



NOVA
NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL

JUDITH JOÃO DELGADO NANTES

Licenciada em Ciências da Engenharia Civil

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE VERÃO
EM EDIFÍCIOS UNIFAMILIARES CONSTRUÍDOS COM
CROSS LAMINATED TIMBER (CLT)**

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL

Universidade NOVA de Lisboa

Agosto, 2022



AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE VERÃO EM EDIFÍCIOS UNIFAMILIARES CONSTRUÍDOS COM CROSS LAMINATED TIMBER (CLT)

JUDITH JOÃO DELGADO NANTES

Licenciada em Ciências da Engenharia Civil

Orientador: Prof. Doutor Daniel Aelenei
Professor Associado, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor Nuno Manuel da Costa Guerra,
Professor Associado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa (FCT-NOVA)

Arguentes: Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar,
Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa (FCT-NOVA)

Orientador: Doutor Daniel Aelenei,
Professor Associado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa (FCT-NOVA)

Avaliação do comportamento térmico de verão em edifícios unifamiliares construídos com Cross Laminated Timber (CLT)

Copyright ©Judith João Delgado Nantes, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

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

Ao meu marido, aos meus pais, irmãos e sobrinhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Daniel Aelenei, pela escolha do tema, pela orientação, acompanhamento pessoal e contínua formação na área da avaliação do comportamento térmico de edifícios durante o percurso curricular do mestrado.

Agradeço a professora Adelina, o professor Grings e a todos os professores do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, pela criação de elementos fundamentais para a formação profissional como engenheira civil.

Gostaria de agradecer a todos os meus familiares e amigos, em especial aos meus pais e irmãos por todo amor, apoio e inspiração.

Ao Pedro pelo amor, respeito, compreensão, paciência e apoio incondicional em todos os momentos.

A todos, muito obrigada!

*“Quanto mais claramente pudermos focar a nossa atenção nas maravilhas e realidades do universo
ao nosso redor, menos gosto teremos pela destruição”.*
(Rachel Carson)

RESUMO

A corrente preocupação com o meio ambiente, tem levantado várias discussões relacionadas ao impacto da indústria da construção na natureza. A busca por soluções alternativas, potencializa o uso da madeira como um material sustentável e economicamente viável, a ser aplicado num futuro próximo.

Este trabalho, surge da necessidade em se desenvolver soluções construtivas sustentáveis, que consigam responder de forma eficiente a falta de conforto térmico no verão.

Neste sentido, foram desenvolvidas três soluções construtivas baseadas em madeira laminada cruzada (CLTA, CLTB e CLTC) e uma solução de Alvenaria corrente como elemento de comparação. Que através da ferramenta de simulação dinâmica *Energyplus*, passaram por uma avaliação térmica, de modo a se compreender a variação do comportamento térmico de verão entre as soluções de madeira e a construção corrente.

Para otimização da análise, foi feita a alteração da localização do edifício, com a primeira avaliação térmica em Lisboa e a segunda em Faro.

Em termos gerais, o presente estudo permitiu analisar o comportamento de térmico da madeira laminada cruzada, quando exposto ao clima de Portugal, demonstrando de forma detalhada a influência dos elementos da envolvente opaca no desempenho térmico dos edifícios e expondo a importância da consideração de soluções construtivas adequadas e capazes de reduzir os consumos energéticos.

Palavras-chaves

Comportamento térmico de verão, Cross Laminated Timber, CLT, Sustentabilidade, EnergyPlus, Sobreaquecimento, Necessidades energéticas.

ABSTRACT

The current concern with the environment, has raised several discussions about the impact of the construction industry on nature. The search for alternative solutions brings the use of wood as a sustainable and economically viable material to be applied in the future.

This work arises from the need to develop sustainable constructive solutions that can efficiently respond to the lack of thermal comfort in the summer.

In this sense, three cross-laminated wood (CLTA, CLTB and CLTC) solutions were developed and a fourth as a comparison element. With a dynamic simulation tool, the Energyplus, the solutions were underwent an evaluation thermal, to understand the variation of the thermal behavior of summer, between the solutions of wood and the current construction.

To optimize the analysis, the location of the building was changed, with the first thermal evaluation in Lisbon and the second in Faro.

In general, the present study allowed us to analyze the thermal behavior of the Cross Laminated Timber, when exposed to Portuguese climate, demonstrating in detail the influence of the elements of the opaque envelope on the thermal performance of buildings and exposing the importance of considering appropriate constructive solutions, and capable of reducing energy consumption.

Key words

Summer thermal behavior, Cross Laminated Timber, CLT, Sustainability, EnergyPlus, Overheating, Energy requirements.

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AVAC - Aquecimento, ventilação e ar condicionado

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

BLAST- Building Loads Analysis and System Thermodynamics

EPBD – Energy performance of buildings directive

IT – Isolamento térmico

nZEB - Nearly Zero Energy Building

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

REH - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

RECS – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

SCE - Sistema de Certificação Energética dos Edifícios

CLT – Cross laminated timber

CLTA – Cross laminated timber solução A

CLTB – Cross laminated timber solução B

CLTC – Cross laminated timber solução C

ÍNDICE

Resumo	x
Abstract.....	xii
1. Introdução.....	1
1.1 Motivação e Enquadramento	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da dissertação.....	2
2. Comportamento Térmico dos Edifícios	3
2.1 Formas de transferências de calor	3
2.1.1 Transferência de calor por condução	3
2.1.2 Transferência de calor por convecção	4
2.1.3 Transferência de calor por radiação	4
2.2 Fundamentos do comportamento térmico dos edifícios	5
2.2.1 Coeficiente de transmissão térmica superficial.....	6
2.2.2 Inércia térmica	6
2.3 Balanço Energético	8
2.4 Noções de sobreaquecimento.....	9
2.5 Legislação térmica	10
3. Madeira laminada cruzada (CLT)	13
3.1 <i>Mass Timber Build</i>	13
3.1.1 Madeira laminada cruzada	13
4. Metodologia de Trabalho.....	21
4.1 Energyplus	22
4.2 Dados de Entrada (Input)	24
4.3 Dados de saída.....	31
4.4 Descrição do Modelo	32

4.5	Zonamento climático	33
4.6	Soluções construtivas	34
5.	Apresentação e análise dos resultados	39
5.1	Análise da envolvente opaca: Lisboa	40
5.2	Avaliação da influência dos envidraçados	49
5.3	Avaliação da influência da renovação de Ar.....	54
5.4	Avaliação da influência dos ganhos internos	58
5.5	Alteração da localização do edifício: Faro	62
6.	Conclusão.....	67
6.1	Desenvolvimentos Futuros	68
7.	Referências bibliográficas	70
8.	ANEXOS	74

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Transmissão de calor através de um elemento construtivo.....	5
Figura 2.2 - Balanço Energético [9].....	8
Figura 2.3 : Evolução da Legislação térmica nacional [12].....	11
Figura 3.1 e Figura 3.2: Edifício “Hoho Wien”, Viena [15].....	14
Figura 3.3 e Figura 3.4: Escola Red Bridge, Lisboa [16]	14
Figura 3.5: Edifício “T3 – Timber, Technology and Transit”, USA [17].....	15
Figura 3.6: Svartlamoen Housing, Trondheim [18]	15
Figura 3.7: Mjøstårnet building, Noruega [19].....	16
Figura 3.8: Ripas infinitas	17
Figura 3.9: Finger-joint transversal e longitudinal (esquerda para direita).	18
Figura 3.10: Processo de montagem dos painéis	18
Figura 3.11: Finalização dos painéis para aplicação.	18
Figura 4.1: Metodologia de trabalho (esquema).....	21
Figura 4.2: Diagrama Energyplus [25].	22
Figura 4.3: Ferramenta EP-Launch	23
Figura 4.4: Temperatura exterior de Lisboa e Faro para os dias 28 a 30 de Agosto.	24
Figura 4.5: Versão usada	24
Figura 4.6: Condições de funcionamento da simulação	25
Figura 4.7: Localização do edifício	25
Figura 4.8: Período de simulação	26
Figura 4.9: Definição do tipo de variável	26
Figura 4.10: Cronograma de funcionamento.....	27
Figura 4.11: Soluções construtivas das envolventes	28
Figura 4.12: Definição da zona térmica	28
Figura 4.13: Construção dos elementos das envolventes	29
Figura 4.14: Modelagem dos vão envidraçados	29
Figura 4.15: Modelagem do Sistema de HVAC.....	30
Figura 4.16: Definição dos termostatos de funcionamento do.....	31
Figura 4.17: Planta esquemática do modelo	32
Figura 4.18: Modelos discriminados para a primeira e a segunda fase de simulação	33
Figura 5.1: Denominação dos elementos verticais.	39

Figura 5.2: Radiação solar incidente sobre cada elemento expresso em Wh/m ² (Lisboa)	40
Figura 5.3: Amortecimento e atraso térmico.....	41
Figura 5.4: Transferências de calor por condução (Caso 1)	41
Figura 5.5: Temperatura exterior e interior no período de 28 a 30 de Agosto (Caso 1)	42
Figura 5.6: Necessidades energéticas verão soluções CLTA e CLTB (Caso 1).....	43
Figura 5.7: Necessidades energéticas verão soluções CLTC e Alvenaria (Caso 1)	43
Figura 5.8: Consumos energéticos para estação de Aquecimento e Arrefecimento (Caso 1)	44
Figura 5.9: Amortecimento e Atraso térmico (Análise de sensibilidade CLT)	45
Figura 5.10: Temperaturas no exterior e interior do edifício (Análise de sensibilidade CLT)	46
Figura 5.11: Consumo energético período de arrefecimento (Análise de sensibilidade CLT)	46
Figura 5.12: Amortecimento e atraso térmico (Análise de sensibilidade IT)	47
Figura 5.13: Temperaturas no exterior e interior do edifício (Análise de sensibilidade IT) ..	48
Figura 5.14: Consumo energético período de arrefecimento (Análise de sensibilidade IT) ..	48
Figura 5.15: Ganhos solares pelos envidraçados	50
Figura 5.16: Temperaturas no exterior e interior do edifício (Caso 2)	51
Figura 5.17: Transferências de calor por condução (Caso 2)	52
Figura 5.18: Necessidades energéticas de verão soluções CLTA e CLTB (Caso 2).....	52
Figura 5.19: Necessidades energéticas de verão soluções CLTC e Alvenaria (Caso 2)	53
Figura 5.20: Consumos energéticos para estação de Aquecimento e Arrefecimento (Caso 2)	53
Figura 5.21: Ganhos e perdas por Renovação de Ar	54
Figura 5.22: Transferências de calor por condução (Caso 3)	55
Figura 5.23: Temperaturas no exterior e interior do edifício (Caso 3)	55
Figura 5.24: Necessidades energéticas de verão soluções CLTA e CLTB (Caso 3).....	56
Figura 5.25: Necessidades energéticas de verão soluções CLTC e Alvenaria (Caso 3)	56
Figura 5.26: Consumos energéticos para estação de Aquecimento e Arrefecimento (Caso 3)	57
Figura 5.27: Transferências de calor por condução (Caso 4)	58
Figura 5.28: Temperaturas no exterior e interior do edifício (Caso 4)	58
Figura 5.29: Necessidades energéticas de verão soluções CLTA e CLTB (Caso 4).....	59
Figura 5.30: Necessidades energéticas de verão soluções CLTC e Alvenaria (Caso 4)	60
Figura 5.31: Perfil de funcionamento do termostato durante o período de simulação	60
Figura 5.32: Perdas térmicas no edifício.....	61
Figura 5.33: Consumos energéticos para estação de Aquecimento e Arrefecimento (Caso 4)	61
Figura 5.34: Radiação solar incidente sobre cada elemento expresso em Wh/m ² (Faro).....	62

Figura 5.35: Transferências de calor por condução (Faro)	62
Figura 5.36: Temperaturas no exterior e interior do edifício (Faro)	63
Figura 5.37: Necessidades energéticas de verão soluções CLTA e CLTB (Faro).....	63
Figura 5.38: Necessidades energéticas de verão soluções CLTC e Alvenaria (Faro).....	64
Figura 5.39: Consumos energéticos para estação de Aquecimento e Arrefecimento (Faro)..	64

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Classes de Inércia térmica [5].....	7
Tabela 4.1: Caracterização do edifício	33
Tabela 4.2 : Zonamento Climático estação de Aquecimento	34
Tabela 4.3: Zonamento Climático estação de Arrefecimento	34
Tabela 4.4: soluções construtivas e coeficientes de transmissão térmica.....	35
Tabela 5.1: Balanço térmico total análise da envolvente opaca (Caso 1)	44
Tabela 5.2: Espessuras do CLT e coeficientes de transmissão térmica.....	45
Tabela 5.3: Espessuras do IT e coeficientes de transmissão térmica	47
Tabela 5.4: Soluções de envidraçados.....	49
Tabela 5.5: Vãos envidraçados.....	50
Tabela 5.6: Balanço térmico total pelo envidraçados.....	51
Tabela 5.7: Resumo balanço térmico (Caso 2).....	53
Tabela 5.8 - Balanço térmico total (Caso 3).....	57
Tabela 5.9: Balanço térmico total (Caso 4)	59
Tabela 5.10: Balanço térmico total (Faro).....	64

ANEXOS

Anexo A: Zonamento climático

Anexo B: Planta e Alçados

Anexo C: Planta

Anexo D: Alçado Frontal

Anexo E: Alçado Posterior

Anexo F: Alçado Lateral Direito

Anexo G: Alçado Lateral Esquerdo

Anexo H: Soluções Construtivas

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e Enquadramento

A construção é uma atividade indispensável ao desenvolvimento de qualquer sociedade, visto que contribui diretamente para o crescimento da economia. Na Europa, a indústria da construção constitui um dos setores económicos mais importantes, gerando 18 milhões de empregos diretos e contribuindo com cerca de 9% do PIB da EU [1].

Contrariamente a sua importância, existem preocupações nas mesmas proporções, no que toca a consumos de matérias-primas, recursos energéticos não renováveis e produção excessiva de resíduos não reutilizáveis.

A procura por soluções sustentáveis, sugere formas alternativas de construções ou até mesmo o resgate de técnicas antigas, o que tem conduzido a um interesse crescente pela utilização da madeira como material de construção.

Nos últimos anos, o termo *Mass Timber* tem sido vinculado ao conceito de construção do futuro, isso porque se trata de uma categoria de produtos geralmente compostos por grandes painéis de madeira sólida, significativamente mais leves e classificados como de alta resistência. Neste grupo, a proveniência da matéria-prima chama muita atenção, a medida que têm sido desenvolvidas florestas híbridas destinadas especificamente para a indústria *Mass timber build*.

A noção de construção sustentável, passa sobretudo pela análise do ciclo de vida das edificações, que vai desde a proveniência dos materiais até a finalidade dos seus componentes após a demolição/reabilitação. No entanto, durante o período de operação, os edifícios precisam dar respostas as funções pelos quais foram desenvolvidos, que inclui a capacidade de “abrigar atividade humana” e “proporcionar conforto”.

O aumento da preocupação com o conforto térmico no interior dos edifícios, tem vindo a se tornar num critério de maior relevância, uma vez que o desconforto térmico afeta negativamente a qualidade de vida dos ocupantes. Portugal, tal como outros países da união europeia, possui regulamentos térmicos que estabelecem requisitos mínimos, que garantem o conforto térmico no interior dos edifícios. Contudo, apesar da existência desses regulamentos, o problema de desconforto térmico no interior dos edifícios, ainda é um elemento bem presente na realidade portuguesa.

Deste modo, no sentido de evitar que os edifícios novos apresentem os mesmos problemas relacionados ao conforto térmico, esta dissertação entra como parte da avaliação do comportamento térmico de Verão de uma moradia construída com madeira laminada cruzada.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal a avaliar comportamento térmico de verão de uma moradia unifamiliar construída com madeira laminada cruzada, através da simulação dinâmica.

Para alcançar o objetivo principal, foi necessário definir alguns objetivos específicos tais como:

- Definição de soluções construtivas que apresentem o CLT como material base, compatíveis com as especificidades do contexto de Portugal;
- Avaliação do comportamento térmico do Madeira Laminada Cruzada face a construção de alvenaria corrente;
- Identificação de elementos que favorecem o sobreaquecimento e os meios de mitigação;
- Promover e intensificar a utilização de ferramentas de simulações energéticas, na análise e melhoria de projeto térmico de edifícios de habitação e serviço.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos:

No primeiro capítulo é feita uma abordagem sobre as motivações que levaram a desenvolver este trabalho, o enquadramento do tema no contexto atual, os objetivos e a estrutura da dissertação.

O segundo capítulo apresenta os conceitos relacionados ao comportamento térmico, focando-se nas formas de transferências de calor, coeficiente de transmissão térmica, inércia térmica, comportamento térmico de edifícios e os fatores que o influenciam, é também feita uma abordagem curta a cerca do sobreaquecimento de verão e sobre a evolução da legislação térmica em Portugal.

No terceiro capítulo é feita uma abordagem sobre o material “madeira laminada cruzada”, definição, categoria em que se enquadra, processo de produção, funcionamento e comportamento térmico.

O quarto capítulo apresenta de forma detalhada a metodologia de trabalho utilizada, é feita também apresentação do programa de simulação dinâmica “EnergyPlus”, o modelo utilizado na simulação dinâmica, bem como as soluções construtivas propostas para análise.

No quinto capítulo são apresentados todos os resultados e as conclusões de cada uma das análises feitas.

No sexto e último capítulo é apresentada a conclusão e as considerações finais sobre o trabalho, limitações encontradas na investigação e propostas de trabalhos futuros.

2. COMPORTAMENTO TÉRMICO DOS EDIFÍCIOS

2.1 Formas de transferências de calor

O calor é definido como a energia interna de um corpo ou superfície. O processo de transferência da energia interna com a finalidade de manter o equilíbrio entre os corpos ou superfícies é designado “Transferência de calor”. [2]

A transferência de calor, ocorre quando existe diferenças de temperaturas entre duas ou mais superfícies, pelo que o fluxo parte sempre da temperatura mais elevada para a menos elevada. Entre os elementos construtivos as transferências de calor podem ocorrer por condução, convecção e radiação. [2]

2.1.1 Transferência de calor por condução

A condução é o tipo de transferência de calor que ocorre quando há contato físico direto entre duas superfícies com diferentes temperaturas.

Na condução, o calor é transferido por colisões entre átomos e moléculas vizinhas, sendo caracterizada como o tipo de transferência de calor mais frequente entre sólidos. Esta denominação pode ser explicada pelo facto da posição fixa dos átomos favorecer a troca de energia entre eles em razão da frequência com que ocorrem as colisões. Quando ocorre em elementos construtivos com várias camadas, o calor flui gradualmente das camadas com temperaturas mais altas para as camadas com temperaturas mais baixas até se atingir o equilíbrio térmico.

A transferência de calor por condução é quantificada pela *Lei de Fourier*, que através da equação da condução permite determinar a quantidade de calor transferido de um elemento para o outro, desde que sejam conhecidas a condutibilidade térmica, a área da superfície e o gradiente de temperatura [3].

$$Q_{condução} = \lambda A \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Em que:

$Q_{condução}$ – fluxo de calor transferido por condução [W]

λ – condutibilidade térmica do material [W/m.°C]

A – área da superfície [m²]

$\frac{dT}{dx}$ – Gradiente de temperatura [°C/m]

2.1.2 Transferência de calor por convecção

A convecção, é um tipo de transferência própria dos fluidos, que ocorre quando um fluido mais frio que se encontra em movimento entra em contacto com outro fluido/superfície mais quente, ocorrendo simultaneamente as transferências de calor por condução e convecção. Em outras palavras, a convecção é um tipo específico de condução em que o calor é transportado pelas partículas do fluido em movimento (correntes convectivas).

Na transferência de calor por convecção, o movimento do fluido pode ser natural ou forçado. No primeiro caso, o movimento do fluido é gerado por diferenças de densidade resultantes do gradiente de temperatura e no segundo caso o movimento do fluido é provocado por um agente externo, como por exemplo uma ventoinha [3].

O fluxo de calor por convecção entre uma superfície e o fluido que a envolve é dada pela *lei de arrefecimento de Newton*:

$$Q_{conv} = h_c A_s (T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Em que:

Q_{conv} – quantidade de calor transferido por convecção [W]

h_c – condutância térmica superficial por convecção [$W/m^2\text{°C}$]

A_s – área da superfície [m^2]

T_s – temperatura da superfície [$^{\circ}C$]

T_∞ - temperatura do fluido [$^{\circ}C$]

2.1.3 Transferência de calor por radiação

Todas as superfícies emitem radiação térmica, pelo que a quantidade de energia emitida vai ser tanto maior quanto mais elevada for a temperatura.

No contexto da transmissão de calor, a radiação é definida como sendo o transporte de energia por meio de ondas eletromagnéticas, e ao contrário das formas de transferências de calor citadas anteriormente, a radiação não necessita de um meio material para que a transferência de calor se efetue.

Durante o processo de transferência de calor por radiação entre duas superfícies no qual uma envolve completamente a outra, se a superfície envolvida emitir mais energia do que aquela que recebe das superfícies envolventes a temperatura desta diminui gradualmente, e o fluxo de calor por radiação entre elas é determinado através da *lei de Stefan-Boltzmann* [3]:

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{env}^4) \quad (3)$$

Em que:

Q_{rad} – quantidade de calor transferido por radiação [W]

ε - emissividade da superfície

σ - constante de stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^4$)

A_s – área da superfície [m^2]

T_s – temperatura da superfície [K]

T_{env} - temperatura da envolvente [K]

2.2 Fundamentos do comportamento térmico dos edifícios

Segundo a definição, um edifício é uma construção de caracter permanente, limitado por envolventes que circunscrevem uma zona independente e que tem como finalidade abrigar atividade humana [4].

As envolventes de um edifício, são elementos que limitam uma zona térmica, através da separação física entre o ambiente exterior e interior, desempenhando um papel fundamental à medida que fazem a separação de um ambiente onde as condições térmicas independem do homem, de outro ambiente onde as condições térmicas são impostas e limitadas por regulamentos que salvagam as condições de conforto, higiene e segurança.

As interações entre as envolventes e o ambiente exterior podem ser descritas pelos três mecanismos de transmissão de calor descritos em 2.1 e manifestando-se da seguinte forma (Figura 2.1):

1. Transferência de calor por radiação e convecção entre a superfície exterior e o ambiente exterior.
2. Transferência de calor por condução, dentro do elemento construtivo, propagando-se no sentido da temperatura mais alta para a mais baixa.
3. Transferência de calor por radiação e convecção entre o ambiente interior e a superfície interior.

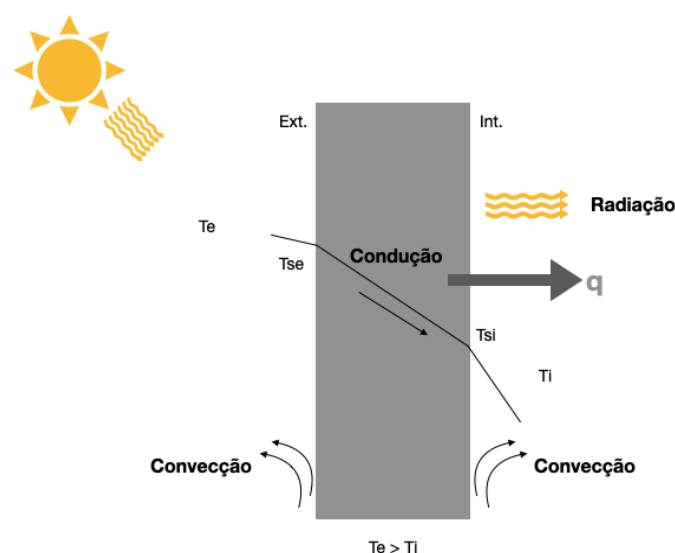


Figura 2.1: Transmissão de calor através de um elemento construtivo (Nunes, 2014)

2.2.1 Coeficiente de transmissão térmica superficial

O coeficiente de transmissão térmica, determina a quantidade de energia sob forma de calor que atravessa uma superfície de área unitária, de um elemento da envolvente opaca, quando a diferença de temperatura entre os dois ambientes é de uma unidade de temperatura. Este coeficiente é função inversa das resistências térmicas, pelo que quanto maior for a resistência térmica do elemento, menor será o coeficiente de transmissão térmica e melhor será a capacidade isolante do elemento.

O cálculo do coeficiente de transmissão térmica de um elemento construtivo é feito através do somatório do inverso das resistências térmicas superficiais e das várias camadas que compõem o elemento [5]:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_n R_n + R_{se}} \quad (4)$$

Em que:

U – Coeficiente de transmissão térmica superficial [W/m²°C]

R_{si} – Resistência térmica superficial interior [m²°C/W]

R_n – Resistência térmica da camada n [m²°C/W]

R_{se} – Resistência térmica superficial exterior [m²°C/W]

2.2.2 Inércia térmica

A inércia térmica, é a capacidade que os elementos construtivos têm em amortecer e desfazer o fluxo de calor que os atravessa. Por sua vez, a inércia térmica é função da massa dos materiais, da condutibilidade térmica e do calor específico, pelo que quanto menor for o isolamento térmico de um material, maior será a sua inércia térmica na medida em que, a condutibilidade térmica varia inversamente em relação à massa volúmica [3].

O cálculo da inércia térmica é feito a partir da seguinte expressão [5]:

$$I_t = \frac{\sum M_{si} \cdot r \cdot S_i}{A_p} \quad (5)$$

Em que:

M_{si} - Massa superficial útil do elemento i [kg/m²]

r - Fator de redução da massa superficial útil

S_i - Área da superfície interna do elemento i [m²]

A_p - Área útil de pavimento [m²]

De acordo com o valor obtido, a inércia térmica pode ser classificada em:

Tabela 2.1: Classes de Inércia térmica [5]

Classe de Inércia Térmica	<i>It</i>
<i>Fraca</i>	$It < 150$
<i>Média</i>	$150 \leq It \leq 400$
<i>Forte</i>	$It > 400$

Sobre os fluxos de calor entre o ambiente interior e exterior, a inércia térmica produz dois importantes efeitos: o Amortecimento térmico (μ) e o Atraso térmico (φ). O primeiro efeito promove a diferença entre as amplitudes térmicas (interior e exterior), enquanto o segundo estima o intervalo de tempo entre as temperaturas máximas exterior e interior.

Em termos quantitativos, o amortecimento térmico ou fator de amortecimento varia de 0 a 1, sendo que, quanto mais próximo do seu limite inferior maior é a capacidade do material em reduzir as oscilações térmicas.

O fator de amortecimento e o atraso térmico podem ser calculados a partir das seguintes equações [6]:

Amortecimento térmico:

$$\mu = e^{-x \cdot \sqrt{\frac{\pi}{T \cdot \sum n \alpha_i}}} \quad (6)$$

Em que:

x – Espessura da parede [m];

T – Período temporal 24 horas [h];

n – Número de elementos;

α - Difusividade térmica [m²/h].

Atraso térmico:

$$\varphi = \frac{x}{2} \cdot \sqrt{\frac{T}{\sum n \alpha_i \cdot \pi}} \quad (7)$$

A difusividade térmica pode ser calculada da seguinte forma:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (8)$$

Em que:

λ - Condutibilidade térmica [W/m.°C];

ρ - Peso específico do elemento [Kg/m³];

C_p - Calor específico [Kcal/Kg.°C].

A necessidade de inércia térmica alta, aumenta segundo as amplitudes térmicas e a radiação solar incidente, sendo mais apropriada em climas com grandes diferenças de temperaturas ao longo do dia. Em Portugal, devido as temperaturas médias anuais, a inercia térmica pode ser usada como princípio de aquecimento e arrefecimento passivo. Porém, há que se ter especial atenção quando se pretende usar a estratégia de alta inercia térmica nos componentes de cobertura e de paredes voltadas á Este e a Oeste, pois durante o período de verão existe uma maior incidência dos raios solares sobre esses elementos com ângulos próximos da perpendicular durante longas horas do dia, o que promove maior captação de energia solar, podendo transformar estes elementos em acumuladores de calor e conseqüentemente provocar elevado desconforto térmico. Portanto, neste tipo de situação, a estratégia deve ser aplicada com muito critério, procurando minimizar os ganhos solares através de isolamento térmico externo ou sombreamento no período diurno [7][8].

2.3 Balanço Energético

O comportamento energético de um edifício é resultado das trocas de calor que ocorrem nos seus ambientes. O balanço energético representa o equilíbrio entre a energia fornecida ao edifício e a energia produzida por ele, incluindo todas as fontes internas como, a ocupação, iluminação, equipamentos, bem como toda energia que flui através das suas envolventes.

A análise do balanço energético deve ser feita separadamente para o período de verão e para o período de inverno, pois o sentido dos fluxos de calor tem comportamento diferente em cada uma das estações. Para o período de inverno, a análise do balanço térmico fixa-se no cálculo das necessidades energéticas para aquecimento e no verão os parâmetros de calculo são as necessidades de energia para arrefecimento.

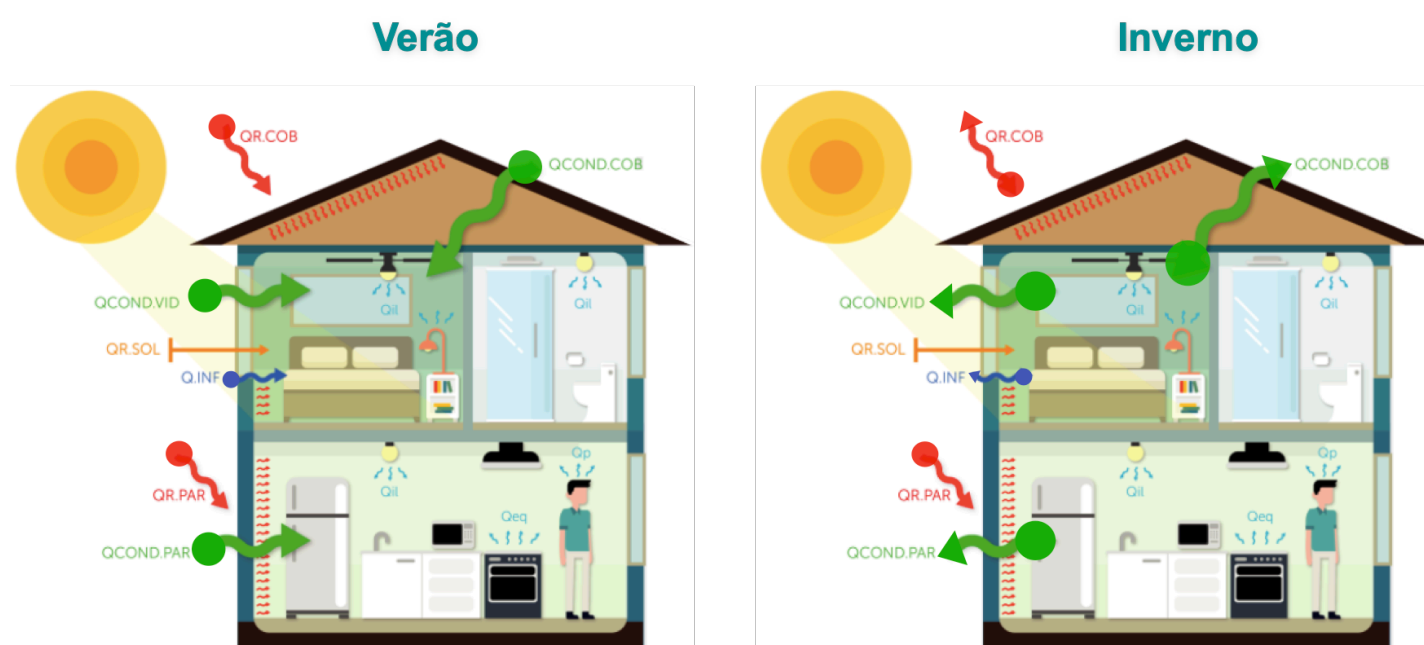


Figura 2.2 - Balanço Energético [9]

A Figura 2.2, esquematiza as trocas de calor entre o edifício e o ambiente exterior nos períodos de verão e inverno. Na primeira situação (Verão), o edifício encontra-se a uma temperatura mais baixa, logo, ganha energia do ambiente exterior, já na segunda situação (Inverno) ocorre o contrário, ou seja, o edifício perde energia para o ambiente por se encontrar a uma temperatura mais elevada.

Além dos componentes já mencionados que entram no balanço energético, evidentemente a inércia térmica é também uma propriedade com grande influência no comportamento térmico dos edifícios.

2.4 Noções de sobreaquecimento

Não há uma definição específica para o sobreaquecimento ou as condições sob as quais pode ocorrer, mas este pode ser entendido como o acúmulo de calor dentro de um edifício a ponto de causar desconforto aos ocupantes [10].

Atualmente nos regulamentos ou nas orientações de saúde e segurança não existe uma temperatura interna máxima legal que apontem o estado de sobreaquecimento, contudo, a sensação de desconforto térmico pode ser usada como um indicador, já que a grande maioria das pessoas começa a aquecer aos 25°C e se sentir quente aos 28°C, o que define 35°C como a temperatura interna acima da qual existe um perigo significativo de estresse por calor [10].

Uma das causas mais conhecidas do sobreaquecimento é o efeito estufa, resultante dos ganhos externos ou da utilização do edifício (ganhos internos). Contudo, o sobreaquecimento não é apenas uma função das altas temperaturas, outros fatores como a falta de movimentação do ar e a exposição prolongada ao calor também afetam o nível de conforto dos ocupantes. E apesar da necessidade em se desenvolver mais investigações sobre o tema, o facto do sobreaquecimento se manifestar apenas em áreas geográficas específicas, como o efeito de ilha de calor¹, e se tratar de um fenómeno difícil de simular, cria várias limitações no seu estudo [10].

Em Portugal, especificamente no município de Lisboa, a fim de dar resposta ao problema, a Câmara Municipal de Lisboa (CML) durante o acordo de Paris de 2015, desenvolveu o projeto “Ondas de Calor” (OC), um estudo que visa aprofundar os conhecimentos sobre esse fenómeno e desenvolver meios de atenuar os seus efeitos. Segundo esse estudo, as ondas de calor ocorrem quando num intervalo de pelo menos seis dias consecutivos a temperatura máxima diária é superior em 5°C ao valor médio diário no período de referência. E, de acordo com o último levantamento feito no município de Lisboa, o número médio de ondas de calor é de onze dias, e a previsão é de aumentar para 38 dias por ano em 2050 [11].

¹ O efeito de Ilha de Calor Urbano (ICU), observa-se em áreas urbanas onde os valores da temperatura do ar, em média são superiores aos que se verificam em zonas rurais circundantes. Fatores como, a densidade dos edifícios, a proximidades entre eles e as suas orientações, contribuem para a dimensão e a intensidade de uma ilha de calor.

2.5 Legislação térmica

Neste subcapítulo é feito um enquadramento sobre a evolução da legislação térmica em Portugal face a legislação europeia.

Em Portugal a legislação térmica surge como um instrumento de regulação das condições de habitabilidade no interior dos edifícios, deste modo, com o objetivo de melhorar a qualidade térmica dos edifícios e reduzir as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento, surge em 1990 o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), aprovado pelo Decreto-Lei n.º 40/90, de 6 de Fevereiro, constituindo o primeiro instrumento legal do regulamento térmico de edifícios em Portugal.

O RCCTE vem impor requisitos a projetos de novos edifícios e de grandes remodelações, por forma a garantir a satisfação das condições de conforto térmico e a minimização de efeitos patológicos na construção devido as condensações.

Na Europa, o RCCTE foi o primeiro regulamento a introduzir exigências térmicas mínimas de conforto para a estação de Arrefecimento (Verão), através dos requisitos construtivos mínimos para as envolventes, uso de sombreamento a fim de evitar sobreaquecimentos e coeficientes de transmissão térmica máximos com objetivo de minimizar os fenómenos de condensação interior [12].

Atualmente o RCCTE já não se encontra em vigor, mas constituiu um marco significativo na melhoria da qualidade da construção em Portugal, havendo hoje uma prática quase generalizada de aplicação de isolamento térmico nos edifícios.

Em 1998, face ao elevado número de edifícios com equipamentos de climatização, surge o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE), com medidas de racionalização de energia e limites na instalação e utilização desses sistemas.

Para responder o excesso de consumo energético apresentado pelos edifícios na UE, em 2002 é publicada a Diretiva Europeia nº 2002/91/CE, referente ao Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD), com objetivo de promover a melhoria do desempenho energético na Comunidade Europeia. A implementação desta diretiva em Portugal aconteceu em 2006 e deu origem ao Sistema de certificação Energética dos Edifícios (SCE) e revisões do RCCTE e RSECE, acrescentando novos requisitos de conforto térmico relacionados a qualidade de ar interior, renovação de ar e sistemas de ar condicionado.

Após a reformulação da diretiva de 2002 (EPBD), em 2010 o Sistema de Certificação Energético dos Edifícios (SCE) é revisto e publicado num único decreto, em conjunto com o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS). Este diploma ficou em vigor até junho de 2021, definindo novas metas relacionadas com a EPBD, nomeadamente aos edifícios novos passarem a ter necessidades energéticas quase nulas nZEB (Nearly Zero Energy Building) e os edifícios a reabilitar apresentarem requisitos energéticos mais exigentes.

Em resposta as questões ambientais, a UE tem vindo a definir metas concentradas na redução do consumo energético, com isso surge o Decreto-Lei n.º 101-D/2020, de 7 de dezembro, que estabelece

os requisitos aplicáveis à conceção e renovação de edifícios, com o objetivo de assegurar e promover a melhoria do respetivo desempenho energético e regulação do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), com a adequação ao cumprimento das disposições da Diretiva EPBD, e apresentar soluções que permitam satisfazer as necessidades dos ocupantes com um reduzido impacto energético [13].

