reabilitação e criados diferentes cenários de simulações, cada um com sua particularidade na tentativa de encontrar a melhor solução para este caso;

Capítulo 4 – Resultados e discussões. Este capítulo foi subdividido em 3 fases, cada uma abordando os resultados extraídos de cada cenário de reabilitação e apontando a melhor alternativa com a aplicação das metodologias custo ótimo e LCC.

Capítulo 5 – Conclusões. Capítulo em conclusão com os resultados obtidos através das diversas simulações e metodologias aplicada ao longo deste trabalho e propostas para trabalhos futuros.

Anexos.



## **2. Estado da arte**

### **2.1 Energia e edifícios**

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), as emissões de gases que influenciam no efeito estufa aumentaram 70% de 1970 a 2004, (ipcc.ch, 2021) o que confere um carácter de urgência no desenvolvimento de técnicas e instrumentos inovadores pensados com o objetivo de mitigar o problema.

Tendo em vista que os edifícios são responsáveis por cerca de um terço das emissões de gases, contribuindo assim de forma importante para as alterações climáticas, nos últimos anos tem aumentado muito o número de estudos sobre a eficiência energética dos edifícios. Vários apontam para o elevado impacto da reabilitação energética na redução das necessidades de energia elétrica (Brandão de Vasconcelos, Pinheiro, Manso, & Cabaço, 2016).

Os edifícios e as mudanças climáticas acabem por ter uma relação causa-efeito, uma vez que os usos de energia dos edifícios contribuem com as mudanças climáticas e estas levam a um maior uso de energia. É possível ver o impacto das mudanças climáticas com o aumento das necessidades entre o aquecimento e o arrefecimento dos edifícios.

A maioria dos estudos tem como objetivo melhorar o desempenho energético das edificações e contribuir para projetar edifícios mais resistentes aos fenómenos climáticos. Existe, portanto, uma necessidade de metodologias que otimizem o potencial de economia de energia, com o intuito de que os edifícios ofereçam maior resistência ao clima e conseqüentemente, minorar os consumos futuros.

## 2.2 Reabilitação energética

Antes de falar sobre a reabilitação energética, é importante perceber a importância sobre a eficiência energética, que consiste na relação entre a quantidade de energia aplicada numa atividade e aquela que é disponibilizada para a sua realização, o que se reflete em fazer mais usando menos, mantendo o conforto e a qualidade.

No que se refere à economia de energia elétrica, a eficiência energética dos edifícios torna-se um fator predominante neste quesito. Num edifício de elevada eficiência energética é evidente a redução nas emissões de carbono e também na contenção dos custos de operação e exploração, o que sustenta a importância dos estudos sobre os efeitos da reabilitação energética no desempenho de uma edificação.

A reabilitação energética é uma intervenção que confere ao edifício uma qualidade térmica e energética superior à que possuía na sua construção original e/ou estado atual, deteriorado ao longo dos anos. No âmbito de uma reabilitação energética devem ser analisadas as possibilidades de incluir várias medidas de eficiência numa edificação por meio de intervenções tais como: a colocação de isolantes térmicos, sombreamento, ventilação e iluminação natural, troca de equipamentos obsoletos e instalação de painéis solares térmicos e fotovoltaicos, entre outras.

Assim, a reabilitação energética deve incluir a caracterização da situação atual da edificação, a identificação dos possíveis pontos de intervenção e a proposta de implementações de medidas que melhorem o desempenho nos pontos críticos identificados. Para que esta seja eficaz, devem ser analisados alguns pontos de intervenção:

- Envolvente, opaca ou translúcida;
- Equipamentos;
- Energias renováveis;
- Ocupação.

Ao nível da envolvente, a reabilitação energética permite não só ganhos significativos em termos de redução das necessidades energéticas, mas também contribui decisivamente para a manutenção das condições de conforto térmico e para a prevenção de ocorrência de patologias. Neste grupo de medidas estão englobadas a proteção térmica nas paredes, coberturas e pavimentos, e a intervenção nos vãos envidraçados.

Em relação aos equipamentos, trata-se da implantação de sistemas de aquecimento e/ou arrefecimento e até mesmo a substituição de equipamentos obsoletos por outros mais eficientes, visando a redução no consumo energético. Porém estas medidas podem ter algumas desvantagens, nomeadamente os custos de investimento, operação e manutenção que podem ser significativamente elevados, além de terem uma certa dependência da envolvente do edifício para que seu rendimento seja mais eficiente e assim possa trazer resultados positivos a serem refletidos nos consumos energéticos.

No tocante das energias renováveis, inclui-se, por exemplo, a introdução de sistemas solares para apoio à produção de Águas Quentes Sanitárias (AQS). Estas medidas habitualmente acarretam altos custos de investimentos e manutenção, pelo que a sua viabilidade económica deve ser sempre avaliada.

## 2.3 Soluções passivas na reabilitação

Cada edifício possui as suas particularidades. Por exemplo, a proporção da exposição solar é uma condição que tem um enorme impacto nas necessidades de aquecimento e arrefecimento do seu interior, o que pode, desde logo, condicionar a escolha de diferentes tipos de medidas a serem tomadas na sua reabilitação.

É de grande importância conhecer os diferentes percursos do sol ao longo do dia nas diferentes estações do ano para com isso ter um melhor aproveitamento dos ganhos solares ou até mesmo restringi-los, caso sua incidência seja inconveniente, (Gonçalves & Graça, 2004). A Figura 1 mostra o percurso do sol ao longo do ano.

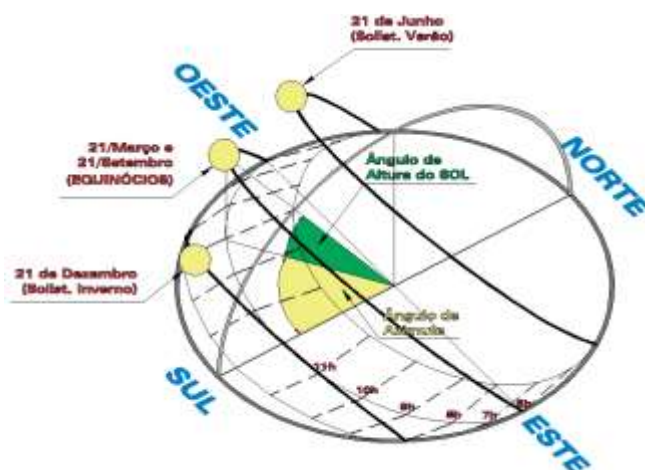


Figura 1- Percurso do sol ao longo do ano (Gonçalves, H.; Graça, J. Mariz. Conceitos bioclimáticos para os edifícios em Portugal.)

A dimensão e a direção em que se encontram os vãos envidraçados em relação ao sol é de especial importância. Vãos orientados a sul receberão maior incidência de raios solares, fator que será de grande contributo no inverno, uma vez que permitirá maior captação dos raios solares, gerando ganhos internos que podem ser muito relevantes, para além de ser uma enorme fonte de luz natural. A Figura 2 mostra o percurso do sol no inverno, onde uma fachada orientada a Sul tem maior incidência solar para o edifício.

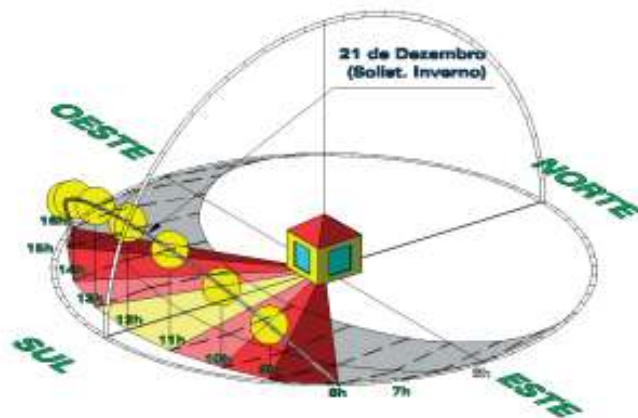


Figura 2- Percurso do sol no inverno

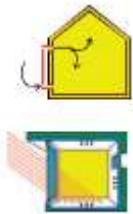







Existe uma vasta gama de medidas passivas que podem ser implementadas nos edifícios com o objetivo de ajudar a manter o conforto interno mais agradável no inverno, nomeadamente: aplicação de materiais isolantes nos elementos construtivos da envolvente (paredes e cobertura), aplicação de caixilharias com corte térmico, vãos envidraçados com propriedades térmicas otimizadas, paredes de trombe, parede massiva, colunas d'água, espaço estufa ou coletor de ar.

No verão é possível reduzir e/ou controlar a incidência solar através de dispositivos de sombreamento exterior, restringindo os raios solares, cujo impacto também pode ser minimizado através de estratégias adequadas de ventilação natural, além do isolamento térmico nos elementos construtivos.

Na concepção de um edifício, a adoção de certas estratégias afetará significativamente o desempenho desse edifício em termos do conforto térmico no seu interior e, conseqüentemente, dos seus ocupantes, estas estratégias que têm em atenção as condições climáticas do local e da sua interação com o clima, proporcionando a adequação do edifício ao clima, designam-se geralmente por Estratégias Bioclimáticas, que são no fundo regras gerais que se destinam a orientar a concepção do edifício tirando partido das condições climáticas de cada local (Gonçalves & Graça, 2004).

O Quadro 1 mostra uma síntese das estratégias bioclimáticas mais comuns, incluindo o seu impacto no desempenho do edifício.

Quadro 1- Estratégias bioclimáticas (Gonçalves, H.; Graça, J. Mariz. Conceitos bioclimáticos para os edifícios em Portugal.)

Estação	Estratégias Bioclimáticas	Sistemas passivos	
Inverno- estação de aquecimento	Promover ganhos solares	Todos os sistemas de ganho são adequados para os tipos de edifícios mais convenientes	
	Restringir perdas por condução	Isolar envolvente	
	Promover inercia forte	Paredes pesadas com isolamento	
Verão- estação de aquecimento	Restringir ganhos solares	Sombrear envidraçados	
	Restringir ganhos por condução	Isolar envolvente	
	Ventilação	Ventilação transversal Tubos enterrados	 
	Promover inércia forte	Paredes pesadas com isolamento	

## 2.4 Enquadramento normativo e legal

Atualmente, cerca de 40% da energia elétrica produzida pela União Europeia está destinada ao mercado imobiliário, sendo assim, os edifícios são os maiores consumidores de energia da Europa, o que torna o setor responsável por cerca de 36% do CO<sub>2</sub> emitido para a atmosfera (Comissão Europeia, 2013, p.4).

Cerca de 35% dos edifícios da EU foram construídos há mais de 50 anos e 75% são considerados como energeticamente ineficientes. Por outro lado, relativamente aos sistemas de climatização, de acordo com o Bureau of Energy Efficiency (BEE), aumentar o setpoint de temperatura de um sistema de aquecimento em apenas 1 grau Celsius pode trazer uma economia em torno dos 6% no consumo de eletricidade. A BEE também afirmou que o potencial geral de conservação de energia através deste tipo de medidas é estimado em 20 mil milhões anualmente.

A reabilitação dos edifícios existentes pode gerar uma expressiva economia energética, o que levaria, em termos de balanço global, a uma redução do consumo de eletricidade de aproximadamente 6% e a uma redução na emissão de CO<sub>2</sub> em torno de 5%. Além disso, as políticas de incentivo à reabilitação energética dos edifícios acabam também por contribuir significativamente para a economia dos países envolvidos, uma vez que a indústria da construção é responsável por cerca de 9% do PIB da Europa e promove aproximadamente 18 milhões de empregos diretos.

Em 1991, Portugal teve seu primeiro regulamento focado no desempenho térmico dos edifícios, tratava-se do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), que tinha por objetivo melhorar as condições de conforto interior nos edifícios, de modo a garantir um racional consumo de energia. No ano seguinte entrou em vigor o Regulamento da Qualidade dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RQSECE) e em 1998 visando a racionalização energética, surgiu o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE), onde foram estabelecidas regras para projetos e instalação de sistemas e que tinha como prioridade a racionalização de energia.

Buscando uma uniformização na metodologia para o cálculo da energia consumida e desempenho dos edifícios, foram desenvolvidas e publicadas uma série de normas, entre elas, a Norma Europeia EN 15251, cujo desenvolvimento este suportado num mandato conferido ao Organismo Europeu de Normalização (CEN) pela Comissão Europeia e Associação Europeia de Comércio Livre e que suporta os requisitos essenciais da União Europeia, nomeadamente da Diretiva 2002/91/CE, Energy Performance of Buildings Directive (EPBD), que é considerada um ponto de viragem em termos legislativos relativamente ao desempenho energético dos edifícios.

A norma EN 15251 estabelece parâmetros ambientais interiores para a conceção e avaliação do desempenho energético dos edifícios, visando a qualidade do ar interior, o ambiente térmico, a

iluminação e a acústica, abrangendo diversas tipologias de construção, tais como habitações, escritórios, comércio, edifícios educacionais e de serviços, hotéis e hospitais, entre outros.

A Diretiva Europeia sobre o Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD) tinha como objetivo primordial estabelecer critérios para promover a melhoria do desempenho energético em edifícios. Para tal, obrigava os países da União Europeia a:

- Desenvolver uma metodologia para o cálculo do desempenho energético integrado dos edifícios e sistemas de AVAC, incluindo sistemas de aquecimento, arrefecimento, ventilação e iluminação;
- Estabelecer requisitos mínimos de desempenho energético aos edifícios novos;
- Aplicar as exigências aos edifícios existentes;
- Desenvolver um sistema de certificação energética de edifícios;
- Impor a obrigatoriedade de inspeção regular dos sistemas de aquecimento e ar condicionado.

Em Portugal, o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar nos Edifícios (SCE) foi instituído pelo Decreto-Lei n.º 78/2006, com o propósito de assegurar as condições de eficiência energética dos edifícios, além de promover a utilização de sistemas de energias renováveis, e garantir a qualidade do ar interior nos edifícios. Neste seguimento, verifica-se a obrigatoriedade da emissão de um certificado energético, que classifica o desempenho energético e a qualidade do ar interior nos edifícios.

Posteriormente, as crescentes preocupações com a sustentabilidade ambiental levaram a uma revisão da legislação, aumento das exigências. Assim, a Diretiva n.º 2010/31/EU apresenta o conceito de edifícios com necessidades quase nulas de energia (NZEB), ou seja, edifícios que se caracterizam por um elevado desempenho energético, com necessidades de energia quase nula ou valores insignificantes, idealmente provenientes de energias renováveis. A Diretiva previa a obrigatoriedade desde o final de 2018 para todos os edifícios públicos novos e a partir do final de 2020 todos os novos edifícios alcançarem o estado NZEB (Parlamento Europeu, 2010). Esta versão da Diretiva incluiu ainda a obrigatoriedade de realizar análises de custo ótimo para suportar a escolha das medidas de melhoria do desempenho energético, reforçando assim a importância de avaliar o impacto económico dos investimentos numa lógica de ciclo de vida.

## **2.5 Simulação térmica e energética**

O EnergyPlus é uma das ferramentas mais populares para a simulação térmica e energética de um edifício. O programa não dispõe de uma interface gráfica amigável, pelo que têm sido lançados no mercado alguns programas que desempenham essa função, ou seja, permitem a criação do modelo de forma mais intuitiva e executam a simulação com recurso ao algoritmo do EnergyPlus. Uma dessas interfaces gráficas é o software DesignBuilder.

O DesignBuilder é um programa que permite efetuar simulações higrótérmicas de edifícios com alguma facilidade, tornando-se uma ferramenta com grande potencial para a avaliação do comportamento térmico e energético de edifícios. O programa permite efetuar simulações confiáveis, com resultados validados por normas internacionais como a ASHRAE 140, possuindo uma vasta gama de variáveis de entrada definidas pelo utilizador, tais como a geometria do edifício, características climáticas do local (ficheiro climático), ganhos internos, ventilação, equipamentos AVAC, etc.

Estes tipos de programas são frequentemente utilizados durante a fase de projeto de edifício pois desta forma o projetista pode testar os materiais e soluções que pretende utilizar no projeto, e também testar outras alternativas, de modo a verificar a solução mais viável para cada caso.

O primeiro passo da simulação consiste na modelação 3D do objeto em estudo, o que permite uma visão mais realista dos componentes construtivos, tais como a espessura e materiais constituintes dos elementos construtivos e dos vãos. A partir deste modelo já é possível, por exemplo, realizar estudos de sombreamento, visualizando-se as sombras provenientes das edificações que circundam o edifício e a posição do sol.

Em contexto de reabilitação de edifícios, os programas de simulação térmica e energética são ferramentas fundamentais numa análise de viabilidade técnico-económica, nomeadamente permitindo as seguintes avaliações:

I. Caracterização do edifício nas atuais condições:

- Simulação anual com e sem sistemas de climatização, permitindo avaliar quer as condições de conforto, quer as necessidades energéticas do edifício;

II. Cenários de reabilitação energética:

- Simular o impacto térmico e energético de alternativas de reabilitação, comparando-as ao cenário atual.

## **2.6 Metodologia do custo ótimo**

### **2.6.1 Considerações iniciais**

É fundamental compreender a aplicabilidade da metodologia do custo ótimo. Para tal, o primeiro passo é saber diferenciar despesas de custos. Saber o que representam estes termos é essencial para uma gestão ativa do capital investido em cada operação. Assim:

- Despesas: entende-se por despesa todos os valores gastos em bens e serviços inerentes à manutenção da vida útil do sistema;
- Custos: valor diretamente ligado à produção/installação de um sistema.

A gestão otimizada destes investimentos a fim de promover a eficiência energética de uma edificação denomina-se por Custo Ótimo. Esta metodologia é baseada numa avaliação

económica, como objetivo de avaliar se o investimento traz reais benefícios económicos, sejam imediatos ou a longo prazo.

Existem vários métodos para a realização de uma análise económica de um investimento, desde a análise de retorno do investimento (MARTINAITIS et al., 2004) até à análise do custo do ciclo de vida, passando pelo custo-benefício (LEE et al., 2003) ou o custo da energia conservada (ROSENFELD, 1996). A metodologia da Análise do Custo do Ciclo de Vida, ACCV, que surgiu na década de 1960, foi rapidamente adaptada à avaliação de investimentos na reabilitação energética de edifícios (GLUCH e BAUMANN, 2004).

Esta metodologia consiste na análise de diferentes alternativas de investimento para determinar a sua eficiência ao longo do ciclo de vida, ou seja, considerando os gastos atuais e futuros. O cálculo do custo envolve os valores iniciais investidos, custos de reposição e funcionamento (custos de manutenção e operação, eletricidade...) e, quando aplicável, custos de desmantelamento e valor residual dos elementos.

As metodologias de análise do custo do ciclo de vida são caracterizadas por uma abordagem racional, onde as diversas informações são padronizadas em uma linguagem comum. Avaliações individuais de ciclo de vida de materiais e de edificações podem ser interligadas por esta linguagem. Estas avaliações são dinâmicas, evoluindo à medida que o conhecimento na área também evolui, auxiliando tomadores de decisão que visam adotar uma estratégia em comum (PEUPORTIER, 2001 e GLUCH e BAUMANN, 2004).

Tratando-se de uma reabilitação energética, existe uma ampla gama de opções, como por exemplo em termos de técnicas de isolamento, cabendo ao profissional analisar e decidir qual a melhor opção. Obviamente que quanto mais possibilidades, maior é a complexidade da análise da ACCV.

### **2.6.2 Abordagem ao ciclo de vida**

O ciclo de vida de uma edificação é constituído por várias fases, que vão desde a conceção até à demolição. Assim, a análise de ciclo de vida de um investimento numa edificação inclui as seguintes fases:

- **Conceção ou viabilidade** – nesta primeira etapa deve ser levantado um plano de ações junto ao cliente/investidor, estabelecendo as reais necessidades a que se destina, dimensões, materiais, padrão de acabamento e necessidades energéticas, são discutidos a formulação do empreendimento e programa de necessidades, estudos preliminares, estimativa de custos e estudo de viabilidade técnica, onde se engloba a fase de projeto. Esta é considerada uma etapa de enorme importância, pois qualquer decisão equivocada, poderá resultar na reformulação do projeto inicial, o que terá repercussão ao longo do ciclo de vida;
- **Construção** – Neste ponto o projeto começa a ganhar forma e é também onde surgem os maiores impactos ambientais; nesta fase utilizam-se bens não renováveis como matéria prima, além do necessário consumo de combustíveis fósseis e emissões de gases nocivos

para a atmosfera; nesta fase surgem ainda os resíduos que são gerados durante a construção;

- **Manutenção** – Cada etapa possui seu grau de importância no ciclo de vida, porém esta acaba por se tornar a mais duradoura, uma manutenção preventiva e corretiva ativa é a que permite prolongar mais o seu tempo de vida útil;
- **Reabilitação** – Quando a manutenção corretiva já não se apresenta tão eficaz, entra em cena a reabilitação, necessária quando o edifício perde a sua funcionalidade necessária para a operação ou oferece riscos aos utentes ou pessoas que circulam nas proximidades, nesta etapa dá-se início a um estudo semelhante ao da concepção, procurando as possíveis deficiências, que podem ser causadas por falhas nos processos ou mal uso de ocupação, e com isso corrigir as falhas encontradas e consequentemente dar melhorar e modernizar o edifício, adequando-o às necessidades atuais de conforto;
- **Demolição** – Esta é a fase em que termina o ciclo de vida de uma edificação; o processo de demolição pode ser manual ou mecânico, por meio de implosão ou desconstrução; um problema grave é a quantidade de resíduos gerados, cuja deposição tem de ser controlada para evitar enormes impactos ambientais.

### **2.6.3 Análise de custo de ciclo de vida**

O objectivo da avaliação económica de diferentes cenários de reabilitação é de apoiar o decisor na escolha entre diferentes alternativas, optando pelas mais rentáveis do ponto de vista custo/benefício. Dado que os investimentos em causa são realizados numa perspectiva de longo prazo, a avaliação económica deve considerar os custos e benefícios durante todo o ciclo de vida do elemento construtivo. Assim, deve ser contabilizado o efeito temporal do dinheiro, convertendo todos os custos no seu valor atual. (Almeida R. M., 2011).

A análise de custos de ciclo de vida é uma metodologia que tem como propósito otimizar os custos totais de um determinado produto através da identificação e quantificação de todos os custos incorridos durante a sua vida útil (White, et al., 2010). Este tipo de análise é especialmente adequado para apoiar a escolha entre diferentes investimentos de reabilitação com o intuito de melhorar o desempenho energético dos edifícios (Gustafsson, 2000; Hasan, et al., 2008). A Figura 3 ilustra graficamente o princípio desta metodologia.

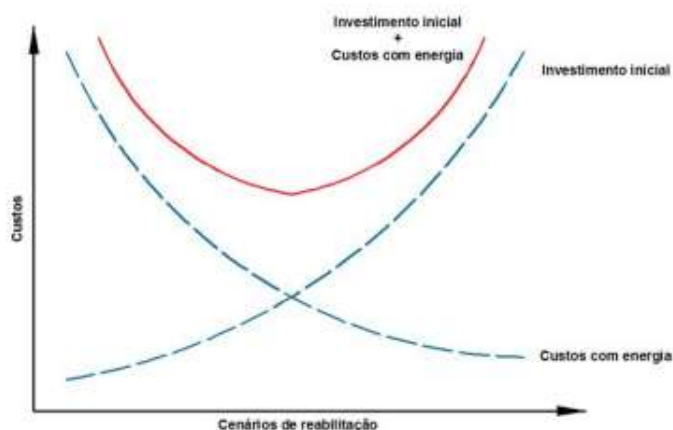


Figura 3- Análise de custos de ciclo de vida (adaptado de Kreith & Goswami, 2007)

### 2.6.4 Vida útil

Definida pela ISO 13823 (2008), a vida útil consiste em mensurar a expectativa de duração de uma estrutura ou suas partes, dentro de limites de projeto admissíveis durante o seu ciclo de vida, como o período efetivo de tempo durante o qual uma estrutura ou qualquer de seus componentes satisfazem os requisitos de desempenho do projeto, sem ações imprevistas de manutenção ou reparo.

Definindo-se a vida útil, trata-se do período de tempo compreendido entre o início de operação e uso de uma edificação até ao momento em que o seu desempenho deixa de atender às exigências do utilizador, sendo diretamente influenciada pelas atividades de manutenção e reparo e pelo ambiente de exposição. Na Figura 4 pode-se verificar a influência das ações de manutenção na vida útil de uma edificação, as quais são necessárias para garantir ou prolongar a vida útil de projeto. (POSSAN, DEMOLINER, 2013).

