

Modelação computacional do comportamento térmico de uma estufa

Bruno Miguel Carapito Lebre

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica
(2^o ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Dinho da Silva
Co-orientador: Prof. Doutor Luís Pires

julho de 2021

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao orientador desta dissertação, Professor Doutor Pedro Dinho da Silva, por toda a disponibilidade, conhecimentos transmitidos e apoio, imprescindíveis para o desenvolvimento da mesma.

Também gostaria de agradecer ao meu co-orientador, Professor Doutor Luís Pires pela disponibilidade e conteúdos facultados que possibilitaram um trabalho mais detalhado.

Agradeço também ao Sr. João Correia, técnico do Laboratório de Termodinâmica Aplicada e Transmissão de Calor da Universidade da Beira Interior pela disponibilidade e informações fornecidas.

Por fim, agradeço à minha família, amigos, e colegas de universidade pelo contínuo apoio.

Resumo

A necessidade de produção de todo o tipo de plantações em elevadas quantidades e ao longo de todo o ano faz do setor da agricultura um dos principais consumidores energéticos. A otimização deste consumo é essencial para garantir a sustentabilidade do mesmo. A implementação de estufas é uma estratégia que permite garantir as necessidades de produção, assim como possui grande potencial para otimização do processo. Nesta dissertação foram estudadas estas estruturas com recurso à simulação computacional. O primeiro passo foi a construção do modelo computacional, seguido da sua validação através da comparação com dados experimentais já existentes, e por fim uma série de estudos de caso foram realizados para avaliar os efeitos de diferentes parâmetros construtivos e operativos no comportamento térmico da estufa. Os resultados obtidos mostraram que a utilização de envidraçados de várias camadas e a variação da taxa de renovação do ar interior produziram os resultados com maior impacto. Estas técnicas permitem reduzir significativamente o consumo energético destas estruturas, promovendo a sua sustentabilidade.

Palavras-chave

Modelação numérica, Comportamento térmico, Eficiência energética, DesignBuilder, Estufa

Abstract

The need for the production of all kinds of crops in high quantities and during the entire year makes the agricultural sector one of the main energy consumers. The optimization of this consumption is essential to guarantee the sustainability of it. The implementation of greenhouses is a strategy that allows assuring the production needs, as well as possess large optimization potential of the process. In this dissertation the structures were studied by the means of computational simulation. The first step was the building of the computational model, followed by its validation through comparison with already-existing experimental data, and lastly a series of case studies were developed as to evaluate the effects of different constructive and operative parameters on the greenhouse's thermal behavior. The results obtained showed that the utilization of multi-layered glazing and variation of inside air exchange rates produced the results with the biggest impact. These techniques allow significant reduction of the energy consumption of these structures, promoting its sustainability.

Keywords

Numerical modeling, Thermal behavior, Energy efficiency, DesignBuilder, Greenhouse

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas	xv
Nomenclatura.....	xvii
1. Introdução	1
1.1. Perspectiva geral	1
1.2. O problema em estudo e a sua relevância	2
1.3. Revisão bibliográfica	5
1.4. Objetivos e contribuição da dissertação	10
1.5. Visão geral e organização da dissertação	10
2. Fundamentos teóricos	13
2.1. Introdução	13
2.2. Princípios de funcionamento de uma estufa.....	13
2.3. Estratégias de controlo das condições de uma estufa	15
2.4. Nota conclusiva	16
3. Modelação computacional.....	17
3.1. Introdução	17
3.2. Software utilizado	18
3.3. Validação experimental	19
3.4. Nota conclusiva	40
4. Estudo de casos	41
4.1. Aspectos referentes à modelação	41
4.2. Resultados e discussão.....	53
4.3. Nota conclusiva	102
5. Conclusão	103
5.1. Recapitulação	103
5.2. Sugestão para trabalho futuro	104
Referências bibliográficas	107

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Aumento populacional nas várias regiões entre 1950 e 2010 (Cleland, 2013).....	1
Figura 1.2 - Estimativa do consumo diário de energia Per Capita em diferentes períodos históricos (Cook, 1971).....	2
Figura 1.3 - Evolução da capacidade computacional de microprocessadores entre a década de 1970 e 2010 (Rupp, 2015).....	5
Figura 2.1 - Principais mecanismos de transmissão de calor presentes numa estufa (Li <i>et al</i> , 2017).....	14
Figura 3.1 - Janela de modelação de um edifício no DesignBuilder.....	19
Figura 3.2 - Localização da estufa em estudo existente na UBI (assinalado a amarelo).....	20
Figura 3.3 - Esquema e dimensões exteriores da estufa.....	21
Figura 3.4 - Fotografia da estrutura da estufa com a cobertura instalada.....	22
Figura 3.5 - Aplique de metal utilizado nas aberturas da estufa com conduta de ventilador acoplada.....	22
Figura 3.6 - Visualização geral da modelação da estufa (a cinzento) e das estruturas alheias relevantes (a roxo).....	23
Figura 3.7 - Visualização pormenorizada do modelo da estufa.....	24
Figura 3.8 - "Render" do modelo da estufa e estruturas de sombreamento.....	24
Figura 3.9 - "Render" pormenorizada do modelo da estufa.....	25
Figura 3.10 - Gráfico comparativo dos ensaios A1.....	29
Figura 3.11 - Gráfico comparativo dos ensaios A2.....	30

Figura 3.12 - Gráfico comparativo dos ensaios A3.....	31
Figura 3.13 - Gráfico comparativo dos ensaios A4.....	32
Figura 3.14 - Gráfico comparativo dos ensaios B5.....	33
Figura 3.15 - Gráfico comparativo dos ensaios B6.....	34
Figura 3.16 - Gráfico comparativo dos ensaios B7.....	35
Figura 3.17 - Gráfico comparativo dos ensaios C1.....	36
Figura 3.18 - Gráfico comparativo dos ensaios C2.....	37
Figura 3.19 - Gráfico comparativo dos ensaios C3.....	38
Figura 4.1 - Visualização da geometria do ensaio EC1.....	43
Figura 4.2 - "Render" da geometria do ensaio EC1.....	44
Figura 4.3 - Visualização da geometria do ensaio EC2.....	45
Figura 4.4 - "Render" da geometria do ensaio EC2.....	45
Figura 4.5 - Visualização da geometria do ensaio EC3.....	46
Figura 4.6 - "Render" da geometria do ensaio EC3.....	47
Figura 4.7 - Visualização da geometria do ensaio EC4.....	48
Figura 4.8 - "Render" da geometria do ensaio EC4.....	48
Figura 4.9 - Visualização da geometria dos ensaios EC21 a EC23.....	50
Figura 4.10 - "Render" da geometria do ensaio EC21 a EC23.....	50
Figura 4.11 - Configuração do funcionamento da ventilação mecânica dos ensaios EC26 a EC27.....	51
Figura 4.12 - Visualização da geometria dos ensaios EC26 e EC27.....	52
Figura 4.13 - "Render" da geometria dos ensaios EC26 e EC27.....	53
Figura 4.14 - Gráfico anual comparativo da temperatura interior dos ensaios EC1 a EC4.....	54
Figura 4.15 - Gráfico anual comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC1 a EC4.....	55

Figura 4.16 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da temperatura interior dos ensaios EC1 a EC4.....	56
Figura 4.17 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC1 a EC4.....	57
Figura 4.18 - Gráfico de 15 julho comparativo da temperatura interior dos ensaios EC1 a EC4.....	58
Figura 4.19 - Gráfico de 15 julho comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC1 a EC4.....	59
Figura 4.20 - Gráfico anual comparativo da temperatura interior do ensaio EC5.....	60
Figura 4.21 - Gráfico anual comparativo da humidade relativa interior do ensaio EC5.....	61
Figura 4.22 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da temperatura interior do ensaio EC5.....	61
Figura 4.23 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da humidade relativa interior do ensaio EC5.....	62
Figura 4.24 - Gráfico de 15 julho comparativo da temperatura interior do ensaio EC5.....	62
Figura 4.25 - Gráfico de 15 julho comparativo da humidade relativa interior do ensaio EC5.....	63
Figura 4.26 - Gráfico anual comparativo da temperatura interior dos ensaios EC6 a EC10.....	64
Figura 4.27 - Gráfico anual comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC6 a EC10.....	65
Figura 4.28 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da temperatura interior dos ensaios EC6 a EC10.....	66
Figura 4.29 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC6 a EC10.....	67
Figura 4.30 - Gráfico de 15 julho comparativo da temperatura interior dos ensaios EC6 a EC10.....	68
Figura 4.31 - Gráfico de 15 julho comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC6 a EC10.....	69
Figura 4.32 - Gráfico anual comparativo da temperatura interior dos ensaios EC11 e EC12....	70
Figura 4.33 - Gráfico anual comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC11 e EC12.....	70
Figura 4.34 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da temperatura interior dos ensaios EC11 e EC12.....	71
Figura 4.35 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC11 e EC12.....	71

Figura 4.36 - Gráfico de 15 julho comparativo da temperatura interior dos ensaios EC11 e EC12.....	72
Figura 4.37 - Gráfico de 15 julho comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC11 e EC12.....	72
Figura 4.38 - Gráfico anual comparativo da temperatura interior dos ensaios EC13 a EC16...73	
Figura 4.39 - Gráfico anual comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC13 a EC16.....	74
Figura 4.40 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da temperatura interior dos ensaios EC13 a EC16.....	75
Figura 4.41 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC13 a EC16.....	76
Figura 4.42 - Gráfico de 15 julho comparativo da temperatura interior dos ensaios EC13 a EC16.....	77
Figura 4.43 - Gráfico de 15 julho comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC13 a EC16.....	78
Figura 4.44 - Gráfico anual comparativo da temperatura interior dos ensaios EC17 a EC20...79	
Figura 4.45 - Gráfico anual comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC17 a EC20.....	80
Figura 4.46 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da temperatura interior dos ensaios EC17 a EC20.....	81
Figura 4.47 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC17 a EC20.....	82
Figura 4.48 - Gráfico de 15 julho comparativo da temperatura interior dos ensaios EC17 a EC20.....	83
Figura 4.49 - Gráfico de 15 julho comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC17 a EC20.....	84
Figura 4.50 - Gráfico anual comparativo da temperatura interior dos ensaios EC21 a EC23...85	
Figura 4.51 - Gráfico anual comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC21 a EC23.....	86
Figura 4.52 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da temperatura interior dos ensaios EC21 a EC23.....	87
Figura 4.53 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC21 a EC23.....	88

Figura 4.54 - Gráfico de 15 julho comparativo da temperatura interior dos ensaios EC21 a EC23.....	89
Figura 4.55 - Gráfico de 15 julho comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC21 a EC23.....	90
Figura 4.56 - Gráfico anual comparativo da temperatura interior dos ensaios EC24 e EC25.....	91
Figura 4.57 - Gráfico anual comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC24 e EC25.....	92
Figura 4.58 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da temperatura interior dos ensaios EC24 e EC25.....	93
Figura 4.59 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC24 e EC25.....	94
Figura 4.60 - Gráfico de 15 julho comparativo da temperatura interior dos ensaios EC24 e EC25.....	95
Figura 4.61 - Gráfico de 15 julho comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC24 e EC25.....	96
Figura 4.62 - Gráfico anual comparativo da temperatura interior dos ensaios EC26 e EC27...	97
Figura 4.63 - Gráfico anual comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC26 e EC27.....	97
Figura 4.64 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da temperatura interior dos ensaios EC26 e EC27.....	98
Figura 4.65 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC26 e EC27.....	98
Figura 4.66 - Gráfico de 15 julho comparativo da temperatura interior dos ensaios EC26 e EC27.....	99
Figura 4.67 - Gráfico de 15 julho comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC26 e EC27.....	99
Figura 4.68 - Gráfico anual comparativo do consumo energético dos ensaios EC26 e EC27...	100
Figura 4.69 - Gráfico de 15 janeiro comparativo do consumo energético dos ensaios EC26 e EC27.....	100
Figura 4.70 - Gráfico de 15 julho comparativo do consumo energético dos ensaios EC26 e EC27.....	101

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Propriedades da cobertura de polietileno utilizadas na simulação.....26

Tabela 3.2 - Parâmetros relevantes dos ensaios experimentais utilizados para a validação experimental.....27

Tabela 4.1 - Parâmetros variados em cada estudo de caso.....42

Nomenclatura

Acrónimos:

<i>AVAC</i>	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado;
<i>BPS</i>	Building Performance Software;
<i>BEA</i>	Building Energy Analysis;
<i>CLI</i>	Command Line Interface;
<i>CUI</i>	Command-line User Interface;
<i>GUI</i>	Graphical User Interface;
<i>CAD</i>	Computer Assisted Design;
<i>UBI</i>	Universidade da Beira Interior;
<i>CFIUTE</i>	Centro de Formação Interação UBI Tecido Empresarial;

1. Introdução

Este primeiro capítulo tem como propósito enquadrar o tema desta dissertação na atualidade e a importância do mesmo, assim como apresentar, de forma resumida, os trabalhos científicos relacionados com o tema. De seguida expõem-se também quais os objetivos que se pretendem atingir com o trabalho realizado. Por fim inclui-se neste capítulo uma secção destinada à apresentação da estruturação desta dissertação.

1.1. Perspectiva geral

O crescimento exponencial da população mundial tem sido cada vez mais alvo de estudo devido às questões que o mesmo levanta relativamente à sustentabilidade dos mais variados recursos energéticos necessários para proporcionar um nível de vida adequado a cada membro da população. As alterações climáticas, tema atualmente omnipresente em todas as áreas do conhecimento assim como no quotidiano, estão diretamente relacionadas com a utilização desgovernada e excessiva de todos os recursos que se testemunha com o contínuo desenvolvimento tecnológico e que, quando multiplicada com o anteriormente mencionado crescimento populacional, devolve um resultado extremamente alarmante que põe em causa a capacidade de sobrevivência da geração atual como também das gerações futuras, podendo ser considerado como o maior perigo, natural ou fabricado, que o ser Humano alguma vez teve de enfrentar.

Region	Population 1950 (millions)	Population 2010 (millions)	Absolute increase (millions)	Ratio 2010/1950
Europe	547	738	191	1.35
Northern America	172	345	173	2.00
Asia	1403	4146	2743	2.96
Latin America	167	590	423	3.53
Oceania	13	36	23	2.77
North Africa	53	209	156	3.94
Sub-Saharan Africa	186	856	670	4.60
World	2532	6896	4364	2.72

Figura 1.1 - Aumento populacional nas várias regiões entre 1950 e 2010 (Cleland, 2013).

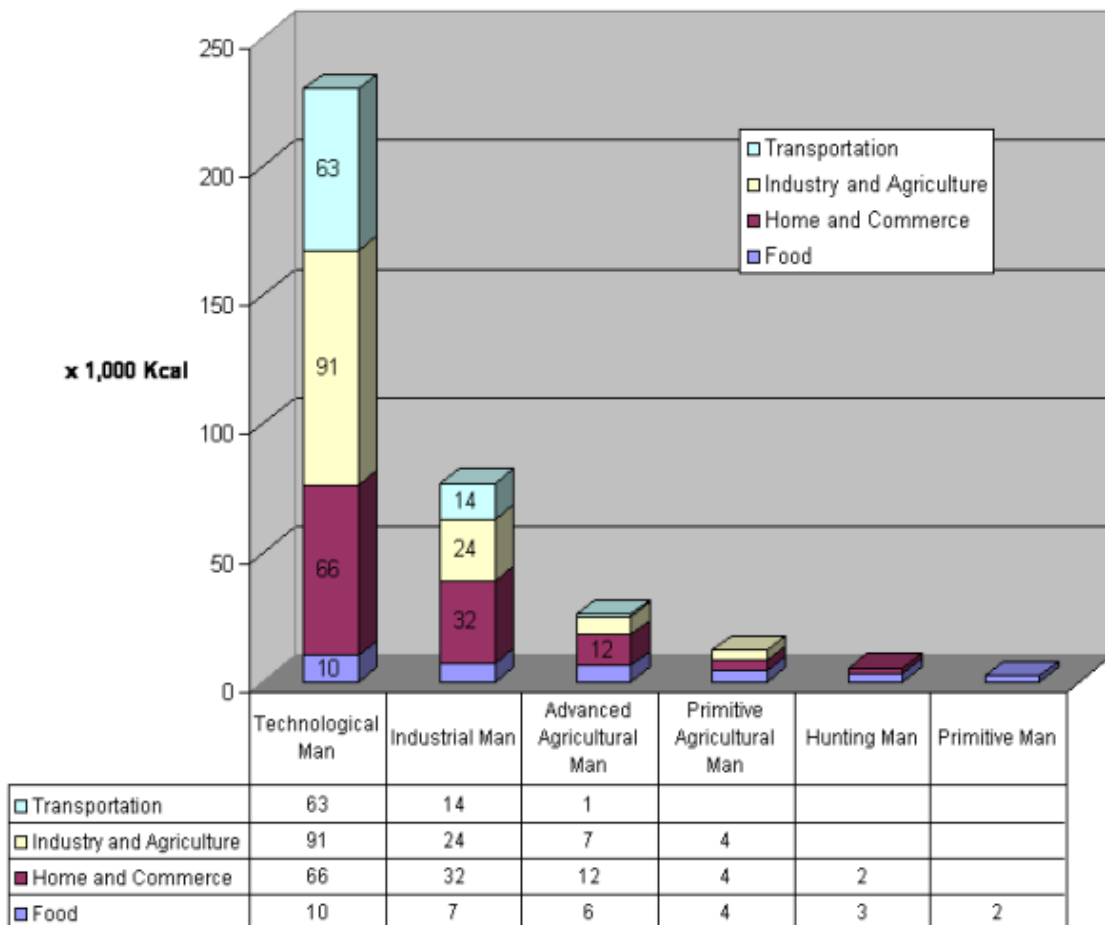


Figura 1.2 - Estimativa do consumo diário de energia Per Capita em diferentes períodos históricos (Cook, 1971).

A alimentação é um destes recursos, sendo possível ser considerado entre todos como o recurso mais crítico e básico quando tendo como ponto de vista simplesmente a sobrevivência do ser Humano como espécie. No entanto, através de um ponto de vista não tão extremo, investigação contínua na área da medicina aponta também para a alimentação variada como um fator de enorme importância para uma qualidade de vida elevada. Para tal, é então necessário ter a capacidade de disponibilizar os vários alimentos que constituem uma dieta equilibrada independentemente do local e da época sazonal nos quais estes se desenvolvem sem intervenção humana. Com isto em mente, existe então uma preocupação cada vez maior com a sustentabilidade da produção, distribuição e consumo de alimentos.

1.2. O problema em estudo e a sua relevância

Para satisfazer a necessidade de produção de alimentos fora das condições ambientais naturais dos mesmos, graças às evoluções tecnológicas das últimas décadas nas áreas dos transportes,

refrigeração e conservação é possível recorrer à produção em larga escala dos diversos produtos alimentares nos seus locais naturais seguida do transporte e distribuição para o resto do mundo no caso em que um determinado produto se desenvolva naturalmente apenas num determinado local, ou seguida da conservação de longa duração no caso em que um determinado produto se desenvolva naturalmente apenas numa determinada época do ano.

Uma alternativa a esta solução é a utilização de estufas. As estufas são estruturas que possibilitam a criação artificial de um vasto leque de diferentes condições climatéricas que consequentemente viabilizam a cultura de alimentos fora dos seus locais e épocas naturais. Para além desta funcionalidade exclusiva, as estufas trazem consigo outras vantagens tais como a independência das diferentes regiões do globo, a redução dos custos de produção a longo prazo devido ao investimento inicial na construção da estrutura ser posteriormente recuperado na redução nos custos de transporte e conservação derivado da produção se encontrar mais próximo do consumo quer em termo de distanciamento físico quer em termo de desfasamento temporal, sendo que esta redução de distanciamento físico e desfasamento temporal garantem, por sua vez, uma maior qualidade de produto assim como uma redução na quantidade de produto descartada devido a degradação excessiva das suas propriedades.

Outra vantagem da utilização de estufas deriva da possibilidade de simular diferentes condições climatéricas, que permite com mais facilidade fazer a rotação das culturas cultivadas no mesmo local, isto é, evitar a designada monocultura, o que é uma importante mais valia em termos de escassez e exaustão do solo, situação esta que é mais propensa a se manifestar na anteriormente mencionada produção em larga escala no local natural do produto, devido da necessidade de obter o maior aproveitamento da época sazonal de crescimento natural.

Todas estas características das estufas contribuem para a sustentabilidade da produção alimentar, pois reduzem-se os desperdícios energéticos.

Para satisfazer as necessidades relativas ao aumento do consumo de energia por parte do Homem, é necessário ter em conta a eficiência energética de todos os dispositivos e estruturas produzidas e utilizadas diariamente por toda a população, assim como proceder ao estudo de outras tecnologias que satisfaçam as mesmas necessidades e que sejam ou tenham o potencial para serem mais eficientes que as já existentes.

Esta questão é então uma que deve ser tida em mente na fase de projeto das ditas estruturas e dispositivos, e deve ser uma questão focal, isto é, deve-se ter em mente desde o início e integrá-la em todas as fases do projeto e não apenas como um apêndice abordado no final com o simples objetivo de garantir o cumprimento de eventuais normas legais em vigor relativas à eficiência energética.

Um dos métodos utilizados para o desenvolvimento de novas tecnologias que sejam mais capazes que as já em vigor é através da recorrência ao conhecimento empírico, ou seja, através da construção de modelos e protótipos que são conseqüentemente sujeitos a ensaios experimentais, e cujos resultados são depois integrados no desenvolvimento de novos produtos ou no desenvolvimento de seguintes iterações de produtos em produção.

Este método tem a vantagem de ser feito em condições reais, o que é uma significativa mais-valia devido ao facto que na fase de projeto podem ocorrer lapsos por falta de capacidade de previsão do modo como o dispositivo que está a ser desenvolvido será implementado ou utilizado. No entanto, este método é demorado assim como dispendioso, não só num ponto de vista monetário mas também num ponto de vista energético e de recursos materiais, o que se opõe claramente ao objetivo que se pretende alcançar: A eficiência energética e a sustentabilidade de recursos.

Para evitar a recorrência ao método empírico é imprescindível possuir um conhecimento teórico aprofundado do assunto a tratar através da aplicação das leis da física, termodinâmica e matemática ao mesmo. Esta solução pode também ser demorada quando aplicada a grande parte das situações atuais, que possuem um grau de complexidade cada vez mais elevado. No entanto, as novas tecnologias informáticas têm provado ser um auxílio gigantesco para a aplicação deste método num espaço de tempo aceitável quando utilizado em situações complexas. A capacidade computacional de um microprocessador tem sido alvo de um crescimento exponencial, e quando aliado ao aumento da acessibilidade por parte da população geral ao mesmo devido à redução dos custos de produção e conseqüentemente aquisição, permite que estas tecnologias proporcionem uma ajuda essencial na abordagem teórica de uma complexa questão de eficiência energética.