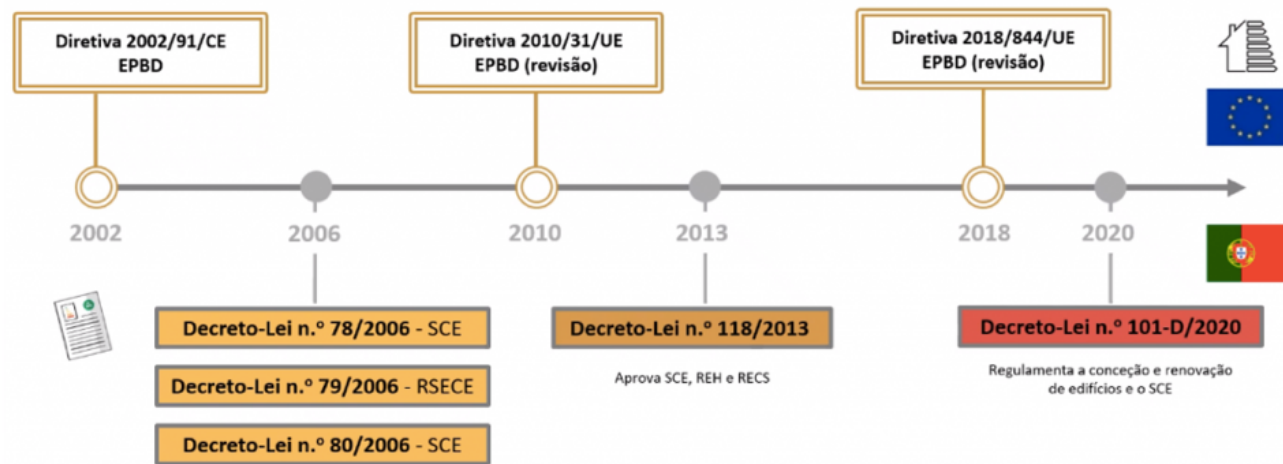


Figura 2.3 : Evolução da Legislação térmica nacional [12]

3. MADEIRA LAMINADA CRUZADA (CLT)

3.1 *Mass Timber Build*

A *Mass timber* ou madeira maciça, representa uma nova categoria de produtos compostos por vários painéis de madeira maciça pregadas ou coladas, com grande resistência e estabilidade. Trata-se de um conceito novo e sem definição específica, baseada na construção prefabricada que se destaca pelo uso de grandes painéis de madeira de elevado desempenho, força e resistência ao fogo.

Nos últimos anos, esta tecnologia tem vindo a ganhar espaço dentro do sector construção, contando atualmente com os seguintes produtos [14]:

- Cross Laminated Timber (CLT) – Madeira Laminada Colada
- Laminated Veneer Lumber (LVL) – Madeira Laminada Folheada
- Dowel-laminated Timber (DLT) – Madeira Laminada com Cavilhas
- Nailed Laminated Timber (NLT) – Madeira Laminada Pregada
- Glue-laminated Timber (Glulam) – Madeira Laminada Colada
- Laminated Strand Lumber (LSL) – Laminado de Aglomerado de Madeira
- Parallel Strand Lumber (PSL) – Aglomerado Paralelo de fios de Madeira

Esta categoria de produtos distingue-se das demais construções de madeira, pela sua versatilidade e variedade de aplicação, permitindo até mesmo construir edifícios com vários andares.

3.1.1 Madeira laminada cruzada

O *Cross Laminated Timber* ou madeira laminada cruzada, é feito de placas retangulares de madeira maciça coladas entre si, formando um painel de elementos de madeira *tipo sandwich*, com duas dimensões muito menores que a terceira.

Este tipo de material é frequentemente usado em sistema estrutural como paredes ou elementos de laje, sendo, portanto, o material com maior crescimento na gama do *Mass Timber Building*.

As figuras que se seguem, ilustram alguns dos edifícios mais conhecidos, construídos com madeira laminada cruzada.



Figura 3.1 e Figura 3.2: Edifício “Hoho Wien”, Viena [15]



Figura 3.3 e Figura 3.4: Escola Red Bridge, Lisboa [16]



Figura 3.5: Edifício “T3 – Timber, Technology and Transit”, USA [17]



Figura 3.6: Svartlamoen Housing, Trondheim [18]



Figura 3.7: Mjøstårnet building, Noruega [19]

Como qualquer material, a madeira laminada cruzada possui vantagens e desvantagens que podem ser evidenciadas a seguir:

Vantagens

- Renovação do carbono durante o crescimento das arvores;
- Resíduos da construção são aproveitáveis;
- Rapidez na construção;
- Estruturas leves;
- Ponte térmicas reduzidas ou inexistentes;
- Construção seca.

Desvantagens

- Falta de mão de obra especializada;
- Necessidade do uso de guindaste no local da construção;
- Limitação da dimensão dos elementos por falta de transporte;
- Pré definição dos aspetos de design antes do fabrico;
- As colas mais usadas são de grande impacto ambiental;
- Custo elevado.

3.1.1.1 Processo de produção

A produção do CLT constitui um processo de melhoria contínua, que passa por várias fases importantes, geralmente variando de acordo com o fabricante, mas que se destacam as seguintes:

3.1.1.2 Seleção da espécie

Existem várias espécies de árvores utilizadas na produção do CLT, entre as mais conhecidas temos o pinheiro silvestre, o larício e o abeto de Douglas, no entanto, atualmente a principal espécie usada é o abeto (*Abies alba* nome científico), árvore nativa da Europa, com subproduto rico em taninos e pouca resina, o que facilita a manipulação.

3.1.1.3 Secagem

Após o corte, falquejo e o aplainamento em dimensões pré-definidas, a madeira é seca de forma artificial (estufa) e condicionada ao estado dessecado, ou seja, a um teor de humidade entre $0% < h < 14%$ [20]. Este processo tem como finalidade assegurar a durabilidade do material, e é seguido pela classificação da força.

3.1.1.4 Limpeza e remoção de defeitos

De acordo com a resistência e qualidade visual final, defeitos como grandes nós e bolsas de resina ou casca são cortados.

3.1.1.5 Ripas infinitas

As placas individuais, são unidas de forma a fazer uma ripa infinita através dos “*finger-joints*” que podem ser transversais ou longitudinais (Figura 3.1 e 3.2). As ripas são coladas na extremidade de outras ripas até se atingirem as dimensões desejadas.

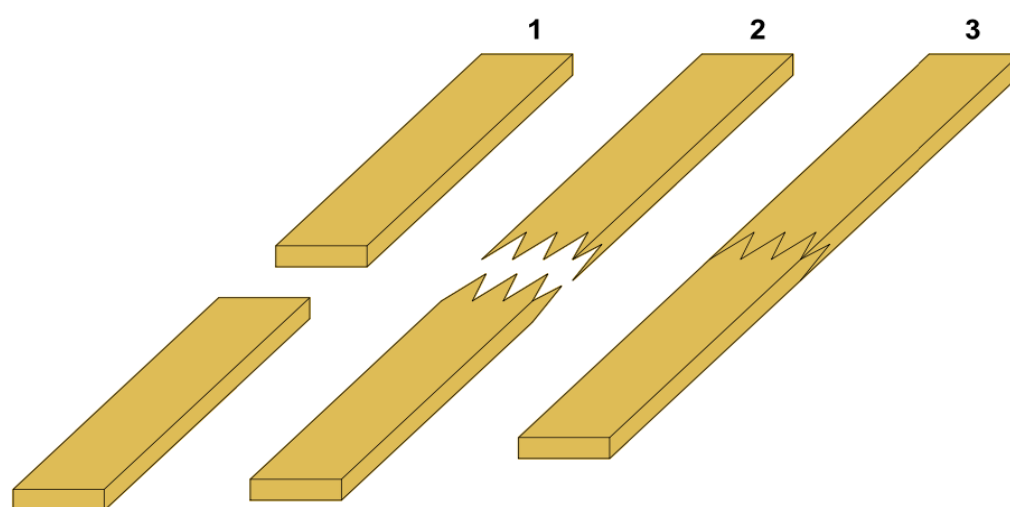


Figura 3.8: Ripas infinitas

1- Placas individuais; 2 – Criação dos fingers-joints; 3- União entre placas.

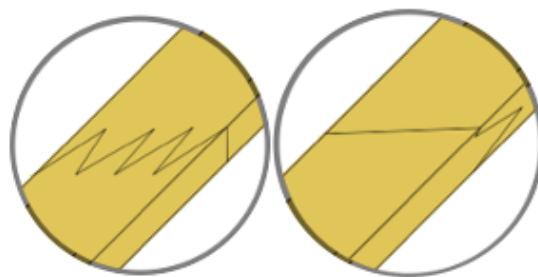


Figura 3.9: Finger-joint transversal e longitudinal (esquerda para direita).

3.1.1.6 Montagem do painel

O processo de montagem é feito de forma intercalada com a aplicação de adesivo de aderência nas faces. Este adesivo é aplicado em um sistema automatizado, que regula a quantidade de produto a aplicar nas faces, podendo ser aplicado diretamente na mesa de prensagem sobre as ripas dispostas lado a lado ou em cada ripa de forma individual enquanto correm em uma esteira rolante. Após isso as ripas são então aderidas umas às outras, seguida da aderência efetiva através do vácuo ou de prensagem hidráulica.

A dimensão do painel vai ser função do fabricante e do tipo de aplicação, podendo ser fabricado em camadas de 3, 5, 7 ou mais placas, com larguras típicas de 0.5 m, 1.2 m e 3 m e comprimentos de até 18 m, sendo que a dimensão do caminhão de transporte é um fator limitante.

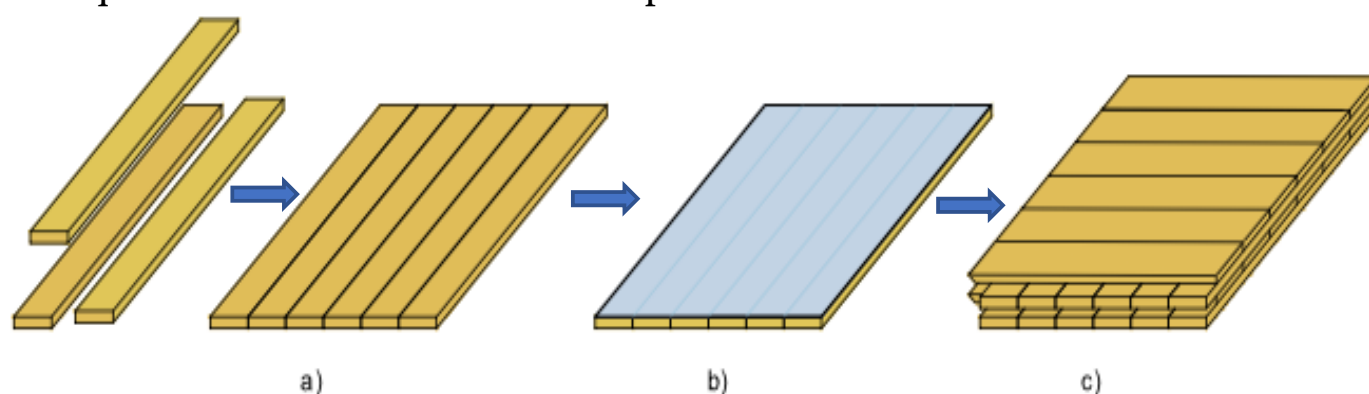


Figura 3.10: Processo de montagem dos painéis
a) Organização das ripas lado a lado; b) Aplicação do adesivo; c) Montagem dos painéis.

3.1.1.7 Acabamentos dos painéis

Com a montagem concluída, são aparadas as bordas, aplainados e / ou lixados os painéis, e transferidos para uma estação de usinagem, onde uma máquina multi-eixo corta aberturas para janelas e portas nas paredes, e aberturas de escadas nos pisos.

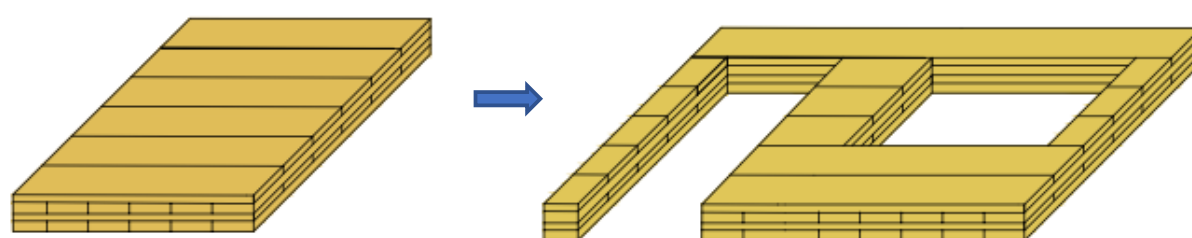


Figura 3.11: Finalização dos painéis para aplicação.

3.1.2 Aplicação

O CLT é frequentemente usado em estruturas de madeira de vários pisos, como moradias unifamiliar e multifamiliar, escritórios etc. Este material também é usado na construção de uma ampla variedade de elementos estruturais, como paredes estruturais, piso, cobertura, divisórias, varandas em balanço, escadas, etc. Podendo ser com ou sem acabamentos interiores.

3.1.3 Comportamento Térmico

O comportamento térmico do CLT, é determinado pelo seu coeficiente de condutibilidade térmica, que geralmente apresenta um valor de $0,13\text{W/m}\cdot\text{°C}$, mas que em função da espécie de madeira, teor de humidade, direção dos grãos etc, este valor pode ser menor.

Termicamente, os painéis são ótimos isolantes, o encaixe das juntas evita a criação de pontes térmicas na estrutura e apresentam pouca infiltração de ar, o que faz com que a temperatura interior de uma estrutura de CLT seja mantida apenas com um terço do gasto de energia necessária para o aquecimento ou arrefecimento da edificação, quando comparado com a construção de alvenaria corrente [21].

4. METODOLOGIA DE TRABALHO

Uma vez que a metodologia para avaliar o desempenho térmico da moradia é feita com base em simulação dinâmica, esta vai consistir num modelo discriminado, analisando o edifício em quatro fases (Figura 4.1).

O primeiro caso de estudo, resulta da análise da habitação considerando apenas a existência da envolvente opaca exterior, em que são feitas análises de sensibilidade do elemento construtivo (CLT) e isolamento térmico. No segundo caso de estudo, além das envolventes opacas analisa-se a influência dos vãos envidraçados.

No terceiro caso de estudo, é introduzido a renovação do ar e por fim, no último caso de estudo são introduzidos e avaliados os efeitos dos ganhos internos.

Este tipo de análise por ser mais pormenorizada permite identificar e examinar com maior detalhe a eficiência do CLT comparativamente a construção corrente, tomando como parâmetro a condução de calor, o balanço térmico através das envolventes, as temperaturas interiores e as necessidades energéticas para arrefecimento.

Não sendo o período de aquecimento (Inverno) objeto de estudo, os parâmetros relativos a este serão apresentado apenas quando necessário.

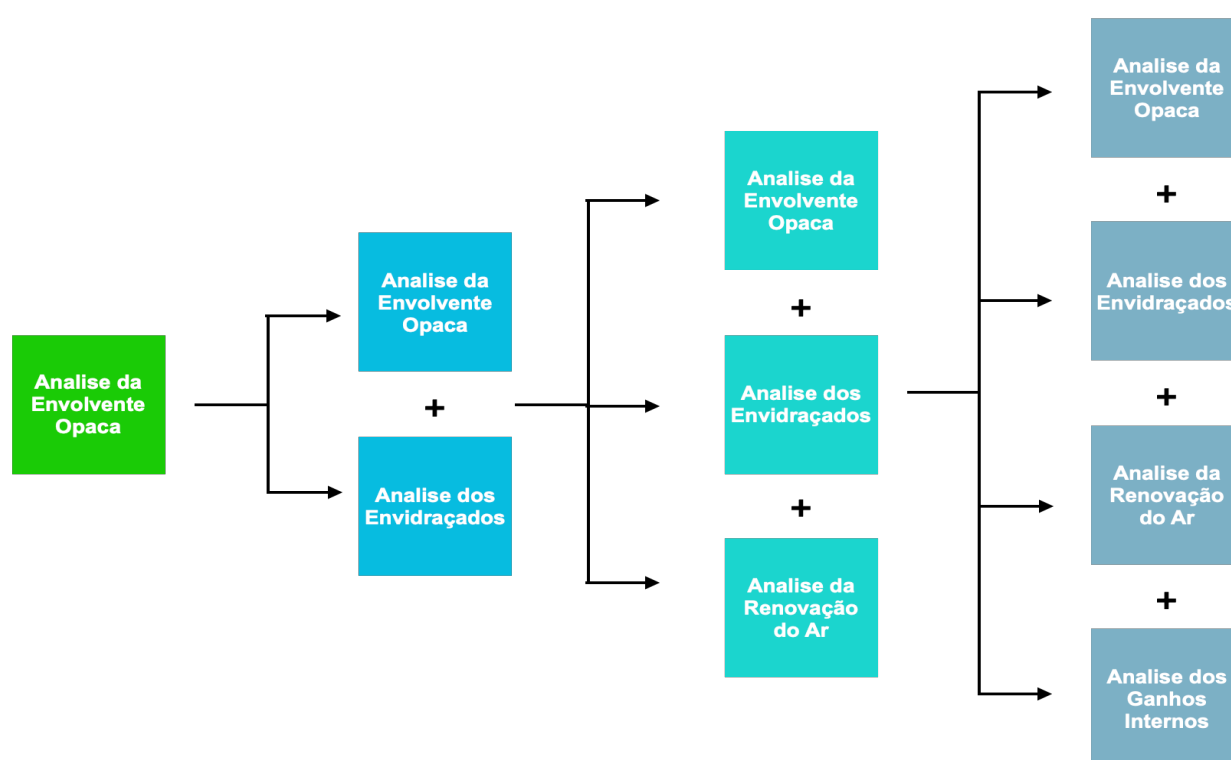


Figura 4.1: Metodologia de trabalho (esquema)

4.1 Energyplus

4.1.1 Descrição do programa

O Energyplus é um programa de simulação energética desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (*U.S. Department of Energy*), que teve como base os recursos e capacidades BLAST [22] e DOE-2 [23].

Atualmente na versão 9.6.0, o EnergyPlus foi lançado pela primeira vez em abril de 2001, com foco em edifícios comerciais e posteriormente expandido para edifícios residenciais. O programa implementa análise da construção detalhada para ar, humidade e transferência de calor, incluindo a transferência de calor por convecção e radiação.

Por sua vez, a transferência de calor por radiação atua separadamente para apoiar a modelagem de sistemas radiantes e cálculo de métricas de conforto térmico, iluminação, sombreamento e conforto visual, suportando configurações a nível de componente de AVAC e sistemas de refrigeração.

O EnergyPlus é testado de acordo com a metodologia ASHRAE Standard 140 [24].

A Figura abaixo apresenta o diagrama geral da integração entre os principais elementos da simulação no software.

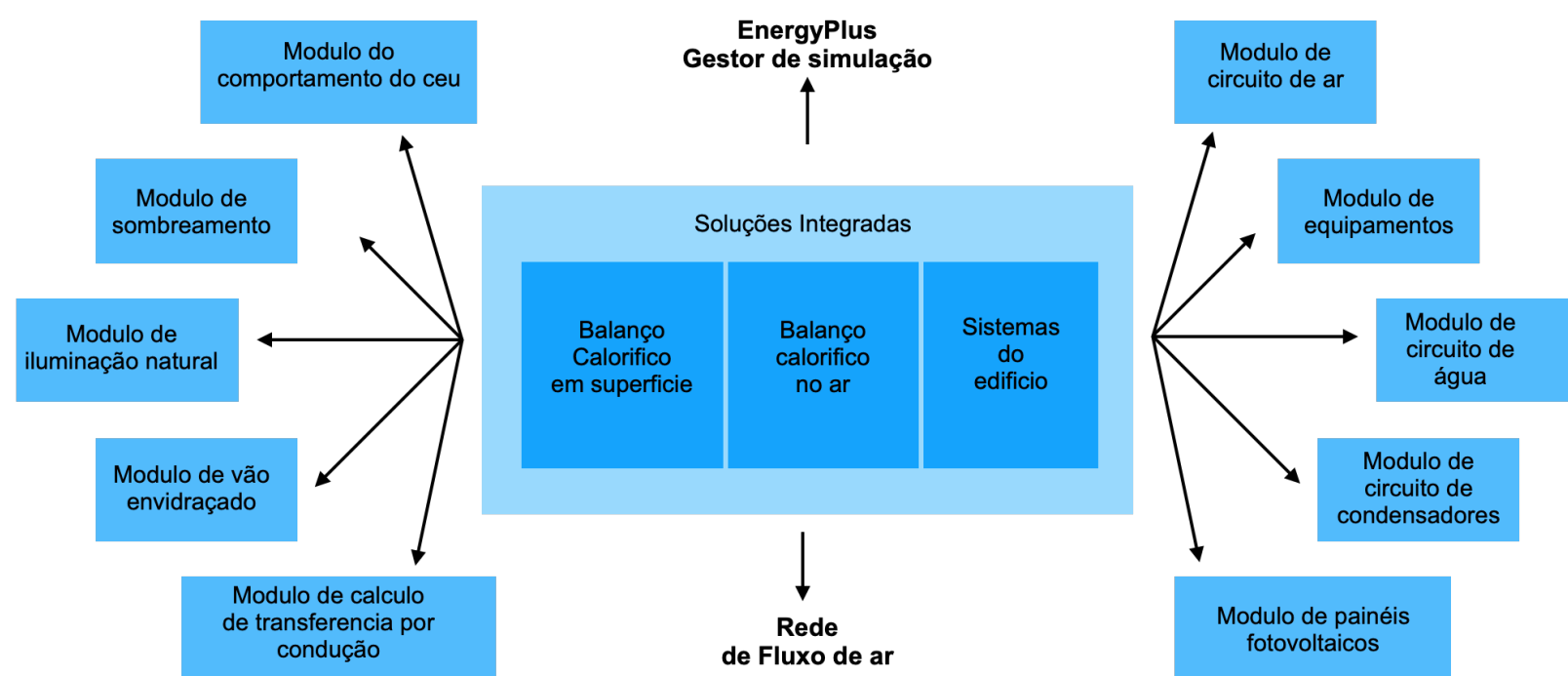


Figura 4.2: Diagrama Energyplus [25].

4.1.2 O EP-LAUNCH

O EP-Launch, é um componente do EnergyPlus exclusivo aos utilizadores do sistema Windows, que permite localizar e seleccionar os arquivos *.idf*, arquivo climático, fazer simulação, ver alguns resultados, etc. Este programa está incluído no pacote de instalação e pode ser localizado na pasta principal do software.

4.1.3 IDF EDITOR

O “idf editor” é um ambiente para edição de arquivos *.idf*, simples e inteligente que lê o Dicionário de Dados EnergyPlus (IDD) e permite a criação ou revisão de Arquivos de Entrada EnergyPlus (IDF). Ele pode ser executado a partir de um atalho no diretório principal do programa ou diretamente do EP-Launch.

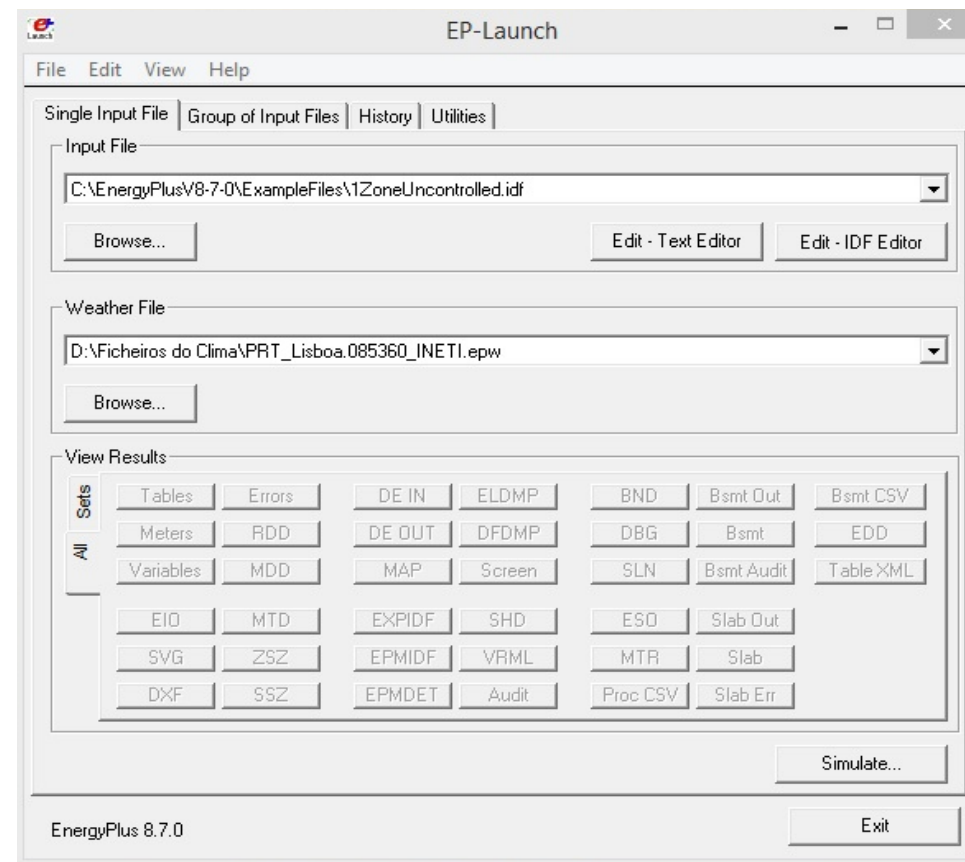


Figura 4.3: Ferramenta EP-Launch

4.1.4 Ficheiro climático

O ficheiro climático corresponde aos dados meteorológicos, disponibilizados em formato simples baseado em texto, que inclui informações básicas de localização (nome, estado / província / região, país), fonte de dados, latitude, longitude, fuso horário, altitude, aquecimento de pico, condições de projeto de arrefecimento, feriados, horário de verão, períodos típicos e extremos. Os ficheiros climáticos estão disponibilizados segundo a região e podem ser encontrados no site oficial do programa [26].

Na Figura 4.4, são apresentadas as temperaturas ao longo do período de simulação para as regiões estudadas. Estas temperaturas foram retiradas através da variável temperaturas exteriores, fornecidas pelos ficheiros climáticos de cada região.

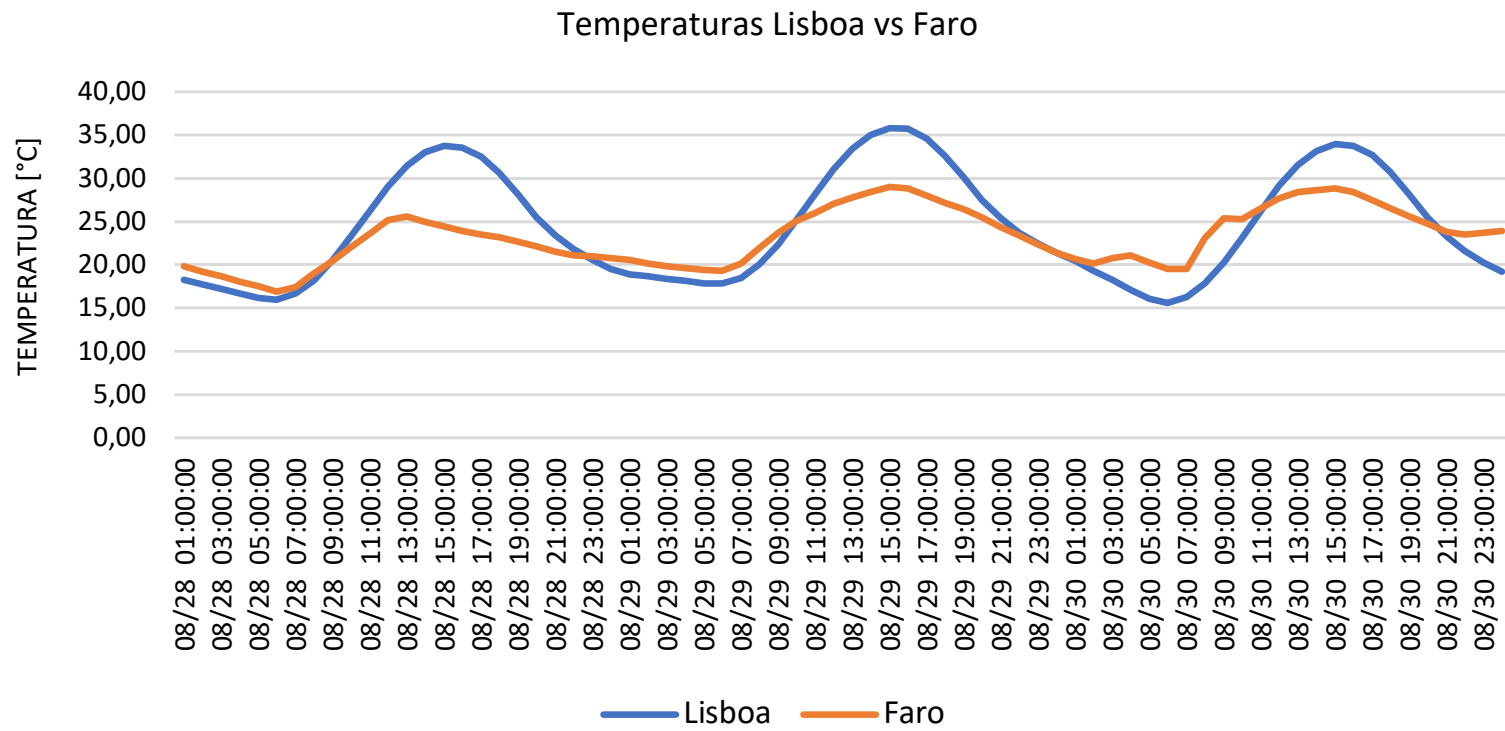


Figura 4.4: Temperatura exterior de Lisboa e Faro para os dias 28 a 30 de Agosto.

4.2 Dados de Entrada (Input)

4.2.1 Grupo “Parâmetros de simulação”

4.2.1.1 Versão

A versão utilizada no presente trabalho é a 8.7.0, contudo atualmente o programa encontra-se na versão 9.6.0, disponibilizada em setembro de 2021 e que pode ser encontrada no site oficial [26].

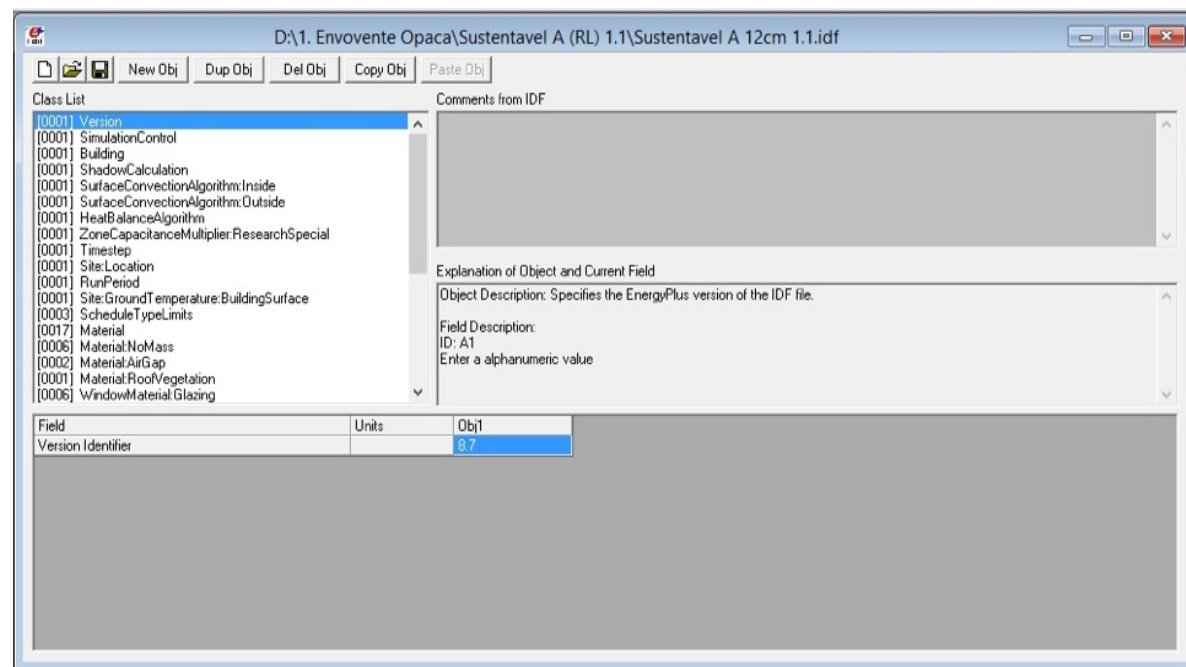


Figura 4.5: Versão usada

4.2.1.2 Controlo da Simulação

Neste campo são definidas as condições de controlo, tais como, a simulação para determinados períodos de dimensionamento ou para o ano inteiro, se haverá dimensionamento de carga térmica do sistema AVAC e o número máximo de iterações. Para o caso de estudo a simulação será anual e para um ficheiro climático.

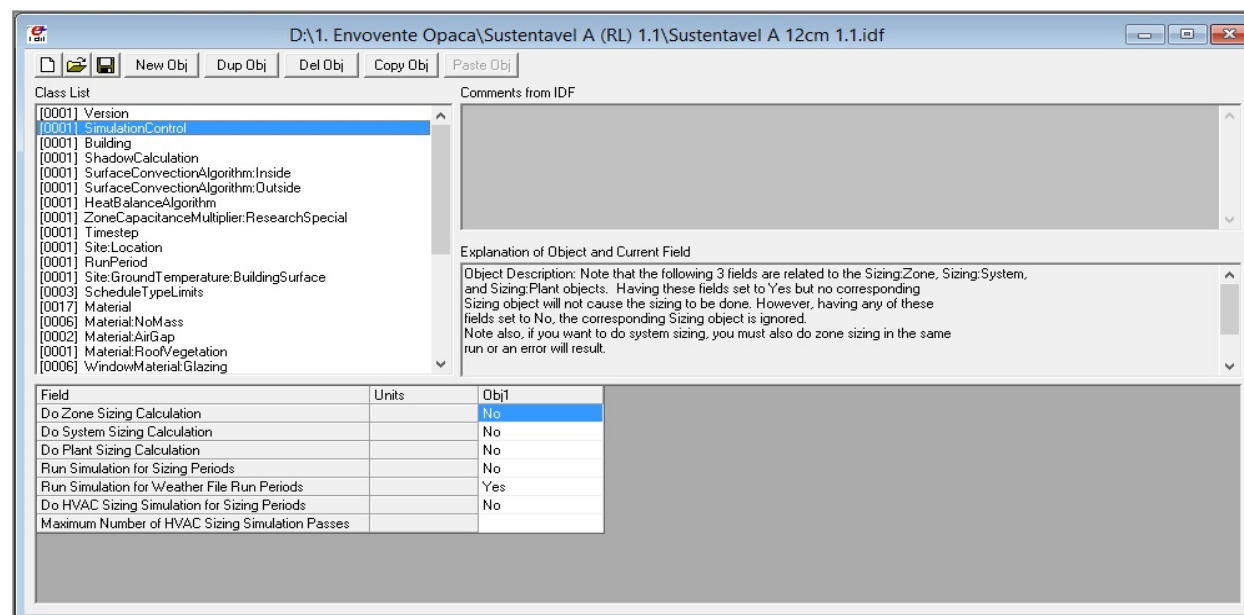


Figura 4.6: Condições de funcionamento da simulação

4.2.2 Grupo “Localização e clima”

4.2.2.1 Localização

Este campo faz referência a localização do edifício, onde é inserida a zona climática, as respetivas coordenadas geográficas como latitude, longitude, fuso horário e a altitude.

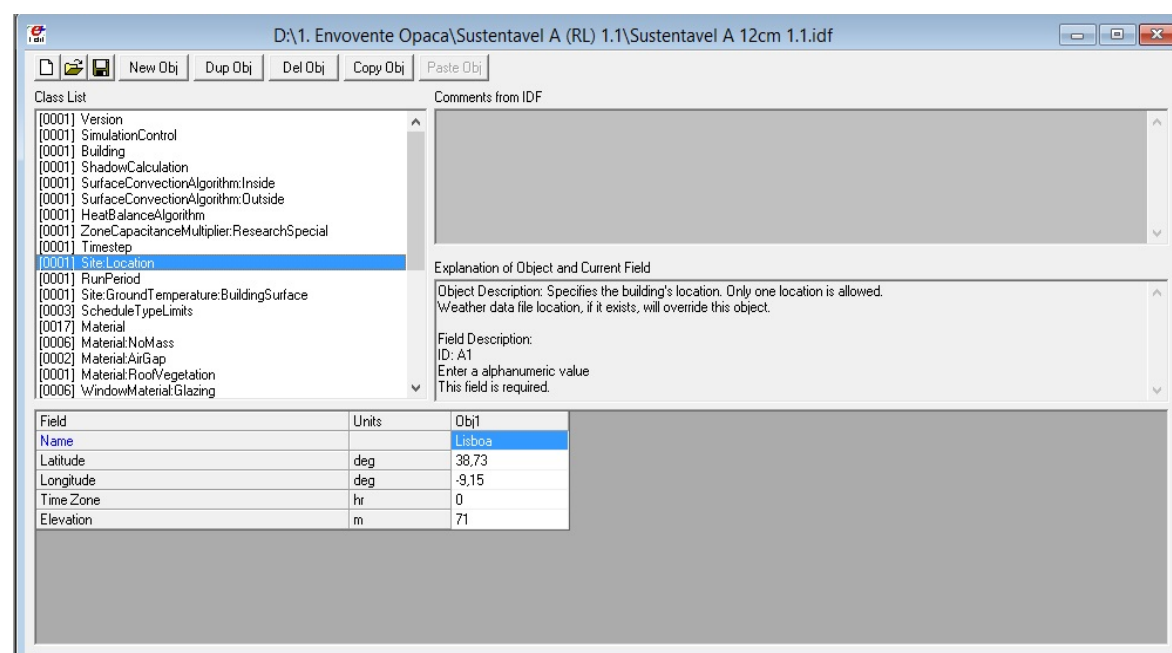


Figura 4.7: Localização do edifício

4.2.2.2 Período de simulação

O *run period* permite definir os elementos necessários para a apresentação dos resultados, como o dia e o mês em que começa e termina a simulação. Neste campo também é permitido a modelação de condições específicas para fins de semanas ou datas especiais.

Para a presente dissertação, a simulação foi definida de forma anual, com início no dia 1 de Janeiro e fim no dia 31 de Dezembro, pelo que não foram definidas regras ou exceções para os fins de semanas ou datas especiais.