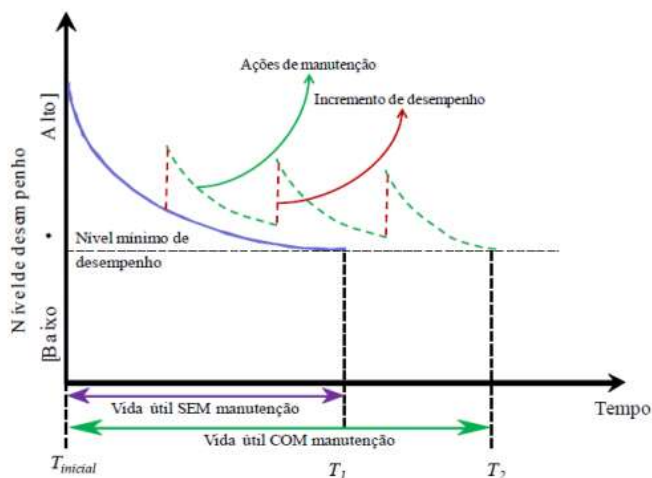


Figura 4-Desempenho de uma edificação (Adaptado da NBR 15575-1, 2013)

### 2.6.5 Aplicação da metodologia LCC

Esta fase terá uma abordagem baseada na análise técnico-económica, onde deve-se levar em consideração todos os custos a um determinado período.

A partida é feita uma coleta de dados baseando-se no modelo a ser executado, a aplicabilidade do método LCC, dá-se pelo seguimento da fórmula:

$$LCC = I + Subs + E + OM\&R$$

Onde:

- LCC = Valor atual do custo do ciclo de vida de um determinado projeto (€);
- I = Valor atual do investimento inicial (€);
- Subs = Valor atual dos custos de substituição (€);
- Res = Valor atual dos valores residuais incluindo os custos de desmantelamento (€);
- E = Valor atual dos custos com energia (€);
- OM&R = Valor atual dos custos de operação, manutenção e reparação não relacionados com os combustíveis (€).

### 3. Metodologia

Este trabalho consiste na modelação e conseqüente definição dos elementos construtivos do modelo de um edifício caso de estudo, onde serão analisadas alternativas de reabilitação térmica e energética, através de uma análise de custos no ciclo de vida, que servirá de apoio à tomada de decisão. A Figura 5 mostra, esquematicamente, a metodologia adotada ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

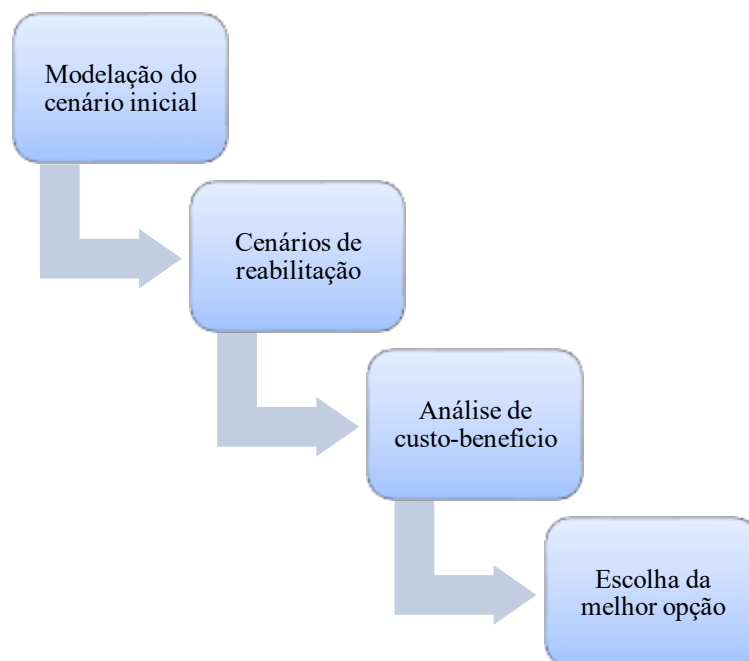


Figura 5- Metodologia de investigação

Recorrendo ao software DesignBuilder foram criados vários modelos de simulação, com diferentes sistemas construtivos, e, em sequência, foi realizada a avaliação das alternativas de intervenção em termos de impacto no consumo energético.

Em conformidade com a metodologia ACCV(LCC), fez-se um levantamento quantitativo e qualitativo dos dados necessários, tais como:

- Custos da intervenção;
- Custo com manutenção;
- Gastos com eletricidade;
- Tempo de análise;
- Amortização.

### 3.1 Fases de estudo

Para facilitar a interpretação dos resultados e tendo em conta o número elevado de simulações que foram realizadas, este trabalho foi subdividido em duas fases de estudo, cada uma com objetivos específicos, nomeadamente:

- Fase 1 – Avaliação do impacto de diferentes alternativas de intervenção no desempenho energético e no comportamento térmico do edifício, onde serão analisadas diversas alternativas com o objetivo de encontrar a que apresente resultados mais positivos;
- Fase 2 – Otimização das duas alternativas que apresentaram resultados mais interessantes no decorrer da Fase 1.

### 3.2 Caso de estudo

O edifício a ser estudado trata-se de uma edificação localizado em Coimbra, datada dos finais da segunda década do século XX, que inicialmente teve como funcionalidade uma moradia. Durante a década de 40, teve a sua aplicabilidade alterada, tornando-se um estabelecimento de ensino, estendendo-se esta função por pouco mais de 40 anos.

Em 1989 o edifício encontrava-se em alto grau de degradação e foi adquirido pelo Instituto Nacional de Estatística (INE) e em 8 de julho de 1991 teve como data de inauguração do conhecido “Casa das Andorinhas” e no início de 2000, devido ao crescimento ocupacional do imóvel, ocorreu outra intervenção, que incluía alterações na fachada, pintura e substituição das caixilharias.

A construção não possui sistemas centralizados de aquecimento e/ou arrefecimento. O controle de temperatura ocorre apenas em alguns espaços do edifício, através de alguns aparelhos de ar condicionado do tipo split e não existe nenhum tipo de equipamento que permita a renovação de ar. Em termos construtivos, as paredes são em pedra, sem qualquer tipo de isolamento térmico.

Constituído por cave, rés do chão e mais dois pavimentos superiores, devido ao decorrer do tempo e por algumas deficiências construtivas, são observáveis algumas anomalias e patologias, tais como, pontes térmicas, condensações superficiais, bolores, entre outras. A Figura 6 mostra o alçado principal do edifício Casa das Andorinhas.



Figura 6- Alçado principal do edifício Casa das Andorinhas

### 3.3 Modelo de simulação

Para apoiar a modelação do edifício, quer geométrica, quer em termos construtivos, foi consultado um relatório sobre o estado de conservação do imóvel produzido em 2019 (Negrão, Almeida, Vicente & Ferreira, 2019). A Figura 7 representa a modelação do edifício, demonstrando o alçado principal/ lateral direito.

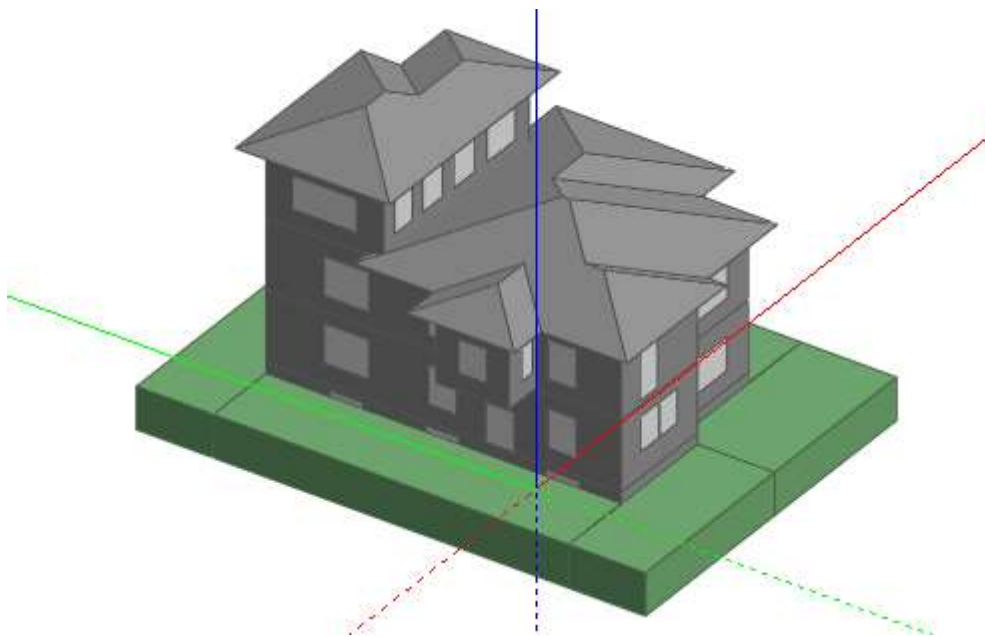


Figura 7 – Vista 3D do edifício

A informação contida no relatório foi fundamental para o desenvolvimento do modelo, tal como evidenciado nas Figuras 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15.

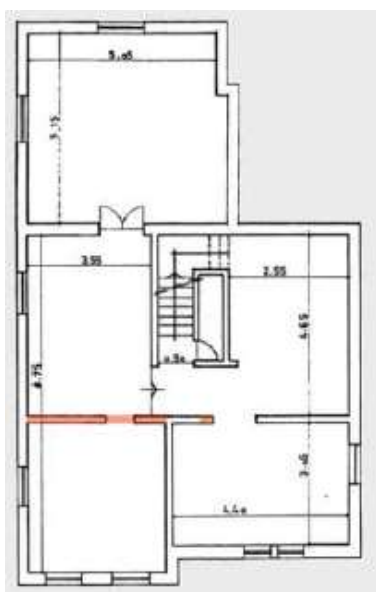


Figura 8- Cave

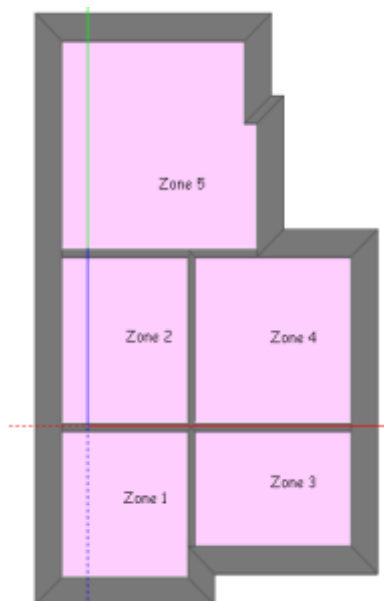


Figura 9- Cave modelada



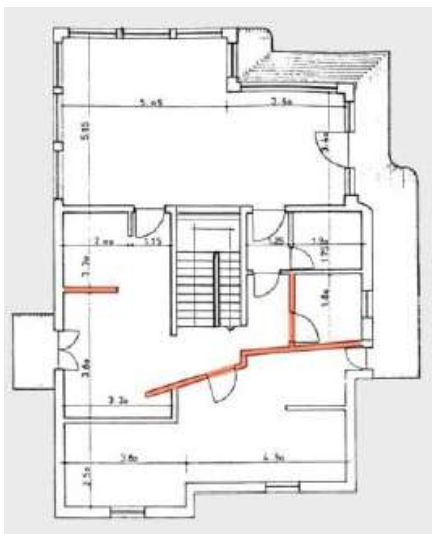


Figura 14- Piso 2

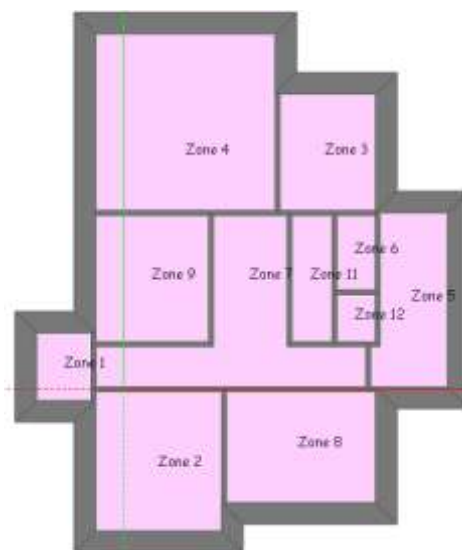






Figura 15- Piso 2 modelado

As paredes exteriores são em pedra calcária fragmentada, os pavimentos do piso da cave têm um revestimento em betonilha, predominantemente em madeira, e os demais são em betão revestidos com soalho de madeira. A cobertura é composta por telha cerâmica tipo marselha, como detalhado no Quadro 2, onde também se apresentam os respetivos coeficientes de transmissão térmica.

Quadro 2- Características dos materiais			
Envolvente	Descrição (cm)	Esquema do corte transversal	U [W/ (m <sup>2</sup> .K)]
<b>Parede exterior</b>	Reboco 3 +Pedra calcária 50 + Reboco 3		1,88
<b>Parede interior</b>	Reboco 3 +Pedra calcária 20 +Reboco 3		2,81
<b>Pavimento base</b>	Soalho de madeira 5 +Betão armado 25 +Betonilha 50		0,51
<b>Pavimentos adjacentes</b>	Soalho de madeira 5 +Betão armado 20		1,48

A Figura 16 representa os vãos envidraçados são constituídos por janelas de vidro simples, com 6 mm de espessura, tendo um coeficiente de transmissão térmica de 5,78 W/ (m<sup>2</sup>.K).

Vão envidraçado	
Source	
Category	Project
Region	PORTUGAL
<b>Layers</b>	
Number layers	1
<b>Outermost pane</b>	
Pane type	Generic CLEAR 6M
Flip layer	No
<b>Calculated Values</b>	
Total solar transmission (SHGC)	0,819
Direct solar transmission	0,775
Light transmission	0,881
U-Value (W/m <sup>2</sup> .K)	5,778

Figura 16- Características dos envidraçados

Neste modelo, não foram considerados sistemas de sombreamento, contudo, esta estratégia torna-se muito importante na minimização da radiação solar, bloqueando-a antes que ela atinga as superfícies envidraçadas.

### **3.4 Ganhos internos e ventilação**

A atividade humana, equipamentos elétricos e iluminação, são fontes de calor que contribuem com o aquecimento de uma edificação, efeito este que pode ser benéfico no inverno, porém durante o verão, este acréscimo torna-se prejudicial, o que eleva a necessidade de medidas de arrefecimento ou ventilação, podendo ser mecânica ou natural. Sendo assim, foi definido um valor de ganhos internos de  $4,00 \text{ W/m}^2$ , em linha com a regulamentação portuguesa para edifícios de habitação.

A ASHRAE, 2009 define a insuflação de ar intencional num edifício como ventilação natural ou mecânica. A ventilação mecânica baseia-se na troca de ar entre o interior e exterior, sendo por meios de ventiladores, bombas ou outros dispositivos mecânicos de controle de ar, o que fizesse pensar nas vantagens do aproveitamento das condições exteriores de temperatura, direção e velocidade do vento para ventilar naturalmente os edifícios e assim evitar os custos associados a instalação, funcionamento e manutenção dos equipamentos de ventilação mecânica (Santos, 2017).

### **3.5 Características climáticas do local**

Relativamente aos dados climáticos da cidade de Coimbra, refere-se que está 28 metros de altitude e apresenta um clima temperado. O mês mais quente do ano é agosto, com uma temperatura média de  $22,3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ao longo do ano, janeiro tem uma temperatura média de  $10,2 \text{ }^\circ\text{C}$  (temperatura média mensal mais baixa do ano). Segundo a classificação de Köppen e Geiger, o clima de Coimbra é classificado como Csa. Coimbra tem uma temperatura média anual de  $16,1 \text{ }^\circ\text{C}$ , como se vê no quadro 3. A Figura 17 mostra a variação da temperatura exterior extraída pelo software DesignBuilder.

Quadro 3- Características do clima de Coimbra

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<b>Temperatura mínima (°C)</b>	6,1	6,7	9,0	10,2	11,9	14,5	15,6	15,8	15,0	12,6	9,3	6,8
<b>Temperatura máxima (°C)</b>	14,3	15,6	18,0	20,1	21,8	25,8	28,0	28,9	26,8	22,7	17,4	14,5
<b>Temperatura média (°C)</b>	10,2	11,1	13,5	15,1	16,8	20,1	21,8	22,3	20,9	17,6	13,3	10,6

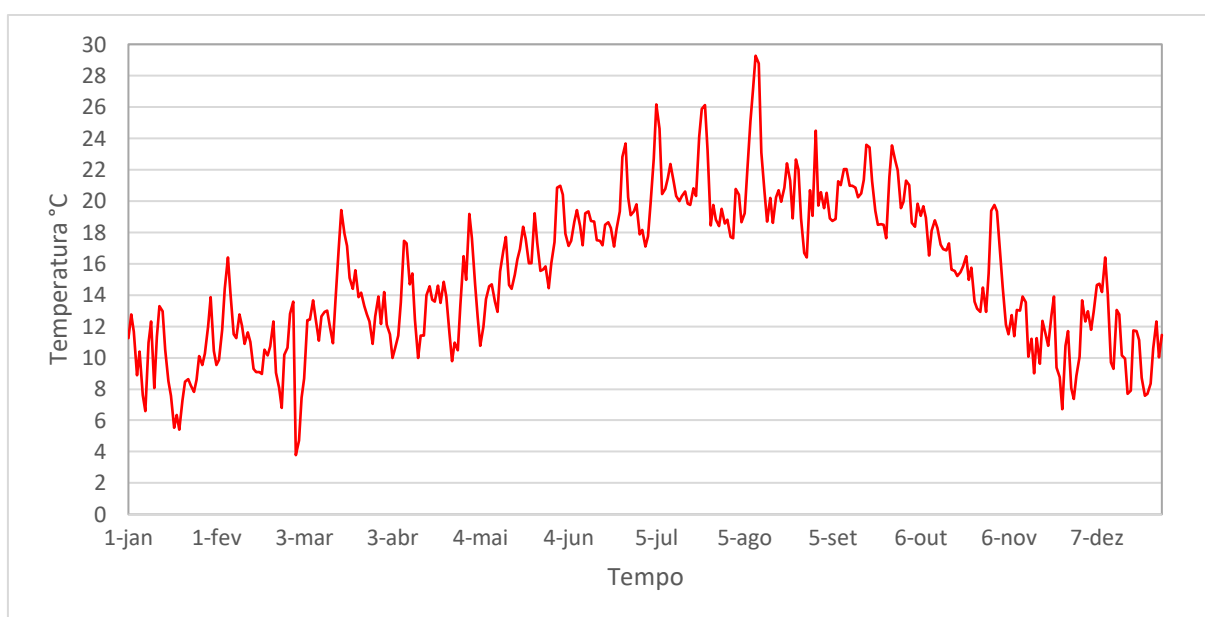


Figura 17- Temperatura exterior

### 3.6 Cenários de simulação

Com o objetivo de realizar uma análise técnico-económica, foram definidos diversos modelos de simulação. Após a modelação do cenário atual (edifício nas condições atuais), que serve de referência para o estudo subsequente, definiu-se uma série de alternativas correspondentes a diferentes cenários de reabilitação térmica e energética. Na definição destes cenários, foi usado como referência o DL 95/2019, que estabelece coeficientes de transmissão térmica máximos, aplicáveis em contexto de reabilitação (Quadro 4).

Quadro 4 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de acordo com o DL 95/2019

Elemento exterior		I1	I2	I3
Elementos opacos verticais-Paredes		1,70	1,50	1,40
Elementos opacos horizontais	Coberturas	0,80	0,70	0,60
	Pavimentos sobre o exterior	1,00	0,90	0,80
Vão envidraçados (portas e janelas) -		4,50	4,00	4,00

Com o intuito de facilitar a interpretação dos resultados e clarificar as soluções construtivas que foram adotadas, o Quadro 5 mostra uma pequena descrição dos 7 cenários que foram definidos (C1 a C7).

Quadro 5- Fase 1, cenários C1 a C7

<b>Códigos</b>	<b>Cenário</b>
<b>C1</b>	Situação atual
<b>C2</b>	Isolamento na cobertura
<b>C3</b>	Isolamento das paredes pelo lado exterior
<b>C4</b>	Isolamento das paredes pelo lado interior
<b>C5</b>	Alteração dos vãos envidraçados
<b>C6</b>	Isolamento nos pisos da cave e piso exterior do primeiro pavimento
<b>C7</b>	Combinação do isolamento das paredes pelo lado interior com a alteração dos vãos envidraçados e o piso exterior do primeiro pavimento

### 3.6.1 Cenário C1

O cenário C1 corresponde ao estado atual do edifício. Neste cenário foram simuladas duas situações: com sistema AVAC para aquecimento, permitindo a quantificação da necessidade energética para aquecimento ao longo do ano com intervalos horários; sem sistema de AVAC, permitindo avaliar o comportamento térmico do edifício através da quantificação do desconforto térmico no interior dos espaços.

Esta abordagem dupla, com avaliação do desempenho energético e do comportamento térmico, foi implementada ao longo de todo o trabalho nos vários cenários que foram simulados.

### 3.6.2 Cenário C2

No cenário C2 foi adotado sistema de isolamento térmico da cobertura no desvão não útil que foi simulado como fortemente ventilado. O material selecionado foi um isolante térmico, aplicado sobre a esteira horizontal. O elemento tinha inicialmente um  $U = 1,40 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , e, após a aplicação de uma camada de lã de rocha com 5 cm de espessura, o valor reduziu-se para  $U = 0,51 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Para modelar a ventilação do desvão considerou-se um caudal constante e permanente de  $1,5 \text{ h}^{-1}$ . A Figura 18 representa a descrição dos elementos do cenário C2.



Figura 18- Descrição dos elementos do cenário C2

### 3.6.3 Cenário C3

Para o cenário C3, como alternativa, foi pensado no isolamento térmico das paredes pelo lado exterior, tendo como material isolante placas de EPS com 5cm de espessura. Nesta composição, a princípio foi obtido um  $U=1,88 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , e após a aplicação da camada isolante, o valor reduziu-se para  $U=0,58\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ . A Figura 19 representa a descrição dos elementos do cenário C3.

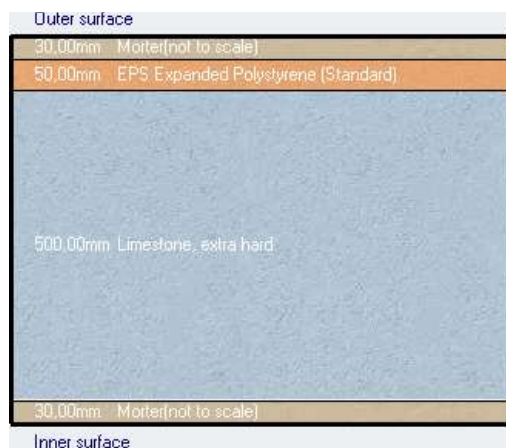


Figura 19- Descrição dos elementos do cenário C3

### 3.6.4 Cenário C4

Para o cenário C4 foi pensado no isolamento térmico das paredes pelo interior. Foi adicionado ao montante uma camada de 5cm de lã de rocha, em que resultou em um coeficiente de transmissão térmica de  $U=0,58\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$ , como demonstrado na Figura 20.

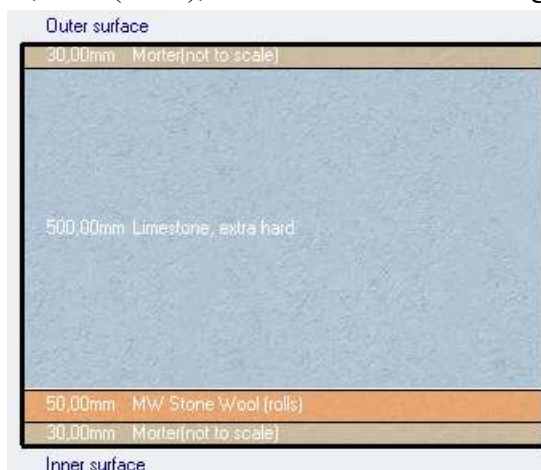


Figura 20- Descrição dos elementos do cenário C4

### 3.6.5 Cenário C5

Por se tratar de uma edificação antiga, nas modelações anteriores, foi usado para os vãos envidraçados vidros simples com a espessura de 6mm que apresenta  $U=5,78\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$ , para este novo cenário (Cenário C5), na modelagem, os mesmos foram substituídos por vidros duplos, sendo 6-13-6mm e passou para  $U=1,55\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$ .

### 3.6.6 Cenário C6

Para o Cenário C6, foi pensado como alternativa, um isolamento térmico pelos pisos. A cave que a princípio tinha um  $U=0,51\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$ , foi adicionado uma camada de 5cm de lã de rocha como isolante térmico, o que resultou na redução para  $U=0,31\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$ . A Figura 21 representa esta alteração.