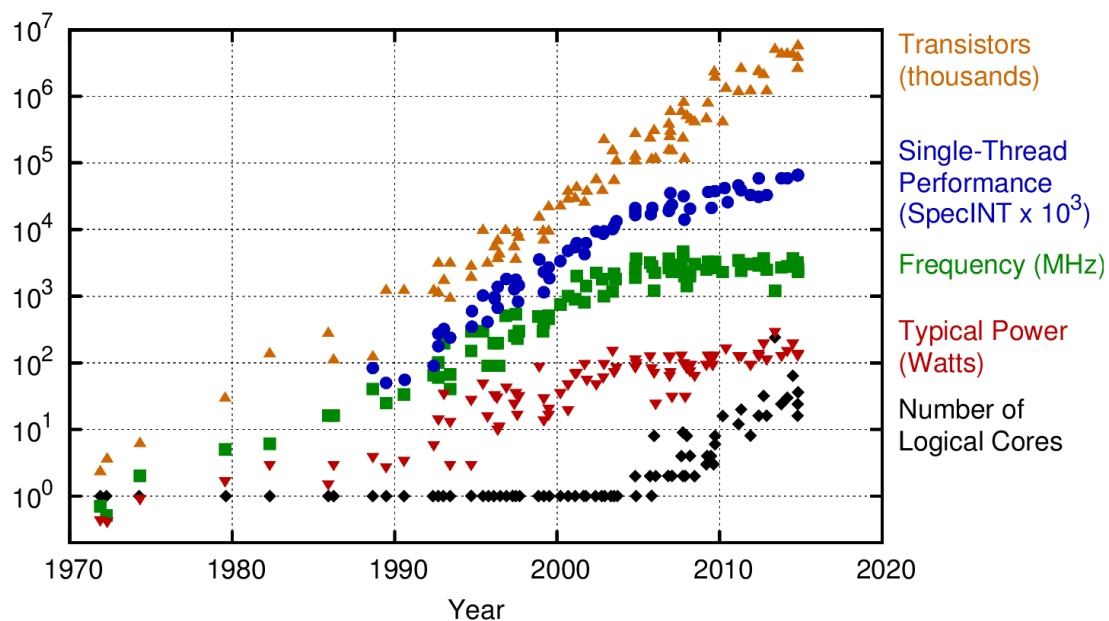


Figura 1.3 - Evolução da capacidade computacional de microprocessadores entre a década de 1970 e 2010 (Rupp, 2015).

Esta capacidade computacional pode ser utilizada não só para o cálculo de soluções de conjuntos de equações extremamente complexas mas também para a simulação numérica ou computacional do dispositivo ou estrutura que está a ser projetado, isto é, a utilização do poder computacional para aplicar as equações teóricas a um modelo computacional, equações estas que podem até ser relativamente compactas e simples de resolver manualmente pelo projetista mas que, devido aos milhares de iterações que são necessárias para calcular as condições para todos os pontos de um modelo computacional, inviabiliza o cálculo manual das mesmas.

Estas ferramentas de simulação permitem então testar praticamente quaisquer dispositivos desejados sob praticamente quaisquer condições desejadas utilizando apenas um computador pessoal, ou seja, possui as vantagens do método teórico relativamente ao método empírico assim como a vantagem da celeridade que nenhum destes métodos proporciona.

1.3. Revisão bibliográfica

Gupta *et al* (2002) realizaram investigação para estudar o efeito de diferentes parâmetros na redução do consumo energético com o objetivo de criar uma lista de medidas a adotar para uma estufa energeticamente eficiente. Foi desenvolvido um modelo matemático que foi conseqüentemente resolvido computacionalmente, e cujos resultados indicaram que para as condições climáticas do norte da Índia, uma estufa com o telhado em formato de arco gótico necessita cerca de 2.6% menos aquecimento comparativamente a estufas com o formato "gable" (formato "em bico", típico de edifícios habitacionais) e menos 4.2% que o formato "quonset"

(formato de semi-círculo ou parábola com concavidade direcionada para o solo). Mostraram também que: a orientação este-oeste requer menos 2% de energia para aquecimento; o isolamento da parede norte reduziu o consumo energético em 30%; a utilização de proteções noturnas reduziu em 70.8% o consumo durante o período noturno e 60.6% no total diário; a substituição da cobertura da parede sul de uma cobertura simples por um envidraçado duplo insuflado com ar resultou numa redução de 23%; e que a combinação de todas estas medidas resultou numa redução de 80%. Por fim, a utilização de um sistema de armazenamento de calor que faz proveito da temperatura constante do solo é capaz de responder as necessidades energéticas restantes.

Sethi (2008) selecionou cinco das configurações geométricas mais comuns na construção de estufas com o objetivo de determinar qual a configuração e orientação mais indicada para diferentes aplicações. Para tal, foi desenvolvido pelo autor um programa computacional escrito em linguagem C++ que utiliza equações teóricas simplificadas de acordo com várias hipóteses assumidas para devolver resultados de equilíbrio energético das configurações selecionadas. Os resultados desta aplicação computacional foram confrontados com resultados experimentais obtidos das estufas selecionadas já implementadas com o intuito de validar os resultados da aplicação, comparando os perfis de radiação solar obtidos em ambos. Os resultados mostraram que das configurações estudadas, a configuração "uneven-span" (formato semelhante ao "gable" mas assimétrico) e a configuração "quonset" receberam mais e menos radiação solar em cada mês do ano para qualquer latitude, respetivamente. Os resultados também mostraram que a configuração este-oeste é a mais adequada para estufas que são utilizadas durante todo o ano devido ao facto de esta captar mais radiação solar durante o inverno e menos durante o verão exceto em localizações próximas do equador.

Gupta *et al* (2012) investigaram detalhadamente a contabilização total da radiação solar que é transmitida para o interior da estufa. Recorreram à simulação computacional do sombreamento de uma estufa existente na Índia em Auto-CAD, que de seguida foi simulada para um dia típico de inverno e um dia típico de verão, ambos com céu limpo, e variando a orientação da mesma. Os resultados mostraram que apesar de em termos numéricos a variação da radiação solar transmitida com a orientação é reduzida, uma orientação rodada em 45° no sentido dos ponteiros do relógio relativamente à orientação este-oeste resulta na menor perda de radiação durante o inverno e a maior perda durante o verão.

Fabrizio (2012) realizou um estudo relativo ao potencial de três medidas na redução do consumo energético de estufas. Uma estufa em formato de túnel foi definida como o estudo de caso e modelada em EnergyPlus com as condições climáticas do noroeste de Itália, e conseqüentemente avaliados nestas os efeitos da utilização de folhas ocas de policarbonato para reduzir a transmissão térmica do envidraçado, da utilização de folhas de polipropileno

como um sistema de aquecimento, e da utilização de coletores solares em plástico de baixo custo como meio de captura de energia solar. Os resultados obtidos mostraram que coberturas transparentes com maiores capacidades isolantes são capazes de reduzir na ordem dos 30% as necessidades energéticas, assim como mostraram que a aplicação de coletores solares tem viabilidade questionável devido à grande área necessária para a implementação e a baixas eficiências.

Mashonjowa *et al* (2013) desenvolveram trabalho que adapta um modelo computacional de estufas localizadas em Zimbabué previamente desenvolvido e validado para calcular as taxas de renovação de ar das estufas e a resistência à transferência de vapor de água por parte da copa da planta. Os resultados numéricos foram comparados com os experimentais, mostrando boa concordância e possibilitando a sua utilização para a otimização de vários parâmetros constituintes da mesma.

Chen *et al* (2018) propuseram-se a construir uma metodologia computacional que, consoante a latitude introduzida, seja capaz de prever qual a orientação ótima para uma estufa a ser implementada nessa latitude. Para o desenvolvimento desta ferramenta, recorreram a dados experimentais obtidos de estufas existentes em vários locais em território chinês assim como a resultados de simulações computacionais em EnergyPlus que foram conseqüentemente utilizados para validar a metodologia desenvolvida. Após concordância com os resultados experimentais e numéricos, esta metodologia mostrou que a orientação ideal depende da latitude, e que com o aumento da latitude, a orientação ideal da estufa deve ser rodada para oeste.

Baxevanou *et al* (2018) estudaram a influência de diferentes materiais utilizados em coberturas de estufas em termos da temperatura no interior da mesma assim como a penetração de radiação fotossinteticamente ativa. Foi utilizada a simulação numérica de quatro diferentes materiais em Ansys Fluent de oito dias característicos do ano com os dados climatéricos recolhidos no centro da Grécia. Ainda outros parâmetros como o campo de velocidades do ar e discrepâncias nos perfis de escoamento foram analisados. A validação do modelo computacional foi feita comparando os resultados com uma estufa construída no mesmo local onde foi feita a recolha dos dados climatéricos. Os resultados mostraram que para um microclima adequado ao cultivo de tomates de 200 W/m² de radiação, intervalo de temperatura de 14 °C a 24 °C, e velocidades de escoamento menores que 0,5 m/s, o material mais indicado para satisfazer estas condições durante o maior período de tempo ao longo do ano é a película de etileno-acetato de vinil.

Ma *et al* (2019) tiveram como objetivo desenvolver uma abordagem de modelação computacional que seja capaz de simular os microclimas que se desenvolvem no interior de uma estufa, e conseqüentemente utilizar os resultados dessas simulações para otimizar

distância e frequência do deslocamento dos vasos que contêm as plantas, sendo esta a prática habitual para combater o desenvolvimento destes prejudiciais microclimas. O modelo computacional de uma estufa localizada em Indiana, EUA foi construído, e o seu microclima estimado computacionalmente. A comparação com os dados experimentais do microclima revelou que foi estimado com precisão pela simulação. A frequência e distância das deslocações dos vasos foi otimizada com base nos resultados da simulação, que resultou na redução de mais de 90% do desenvolvimento de microclimas diversos e mais de 95% de redução na quantidade de movimento dos vasos.

Baglivo *et al* (2020) produziram trabalho com o objetivo de desenvolver uma metodologia de referência construída em cima de software computacional existente e que, através da modelação detalhada de diferentes parâmetros, simplifique o processo e melhore a qualidade dos resultados de simulações numéricas de estufas. O programa TRNSYS foi utilizado como base para o desenvolvimento desta nova ferramenta, sendo esta de seguida validada através comparação dos resultados da simulação de uma estufa existente em Itália na ferramenta proposta e dos resultados da simulação num aplicativo reconhecido na simulação de estufas, o EnergyPlus. Após a validação, um estudo de caso foi realizado de modo a comparar a discrepância entre resultados de simulações com o software habitual e o novo programa desenvolvido, o que demonstrou que simulações habituais produzem resultados precisos apenas para certas condições de configuração da simulação, sendo que a simulação detalhada feita com o programa apresentado expôs diferenças nas necessidades energéticas de arrefecimento e aquecimento na ordem dos 50 kWh/m³ comparativamente à simulação tradicional.

Esmaeli *et al* (2020) desenvolveram um modelo térmico dinâmico capaz de calcular a resultante temperatura do ar no interior de uma estufa. Este modelo é de seguida sujeito a um processo de otimização para devolver quais as mais adequadas características a adotar na estufa em estudo de modo obter o melhor desempenho térmico. O modelo desenvolvido foi validado através da comparação com os dados recolhidos de uma estufa experimental de características semelhantes situada no norte da China, e um estudo de caso de otimização foi depois feito para uma estufa localizada no Irão. As alterações à configuração geométrica da estufa resultantes do processo de otimização tornaram possível a operação da estufa, no intervalo de temperatura definido como o limite máximo aceitável para produção das culturas mais comuns de 10 °C a 32 °C, sem utilização de fontes de energia auxiliar durante 85% do ano de referência dos dados climatéricos utilizados.

Ali *et al* (2020) propuseram desenvolver um modelo dinâmico que, através da formulação das interações térmicas no interior de uma estufa, seja capaz de prever o comportamento da temperatura do ar do interior de dois tipos de estufas localizadas na Tunísia: uma estufa tradicional, transparente e envidraçada em toda a superfície, e uma estufa com apenas a

parede e telhado sul envidraçados, com cobertura que pode ser aplicada nestas superfícies, e com as restantes superfícies em material isolante opaco. O modelo matemático desenvolvido foi introduzido em MATLAB/Simulink e aplicado às estufas mencionadas, e os resultados foram confrontados com dados obtidos experimentalmente nas estufas. Os resultados mostraram boa concordância com os dados experimentais, validando a capacidade do modelo para prever o comportamento térmico do ar interior da estufa.

Zhang *et al* (2020) investigaram a influência das copas das plantas no microclima encontrado no interior da estufa que as contém. Foi desenvolvido um método para avaliar o microclima luminoso e o desempenho térmico numa estufa com configuração habitualmente utilizada para novas estufas implementadas na China, que inclui a modelação detalhada em 3D de toda a estrutura que constitui uma planta de tomate, que foi validado comparando-o com uma estufa existente. Os resultados obtidos foram de encontro aos dados experimentais, o que consequentemente significa que o método desenvolvido possa ser a primeira modelação capaz de contabilizar com precisão aspetos minuciosos constituintes de uma estufa real que são geralmente desprezados principalmente devido a limitações de software.

Chahidi *et al* (2021) estudaram a integração de diferentes tecnologias passivas e de energias renováveis para avaliar a potencial redução do consumo energético das estufas. Utilizando uma estufa de investigação de alto desempenho localizada em Itália como referência, que inclui sistemas como sombreamento refletivo das superfícies envidraçadas, janelas operáveis para promover a ventilação natural, painéis fotovoltaicos semi-transparentes montados no topo da estufa, e um sistema de AVAC que utiliza um permutador de calor ar-solo como uma das fontes de energia, foi construído um modelo computacional em EnergyPlus que fosse de encontro com os valores experimentais da estufa mencionada, que contabiliza componentes do balanço térmico como as plantas, o solo, e as massas internas, e foi consequentemente utilizado para estudar os efeitos no consumo energético destas tecnologias. Os resultados demonstraram que as cargas térmicas provenientes das massas internas e das plantas têm efeitos relevantes e não devem ser desprezadas; o sombreamento e a abertura de janelas reduzem em cerca de 5% e 14% o consumo de energia durante o período de arrefecimento; a utilização de um permutador de calor ar-solo pode reduzir em 21% o consumo energético relativamente à utilização exclusiva do mais habitual sistema composto por uma cadeira e um chiller; e finalmente que os módulos fotovoltaicos podem fornecer cerca de 16% e 44% do consumo elétrico anual total e o consumo elétrico anual para arrefecimento, respetivamente.

Cheng *et al* (2021) desenvolveram um sistema de sensores virtuais com capacidade de monitorizar detalhadamente vários aspetos do ambiente interno da estufa e consequentemente alterar os parâmetros de controlo da estufa em uso. Foi utilizado uma combinação dos programas Ansys Fluent e MATLAB para a criação destes sensores assim como para a modelação

computacional da estufa experimental em estudo, e a validação foi feita através da comparação dos resultados obtidos e os dados recolhidos experimentalmente. Os resultados mostraram que a simulação tinha concordância com os dados empíricos e o conhecimento teórico, sendo possível concluir que a combinação de sensores físicos e virtuais pode ser utilizada para a monitorização do ambiente de uma estufa.

1.4. Objetivos e contribuição da dissertação

O tema a ser desenvolvido nesta dissertação de mestrado tem como objetivo, em primeiro lugar, aplicar o programa computacional DesignBuilder, cujo foi construído com o intuito de simular edifícios habitacionais, comerciais e governamentais como escritórios, escolas, hospitais, armazéns, entre outros, para a construção de um modelo de simulação de uma estufa e avaliar se o mesmo possui capacidades para produzir resultados de comportamento térmico que vão de encontro com os dados experimentais de uma estufa idêntica existente e, em segundo lugar, posteriormente utilizá-lo para estudar a influência da variação de uma série de parâmetros característicos de uma estufa existente, fornecendo assim um conjunto de potenciais alterações de projeto que permitiram alterar o comportamento térmico da mesma.

A dissertação pretende também expor, resumidamente, uma pequena coleção de trabalhos científicos realizados por outros que estão em parte relacionados com os objetivos mencionados que serviram de apoio às decisões tomadas durante a realização da dissertação, e que também fornece uma perspetiva do estado da arte do tema abordado.

1.5. Visão geral e organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos que abordam os diferentes objetivos mencionados na secção anterior, dispostos geralmente cronologicamente de acordo como foram desenvolvidos.

O capítulo inicial é um capítulo introdutório, que aborda o enquadramento e relevância do tema da dissertação para a atualidade, a revisão bibliográfica que auxiliou a compreensão das barreiras existentes aos objetivos pretendidos e que apoiou as decisões tomadas, e finalmente quais são esses objetivos.

O segundo capítulo é dedicado aos princípios teóricos básicos que caracterizam o assunto em estudo.

O terceiro capítulo contém uma pequena introdução à ferramenta computacional a utilizar, assim como o processo de validação do modelo criado no software.

O quarto capítulo inclui toda a informação relativa ao estudos de caso realizados, assim como a análise e discussão dos resultados dos mesmos.

Por fim, o quinto e último capítulo faz uma recapitulação breve de toda a dissertação, assim como fornece algumas sugestões para futuros trabalhos a realizar que construam por cima ou estejam relacionados com esta dissertação.

2. Fundamentos teóricos

O presente capítulo é dedicado a expor e contextualizar os princípios teóricos básicos que se aplicam às situações em estudo pelo trabalho realizado para esta dissertação, assim como fazer uma exposição breve do funcionamento e métodos de operação de uma estufa.

2.1. Introdução

Estudar o princípio de funcionamento de uma estufa é compreender as leis básicas e fundamentos principais das áreas da termodinâmica e de transmissão de calor. Mais especificamente, caracterizar o comportamento térmico de uma estufa necessita da compreensão da primeira lei da termodinâmica, também chamada de lei da conservação de energia, que explica como energia é adicionada ou removida a um sistema em estudo, assim como da compreensão dos três mecanismos de transmissão de calor, que explicam de que forma a energia sob a forma de calor contida num sistema é transferida pelas fronteiras do sistema, assim como entre os constituintes do mesmo no seu interior.

2.2. Princípios de funcionamento de uma estufa

Um aumento de temperatura ocorre no interior de uma estufa devido à radiação solar incidente nas superfícies exteriores da estrutura, que são transparentes ao espectro da radiação solar, fazendo com que essa radiação atravesse estas superfícies e incida em todos os corpos que se encontram no interior da estufa. Estes corpos, opacos à radiação, absorvem grande parte dela por radiação, o que faz com que estes aqueçam e conseqüentemente dissipem parte dessa energia para o ar que imediatamente os envolve por condução, que depois se distribui, por convecção, devido a diferenças de temperatura e pressão, por todo o volume da estufa. Como a estufa é completamente fechada, à exceção de aberturas controláveis, conseguem-se atingir temperaturas muito superiores à temperatura ambiente exterior, permitindo então a cultura de vegetais e plantas que requerem condições climáticas muito diferentes das condições do ambiente envolvente da estufa (Daintith, 2009).

Existe, no entanto, a questão da emissão de radiação infra-vermelha de baixa intensidade de volta para o meio exterior que é emitida por todos os corpos quentes a baixa temperatura. As coberturas exteriores mais simples utilizadas em estufas não só são transparentes à radiação visível e ultra-violeta proveniente do Sol como já descrito, mas também à radiação infra-vermelha, permitindo que a radiação infra-vermelha emitida pelos corpos no interior da estufa escape de volta para o exterior. Estas perdas não são desprezáveis, podendo ter impacto

económico significativo em estufas que utilizem sistemas auxiliares de aquecimento (Kurpaska, 2014).

A figura 2.1 esquematiza simplificada os mecanismos descritos na presente secção.

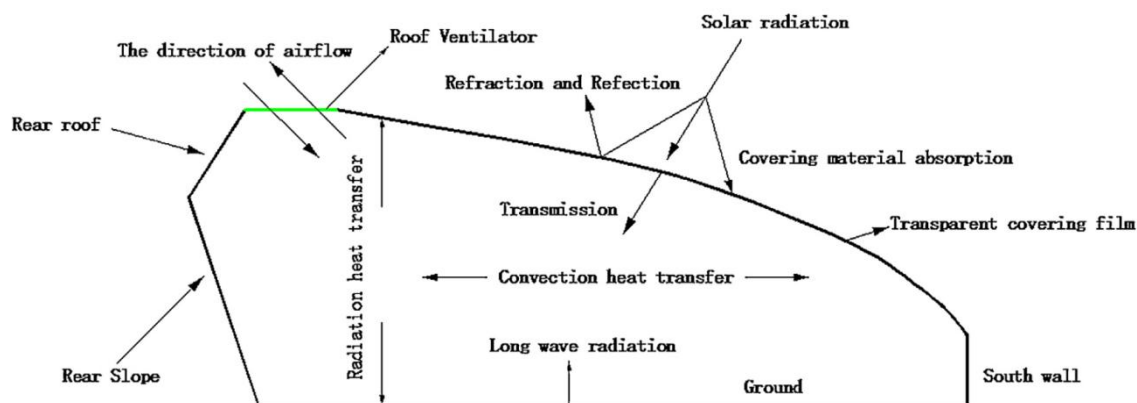


Figura 2.1 - Principais mecanismos de transmissão de calor presentes numa estufa (Li *et al*, 2017).

O aquecimento das estufas é então a questão mais estudada destas estruturas pois, devido ao facto de ser o principal fator que permite a criação das condições climáticas não endémicas à região geográfica onde são implementadas, compreender o processos de captação e libertação da energia proveniente do Sol permitirá fazer o aproveitamento desta fonte de energia mais eficazmente, eficácia essa que se traduz posteriormente numa significativa redução de custos pois as estufas têm necessidades energéticas elevadas e, ao recorrer a fontes de energia auxiliares, eleva exponencialmente os custos de operação das mesmas. Esta recorrência a fontes de energia auxiliares vem habitualmente acompanhada de um outro impacto, o impacto ambiental, visto que a maior parte das fontes de energia suplementar tradicionais são alimentadas a combustíveis fósseis ou a electricidade, electricidade esta proveniente da rede eléctrica, que, por sua vez, depende em certa parte de combustíveis fósseis. Devido a esta situação, existe um grande foco no estudo e implementação de estufas que integrem sistemas de aproveitamento da energia proveniente de várias fontes renováveis. Estes sistemas podem ir dos mais convencionais, tais como a utilização de painéis solares térmicos e fotovoltaicos, ou como a utilização do aquecimento geotérmico, até às menos convencionais, como o armazenamento de calor solar em períodos de abundância, que é depois utilizado para aquecimento em períodos de escassez.

A ventilação é outro parâmetro muito importante para o funcionamento adequado duma estufa. A ventilação tem como objectivo regular a temperatura e humidade dentro da mesma,

e para garantir a renovação e circulação do ar, que evita o desenvolvimento de patogenias que afectam as plantas e vegetais, assim como a entrada de ar fresco, necessário quer para o processo de fotossíntese, quer para o processo de respiração das plantas.

2.3. Estratégias de controlo das condições de uma estufa

Para cumprir as condições climatéricas mencionadas na secção anterior no interior de uma estufa, existe um conjunto extremamente diverso de diferentes estratégias que podem ser adotadas no processo de construção ou durante a operação de uma estufa com o intuito de cumprir as condições requeridas pelos cultivos que se pretendem desenvolver. Algumas das principais estratégias que permitem cumprir estas condições são de seguida apresentadas.

Aumentar a opacidade da estrutura exterior à radiação infra-vermelha mantendo a transparência ao espectro mais energético é uma estratégia com grande foco, tais como a utilização de diferentes tipos de envidraçados ou a utilização de revestimentos aplicados nos envidraçados, sendo esta situação muito semelhante à situação que ocorre em coletores solares térmicos e painéis solares fotovoltaicos, onde também se pretende que a radiação solar visível e ultra-violeta absorvida não seja re-irradiada no espectro infra-vermelho de volta para a atmosfera. A utilização de proteções refletivas aplicadas nos envidraçados que são operadas durante o período noturno produzem um efeito semelhante, sendo uma solução que possa ser adotada retroativamente a estufas já existentes evitando a substituição dos envidraçados por outros com estas propriedades embutidas. Estas proteções também têm a capacidade de reduzir as perdas por condução e convecção pois criam uma caixa-de-ar entre o envidraçado e a proteção, analogamente ao que acontece no interior de envidraçados duplos e triplos, assim como o que acontece com persianas e estores utilizados em edifícios habitacionais.

Em situações em que o oposto, o arrefecimento do interior da estufa, é necessário, esta é tipicamente mais simples, recorrendo-se maioritariamente à ventilação cruzada dentro da estufa, feita manualmente ou através de sensores de temperatura que ativam atuadores que operam as aberturas da estufa conforme necessário, promovendo a ventilação natural. Nalguns casos nos quais a ventilação natural não é suficiente, a ventilação mecânica é eficaz para dissipar a carga energética em excesso que se encontra no interior da estufa.