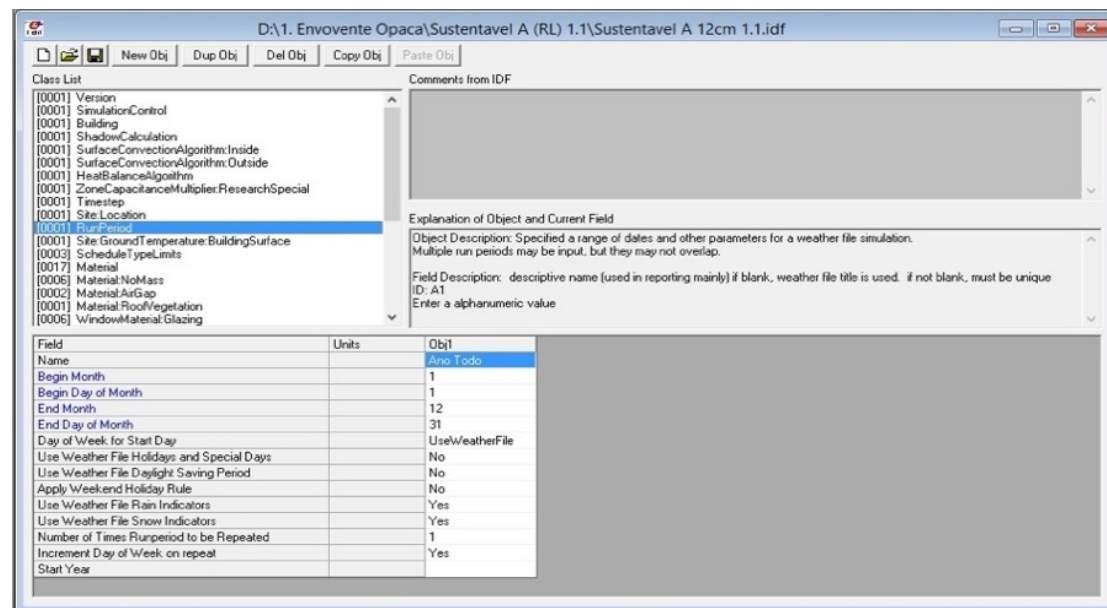


Figura 4.8: Período de simulação

Grupo “Cronogramas”

4.2.2.3 Cronograma de funcionamento (Schedules: Type Limits)

Através deste campo, o utilizador influencia a programação e o horário de funcionamento de vários itens como, densidade de ocupação, iluminação, controlos termostáticos, atividade de ocupação, ativação dos dispositivos de oclusão, etc. O utilizador estipula os limites máximos e mínimos (programações anuais) e o tipo de variável (discreta ou contínua). Este campo é usado em conjunto com o campo *Schedules: Compact*.

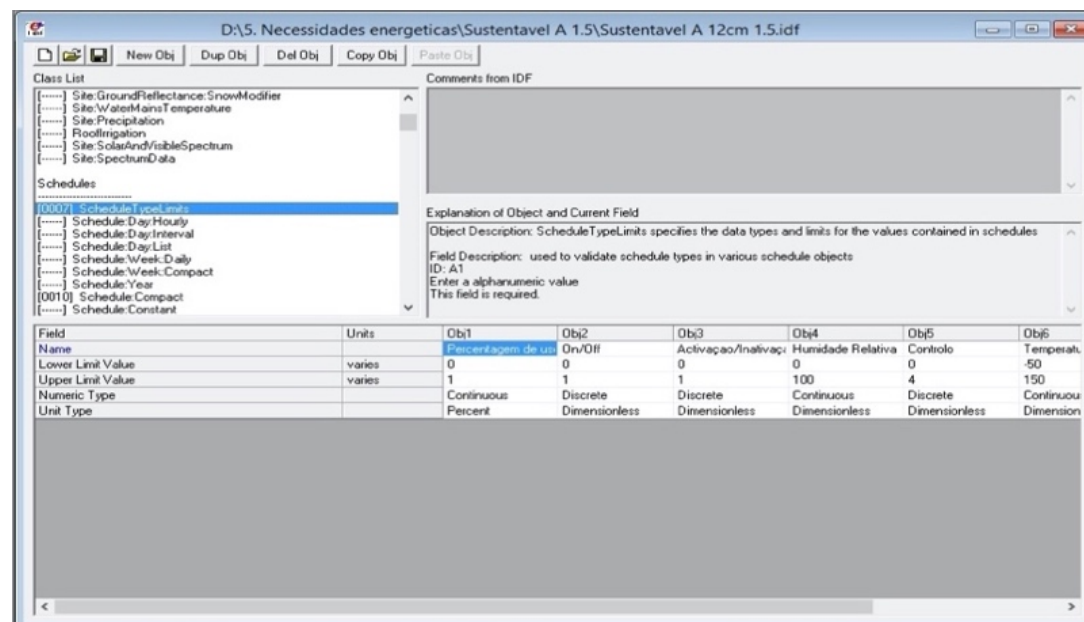


Figura 4.9: Definição do tipo de variável

4.2.2.4 Cronograma de funcionamento Schedules: Compact

No *schedule Compact* são definidos os horários e os períodos de funcionamento para cada item. É feita também a ligação com o campo *Schedule: Types Limits* que vai impor o limite ou quando o sistema vai estar ligado ou desligado.

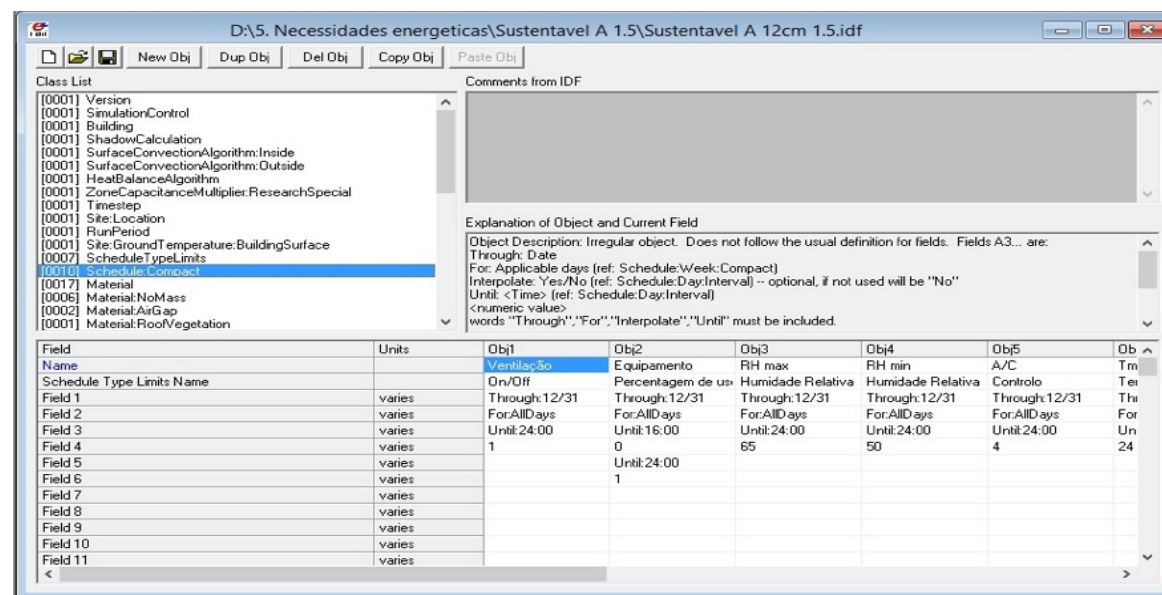


Figura 4.10: Cronograma de funcionamento

4.2.3 Grupo “Elementos construtivos”

Este campo de objetos, descreve as propriedades físicas, a configuração da envolvente do edifício e dos elementos interiores (paredes, cobertura, pisos, janelas, portas). É onde são definidos os materiais construtivos, isolamentos térmicos, cobertura ajardinada, tipo de envidraçados, etc.

4.2.3.1 Materiais

É no campo “Material” onde são definidos os materiais de construção que constituem a envolvente do edifício, o que requer conhecimento de muitas propriedades térmicas dos materiais, mas que permite ao EnergyPlus levar em consideração a inércia térmica e avaliar os efeitos de condução transitória.

4.2.3.2 Soluções construtivas

A “construção” dos elementos como paredes, pavimentos, coberturas e vãos envidraçados são feitos neste campo. E, recorrendo ao campo anterior, os materiais são introduzidos um a um, posicionados de fora para dentro até formar o elemento construtivo pretendido.

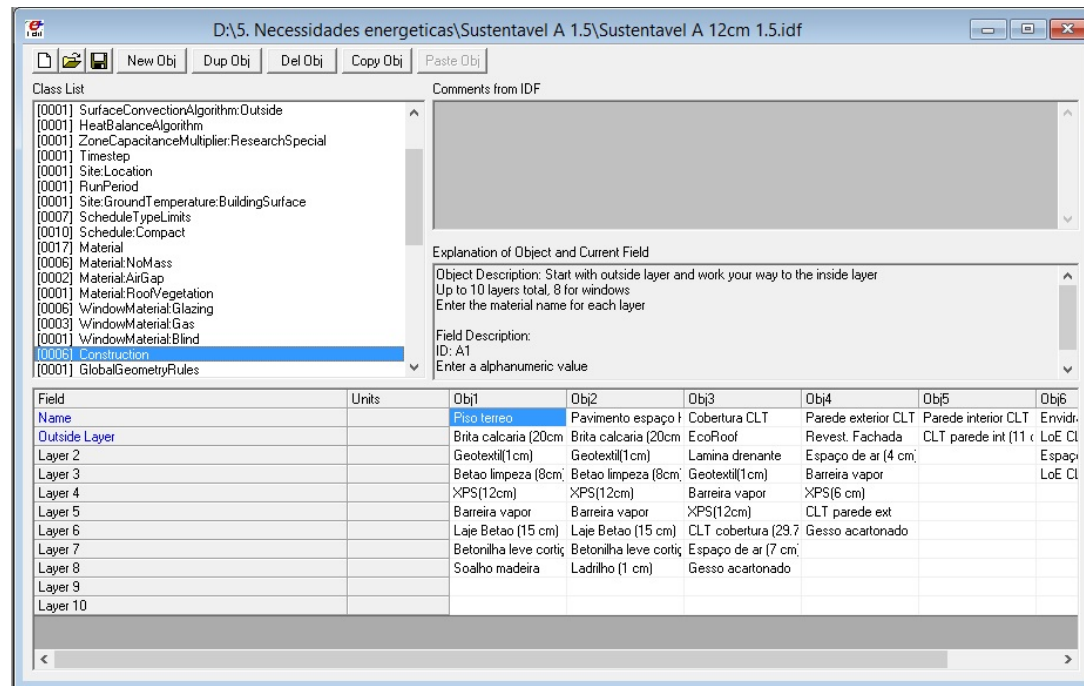


Figura 4.11: Soluções construtivas das envoltivas

4.2.4 Grupo “Zona térmica e superfícies”

4.2.4.1 Zonas térmicas

O campo *zone* descreve as particularidades da “zona térmica”, com os seus aspetos em termos de perfil de utilização, iluminação e equipamentos. Por simplificação definiu-se apenas uma zona térmica.

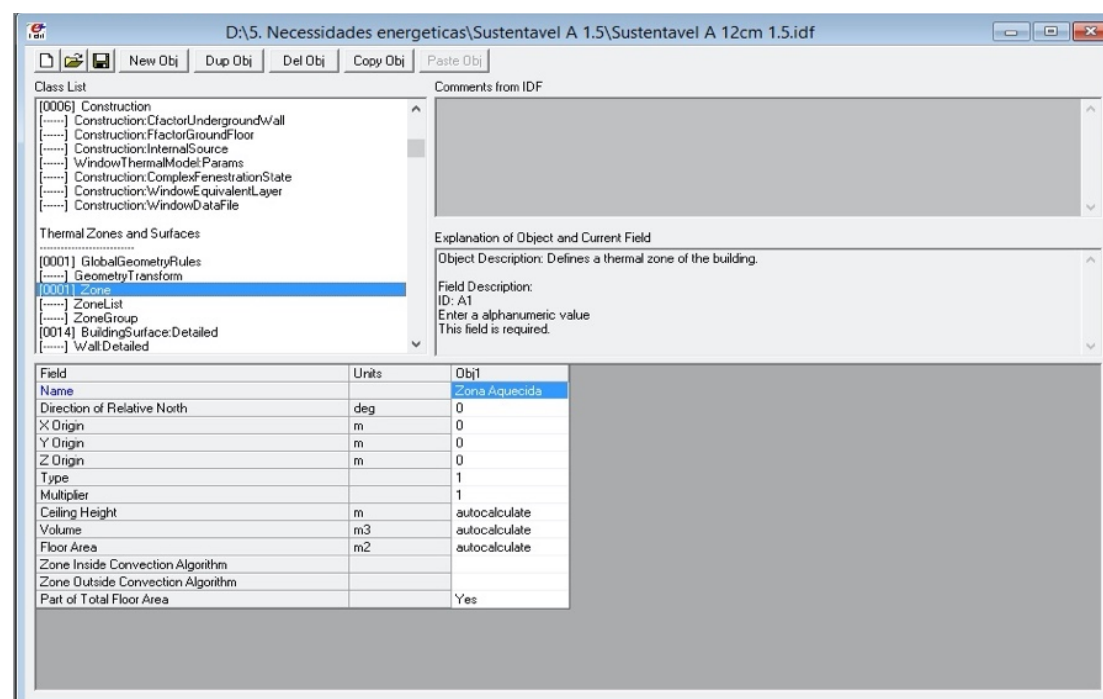


Figura 4.12: Definição da zona térmica

4.2.5 Superfícies do edifício

As superfícies que constituem os edifícios e os elementos que os sombreiam são definidos neste campo, exemplo, paredes exteriores, elementos de cobertura, piso, etc. Estes elementos são dispostos segundo o tipo de superfície, a zona em que se encontram, se estão ou não expostos ao sol, etc.

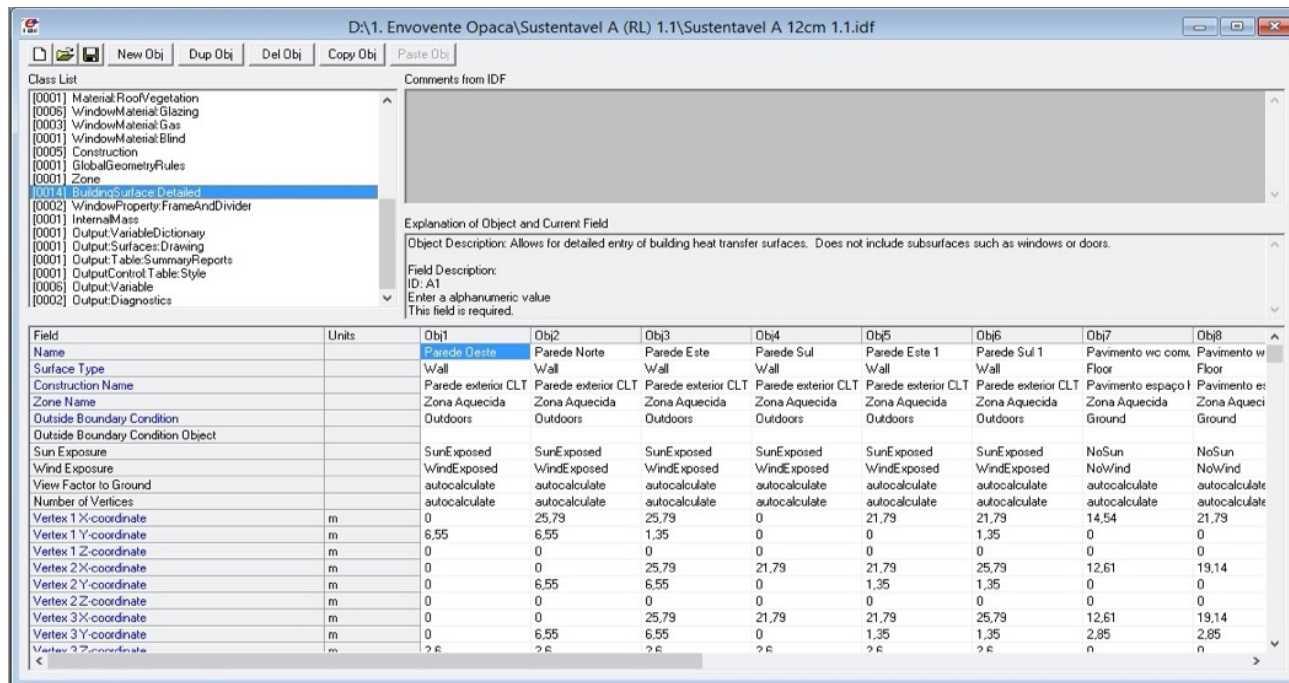


Figura 4.13: Construção dos elementos das envoltantes

4.2.5.1 Vãos envidraçados (Fenestration Surface: Detailed)

A caracterização dos vãos envidraçados é indispensável para análise térmica, neste campo os elementos com incidência solar relevantes á análise térmica são definidos em função do nome, tipo (janela ou porta de vidro), construção associada, localização e as coordenadas.

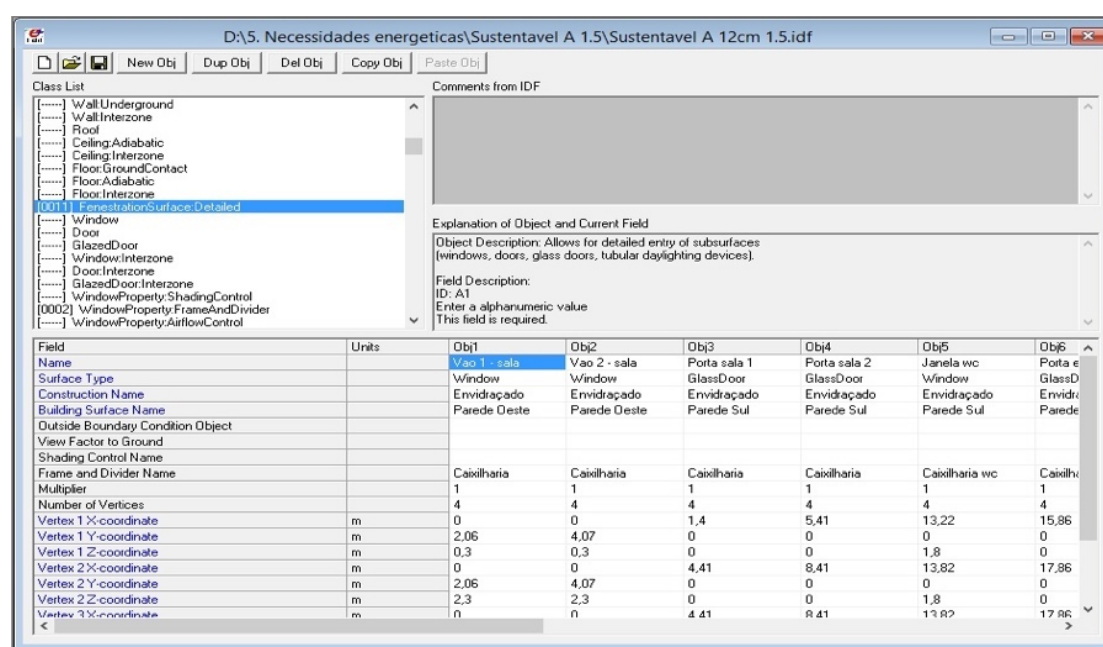


Figura 4.14: Modelagem dos vãos envidraçados

4.2.6 Grupo “Ganhos internos”

São considerados ganhos internos, os ganhos de energia resultantes da ocupação, dos dispositivos de iluminação e dos equipamentos existentes. Esses ganhos podem ser contabilizados de acordo com a situação analisada ou estimados de acordo com o regulamento em vigor. Para este caso de estudo, foi fixado um valor de 4 W/m², estabelecido de acordo com o regulamento em vigor para edifícios de habitação.

4.2.7 Grupo “Infiltrações de ar na zona térmica”

4.2.7.1 Zone Airflow

A infiltração, é o fluxo não intencional de ar proveniente do ambiente externo, diretamente para uma zona térmica, geralmente provocado por ação do vento quando o ar exterior infiltra o interior do edifício através das aberturas, ou por diferenças de pressão entre o ar interior e o exterior.

Para a garantia das condições mínimas de conforto do ar interior nos edifícios de habitação, o regulamento impõe uma taxa de renovação de ar não inferior a 0,4 renovações por hora. Neste trabalho, utilizou-se um valor constante de 0,6 renovações por horas.

4.2.8 Grupo “Controlo da zona térmica – Termóstato e Humidade”

4.2.8.1 Zone HVAC: Ideal Loads Air System

Este campo é usado quando o usuário pretende estudar as necessidades energéticas do edifício, sem modelar um sistema AVAC completo, sendo necessário apenas definir as configurações de equipamento e o componente ideal do sistema de cargas. Nesse caso o componente pode ser operado com sistema de carga de aquecimento e arrefecimento (adicionando ou retirando calor ao ambiente), de acordo com a necessidade em manter a temperatura interior dentro da faixa de controle.

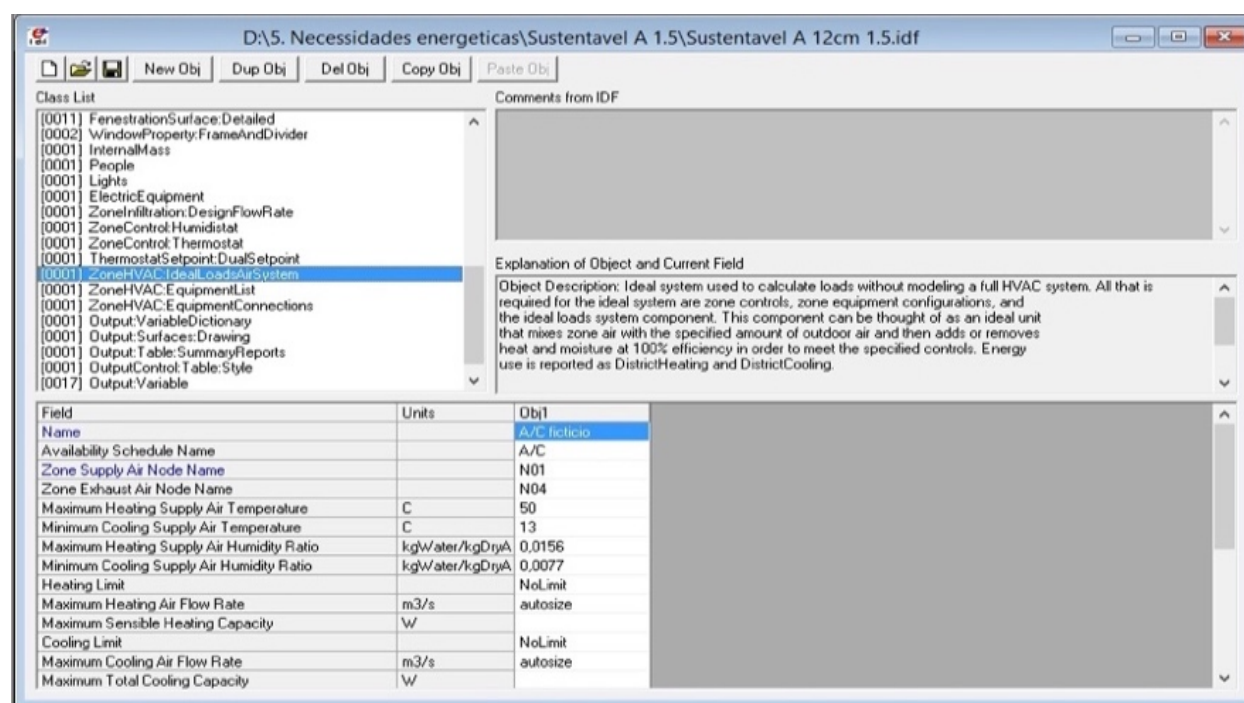


Figura 4.15: Modelagem do Sistema de HVAC

4.2.8.2 Humidistats

Através da criação de cronogramas (schedule) com o valor da HR min e HR max, é feito o controlo da humidade relativa da zona. No caso de estudo, os valores inseridos foram de 50% e 60% para HR min e HR max respetivamente.

4.2.8.3 Thermostat

Este objeto é usado para controlar a temperatura da zona, e dependendo da análise, podem ser estabelecidas programações para aquecimento (Inverno), arrefecimento (Verão) ou para ambas situações.

No presente estudo, foi estabelecido programação para aquecimento e arrefecimento, de modo que a zona térmica é aquecida quando as temperaturas se encontram abaixo dos 20°C e arrefecida quando as temperaturas se encontram acima dos 25°C.

No entanto, para que este campo funcione de acordo com o indicado, é necessário associar o campo *Thermostat Setpoint: Dual Setpoint*, que por sua vez, fica associado a cronogramas de funcionamento (schedules: Type limits e Compact) com as temperaturas mínima e máxima de ativação.

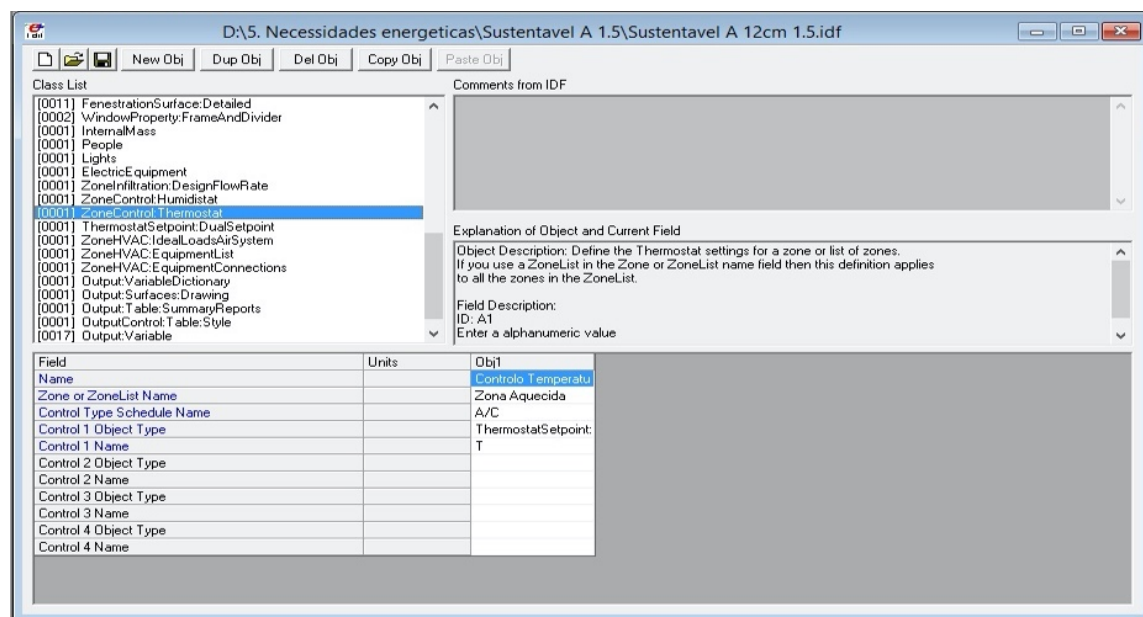


Figura 4.16: Definição dos termostatos de funcionamento do sistema de controlo da temperatura interior

4.3 Dados de saída

4.3.1 Grupo “Relatório de saída”

4.3.1.1 Output: Variable

Após a modelação do edifício, o grupo *Output Reporting* é usado para fornecer aos utilizadores dados para a análise térmica do modelo. O campo *Output: Variable* é precisamente onde as variáveis são solicitadas, porém, elas devem ser selecionadas em função do que se pretende analisar.

Para este trabalho, uma vez que o objetivo principal é a avaliação do comportamento térmico do edifício, torna-se essencial solicitar variáveis que permitam: analisar as trocas de calor através das envolventes, efetuar o balanço térmico e avaliar as suas necessidades energéticas. Para isso foram solicitadas as seguintes variáveis:

- Outdoor Dry Bulb
- Zone Mean Air Temperature

- Zone Opaque Surface Inside Face Conduction Gain Energy
- Zone Opaque Surface Inside Face Conduction Loss Energy
- Zone Window Heat Gain
- Zone Window Heat Loss
- Zone Windows Total Transmitted Solar
- Zone Infiltration Sensible Heat Loss
- Zone Infiltration Sensible Heat Gain
- Zone Electric Equipment Total Heat Gain
- Zone Lights Total Heat Gain
- Zone People Total Heat Gain
- Ideal Loads Air Heating Energy
- Ideal Loads Air Total Cooling Energy

4.4 Descrição do Modelo

O modelo usado para análise térmica, geralmente é baseado em geometria simples, de compartimento único e representativo de todo edifício. Para este trabalho não foi muito diferente, o modelo foi desenvolvido de maneira a assemelhar-se o mais possível de um edifício real, de geometria retangular e que apesar de possuir uma reentrância na sua fachada sul, a sua configuração permite analisar várias soluções e fazer alterações sem grandes dificuldades.

O modelo baseia-se num edifício de habitação unifamiliar de tipologia T2, com uma área útil de 152,49 m² e um pé direito de 2,6 m, composto por sala e cozinha *open space* (integrada), uma instalação sanitária comum, zona de circulação, dois quartos, sendo que um deles possui um *closet* e uma instalação sanitária.

As Figuras 4.17 e 4.18 apresentam a planta esquemática da habitação e as visualizações tridimensionais.

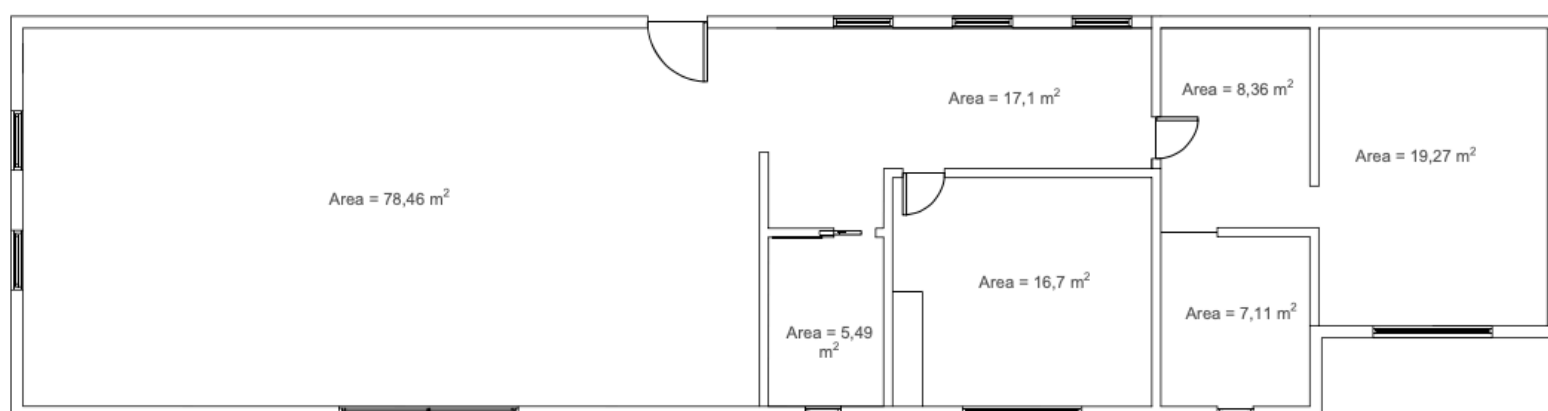


Figura 4.17: Planta esquemática do modelo

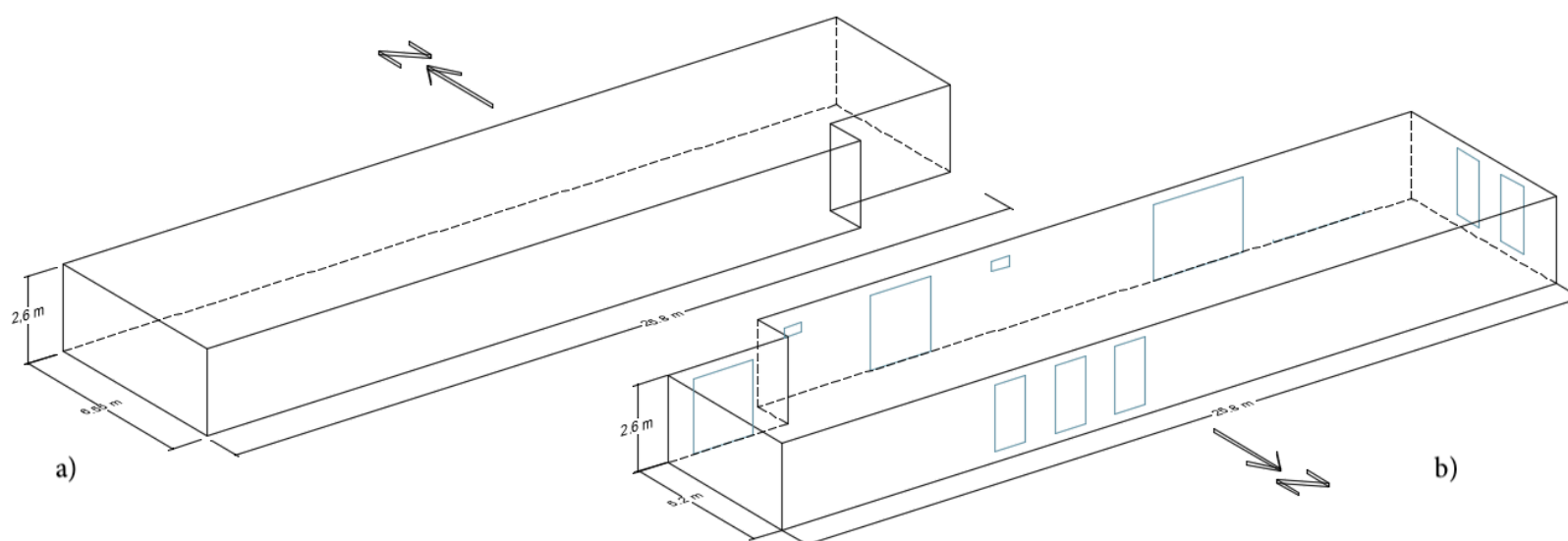


Figura 4.18: Modelos discriminados para a primeira e a segunda fase de simulação

Como já referido anteriormente, o modelo de simulação dinâmica foi analisado em várias fases. Na Figura 4.18, estão representadas as duas primeiras fases, sendo que o modelo (4.18a) correspondente ao primeiro caso de estudo e o modelo (4.18b) corresponde ao segundo caso de estudo, em que se tem em conta a presença dos vãos envidraçados.

Na Tabela 4.1, apresentam-se as áreas dos compartimentos e as orientações dos vãos envidraçados presentes no edifício.

Tabela 4.1: Caracterização do edifício

Zona	Área [m ²]	Pé direito [m]	Vãos envidraçados	Orientação dos vãos envidraçados
Sala e cozinha	78,46	2,6	3	Sul e Oeste
I.S.1	5,49	2,6	1	Sul
Circulação	17,1	2,6	3	Norte
Quarto 1	16,7	2,6	1	Sul
Quarto 2	19,27	2,6	1	Sul
Closet	8,36	2,6	-	-
I.S. P	7,11	2,6	1	Sul

4.5 Zonamento climático

A análise térmica foi feita para as regiões da grande Lisboa e Faro, deste modo, para a verificação do cumprimento dos requisitos de qualidade térmica das envolventes, foi feito o zonamento climático, que consiste em agrupar as zonas, de acordo com as condições climáticas existentes em cada uma delas.

Em Portugal, o zonamento climático baseia-se na Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos (NUTS) de nível III, numa composição por municípios, conforme indicado no Despacho nº 15793-F/2013, de 3 de dezembro [27].

De acordo com o despacho, as estações foram divididas em três zonas climáticas de inverno, I1, I2 e I3 e três zonas climáticas de verão V1, V2 e V3. Pelo que cada concelho possui uma zona climática correspondente de inverno e verão, identificadas através dos valores de referência tabelados, e ajustados à altitude do local.

Tendo em conta esses preceitos, a caracterização do período de aquecimento (Tabela 4.2), passou pela determinação de vários parâmetros, nomeadamente o número de graus dias GD, a duração da estação de aquecimento M, e a energia solar média mensal G_{sul} .

E para o período de arrefecimento (Tabela 4.3), determinou-se a temperatura exterior média da zona $\theta_{ext,v}$ e a energia solar acumulada durante a estação $I_{sol,H}$.

Tabela 4.2 : Zonamento Climático estação de Aquecimento

Concelho	GD [°C]	Zona climática	M [meses]	G_{sul} [kWh/m ² .mês]
Lisboa	1006	I1	5,2	150
Faro	724	I1	4,8	155

Tabela 4.3: Zonamento Climático estação de Arrefecimento

Concelho	$\theta_{ext,v}$	Zona climática	$I_{sol,H}$ [kWh/m ²]
Lisboa	22,1	V3	840
Faro	23,1	V3	865

4.6 Soluções construtivas

Para análise foram definidas três soluções construtivas baseadas em madeira laminada cruzada, denominadas CLTA, CLTB e CLTC, constituídas por paredes em painéis CLT, revestidos exteriormente por isolamento térmico e coberturas planas invertidas também do mesmo material. Como elemento de comparação, definiu-se uma solução de alvenaria corrente, baseada em paredes duplas com caixa de ar e cobertura plana de betão armado com isolamento térmico.

Para aplicação da qualidade térmica das envolventes calculou-se o coeficiente de transmissão térmica superficial dos elementos, sendo que para todas as soluções este coeficiente foi calculado respeitando os limites impostos pelo regulamento.

Na Tabela 4.4, encontram-se as soluções construtivas supracitadas e os respectivos coeficientes de transmissão térmica superficial.

Tabela 4.4: soluções construtivas e coeficientes de transmissão térmica

Solução construtiva	Elemento estrutural	Constituição	e [m]	U [W/m ² .°C]
CLT A	Cobertura	Ecoroof	0,18	0,18
		Lâmina drenante	0,02	
		Geotêxtil	0,01	
		Impermeabilização	0,02	
		XPS	0,12	
		CLT	0,297	
		Espaço de ar	0,07	
		Gesso acartonado	0,013	
	Parede	Revestimento Painel de madeira	0,03	0,26
		Espaço de ar	0,04	
		Barreira Vapor	0,0002	
		XPS	0,06	
		CLT	0,297	
		Espaço de ar	0,03	
		Gesso acartonado	0,013	
	Piso térreo	Enrocamento	0,2	0,18
		Geotêxtil	0,01	
		Betão limpeza	0,08	
		XPS	0,12	
		Barreira Vapor	0,0002	
		Laje betão	0,15	
Betonilha leve		0,08		
Soalho madeira		0,012		
CLT B	Cobertura	Gravilha	0,06	0,26
		Geotêxtil	0,01	
		XPS	0,12	
		Barreira Vapor	0,0002	
		CLT	0,117	
	Parede exterior	Revestimento Painel de madeira	0,03	0,35
		Barreira Vapor	0,002	
		XPS	0,08	
		CLT	0,117	
	Piso térreo	Enrocamento	0,2	0,18
		Geotêxtil	0,01	
		Betão limpeza	0,08	
		XPS	0,12	

Solução construtiva	Elemento estrutural	Constituição	e [m]	U [W/m ² .°C]
CLT C		Barreira Vapor	0,0002	
		Laje betão	0,15	
		Betonilha leve	0,08	
		Soalho madeira	0,012	
	Cobertura	Impermeabilização	0,01	0,31
		Vidro celular (IT)	0,1	
		Impermeabilização	0,03	
		CLT	0,12	
		Espaço de ar	0,07	
		Gesso acartonado	0,013	
	Parede	Painéis Eternit	0,06	0,37
		Barreira Vapor	0,0002	
		Vidro celular (IT)	0,08	
		CLT	0,12	
		Espaço de ar	0,03	
		Gesso acartonado	0,013	
	Piso Térreo	Enrocamento	0,2	0,18
		Geotêxtil	0,01	
		Betão limpeza	0,08	
		XPS	0,12	
		Barreira Vapor	0,0002	
Laje betão		0,15		
Betonilha leve		0,08		
Soalho madeira		0,012		
Alvenaria ² corrente	Cobertura	Gravilha	0,08	0,36
		Geotêxtil	0,01	
		XPS	0,08	
		Geotêxtil	0,01	
		Impermeabilização	0,03	
		Camada de forma	0,08	
		Laje de betão armado	0,2	
		Estuque projetado	0,015	
	Parede Exterior	Reboco	0,02	0,48
		Tijolo 15	0,15	
		Espaço de ar	0,04	
		XPS	0,04	
		Tijolo 11	0,11	
		Reboco	0,015	
		Estuque	0,015	
	Piso térreo	Enrocamento	0,2	0,18
		Geotêxtil	0,01	
		Betão limpeza	0,06	
		XPS	0,12	
		Barreira Vapor	0,0002	

² Para a solução de Alvenaria corrente não foram consideradas pontes térmicas.