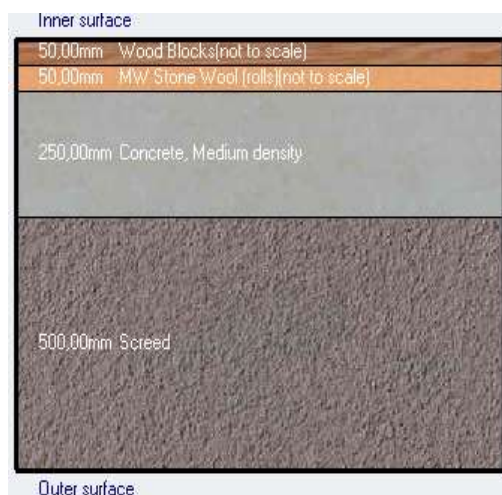


Figura 21 – Descrição do Cenário C6 – Cave

Em seguida para o caso do piso do primeiro pavimento que tem contato com o exterior, que tinha um  $U= 1,398 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , foi adicionado uma camada do mesmo material, porém com uma espessura de 8cm, que apresentou  $U=0,364 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , como demonstrado na Figura 22.



Figura 22- Descrição dos elementos do cenário C6

### 3.6.7 Cenário C7

Nesta opção, foi feita uma compilação de algumas modelações anteriores, foram utilizados os cenários C4, C5 e parcialmente o C6, que neste caso foi usado somente o isolamento no piso das partes exteriores do piso 1.

A intenção foi usar os resultados que pareciam mais satisfatórios, e com sua combinação, perceber os efeitos deste investimento ao final da vida útil da edificação, visto que o valor inicial introduzido se torna mais elevado.

## 4. Apresentação e discussão dos resultados

### 4.1 Considerações iniciais

A apresentação de resultados da primeira fase tem como objetivo caracterizar o estado atual do edifício, analisando e apontando as principais deficiências no seu desempenho, e avaliar o impacto de diferentes intervenções, valorizando as mais valias que cada uma tem a oferecer. O elevado número de simulações que foram realizadas obrigou a um tratamento cuidadoso dos dados que conduziu a muitos resultados. Assim, todos os resultados obtidos após tratamento estão disponíveis para consulta em Anexo, tendo sido feita uma seleção dos mais relevantes para incluir no corpo principal da Dissertação. Nesse sentido, para cada cenário de simulação são apresentados os seguintes resultados:

- Variação da temperatura do ar interior com e sem o sistema de aquecimento em cada piso da edificação;
- Quantificação do grau de desconforto avaliado através do modelo de conforto adaptativo;
- Quantificação das necessidades energéticas para aquecimento;
- Comparação dos vários cenários de reabilitação.

Em conformidade com preconizado na EN 15251, nas simulações que incluem sistema de aquecimento, o *setpoint* foi ajustado considerando uma temperatura mínima de 20 °C, ou seja, sempre que a temperatura atinge valores abaixo deste limite, o sistema de aquecimento é ativado.

## 4.2 Resultados da Fase 1

### 4.2.1 Cenário C1- Situação atual

Relativamente ao cenário C1, a Figura 23 mostra a variação da temperatura interior do edifício, separadamente para cada piso, numa situação de flutuação livre da temperatura, ou seja, sem qualquer sistema de climatização ativo.

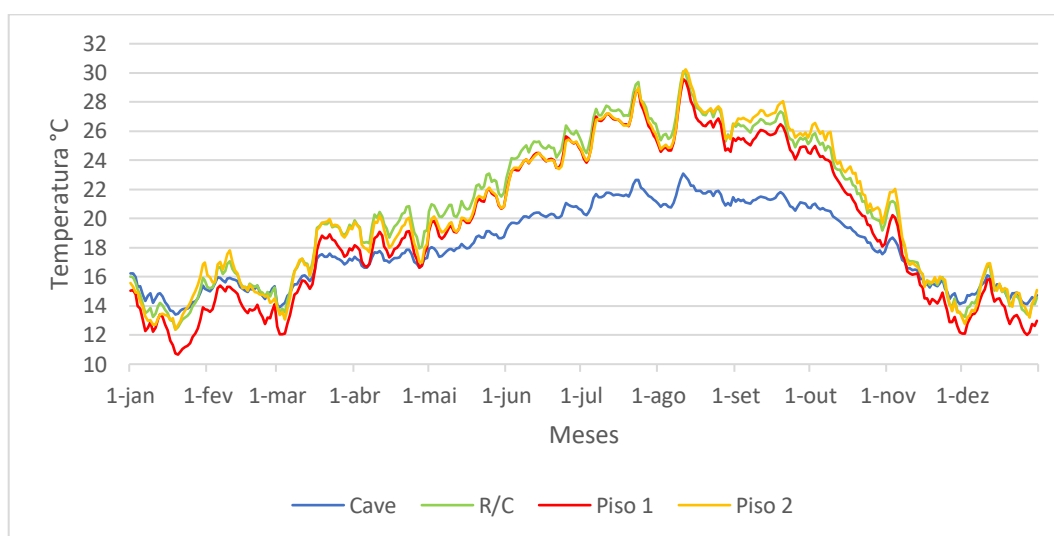


Figura 23- Variação da temperatura no cenário C1 sem aquecimento

Como já era de certa forma esperado, os resultados descrevem um cenário preocupante, com índices de até 99,5% de desconforto na zona da cave e temperaturas que chegaram aos 10,5 °C no Piso 1, durante o mês de janeiro. Chama-se ainda a atenção para a importante diferença de desempenho do piso da cave, com oscilações anuais de temperatura muito menores, resultado do efeito do terreno.

Com a ativação do sistema de aquecimento, considerando a temperatura de funcionamento do sistema a 20 °C (Figura 24), resultou um consumo energético anual de 25.867,23 kWh, ou seja, cerca de 79,78 kWh/m<sup>2</sup>. A Figura 25 mostra as necessidades mensais de energia para aquecimento.

## 4- Resultados

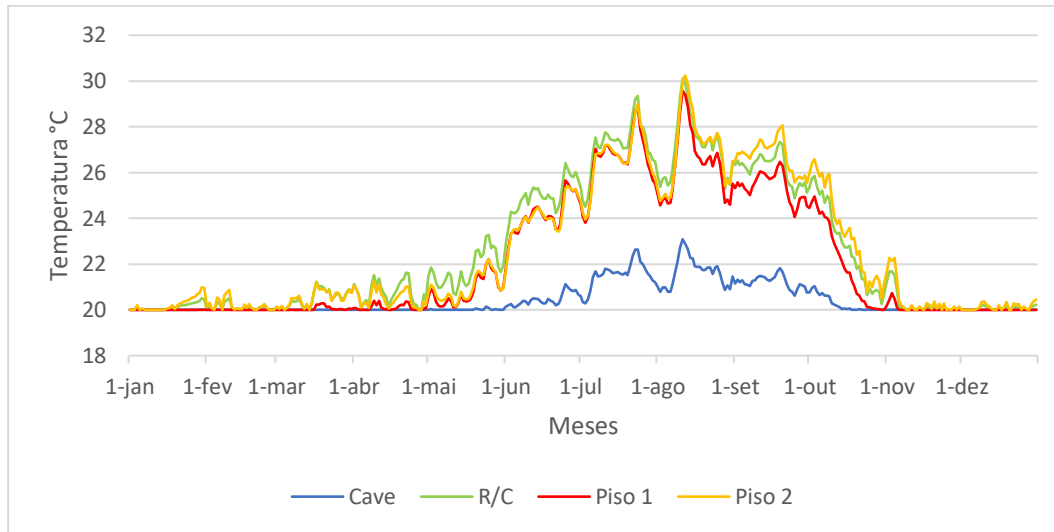


Figura 24- Variação da temperatura no cenário C1 com aquecimento

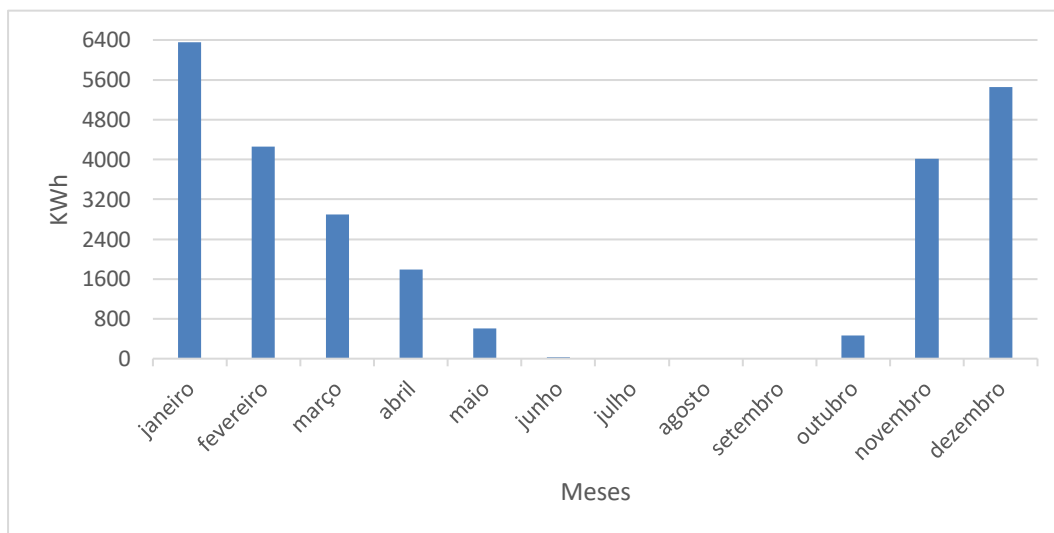


Figura 25- Consumo energético do cenário C1

### 4.2.2 Cenário C2- Isolamento pela cobertura

Em relação ao cenário C2, a Figura 26 mostra a variação da temperatura interior do edifício antes da ativação do sistema de climatização.

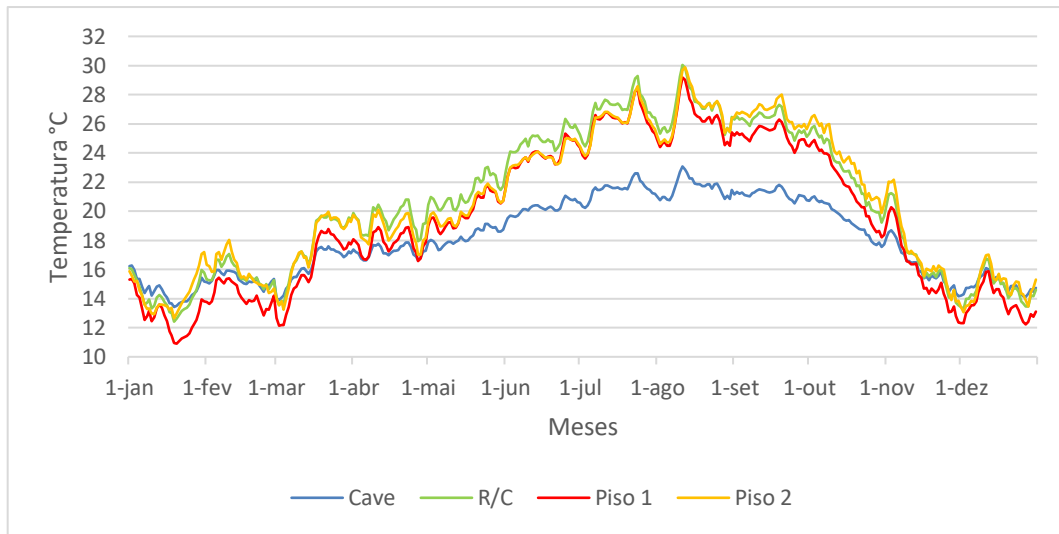


Figura 26- Variação da temperatura no cenário C2 sem aquecimento

As diferenças no cenário C2 não foram muito significativas, observando-se uma pequena melhoria apenas nos Pisos 1 e 2, porém, ainda insuficiente para os fins desejados, mantendo-se assim os níveis de desconforto muito semelhantes aos registados no cenário antes da reabilitação.

Com o sistema de aquecimento ativo, obteve-se um consumo energético anual de 24.831,04 kWh (76,59 kWh/m<sup>2</sup>), correspondendo a uma redução de apenas 4% relativamente à situação inicial. A Figura 27 mostra a variação da temperatura e a Figura 28 mostra a quantidade de energia despendida para o aquecimento.

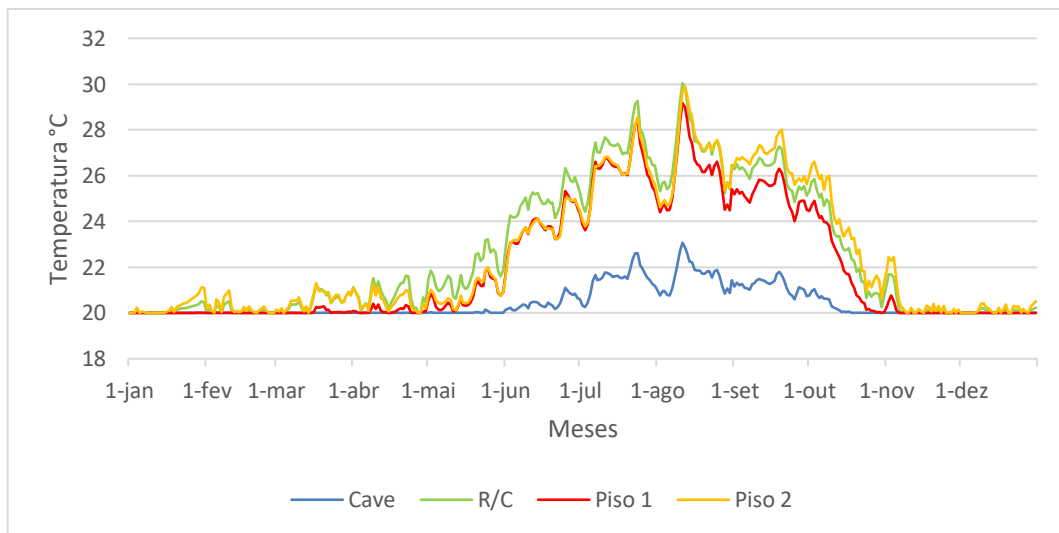


Figura 27-Variação da temperatura do cenário C2 com aquecimento

## 4- Resultados

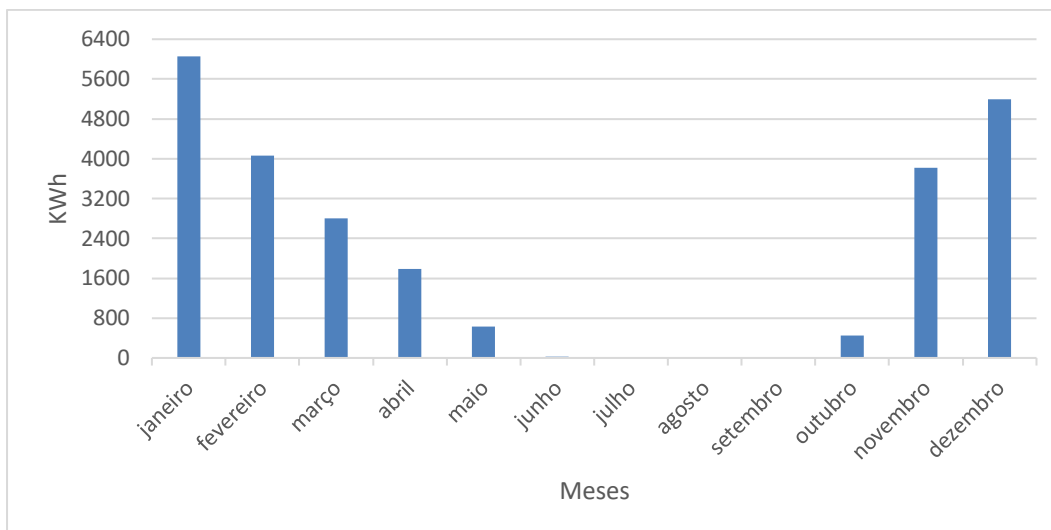


Figura 28- Consumo energético anual do cenário C2

### 4.2.3 Resultados do cenário C3- Isolamento pelo exterior

Em continuidade para cenário C3, a Figura 29 mostra a variação da temperatura interior sem a ativação do sistema de climatização.

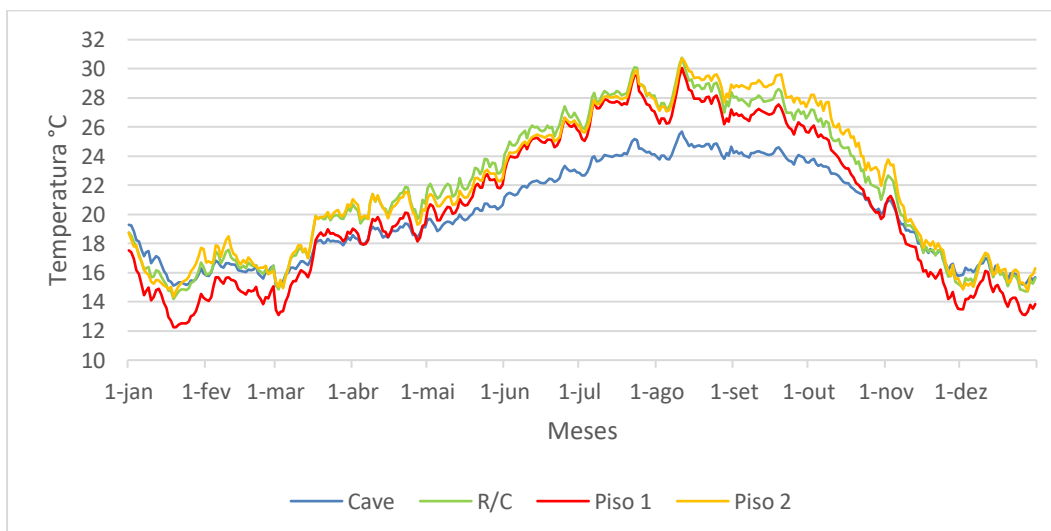


Figura 29- Variação da temperatura C3 sem aquecimento

Este cenário apresentou uma resposta melhor, o conforto adaptativo, onde anteriormente no piso da Cave tínhamos um desconforto de 99,5%, passou para 60,74%.

Contudo, foi possível ver certa vantagem neste cenário, a Figura 30 mostra a variação da temperatura interior, o consumo energético anual foi de 14.675,76 kWh (45,26 kWh/m<sup>2</sup>), como mostra a Figura 31, o que levou a uma redução de 43,26% em seu consumo energético, o que aponta ser uma boa alternativa para este tipo de situação.

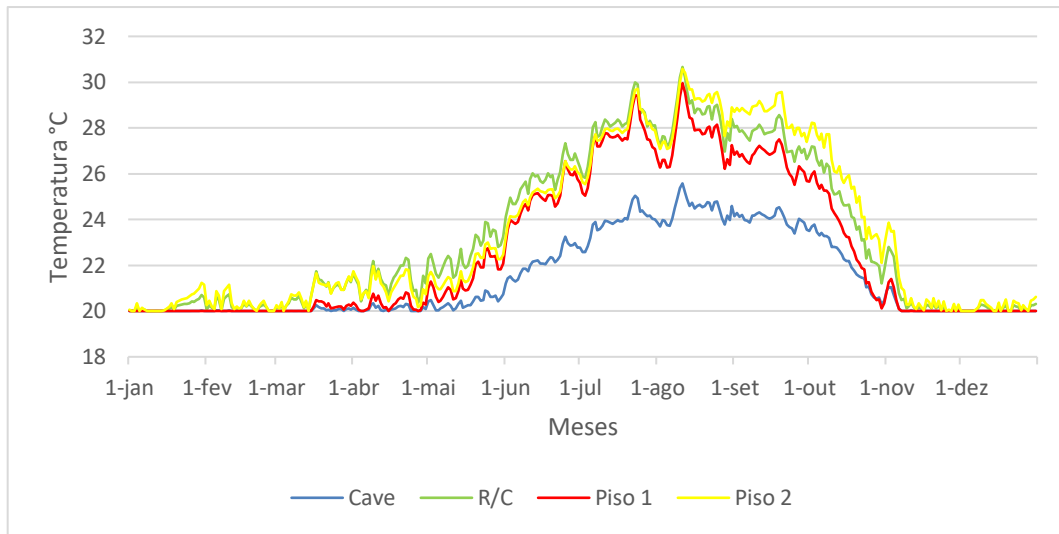


Figura 30-Variação da temperatura do cenário C3 com aquecimento

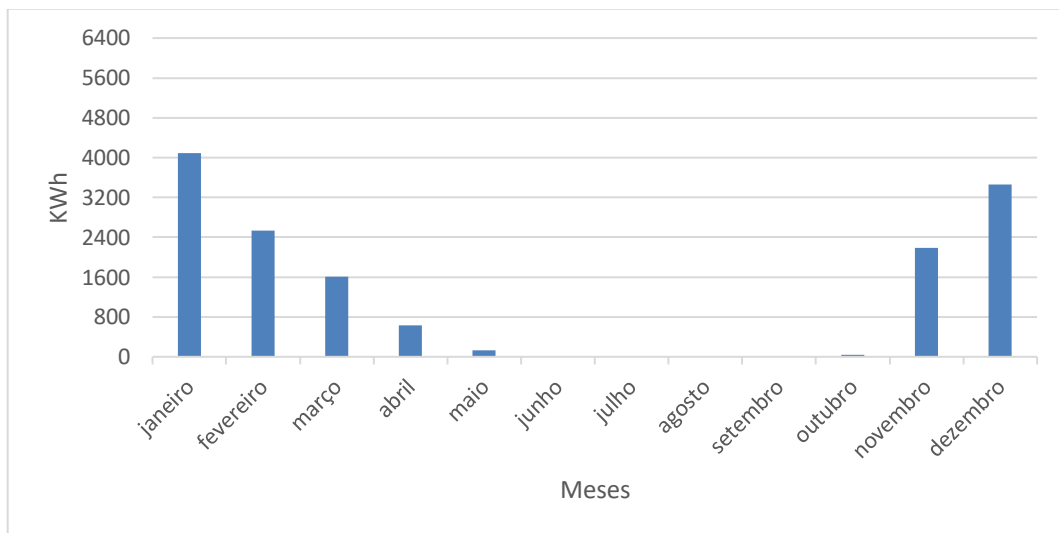


Figura 31- Consumo energético anual do cenário C3

#### 4.2.4 Resultados do cenário C4- Isolamento pelo interior

As apresentações dos resultados deste cenário também foram bastante interessantes, alguns pontos bem semelhantes ao modelo anterior, também se mostra uma boa alternativa de reabilitação energética. A figura 32 mostra a variação da temperatura sem a ativação do sistema de aquecimento.

#### 4- Resultados

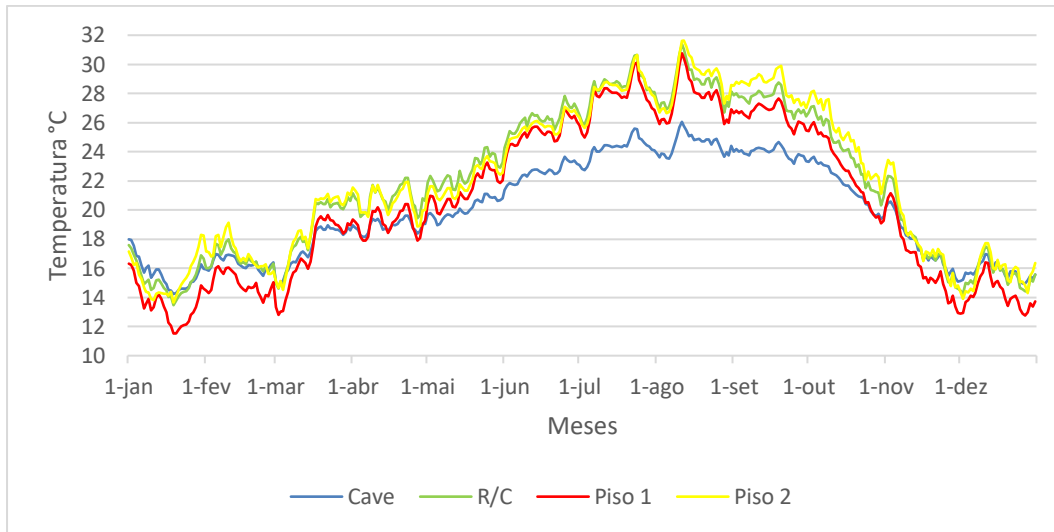


Figura 32-Variação da temperatura do cenário C4 sem aquecimento

Na utilização do sistema de aquecimento, mantendo a temperatura interna (Figura 33). Houve uma pequena desvantagem em relação ao cenário C3 no que se refere a economia ao gasto com eletricidade, porém ainda com resultados satisfatórios, gerando uma economia de 42,07%, totalizando um consumo energético anual 14.983,72 kWh (46,21 kWh/m<sup>2</sup>), como mostra a Figura 34.