A iluminação das estufas é feita aproveitando a luz natural solar, visto que a grande quantidade de superfícies exteriores transparentes combinada com a não existência barreiras ou divisórias de grandes dimensões no interior da estufa permitem que a luz incidente numa das laterais da estufa a uma determinada hora do dia ilumine suficientemente todo o interior da mesma. Durante a parte noturna pode-se recorrer à iluminação eléctrica, pois existe iluminação LED especificamente desenhada para iluminar as plantas e vegetais durante o período sem

iluminação natural que permite o desenvolvimento do cultivo mesmo sem radiação solar (Tewolde *et al*, 2016).

Existe também ainda a possibilidade de utilizar o enriquecimento em dióxido de carbono nas estufas. Esta técnica já era conhecida e utilizada em agricultura tradicional antes da utilização de estufas, e consiste na concentração de dióxido de carbono na atmosfera da estufa, com o objectivo de atingir o potencial máximo do processo de fotossíntese, que tira proveito do dióxido de carbono presente (Stuhlfauth *et al*, 1990). Este processo também permite reduzir em parte o consumo de água, pois faz com que não seja necessária uma renovação do ar tão grande, o que leva a que haja menos perdas de água por evaporação, pois a atmosfera fica mais carregada de vapor de água (Stacey *et al*, 2018).

2.4. Nota conclusiva

O aspeto focal da utilização de uma estufa é o aproveitamento da energia proveniente do Sol, pois é através desta que as condições de temperatura no interior da estufa são criadas. Para além das condições climatéricas como a temperatura e humidade que são exigidas pelos diferentes cultivos, a exposição à radiação solar é imprescindível no crescimento de qualquer planta, fomentando ainda mais o Sol como o foco na implementação de estufas. A renovação do ar contido no interior da estufa é também crítica porque assegura a qualidade das plantações e influencia também a temperatura no interior da estufa. O balanço entre temperatura ambiente, ganhos térmicos provenientes da radiação solar, e perdas térmicas devido a emissão de radiação infra-vermelha e a renovações de ar é a chave para o ideal funcionamento de uma estufa.

3. Modelação computacional

Este capítulo contém toda a informação relativa à ferramenta computacional utilizada no desenvolvimento desta dissertação, fazendo uma pequena introdução à modelação computacional, seguida de uma explicação breve da utilização da ferramenta, e por fim a validação das capacidades da mesma, que garante a coerência com a realidade dos resultados obtidos com esta e permite o estudo computacional de diferentes condições da estufa.

3.1. Introdução

Actualmente existem centenas de diferentes programas de modelação e simulação computacional para os mais variados ramos da engenharia. Para o caso da simulação de edifícios com o objectivo de avaliar o seu desempenho energético, os diversos programas disponíveis são habitualmente referidos como BPS ou BEA.

Dentro destas ferramentas, é importante fazer a distinção entre o motor de simulação, que aplica e calcula equações da termodinâmica e transmissão de calor, e a aplicação de modelação, que é manipulada pelo utilizador para criar um modelo computacional do edifício que se pretende estudar, modelo este que é depois utilizado pelo já mencionado motor de simulação que irá então aplicar e calcular equações tendo em conta todas as características do modelo feito pelo utilizador. É então importante que o utilizador seja capaz de criar um modelo com o maior nível de rigor para que os resultados obtidos após a simulação venham de encontro à realidade (Crawley *et al*, 2008).

De modo geral, as ferramentas de BPS/BEA podem ser classificadas como: aplicações com motor de simulação integrado; programas que se acoplam a um determinado motor de simulação; extras ou extensões ("plug-ins" ou "add-ons") desenhadas para se aliarem a software que não foi desenhado com capacidades de BPS/BEA.

Tal como a sua designação indica, uma aplicação com um motor de simulação integrado é uma ferramenta que foi concebida para executar funções de simulação, sendo capaz então de as fazer de forma independente, ou seja, sem necessidade de outros programas auxiliares.

Os programas que se acoplam a motores de simulação têm como objectivo aumentar as funcionalidades do software de simulação já existente, ou então tornar a sua utilização mais prática e simples.

Por fim, os extras/extensões são programas que também se acoplam a outro software, mas que, ao contrário dos mencionados anteriormente, se acoplam a software que não tem

quaisquer capacidades de BPS/BEA inicialmente, e adicionam ferramentas e funcionalidades por forma a que tenham capacidades de o fazer quando adicionadas (Østergård *et al*, 2016).

3.2. Software utilizado

Na década de 1960 o Departamento da Energia (DOE) dos Estados Unidos financiou o desenvolvimento do programa DOE-2, e na década de 1970 o Departamento da Defesa (DOD) dos Estados Unidos financiou o desenvolvimento do programa BLAST. Mais tarde, na década de 1990, conflitos devido a resultados diferentes provenientes das duas distintas ferramentas, combinado com dificuldades na manutenção e atualização de software com mais de duas décadas, levou a que o Departamento da Energia dos Estados Unidos financiasse o desenvolvimento de uma nova ferramenta, chamada de EnergyPlus.

O EnergyPlus é baseado na versão 90 da língua de programação Fortran, sendo esta uma versão muito mais recente da versão de Fortran encontrada na base do BLAST e DOE-2, e que permite que o EnergyPlus seja um programa mais modular que, por sua vez, possibilita que o EnergyPlus seja mantido e atualizado mais facilmente, factor este que foi determinante na descontinuação dos seus predecessores, como já mencionado.

O EnergyPlus combina também as funcionalidades e vantagens de cada um dos predecessores, pois nenhum dos seus predecessores era superior ao outro na totalidade; consoante a situação, um dos programas obtinha resultados mais próximos da realidade que o outro (Crawley *et al*, 2001).

O EnergyPlus é maioritariamente um motor de simulação, isto é, a introdução de dados e comandos é feita em forma de texto, sendo então a sua interface máquina-utilizador do tipo CLI ou CUI. Este tipo de interface, muito comum na década de 1990 opõe-se à interface designada por GUI, que tem sido, ao longo dos anos, cada vez mais adoptada devido a sua menor barreira de entrada e mais fácil visualização do modelo a simular durante a sua construção.

O DesignBuilder é outra ferramenta de simulação, mas uma que não funciona por si só. O DesignBuilder cai na categoria de software que se acopla a um determinado motor de simulação. Mais especificamente, este acopla-se ao anteriormente mencionado EnergyPlus.

O DesignBuilder dá ao EnergyPlus uma interface do tipo GUI, tornando o acesso às capacidades de simulação do EnergyPlus substancialmente mais simples e prático, pois permite a modelação das estruturas que se pretendem simular através de desenho CAD em 3D, o que é mais intuitivo para o utilizador do que a interface CLI utilizada pelo EnergyPlus, particularmente em situações com geometrias de grandes dimensões e com um grau de complexidade elevado.

Para além da interface fornecida pelo DesignBuilder, este também inclui uma extensa biblioteca de "templates" de diferentes aspetos relevantes, tais como materiais de construção e materiais de envidraçados assim como combinações habituais dos mesmos, tipos de sistemas de aquecimento ambiente e de água doméstica, ventilação, iluminação, climatização, entre outros, permitindo uma modelação mais rápida facilitando a definição dos muitos parâmetros característicos necessários para a reprodução de uma simulação precisa da estrutura, existindo também a possibilidade destes serem utilizados como base e posteriormente adaptados a uma situação em específico.

O DesignBuilder inclui também uma base de dados com informações climáticas de várias regiões, assim como suporta uma variedade de diferentes formatos que armazenam informações climáticas utilizados por outras aplicações, o que também facilita e acelera o processo de preparação das condições externas a que o modelo a simular vai estar sujeito (Trouchin *et al*, 2008).

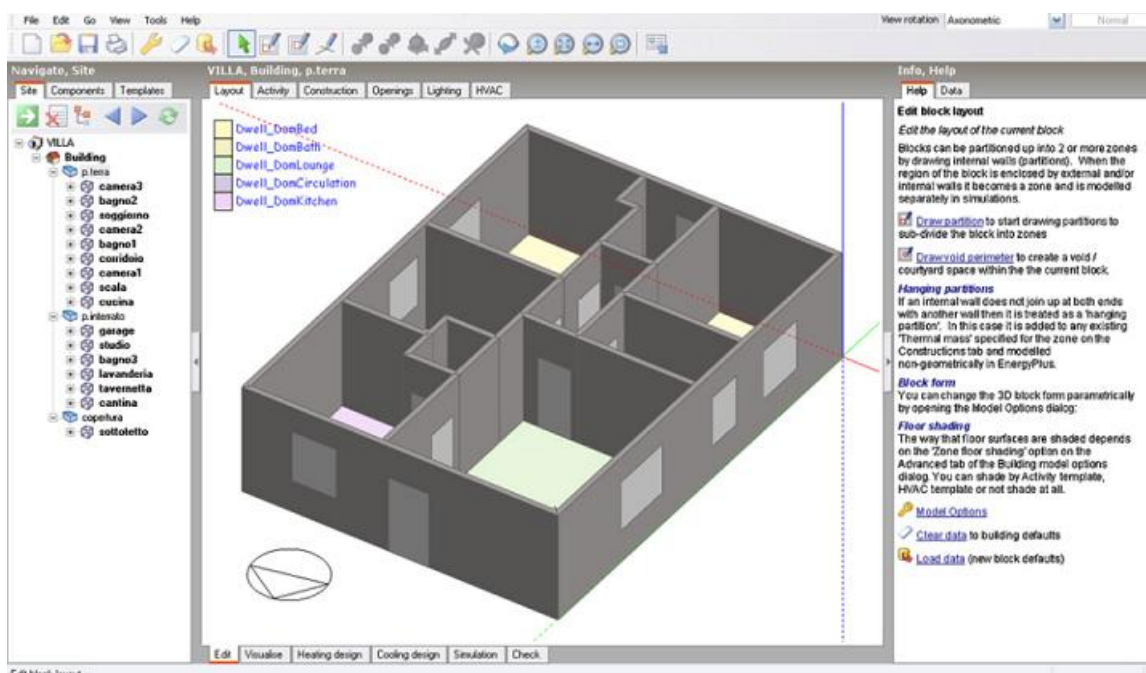


Figura 3.1 - Janela de modelação de um edifício no DesignBuilder.

3.3. Validação experimental

Por forma a existir credibilidade nos resultados de simulações feitas no software é necessário em primeiro lugar simular uma estrutura existente e da qual foram recolhidos dados relevantes e compará-los com os resultados obtidos na simulação.

Para isto foi escolhida uma estufa existente nas instalações da UBI (Godinho, 2019), localizada dentro da propriedade da Faculdade de Engenharia, junto ao edifício do CFIUTE, mais

precisamente com coordenadas 40° 16' 43" N 7° 30' 48" W, devido ao fácil acesso às características necessárias para a modelação computacional da mesma que são mencionadas de seguida.



Figura 3.2 - Localização da estufa em estudo existe na UBI (assinalado a amarelo).

As dimensões da estufa são a primeira informação para o início da construção do modelo, tendo então a estufa dimensões de 2,0m de profundidade por 1,4m de largura e 2,1m de altura no ponto mais alto e 1,4m no ponto mais baixo, resultando numa área de implementação de 2,8m² e um volume interno total de 4,9m³. A imagem seguinte mostra em maior detalhe as dimensões mencionadas.

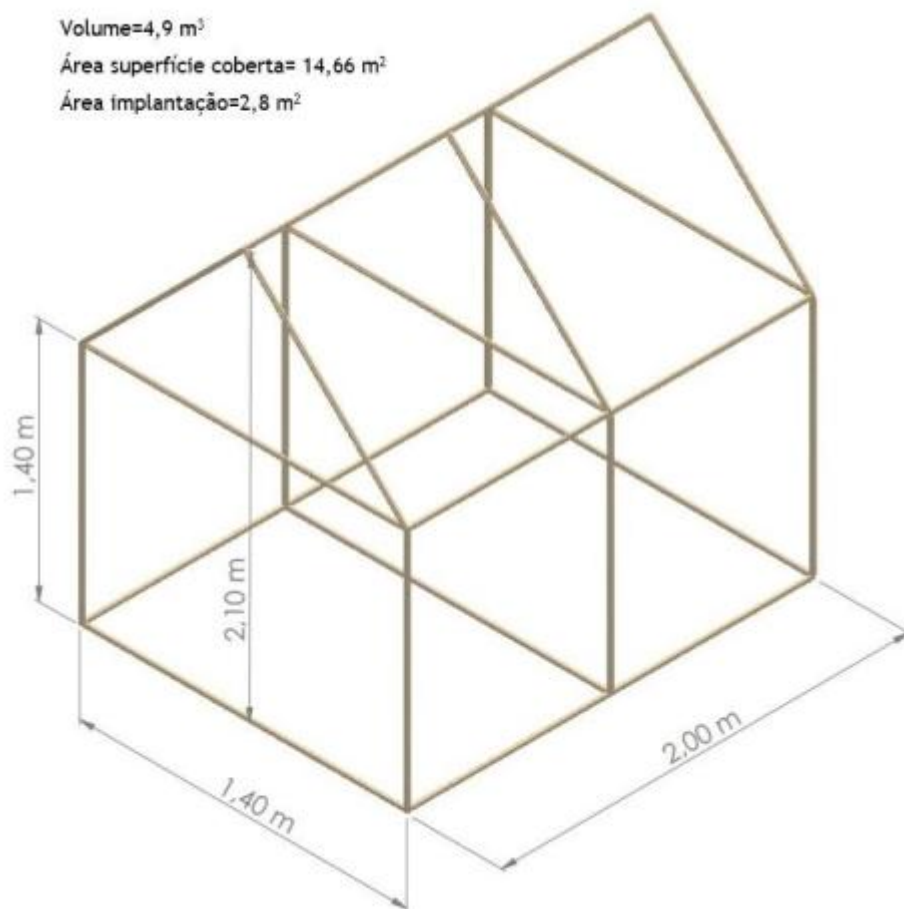


Figura 3.3 - Esquema e dimensões exteriores da estufa.

O material escolhido para a construção da estrutura de suporte da estufa foi madeira de abeto, sendo utilizado um perfil quadrangular com dimensões de secção de 30mm por 30mm para todas as secções representadas na figura anterior.

A cobertura que abrange todas as superfícies da estufa é feita em polietileno com espessura de 215 μm . A figura seguinte contém uma fotografia da estrutura da estufa com a cobertura já aplicada.



Figura 3.4 - Fotografia da estrutura da estufa com a cobertura instalada.

A estufa possui também duas aberturas circulares com 127 mm de diâmetro, uma localizada no canto inferior esquerdo da parede voltada para sul e a outra localizada no canto superior direito da parede voltada para norte, com apliques em metal e que são utilizadas para acoplar ventilação mecânica quando desejada, assim como promover a ventilação natural de uma estrutura completamente fechada, salvo infiltrações.



Figura 3.5 - Aplique de metal utilizado nas aberturas da estufa com conduta de ventilador acoplada.

Outro parâmetro relevante que afeta os resultados da simulação é a existência de estruturas alheias nos arredores da estufa que sejam capazes de induzir sombreamento significativo. Com isto em mente, foram também modelizadas algumas destas estruturas, nomeadamente o edifício do CFIUTE que se encontra poucos metros a este da estufa; o muro que limita o fim da propriedade da Faculdade de Engenharias e que serve de suporte à Rua Marquês de Pombal; e finalmente os edifícios mais próximos que existem na Rua Marquês de Pombal.

O modelo resultante das informações mencionadas é apresentado nas figuras 3.6 e 3.9.

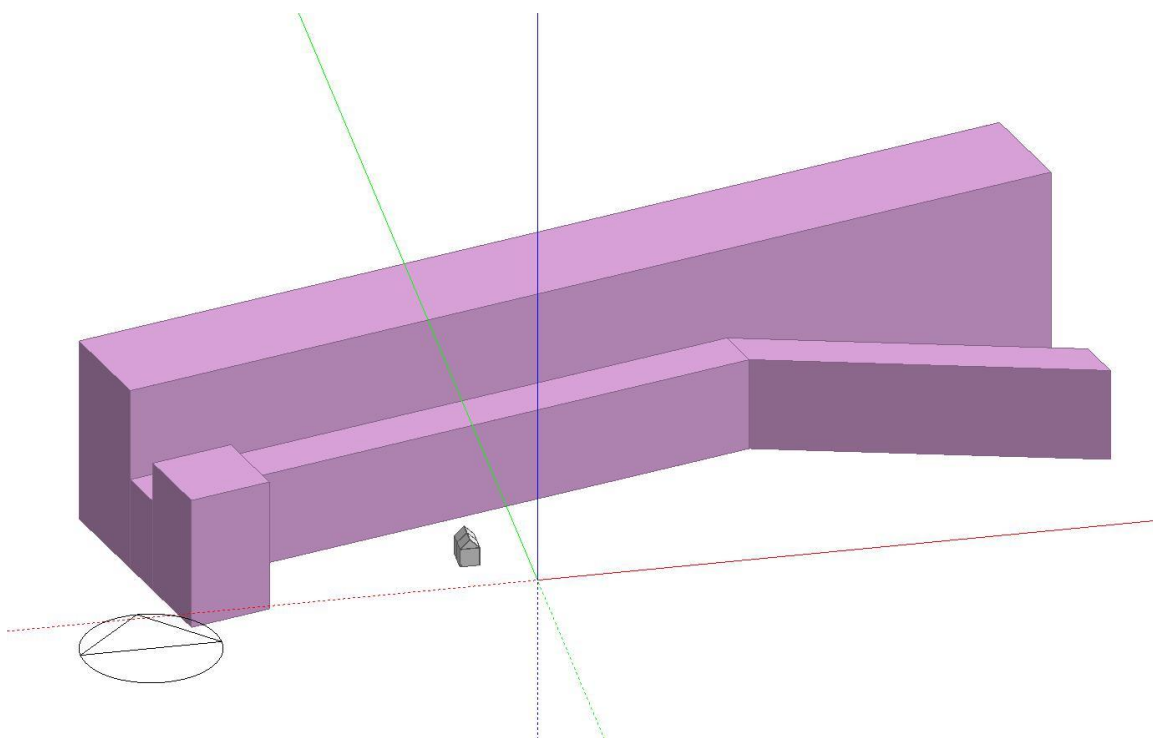


Figura 3.6 - Visualização geral da modelação da estufa (a cinzento) e das estruturas alheias relevantes (a roxo).

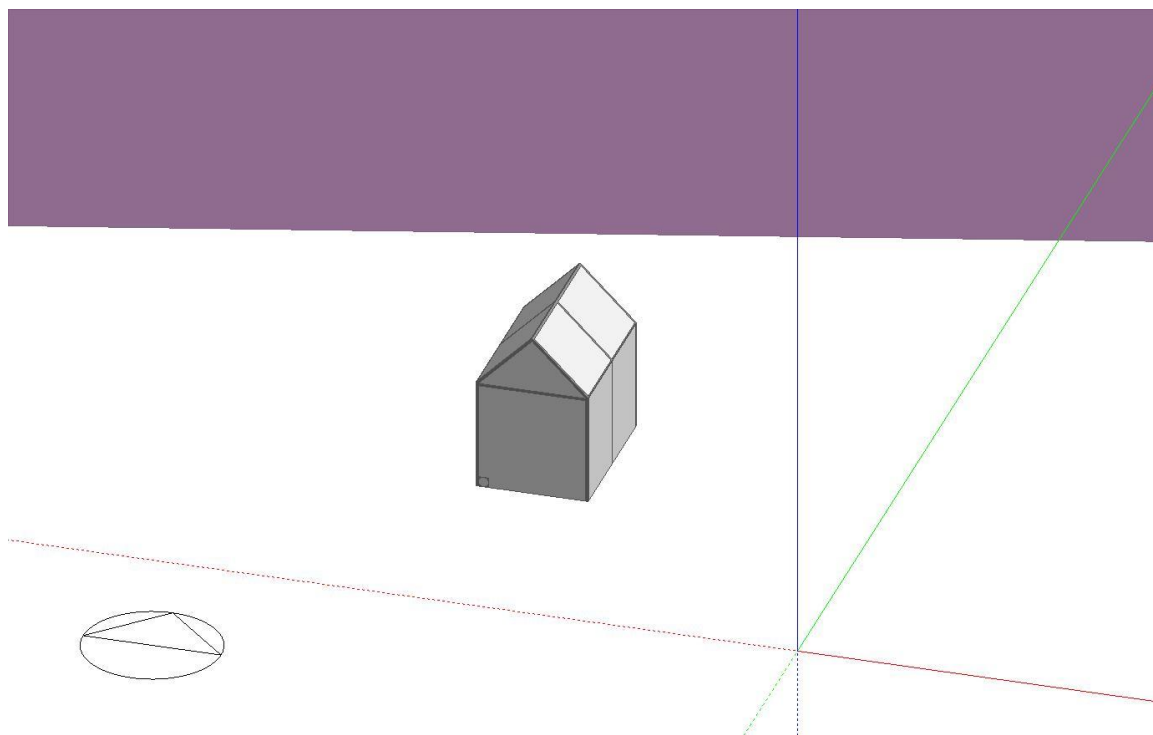


Figura 3.7 - Visualização pormenorizada do modelo da estufa.

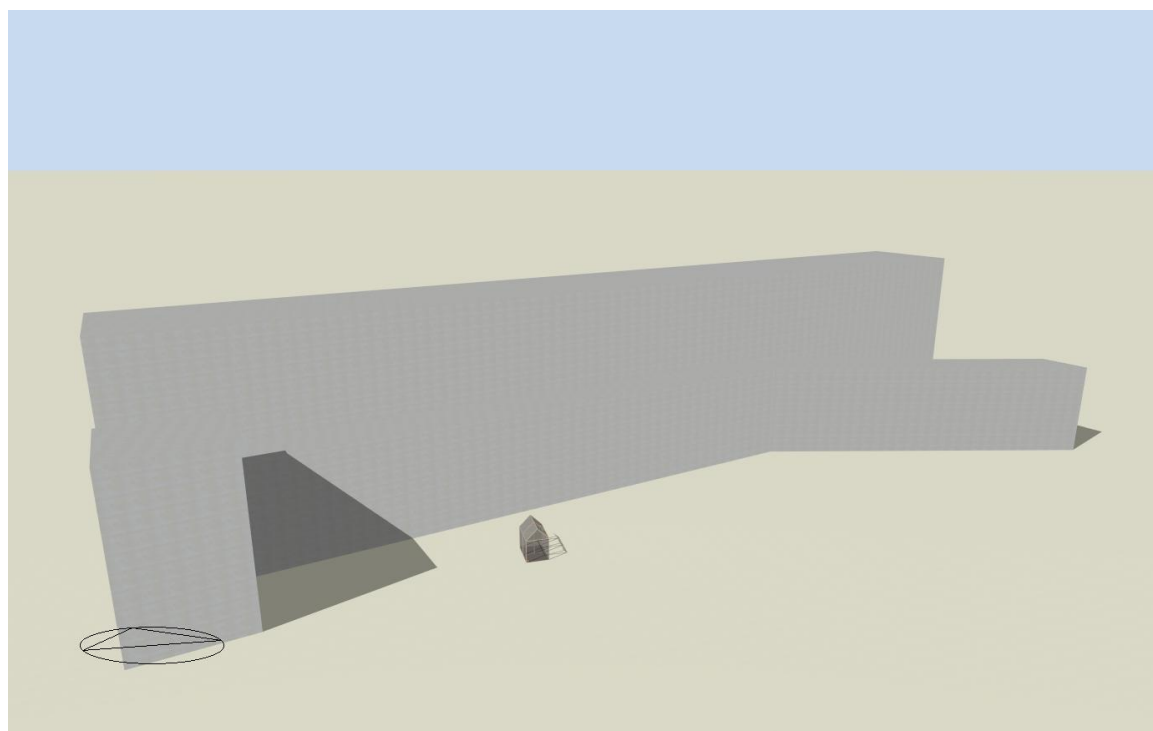


Figura 3.8 - "Render" do modelo da estufa e estruturas de sombreamento.