Solução construtiva	Elemento estrutural	Constituição	e [m]	U [W/m².°C]
		Laje betão	0,15	
		Betonilha leve	0,08	
		Argamassa de regularização	0,01	
		Ladrilho cerâmico	0,01	

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, proceder-se-á a apresentação e análise dos resultados obtidos para os diferentes cenários de simulação estudados, dando-se especial atenção aos efeitos da temperatura interior, estimativa da inércia térmica e consumo energético.

A apresentação dos resultados será feita em função dos objetivos propostos e de acordo com a metodologia de análise apresentada na Figura 4.1. Esta organização permitirá comparar o comportamento das diferentes soluções construtivas testadas, conseguindo, deste modo, efetuar a caracterização das condições do comportamento térmico inerentes a cada uma delas.

As simulações foram processadas de hora a hora, num período de três dias para cada período (verão: 28/08 a 30/08 e inverno: 30/01 a 1/02) e em regime livre, ou seja, sem imposição de limites de temperaturas.

Ao longo do trabalho, alguns resultados serão apresentados em função da orientação dos elementos construtivos, e de modo a facilitar o entendimento, a Figura 5.1 ilustra a denominação utilizada para cada um desses elementos.

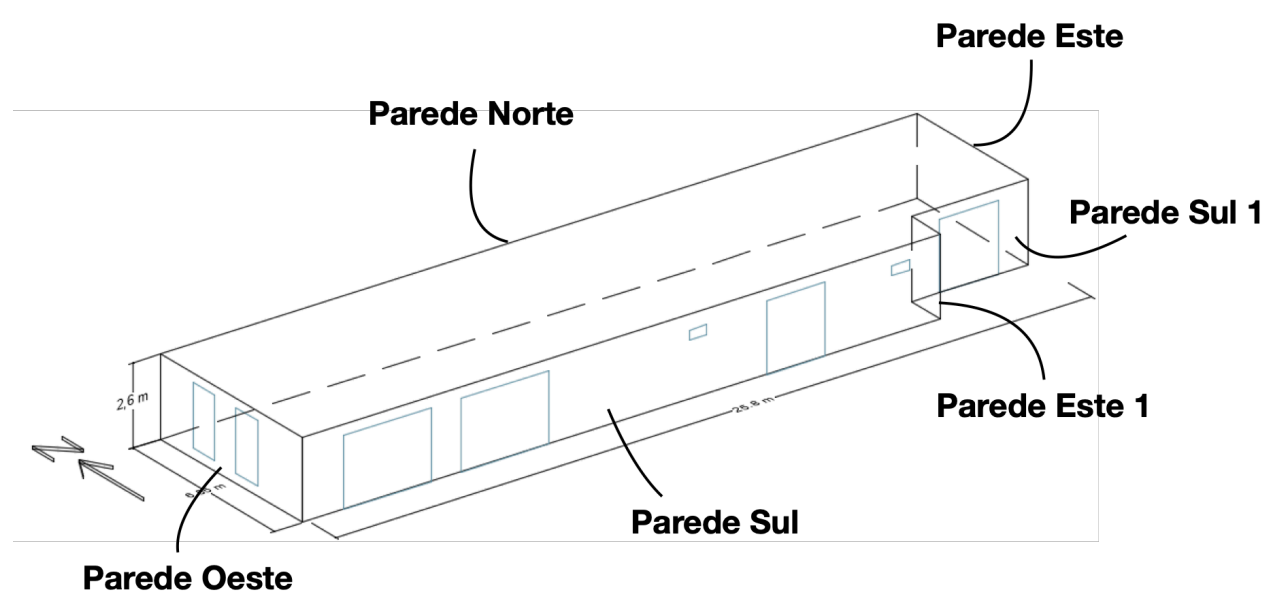


Figura 5.1: Denominação dos elementos verticais.

5.1 Análise da envolvente opaca: Lisboa

Segundo [28], a contabilização das trocas térmicas entre os espaços interiores úteis e os demais, é feita através da caracterização dos elementos da envolvente opaca, que por sua vez, são responsáveis por uma percentagem significativa das trocas de calor por condução entre o ambiente interior e o ambiente exterior. Neste sentido, a radiação solar entra como um elemento de grande influência no aumento das temperaturas, contribuindo positivamente para a satisfação das exigências de inverno e representando um o fator condicionante nas exigências de conforto no período de verão.

Considerando o efeito deste, a Figura 5.2 apresenta a radiação solar incidente em cada elemento da envolvente ao longo do período de simulação (28 a 30 de Agosto e 30 de Janeiro a 1 de Fevereiro).

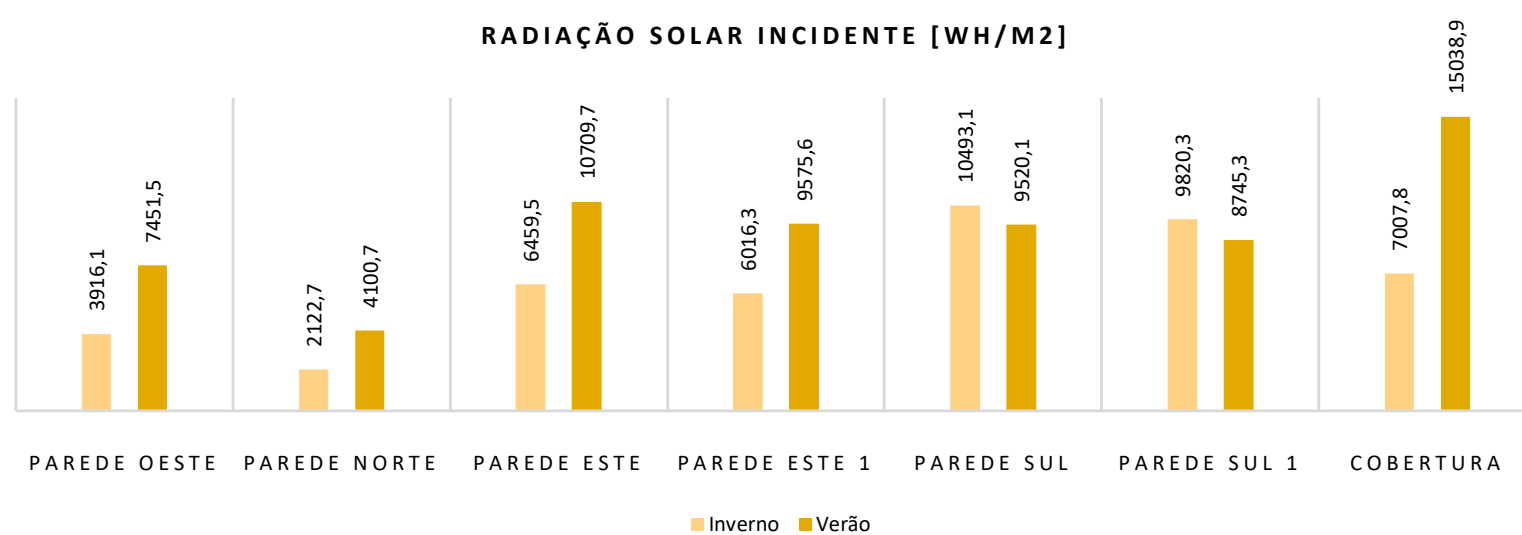


Figura 5.2: Radiação solar incidente sobre cada elemento expresso em Wh/m² (Lisboa)

Analisando a Figura 5.2, verifica-se que no período de aquecimento (Inverno), as fachadas orientadas a Norte e a Oeste recebem pouca radiação solar, o que vai configurar zonas com grandes perdas térmicas durante este período. Ao passo que as fachadas orientadas a Este, Oeste e a Sul, devido a maior incidência solar vão proporcionar ganhos térmicos ao edifício, já que o percurso solar é favorável aos elementos expostos a esta orientação.

Quando passamos para o período de arrefecimento (Verão), como resultado da alteração do percurso solar, as fachadas Este, Sul e a cobertura, ficam expostas durante várias horas do dia, configurando zonas com grandes ganhos de calor, o que para essa estação pode levar ao sobreaquecimento interior.

A fachada Oeste, por sua vez, apresenta comportamento semelhante a fachada Este, no entanto, ao contrário da fachada Este que fica exposta durante o período da manhã, a fachada Oeste fica exposta durante o período da tarde.

5.1.1 Amortecimento e atraso térmico

Como mencionado no capítulo 2, o coeficiente de amortecimento (μ) e o atraso térmico (ϕ) permitem avaliar a inércia térmica das envoltentes, sem recorrer a várias expressões de cálculo. Deste modo, com vista a avaliar a forma como cada solução construtiva responde as oscilações térmicas, a Figura 5.3 apresenta o coeficiente de amortecimento e o atraso térmico para cada uma das soluções analisadas.

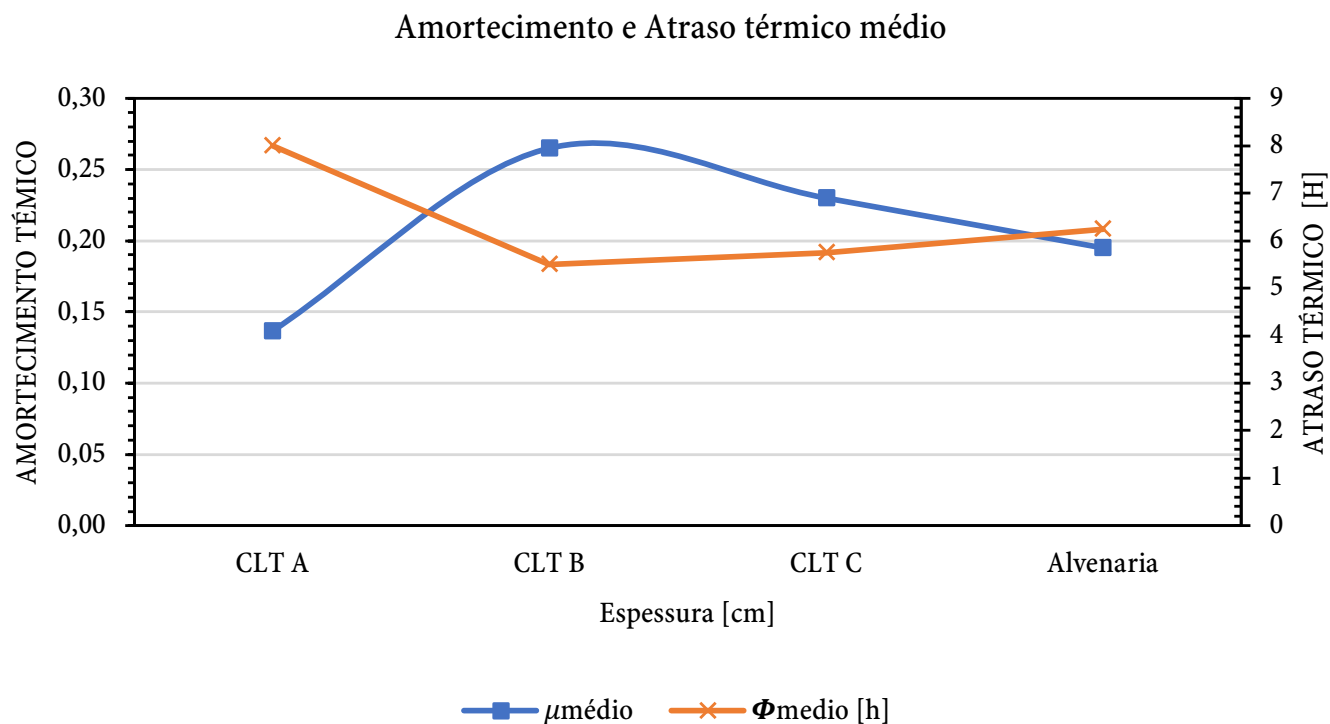


Figura 5.3: Amortecimento e atraso térmico

Como se pode observar, o sistema construtivo CLTA reduz a amplitude térmica exterior em 86%, levando em média 8 horas para que o pico máximo de temperatura seja registado no interior do edifício.

As restantes soluções construtivas reduzem as amplitudes térmicas em 73%, 77% e 80%, respetivamente para CLTB, CLTC e Alvenaria, com atrasos térmicos na ordem das 6 horas.

Vale lembrar que os valores apresentados na Figura 5.3 retratam uma média entre os diferentes elementos construtivos de uma mesma solução.

Para a análise da transferência de calor, a Figura 5.4 apresenta a condução de calor através das envoltentes opacas.

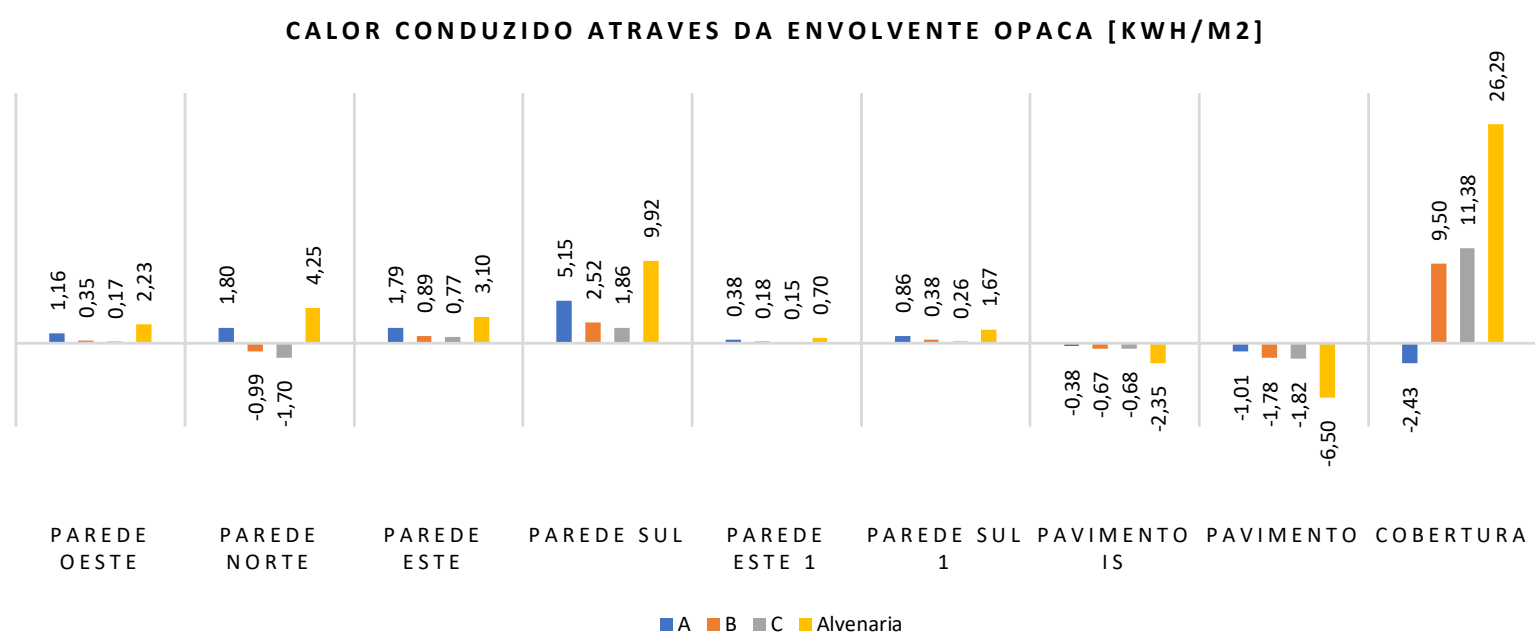


Figura 5.4: Transferências de calor por condução (Caso 1)

O processo de transferência de calor através das envolventes, depende da radiação solar incidente sobre a superfície, da temperatura exterior na vizinhança do elemento e da inércia térmica.

Como resultado da radiação solar incidente durante o dia, o fluxo de calor ao atravessar o elemento é, portanto, consumido no aquecimento gradual deste, de forma que no final, apenas parte desse calor chega até a superfície interior do elemento, e posteriormente conduzido para o ambiente.

Segundo a Figura 5.4, para as quatro soluções construtivas, o calor transferido para o ambiente através da face interior é positivo, ou seja, verificam-se ganhos térmicos em todas as orientações com exceção da parede voltada a Norte, em que metade das soluções apresentam valores negativos, indicando que a condução de calor se dá de dentro para fora da zona térmica (perdas de calor).

A condução de calor através da cobertura, mostra que a solução de Alvenaria apresenta um valor consideravelmente alto comparando com as outras soluções, ao passo que as soluções CLTB e CLTC resultaram em valores da mesma ordem de grandeza.

A cobertura da solução CLTA, por sua vez, apresenta condução de calor negativo, isso pode ser explicado pelo facto de se tratar de uma cobertura ajardinada, em que as plantas durante o verão protegem o edifício da radiação solar e reduzem o aquecimento através do fenómeno de evapotranspiração, permitindo assim o arrefecimento global de toda área da cobertura [29].

Para análise do pavimento utilizou-se o pré-processador *Slab*, auxiliar do EnergyPlus, de forma que se pudesse levar em conta a influência da temperatura do solo. Assim sendo, o facto das temperaturas médias mensais do solo não ultrapassarem os 21°C, fazem com que as perdas de calor pelo pavimento ajudem na regularização das temperaturas da zona.

Para este primeiro Caso de estudo, as soluções CLTA e Alvenaria apresentaram valores dentro da faixa confortável para a estação de Arrefecimento com médias abaixo dos 25°C, enquanto as soluções CLTB e CLTC apresentaram valores um pouco acima do recomendável (Figura 5.5).

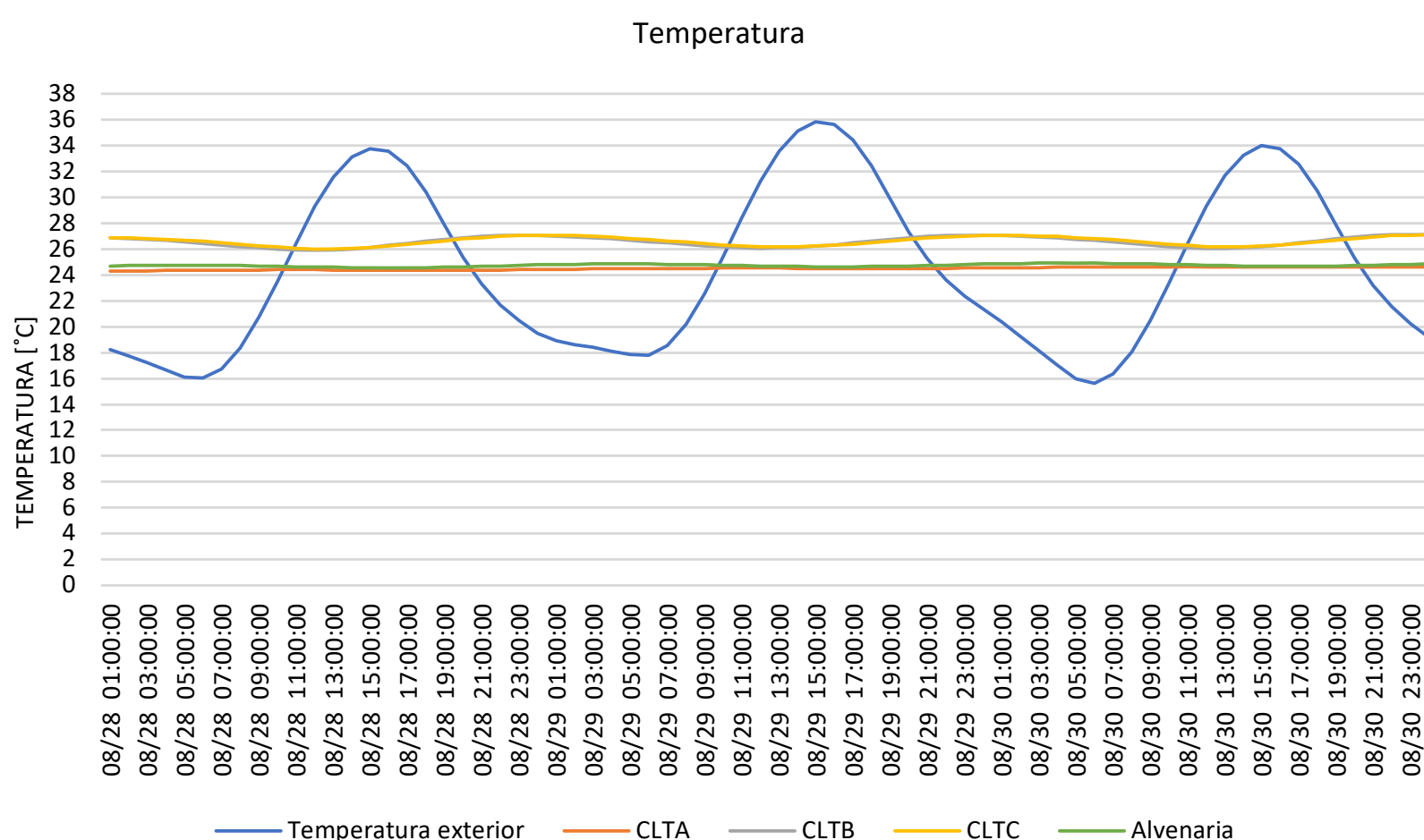


Figura 5.5: Temperatura exterior e interior no período de 28 a 30 de Agosto (Caso 1)

A Figura 5.6, apresenta a evolução das necessidades energéticas para cada uma das soluções, em função da temperatura interior no período de 28 a 30 de Agosto.

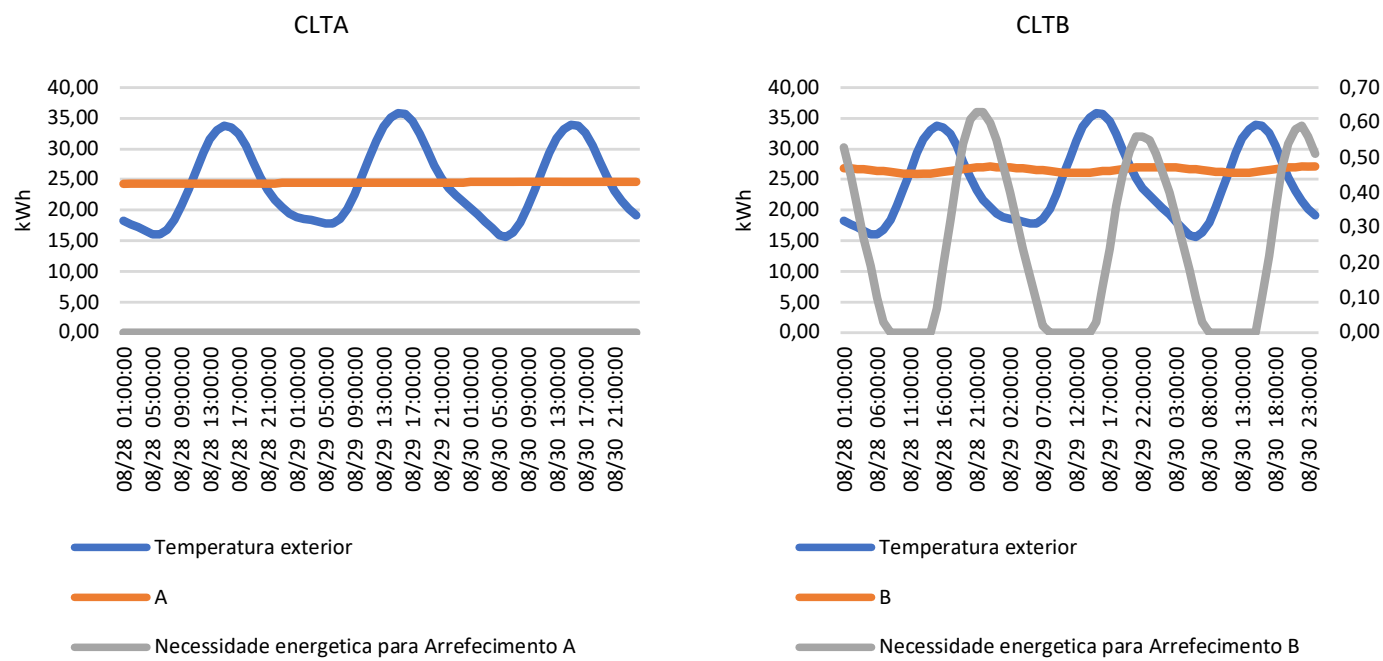


Figura 5.6: Necessidades energéticas verão soluções CLTA e CLTB (Caso 1)

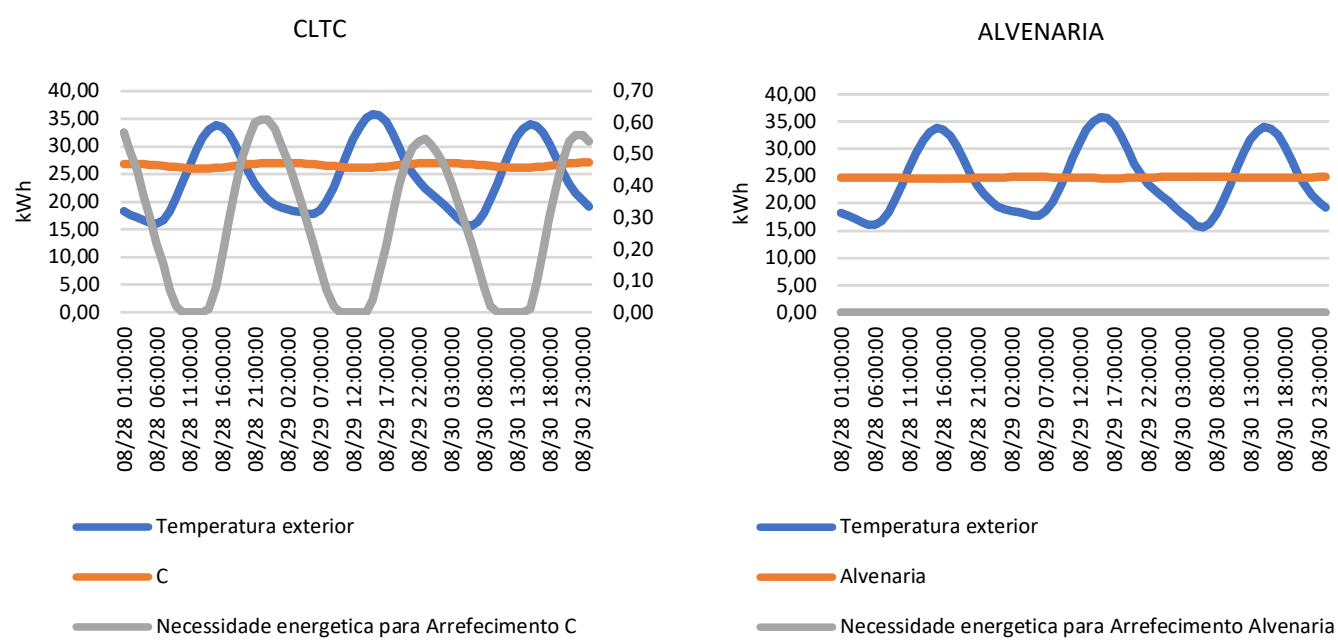


Figura 5.7: Necessidades energéticas verão soluções CLTC e Alvenaria (Caso 1)

Como se pode observar, em resposta as altas temperaturas nas soluções CLTB e CLTC, o termostato é ativado, fazendo com que seja injetada carga de arrefecimento no ambiente, reduzindo as temperaturas interiores até a faixa confortável. Para as soluções CLTA e Alvenaria, não houve ativação do dispositivo de arrefecimento, já que a maior parte do tempo as temperaturas encontravam-se abaixo dos 25°C.

Nas curvas do funcionamento do sistema de arrefecimento apresentadas na Figura 5.6 (cor cinza), é possível observar zonas de interrupções no consumo energético nas soluções CLTB e CLTC, este comportamento é um indicativo de que as trocas de calor com o ambiente exterior não são imediatas, havendo um certo controlo da temperatura do ar interior, pelo que quanto mais eficiente for a solução construtiva, maior será a zona de consumo nulo.

Na Tabela 5.1, apresentam-se os balanços térmicos por condução, calculados em função das perdas e os ganhos térmicos pelas envolvente e expressos em kWh.

Tabela 5.1: Balanço térmico total análise da envolvente opaca (Caso 1)

	CLTA	CLTB	CLTC	Alvenaria
Ganhos por condução pela envolvente opaca [kWh]	0,25	1,05	0,95	0,31
Perdas por condução pela envolvente opaca [kWh]	0,07	1,02	0,91	0,24
Balanço energético Total [kWh]	0,18	0,03	0,04	0,07

Para o primeiro Caso de estudo, a maioria das soluções apresentaram perdas de calor por condução na mesma ordem de grandeza dos ganhos, o que é positivo, já que durante o período de verão há necessidades em restringir os ganhos de calor por condução e promover as perdas. Uma vez que estas contribuem para o arrefecimento do ambiente interior e fazem com que as necessidades energéticas sejam menores.

Por fim, para completar a informação apresenta-se na Figura 5.7, os consumos finais de energia para o período de aquecimento e arrefecimento, e como se pode notar, as soluções CLTA e Alvenaria apesar de não apresentarem necessidades energéticas para arrefecimento, durante o inverno já não se verifica tal comportamento, tanto que a solução de Alvenaria corrente é aquela que apresenta maior necessidade de energia para aquecimento da zona térmica.

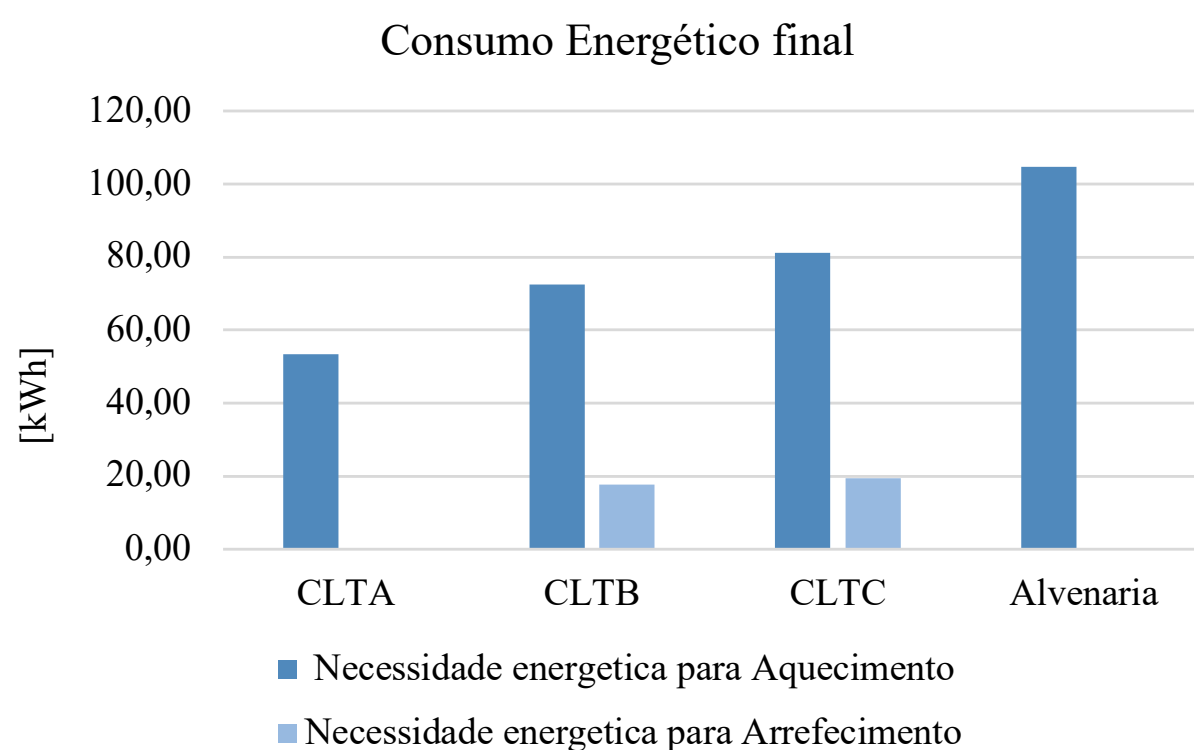


Figura 5.8: Consumos energéticos para estação de Aquecimento e Arrefecimento (Caso 1)

5.1.2 Influência da espessura do CLT

Para a compreensão do comportamento do material, nesta secção é feita uma análise de sensibilidade do CLT, que proceder-se-á através do aumento gradual da espessura do elemento, com objetivo de entender a influência desta variação nas flutuações térmicas.

Para análise, escolheu-se a solução CLTB, em que os elementos de parede e cobertura sofrerão alteração da espessura em três situações diferentes (Tabela 5.2).

Tabela 5.2: Espessuras do CLT e coeficientes de transmissão térmica

Espessura CLT simulada [cm]	U [W/m ² .°C]	
	Parede	Cobertura
10 cm	0,33	0,25
20 cm	0,29	0,22
30 cm	0,25	0,20

As figuras que se seguem, apresentam os resultados referentes ao amortecimento e o atraso térmico, temperaturas interiores e os consumos energéticos para as três situações simuladas.

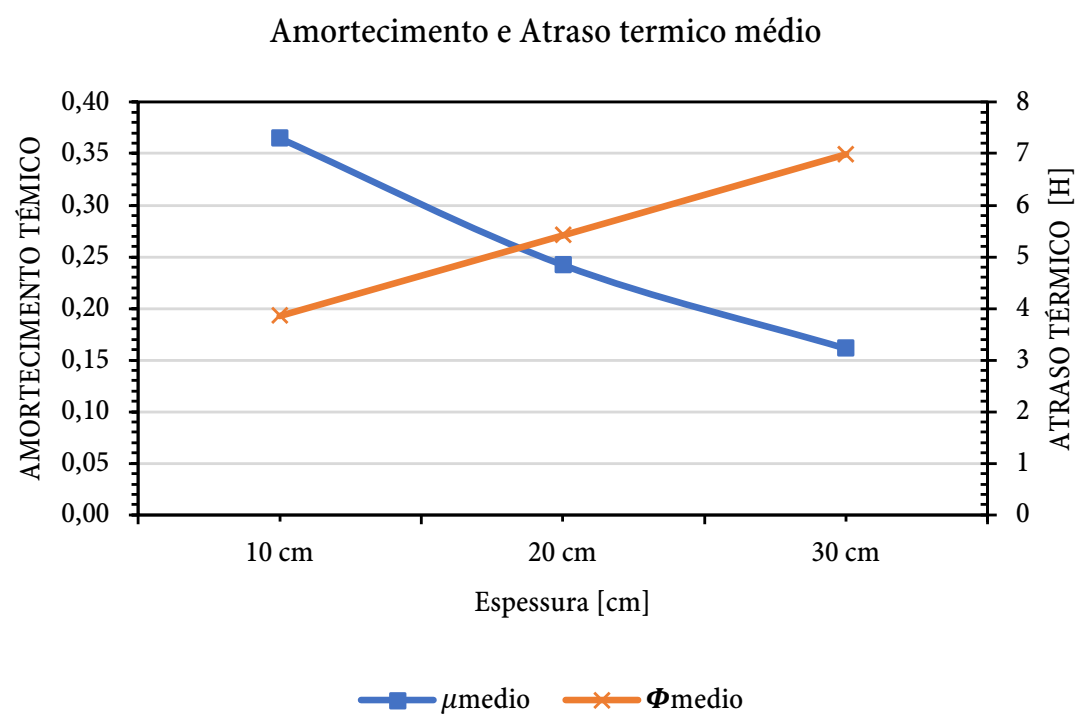


Figura 5.9: Amortecimento e Atraso térmico (Análise de sensibilidade CLT)

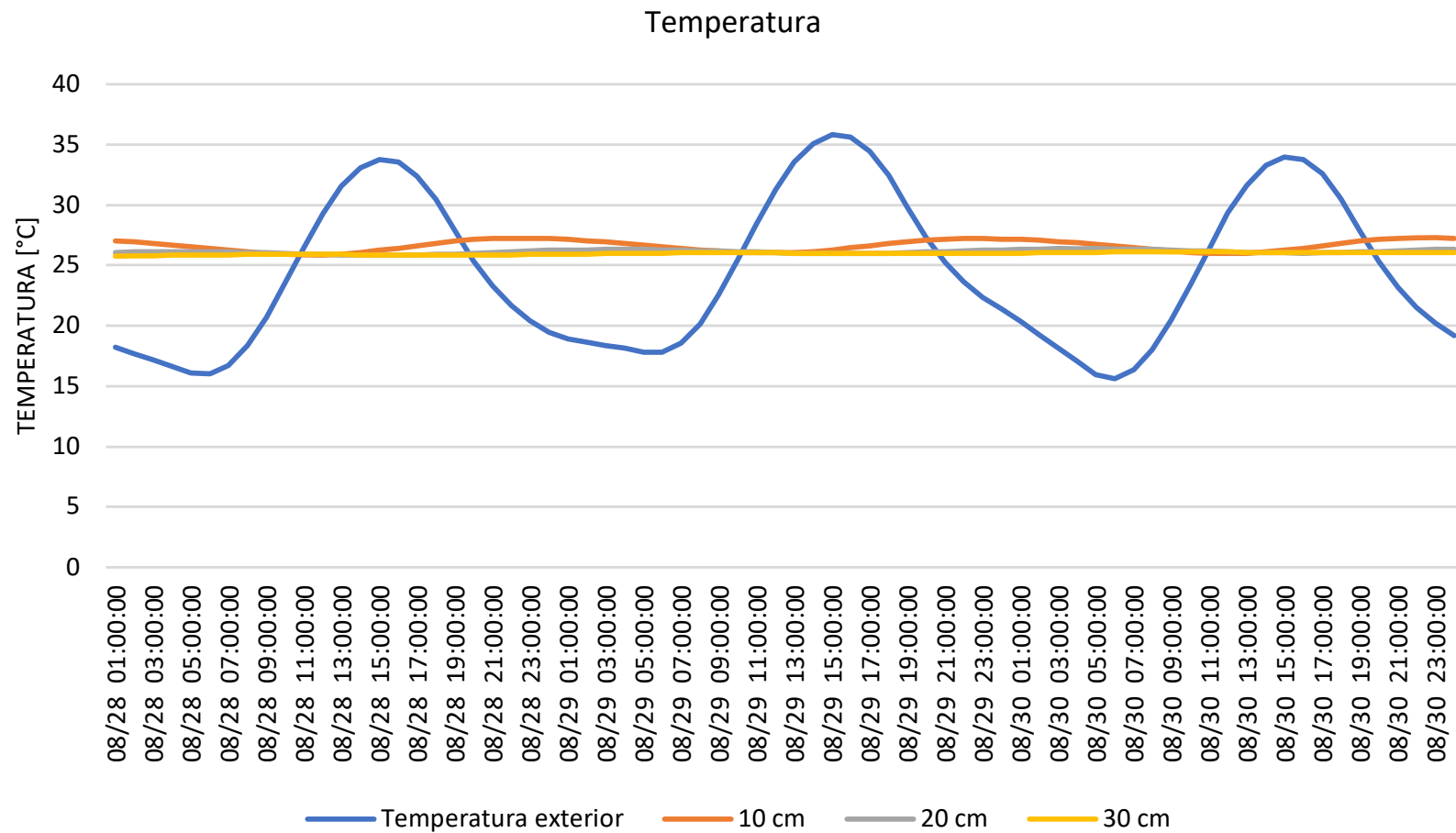


Figura 5.10: Temperaturas no exterior e interior do edifício (Análise de sensibilidade CLT)

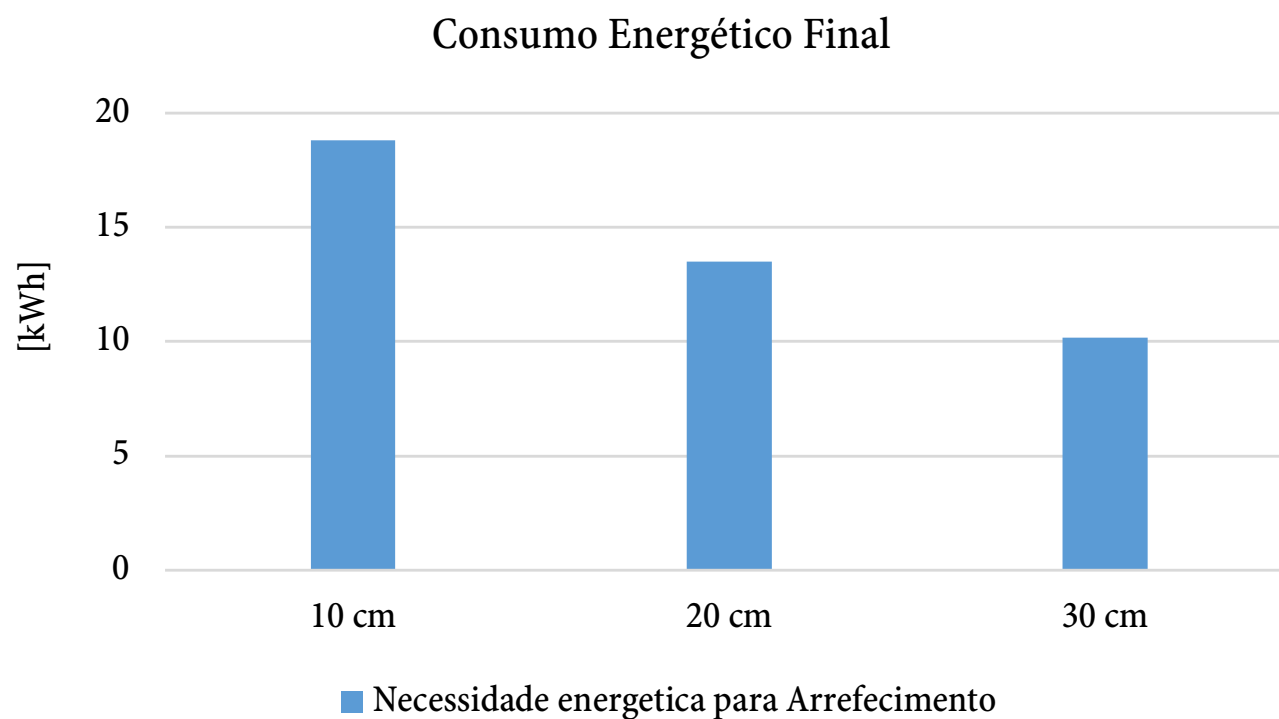


Figura 5.11: Consumo energético período de arrefecimento (Análise de sensibilidade CLT)

Como se pode observar na Figura 5.8, o coeficiente de amortecimento térmico diminui e o atraso térmico aumenta, à medida que a espessura dos elementos aumentam. Porém, em termos das temperaturas interiores (Figura 5.9), verifica-se pouca variação entre as três simulações, com valores médios muito próximos, mas ainda assim, suficientes para afetar o consumo final de energia (Figura 5.10).