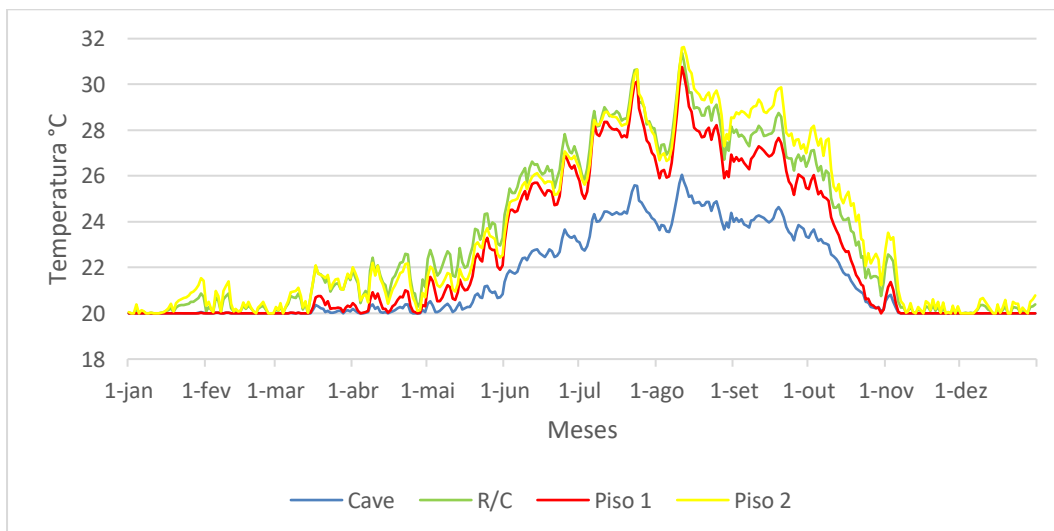


Figura 33- Variação da temperatura do cenário C4 com aquecimento

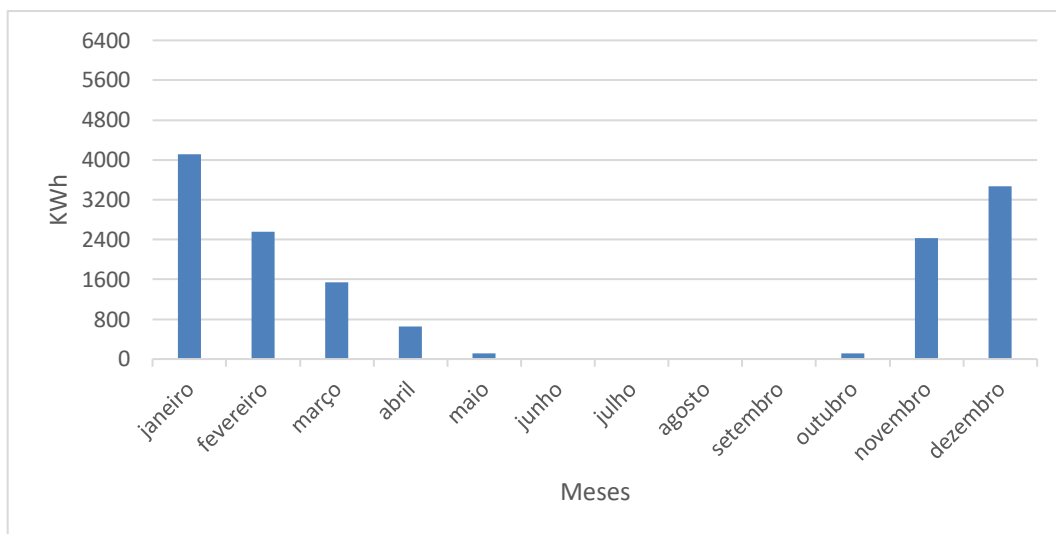


Figura 34- Consumo energético anual do cenário C4

#### 4.2.5 Resultados do cenário C5- Alteração dos vãos envidraçados

Para este cenário, sem a ativação do aquecimento, a temperatura interna ainda apresenta valores de desconforto como vê-se na Figura 35.

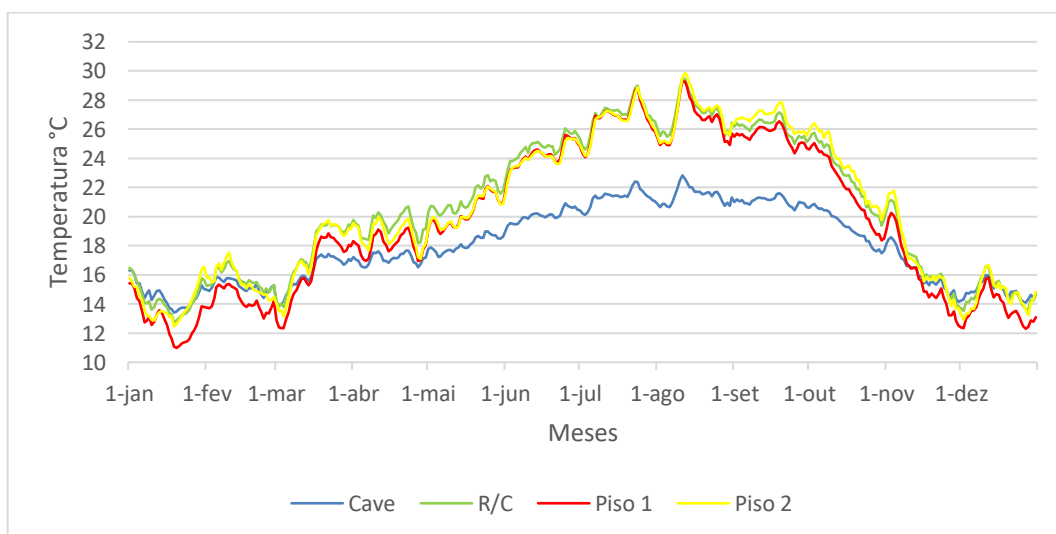


Figura 35- Variação da temperatura do cenário C5 sem aquecimento

Após a ativação, os resultados apresentaram uma pequena melhoria, contudo se optar somente por esta parcela, os resultados ainda ficam aquém do esperado, o desconforto interno ainda permanece alto e para manter a temperatura interna (Figura 36), o consumo energético foi de 23.144,72 kWh (71,39 kWh/m<sup>2</sup>), como visto na Figura 37, o que totaliza uma economia de apenas 10,52% em seu consumo energético.

## 4- Resultados

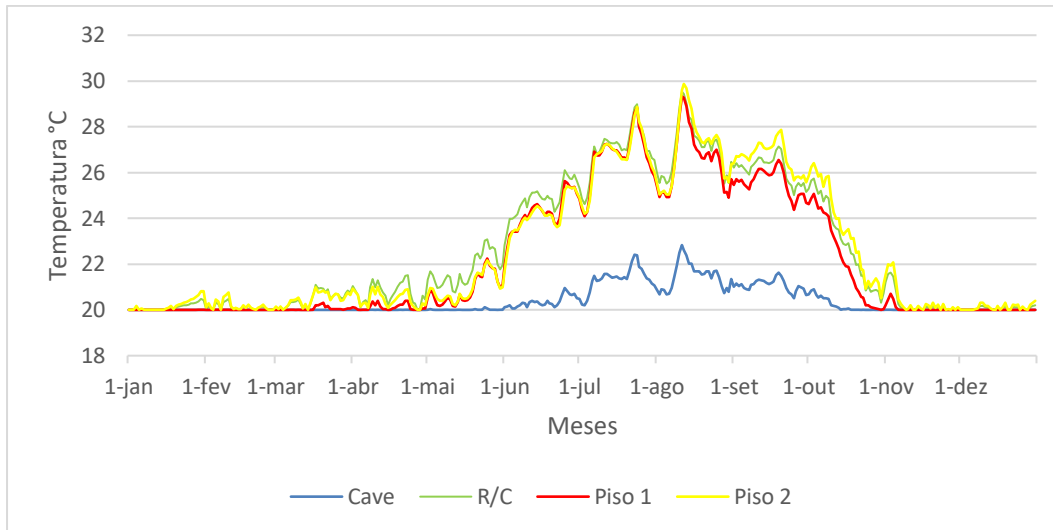


Figura 36- Variação da temperatura do cenário C5 com aquecimento

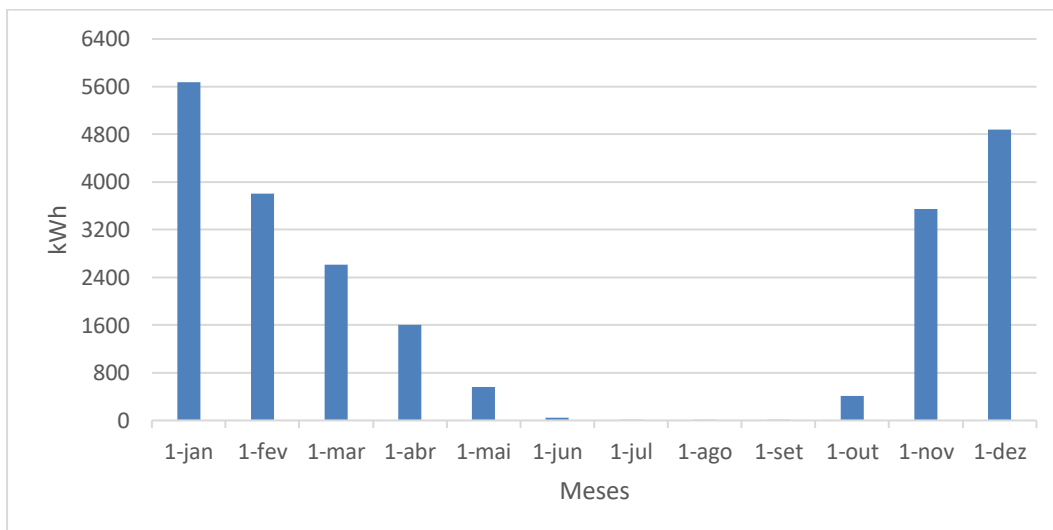


Figura 37- Consumo energético anual do cenário C5

### 4.2.6 Resultados do cenário C6- Isolamento no piso da cave e piso do primeiro pavimento

No tocante ao cenário C6, a temperatura interna sem o sistema de aquecimento não sofreu grandes alterações, como vê na Figura 38.

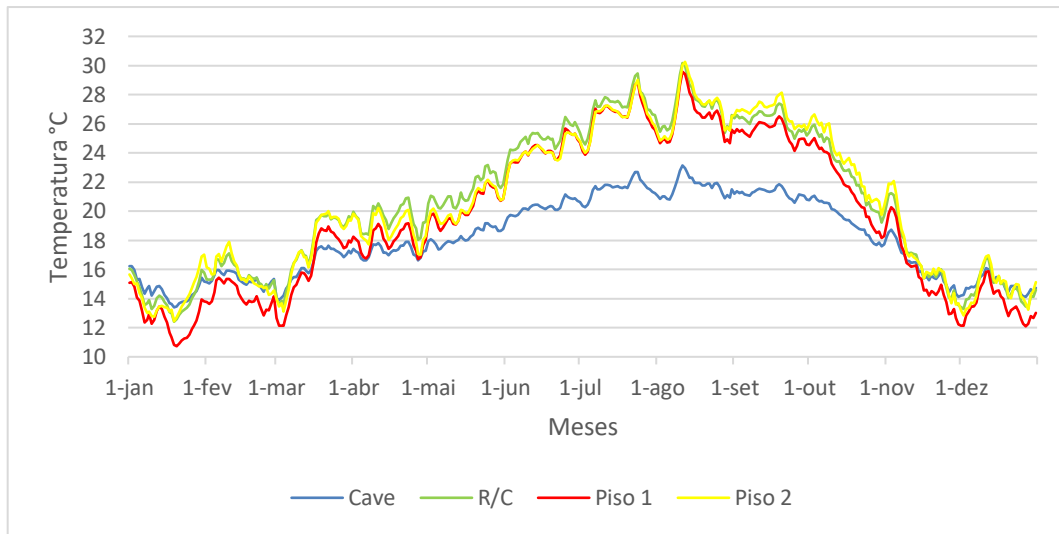


Figura 38- Variação da temperatura do cenário C6 sem aquecimento

A figura 39 mostra a variação da temperatura interior com o sistema de aquecimento, onde foi possível extrair o consumo energético, que também não teve resultados muito positivos, gerando apenas 2,08% de economia, sendo 25.330,11 kWh (78,13 kWh/m<sup>2</sup>), como mostra a Figura 40.

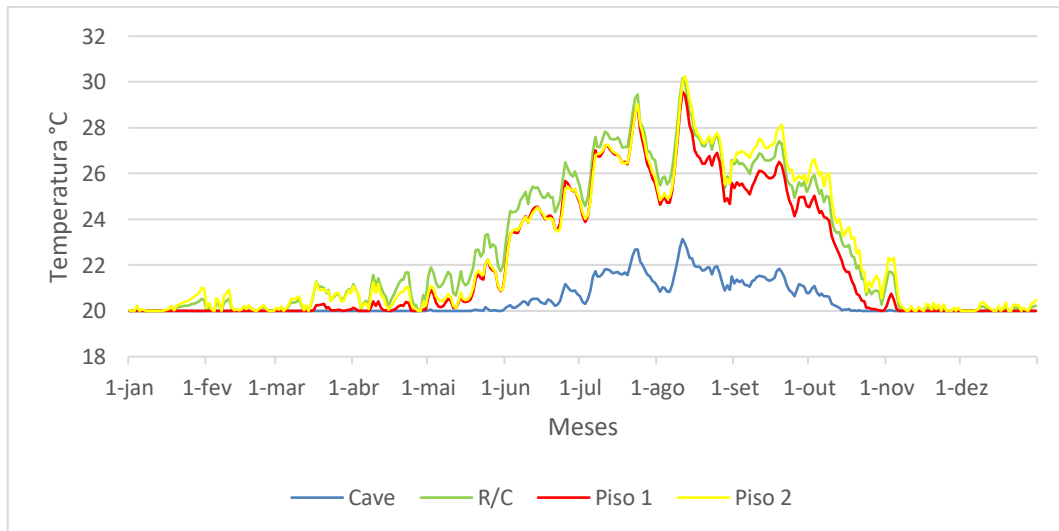


Figura 39- Variação da temperatura do cenário C6 com aquecimento

## 4- Resultados

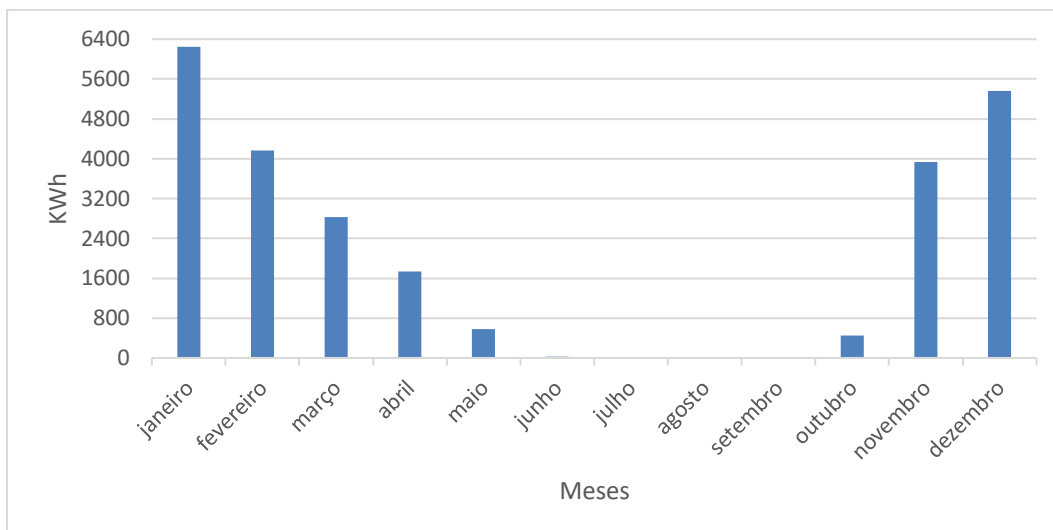


Figura 40- Consumo energético anual do cenário C6

### 4.2.7 Resultados do cenário C7– Combinação C4+C5+C6

Na junção das técnicas, o cenário C7 trouxe apontamentos que merecem uma devida atenção nas próximas fases deste estudo, sem o sistema de aquecimento, a temperatura interna teve sinais mais positivos que os anteriores como mostra a Figura 41, o que fez com que o desconforto interno apresentasse resultados favoráveis.

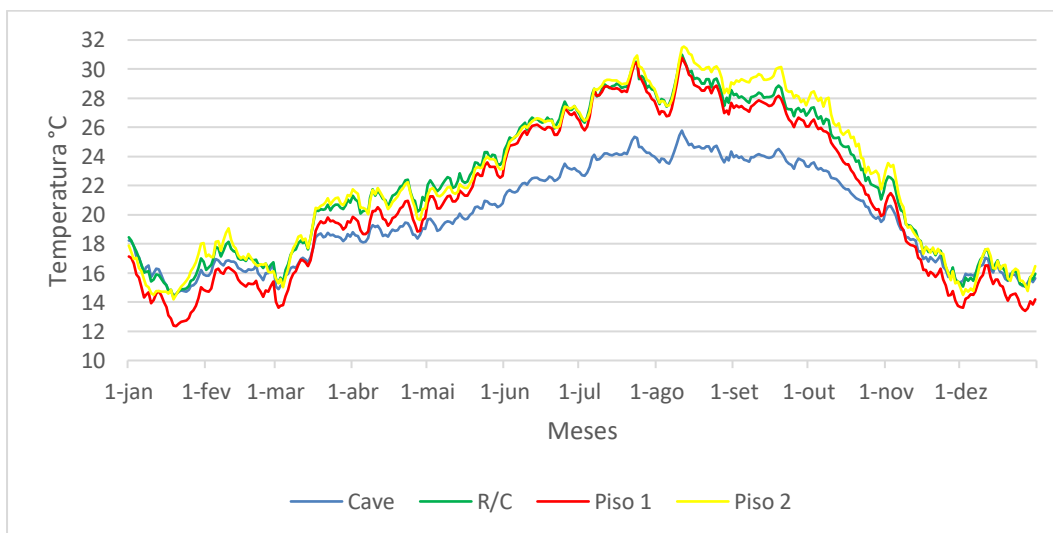


Figura 41- Variação da temperatura do cenário C7 sem aquecimento

Com a ativação de sistema de aquecimento, mantendo a temperatura interna (Figura 42), foi possível obter um consumo de 11.087,92 kWh (31,20 kWh/m<sup>2</sup>), como mostra a Figura 43.

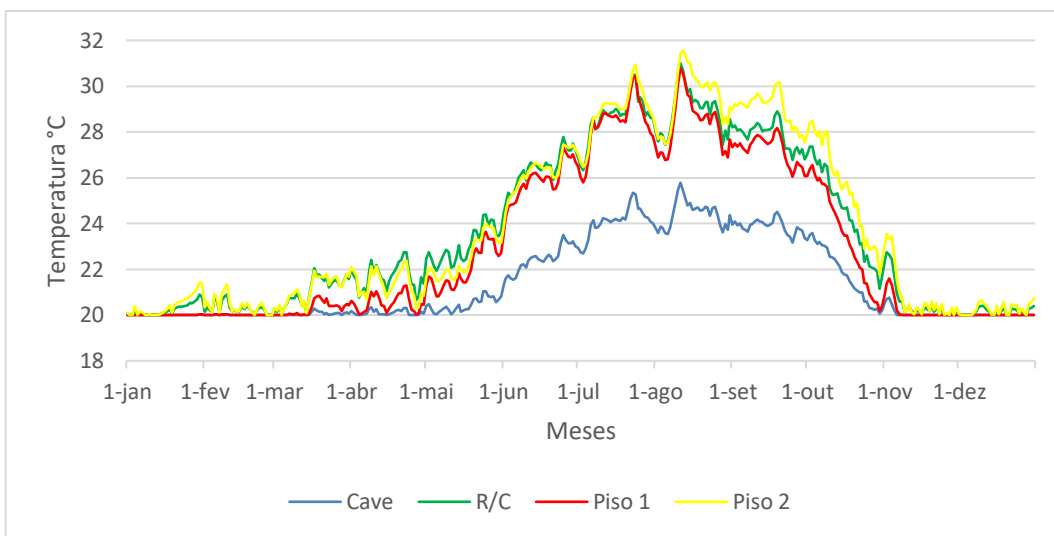


Figura 42- Variação da temperatura do cenário C7 com aquecimento

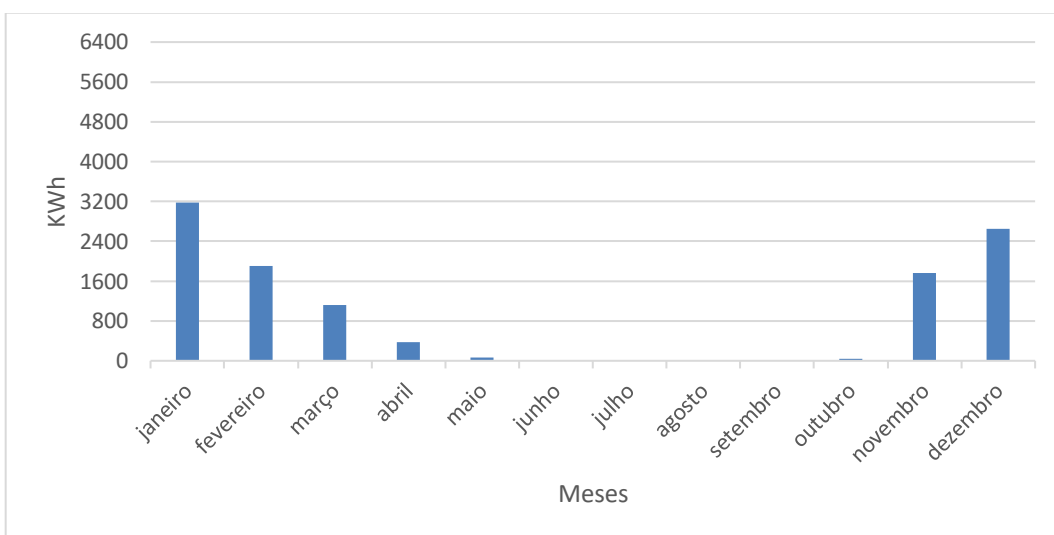


Figura 43- Consumo energético anual do cenário C7

### 4.3 Avaliação do conforto térmico

Para quantificar o impacto de cada intervenção no conforto térmico interior do edifício, foi calculada a percentagem de desconforto, ou seja, a percentagem de tempo em que a temperatura interior se encontra abaixo dos 20 °C, nas simulações sem sistema de aquecimento. Esta avaliação foi feita separadamente para cada piso do edifício. O Quadro 6 mostra os resultados obtidos.

Quadro 6- Percentagem de desconforto térmico

	% de desconforto						
<b>Cave</b>	99,50	99,58	60,74	61,13	99,79	99,36	61,79
<b>R/C</b>	50,99	51,26	42,48	42,11	51,15	50,48	39,60
<b>Piso 1</b>	59,94	60,55	52,21	52,18	59,39	59,75	47,71
<b>Piso 2</b>	54,16	54,28	42,28	41,64	54,69	53,79	38,36
<b>Cenário</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>	<b>C6</b>	<b>C7</b>

Os resultados mostram que o cenário C7, que agrega um conjunto de medidas de melhoria, é o que apresenta um impacto positivo maior. No entanto, os cenários C3 e C4, que correspondem à aplicação de isolamento térmico nas paredes exteriores do edifício, introduzem também o impacto muito relevante

#### 4.4 Consumo energético

Para ajudar na caracterização do desempenho energético do edifício foi calculado o custo com eletricidade resultante das necessidades energéticas simuladas em cada cenário. Para esse efeito, foi considerado o valor unitário de 0,229 €/kWh, indicado para Portugal nas Estatísticas Europeias de preços de eletricidade (<https://ec.europa.eu>, 2021). O quadro 7 mostra os custos anuais com eletricidade (considerando apenas aquecimento) em cada cenário.

Quadro 7- Custos anuais com eletricidade

<b>Cenário</b>	<b>Custos (€)</b>
<b>C1</b>	25.867,23
<b>C2</b>	24.831,04
<b>C3</b>	14.675,76
<b>C4</b>	14.983,72
<b>C5</b>	23.144,72
<b>C6</b>	25.330,11
<b>C7</b>	11.087,92

Assim, caso não fosse feito qualquer tipo de intervenção, ou seja, no cenário atual C1, os custos anuais seriam de 25.867,23 €. Na Figura 44 é possível observar o consumo de cada cenário e respetivas diferenças quando comparado com a situação inicial. O cenário C7 seria o mais vantajoso, seguindo-se os cenários C3 e C4. O impacto dos restantes é de tal forma insignificante que possivelmente já poderiam ser descartados.