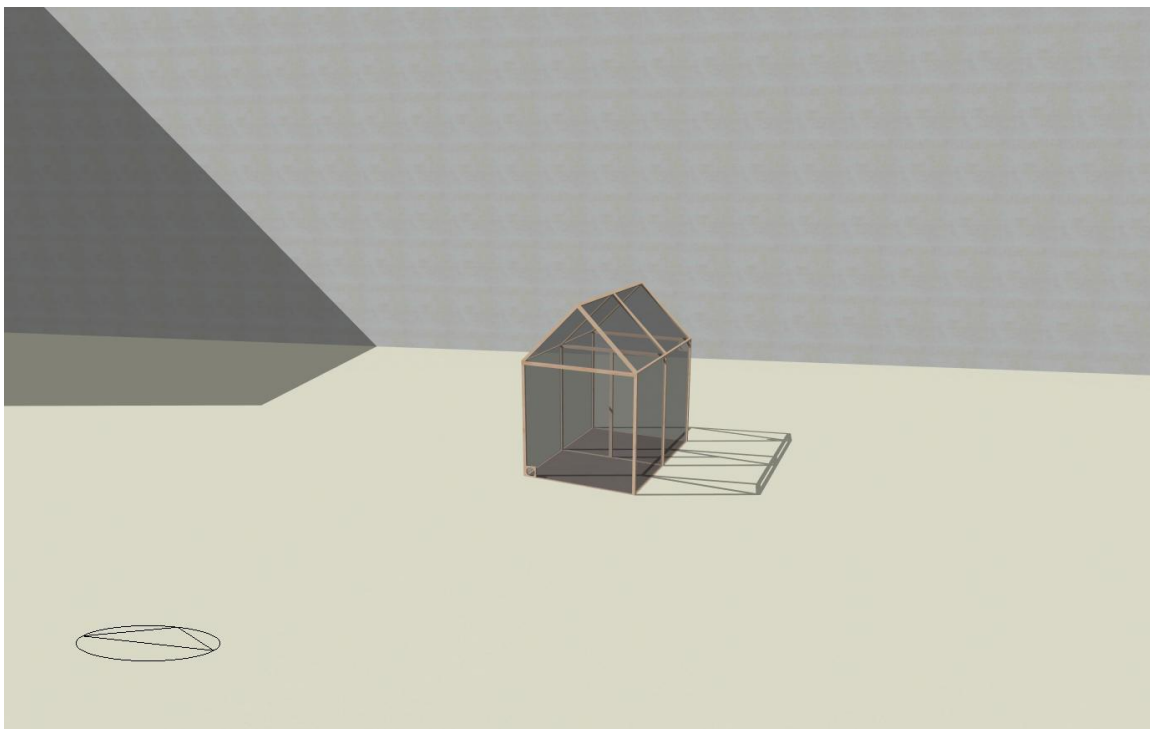


Figura 3.9 - "Render" pormenorizado do modelo da estufa.

Após a construção do modelo, o passo seguinte é introduzir as características dos materiais utilizados para a construção da estufa.

Para a madeira de abeto utilizada na estrutura utilizou-se um "template" incluído com o DesignBuilder, denominado "Woods - fir, pine", ao qual foi apenas necessário modificar a espessura para 0,03m para corresponder ao perfil da secção dos barrotes de madeira usados. Este "template" foi aplicado nas secções relevantes que definem as propriedades da estrutura, especificamente "External walls", "Pitched roof (occupied)", e "Internal partitions".

Para as propriedades do chão da estufa, sendo este o solo do terreno onde foi implementado, utilizou-se também um template incluído com o DesignBuilder chamado de "Earth, common (0,5m)".

A opção de cálculo de infiltrações foi utilizada nesta modelação. Não existem valores experimentais de medição das infiltrações na estufa, sendo então utilizado o valor por defeito do DesignBuilder de 0,100 ac/h como referência, que foi de seguida aumentado para 0,200 ac/h por estimativa, partindo do pressuposto que o valor por defeito é um valor típico para edifícios habitacionais e comerciais devido ao facto de o DesignBuilder ser utilizado principalmente na modelação deste tipo de edifícios, e que, devido ao facto da estufa utilizar uma cobertura maleável que foi afixada com um sistema que permite a sua remoção com rapidez em caso de condições atmosféricas que possam danificar a cobertura, é de esperar que

este sistema levará a valores de infiltração mais elevados que aqueles de edifícios tradicionais e uma estimativa conservadora deste aumento foi feita. É de destacar que este valor contabiliza exclusivamente as renovações de ar devido a falhas na impermeabilização da estrutura simulada; isto significa que todas as aberturas deliberadamente adicionadas no modelo são contabilizadas à parte, ou seja, este valor de 0,200 ac/h não está a contabilizar a ventilação natural resultante das duas aberturas existentes mencionadas anteriormente.

As propriedades das estruturas que fazem sombreamento na estufa também são necessárias para a simulação, pois o programa utiliza-as para estimar transmissão de calor por condução no caso destas estruturas estarem em contacto com o objeto a simular, assim como estimar os ganhos devido à reflexão de radiação solar nelas. Com isto em mente, o "template" "Project component block material" incluído com o DesignBuilder foi escolhido para as modelar.

As propriedades do cobertura de polietileno foram introduzidas manualmente devido ao DesignBuilder apenas possuir um "template" deste material para a secção de construção, isto é, não é possível utilizar este "template" como envidraçado por não conter as propriedades necessitadas pelo software para o simular como envidraçado. Os dados introduzidos são uma combinação de dados do fabricante (espessura), do já mencionado "template" do DesignBuilder para polietileno de baixa densidade, que por sua vez deriva da norma ISO 10456 (condutibilidade térmica), valores por defeito quando da criação de um "template" personalizado (transmissividade infra-vermelha), e todos os restantes provenientes da literatura (Kempkes *et al*, 2012). Estes valores são resumidos na tabela que se encontra de seguida.

Tabela 3.1 - Propriedades da cobertura de polietileno utilizadas na simulação.

Espessura (mm)	0,21500
Condutibilidade térmica (W/m·K)	0,33000
Transmissividade solar	0,80000
Refletividade solar exterior	0,17000
Refletividade solar interior	0,17000
Transmissividade visível	0,85000
Refletividade visível exterior	0,12000
Refletividade visível interior	0,12000
Transmissividade infra-vermelha	0,00000
Emissividade exterior	0,70000
Emissividade interior	0,70000

Por fim são necessários os dados climatéricos da região onde o modelo a simular se encontra. O DesignBuilder inclui uma extensa lista de "templates" de climas de diferentes locais espalhados por todo o globo, mas no entanto não possui um para a região da Covilhã. Os dados climatéricos da Covilhã existem, no entanto, em formato de EnergyPlus, e este formato é um dos vários formatos aceites pelo DesignBuilder, permitindo assim a introdução dos dados da Covilhã ao invés de recorrer à utilização de um "template" da região mais próxima ou com comportamento climatérico semelhante encontrada na biblioteca do DesignBuilder. O ano de referência dos dados da Covilhã é 2002.

Com esta informação introduzida a modelação da estufa dá-se como concluída, sendo agora apenas necessário ajustar os parâmetros que foram especificados nos ensaios experimentais que servirão como referência para efetuar comparação com os resultados da simulação.

Os parâmetros dos ensaios experimentais relevantes para a validação do modelo simulado encontram-se listados na tabela 3.2 (Godinho, 2019; Vitale, 2020), e foram aplicados durante toda a duração dos ensaios.

Tabela 3.2 - Parâmetros relevantes dos ensaios experimentais utilizados para a validação experimental.

Ensaio	Ventilação	Caudal Ventilador (ac/h)	Aquecimento	"Setpoint" Aquecedor (°C)
A1	Natural	-	OFF	-
A2	Forçada	12,9	OFF	-
A3	Forçada	14,7	OFF	-
A4	Natural	-	OFF	-
B5	Natural	-	ON	12
B6	Natural	-	ON	20
B7	Forçada	12,9	ON	18
C1	Forçada	1	OFF	-
C2	Forçada	3	OFF	-
C3	Forçada	3	OFF	-

Os ensaios experimentais tiveram durações de 24 horas, sendo que os ensaios A1 a B7 foram realizados em vários dias no período de abril de 2019 a maio de 2019, enquanto que os ensaios C1 a C3 foram realizados no período de fevereiro de 2020 a março de 2020.

Os valores apresentados são valores horários (assinalados por marcações nas curvas de todos os gráficos), ou seja, os restantes pontos das curvas não representam valores com passos no tempo menores, servindo apenas para uma leitura mais fácil dos gráficos.

A condição utilizada para a comparação dos resultados é o valor da temperatura ambiente, medida experimentalmente no local no caso dos ensaios experimentais, e incluída nos dados climatéricos da Covilhã no caso dos ensaios computacionais.

Devido aos períodos nos quais os ensaios experimentais foram realizados, foram selecionados para a validação os gráficos que, nos intervalos de abril de 2002 a maio de 2002 e fevereiro de 2002 a março de 2002 respetivamente para os ensaios A1 a B7 e C1 a C3, tinham a menor diferença média de temperatura ambiente horária.

Relativamente aos ensaios que recorreram a uma fonte auxiliar de aquecimento, a fonte utilizada foi um aquecedor elétrico com potência de 1800 W, alimentado a partir da rede elétrica.

Em todos os gráficos que se seguem, a curva "SIMULAÇÃO" descreve a temperatura no interior da estufa de simulação e a curva "T AMBIENTE SIMULAÇÃO" a temperatura ambiente do exterior da simulação. Analogamente, as curvas "EXPERIMENTAL" e "T AMBIENTE EXPERIMENTAL" descrevem a temperatura interior e a temperatura ambiente do exterior da estufa experimental.

O gráfico da figura 3.10 mostra a temperatura ambiente e a temperatura no interior da estufa para as condições do ensaio A1, sendo apresentado o intervalo dos resultados da simulação de 28-05 às 17 horas a 29-05 às 16 horas pois é neste intervalo que se obteve a menor diferença média de temperatura ambiente, cujo valor é de 2,53 °C.

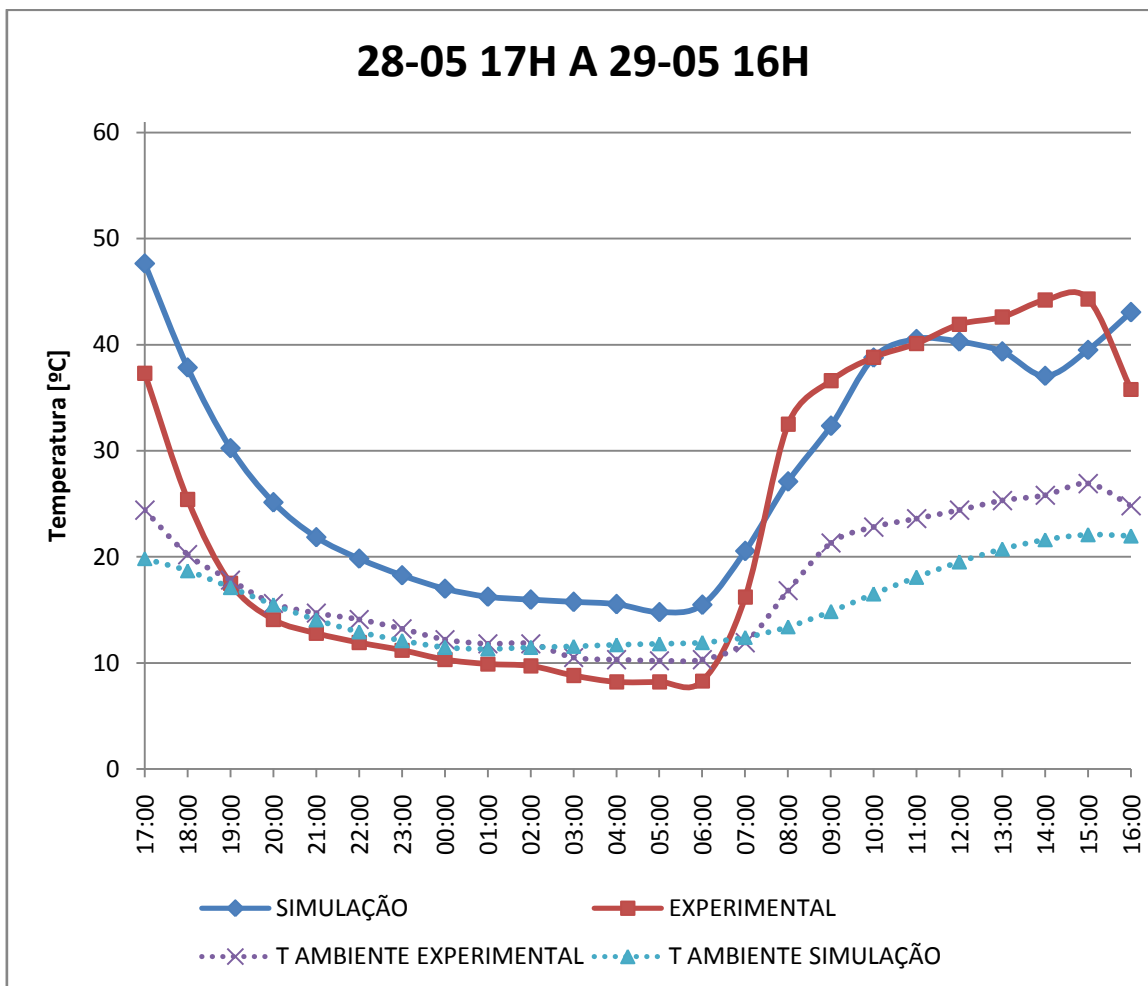


Figura 3.10 - Gráfico comparativo dos ensaios A1.

O gráfico da figura 3.11 mostra a temperatura ambiente e a temperatura no interior da estufa para as condições do ensaio A2, sendo apresentado o intervalo dos resultados da simulação de 29-05 às 17 horas a 30-05 às 16 horas pois é neste intervalo que se obteve a menor diferença média de temperatura ambiente, cujo valor é de 2,96 °C.

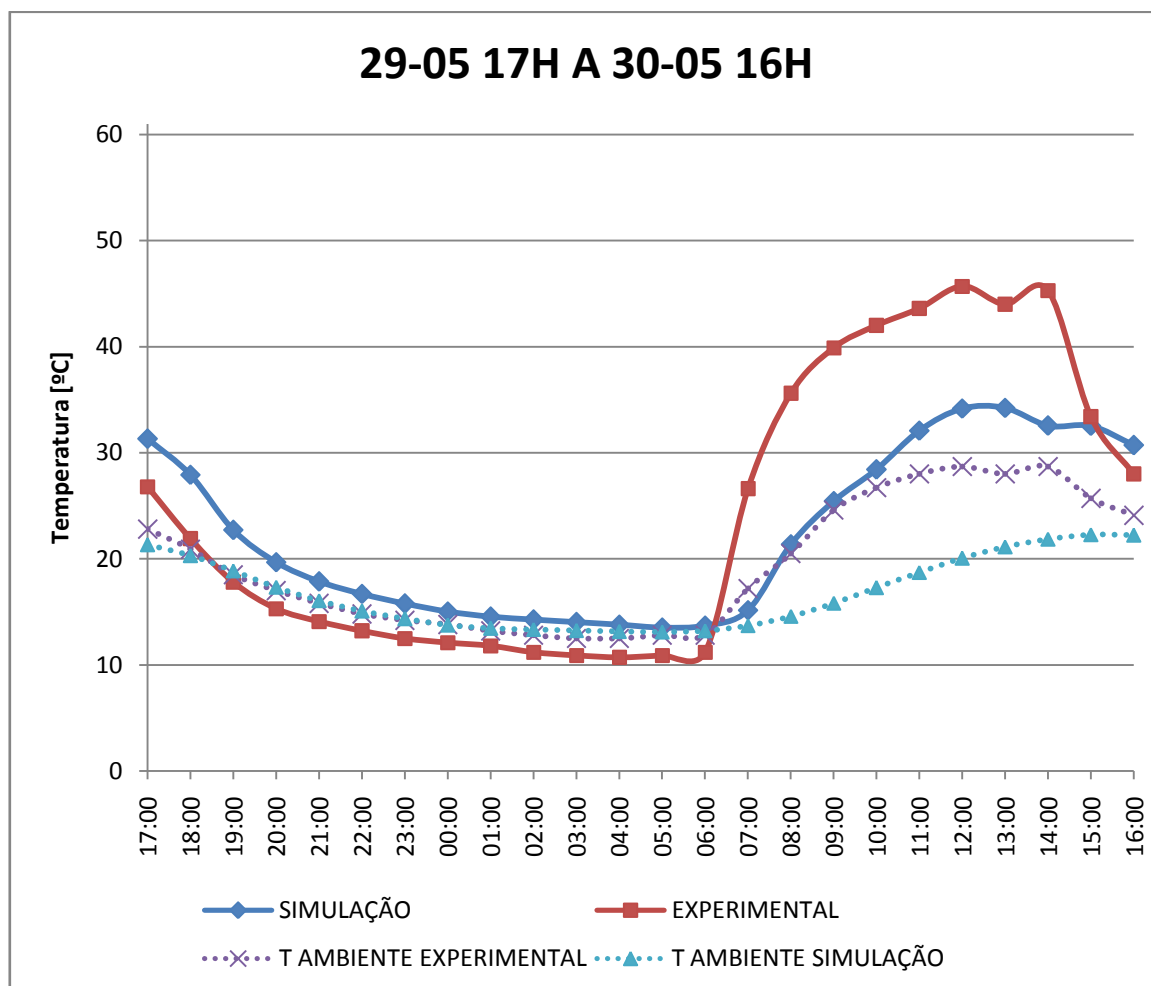


Figura 3.11 - Gráfico comparativo dos ensaios A2.

O gráfico da figura 3.12 mostra a temperatura ambiente e a temperatura no interior da estufa para as condições do ensaio A3, sendo apresentado o intervalo dos resultados da simulação de 29-05 às 17 horas a 30-05 às 16 horas pois é neste intervalo que se obteve a menor diferença média de temperatura ambiente, cujo valor é de 3,38 °C.

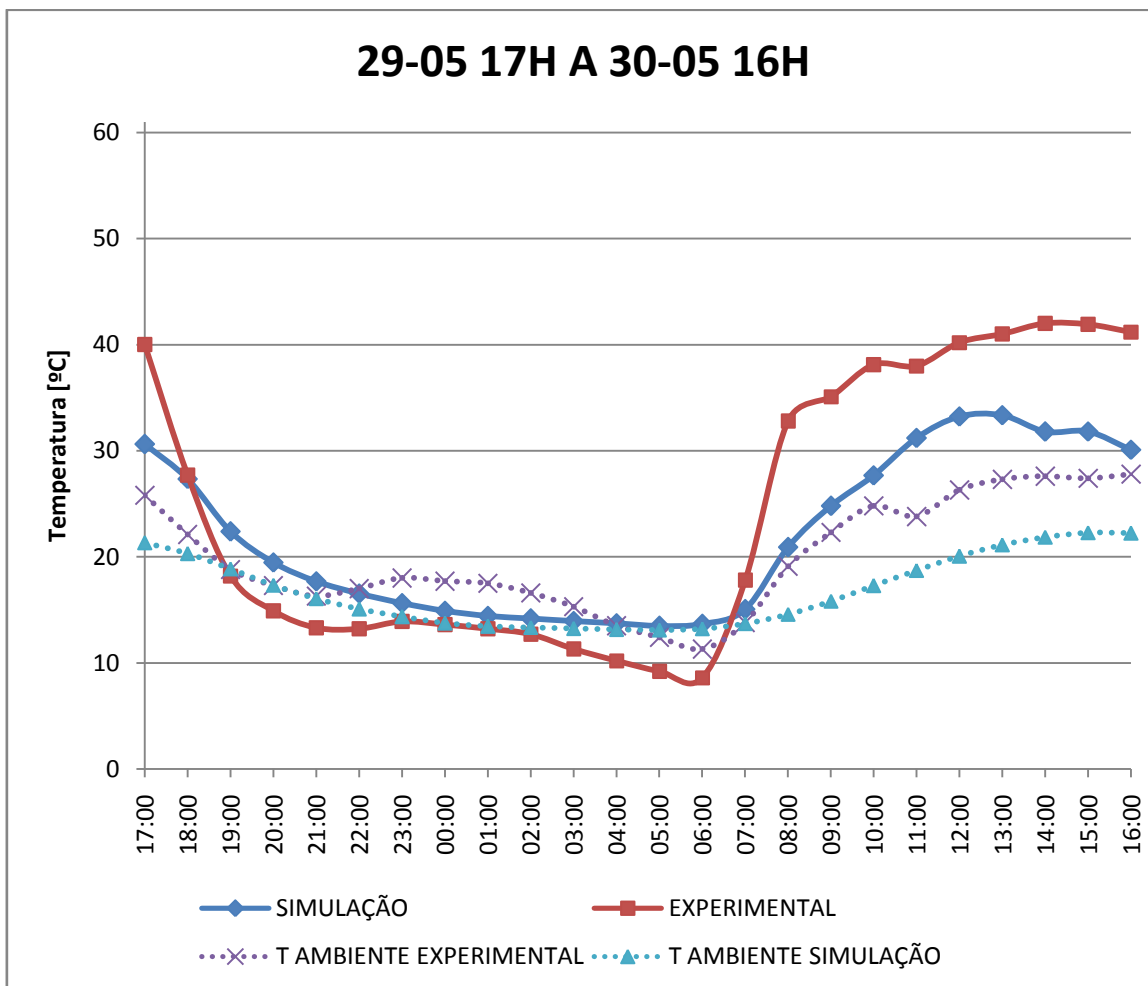


Figura 3.12 - Gráfico comparativo dos ensaios A3.

O gráfico da figura 3.13 mostra a temperatura ambiente e a temperatura no interior da estufa para as condições do ensaio A4, sendo apresentado o intervalo dos resultados da simulação de 28-05 às 17 horas a 29-05 às 16 horas pois é neste intervalo que se obteve a menor diferença média de temperatura ambiente, cujo valor é de 2,94 °C.