Assim sendo, do ponto de vista económico e de conforto, é sempre vantajoso optar por elementos de maiores espessuras, pois resultará em baixo amortecimento térmico, grande atraso entre os picos de temperaturas e menor consumo energético para arrefecimento.

5.1.3 Influência da espessura do isolamento térmico

Para terminar o primeiro caso de estudo, focado na envolvente do edifício, fez-se também análise de sensibilidade do isolamento térmico, nos elementos de paredes e cobertura.

Como material isolante, escolheu-se o poliestireno extrudado (XPS) e utilizou-se a mesma solução construtiva (CLTB) e condições de análise do caso anterior.

Foram feitas três simulações, sendo que a primeira consistiu em analisar o comportamento térmico da moradia quando o IT possui uma espessura comercial 12 cm, na segunda simulação esta espessura foi reduzida para 6 cm e na última simulação optou-se por retirar totalmente o isolamento térmico, e avaliar de que forma a presença ou ausência deste material afeta o comportamento térmico interior do edifício.

Tabela 5.3: Espessuras do IT e coeficientes de transmissão térmica

Espessura XPS [cm]	U [W/m ² .°C]	
	Parede	Cobertura
12 cm	0,24	0,24
6 cm	0,40	0,39
Sem IT	0,48	1,01

Começou-se por determinar o coeficiente de amortecimento e o atraso térmico para as três situações (Figura 5.11).

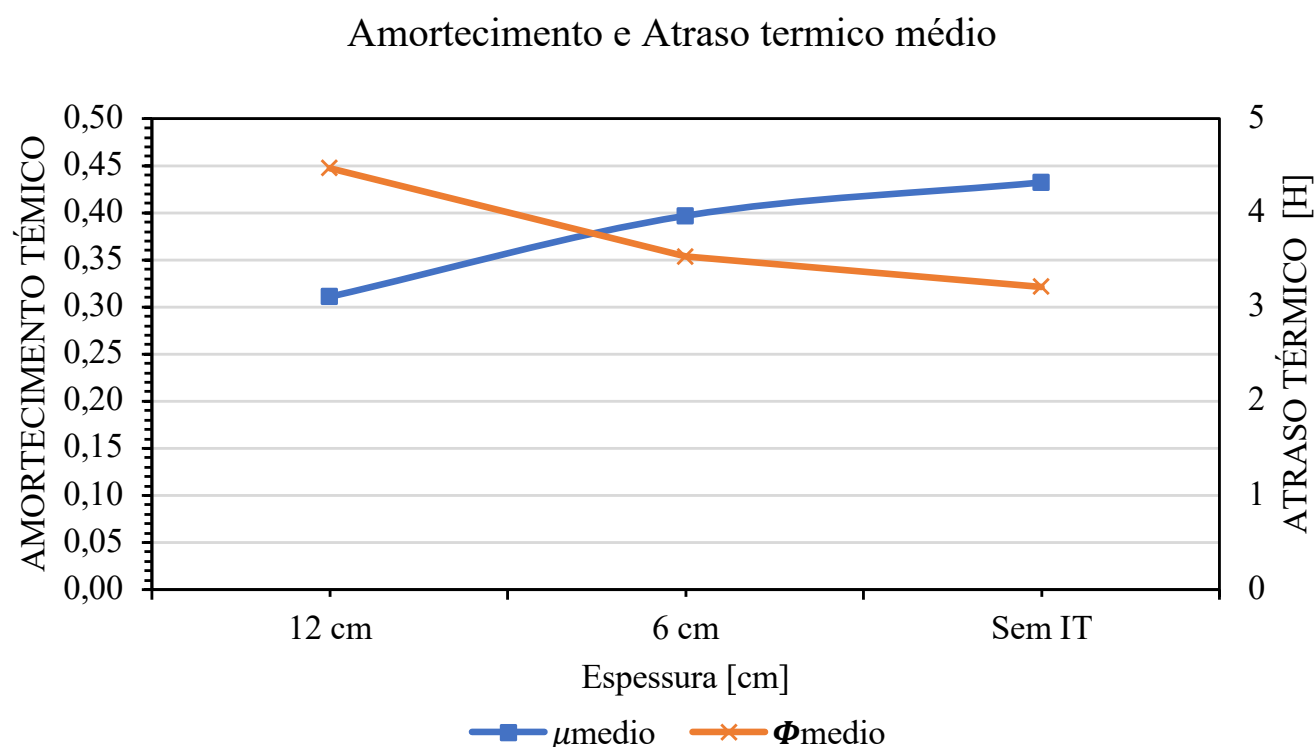


Figura 5.12: Amortecimento e atraso térmico (Análise de sensibilidade IT)

A seguir extraíram-se as temperaturas interiores e exterior para os dias 28 a 30 de Agosto.

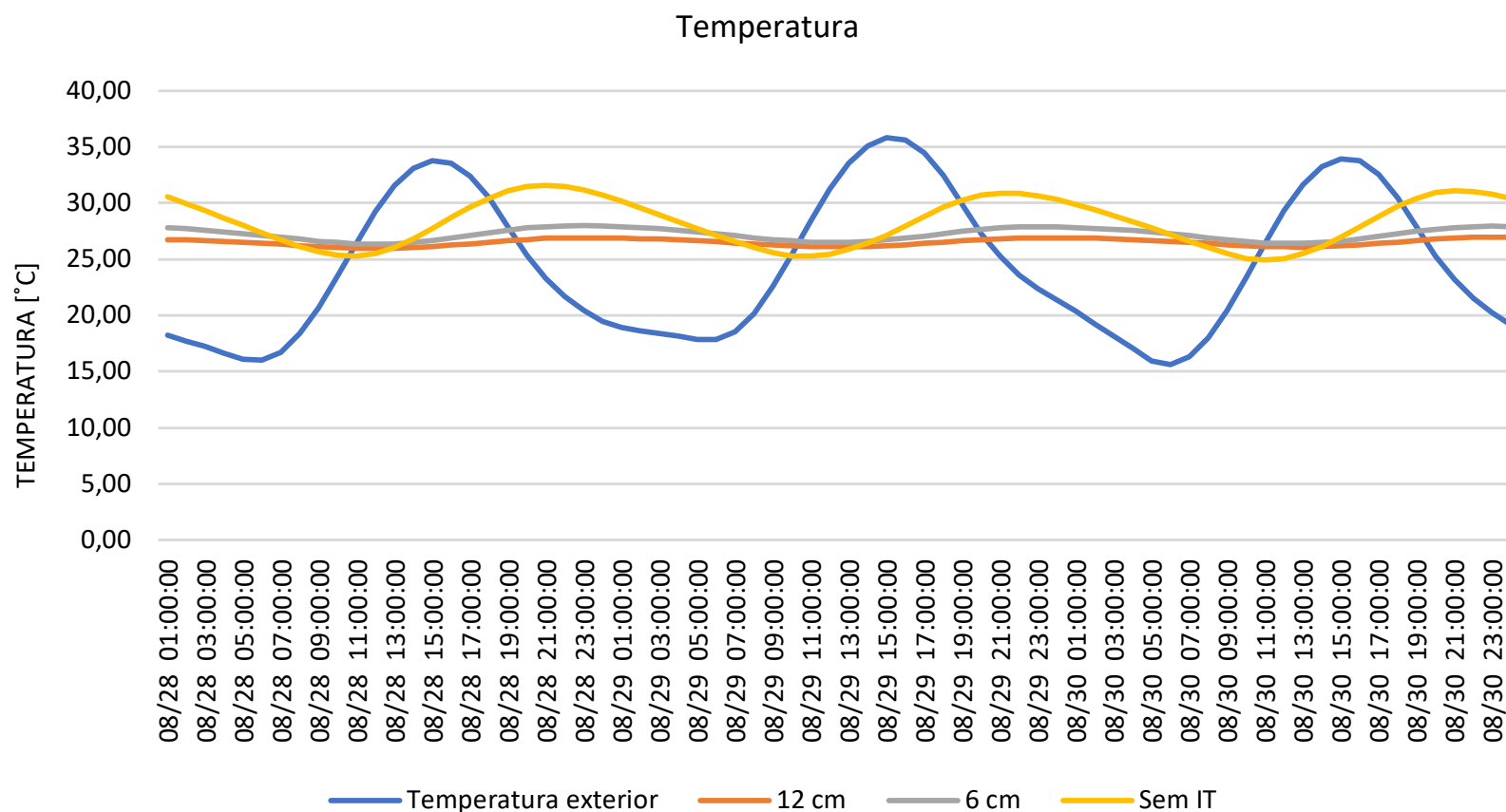


Figura 5.13: Temperaturas no exterior e interior do edifício (Análise de sensibilidade IT)

E por fim, foram determinados os consumos finais de energia para arrefecimento da zona térmica.

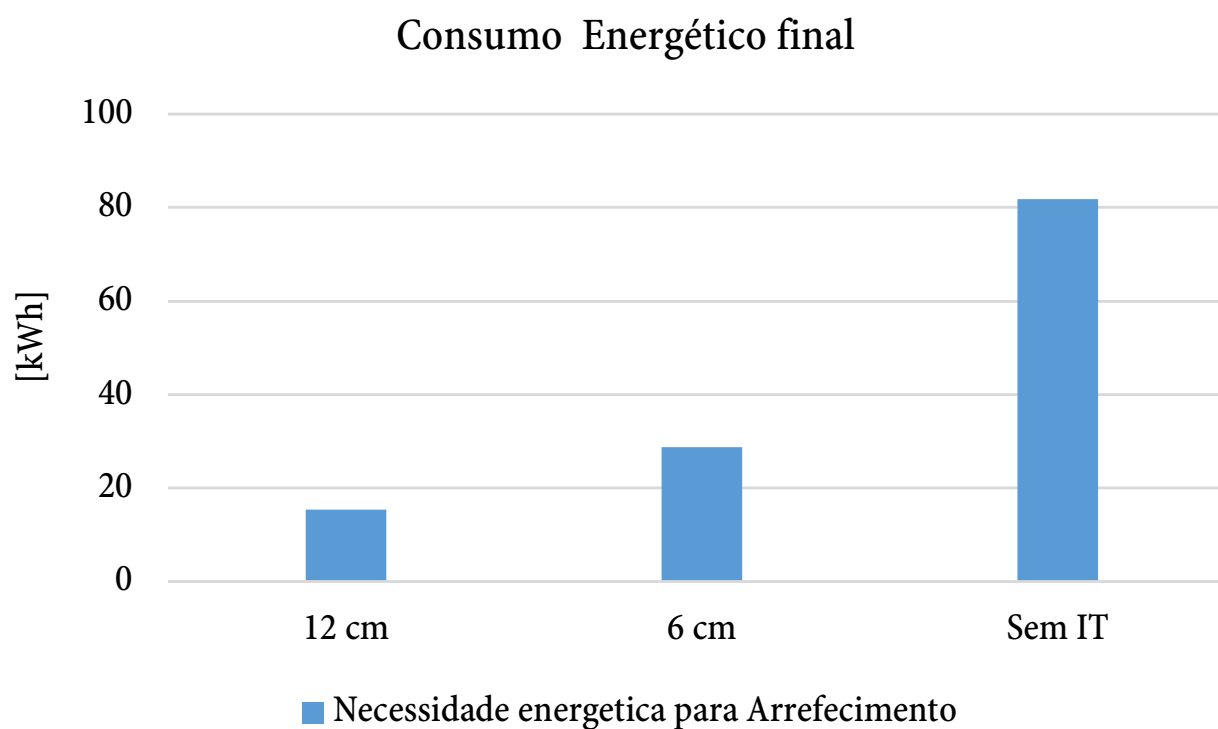


Figura 5.14: Consumo energético período de arrefecimento (Análise de sensibilidade IT)

A semelhança do caso anterior, nota-se que quanto maior a espessura do material isolante, menor é o amortecimento das ondas de calor. Para este caso, tem-se que para a maior espessura de isolamento térmico a amplitude térmica interior corresponde a 31% da exterior. Quando esta mesma espessura, é reduzida para metade (6 cm), há um aumento de aproximadamente 10% no valor do amortecimento, o que leva ao aumento na temperatura interior e consumo energético (Figura 5.13).

Para a última situação, em que não se tem IT, se olharmos apenas para o primeiro gráfico (Figura 5.11), aparentemente, a ausência deste material não rendeu grande redução no amortecimento térmico quando comparado com a segunda simulação (6 cm). No entanto, quando se observa o comportamento das curvas de temperaturas na Figura 5.12, fica visível que a ausência do isolamento térmico faz com que as flutuações térmicas sejam muito maiores ao longo do dia, situação que reverbera a necessidade de injeção de carga térmica para arrefecimento da zona.

5.2 Avaliação da influência dos envidraçados

Os vãos envidraçados têm a função de permitir a entrada de luz natural e ventilar o ambiente interior. Quando a radiação solar incide sobre os envidraçados, uma parcela é imediatamente refletida, outra é transmitida e a terceira é absorvida pela superfície do vidro. A fração absorvida, é dividida em duas parcelas, das quais uma é transmitida para o interior e outra para o exterior do ambiente, por convecção e radiação.

A radiação transmitida para o interior, é absorvida pelas superfícies internas (paredes, piso, teto) e posteriormente libertada para o espaço, por condução e convecção, fazendo com que as temperaturas do ambiente aumentem.

A quantidade de radiação que atravessa o envidraçado, depende, das suas características, do ângulo de incidência, das dimensões e orientações dos envidraçados. No período de arrefecimento (Verão), os ganhos excessivos de calor têm implicações negativas no comportamento térmico do edifício, que podem levar ao sobreaquecimento.

Com objetivo de reduzir a radiação solar incidente e controlar os ganhos solares pelos envidraçados, foram introduzidos dispositivos de oclusão (estores) em todos os envidraçados, com funcionamento automático de acordo com as condições programadas. Por sua vez, além destes dispositivos, sentiu-se também a necessidade de introduzir palas de sombreamento nos vãos de grandes áreas orientados a sul como uma estratégia de reduzir os ganhos solares excessivos.

Para os envidraçados, adotou-se uma solução constituída por duas laminas de vidro de 12 mm, separados por uma lamina de ar de 14 mm e suportados por caixilharia de alumínio. A Tabela 5.4, apresenta os coeficientes de caracterização térmica do vidro, como o coeficiente de transmissão térmica (U_w), o fator solar ($g_{\perp,vi}$) e o coeficiente de transmissão visível (T_{vis}).

Tabela 5.4: Soluções de envidraçados

Tipo de vidro	e [m]	Espessura da lâmina de gás [m]	Tipo de gás	U_{wdn} [W/m ² .°K]	$g_{\perp,vi}$	T_{vis}
Transparente	0,012	0,014	Ar	2,56	0,59	0,71

O modelo de estudo dispõe de um total de dez envidraçados, distribuídos segundo as diferentes orientações e fachadas do edifício (Tabela 5.5).

Tabela 5.5: Vãos envidraçados

Envidraçado	Orientação	Área efetiva coletora do vão envidraçado (A_{snj}) [m ²]	Área total ³ [m ²]
VE1	Norte	2	2,31
VE2	Norte	2	2,31
VE3	Norte	2	2,31
VE4	Sul	4,5	4,94
VE5	Sul	0,18	0,28
VE6	Sul	4,5	4,94
VE7	Sul	0,18	0,28
VE8	Sul	6,77	7,31
VE9	Oeste	2	2,31
VE10	Oeste	2	2,31

As figuras seguintes apresentam os resultados relativos as perdas e ganhos através dos envidraçados.

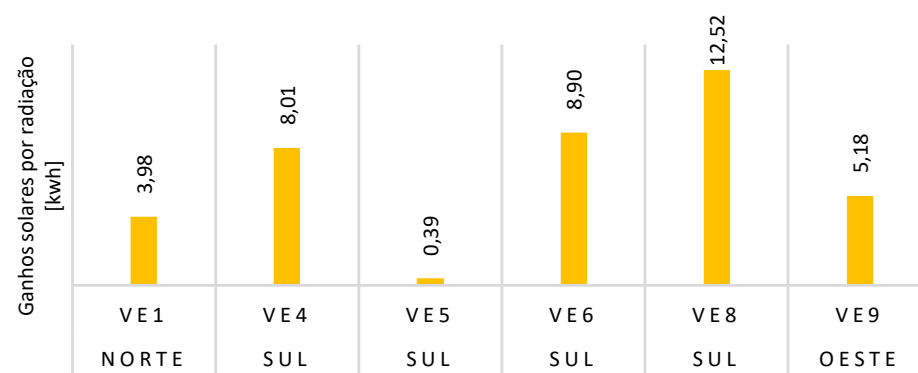
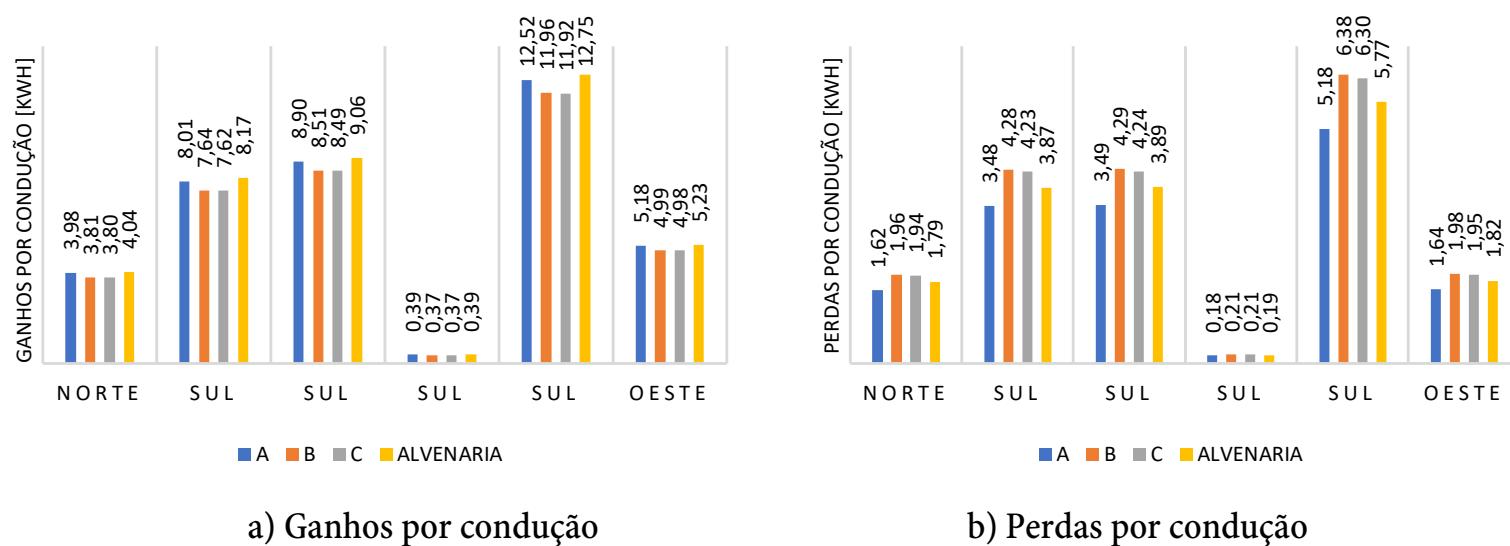


Figura 5.15: Ganhos solares pelos envidraçados

³ Área do envidraçado + caixilho

Analisando as imagens acima, pode-se concluir que a orientação e a área do envidraçado maximizam tanto os ganhos quanto as perdas de calor, e neste caso apesar do fator solar $g_{L,vi}$ ser baixo (0.59), ainda assim revelou-se insuficiente, principalmente para radiação direta em largos períodos do dia.

Todavia, a escolha da colocação das palas foi imprescindível para o melhoramento das condições de conforto, uma vez que antes da colocação desses elementos, as temperaturas interiores chegavam a valores muito altos devido aos ganhos excessivos de calor.

A Figura 5.14, apresenta a evolução das temperaturas interiores no período de 28 a 30 de Agosto.

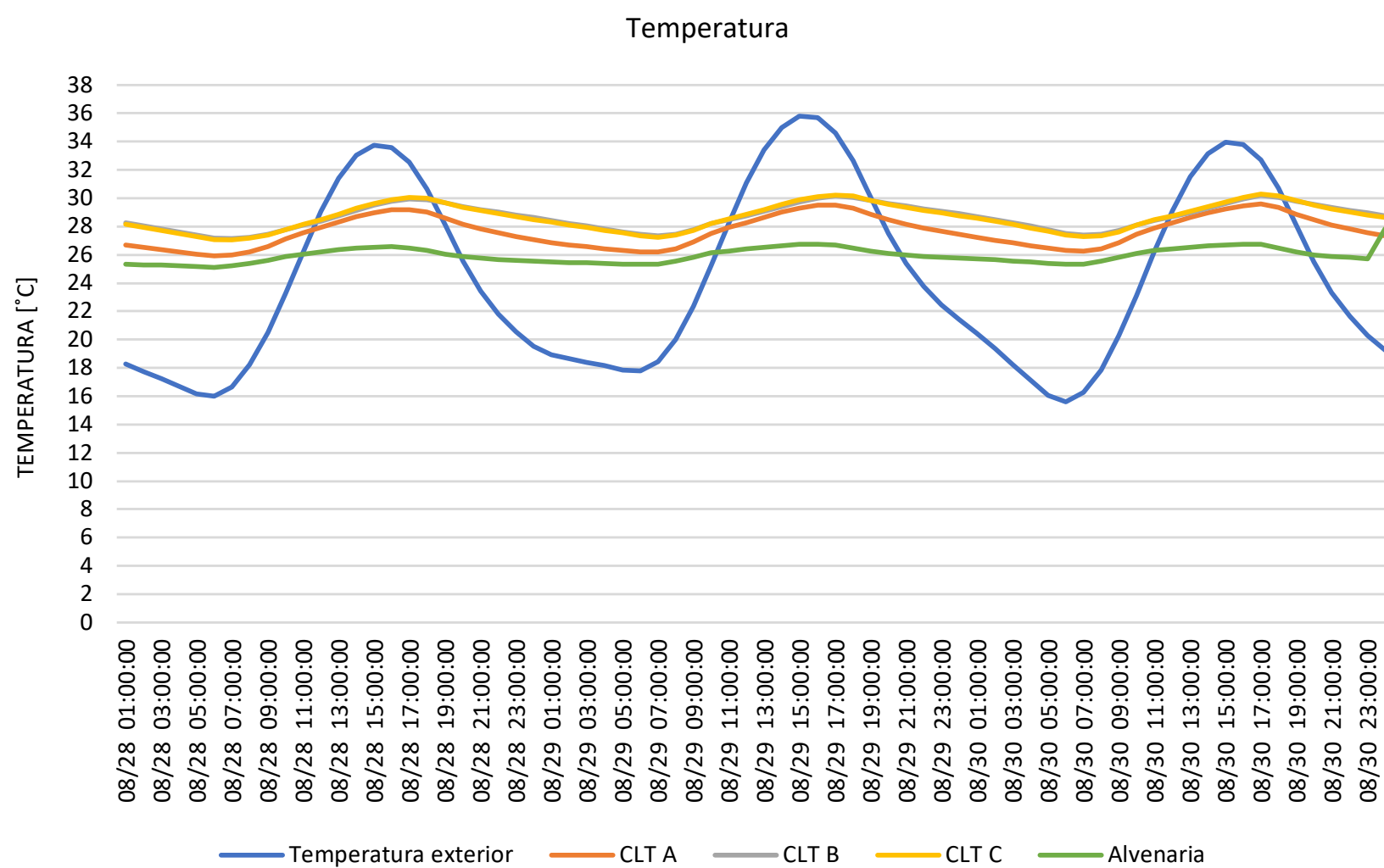


Figura 5.16: Temperaturas no exterior e interior do edifício (Caso 2)

A Tabela 5.6, apresenta os balanços energéticos totais nos envidraçados, calculados através do somatório do balanço térmico por condução e o somatório dos ganhos solares por radiação.

Tabela 5.6: Balanço térmico total pelo envidraçados

Solução	Ganhos por condução [kWh]	Perdas por condução [kWh]	Balanço por condução [kWh]	Ganhos solares por radiação [kWh]	Balanço energético Total [kWh]
CLTA	52,35	20,50	31,85	34,39	66,22
CLTB	50,12	25,07	25,05	34,39	59,44
CLTC	49,97	24,76	25,21	34,39	59,60
Alvenaria	58,20	16,68	41,52	34,39	75,91

Observando os valores da tabela acima, a primeira solução (CLTA) apresenta balanço energético total de 66,22 kWh, superior aos registados nas outras soluções sustentáveis. As soluções CLTB e CLTC, apresentam valores dos ganhos e perdas por condução semelhantes, fazendo com que os balanços energéticos totais sejam praticamente iguais (59,44 e 59,60 kWh).

Para esta fase de análise, a solução de Alvenaria corrente é aquela com maiores ganhos e menos perdas por condução, o que faz com que o balanço energético total para esta solução seja superior que o das outras soluções.

Dando sequência a análise, a Figura 5.16 apresenta as transferências de calor por condução através das envolturas opacas não envidraçadas.

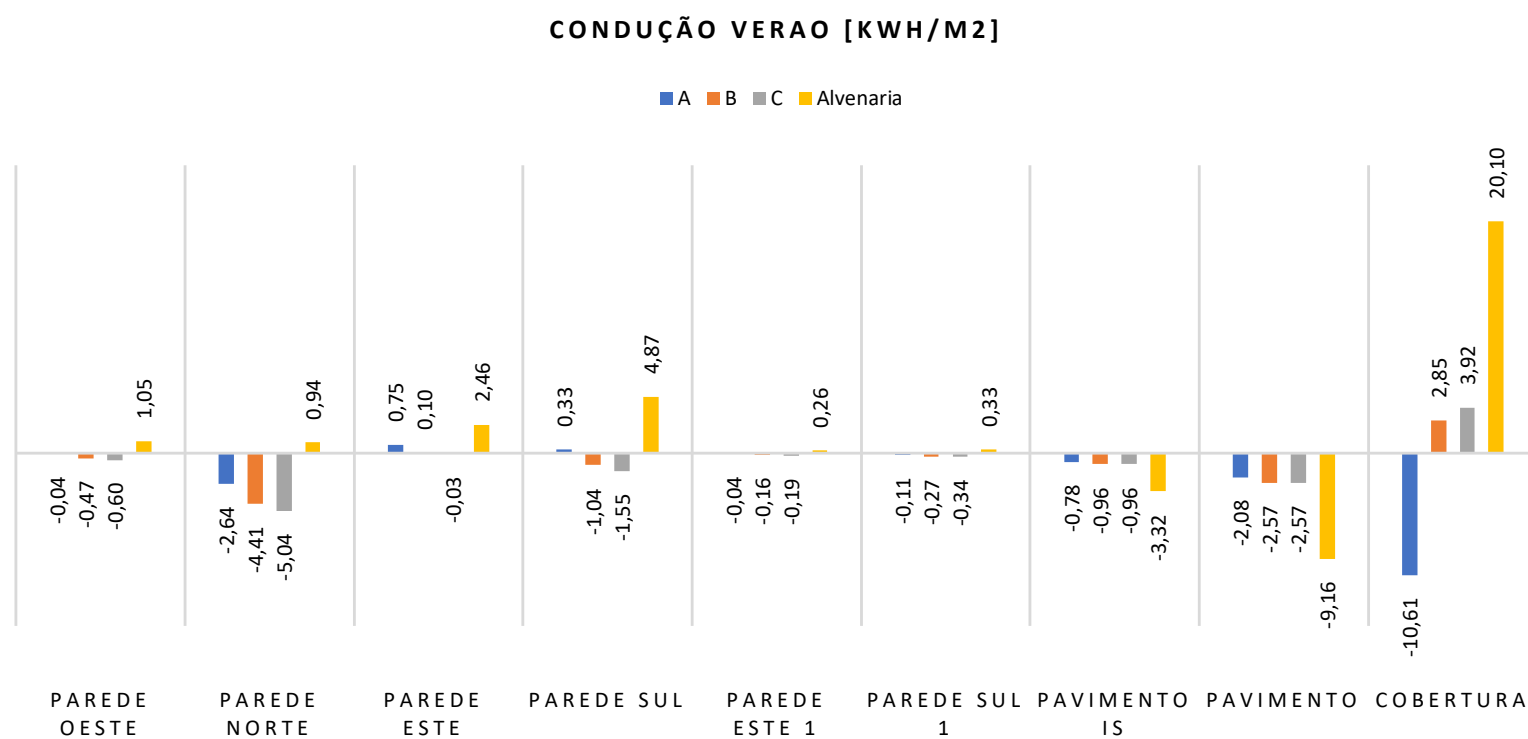


Figura 5.17: Transferências de calor por condução (Caso 2)

A Figura 5.16, apresenta a evolução das necessidades energéticas para cada uma das soluções, em função das temperaturas durante o período de simulação.

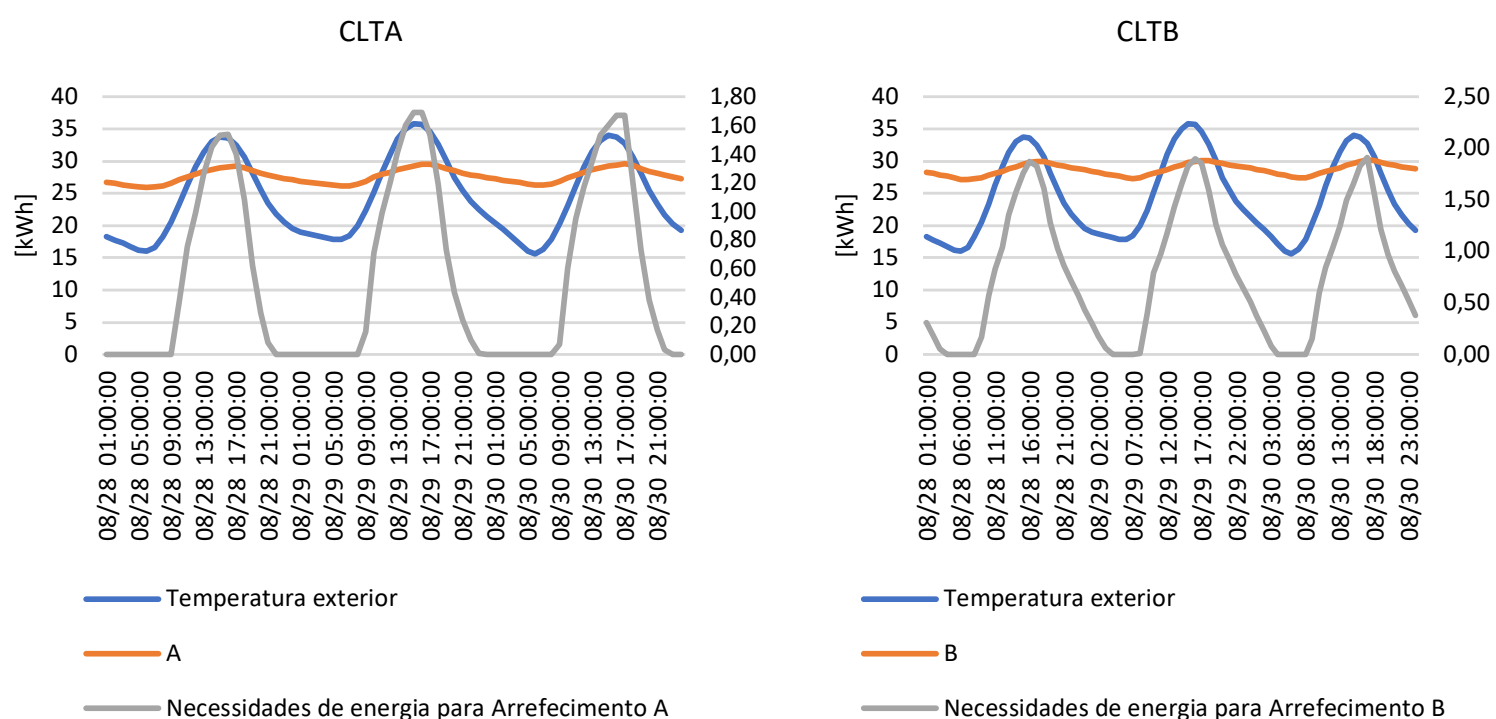


Figura 5.18: Necessidades energéticas de verão soluções CLTA e CLTB (Caso 2)

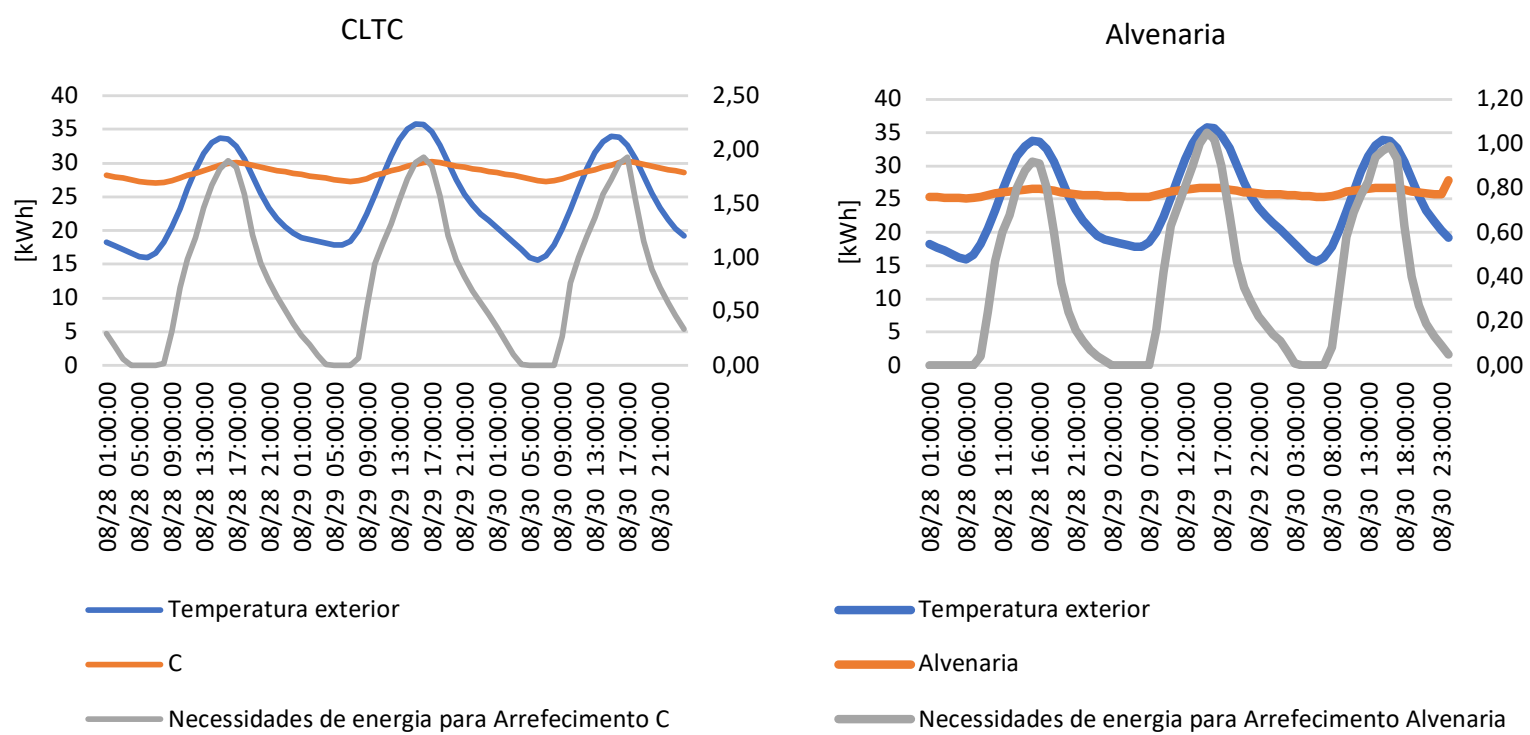


Figura 5.19: Necessidades energéticas de verão soluções CLTC e Alvenaria (Caso 2)

Na Tabela seguinte, apresenta-se um resumo dos balanços energéticos totais através das envolventes opacas e as necessidades de energia para arrefecimento.