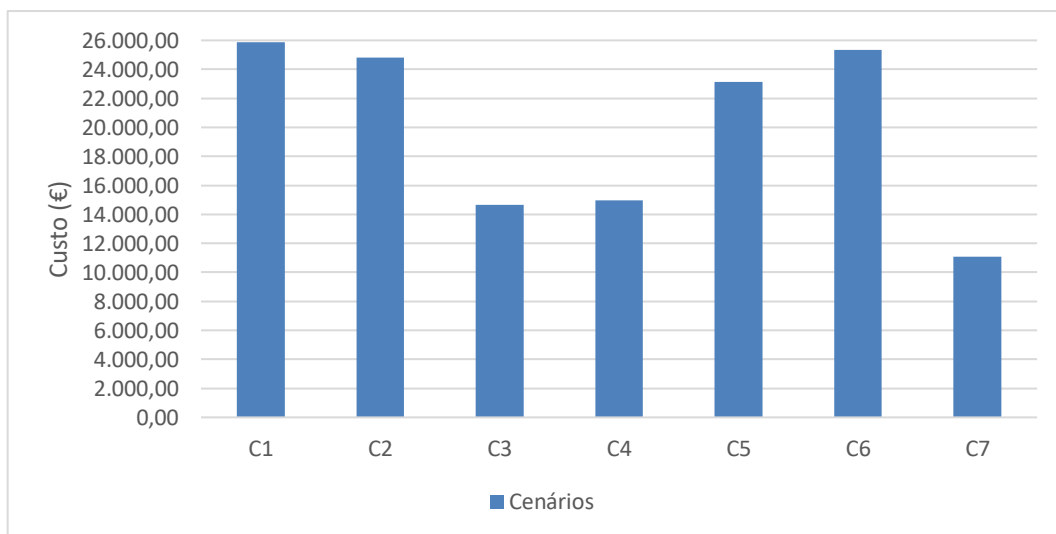


Figura 44- Custo energético em cada cenário

#### 4.5 Custos de investimento e manutenção

Com o auxílio do Cype Gerador de Preços (<https://geradordeprecos.cype.pt/>, 2021), foi possível estimar os montantes correspondentes aos custos iniciais das intervenções, bem como os gastos nas manutenções anuais ao longo do período em estudo. Os materiais que foram usados no modelo de simulação, correspondem aos que estão disponíveis na base de dados do gerador de preços, para dar maior fiabilidade e rigor aos valores utilizados na análise económica. O Quadro 8 mostra uma síntese da informação necessária à quantificação dos custos iniciais e aos de manutenção.

Quadro 8 - Custos iniciais e de manutenção

Tipo de isolamento	Material	Quantidade m <sup>2</sup>	Valor Unitário €	Valor do investimento €	Custo da manutenção €	Valor anual da manutenção €
<b>Cobertura (C2)</b>	Lã de rocha	126	49,33	6.215,58	1,26	159,14
<b>Parede pelo exterior (C3)</b>	EPS expandido	510	65,98	33.649,80	0,52	262,65
<b>Parede pelo interior (C4)</b>	Lã de rocha	510	34,07	17.375,70	10,9	557,94
<b>Vidro (C5)</b>	Vidro duplo	90	139,44	12.549,60	2,93	263,52
<b>External floor Cave(C6)</b>	Lã de rocha	100	56,88	5.688,00	0,36	35,80
<b>Combinação (C7)</b>	x	700	230,39	35.613,30	4,38	857,26

## 4.6 Aplicação da metodologia LCC

Após o levantamento dos montantes investidos na fase inicial, bem como os gastos em eletricidade e acrescentando os custos de manutenção ao longo da vida útil, foi realizada uma comparação técnico-económica das alternativas em análise.

Nesta análise considerou-se 30 anos como sendo o período de vida útil do edifício. Tendo em conta a volatilidade da economia optou-se por considerar dois cenários económicos: i) cenário conservador, considerando apenas uma taxa de atualização (d) de 3%; e ii) cenário menos conservador em que se considera uma escalada do custo da energia (e) de 2% acima do valor da inflação.

Seguindo os critérios necessários para aplicação desta metodologia, foram então realizados os cálculos para cada cenário de reabilitação, utilizando os valores de eletricidade, custos iniciais com a execução da reabilitação e manutenção apresentados anteriormente. O Quadro 9 e a Figura 45 mostram uma síntese dos resultados, onde é possível ter a perspetiva final de cada alternativa.

Quadro 9- Resultados da aplicação da metodologia LCC

Cenário	Valor atual €	
	d=3%	d=3%; e=2%
<b>C2</b>	120.788,90	156.506,57
<b>C3</b>	104.670,02	125.780,05
<b>C4</b>	<b>95.566,01</b>	<b>117.119,02</b>
<b>C5</b>	121.599,76	154.891,77
<b>C6</b>	268.365,64	304.801,18
<b>C7</b>	102.184,07	118.133,23

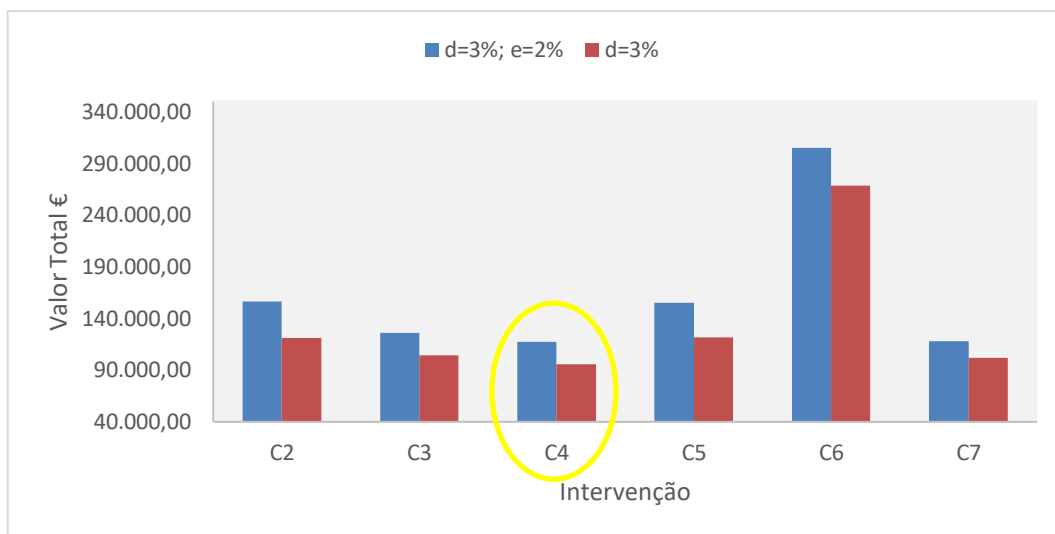


Figura 45- Resultados da metodologia LCC fase 1

A alternativa C4, que corresponde à aplicação de isolamento térmico nas paredes pelo lado interior, foi a que apresentou melhores resultados. O cenário C7 teve uma performance próxima. Os resultados foram idênticos nos dois cenários económicos considerados.

## 4.7 Resultados da Fase 2

A partir dos resultados obtidos na Fase 1, iniciou-se uma nova etapa, visando otimizar a estratégia de intervenção associada ao cenário C4, que foi o que apresentou um melhor desempenho em termos técnico-económicos. Nesse sentido, procurou-se otimizar a espessura do isolante térmico, que inicialmente foi assumido em 5 centímetros.

A metodologia adotada consistiu em fazer variar a espessura entre os 4 e os 12 centímetros e, utilizando os critérios anteriores, para cada espessura foram contabilizados todos os custos, procurando-se alcançar o ponto ideal da curva do custo ótimo, ou seja, o valor mínimo da análise LCC. Também nesta fase foram considerados os dois cenários económicos.

O Quadro 10 e a Figura 46 mostram o resultado da aplicação da metodologia LCC na otimização da espessura do isolante térmico no cenário C4.

#### 4- Resultados

Quadro 10- Resultados da aplicação da metodologia LCC na otimização do cenário C4

Valor atual €		
Espessura (cm)	d=3%;	d=3%; e=2%
4	98.748,76	121.587,70
5	95.566,01	117.119,02
6	94.069,98	114.660,28
7	93.205,78	113.048,96
8	92.756,41	112.003,04
9	<b>92.647,85</b>	111.407,16
10	92.789,12	<b>111.141,17</b>
11	93.133,28	111.143,07
12	93.643,37	111.364,10

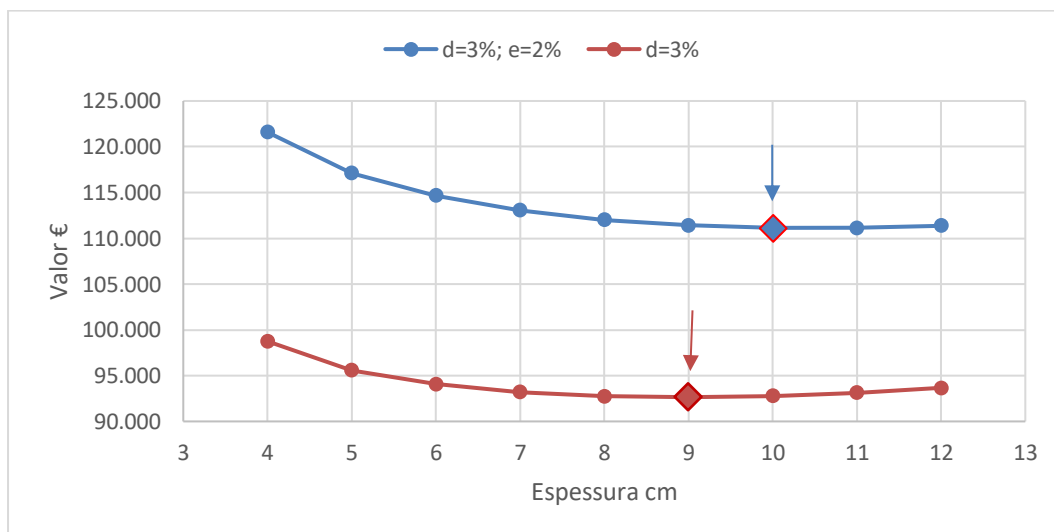


Figura 46- Curva de custo ótimo na otimização do cenário C4

Os resultados mostram que, no cenário que considera apenas a taxa de atualização (d) de 3%, a espessura ótima de isolamento seria de 9 centímetros, enquanto, no cenário que inclui o efeito de uma escalada do custo da energia (e) de 2%, esse valor passa para 10 centímetros.

Anteriormente, o cenário C7 também se tinha evidenciado pelos resultados positivos, quer em termos técnico-económicos, quer em termos de melhoria das condições de conforto térmico interior. Assim, considerou-se que seria pertinente realizar também um estudo de otimização da espessura do isolante térmico para esta alternativa de intervenção, semelhante ao modelo anterior, foram estudadas as espessuras do isolamento térmico da parede pelo interior que variaram dos 4cm aos 12cm, o isolamento pelo piso do primeiro pavimento permaneceu com 5cm de espessura e os vão envidraçados permaneceram com 6-13-6mm.

O Quadro 11 e a Figura 47 mostram o resultado da aplicação da metodologia LCC na otimização da espessura do isolante térmico no cenário C7.

Quadro 11- Resultados da aplicação da metodologia LCC na otimização do cenário C7

Espessura	Valor atual €	
	d=3%	d=3%; e=2%
4	105.574,06	122.875,56
5	102.184,07	118.133,23
6	100.541,80	115.481,40
7	99.570,51	113.728,66
8	99.040,66	112.576,47
9	<b>98.893,95</b>	111.930,21
10	98.987,15	111.600,74
11	99.293,19	<b>111.552,32</b>
12	99.746,19	111.697,96

## 4- Resultados

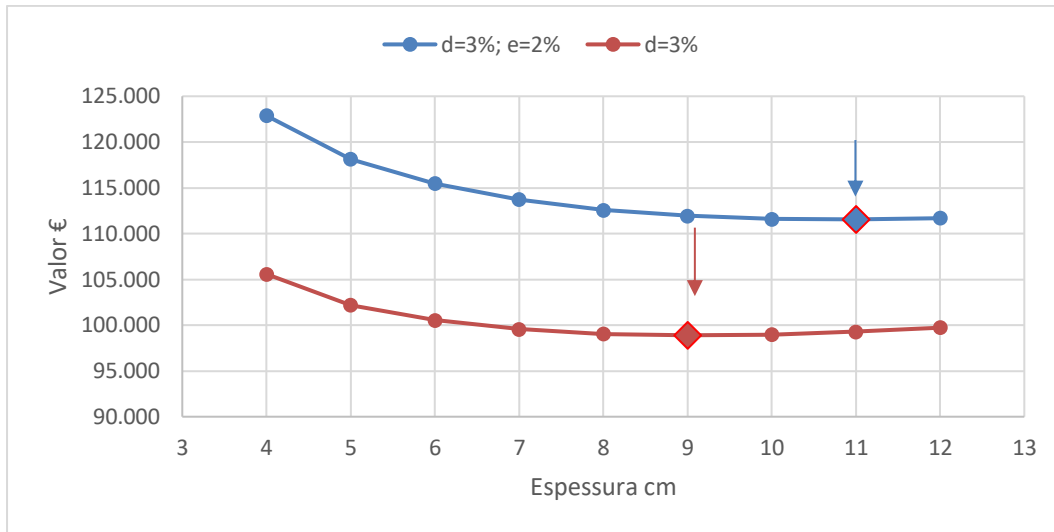


Figura 47- Curva custo ótimo na otimização do cenário C7

Os resultados mostram que, no cenário que considera apenas a taxa de atualização (d) de 3%, a espessura ótima de isolamento também seria de 9 centímetros, no entanto, no cenário que inclui o efeito de uma escalada do custo da energia (e) de 2%, esse valor passa agora para 11 centímetros.

## 5. Conclusões

Os resultados apresentados por meio deste estudo vieram mostrar os níveis de rentabilidade para a proposta de reabilitação energética para o caso em estudo. Visando a melhoria da envolvente de um modo global, quanto mais eficiente for o estudo, menor o investimento.

Através da interação entre a edificação sem qualquer tipo de isolamento e os diferentes cenários de reabilitação, foi possível observar as necessidades energéticas. Com a utilização da metodologia de custo ótimo foi possível concluir o cenário mais vantajoso, do ponto de vista energético e económico, quando sujeito a diferentes medidas de reabilitação energética.

A solução ao nível de rentabilidade a longo prazo corresponde as diferentes medidas de isolamento térmico, bem como o estudo das diferentes espessuras utilizadas, sendo que a reabilitação energética apresenta inúmeras vantagens a nível social, ambiental, energético e económico.

Como fase inicial, foi apresentado o edifício em estudo e suas principais deficiências energéticas, com a simulação em seu estado atual e nas diferentes soluções de reabilitação energética, foi possível analisar o impacto no desempenho térmico nos diferentes pisos ao longo do edifício.

O estudo dos possíveis cenários de reabilitação consistiu numa análise prévia em que foi explorado um conjunto de medidas de reabilitação e onde foram identificadas a potencialidade de cada solução ao nível ótimo de rentabilidade. A diferença entre cada cenário fica mais evidente quando é ativado o sistema de aquecimento, é possível ver a quantidade kWh/m<sup>2</sup> que é despendida para manter o conforto interno.

Para o cenário C2, foi constatado que somente o isolamento pela cobertura não traz efeitos significativos.

Para o cenário C3 os isolamentos das paredes pelo exterior e seguido pelo C4 com isolamento pelo interior, ambas estratégias mostraram desempenhos bastante atrativos, a percentagem de desconforto interno assim como o consumo energético tiveram uma queda considerável.

Em relação ao cenário C5, as alterações nos vão envidraçados foram de extrema importância, contudo, faz-se necessário que esta seja usada em conjunto, a sensação térmica sem o sistema de aquecimento não foi muito satisfatória, as temperaturas internas não apresentaram grandes ganhos, porém como a ativação do sistema de aquecimento, a quantidade de energia para manter a temperatura estável, houve uma melhora, entretanto, pelo valor despendido na estratégia, ainda fica aquém do esperado.

Para o cenário C6, os isolamentos nos pisos da Cave e do primeiro piso, as diferenças não tiveram um efeito tão positivo, tanto na variação da temperatura interior, quanto no consumo energético.

Na compilação das estratégias de reabilitação energética, o cenário C7, trouxe resultados que tiveram um efeito bastante positivo, nos diferentes pisos, houveram ganhos significativos na temperatura interior, assim como o consumo energético teve uma considerável melhoria, tendo como 57,13% a menos que o cenário inicial.

Na segunda fase deste estudo, que tinha como objetivo maximizar a potencialidade do o cenário C4 que foi o que apresentou melhores como estratégia isolada, onde foi avaliado não somente os fatores térmicos e energéticos e sim o qual seria mais economicamente rentável ao longo do período de vida útil da edificação. Com a extração destes dados, e após novas simulações em busca da espessura ideal, em que através das simulações, foi possível chegar a conclusão que a para o cenário conservador a espessura ideal seria de 9 centímetros, enquanto para o menos conservador, a espessura seria de 10 centímetros.

Ainda nesta fase, com as vantagens que o cenário C7 mostrou, foram repetidas novas simulações, onde foi constatado que para o cenário conservador, a espessura ideal também seria de 9 centímetros e já para o cenário menos conservador a espessura passaria para os 11 centímetros.

Com isto, pode-se concluir a eficácia de uma análise nos diversos fatores que acercam uma reabilitação energética, quando se trata de soluções a médio e longo prazo, é preciso ter em atenção os custos iniciais e futuros que estão em torno da edificação.

### **5.1 Trabalhos futuros**

Como foi visto, são inúmeros os fatores que colaboram para uma eficiência energética, este trabalho teve como ênfase, propostas para reabilitação energética no tocante da envolvente, entretanto em sequência para trabalhos futuros, seria uma mais valia, um estudo sobre os equipamentos bem como sua fonte de alimentação visando melhores rendimentos nas

soluções de climatização e AQS, influencia dos ganhos internos e importância da ventilação bem como a utilização de energias renováveis.

## Referências

- (2021). Obtido de <http://geradordeprecos.cype.pt/>: <http://www.geradordeprecos.info/>
- Almeida, R. M. (Agosto de 2011). Avaliação do desempenho higrotérmico do parque escolar reabilitado.
- Almeida, R. M. (2011). Avaliação do desempenho higrotérmico do parque escolar reabilitado.
- Almeida, R. M., & De Freitas, V. P. (2016). An insulation thickness optimization methodology for school buildings rehabilitation combining artificial neural networks and life cycle cost.
- Almeida, R. M., Ramos, N. M., & Manuel, S. (2015). Towards a methodology to include building energy simulation uncertainty in the Life Cycle Cost analysis of rehabilitation alternatives.
- Ashrafian, T., Yilmaz, A. Z., Corgnati, S. P., & Moazzen, N. (2016). Methodology to define cost-optimal level of architectural measures for energy efficient retrofits of existing detached residential buildings in Turkey.
- Barbosa, T. P. (2017). Auditoria energética e simulação dinâmica de um edifício público: o caso do Teatro Municipal de Bragança (Doctoral dissertation).
- Bot, K., Ramos, N. M., Almeida, R., Pereira, P., & Monteiro, C. (2019). Energy performance of buildings with on-site energy generation and storage-An integrated assessment using dynamic simulation.
- Carlo, J. (2008). Desenvolvimento de metodologia de avaliação da eficiência energética do envoltório de edificações não-residenciais.
- Comissão Europeia. (Setembro de 2021). <https://eur-lex.europa.eu/>. Obtido de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52013DC0149&from=ES>
- DesignBuilder 2.1 User's Manual. (agosto de 2021). Obtido de <https://designbuilder.co.uk/training/tutorials>
- designbuildersoftware. (2020). Obtido de [http://www.designbuildersoftware.com/docs/designbuilder/DesignBuilder\\_2.1\\_Users-Manual\\_Ltr.pdf](http://www.designbuildersoftware.com/docs/designbuilder/DesignBuilder_2.1_Users-Manual_Ltr.pdf)
- Direito da Eficiência Energética. (2017). Em S. T. Silva, Direito da Eficiência Energética. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra.
- Gonçalves, H., & Graça, J. M. (Novembro de 2004). Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal.

## REFERÊNCIAS

- <https://designbuilder.co.uk>. (Junho de 2020). Obtido de <https://designbuilder.co.uk>
- <https://ec.europa.eu>. (agosto de 2021). Obtido de [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Estat%C3%ADsticas\\_sobre\\_os\\_pre%C3%A7os\\_da\\_eletricidade&oldid=496211#Pre.C3.A7os\\_da\\_eletricidade\\_para\\_consumidores\\_dom.C3.A9sticos](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Estat%C3%ADsticas_sobre_os_pre%C3%A7os_da_eletricidade&oldid=496211#Pre.C3.A7os_da_eletricidade_para_consumidores_dom.C3.A9sticos)
- <https://ec.europa.eu/>. (Setembro de 2020). Obtido de [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/pt/MEMO\\_03\\_154](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/pt/MEMO_03_154)
- <https://pt.climate-data.org/>. (Abril de 2020). Obtido de <https://pt.climate-data.org/europa/portugal/coimbra/coimbra-160/>
- <https://www.europarl.europa.eu/>. (2020). Obtido de <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/pt/sheet/68/politica-energetica-principios-gerais>
- ipcc.ch. (2021). Obtido de <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/07/SPM-Portuguese-version.pdf>
- Jardim, F. M. (2009). Proposta de Intervenção e Reabilitação Energética de Edifícios de Habitação.
- Kazem, M., Ezzeldin, S., & Tolba, O. (Agosto de 2021). Life-cycle cost analysis for façade retrofit measures of residential buildings in Cairo.
- Kuusk, K., Kalamees, T., & Maivel, M. (2014). Cost effective of energy performance improvements in Estonian brick apartment buildings.
- Liu, L., Rohdin, P., & Moshfegh, B. (2016). LCC assessments and environmental impacts on the energy renovation of a multi-family building from the 1890s.
- Machado, R. A. (Novembro de 2014). Reabilitação de Edifícios visando a Eficiência Energética.
- Negrão, J., Almeida, R., Vicente, R., & Ferreira, T. (Julho de 2019). Relatório de Caracterização e inspeção da casa das Andorinhas.
- Niemelä, T., Kosonem, R., & Jokisalo, J. (2017). Cost-effectiveness of energy performance renovation measures in Finnish brick apartment buildings.
- Nogueira, J. P. (2010). Análise e Resposta à Diretiva 2010/31/UE no contexto nacional-ciclo de vida, independência energética da rede e emissões de dióxido de carbono.
- Oliveira, R., Figueiredo, A., Vicente, R., & Almeida, R. M. (2018). Multi-Objective Optimisation of the Energy Performance of the Lightweight Constructions Combining Evolutionary Algorithms and the Life Cycle Cost.

## REFERÊNCIAS

SANTOS, C. P. (Junho de 2012). Reabilitação de edifícios para promoção do conforto e da eficiência energética, Net Zero Energy Buildings Conference, LNEC.

Santos, M. R.-B. (Outubro de 2017). Ventilação natural e comportamento térmico de edifícios.

Teixeira, A. M. (Junho de 2009). Impacto da Norma de Conforto Europeia EN 15251 na certificação energética em edifícios de serviços. Impacto da Norma de Conforto Europeia EN 15251 na certificação energética em edifícios de serviços.

Urge-Vorsatz, D., Cabeza, L. F., Serrano, S., Barreneche, C., & Petricheno, K. (2015). Heating and cooling energy trends and drivers in buildings.

Urge-Vorsatz, D., Petrichenko, K., Staniec, M., & Eon, J. (2013). Energy use in buildings in a long-term perspective. Current Opinion in Environmental Sustainability.

Vasconcelos, A. B., Santos, A., & Cabaço, A. (Novembro de 2016). REABILITAÇÃO TÉRMICA E ILUMINAÇÃO NUM EDIFÍCIO PORTUGUÊS.

Zhai, Z. J., & Helman, J. M. (2019). Implications of climate changes to building energy and design.