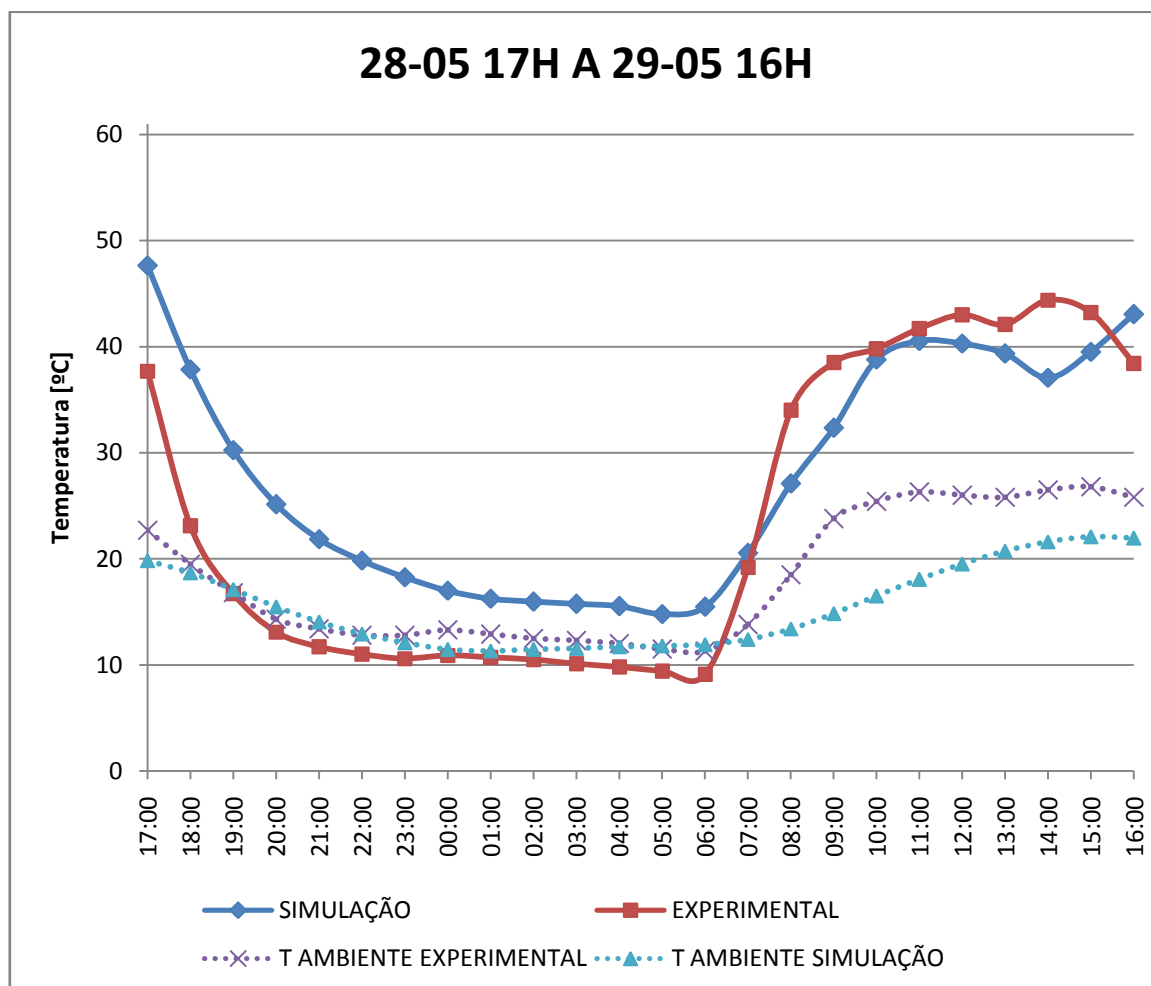


Figura 3.13 - Gráfico comparativo dos ensaios A4.

O gráfico da figura 3.14 mostra a temperatura ambiente e a temperatura no interior da estufa para as condições do ensaio B5, sendo apresentado o intervalo dos resultados da simulação de 28-05 às 17 horas a 29-05 às 16 horas pois é neste intervalo que se obteve a menor diferença média de temperatura ambiente, cujo valor é de 0,85 °C.

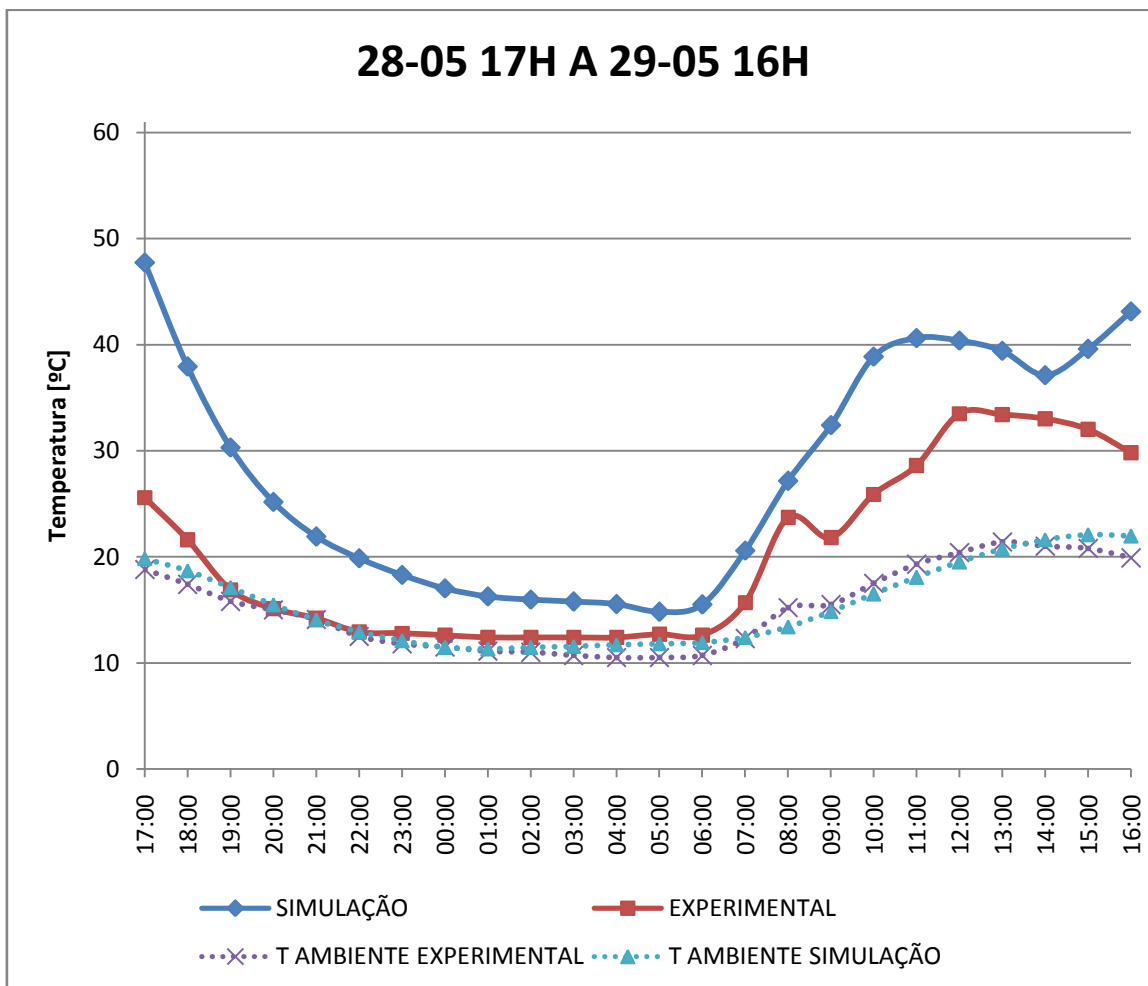


Figura 3.14 - Gráfico comparativo dos ensaios B5.

O gráfico da figura 3.15 mostra a temperatura ambiente e a temperatura no interior da estufa para as condições do ensaio B6, sendo apresentado o intervalo dos resultados da simulação de 01-04 às 17 horas a 02-04 às 16 horas pois é neste intervalo que se obteve a menor diferença média de temperatura ambiente, cujo valor é de 1,36 °C.

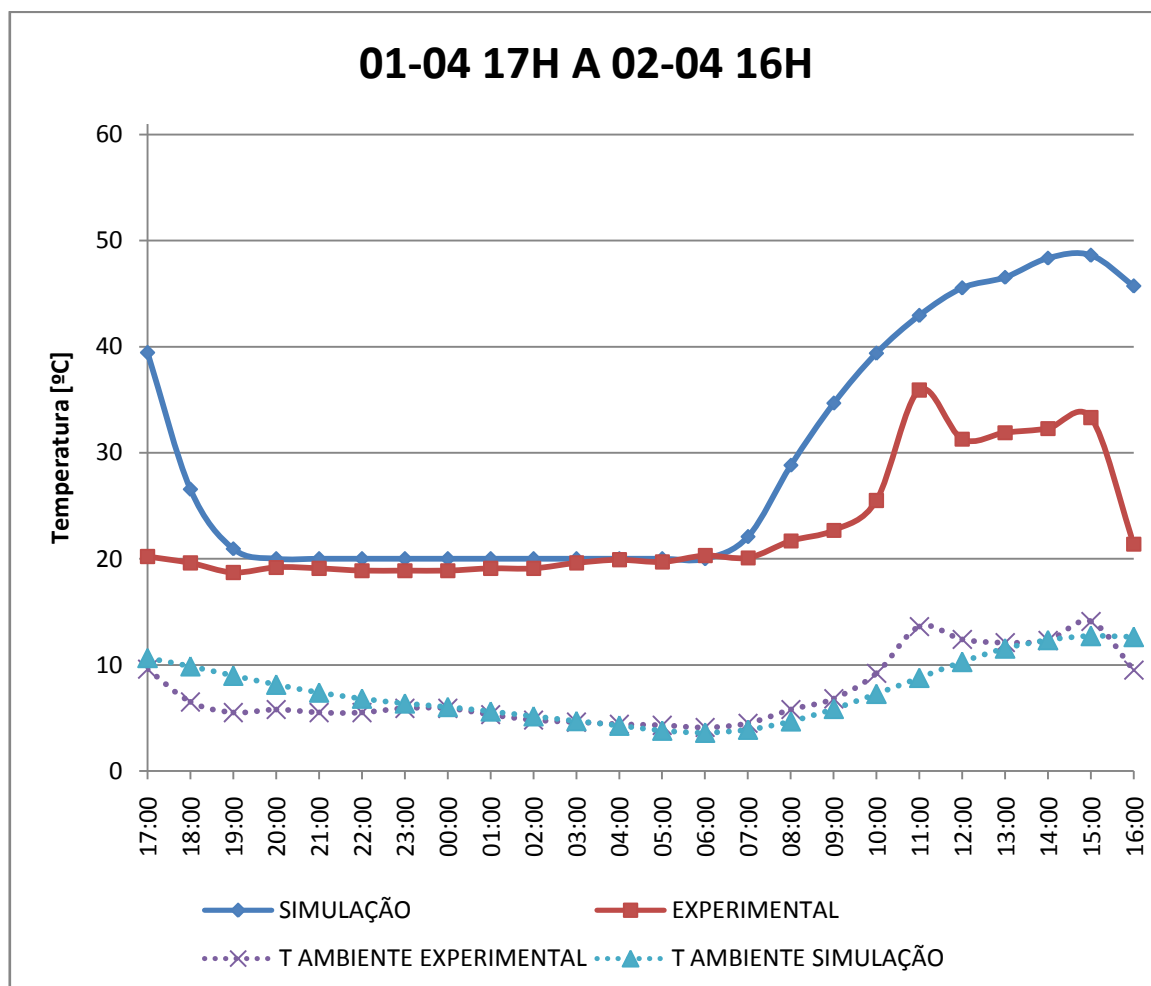


Figura 3.15 - Gráfico comparativo dos ensaios B6.

O gráfico da figura 3.16 mostra a temperatura ambiente e a temperatura no interior da estufa para as condições do ensaio B7, sendo apresentado o intervalo dos resultados da simulação de 29-05 às 17 horas a 30-05 às 16 horas pois é neste intervalo que se obteve a menor diferença média de temperatura ambiente, cujo valor é de 3,00 °C.

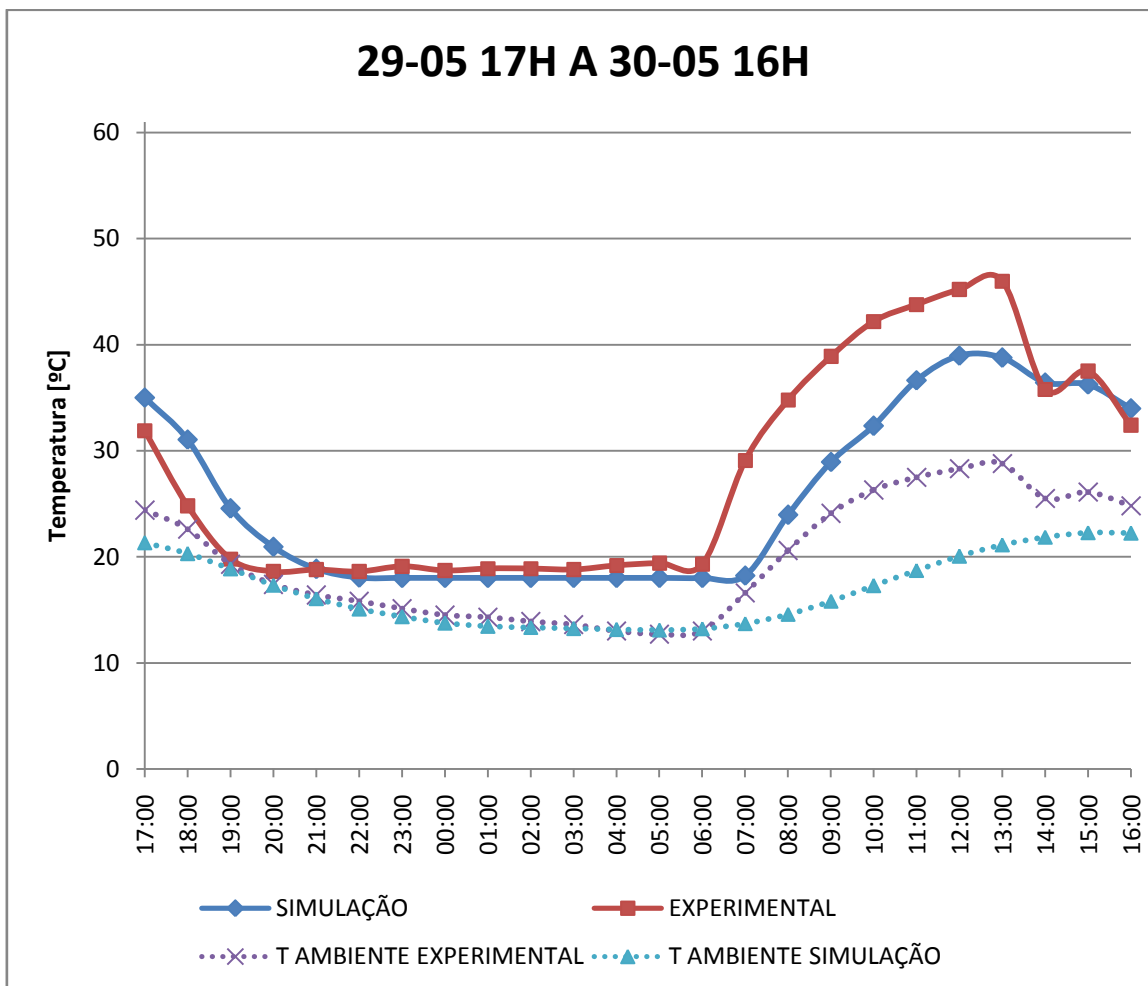


Figura 3.16 - Gráfico comparativo dos ensaios B7.

O gráfico da figura 3.17 mostra a temperatura ambiente e a temperatura no interior da estufa para as condições do ensaio C1, sendo apresentado o intervalo dos resultados da simulação de 15-03 às 17 horas a 16-03 às 16 horas pois é neste intervalo que se obteve a menor diferença média de temperatura ambiente, cujo valor é de 4,80 °C.

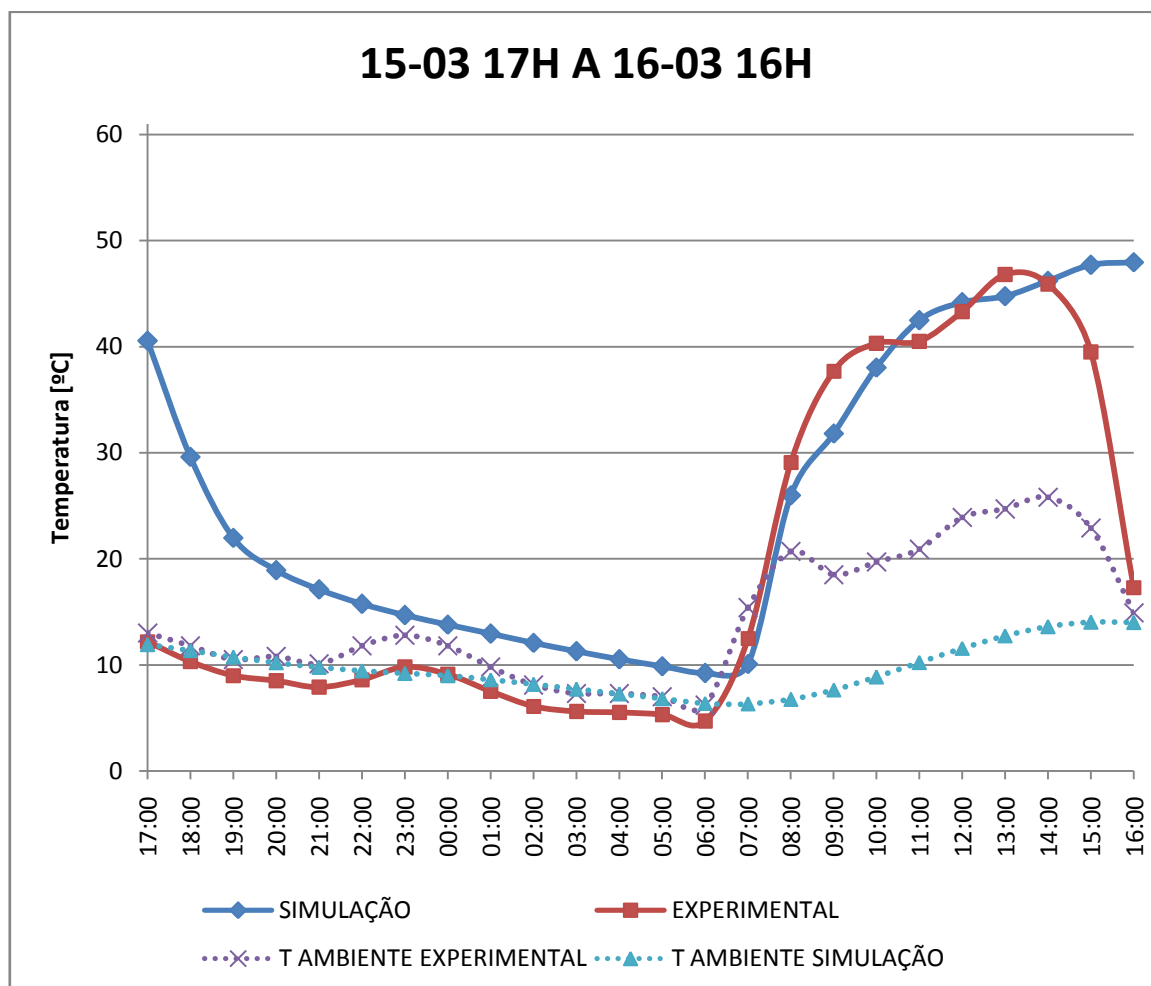


Figura 3.17 - Gráfico comparativo dos ensaios C1.

O gráfico da figura 3.18 mostra a temperatura ambiente e a temperatura no interior da estufa para as condições do ensaio C2, sendo apresentado o intervalo dos resultados da simulação de 25-02 às 17 horas a 26-02 às 16 horas pois é neste intervalo que se obteve a menor diferença média de temperatura ambiente, cujo valor é de 3,55 °C.

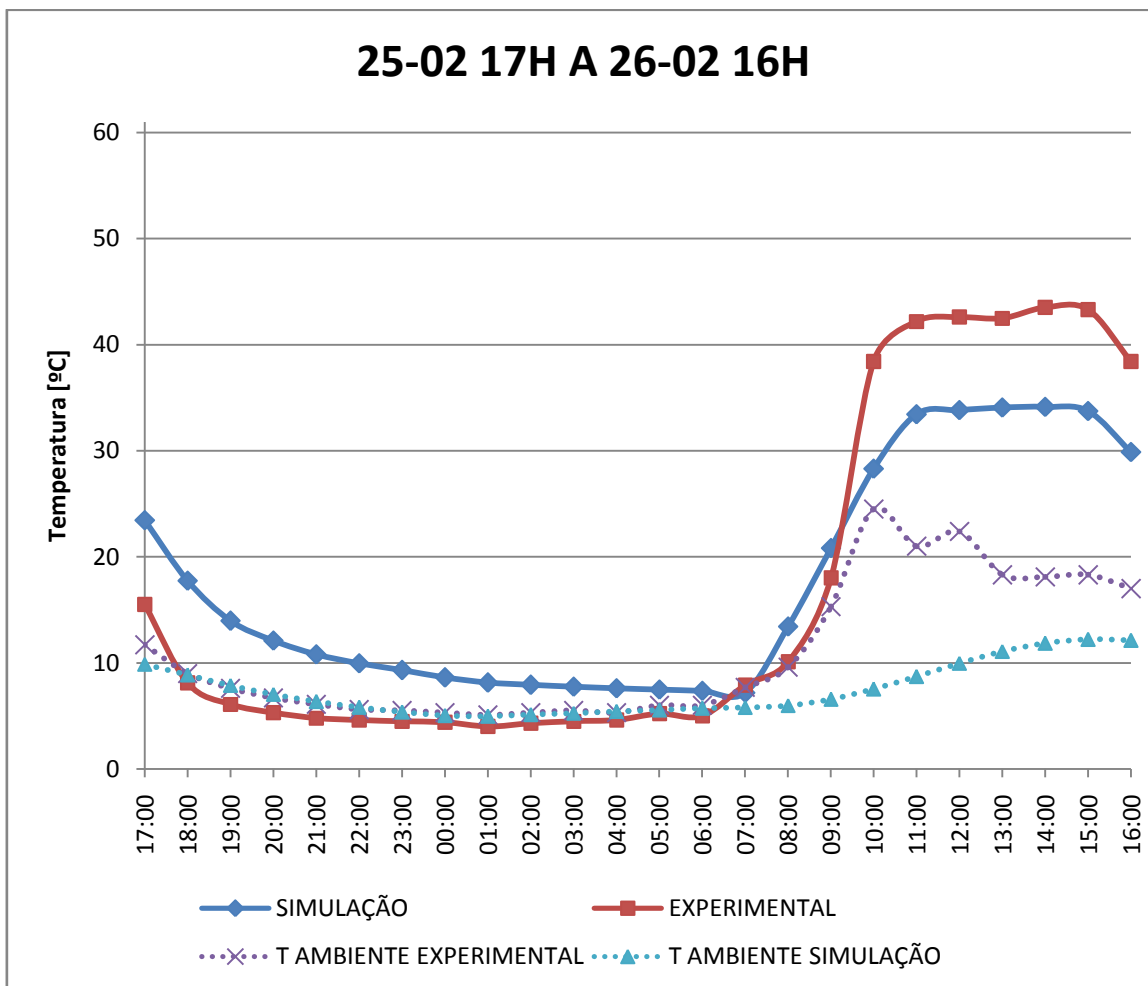


Figura 3.18 - Gráfico comparativo dos ensaios C2.

O gráfico da figura 3.19 mostra a temperatura ambiente e a temperatura no interior da estufa para as condições do ensaio C3, sendo apresentado o intervalo dos resultados da simulação de 15-03 às 17 horas a 16-03 às 16 horas pois é neste intervalo que se obteve a menor diferença média de temperatura ambiente, cujo valor é de 2,20 °C.