Tabela 5.7: Resumo balanço térmico (Caso 2)

	CLTA	CLTB	CLTC	Alvenaria
Balanço térmico envolvente opaca [kWh]	-30,57	-23,45	-23,70	-40,21
Balanço térmico envidraçados [kWh]	66,22	59,44	59,60	75,91
Necessidades de Arrefecimentos	38,16	54,87	56,34	26,93

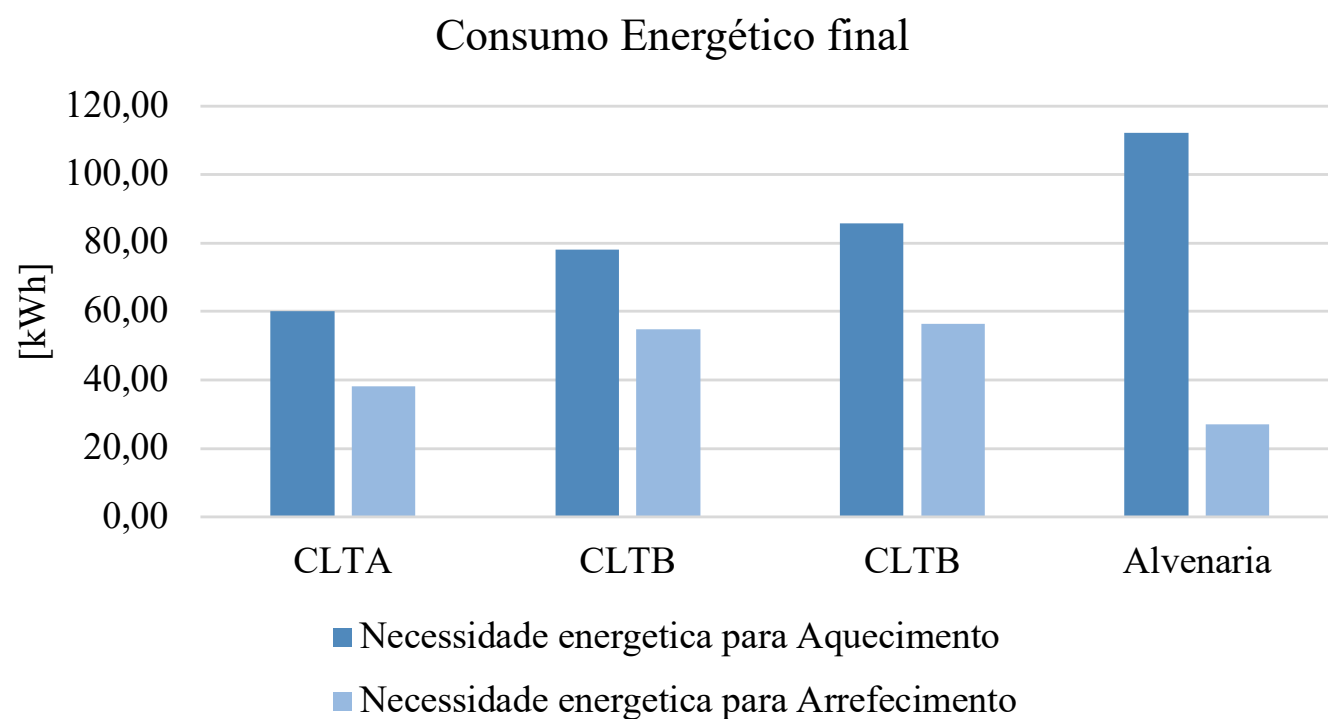


Figura 5.20: Consumos energéticos para estação de Aquecimento e Arrefecimento (Caso 2)

No primeiro caso de estudo, verifica-se praticamente um equilíbrio entre perdas e ganhos térmicos pela envólucro opaca. Neste segundo caso de estudo, devido a existência dos ganhos solares pelos vãos envidraçados, as temperaturas no interior da habitação aumentam, fazendo com à ativação dos dispositivos de arrefecimento ocorressem com mais frequência ao longo do dia.

Como consequência deste aumento da temperatura, as perdas de calor neste caso de estudo superaram em muito as do primeiro, verificando-se assim uma diminuição do balanço energético associado à envólucro opaca. Segundo os resultados obtidos, as soluções CLT apresentaram necessidades de energia para arrefecimento consideravelmente mais altas em relação a solução de Alvenaria.

5.3 Avaliação da influência da renovação de Ar

A ventilação é um parâmetro relevante no período de arrefecimento, principalmente quando se pretende evitar o sobreaquecimento. Como referido no Capítulo 4, para a presente dissertação considerou-se um valor de ventilação constante de 0,6 h⁻¹.

A Figura 5.18, apresenta os ganhos e perdas resultantes da introdução da ventilação no modelo.

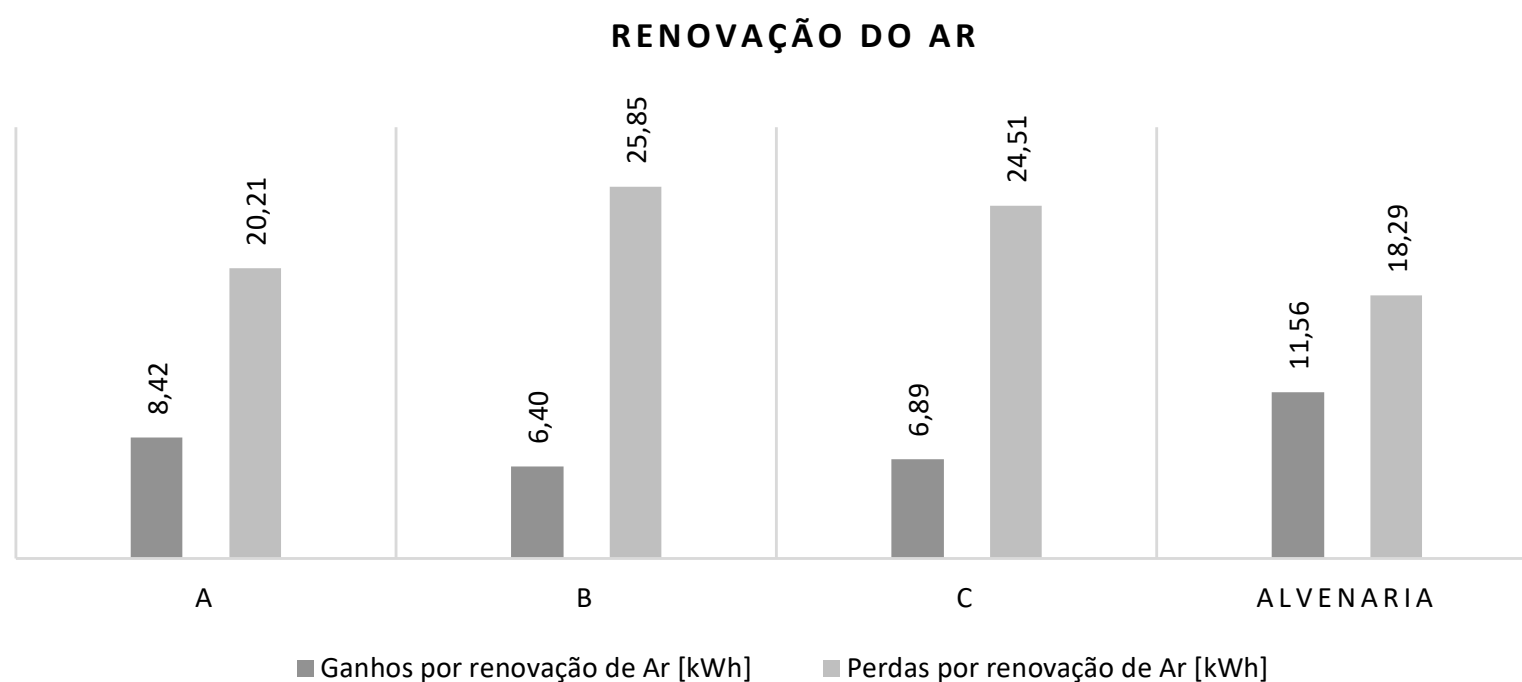


Figura 5.21: Ganhos e perdas por Renovação de Ar

A Figura 5.12, apresenta o calor conduzido pela face interior.

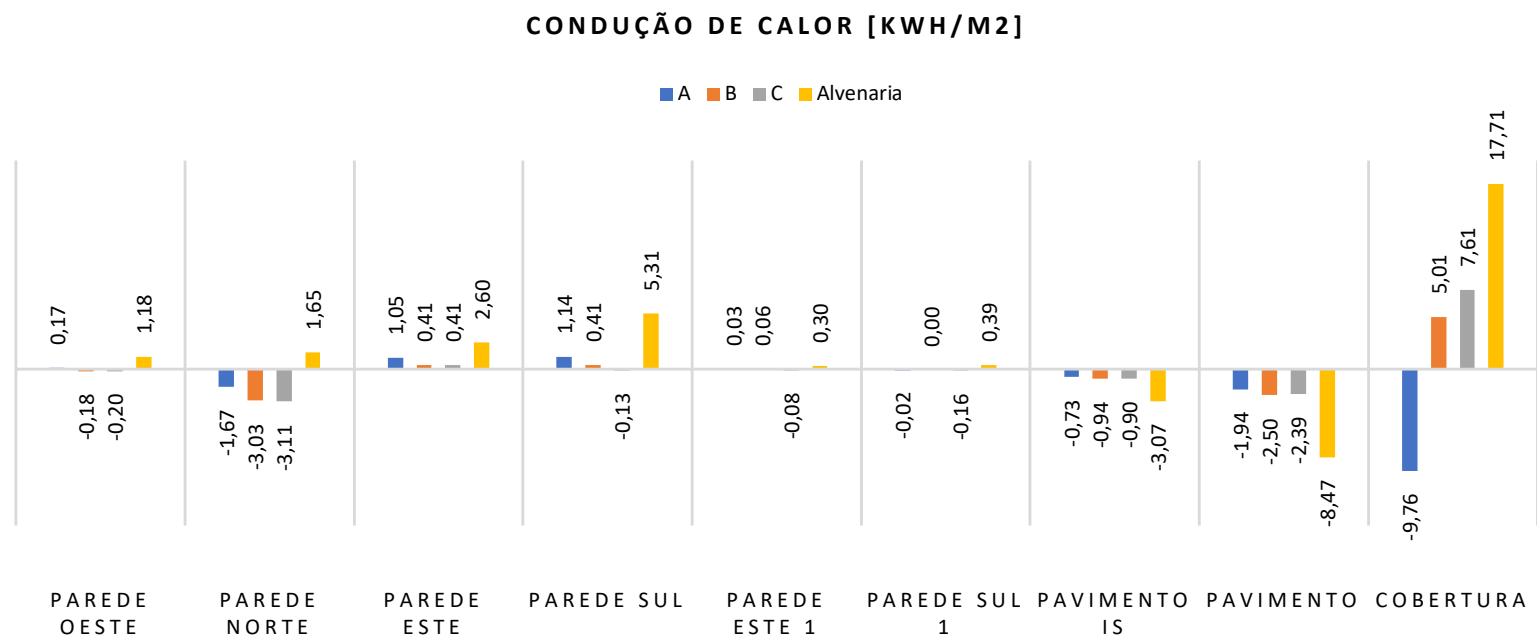


Figura 5.22: Transferências de calor por condução (Caso 3)

A Figura 5.21, apresenta a evolução das temperaturas interiores e exterior durante o período de 28 a 30 de Agosto.

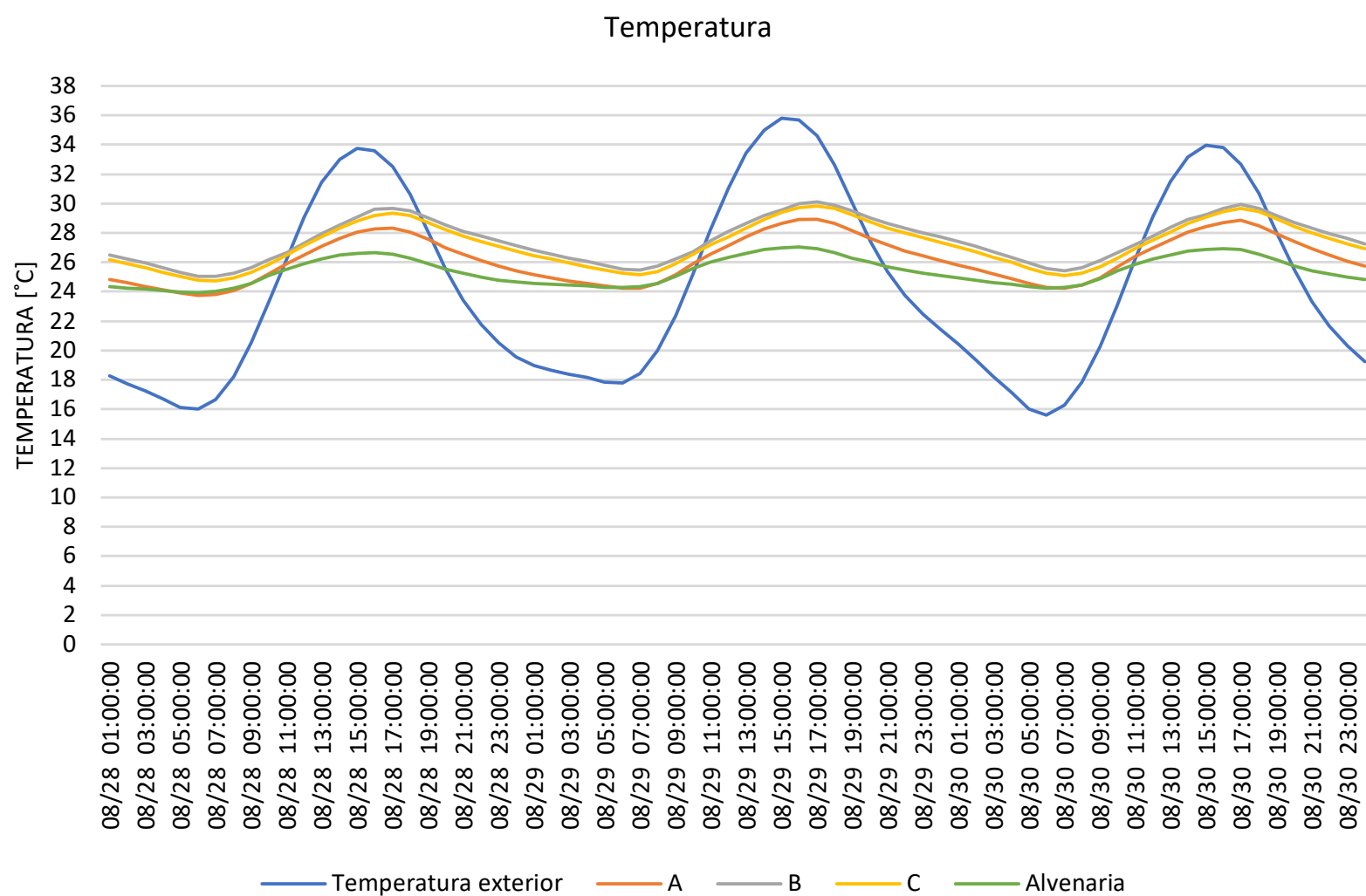


Figura 5.23: Temperaturas no exterior e interior do edifício (Caso 3)

A Figura 5.21, apresenta a evolução das necessidades energéticas para cada uma das soluções, em função da temperatura interior, no período de 28 a 30 de Agosto.

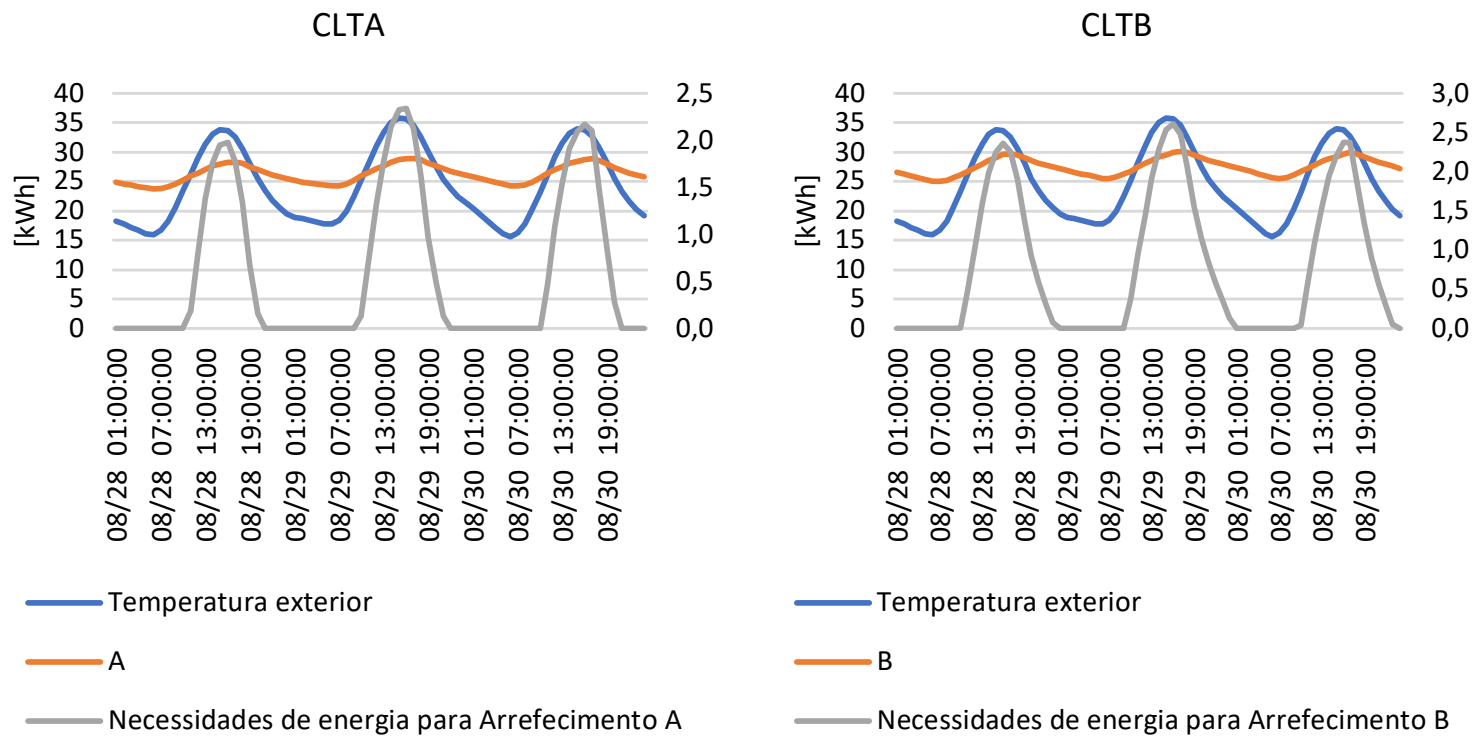


Figura 5.24: Necessidades energéticas de verão soluções CLTA e CLTB (Caso 3)

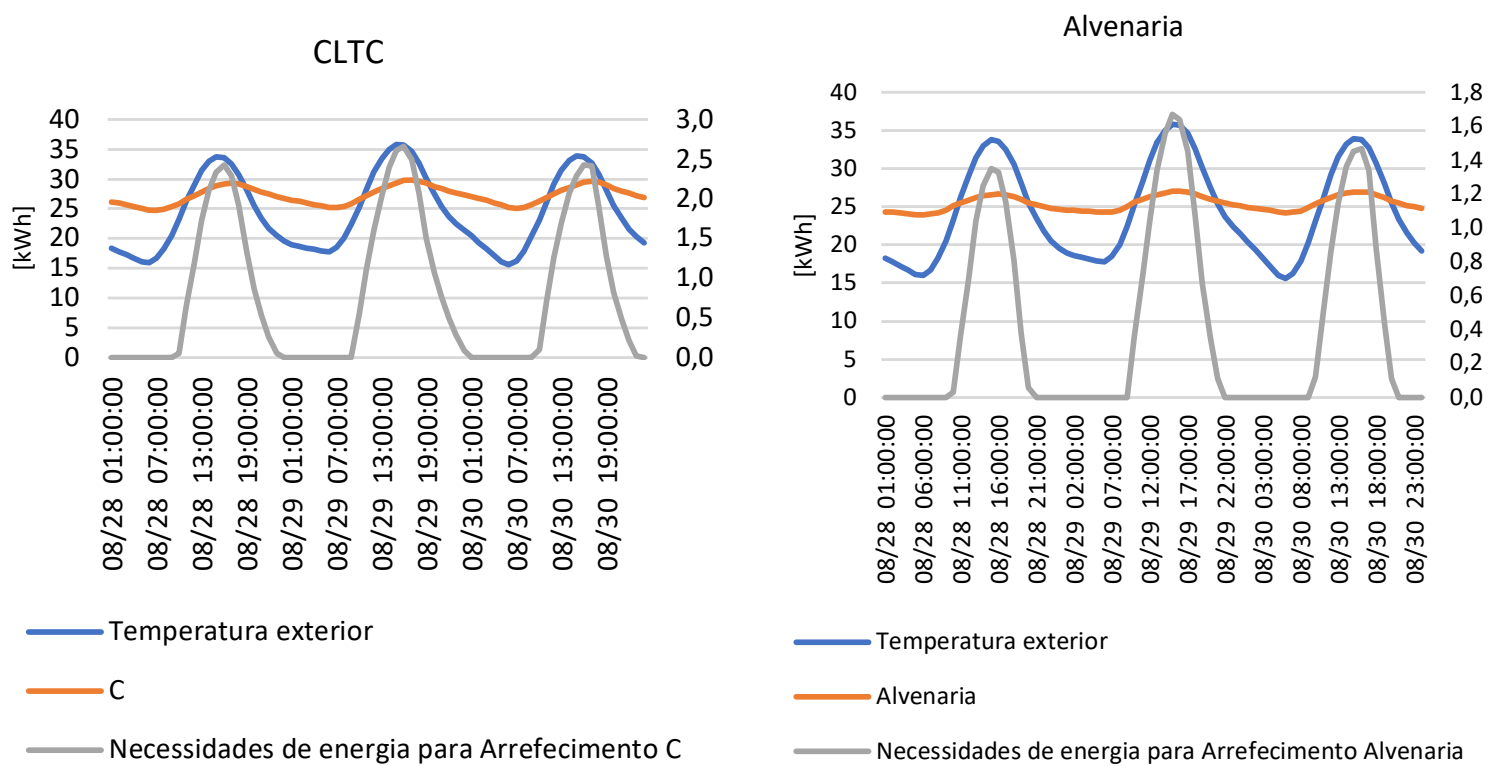


Figura 5.25: Necessidades energéticas de verão soluções CLTC e Alvenaria (Caso 3)

Na Tabela seguinte apresenta-se um resumo dos balanços energéticos totais e as correspondentes necessidades de energia para arrefecimento.

Tabela 5.8 - Balanço térmico total (Caso 3)

	CLTA	CLTB	CLTC	Alvenaria
Balanço energético envolvente opaca [kWh]	-26,16	-16,62	-13,68	-36,09
Balanço energético envidraçados [kWh]	73,60	72,10	67,17	78,51
Balanço energético por ventilação [kWh]	8,42	6,40	6,89	-30,42
Necessidades de Arrefecimentos [kWh]	42,11	55,52	57,13	30,14

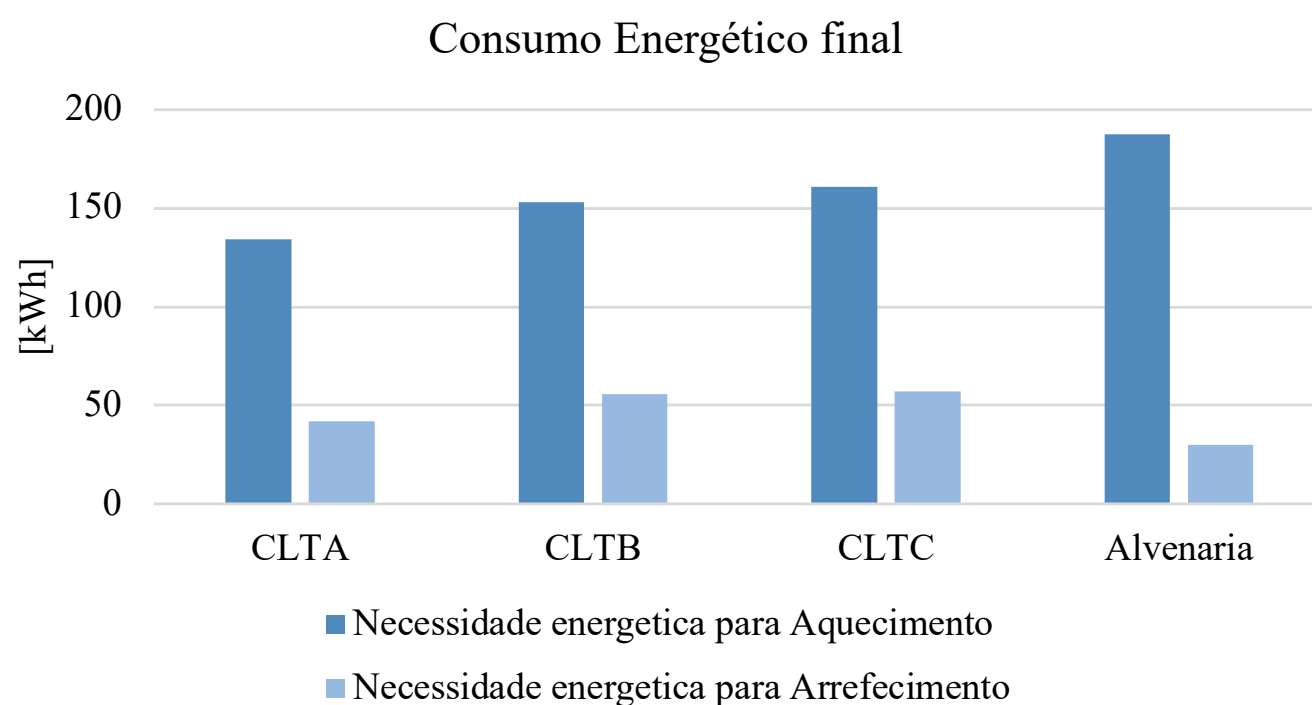


Figura 5.26: Consumos energéticos para estação de Aquecimento e Arrefecimento (Caso 3)

Certamente, é possível observar que as perdas térmicas associadas à ventilação são superiores aos ganhos térmicos, e comparado ao caso de estudo anterior a introdução da ventilação ocasionou redução da temperatura interior em todas as soluções construtivas. Seguramente, isso acontece devido ao fenómeno de “arrefecimento noturno”, que se utiliza das baixas temperaturas noturnas para reduzir a temperatura do ar interior e remover o calor sensível armazenado na massa térmica deixando o ambiente mais agradável.

No que diz respeito as envolventes opacas, verificou-se aumento nos ganhos e perdas por esses elementos, resultando no aumento balanço energético final. Já no caso dos vãos envidraçados, as soluções CLT registaram aumento nos ganhos e redução nas perdas de energia por condução.

5.4 Avaliação da influência dos ganhos internos

A introdução dos ganhos internos, faz com que este caso de estudo se assemelhe mais as condições reais de funcionamento de um edifício, permitindo uma análise mais completa do modelo e das suas condições de funcionamento.

Na Figura 5.24 é apresentada a energia sob forma de calor que é conduzida pela face interior.

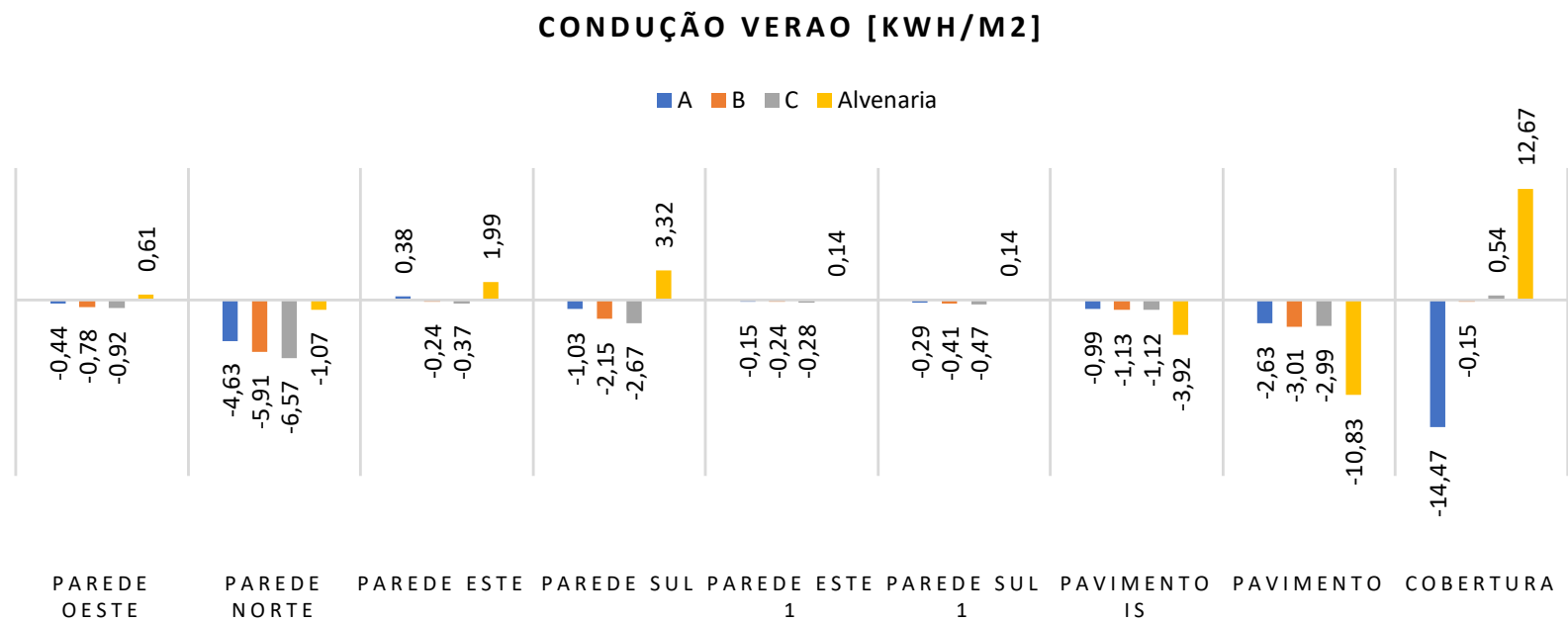


Figura 5.27: Transferências de calor por condução (Caso 4)

A Figura 5.25, apresenta a evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período de 28 a 30 de Agosto, quando são introduzidos os ganhos internos.

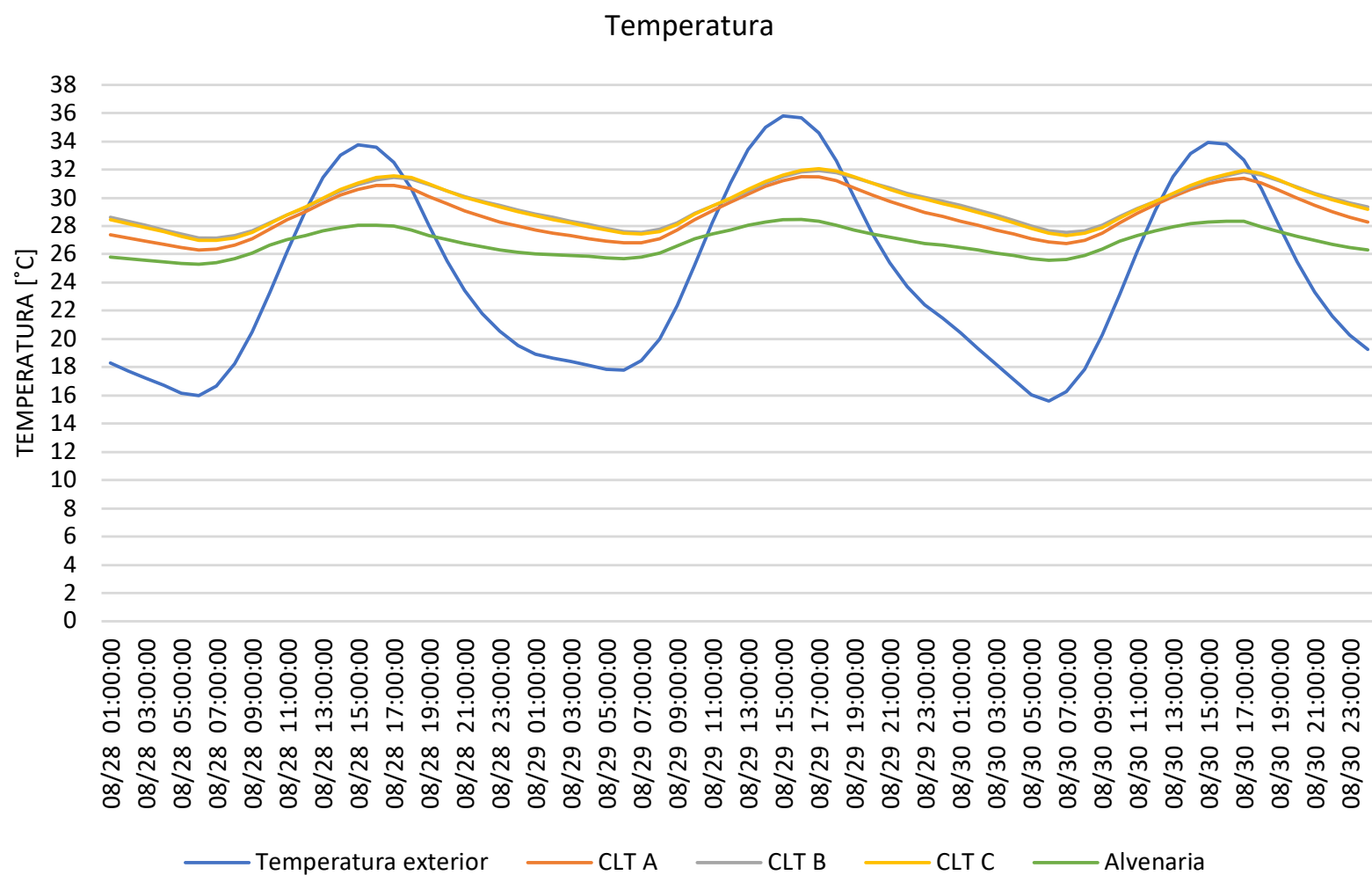


Figura 5.28: Temperaturas no exterior e interior do edifício (Caso 4)

Na Tabela 5.9, tem-se um resumo dos balanços energéticos totais e as correspondentes necessidades de energia para arrefecimento.

Tabela 5.9: Balanço térmico total (Caso 4)

	CLTA	CLTB	CLTC	Alvenaria
Balanço energético envolvente opaca [kWh]	-43,85	-33,92	-34,55	-66,88
Balanço energético envidraçados [kWh]	60,48	55,07	55,40	71,90
Balanço energético por ventilação [kWh]	-27,21	-31,50	-31,18	-15,52
Ganhos internos [kWh]	46,96	46,96	46,96	46,96
Necessidades de Arrefecimentos [kWh]	80,12	102,06	103,45	64,12

Com o aumento da resistência térmica das envolventes, as trocas entre o ambiente interior e o ambiente exterior diminuem. Esta restrição, faz com que a energia resultante da radiação solar incidente e os ganhos internos gerados no interior do edifício, acumulem-se na zona térmica, gerando aumento das temperaturas interiores.

Como se pode observar nas curvas da Figura 5.26, os 46,96 kWh resultantes dos ganhos internos, potencializaram o aumento das temperaturas e geraram aumento nos consumos energéticos.