## Anexo

## I. Cenário C1 sem aquecimento;

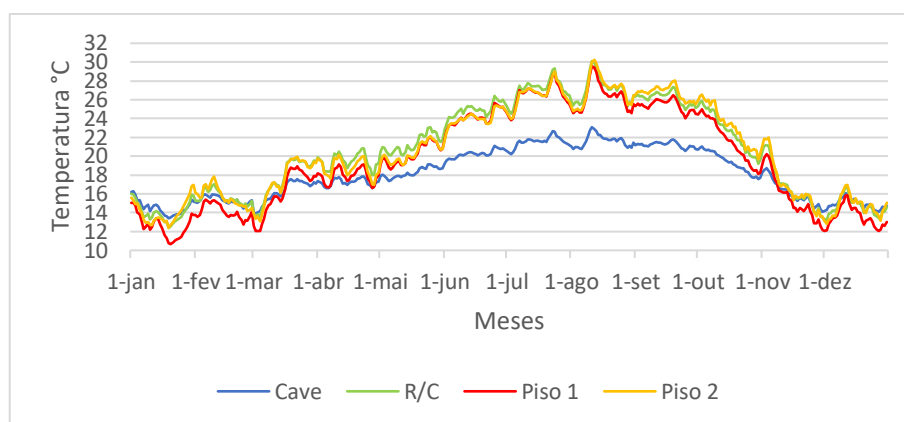


Figura A.1 - Variação da temperatura do cenário C1 sem aquecimento

Quadro A.1 – Avaliação do conforto através do método adaptativo (cenário C1 sem aquecimento)

	Inverno		Verão	
	G.h	%	G.h	%
<b>Cave</b>	26303,75	99,50	0	0
<b>R/C</b>	16948,78	50,99	118,83	2,42
<b>Piso 1</b>	23117,75	59,94	17,06	0,47
<b>Piso 2</b>	17507,85	54,16	123,56	2,51

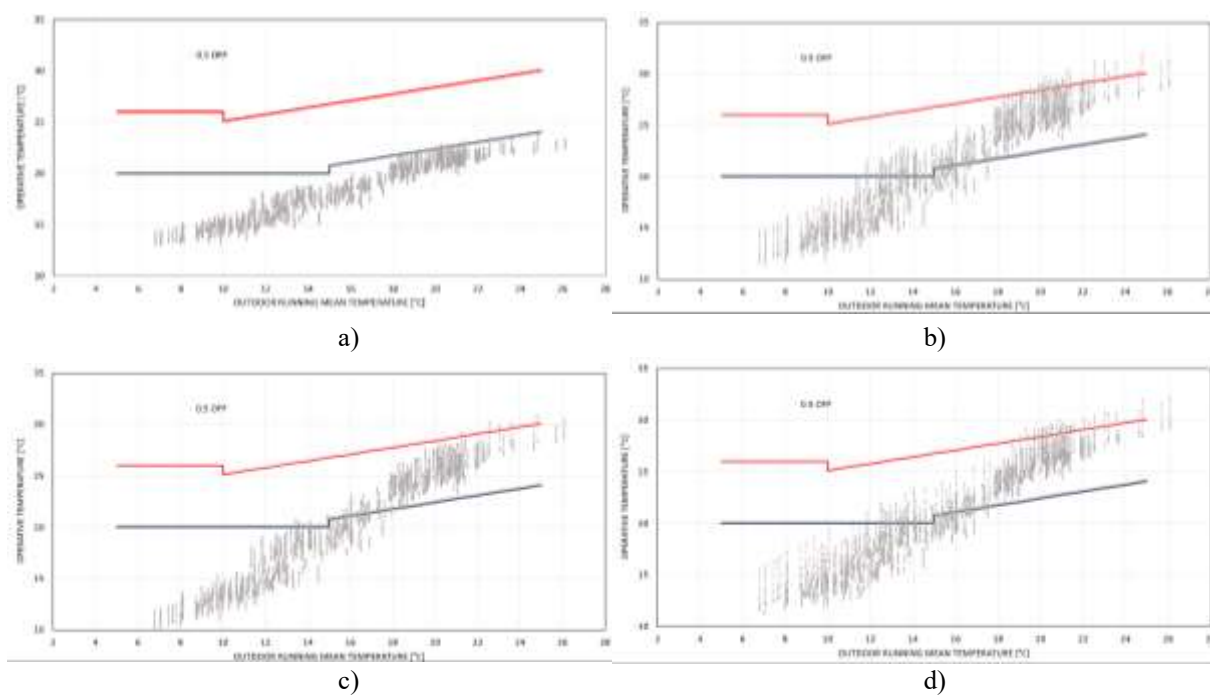


Figura A.2 - Conforto adaptativo no cenário C1 sem aquecimento: a) cave; b) R/C; c) piso 1; d) piso 2

II. Cenário C1 com aquecimento;

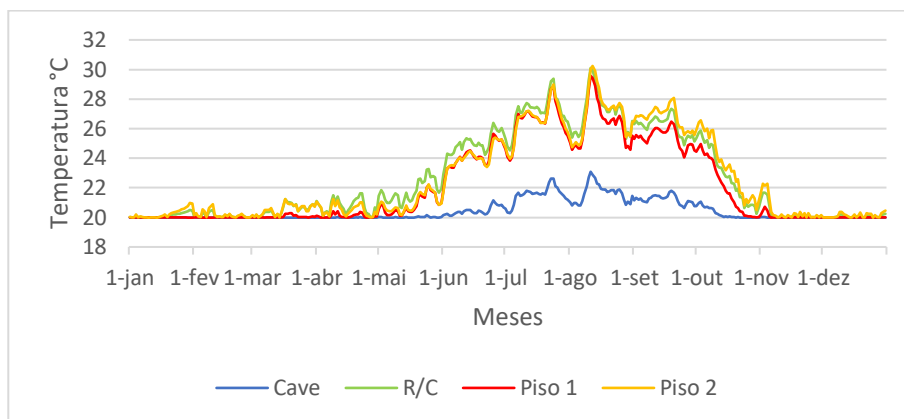


Figura A.3 - Variação da temperatura do cenário C1 com aquecimento

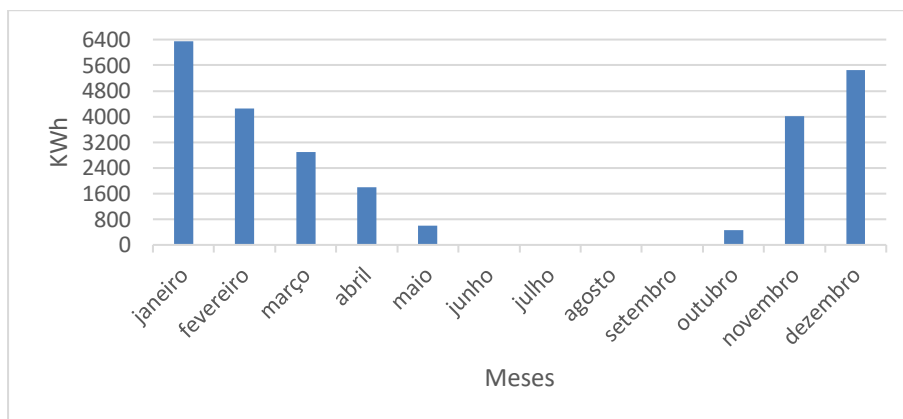


Figura A.4- Consumo energético anual do cenário C1 25.867,23 kWh

Quadro A.2- Avaliação do conforto através do método adaptativo (cenário C1 com aquecimento)

	Inverno		Verão	
	G.h	%	G.h	%
<b>Cave</b>	5610,00	49,92	0	0
<b>R/C</b>	243,94	5,34	118,95	2,42
<b>Piso 1</b>	649,82	10,58	17,07	0,47
<b>Piso 2</b>	293,53	6,85	123,37	2,51

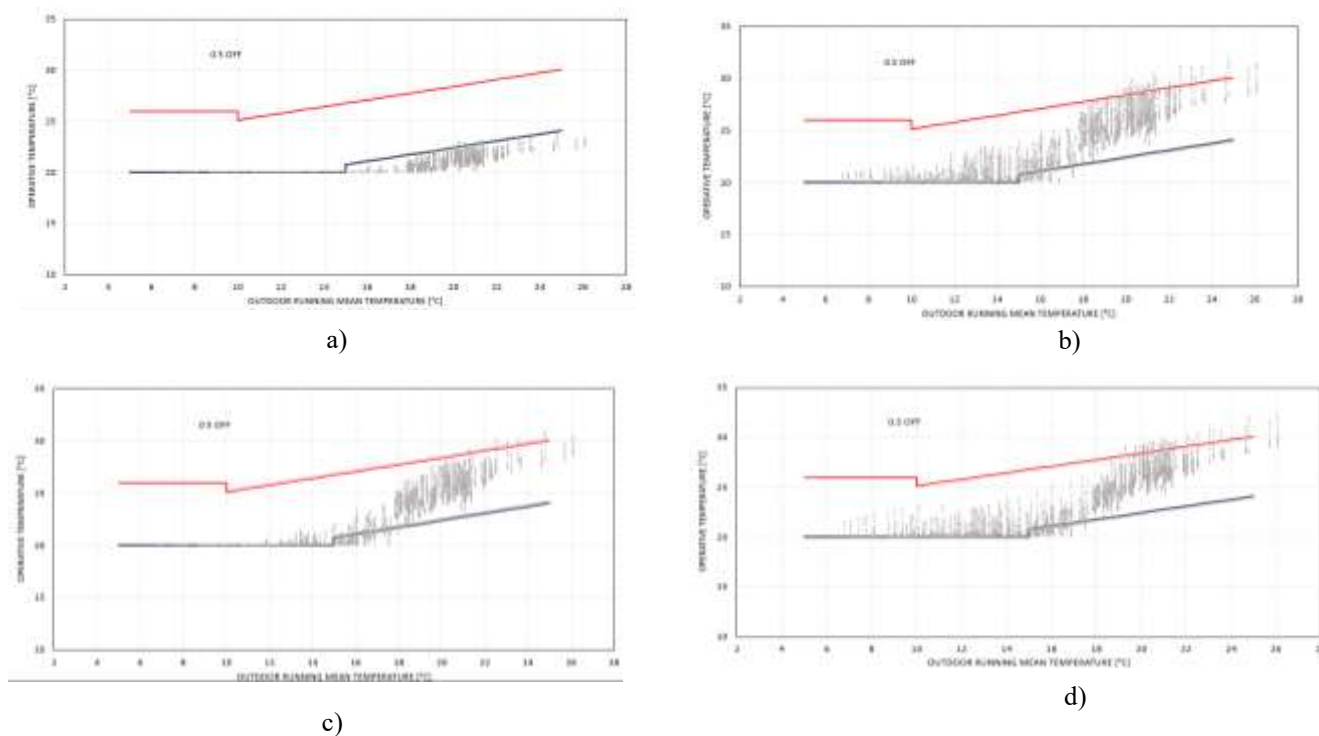


Figura A.5 - Conforto adaptativo no cenário C1 com aquecimento: a) cave; b) R/C; c) piso 1; d) piso 2

III. Cenário C2 sem aquecimento;

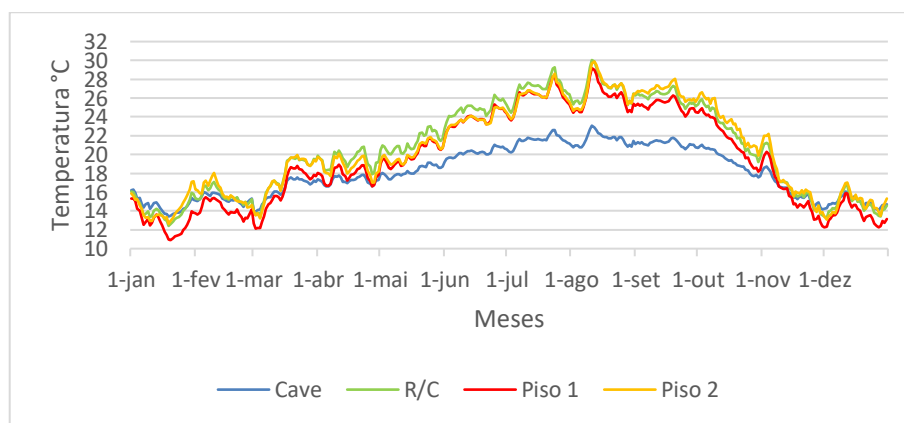


Figura A.5- Variação da temperatura do cenário C2 sem aquecimento

Quadro A.3- Avaliação do conforto através do método adaptativo (cenário C2 sem aquecimento)

	Inverno		Verão	
	G.h	%	G.h	%
<b>Cave</b>	26343,53	99,58	0	0
<b>R/C</b>	16870,41	51,26	103,84	2,21
<b>Piso 1</b>	22899,90	60,55	4,36	0,22
<b>Piso 2</b>	16923,50	54,28	87,49	2,18

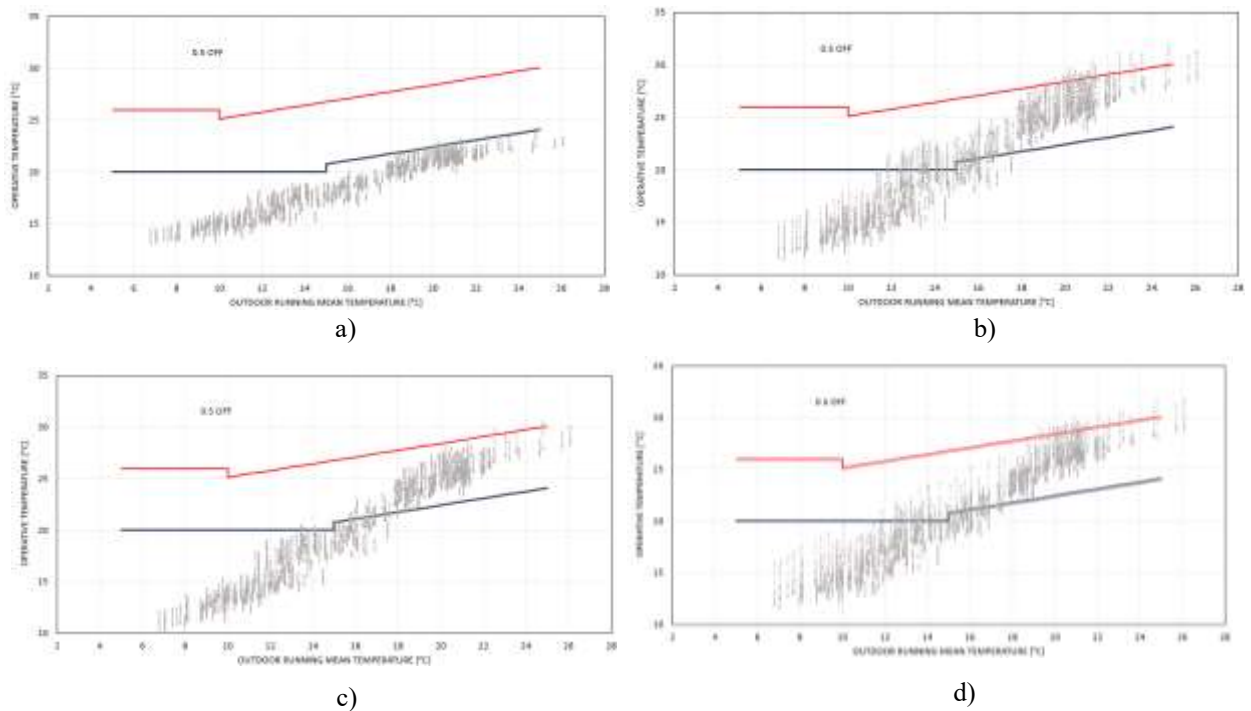


Figura A.6 - Conforto adaptativo no cenário C2 sem aquecimento: a) cave; b) R/C; c) piso 1; d) piso 2

## IV. Cenário C2 com aquecimento;

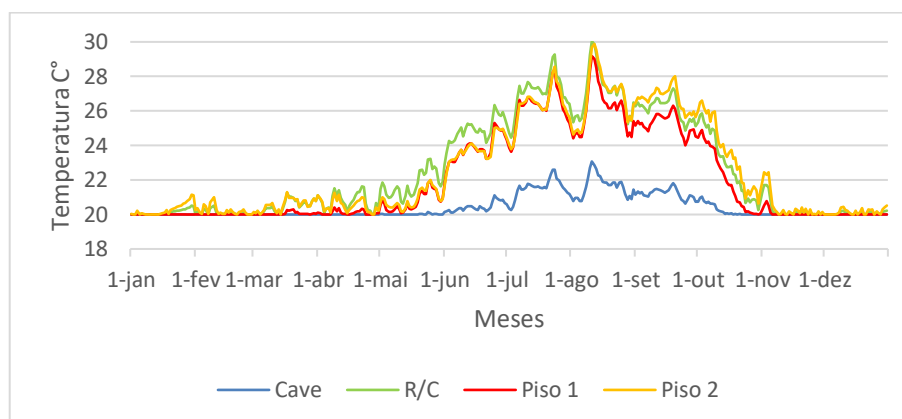


Figura A.7 -Variação da temperatura do cenário C2 com aquecimento

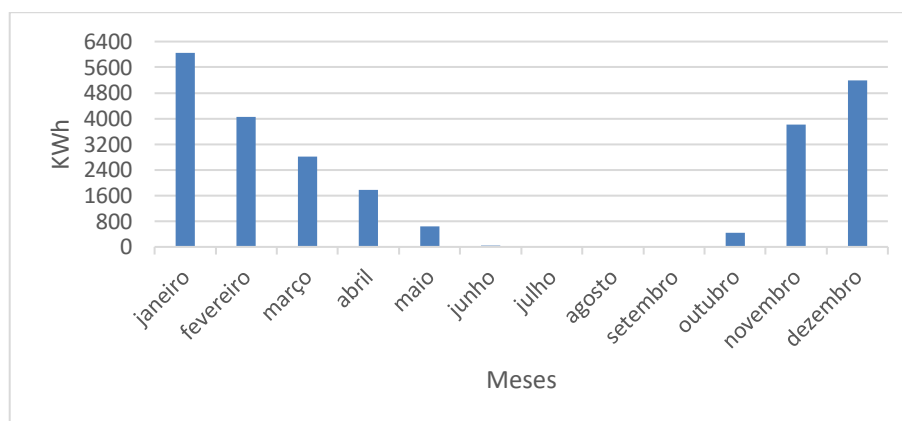


Figura A.8- Consumo energético anual do cenário C2 24.831,04 kWh

Quadro A.4- Avaliação do conforto através do método adaptativo (cenário C2 com aquecimento)

	Inverno		Verão	
	G.h	%	G.h	%
<b>Cave</b>	5660,13	50,00	0	0
<b>R/C</b>	243,63	5,35	103,96	2,21
<b>Piso 1</b>	669,40	10,89	4,36	0,22
<b>Piso 2</b>	300,57	6,99	87,50	2,18

## ANEXO

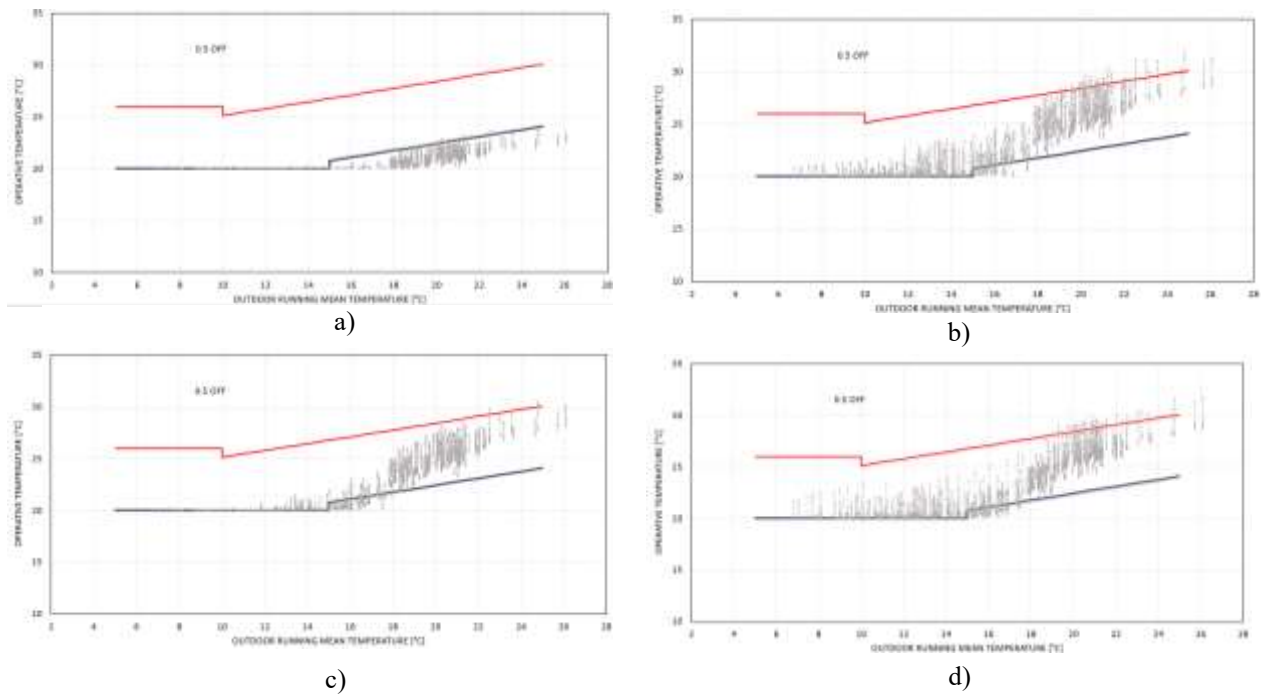


Figura A.9 - Conforto adaptativo no cenário C2 com aquecimento: a) cave; b) R/C; c) piso 1; d) piso 2

## V. Cenário C3 sem aquecimento

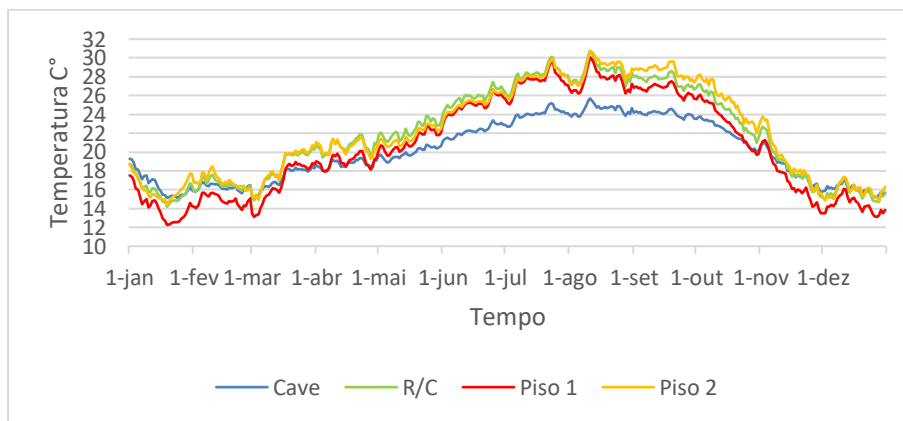


Figura A.10- Variação da temperatura do cenário C3 sem aquecimento

Quadro A.5 – Avaliação do conforto através do método adaptativo (cenário C3 sem aquecimento)

	Inverno		Verão	
	G.h	%	G.h	%
<b>Cave</b>	13621,12	60,74	0	0
<b>R/C</b>	11691,34	42,48	735,25	8,82
<b>Piso 1</b>	17933,63	52,21	111,92	2,47
<b>Piso 2</b>	10948,02	42,28	955,29	9,90

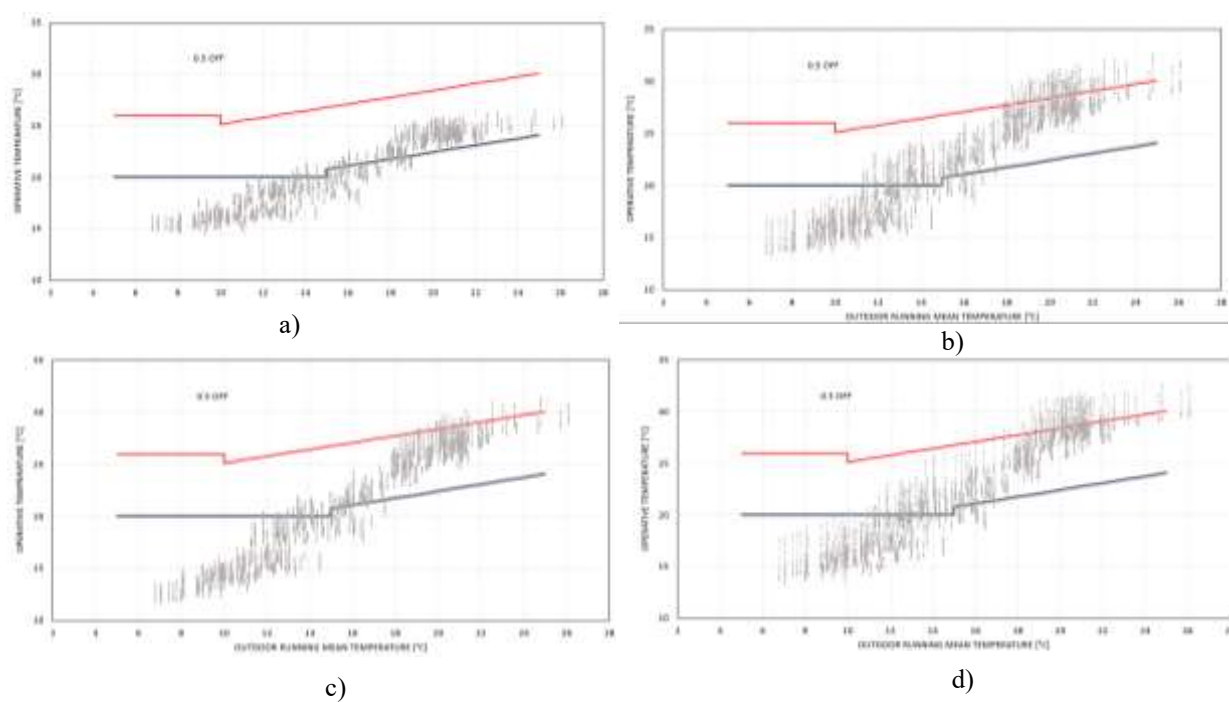


Figura A.11 - Conforto adaptativo no cenário C3 sem aquecimento: a) cave; b) R/C; c) piso 1; d) piso 2