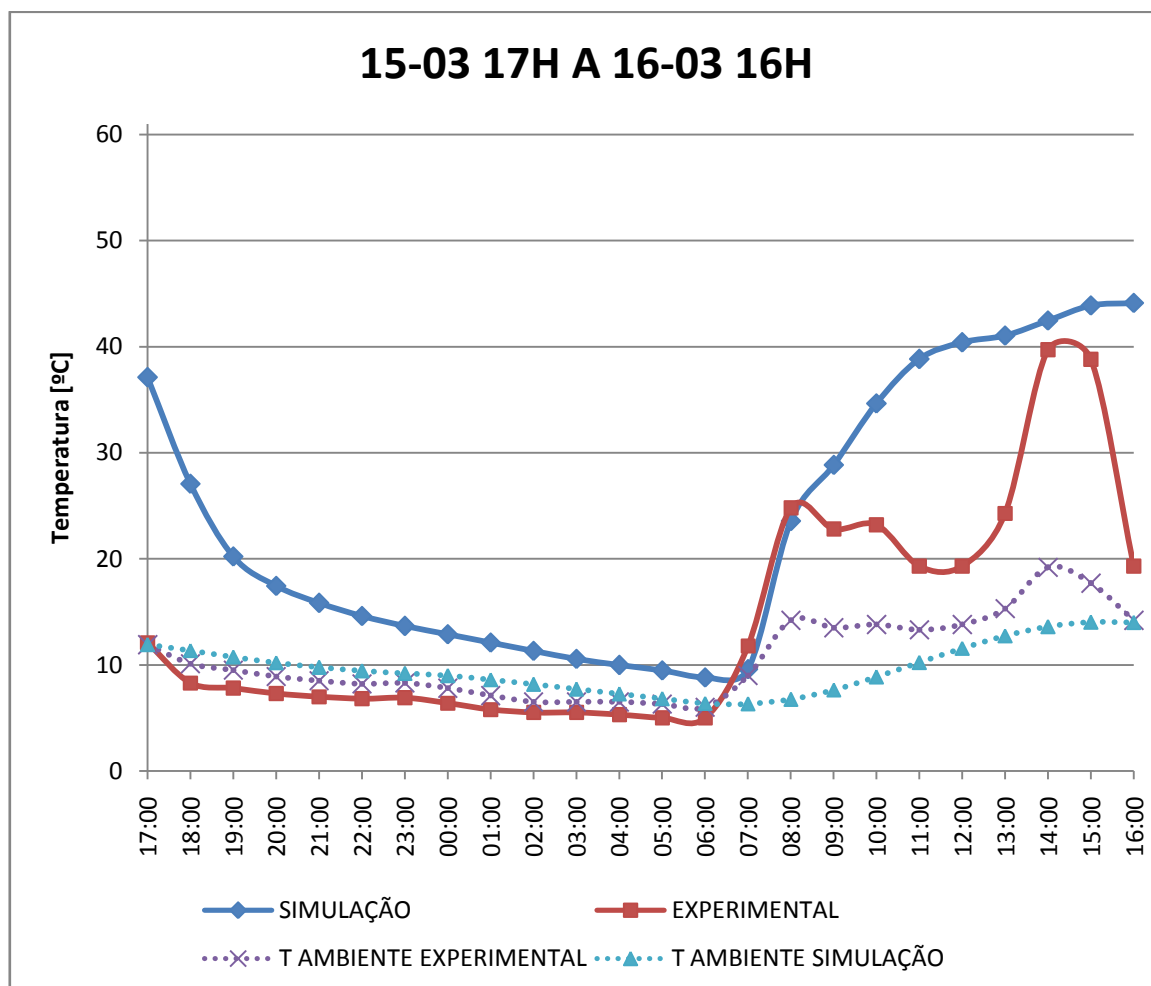


Figura 3.19 - Gráfico comparativo dos ensaios C3.

Após a análise dos gráficos apresentados é possível visualizar que o perfil das curvas da temperatura no interior da estufa de simulação segue um comportamento quase idêntico à curva da temperatura interior experimental, inclusive nos ensaios que utilizaram aquecimento elétrico auxiliar na climatização da estufa, onde se pode ver que a temperatura no interior de ambas as estufas se manteve sempre acima da temperatura de "setpoint" do aquecedor elétrico, o que permite afirmar que a implementação do aquecimento auxiliar nos parâmetros do modelo foi feita corretamente.

É visível também, no entanto, uma discrepância relativamente constante das temperaturas ambiente durante o período de exposição solar que tende a desaparecer durante o período noturno.

Os ensaios com aumento de renovações de ar por hora devido à ventilação mecânica seguem um comportamento semelhante aos restantes ensaios, o que leva a concluir que a configuração da função de ventilação mecânica do programa foi bem executada.

Existem várias razões que possivelmente justifiquem as diferenças de temperatura entre as estufas simuladas e as experimentais. A primeira potencial justificação é a utilização da temperatura ambiente no exterior das estufas como critério comparativo das condições dos ensaios numéricos e experimentais. O critério mais adequado seria a utilização dos valores de radiação solar do local das estufas, pois a radiação solar é a principal fonte de calor das estufas, e apesar da temperatura ambiente no exterior ter uma consequência da radiação solar, existem outros fatores que influenciam a temperatura ambiente, não sendo então uma correlação direta com a exposição solar e por conseguinte não o critério mais adequado. A temperatura ambiente foi, no entanto, utilizada devido a ser o critério mais próximo do ideal para o qual existiam dados experimentais e numéricos, pois os valores de radiação solar não foram medidos experimentalmente durante os ensaios experimentais e não foi possível obter acesso a dados de estações meteorológicas da zona da Covilhã que estejam equipadas para medir valores de radiação solar.

Outra possível justificação tem que ver com detalhes dos métodos utilizados para recolha de dados durante os ensaios experimentais. Particularmente, a medição da temperatura ambiente experimental foi feita através de um termómetro digital no local durante os ensaios enquanto que a temperatura ambiente da simulação é proveniente do ficheiro de dados climatéricos da Covilhã, cujos foram recolhidos através de equipamento de estação meteorológica na zona. A diferença nos equipamentos e podem induzir diferenças nos resultados dos ensaios.

Oscilações pontuais mais acentuadas na temperatura ambiente medida experimentalmente também apontam para pequenas falhas durante o ensaio ou implementação dos métodos de recolha de dados. As oscilações na temperatura interior da estufa é expectável consoante a exposição solar varia entre direta e difusa, especialmente quando tendo em conta as dimensões reduzidas da estrutura que, devido a isso, tem uma baixa inércia térmica sendo então de esperar que a temperatura no seu interior seja capaz de variar rapidamente. No entanto, comparando a temperatura ambiente das simulações, cujos valores foram obtidos por estação meteorológica como já mencionado, é visível que não existem oscilações pontuais acentuadas na mesma. Este facto aponta então para potenciais problemas durante os ensaios experimentais ou erros dos equipamentos de medição.

A utilização das propriedades do material da cobertura provenientes da literatura relativa a polietileno ao invés da utilização dos valores fornecidos pelo fabricante das propriedades necessárias é outro fator com potencial para induzir discrepâncias. Esta situação ocorreu, no entanto, devido a não ser possível por parte do fabricante disponibilizar os dados requeridos.

Por fim, o valor das infiltrações da estufa teve de ser estimado, o que poderá divergir significativamente do valor real e não ser constante durante todo o dia, particularmente devido às características estruturais da estufa em estudo e em dias de maior intensidade de vento.

A combinação das situações mencionadas torna plausível a diferença experienciada entre os ensaios numéricos e experimentais. O comportamento geral é, no entanto, extremamente semelhante, permitindo concluir que o software utilizado é capaz de simular uma estufa com uma precisão razoável.

3.4. Nota conclusiva

Sempre que recorre à simulação computacional de uma estrutura existe a necessidade de avaliar se a ferramenta é capaz de produzir resultados coerentes com a realidade. Com isso em mente, foi escolhida uma estufa existente na Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior para ser modelada no software DesignBuilder. Neste capítulo foi descrito detalhadamente o processo de modelação com o intuito de incluir toda a informação utilizada de modo a que seja possível reconstruir o modelo aqui apresentado se necessário.

Após a modelação, os parâmetros dos ensaios experimentais realizados anteriormente foram introduzidos, os dias mais adequados para comparação dos resultados foram determinados, e os resultados dos ensaios apresentados.

A análise dos resultados mostrou que o programa e o modelo feito foram capazes de produzir resultados coerentes com a realidade. Existem discrepâncias entre os resultados numéricos e experimentais, com as possíveis causas para tal expostas. O comportamento térmico numérico extremamente semelhante ao experimental também permite com firmeza utilizar este modelo como base para a avaliação dos efeitos da variação dos parâmetros de operação da estufa no seu comportamento térmico.

4. Estudo de casos

O capítulo que se segue é dedicado aos estudos de caso que foram simulados com base no modelo descrito no capítulo anterior. Estes estudos de caso permitem avaliar o impacto da variação de diferentes parâmetros construtivos e operacionais da estufa. Os resultados destes estudos são apresentados graficamente juntamente com os resultados da estufa de referência abordada no capítulo anterior.

4.1. Aspectos referentes à modelação

Para a realização de estudos de caso a partir dos quais seja possível tirar conclusões é necessário garantir que apenas se variam os parâmetros em estudo e que os restantes se mantêm fixos entre o caso em estudo e o modelo de referência. Com isto em mente, partiu-se do modelo em referência desenvolvido no capítulo anterior e de seguida foram alterados os parâmetros desejados, garantindo assim que todas as características restantes se mantêm constantes.

Sendo assim, as simulações dos estudos de caso foram realizadas com os mesmos dados climatéricos, ou seja, dados da zona da Covilhã cujo ano de referência é 2002. Todos os outros aspetos construtivos e operacionais foram mantidos, tais como materiais de construção, dimensões, aberturas, taxa de infiltrações, e todos os outros mencionados na secção dedicada à descrição do modelo numérico, exceto aqueles explicitamente mencionados na descrição de cada um dos casos que se seguem.

De seguida apresenta-se uma tabela com os parâmetros variados em cada caso em estudo, de forma a permitir uma consulta rápida das situações avaliadas. Para os casos que carecem de informação adicional, especificamente figuras ilustrativas das alterações feitas, estas serão expostas imediatamente a seguir.

Tabela 4.1 - Parâmetros variados em cada estudo de caso.

Estudo de caso	Parâmetro alterado
EC1	Geometria - Perfil em arco de circunferência
EC2	Geometria - Perfil em semi-circunferência
EC3	Geometria - Perfil em semi-circunferência elevada
EC4	Rotação de 90° no sentido contrário aos ponteiros do relógio da estufa
EC5	Proteção noturna dos envidraçados
EC6	Taxa de renovação de ar - 1 ac/h
EC7	Taxa de renovação de ar - 2 ac/h
EC8	Taxa de renovação de ar - 3 ac/h
EC9	Taxa de renovação de ar - 4 ac/h
EC10	Taxa de renovação de ar - 5 ac/h
EC11	Cobertura dupla com camada de ar intercalar de 13mm de espessura
EC12	Cobertura tripla com camadas de ar intercalares de 13mm de espessura
EC13	Emissividade exterior - 0,1
EC14	Emissividade exterior - 0,3
EC15	Emissividade exterior - 0,5
EC16	Emissividade exterior - 0,9
EC17	Emissividade interior - 0,1
EC18	Emissividade interior - 0,3
EC19	Emissividade interior - 0,5
EC20	Emissividade interior - 0,9
EC21	Parede norte em granito - 40cm espessura e "grounded"
EC22	Parede norte em granito - 60cm espessura e "grounded"
EC23	Parede norte em granito - 100cm espessura e "grounded"
EC24	Transmissividade solar - 0,7
EC25	Transmissividade solar - 0,9

Não incluído nesta tabela estão os ensaios EC26 e EC27, sendo estes ensaios que variam múltiplas características, sendo descritos detalhadamente no final desta secção.

Nos ensaios onde a geometria da estufa foi modificada, o critério de coerência utilizado foi a área de implementação da estufa. Outros critérios, tais como o volume total da estufa, a área exposta à radiação solar, ou a área da parede norte podiam ter sido adotados, sendo que estes seriam possivelmente fornecedores de informação mais relevante quando visto de uma ótica estritamente científica, no entanto o critério da área de implementação da estufa foi escolhido devido a ser o mais relevante numa situação prática de projeto de uma estufa, pois a limitação principalmente durante o projeto é a área do terreno que pode ser utilizada para construção, então estudar diferentes configurações da estufa que façam utilização da mesma é o mais relevante de um ponto de vista prático.

No ensaio EC1 a geometria da estufa foi alterada para ter um perfil lateral de 1/4 de um arco de circunferência de 2 m de raio. As figuras 4.1 e 4.2 ilustram esta configuração.

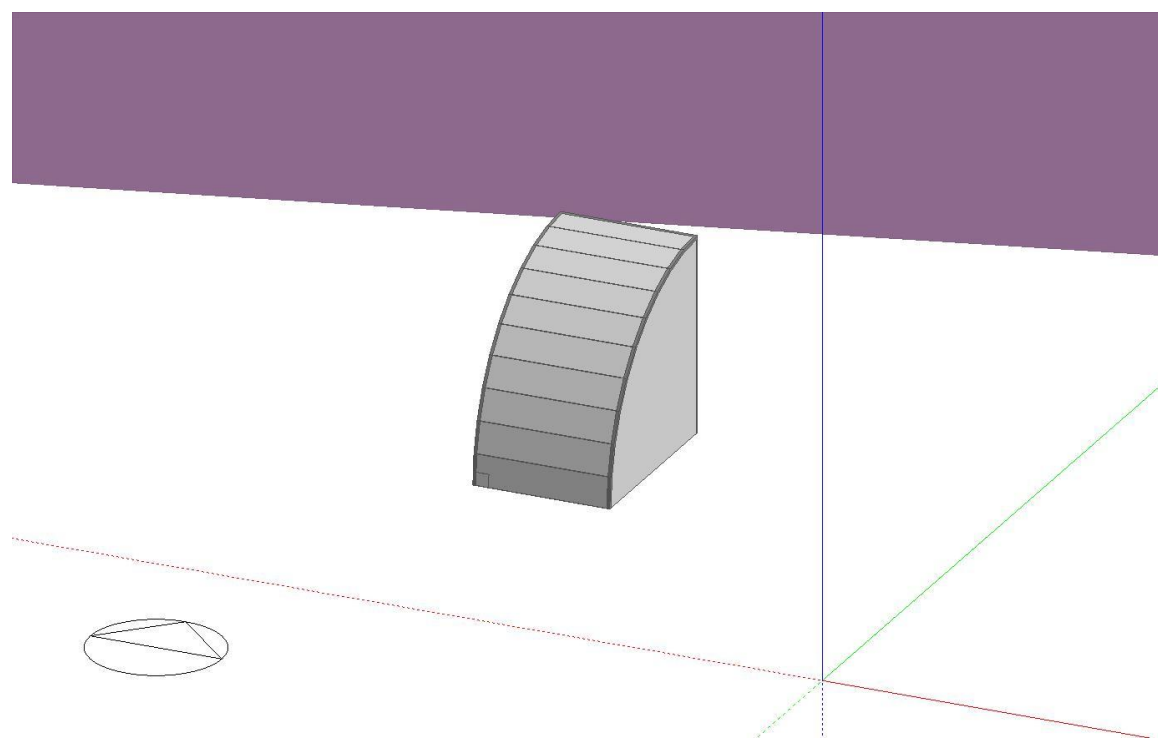


Figura 4.1 - Visualização da geometria do ensaio EC1.

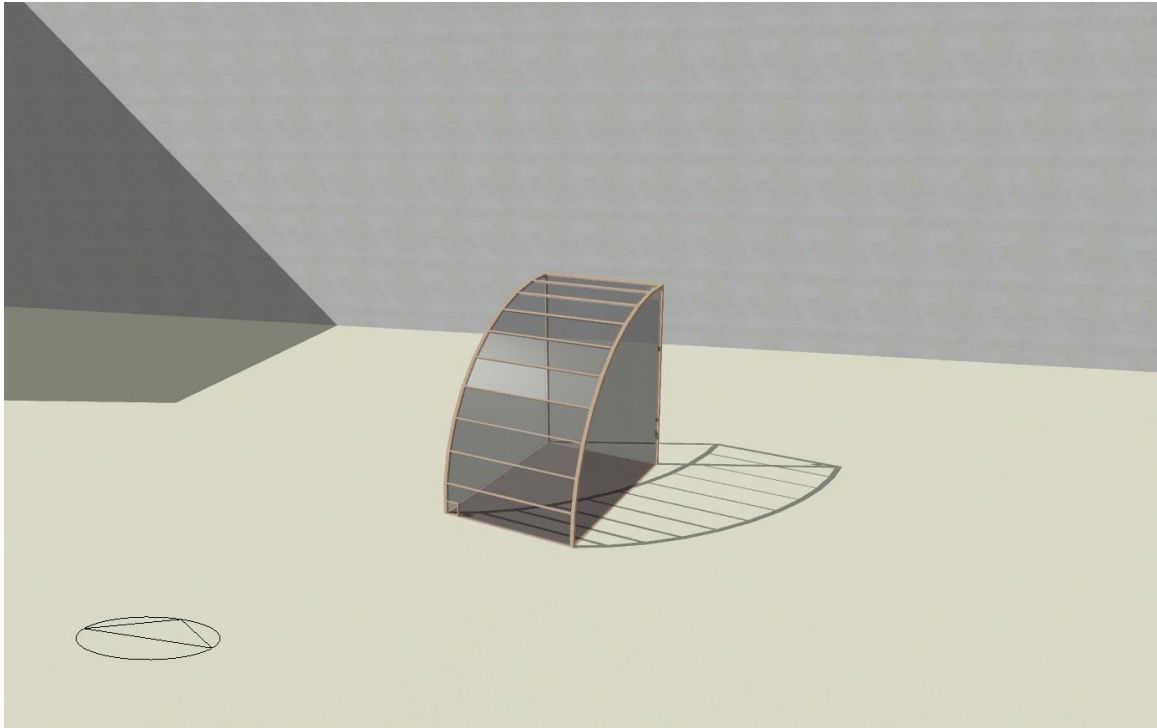


Figura 4.2 - "Render" da geometria do ensaio EC1.

No ensaio EC2 a geometria da estufa foi alterada para ter um perfil de uma semi-circunferência. Por forma a cumprir o critério de área de implementação constante, esta semi-circunferência tem 1 m de raio, perfazendo assim os 2 m de profundidade da base da estufa. As figuras 4.3 e 4.4 ilustram esta configuração.

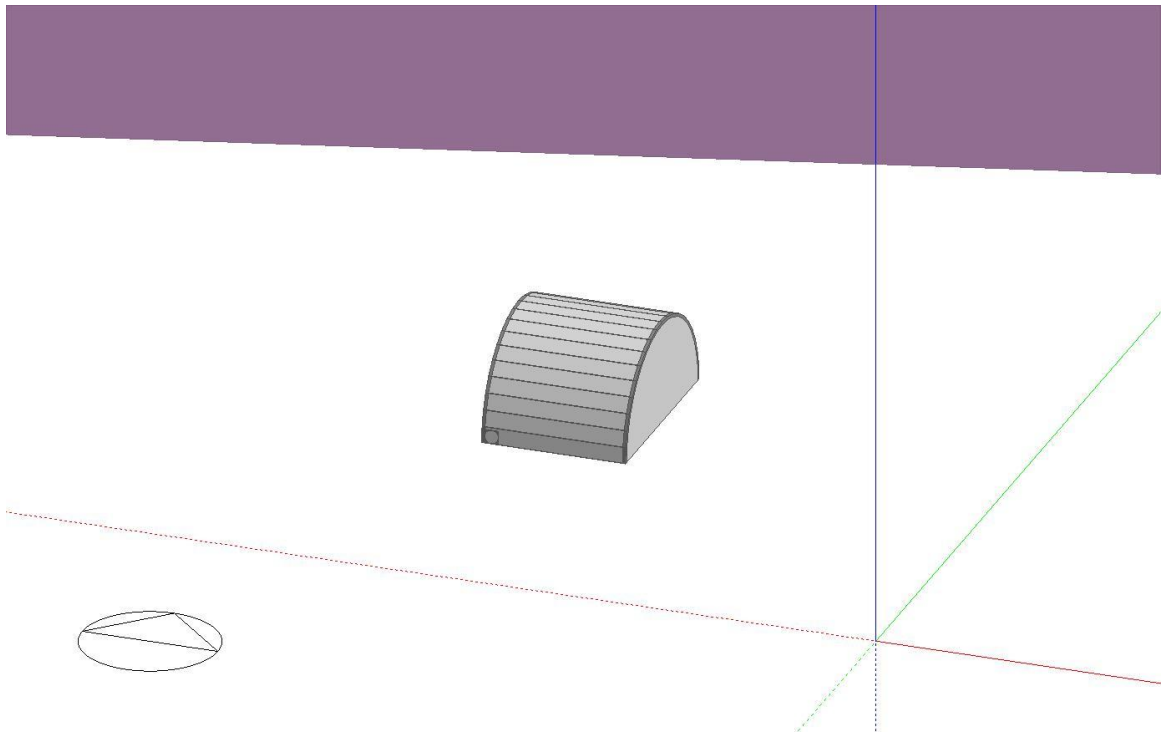


Figura 4.3 - Visualização da geometria do ensaio EC2.

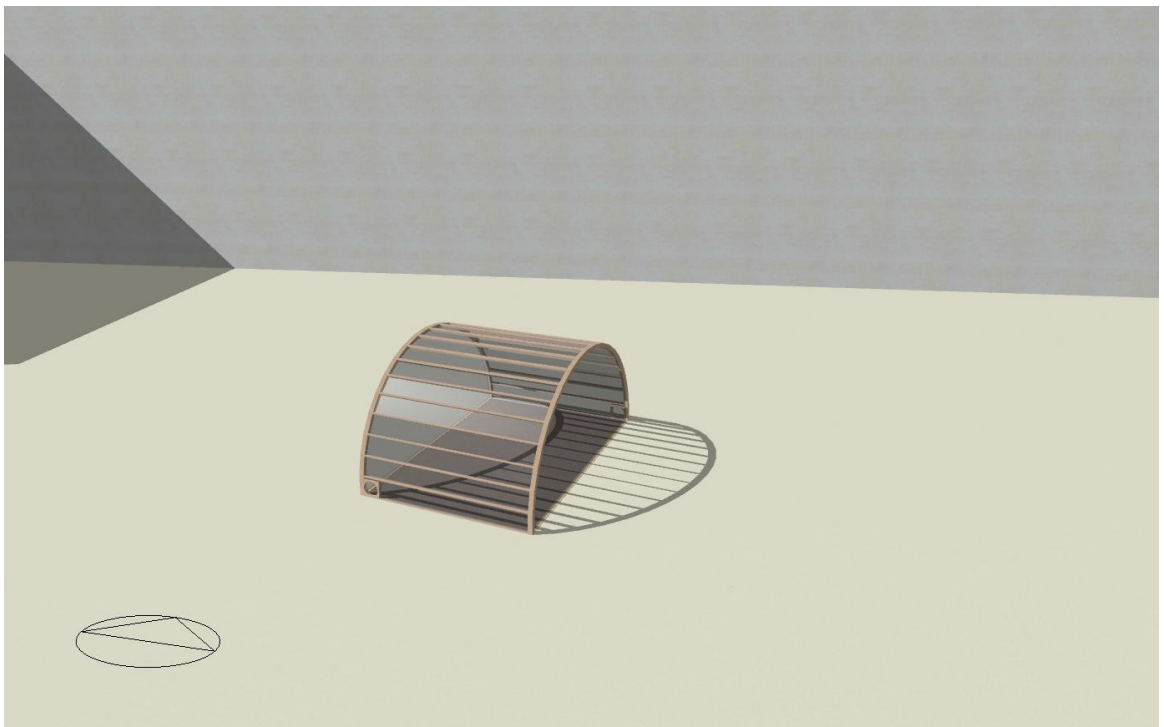


Figura 4.4 - "Render" da geometria do ensaio EC2.

No ensaio EC3 a geometria da estufa foi alterada para ter um perfil de uma semi-circunferência semelhante ao anterior mas desta vez colocado no topo de um perfil rectangular ao invés de

em contacto direto com o solo. Por forma a cumprir o critério de área de implementação constante, esta semi-circunferência tem 1 m de raio, perfazendo assim os 2 m de profundidade da base da estufa. A secção rectangular abaixo da secção semi-circular tem 1,1 m de altura, fazendo com que a estufa tenha no seu ponto mais alto 2,1 m de altura. As figuras 4.5 e 4.6 ilustram esta configuração.