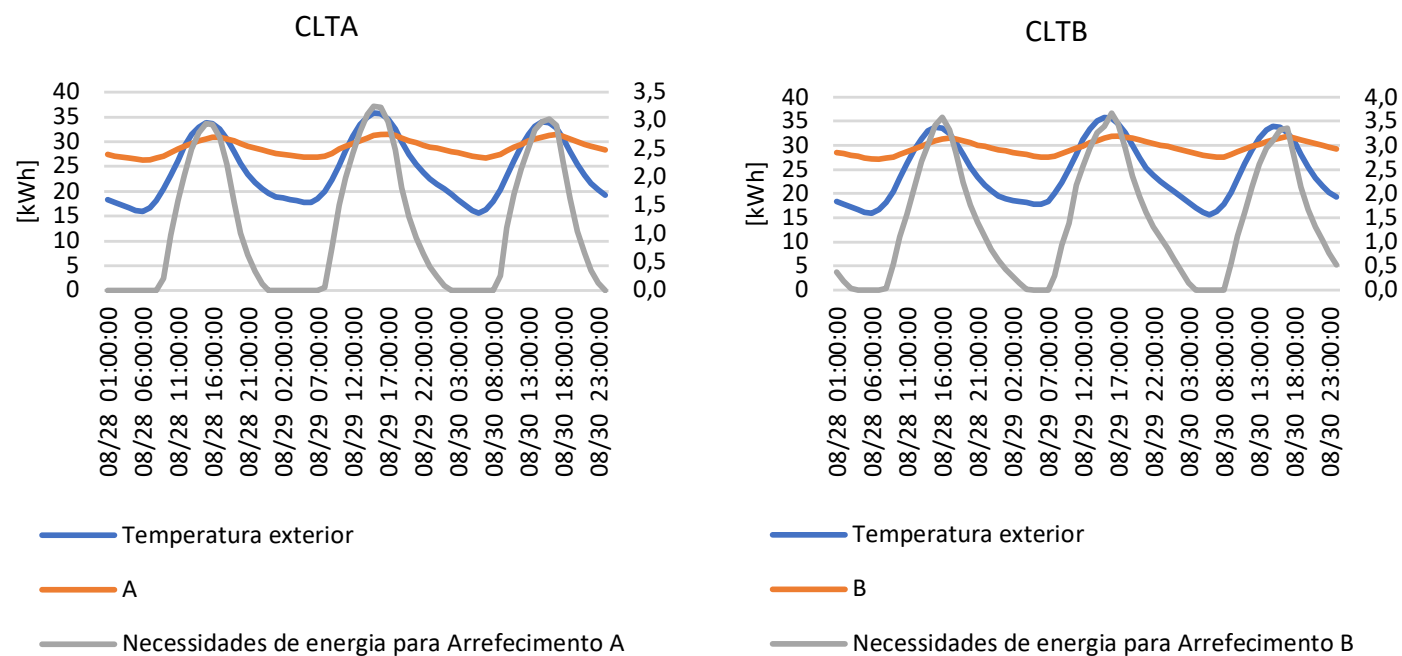


Figura 5.29: Necessidades energéticas de verão soluções CLTA e CLTB (Caso 4)

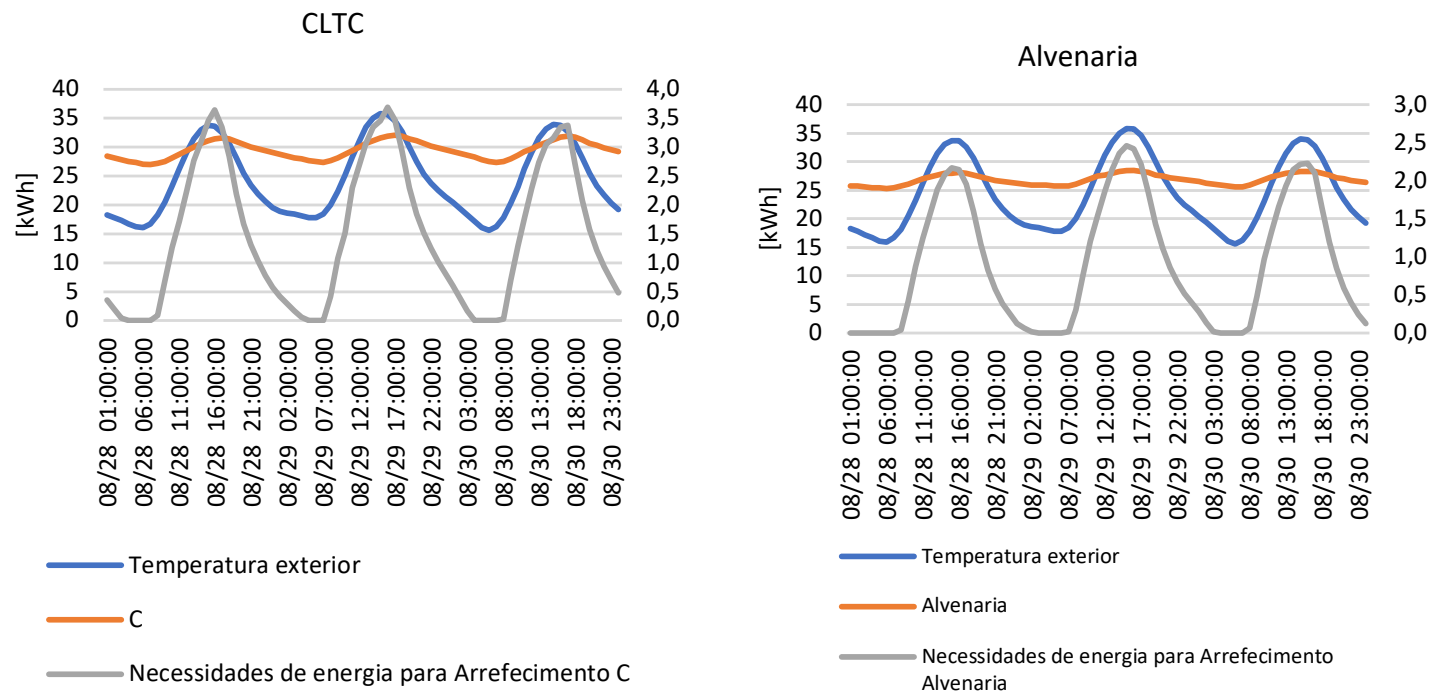


Figura 5.30: Necessidades energéticas de verão soluções CLTC e Alvenaria (Caso 4)

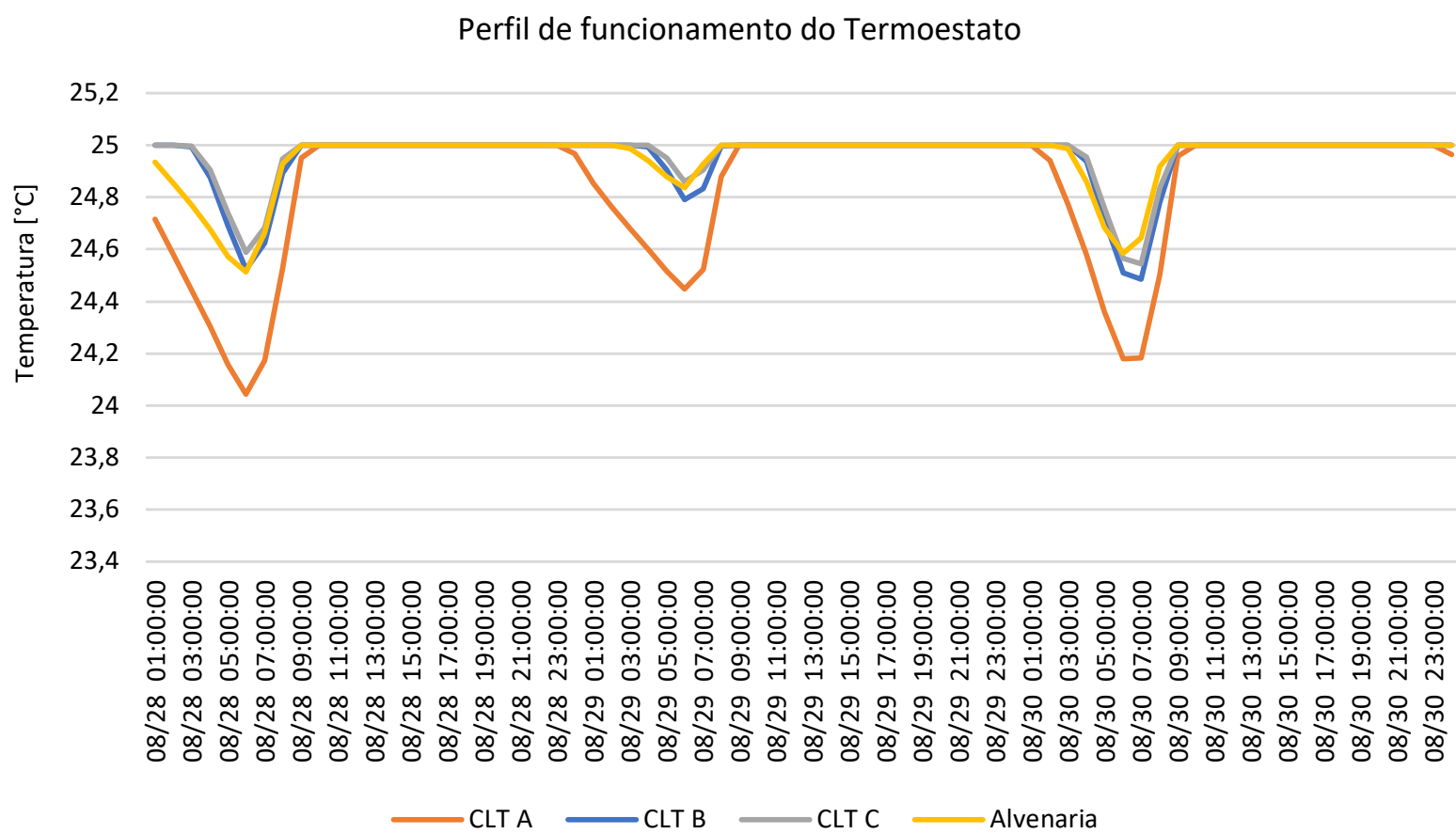


Figura 5.31: Perfil de funcionamento do termostato durante o período de simulação

A Figura 5.28, apresenta as perdas térmicas gerais em cada uma das soluções analisadas.

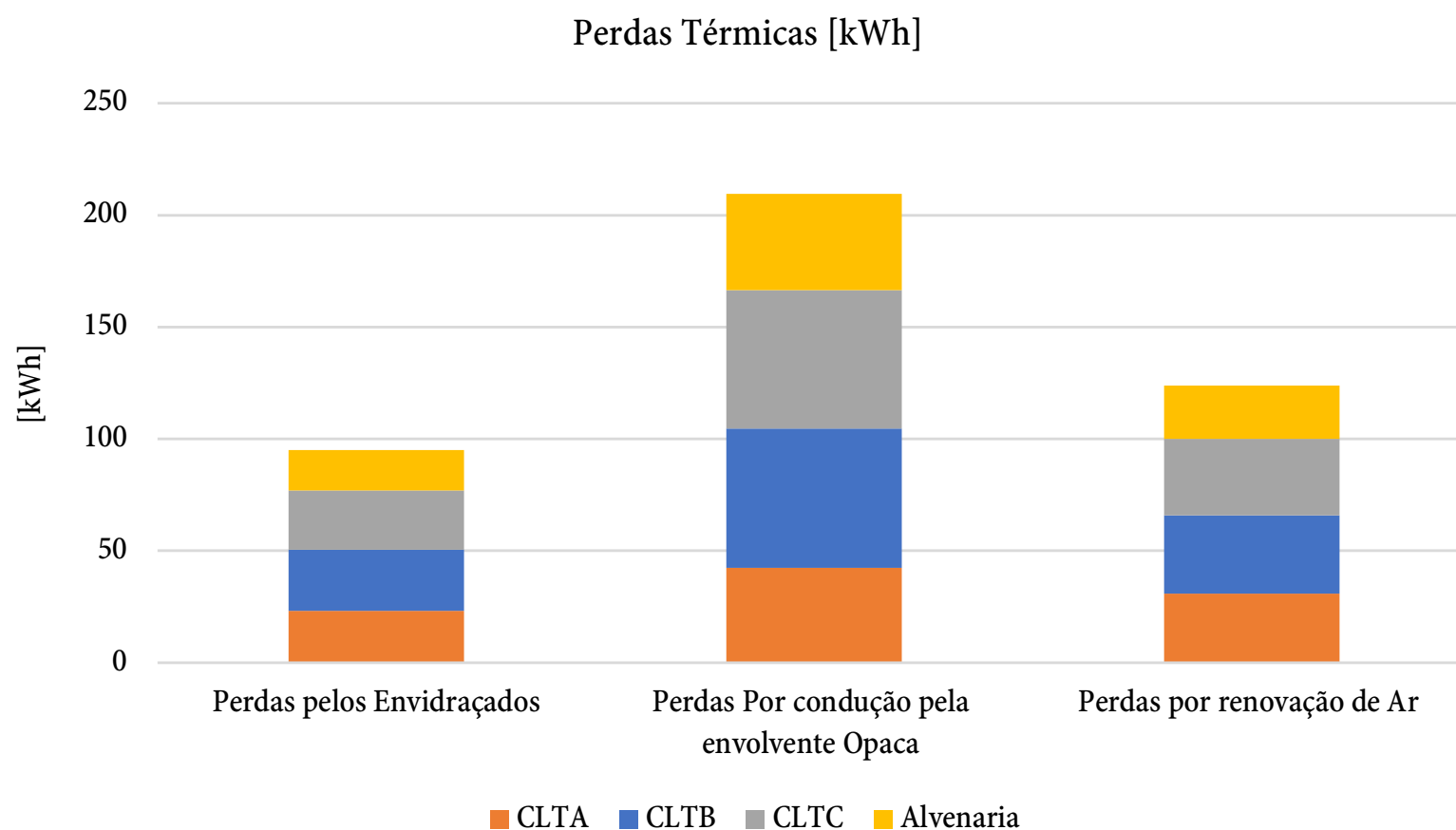


Figura 5.32: Perdas térmicas no edifício

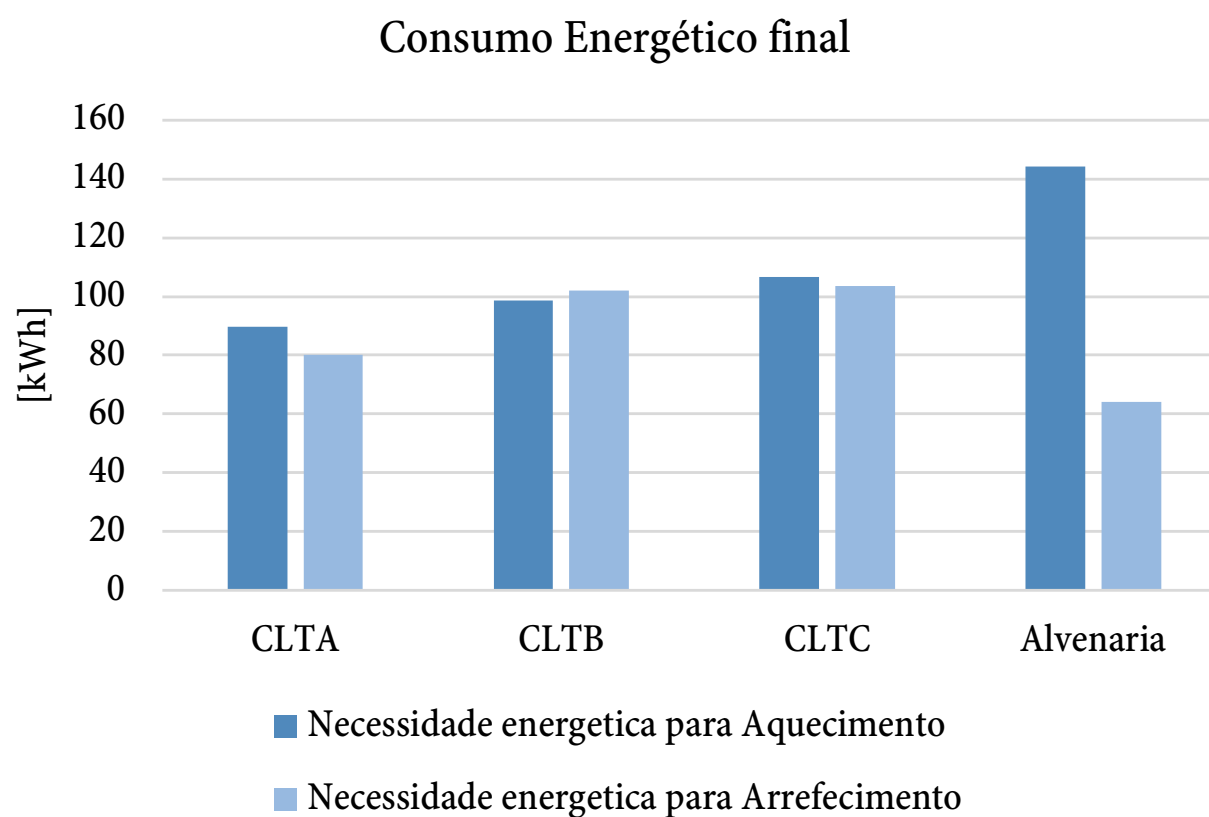


Figura 5.33: Consumos energéticos para estação de Aquecimento e Arrefecimento (Caso 4)

Como esperado, a introdução dos ganhos internos geraram aumento das temperaturas interiores, e fizeram com que as perdas por condução pelas envolventes opacas também aumentassem significativamente (Figura 48). E, como consequência disso os balanços energéticos finais associados a envolvente opacas, vãos envidraçados e ventilação são diretamente afetados, gerando um aumento nas necessidades energéticas finais do edifício como mostra a Tabela 5.9 e a Figura 5.29.

5.5 Alteração da localização do edifício: Faro

Sem dúvidas que, a localização do edifício é um dos fatores mais importantes na escolha das soluções construtivas a aplicar, já que alguns sistemas construtivos quando aplicados em determinados climas podem desenvolver anomalias difíceis de resolver, gerando custos e desconforto para os ocupantes.

Para esta fase de avaliação, é seguida uma abordagem semelhante à do último caso de estudo de Lisboa, em que se levou em conta o efeito das envolventes, dos envidraçados, da ventilação e dos ganhos internos. A análise consistiu em usar as mesmas soluções construtivas e metodologia de trabalho, tendo como fator de alteração a localização do edifício.

Neste seguimento, apresenta-se na Figura 5.30, a radiação incidente em cada elemento construtivo.

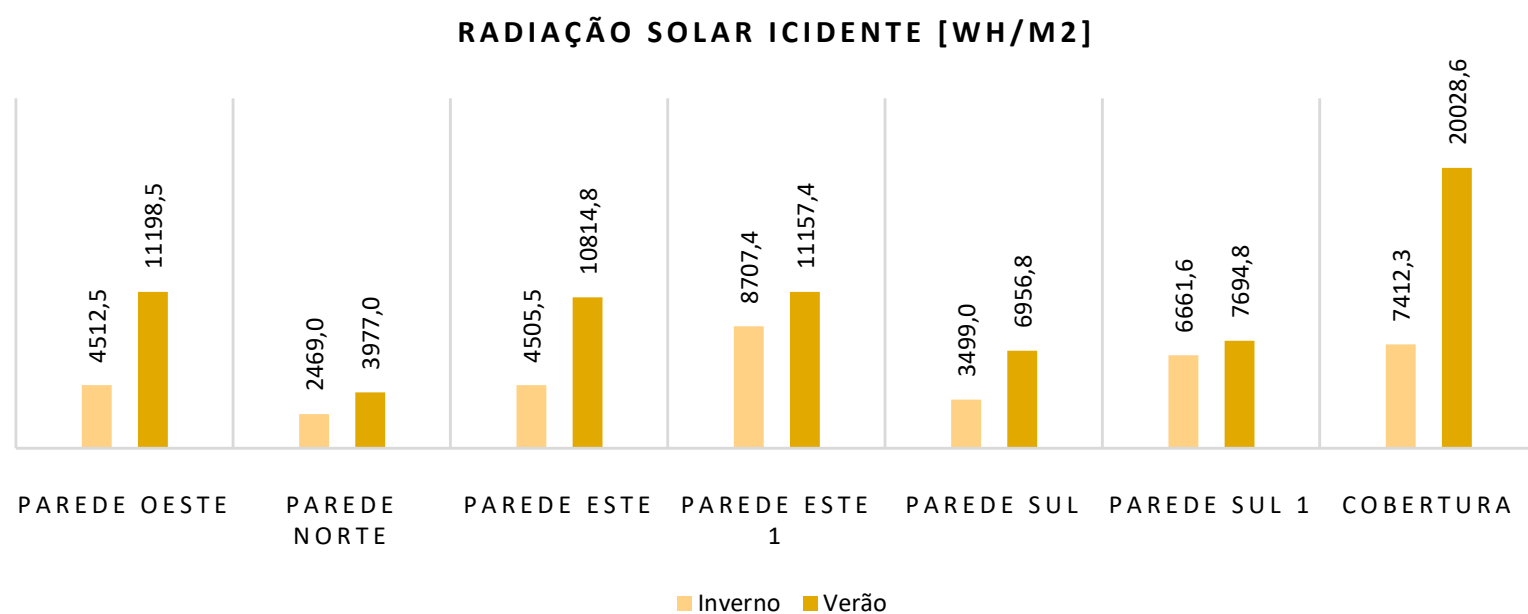


Figura 5.34: Radiação solar incidente sobre cada elemento expresso em Wh/m² (Faro)

A seguir, é apresentado o calor transferido por condução através da face interior.

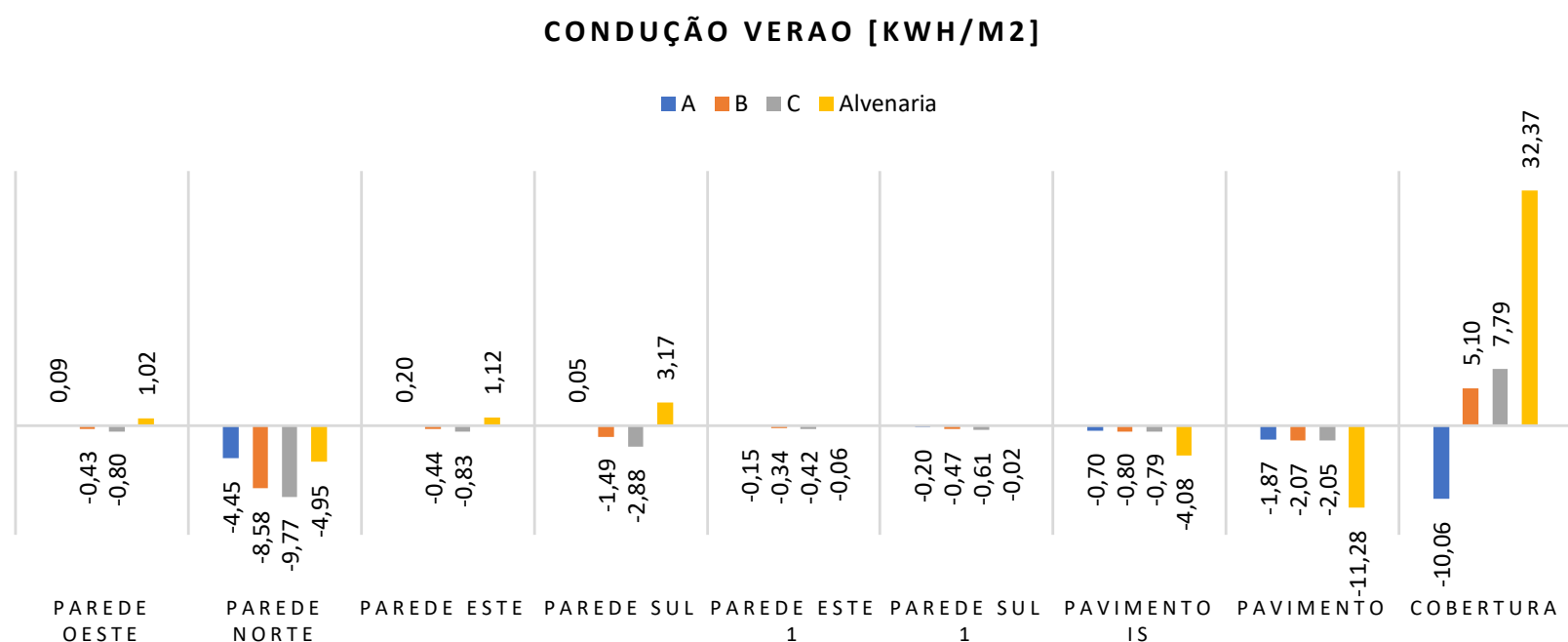


Figura 5.35: Transferências de calor por condução (Faro)

A Figura 5.32, apresenta a evolução das curvas de temperaturas no período de 28 a 30 de Agosto.

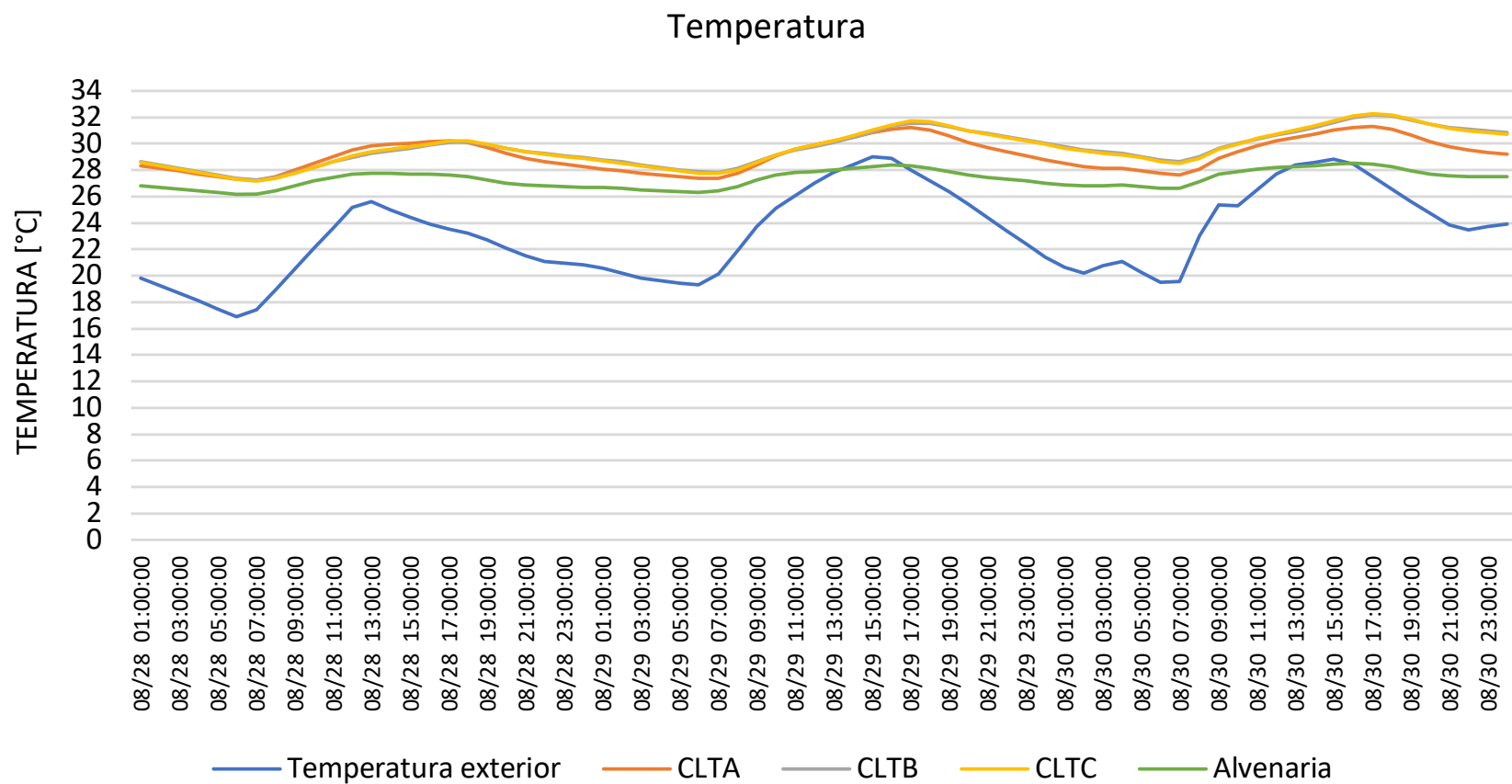


Figura 5.36: Temperaturas no exterior e interior do edifício (Faro)

A Figura 5.33, apresenta a evolução das necessidades energéticas para cada uma das soluções, em função da temperatura interior, no período de 28 a 30 de Agosto.

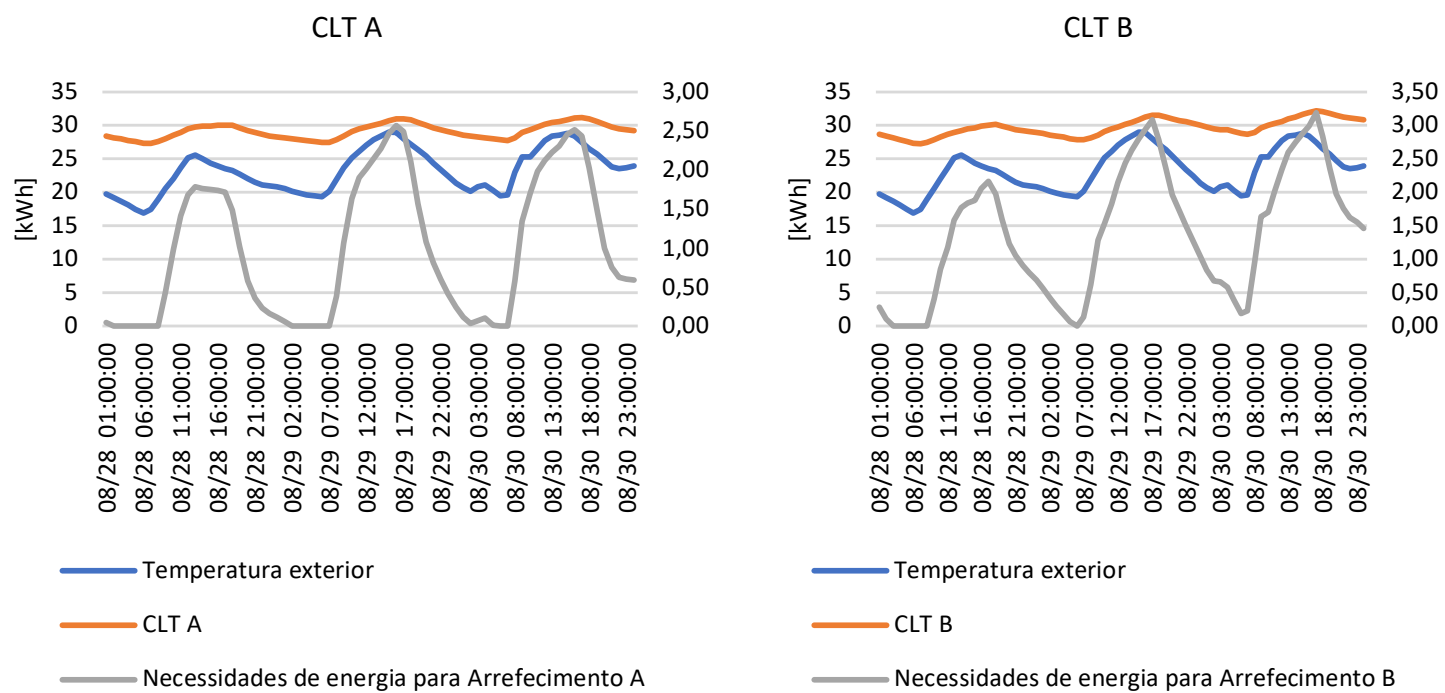


Figura 5.37: Necessidades energéticas de verão soluções CLTA e CLTB (Faro)

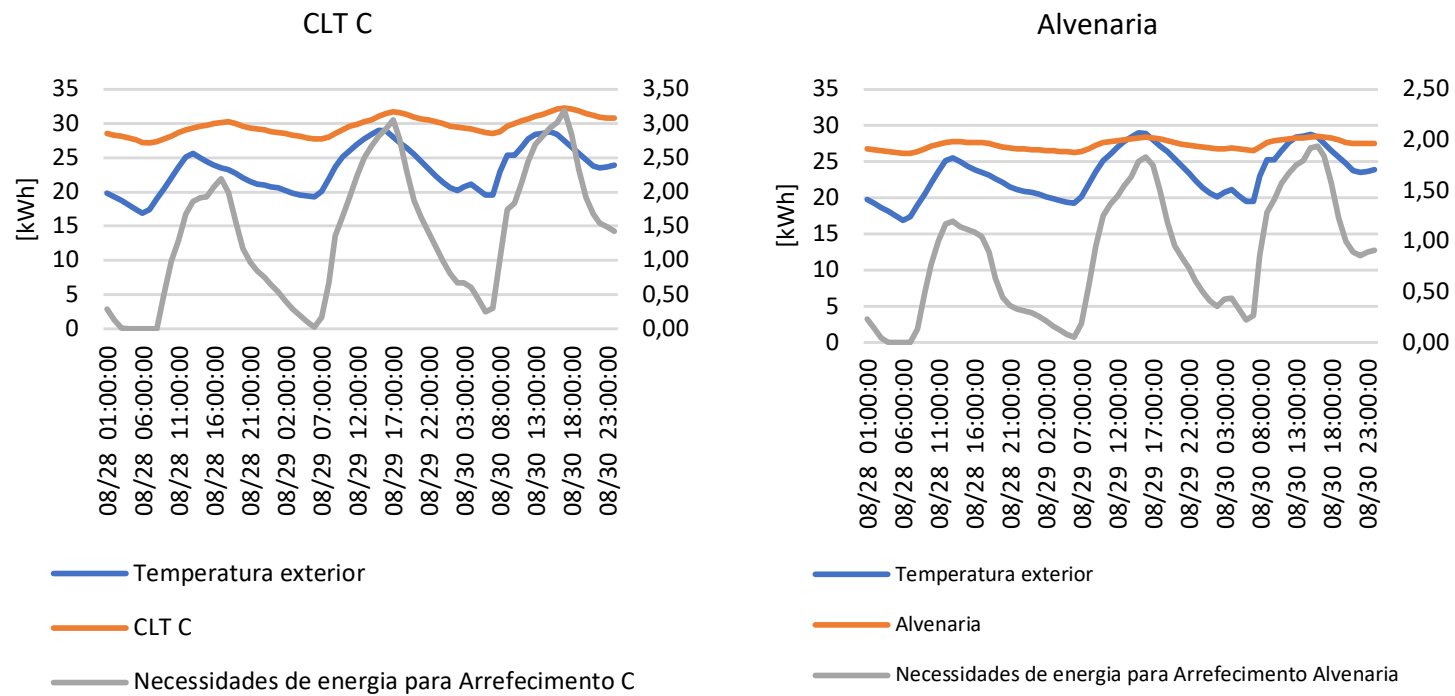


Figura 5.38: Necessidades energéticas de verão soluções CLTC e Alvenaria (Faro)

Na Tabela seguinte apresenta-se um resumo dos balanços energéticos totais e as correspondentes necessidades de energia para arrefecimento.

Tabela 5.10: Balanço térmico total (Faro)

	CLTA	CLTB	CLTC	Alvenaria
Balanço térmico envolvente opaca [kWh]	-31,22	-23,27	-23,61	-52,37
Balanço térmico envidraçados [kWh]	59,99	56,18	56,26	70,28
Balanço térmico por Ventilação [kWh]	-36,5	-39,65	-39,56	-25,32
Ganhos internos [kWh]	46,96	46,96	46,96	46,96
Necessidades de Arrefecimentos [kWh]	70,11	98,1	99,31	60,24

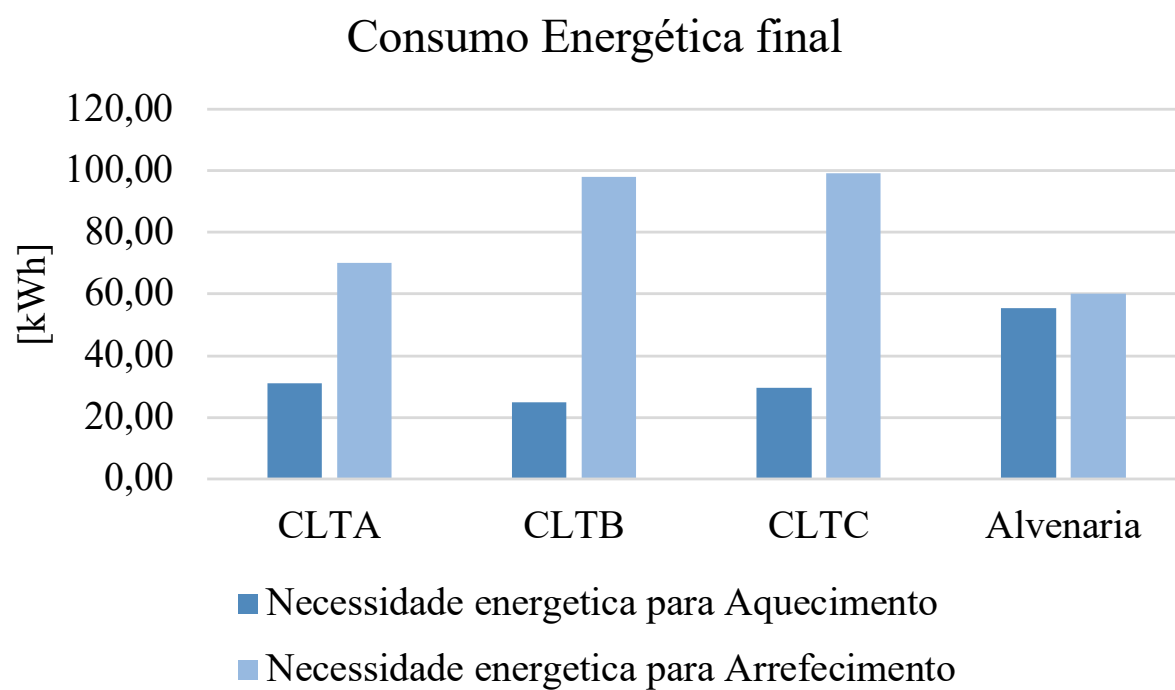


Figura 5.39: Consumos energéticos para estação de Aquecimento e Arrefecimento (Faro)

Segundo o zonamento climático feito, Faro e Lisboa apresentam zonas climáticas iguais e valores idênticos de temperatura média exterior.

Quanto a radiação solar incidente (Figura 5.30), tem-se que a cobertura é o elemento que recebe maior radiação solar ao longo do período de Arrefecimento, tanto que todas as soluções apresentaram ganhos de calor por este elemento, com exceção da solução CLTA (Figura 5.31). Em relação as envoltentes verticais, as paredes orientadas a Oeste, Este e Sul recebem mais radiação solar incidente, pelo que também foram nestas orientações onde as soluções CLTA e Alvenaria registaram transferências de calor para o ambiente interior.

As paredes Este 1 e Sul 1, por fazerem parte da reentrância do edifício e formarem uma zona com alguma sombra, todas as soluções apresentaram perdas de calor por esses dois elementos.

Apesar da semelhança no zonamento climático, o facto da densidade urbana em Faro ser menor que em Lisboa, contribui para o aumento da autorregulação térmica do edifício. Situação que leva ao aumento das perdas de calor no verão e redução das perdas de calor no inverno, resultando em menos necessidades energéticas nos dois períodos (Figura 5.34).

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal a avaliar comportamento térmico de verão de uma moradia unifamiliar construída com Madeira Laminada Cruzada (Cross Laminated Timber), através da simulação dinâmica computacional.