VI. Cenário C3 com aquecimento

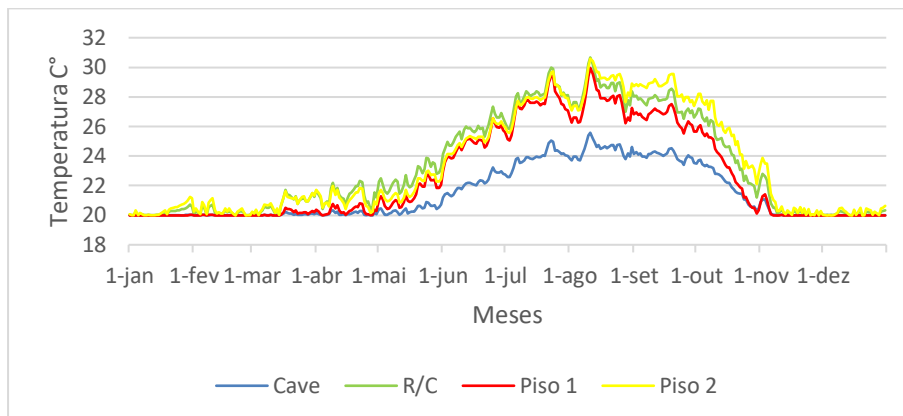


Figura A.12 -Variação da temperatura do cenário C3 com aquecimento

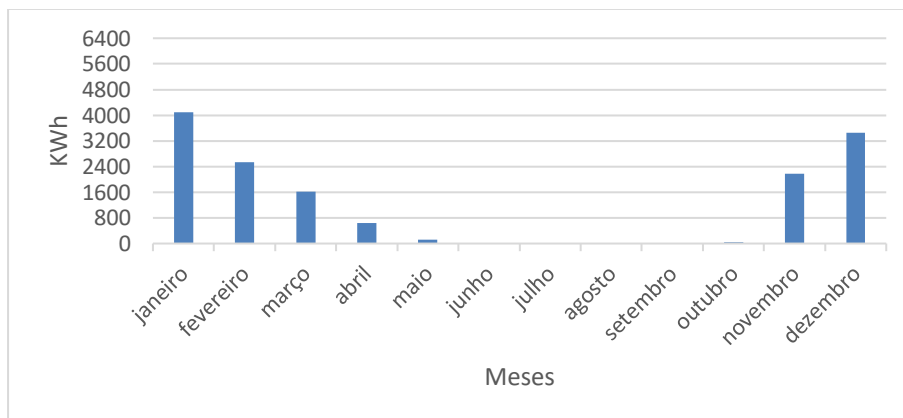


Figura A.14 - Consumo energético anual do cenário C3 14.675,76kWh

Quadro A.6 – Avaliação do conforto através do método adaptativo (cenário C3 com aquecimento)

	Inverno		Verão	
	G.h	%	G.h	%
<b>Cave</b>	786,28	13,11	0	0
<b>R/C</b>	83,76	2,29	691,05	8,58
<b>Piso 1</b>	312,13	5,56	98,3	2,26
<b>Piso 2</b>	69,55	2,50	897,50	9,49

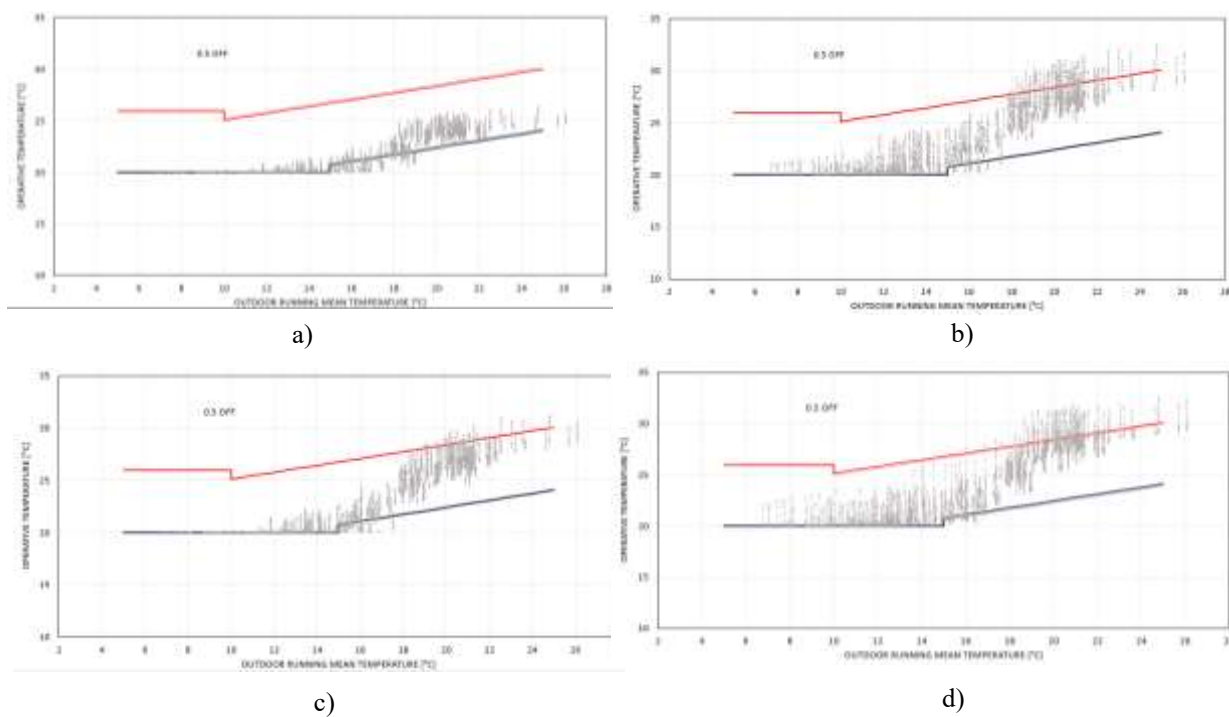


Figura A.15 - Conforto adaptativo no cenário C3 com aquecimento: a) cave; b) R/C; c) piso 1; d) piso 2

VII. Cenário C4 sem aquecimento

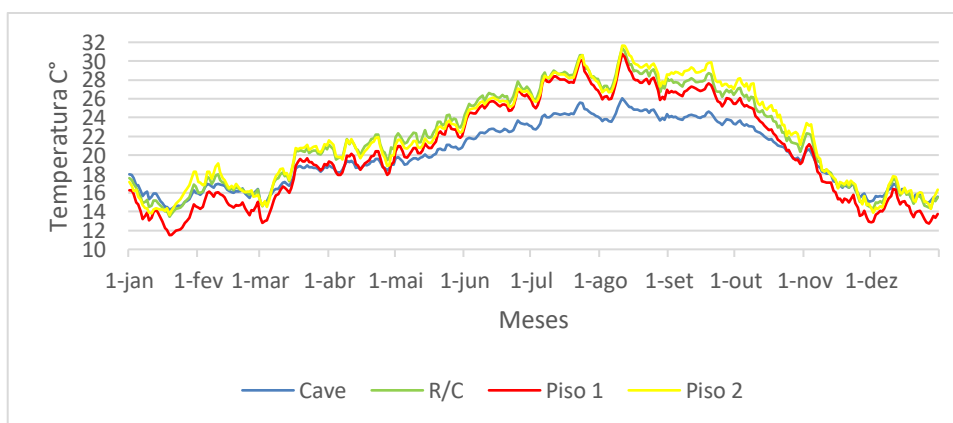


Figura A.16 -Variação da temperatura do cenário C4 sem aquecimento

Quadro A.7 – Avaliação do conforto através do método adaptativo (cenário C4 sem aquecimento)

	Inverno		Verão	
	G.h	%	G.h	%
<b>Cave</b>	14522,52	61,13	0	0
<b>R/C</b>	12562,22	42,11	911,31	9,78
<b>Piso 1</b>	18642,52	52,18	195,48	3,47
<b>Piso 2</b>	11998,92	41,64	1175,50	11,29

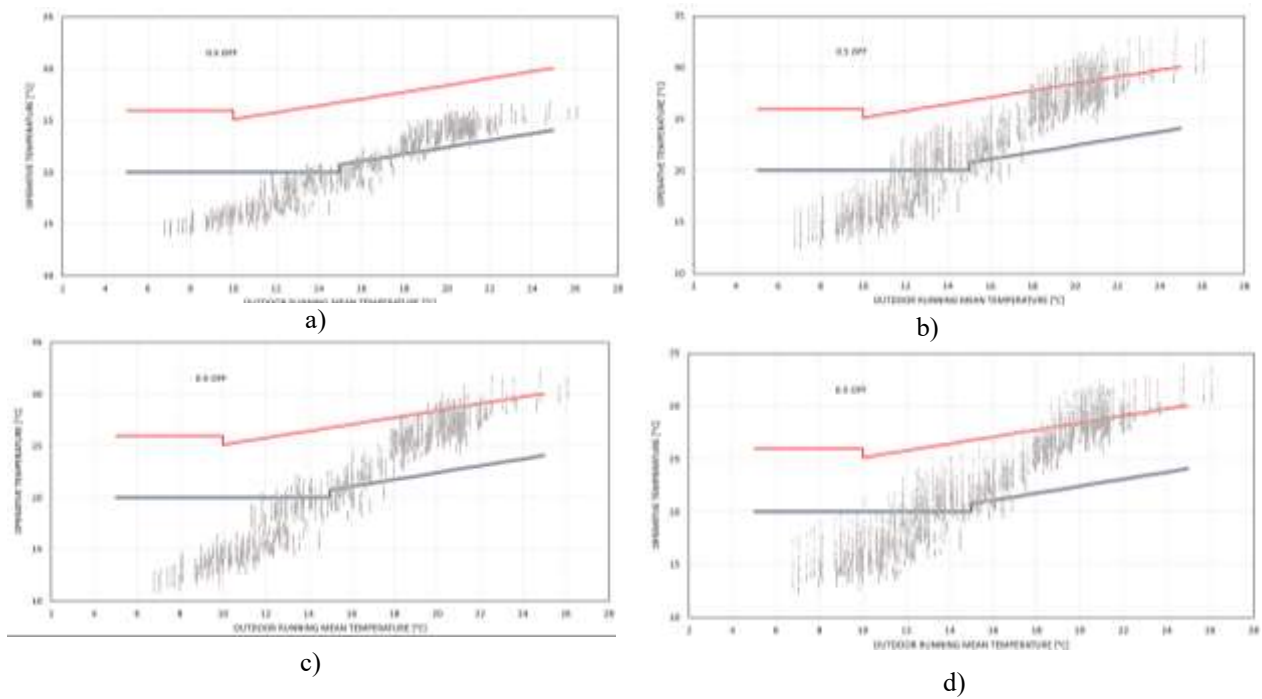


Figura A.17 - Conforto adaptativo no cenário C4 sem aquecimento: a) cave; b) R/C; c) piso 1; d) piso 2

VIII. Cenário C4 com aquecimento

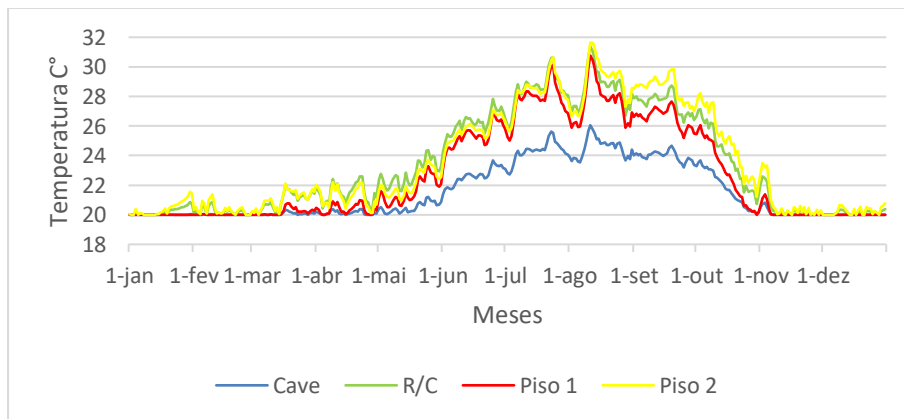


Figura A.18 - Variação da temperatura do cenário C4 com aquecimento

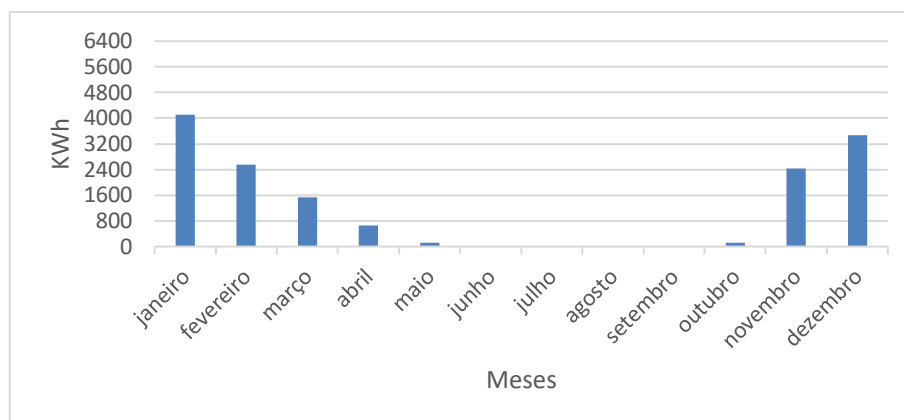


Figura A.19- Consumo energético anual do cenário C4 14.983,72kWh

Quadro A.8 – Avaliação do conforto através do método adaptativo (cenário C4 com aquecimento)

	Inverno		Verão	
	G.h	%	G.h	%
<b>Cave</b>	727,88	12,85	0	0
<b>R/C</b>	85,77	2,34	911,44	9,78
<b>Piso 1</b>	299,36	5,78	195,48	3,47
<b>Piso 2</b>	47,91	2,02	1175,51	11,29

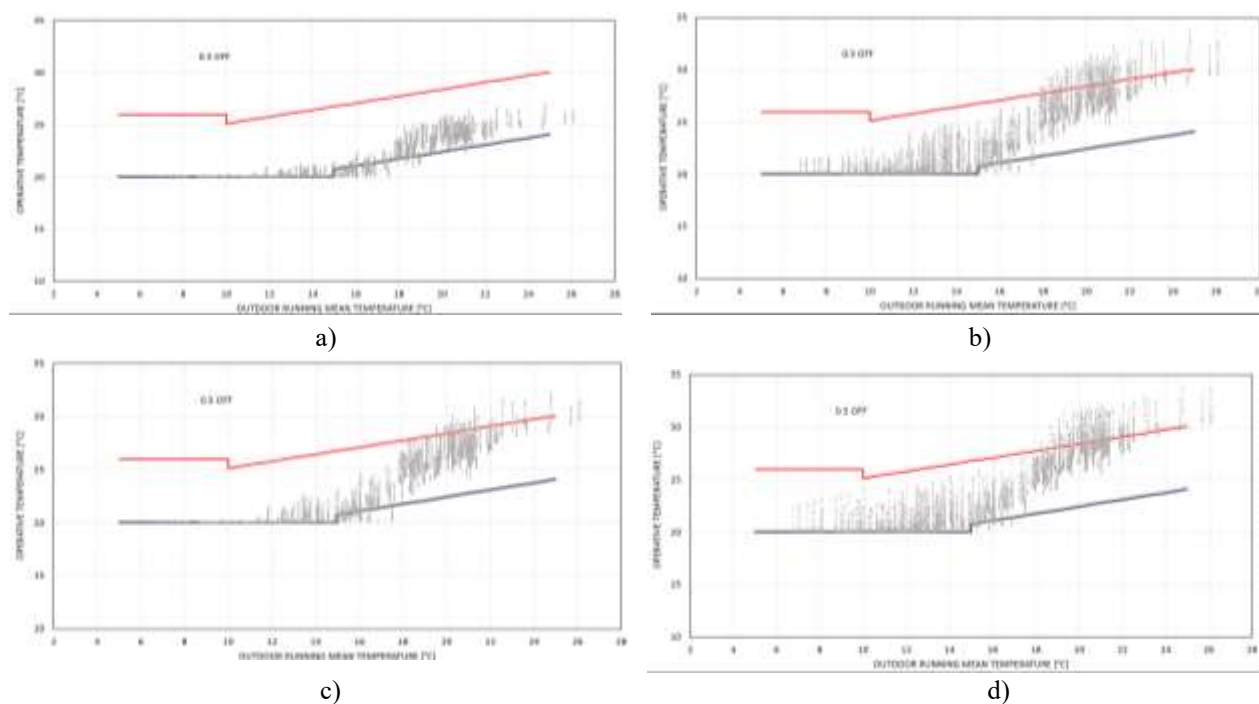


Figura A.20 - Conforto adaptativo no cenário C4 com aquecimento: a) cave; b) R/C; c) piso 1; d) piso 2

IX. Cenário C5 sem aquecimento

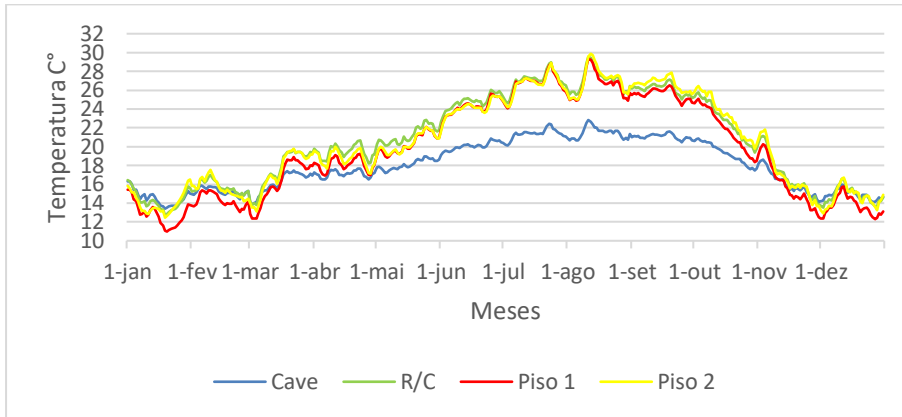


Figura A.21 - Variação da temperatura do cenário C5 sem aquecimento

Quadro A.9 – Avaliação do conforto através do método adaptativo (cenário C5 sem aquecimento)

	Inverno		Verão	
	G.h	%	G.h	%
<b>Cave</b>	27214,44	99,79	0	0
<b>R/C</b>	16420,53	51,15	61,33	1,70
<b>Piso 1</b>	22201,70	59,39	10,62	0,38
<b>Piso 2</b>	17605,45	54,69	71,49	1,97

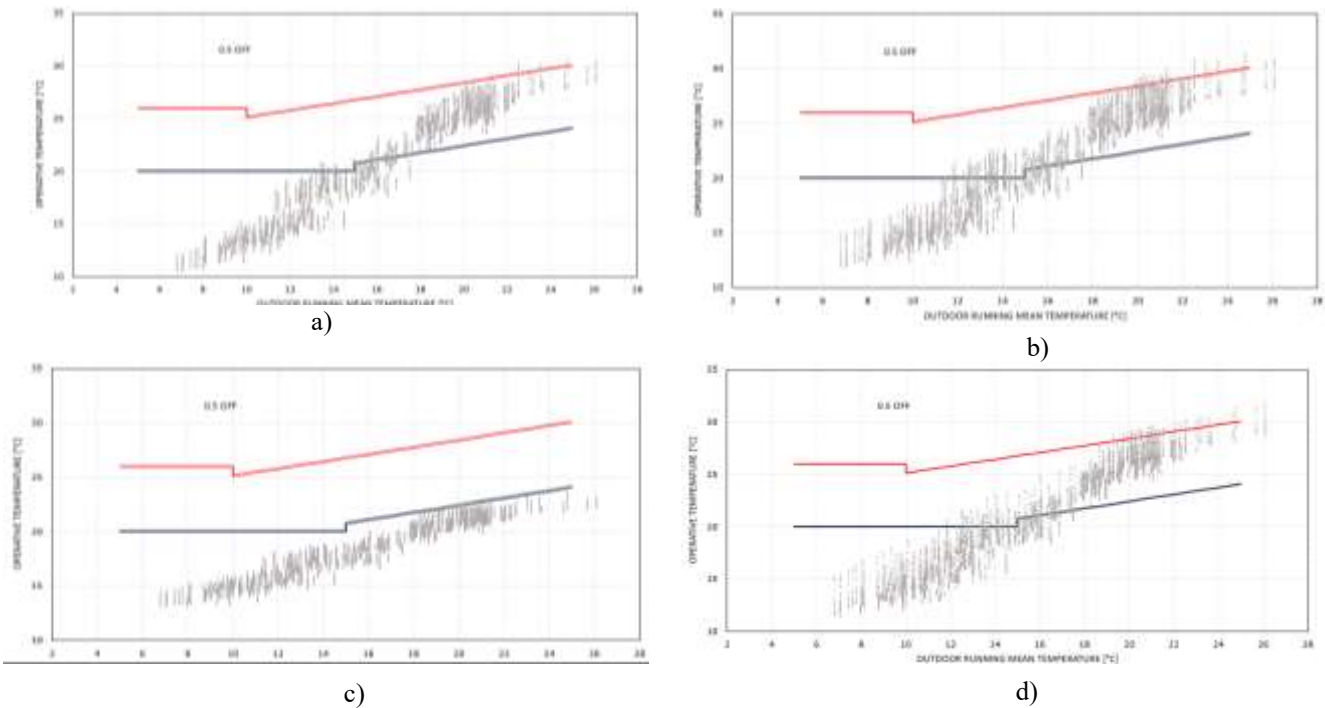


Figura A.22 - Conforto adaptativo no cenário C5 sem aquecimento: a) cave; b) R/C; c) piso 1; d) piso 2

## X. Cenário C5 com aquecimento

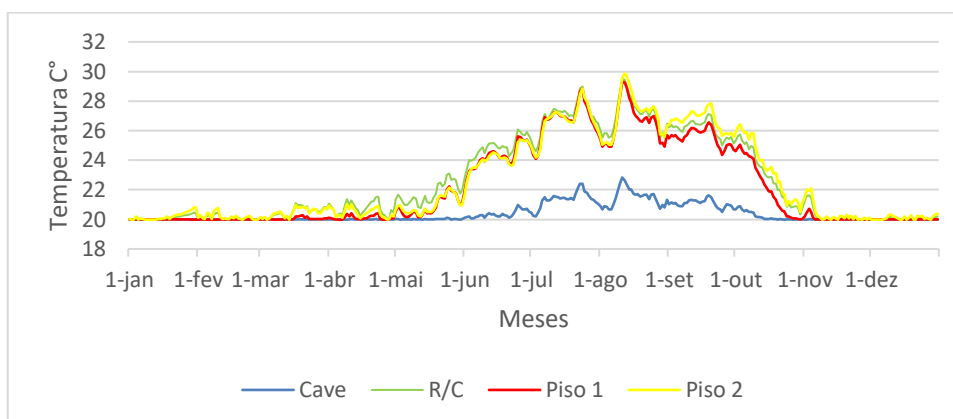


Figura A.23 - Variação da temperatura do cenário C5 com aquecimento

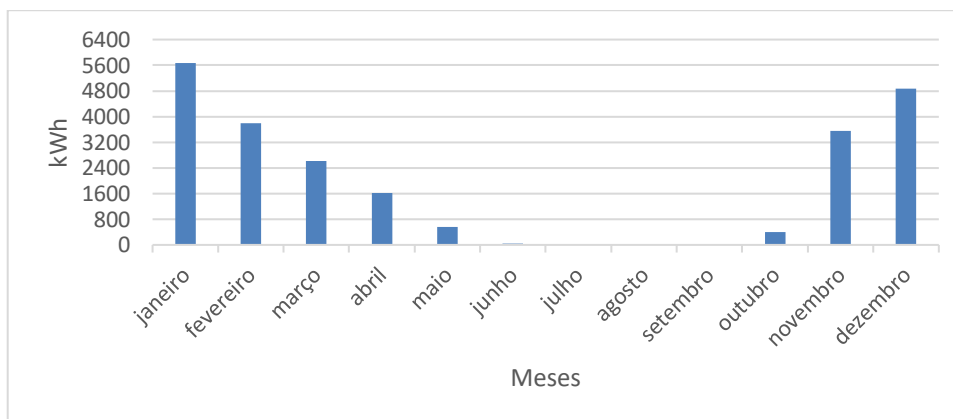


Figura A.24- Consumo energético anual do cenário C5 23.144,72kWh

## Quadro A.10 – Avaliação do conforto através do método adaptativo (cenário C5 com aquecimento)

	Inverno		Verão	
	G.h	%	G.h	%
<b>Cave</b>	6073,75	50,24	0	0
<b>R/C</b>	236,28	4,91	61,46	1,70
<b>Piso 1</b>	586,59	9,91	10,63	0,38
<b>Piso 2</b>	292,85	6,66	71,50	1,97