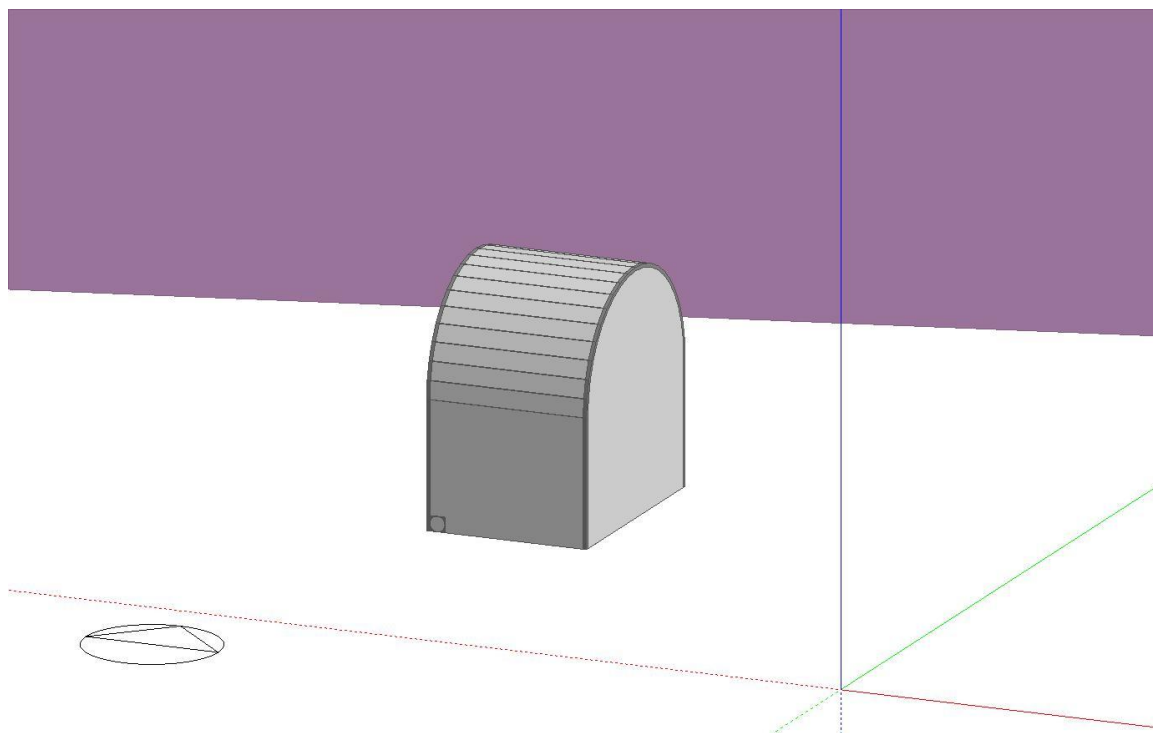


Figura 4.5 - Visualização da geometria do ensaio EC3.

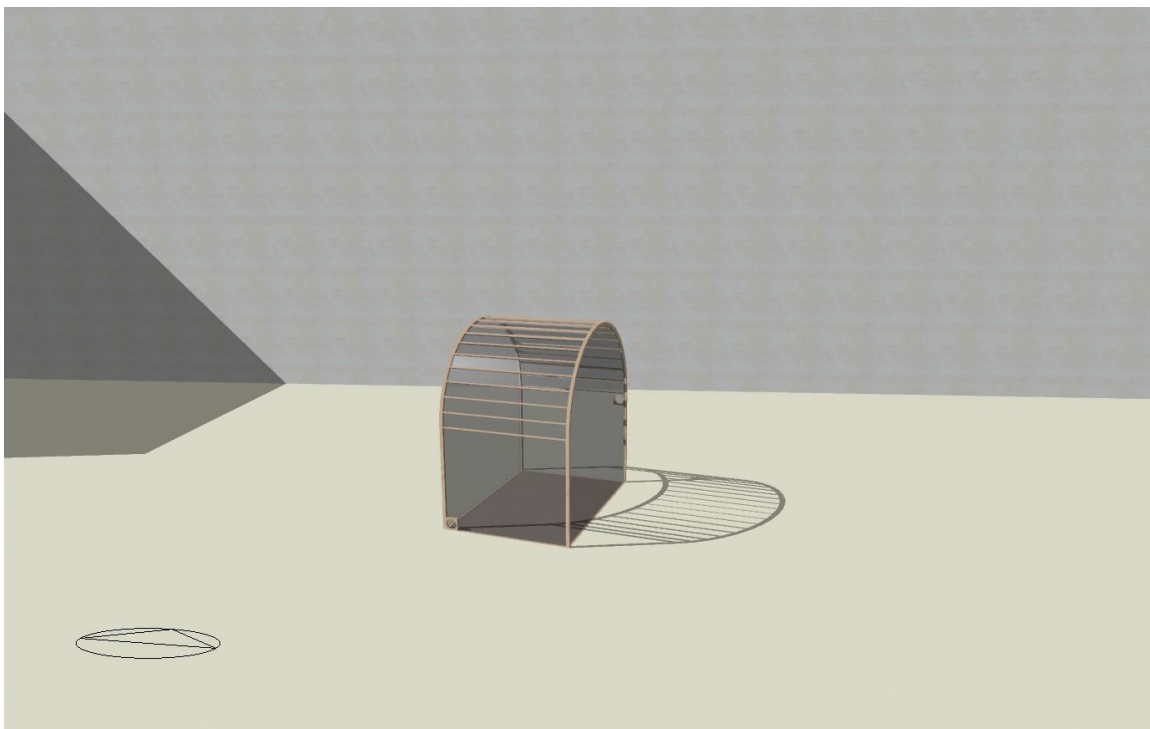


Figura 4.6 - "Render" da geometria do ensaio EC3.

O ensaio EC4 tem a estufa de referência rodada de 90° no sentido contrário aos ponteiros do relógio, ou seja, a parede originalmente a sul é agora a parede este. Esta configuração coloca a estufa com a dimensão mais longa ao longo do eixo este-oeste, reduzindo assim as áreas das paredes este e oeste e aumentando as áreas paredes norte e sul. As figuras 4.7 e 4.8 ilustram esta configuração.

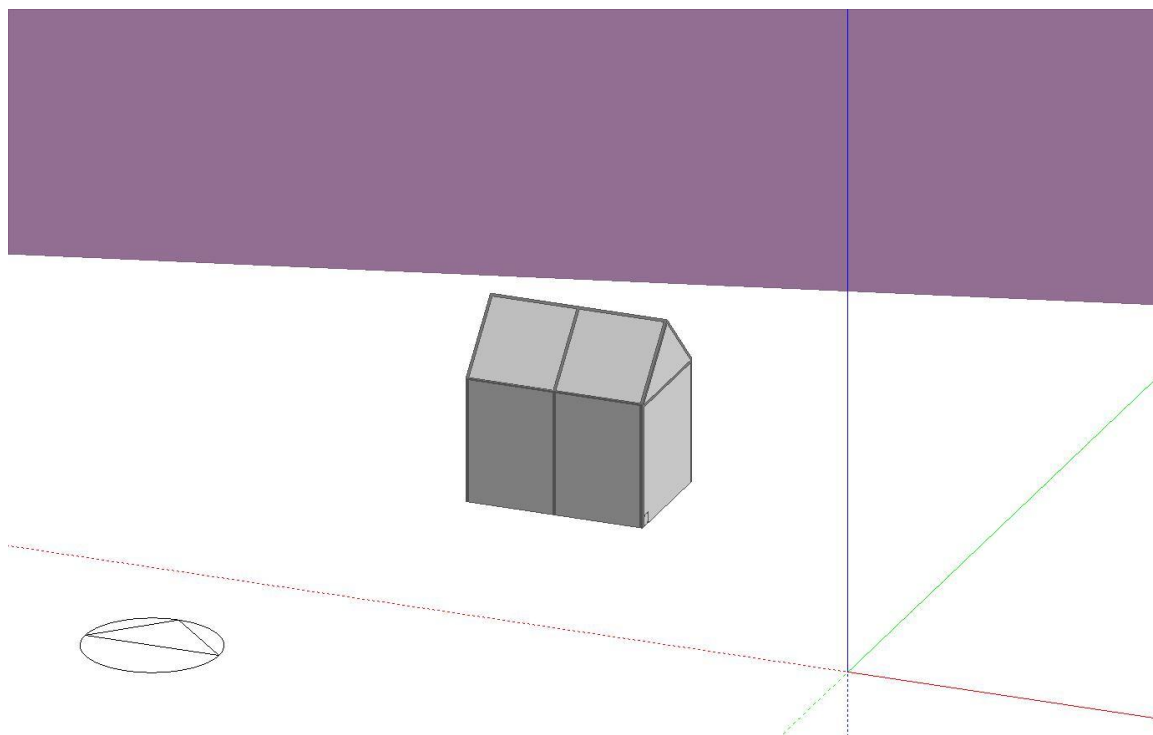


Figura 4.7 - Visualização da geometria do ensaio EC4.

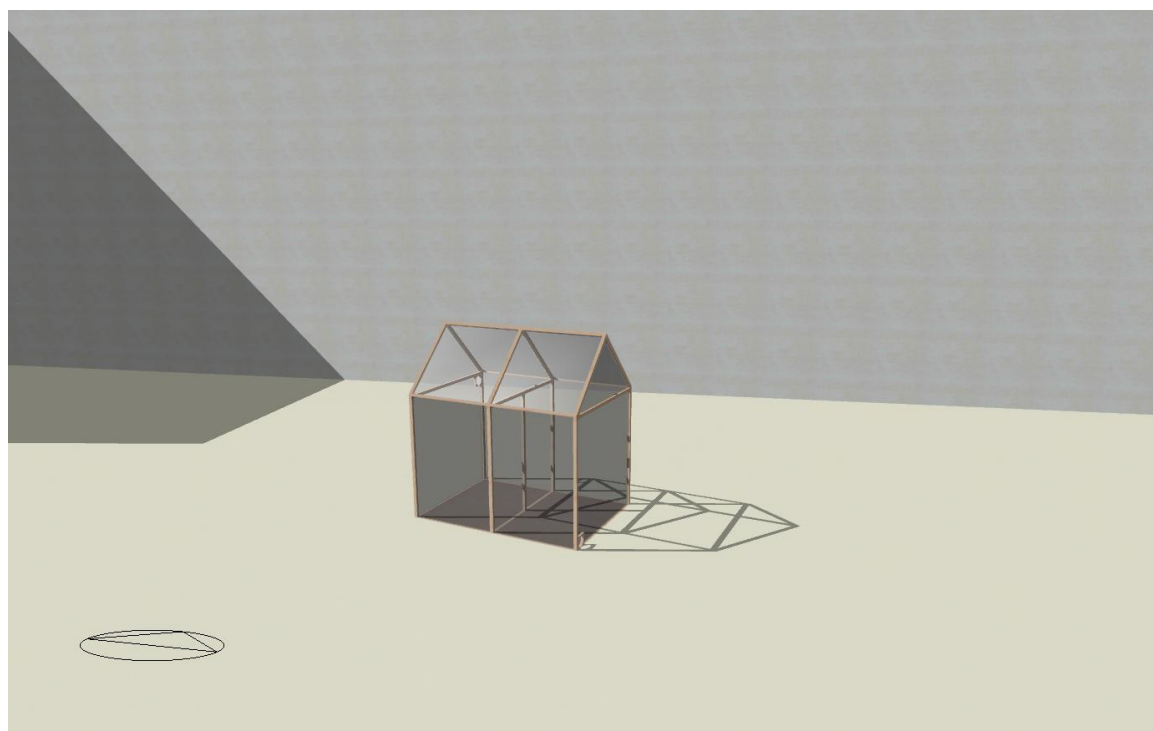


Figura 4.8 - "Render" da geometria do ensaio EC4.

No ensaio EC5 foi simulado o efeito de uma proteção que é colocada no lado exterior das superfícies envidraçadas durante o período noturno. As características desta cobertura são

definidas pelo "template" incluído com o DesignBuilder escolhido, chamado "High reflectance - low transmittance shade". Este "template" foi escolhido devido às suas características de alta refletividade e baixa transmissividade, adequadas para uma proteção noturna que reduza as perdas térmicas. Estas proteções são removidas durante todo o período em que existe radiação solar direta ou difusa.

Os ensaios EC6 a EC10 consistem na simples variação da taxa de renovação de ar, constante durante toda a duração dos ensaios.

Os ensaios EC11 e EC12 consistem na variação do envidraçado, composto por duas e três camadas da mesma cobertura em polietileno, respetivamente, com intervalos entre camadas de 13 mm e insufladas com ar.

Nos ensaios EC13 a EC16 e EC17 a EC20 a emissividade do lado exterior e interior, respetivamente, do envidraçado é alterada.

Nos ensaios EC21 a EC23 a parede norte da estufa foi substituída por uma parede maciça em granito de 40 cm, 60 cm, e 100 cm, respetivamente. Esta parede está posteriormente imposta com a condição "grounded", que trata a parede como em contacto com o terreno/solo, semelhante ao que acontece com paredes de caves ou de habitações construídas contra uma encosta ou estrutura de suporte de terreno. As figuras 4.9 e 4.10 mostram o pormenor da construção da parede norte destes ensaios. É de notar que a espessura da parede não é representada visualmente, isto é, independentemente da espessura da parede, esta aparenta ter sempre a mesma espessura na representação gráfica. É também de notar que o componente que define a condição "grounded", representado a verde na figura 4.9 e a cinzento na figura 4.10 tem espessura representada mas esta existe apenas para facilitar a modelação, não influenciado os resultados pois a condição "grounded" define que a parede está em contacto com terreno com características iguais às do solo e que este contacto, para efeitos térmicos, tem espessura infinita, semelhante ao que acontece em paredes de estruturas subterrâneas.

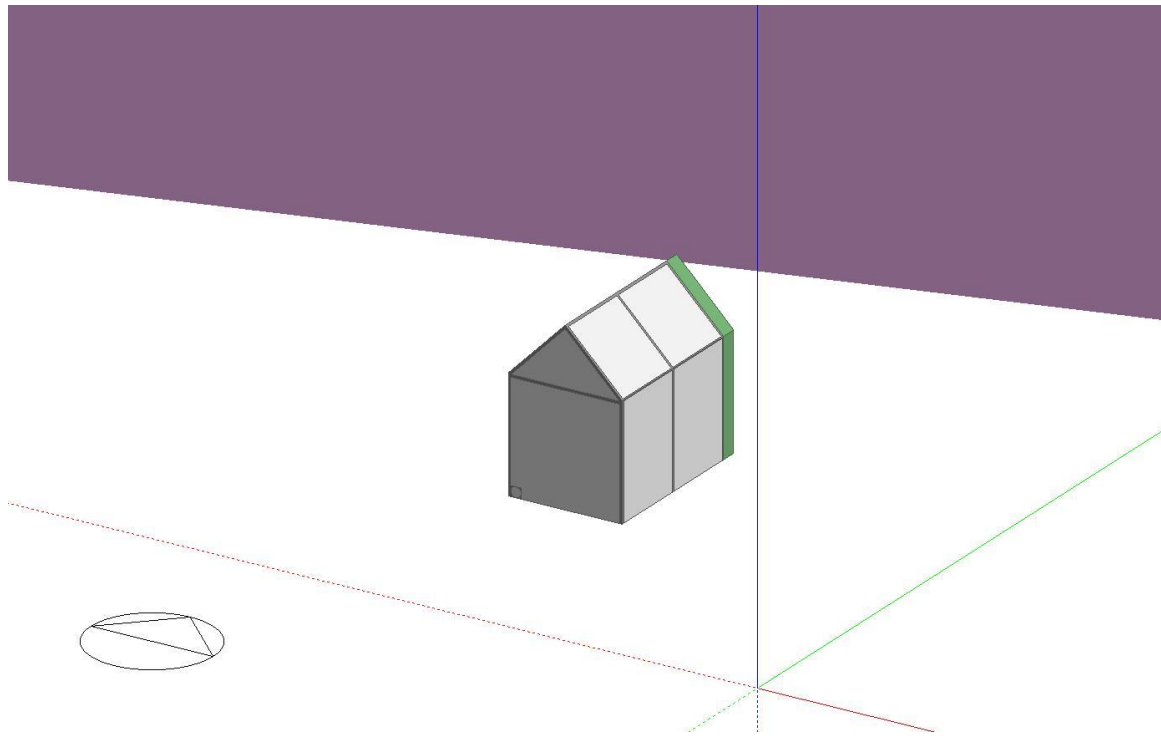


Figura 4.9 - Visualização da geometria dos ensaios EC21 a EC23.

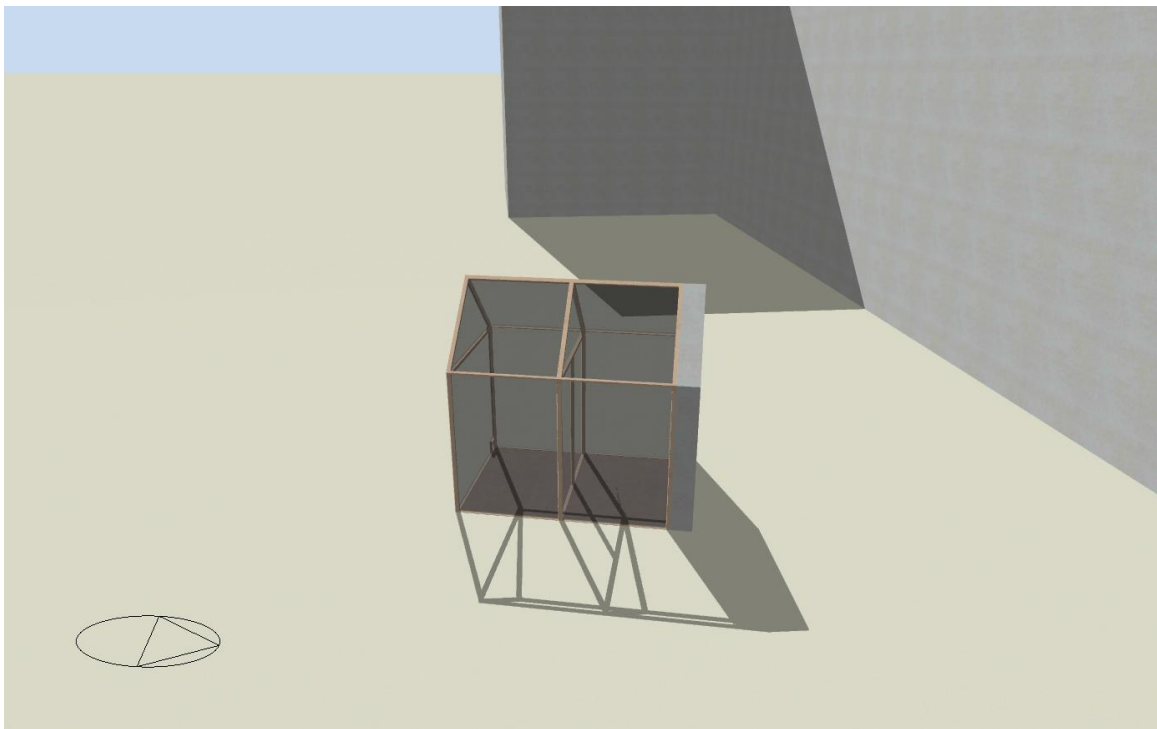


Figura 4.10 - "Render" da geometria dos ensaios EC21 a EC23.

Nos ensaios EC24 e EC25 a transmissividade solar do envidraçado é alterada.

Por fim, o ensaios EC26 e EC27, não incluído na tabela 4.1, consiste na variação de vários parâmetros em simultâneo contrariamente ao que foi feito em todos os ensaios anteriores. Estes ensaios estão a ser abordados em simultâneo pois apesar de vários parâmetros terem sido alterados relativamente à estufa utilizada na validação, entre eles apenas existe a diferença no "setpoint" da temperatura mínima que deve ser mantida no interior da estufa pelo sistema auxiliar de aquecimento.

Os parâmetros alterados para a realização destes ensaios são: configuração da estufa de referência rodada de 90° no sentido contrário aos ponteiros do relógio, igualmente ao ensaio EC4; envidraçado duplo de polietileno com espaçamento de 13 mm insuflado com ar, igualmente ao ensaio EC11; emissividade do lado interior de ambas as camadas do polietileno de 0,3; proteção noturna "High reflectance - low transmittance shade", igualmente ao ensaio EC5; parede norte em granito de 40 cm de espessura e com a condição "grounded" aplicada, semelhante ao ensaio EC21, com a exceção de que devido à rotação da estufa nestes ensaios, a parede norte tem dimensões diferentes da parede norte do ensaio EC21.

Outro parâmetro alterado foi a variação da taxa de renovação de ar, mas que nestes ensaios não é constante durante todo o período de simulação. A figura seguinte mostra a configuração das renovações de ar na janela de configuração do programa. A configuração foi feita com o intuito de reduzir as oscilações de temperatura sentidas no interior, onde se pode ver que: nos meses de janeiro, fevereiro, outubro, novembro e dezembro não foi ativada a ventilação mecânica; nos meses de março e abril a ventilação funciona das 10 horas às 17 horas, com intensidade de 40% do máximo, sendo o máximo definido de 5 ac/h, ou seja, 2 ac/h; nos meses de maio, junho e setembro a ventilação funciona das 9 horas às 18 horas a 80%, ou seja, a 4 ac/h; nos meses de julho e agosto a ventilação funciona das 8 horas às 19 horas a 100%.

Month	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Feb	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Mar	10:00 - 17:00 A 40PER	10:00 - 17:00 A 40PER	10:00 - 17:00 A 40PER	10:00 - 17:00 A 40PER	10:00 - 17:00 A 40PER	10:00 - 17:00 A 40PER	10:00 - 17:00 A 40PER
Apr	10:00 - 17:00 A 40PER	10:00 - 17:00 A 40PER	10:00 - 17:00 A 40PER	10:00 - 17:00 A 40PER	10:00 - 17:00 A 40PER	10:00 - 17:00 A 40PER	10:00 - 17:00 A 40PER
May	9:00 - 18:00 A 80PER	9:00 - 18:00 A 80PER	9:00 - 18:00 A 80PER	9:00 - 18:00 A 80PER	9:00 - 18:00 A 80PER	9:00 - 18:00 A 80PER	9:00 - 18:00 A 80PER
Jun	9:00 - 18:00 A 80PER	9:00 - 18:00 A 80PER	9:00 - 18:00 A 80PER	9:00 - 18:00 A 80PER	9:00 - 18:00 A 80PER	9:00 - 18:00 A 80PER	9:00 - 18:00 A 80PER
Jul	8:00 - 19:00 A 100PER	8:00 - 19:00 A 100PER	8:00 - 19:00 A 100PER	8:00 - 19:00 A 100PER	8:00 - 19:00 A 100PER	8:00 - 19:00 A 100PER	8:00 - 19:00 A 100PER
Aug	8:00 - 19:00 A 100PER	8:00 - 19:00 A 100PER	8:00 - 19:00 A 100PER	8:00 - 19:00 A 100PER	8:00 - 19:00 A 100PER	8:00 - 19:00 A 100PER	8:00 - 19:00 A 100PER
Sep	9:00 - 18:00 A 80PER	9:00 - 18:00 A 80PER	9:00 - 18:00 A 80PER	9:00 - 18:00 A 80PER	9:00 - 18:00 A 80PER	9:00 - 18:00 A 80PER	9:00 - 18:00 A 80PER
Oct	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Nov	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Dec	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off

Figura 4.11 - Configuração do funcionamento da ventilação mecânica dos ensaios EC26 a EC27.