Com os resultados obtidos pretendeu-se aumentar o conhecimento existente sobre as condições ambientes no interior de edifícios habitacionais construídos em CLT no período de arrefecimento, face a construção em Alvenaria corrente, através das temperaturas interiores e estimativa da inércia térmica (coeficientes de amortecimento e atraso térmico) de acordo com os critérios de conforto térmico indicados nos regulamentos nacionais.

Deste modo, foram alcançados sucessivamente todos os objetivos propostos, o que permitiu tirar as seguintes conclusões:

- Os coeficientes de transmissão térmica em cada uma das soluções, traduziu claramente a quantidade de energia sob a forma de calor que atravessava as envolventes, sendo que a pouca diferença entre os U das soluções CLTB e CLTC, refletiu na similaridade nos resultados.
- As temperaturas médias interiores variaram entre os 26,86 °C e os 29,51 °C para Lisboa, e entre os 27,32 °C e os 29,66 °C para Faro. Salientando-se que antes da implementação das palas de sombreamento estas temperaturas chegaram a atingir valores acima dos 30°C.
- O amortecimento e o atraso térmico demonstraram ser fundamentais na estimativa da inércia térmica, apresentando de forma simplificada a interação das diferentes soluções construtivas com o ambiente externo face as ondas de calor.
- Apesar das soluções de madeira laminada cruzada, apresentarem excelente desempenho térmico no inverno, durante o verão estas soluções mostraram-se mais propensas ao sobreaquecimento.
- A alteração da localização poderia ter sido mais interessante caso as zonas climáticas fossem mais distintas, o que não é o caso de Lisboa e Faro. Mas ainda assim, foi possível observar as algumas diferenças, na forma como as soluções construtivas respondiam, as condições climáticas de cada região.

6.1 Desenvolvimentos Futuros

Apesar do EnergyPlus ser uma ferramenta eficiente e possibilitar um estudo bastante aprofundado do comportamento térmico dos edifícios, seria interessante desenvolver futuramente um estudo com medições “in situ” de forma a se ter uma análise realista das temperaturas interiores, humidades relativas, necessidades energéticas, eficiência dos sistemas de climatização e das condições de conforto proporcionadas pelos diferentes sistemas construtivos.

Propõe-se também a comparação entre diferentes ficheiros climáticos com exigências regulamentares diferentes, como um meio de otimizar soluções construtivas e determinar efetivamente o nível de sustentabilidade e eficiência da aplicação do CLT no meio ambiente.



7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] European Commission. (2020). *Construction Sector*. Acesso: Fev, 2021. [Online]. Disponível em: https://ec.europa.eu/growth/sectors/construction_en
- [2] Portal de Laboratórios Virtuais de Processos Químicos. *Transferência de Calor*. Acesso: Fev 2021. [Online]. Disponível em: http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=248&Itemid=422
- [3] Henriques, F. M. A. (2016), *Comportamento Higrotérmico de Edifícios* [versão PDF].
- [4] LNEC (2004). *Definições de espaços e de áreas utilizados na Ficha Técnica da Habitação*. [Online]. *Memorando*, pp.1.
- [5] Aelenei, D. (2016). *REH Light - Manual de apoio á aplicação de regulamentação referente ao comportamento térmico de edifícios de habitação*. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciência e Tecnologia - UNL. Acesso: Mar, 2021
- [6] Silva, P. C. P. (2006). *Análise do Comportamento Térmico de Construções não Convencionais através de Simulação em VisualDOE*. (Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade do Minho). pp. 50.
- [7] Gonçalves, Hélder; Graça, João M. (2004), *Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal* [versão PDF].
- [8] Australian government. (2020). *Thermal Mass* Acesso: 2021. [online]. <https://www.yourhome.gov.au/passive-design/thermal-mass>
- [9] Sinduscon. (2019). Balanço Energético [PNG]. Disponível em: <https://www.guiaenergiaedificacoes.com.br/conceitos/envoltoria/>
- [10] Richards Partington Architects. (2012). *Understanding overheating where to start*. NHBC Foundation Publications. Acesso: 27, Dez, 2021.

- [11] Câmara Municipal de Lisboa. (2019). *Projeto ondas de calor*. Acesso: Dezembro, 2022. [Online]. <https://www.lisboa.pt/cidade/ambiente/alteracoes-climaticas/ondas-de-calor>
- [12] Decreto-Lei nº 80/2006, “Desempenho Energético dos Edifícios,” *Diário da República, 1ª série - A. 4 Abril, 2004*.
- [13] Decreto-Lei nº 101- D/2020, “Estabelece os requisitos aplicáveis à conceção e renovação de edifícios com o objetivo de assegurar e promover a melhoria do respetivo desempenho energético e regular o SCE”, *Diário da República 1ª. série, 7 dezembro, 2020*.
- [14] NC State Extension Publications. (2018). *Mass Timber Products: Innovative Wood-Based Building Materials*. Acesso: Ma, 2021. [Online]. Disponível em: <https://content.ces.ncsu.edu/mass-timber-products-innovative-wood-based-building-materials>
- [15] Housing Evolutions. Edifício madeira laminada cruzada, Hoho Wien. [PNG]. Disponível em: <https://www.housingevolutions.eu/project/hoho-wien-the-worlds-tallest-wooden-high-rise/>
- [16] Arch Daily. (2021). Edifício madeira laminada cruzada, Escola Red bridge. [PNG]. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/935449/escola-redbridge-arx-portugal-arquitetos>
- [17] Swedich Wood. (2017). Edifício T3. [PNG]. Disponível em: <https://www.swedishwood.com/publications/wood-magazine/2017-1/michael-green-a-challenger-in-the-usa/>
- [18] Arquitetura Viva (AV). (2022). Svartlamoen Housing. [PNG]. Disponível em: <https://arquitecturaviva.com/works/viviendas-en-svartlamoen-trondheim->
- [19] Raidhse Life. (2020). Mjøstårnet building. [PNG]. Disponível em: <https://raidhselife.com/cross-laminated-timber/>
- [20] Carpinteria. (2018). *Madeira laminada colada cruzada (CLT): Produção e desenvolvimento*. Acesso: Mar, 2021. [Online]. Disponível em: <https://carpinteria.com.br/2018/04/08/madeira-laminada-cruzada-clt/>.
- [21] Crosslam. (2020). *Cross laminated timber: Informações técnicas*. Acesso: Mar, 2021. [Online]. Disponível em: <https://www.crosslam.com.br/site/> .
- [22] Herron, Dale; Walton, George; Lawrie, L. (1981). Building Loads Analysis and System Thermodynamics (BLAST). *Program user's Manual*, vol. 1.
- [23] Haves, P., Ravache, B., Fergadiotti, Andres., Kohler, C., Yazdanian, M., et al. (2019). *Accuracy of HVAC Load Predictions: Validation of EnergyPlus and DOE-2 using FLEXLAB Measurements*.
- [24] Energy.Gov. ASHRAE Standard 140 Maintenance and Development. <https://www.energy.gov/eere/buildings/ashrae-standard-140-maintenance-and-development>

[25] Laboratório Nacional Lawrence Berkeley. *Diagrama Energyplus*. Energyplus Documentation (Engineering Reference), pp 11.

[26] Energyplus (2021). Acesso: Mar, 2021. [Online]. Disponível em: <https://energyplus.net/>

[27] Guia SCE – Parâmetros de Cálculo Parâmetros de Cálculo, março 2020, Direção geral da energia e geologia

[28] Adene. *Manual Técnico para a Avaliação do Desempenho Energético dos Edifícios*. Manual SCE. Acesso: Março, 2021.

[29] Pinto, C. I. R. C. (2014). *Introdução às coberturas ajardinadas*. (Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto). Acesso: Abril, 2022.

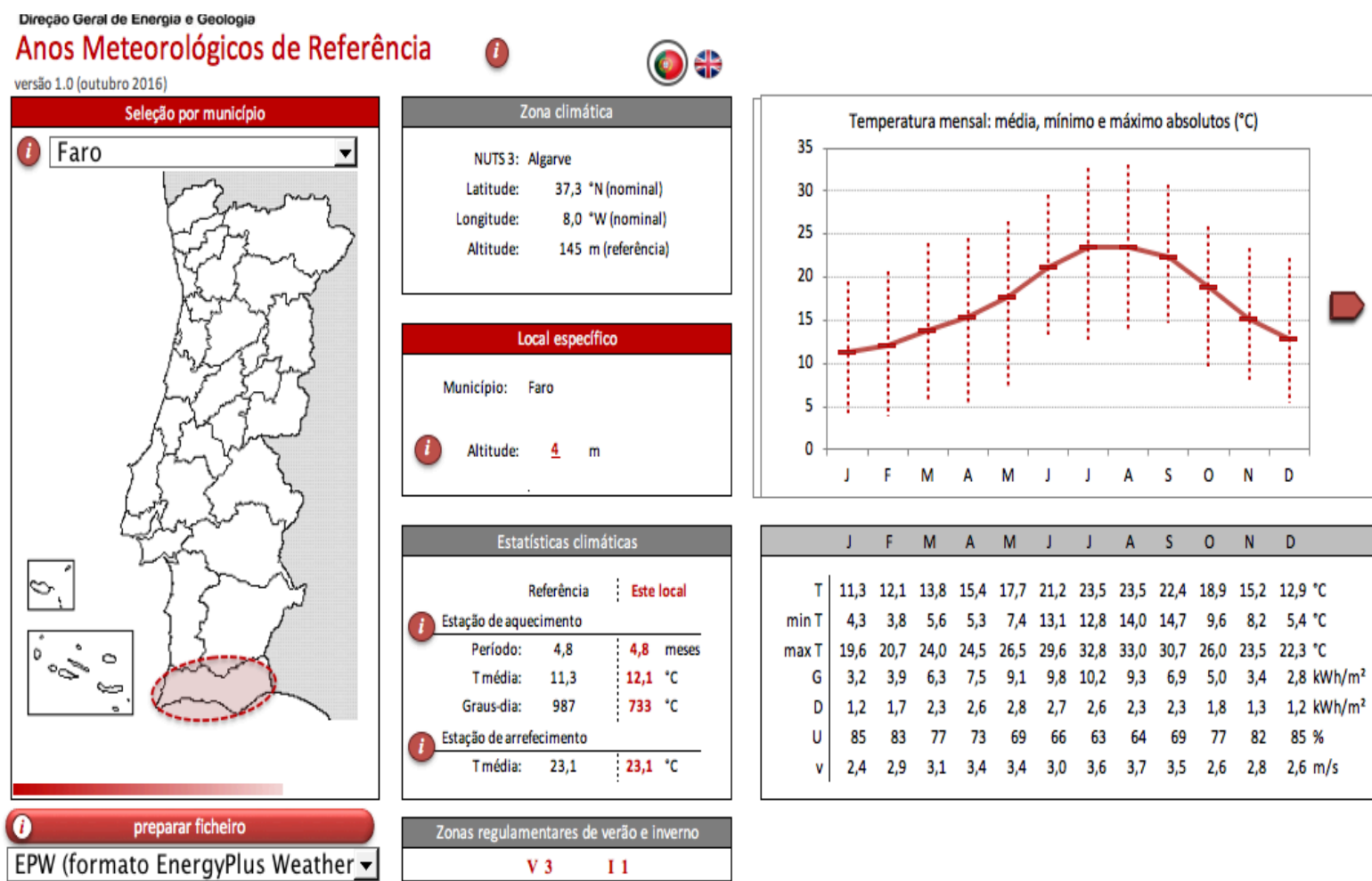
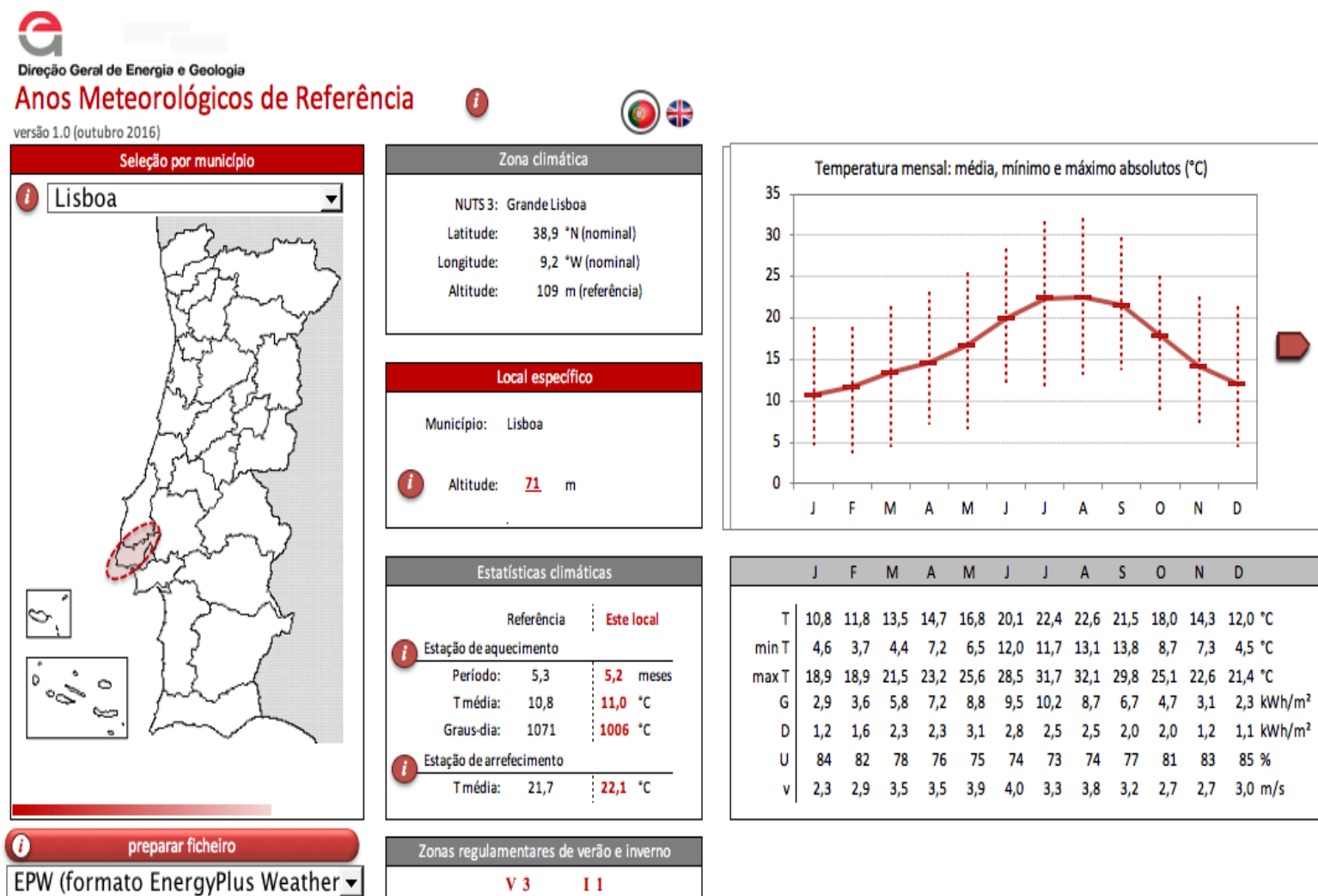
Tonelli, C; Grimaudo, M. (2014). “Timber buildings and thermal inertia: Open scientific problems for summer behavior in Mediterranean climate”. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778814001388>

ANEXOS



ANEXO A

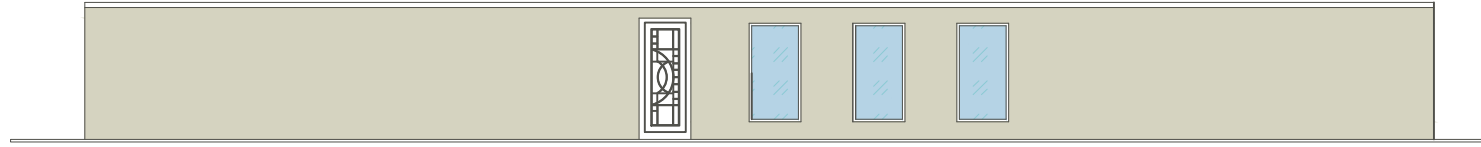
ZONAMENTO CLIMÁTICO



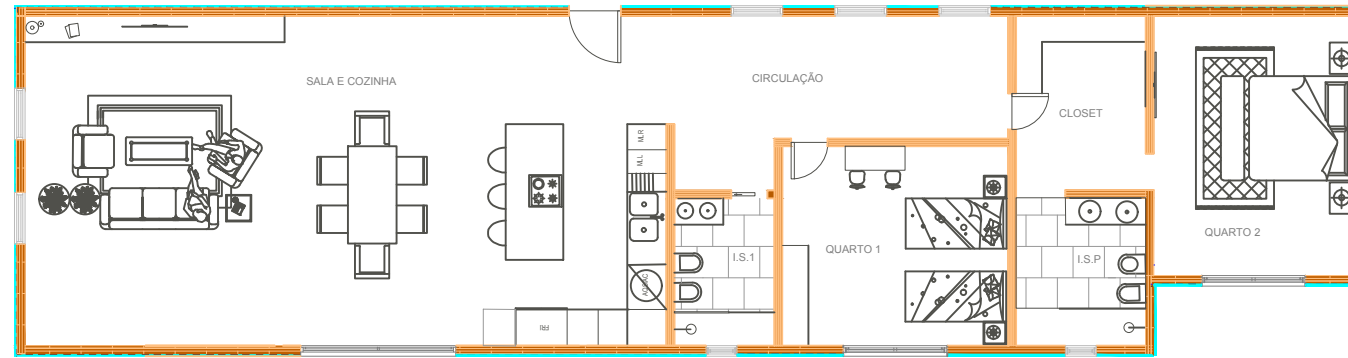
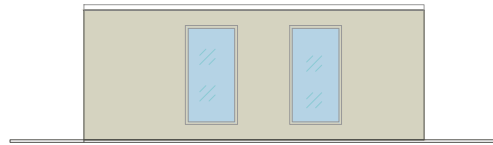
ANEXO B

PLANTA E ALÇADOS

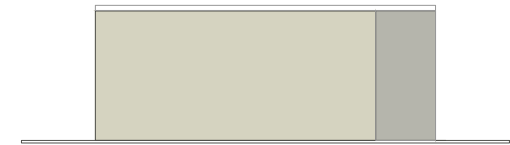
FACHADA NORTE



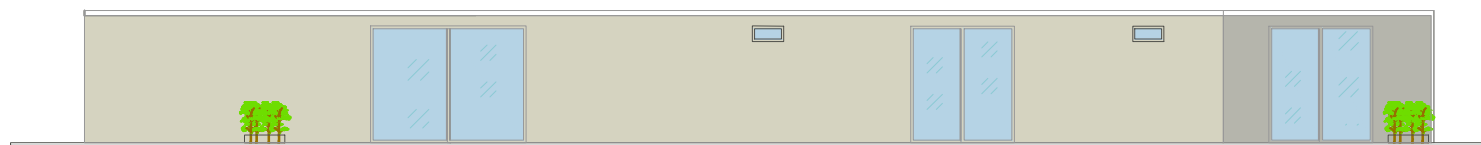
FACHADA OESTE



FACHADA ESTE



FACHADA SUL

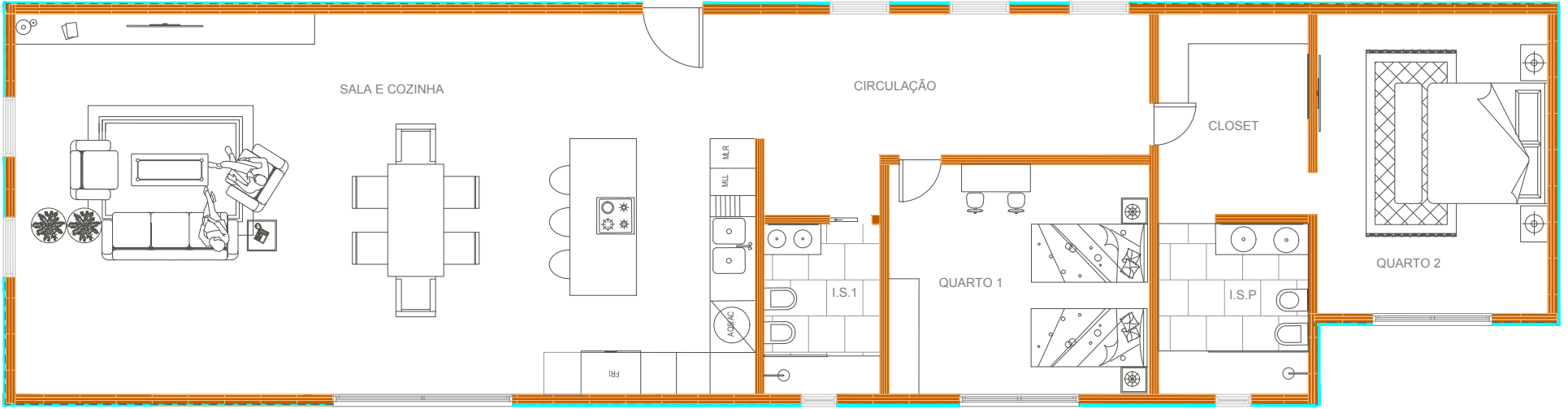


COMPARTIMENTO:	ÁREA
SALA E COZINHA	78,46m ²
I.S.1	5,49m ²
CIRCULAÇÃO	17,1m ²
QUARTO 1	16,7m ²
QUARTO 2	19,27m ²
CLOSET	8,36m ²
I.S.P	7,11m ²

ANEXO C

PLANTA

PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION



COMPARTIMENTO:	ÁREA
SALA E COZINHA	78,46m ²
I.S.1	5,49m ²
CIRCULAÇÃO	17,1m ²
QUARTO 1	16,7m ²
QUARTO 2	19,27m ²
CLOSET	8,36m ²
I.S.P	7,11m ²

PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

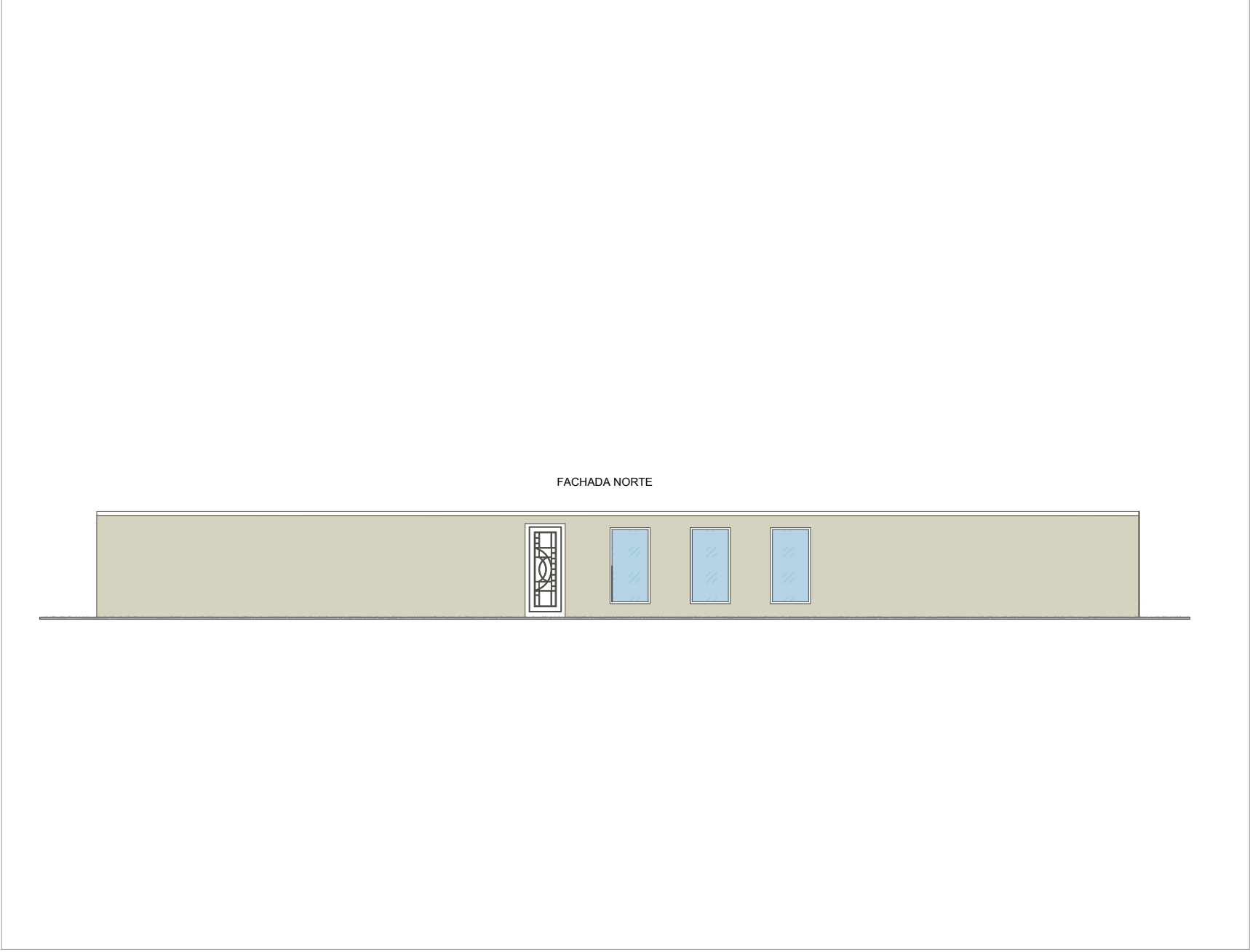
PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

ANEXO D

ALÇADO FRONTAL

PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION



PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

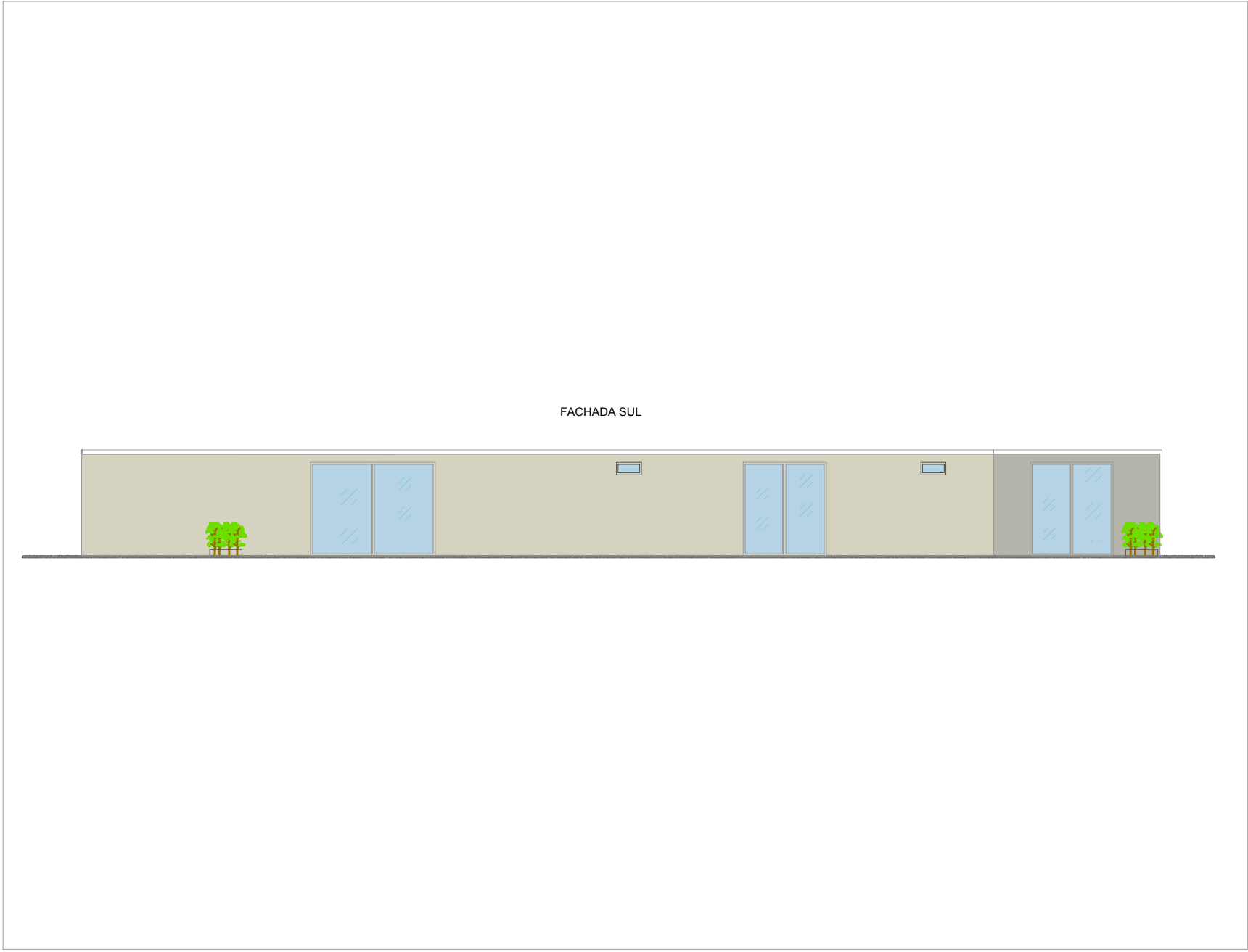
PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

ANEXO E

ALÇADO POSTERIOR

PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION



PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

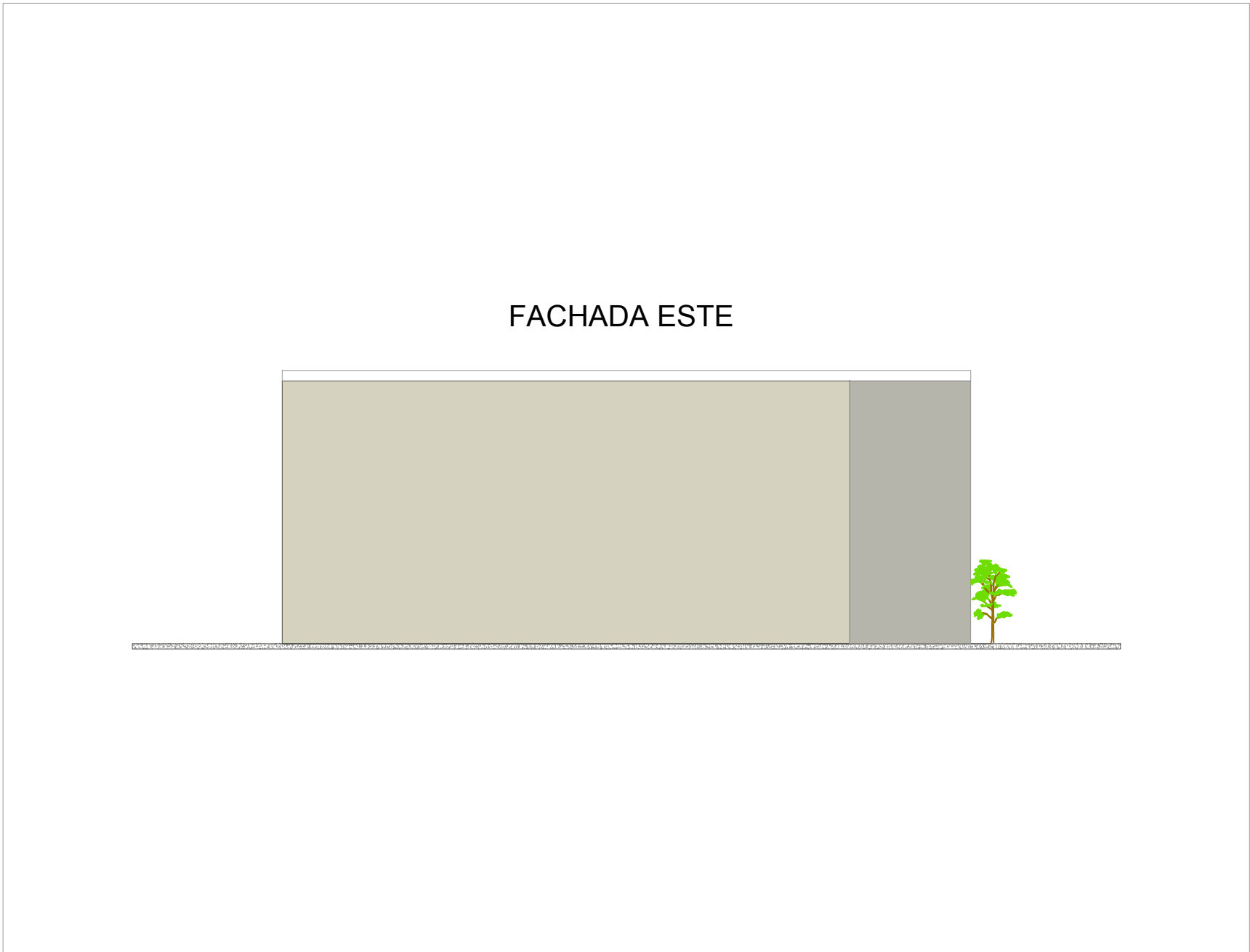
PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

ANEXO F

ALÇADO LATERAL DIREITO

PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION



PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

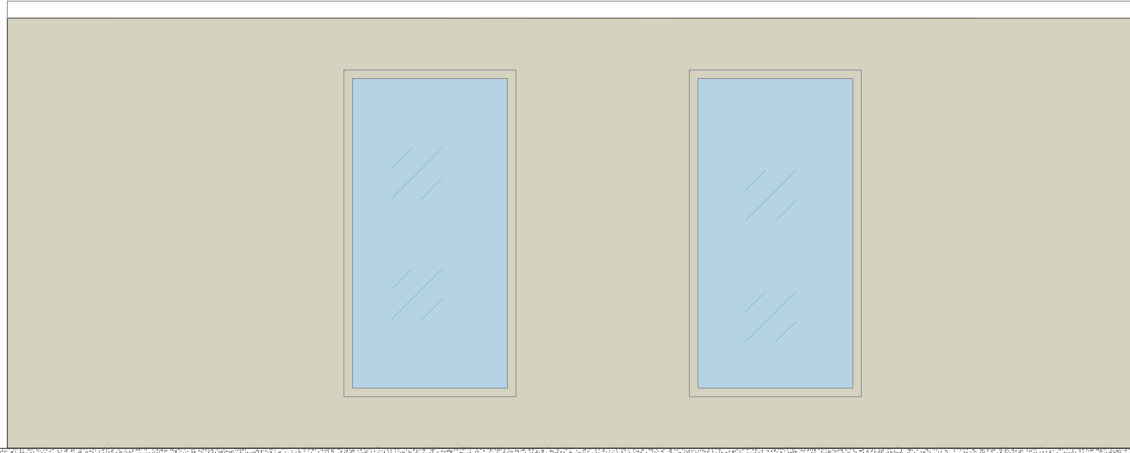
PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

ANEXO G

ALÇADO LATERAL ESQUERDO

PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

FACHADA OESTE



PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

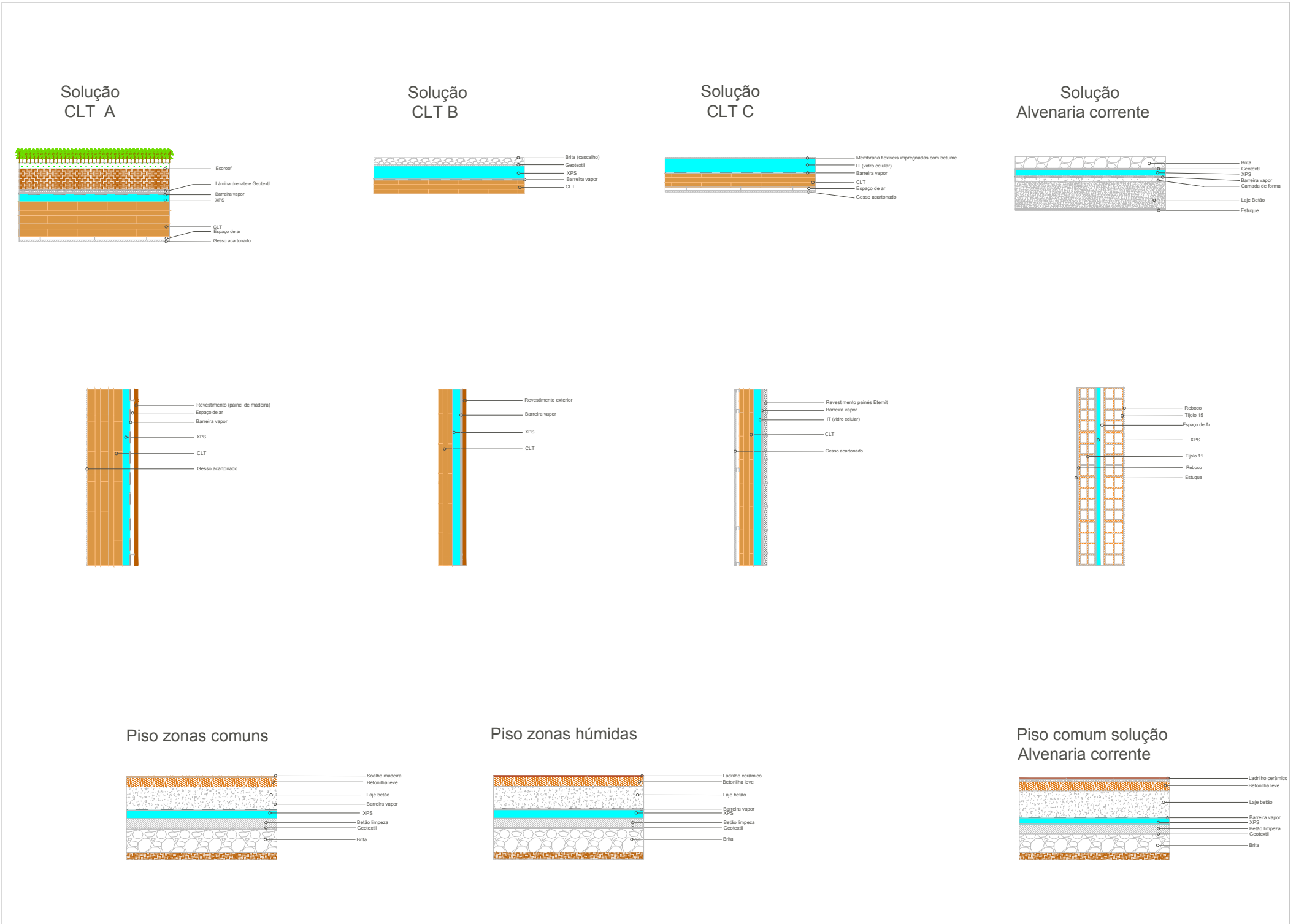
PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

ANEXO H

SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS

PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION



PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION



<2022>

JUDITH NANTES

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE VERÃO EM EDIFÍCIOS
UNIFAMILIARES CONSTRUÍDOS COM CROSS LAMINATED TIMBER (CLT)