## ANEXO

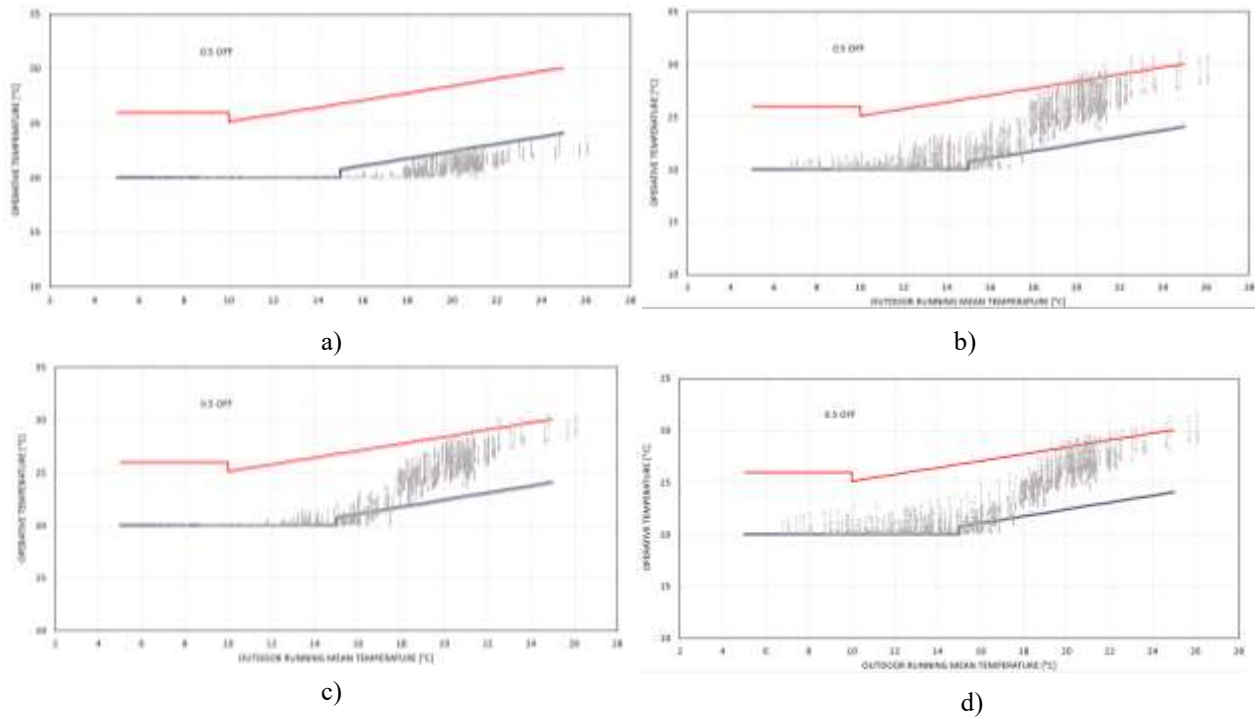


Figura A.25 - Conforto adaptativo no cenário C5 com aquecimento: a) cave; b) R/C; c) piso 1; d) piso 2

### XI. Cenário C6 sem aquecimento

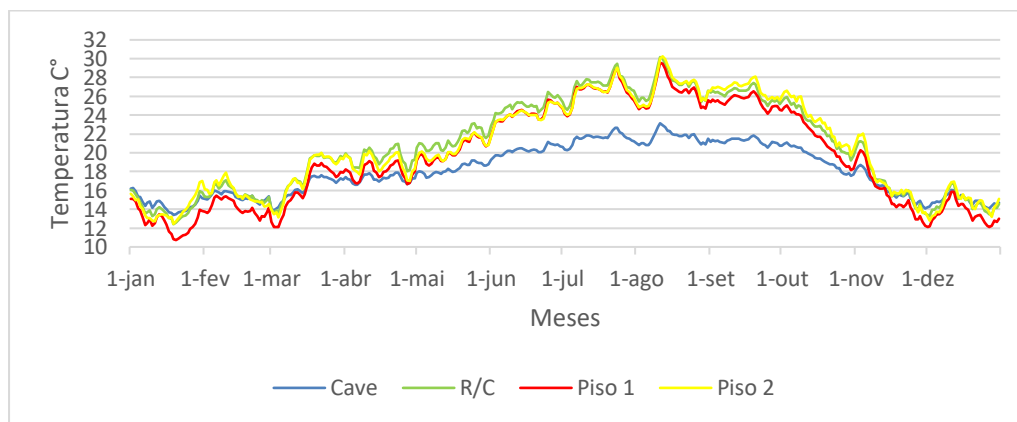


Figura A.26 - Variação da temperatura do cenário C6 sem aquecimento

Quadro A.11 – Avaliação do conforto através do método adaptativo (cenário C6 sem aquecimento)

	Inverno		Verão	
	G.h	%	G.h	%
<b>Cave</b>	26139,81	99,36	0	0
<b>R/C</b>	16754,82	50,48	139,92	2,72
<b>Piso 1</b>	22852,43	59,75	18,14	0,49
<b>Piso 2</b>	17254,48	53,79	139,04	2,67

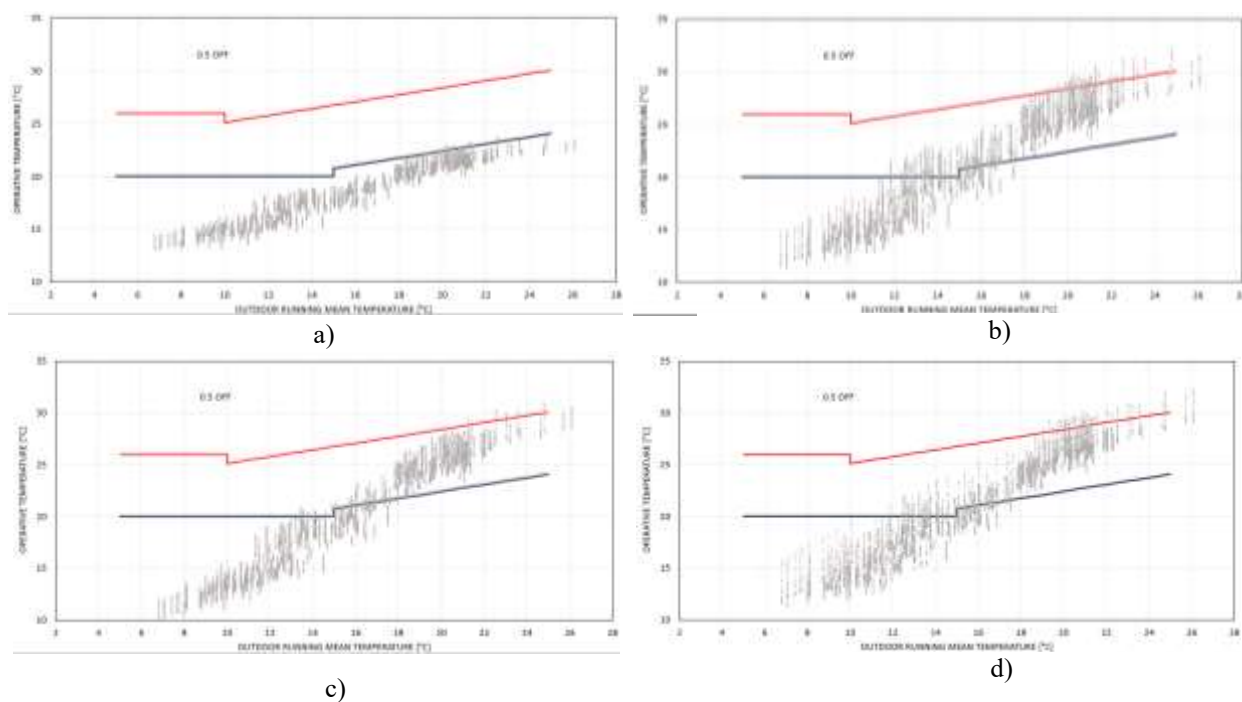


Figura A.27 - Conforto adaptativo no cenário C6 sem aquecimento: a) cave; b) R/C; c) piso 1; d) piso 2

XII. Cenário C6 com aquecimento

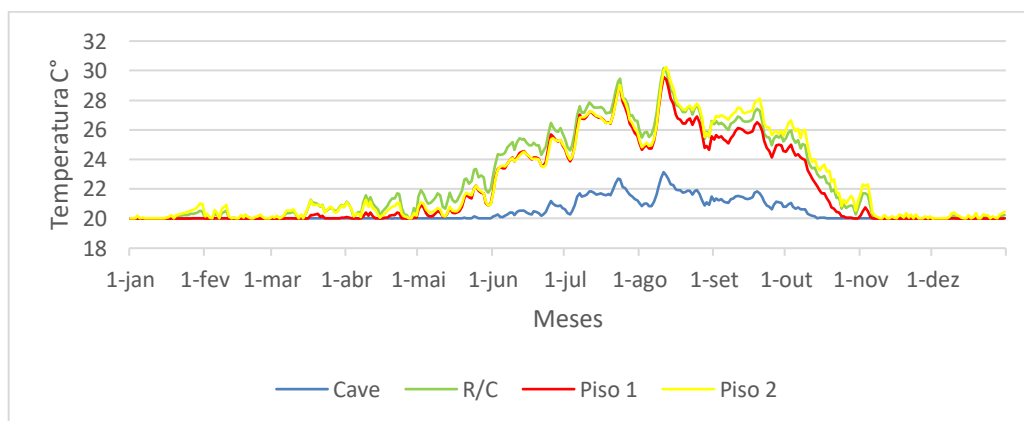


Figura A.28 - Variação da temperatura do cenário C6 com aquecimento

ANEXO

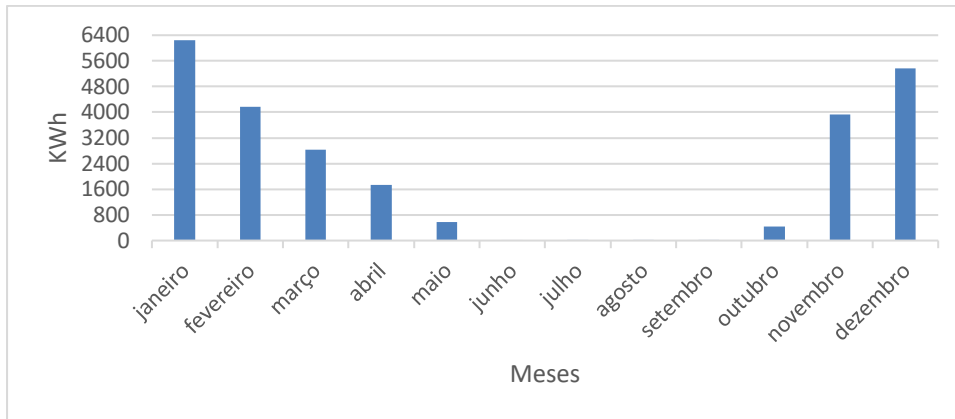
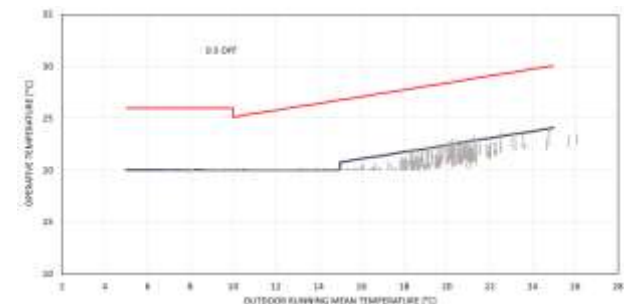


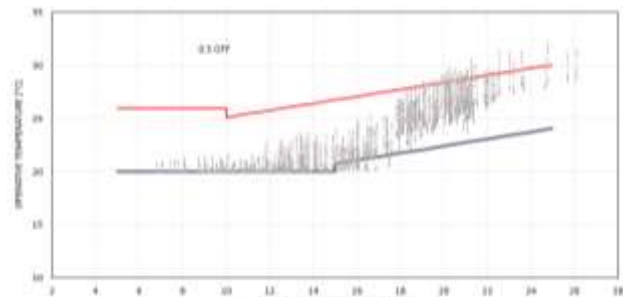
Figura A.29- Consumo energético anual do cenário C6 25.330,11 kWh

Quadro A.12 – Avaliação do conforto através do método adaptativo (cenário C6 com aquecimento)

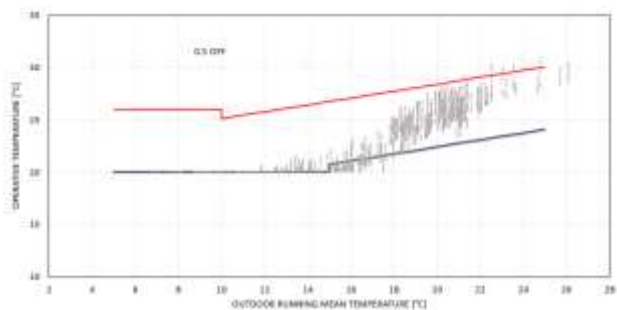
	Inverno		Verão	
	G.h	%	G.h	%
<b>Cave</b>	5505,27	49,81	0	0
<b>R/C</b>	232,71	5,08	140,06	2,72
<b>Piso 1</b>	628,70	10,43	18,15	0,49
<b>Piso 2</b>	281,20	6,70	139,05	2,67



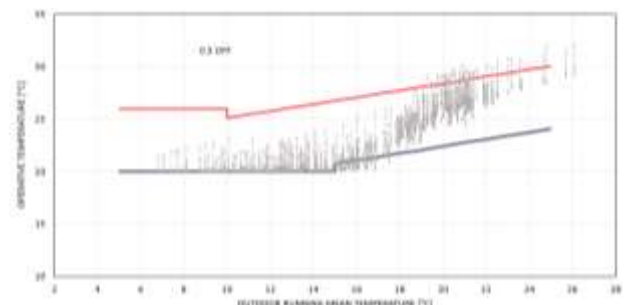
a)



b)



c)



d)

Figura A.29 - Conforto adaptativo no cenário C6 com aquecimento: a) cave; b) R/C; c) piso 1; d) piso 2

XIII. Cenário C7 sem aquecimento

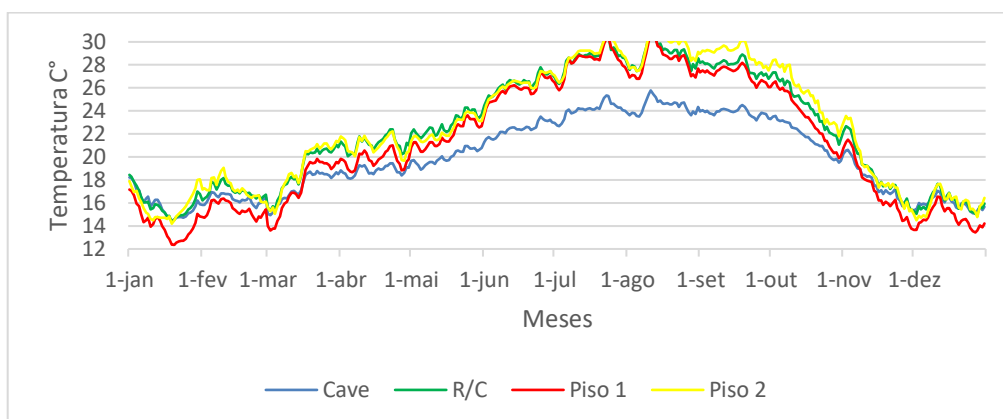
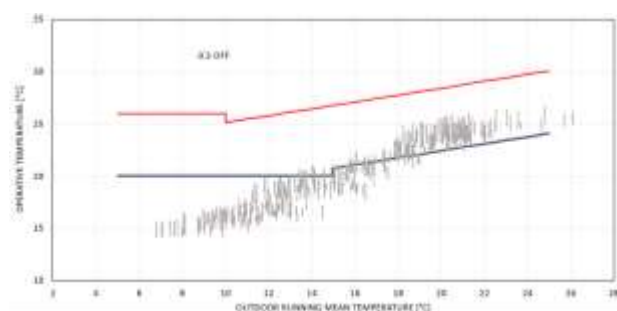


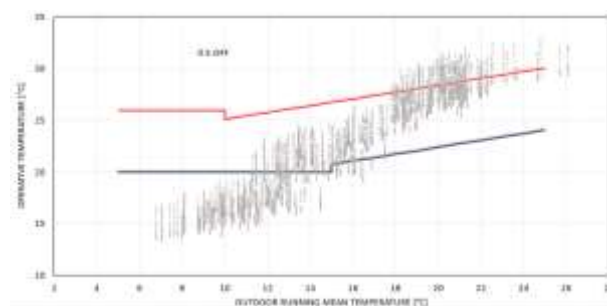
Figura A.30 - Variação da temperatura do cenário C7 sem aquecimento

Quadro A.13 – Avaliação do conforto através do método adaptativo (cenário C7 sem aquecimento)

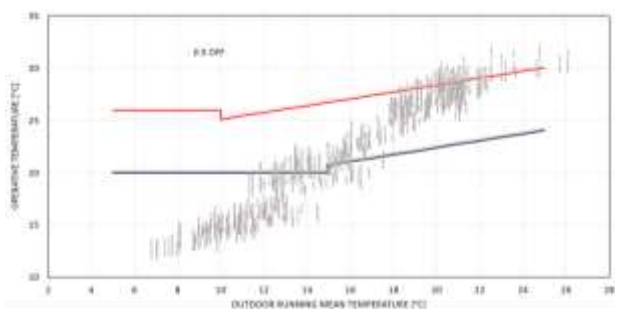
	Inverno		Verão	
	G.h	%	G.h	%
<b>Cave</b>	14225,25	61,79	0	0
<b>R/C</b>	10673,23	39,60	1043,13	11,10
<b>Piso 1</b>	16096,18	47,71	407,94	6,67
<b>Piso 2</b>	10668,65	38,36	1701,04	16,94



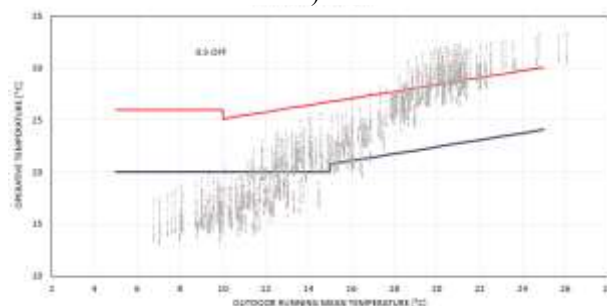
a)



b)



c)



d)

ANEXO

Figura A.31 - Conforto adaptativo no cenário C1 sem aquecimento: a) cave; b) R/C; c) piso 1; d) piso 2

XIV. Cenário C7 com aquecimento

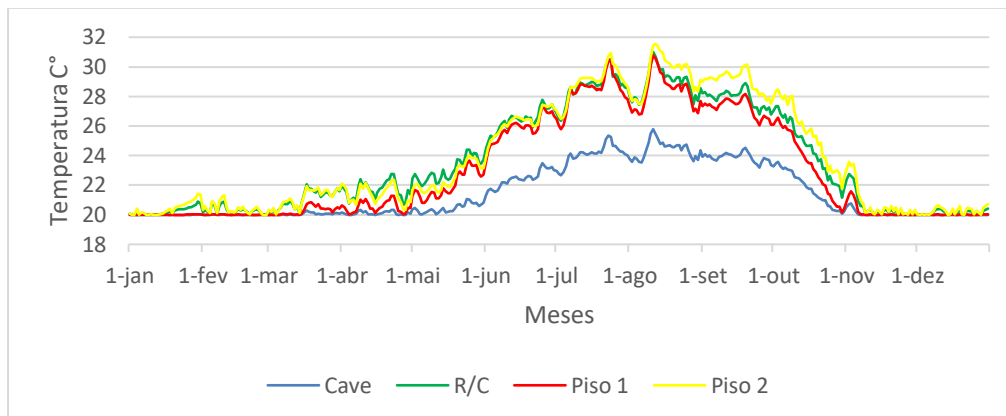


Figura A.32 - Variação da temperatura do cenário C7 com aquecimento

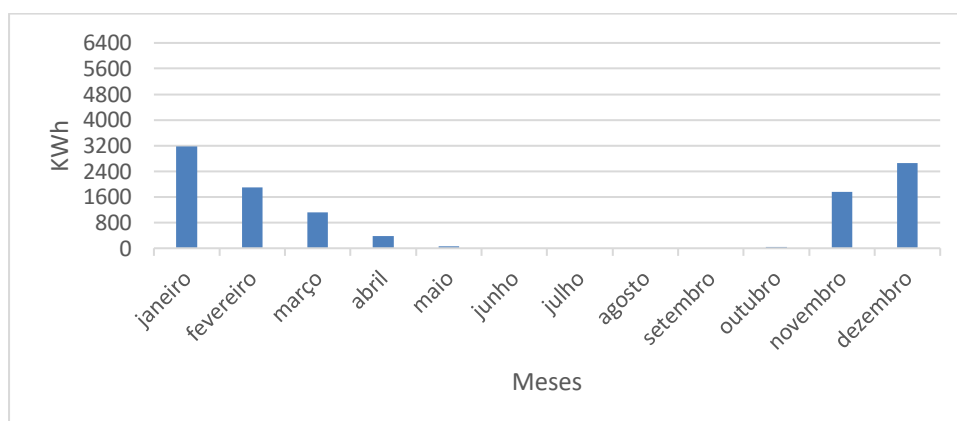


Figura A.33 - Consumo energético anual do cenário C7 11.087,92 kWh

Quadro A.14 – Avaliação do conforto através do método adaptativo (cenário C7 com aquecimento)

	Inverno		Verão	
	G.h	%	G.h	%
<b>Cave</b>	775,52	13,38	0	0
<b>R/C</b>	43,99	1,56	1043,40	11,10
<b>Piso 1</b>	196,72	3,94	407,97	6,67
<b>Piso 2</b>	20,52	1,11	1701,07	16,94

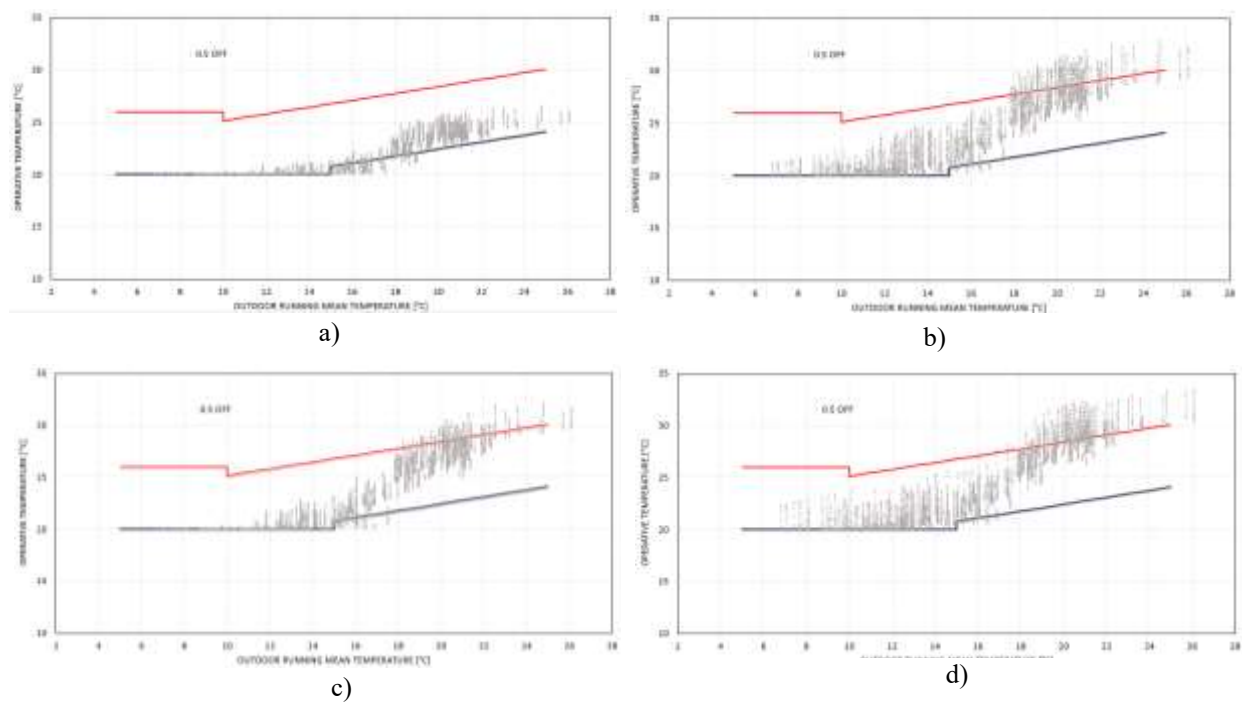


Figura A.31 - Conforto adaptativo no cenário C1 sem aquecimento: a) cave; b) R/C; c) piso 1; d) piso 2