O último parâmetro variado é o já mencionado "setpoint" da temperatura mínima desejada no interior da estufa. O "setpoint" do ensaio EC26 é de 21 °C e 24 °C para o ensaio EC27. O sistema auxiliar de aquecimento nestas simulações é idêntico ao definido no modelo de referência. Estas temperaturas de "setpoint" foram escolhidas devido a serem temperaturas de

funcionamento de estufas no inverno e verão, respetivamente, adequadas, que permitem a produção de uma grande variedade dos diferentes produtos hortícolas mais consumidos (Tüzel *et al*, 2017).

Finalmente, neste ensaio não foram utilizados os resultados da simulação da estufa de referência tal como apresentados no capítulo 3 desta dissertação. Devido à quantidade de alterações feitas, foi considerado que uma comparação entre a estufa inicial e as estufas dos ensaios EC26 e EC27 não seria a que produziria resultados mais relevantes. Com isto em mente, foi então definido que a comparação mais adequada seria a comparação com a estufa de referência mas sujeita às mesmas condições de taxa de renovações de ar, e com um "setpoint" para a temperatura mínima intermédio de 22,5 °C. Os resultados apresentados na secção seguinte para estes ensaios incluem então como valores de referência a estufa de referência com as características mencionadas alteradas.

As figuras 4.12 e 4.13 ilustram as configurações EC26 e EC27.

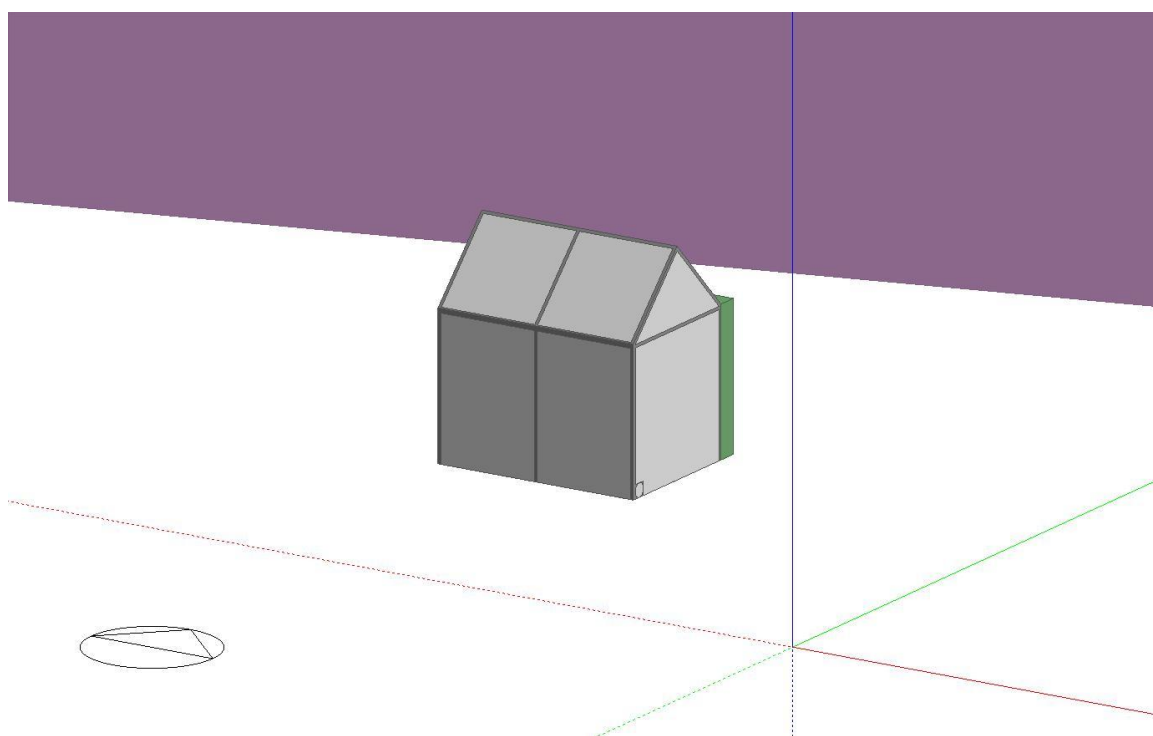


Figura 4.12 - Visualização da geometria dos ensaios EC26 e EC27.

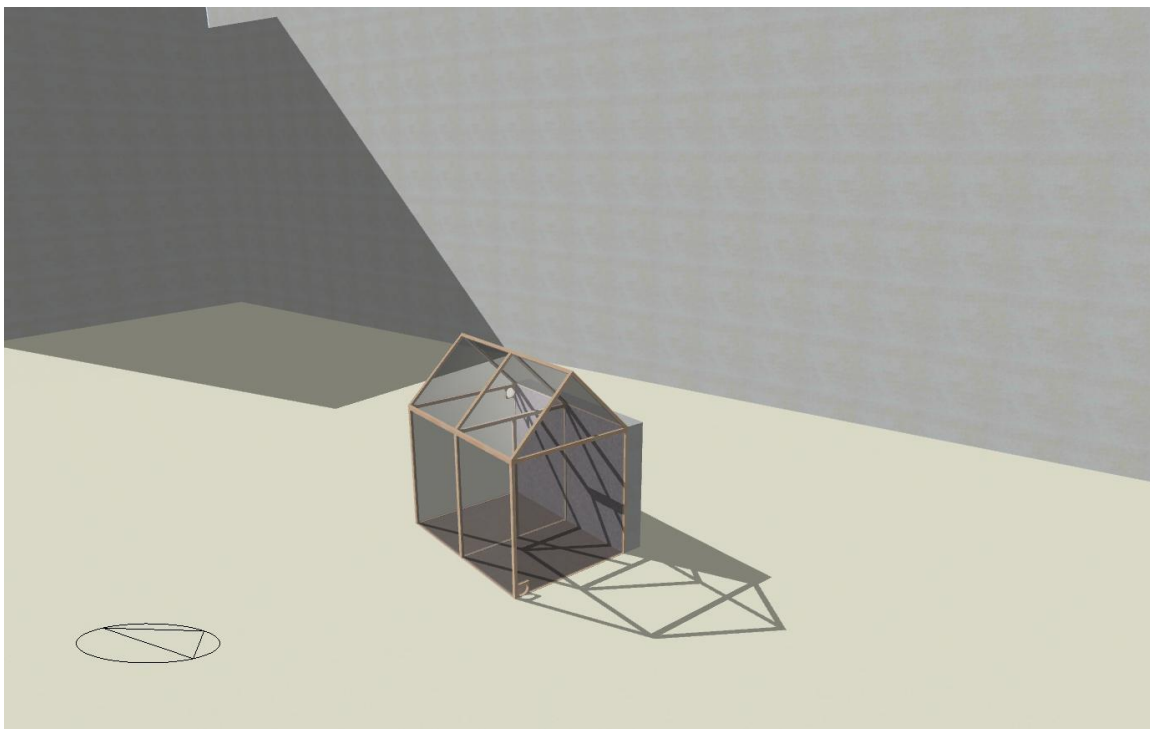


Figura 4.13 - "Render" da geometria dos ensaios EC26 e EC27.

4.2. Resultados e discussão

São agora neste subcapítulo apresentados e comentados os resultados de todos os estudos de caso descritos na secção anterior. Os resultados apresentados consistem nos dados da estufa de referência, assinalados como "REFERÊNCIA", e nos dados de ensaio em estudo, assinalados como "ESTUDO DE CASO" em cada gráfico, à exceção de ensaios cujos resultados tenham sido agrupados num só gráfico quando adequado, sendo que neste caso os dados estão assinalados com a propriedade variada que os identifica. Mais especificamente, os dados apresentados são a temperatura e humidade relativa no interior da estufa com valores calculados mensalmente, perfazendo 1 ano, assim como a temperatura e humidade relativa para um dia típico de inverno e um dia típico de verão, com valores calculados a cada hora, perfazendo 1 dia. Estes dias típicos são 15 de janeiro e 15 de julho do ano de referência, e foram escolhidos como dias típicos devido a serem o primeiros dias das semanas típicas de inverno e verão, respetivamente, utilizadas pelo DesignBuilder para auto-dimensionamento dos sistemas de aquecimento e arrefecimento, quando o auto-dimensionamento é ativado. É incluído também em todos os gráficos a temperatura ambiente exterior para auxílio à leitura, designada por "T AMBIENTE".

As figuras 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 e 4.19 ilustram os resultados dos ensaios EC1 a EC4, cujos resultados estão legendados como "CONFIG. EM ARCO", "CONFIG EM U 1", "CONFIG EM U 2", "CONFIG. REFERÊNCIA RODADA 90°", respetivamente, para os casos EC1, EC2, EC3 e EC4.

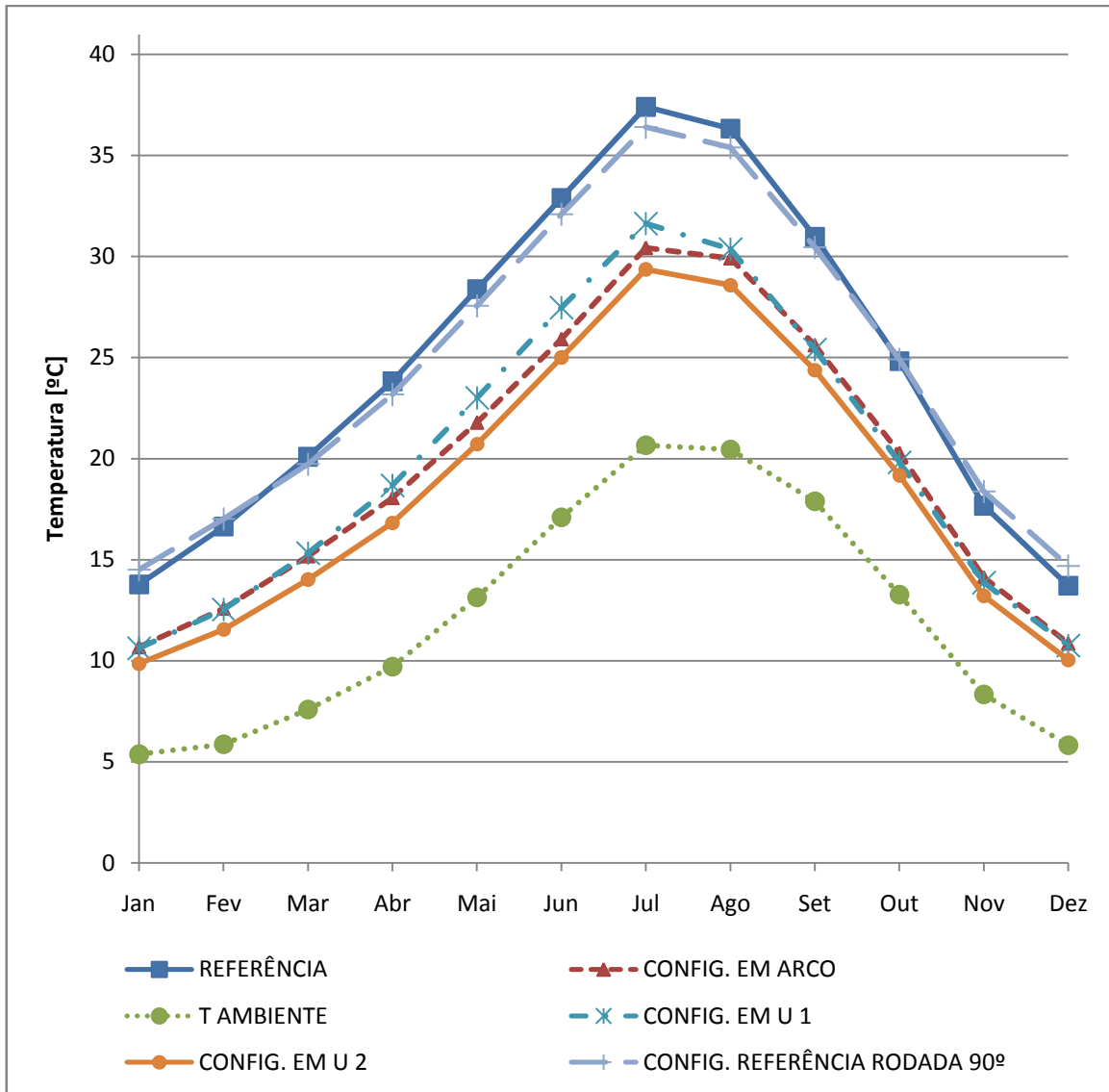


Figura 4.14 - Gráfico anual comparativo da temperatura interior dos ensaios EC1 a EC4.

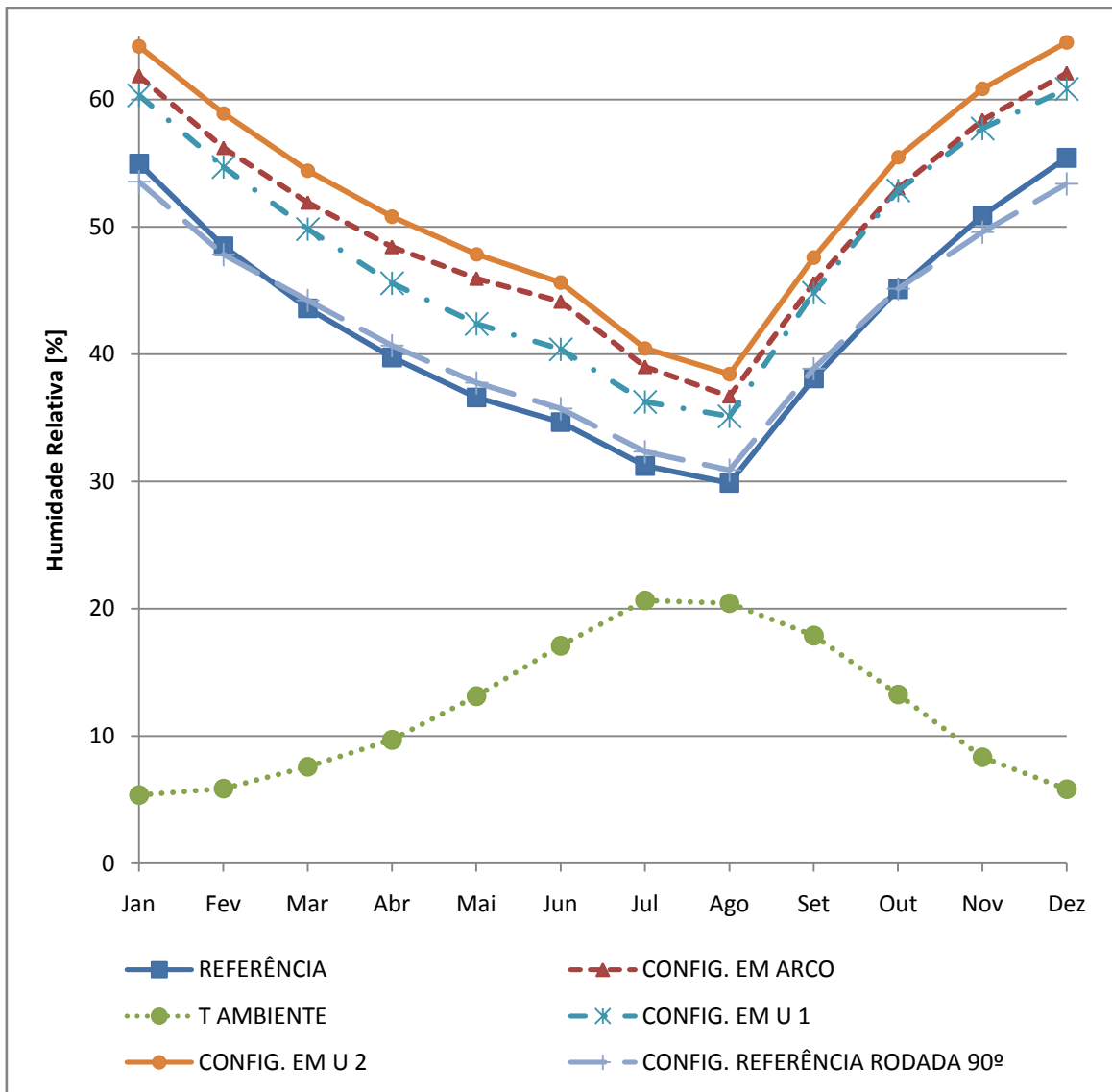


Figura 4.15 - Gráfico anual comparativo da umidade relativa interior dos ensaios EC1 a EC4.

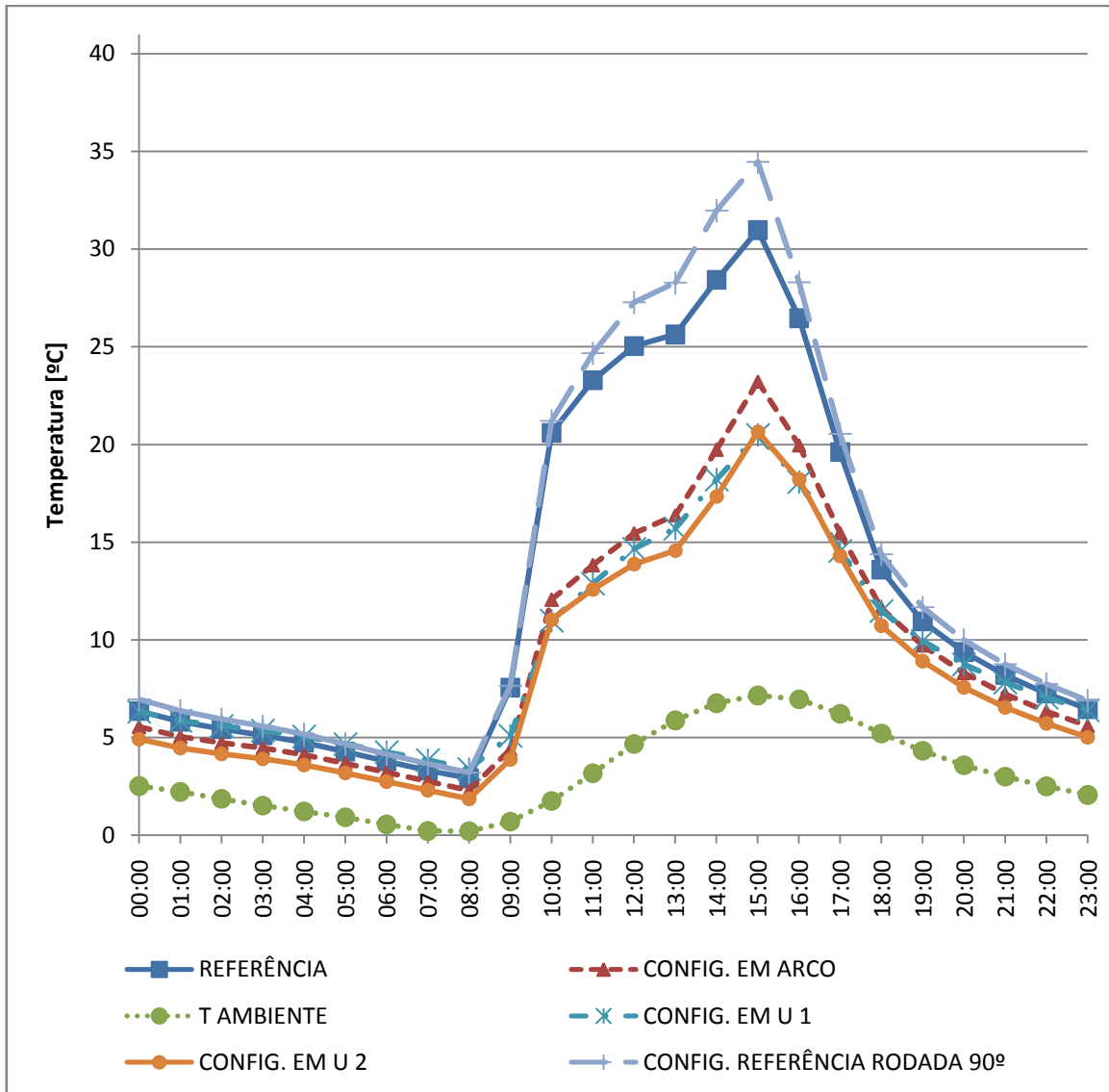


Figura 4.16 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da temperatura interior dos ensaios EC1 a EC4.

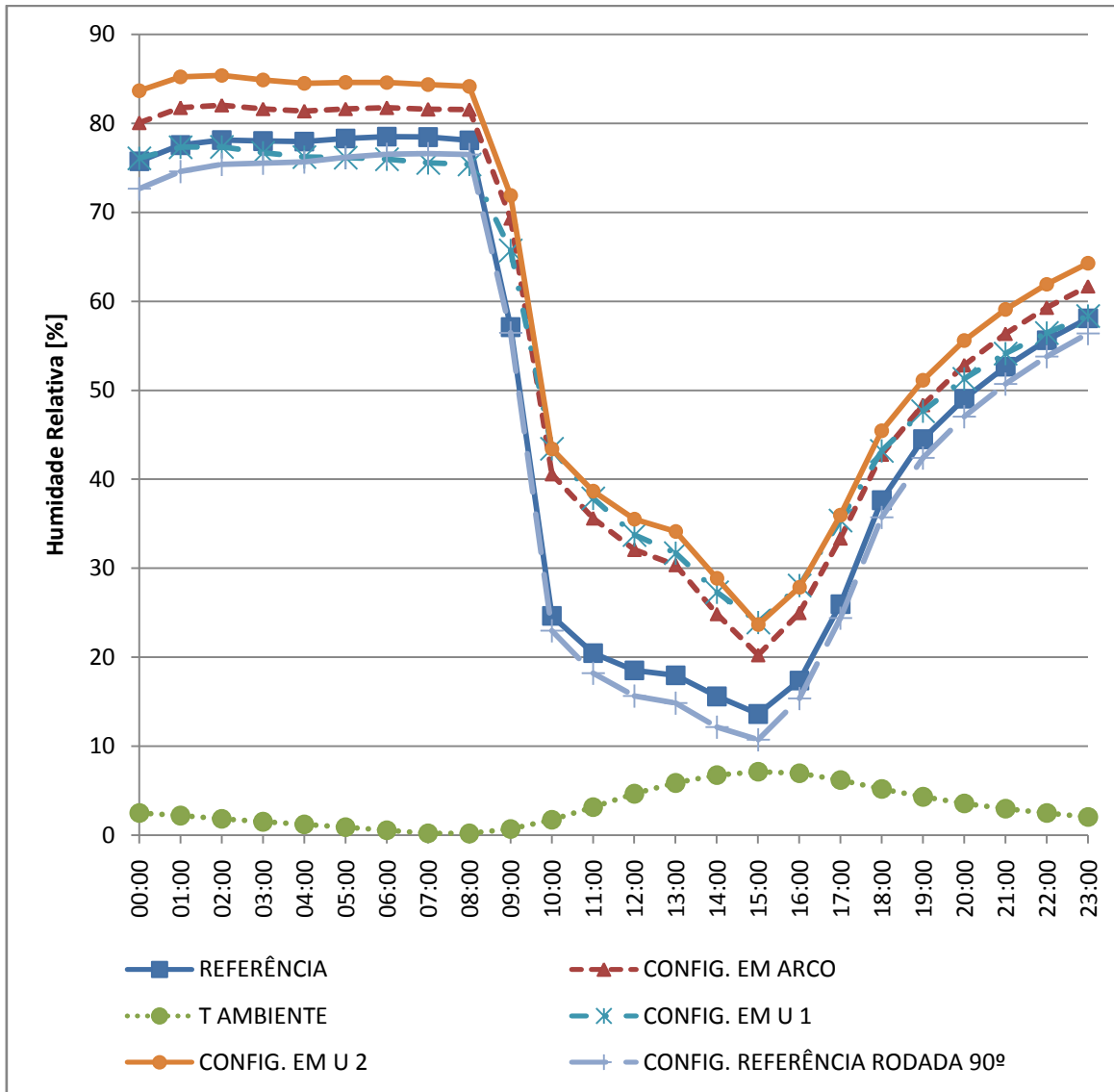


Figura 4.17 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC1 a EC4.

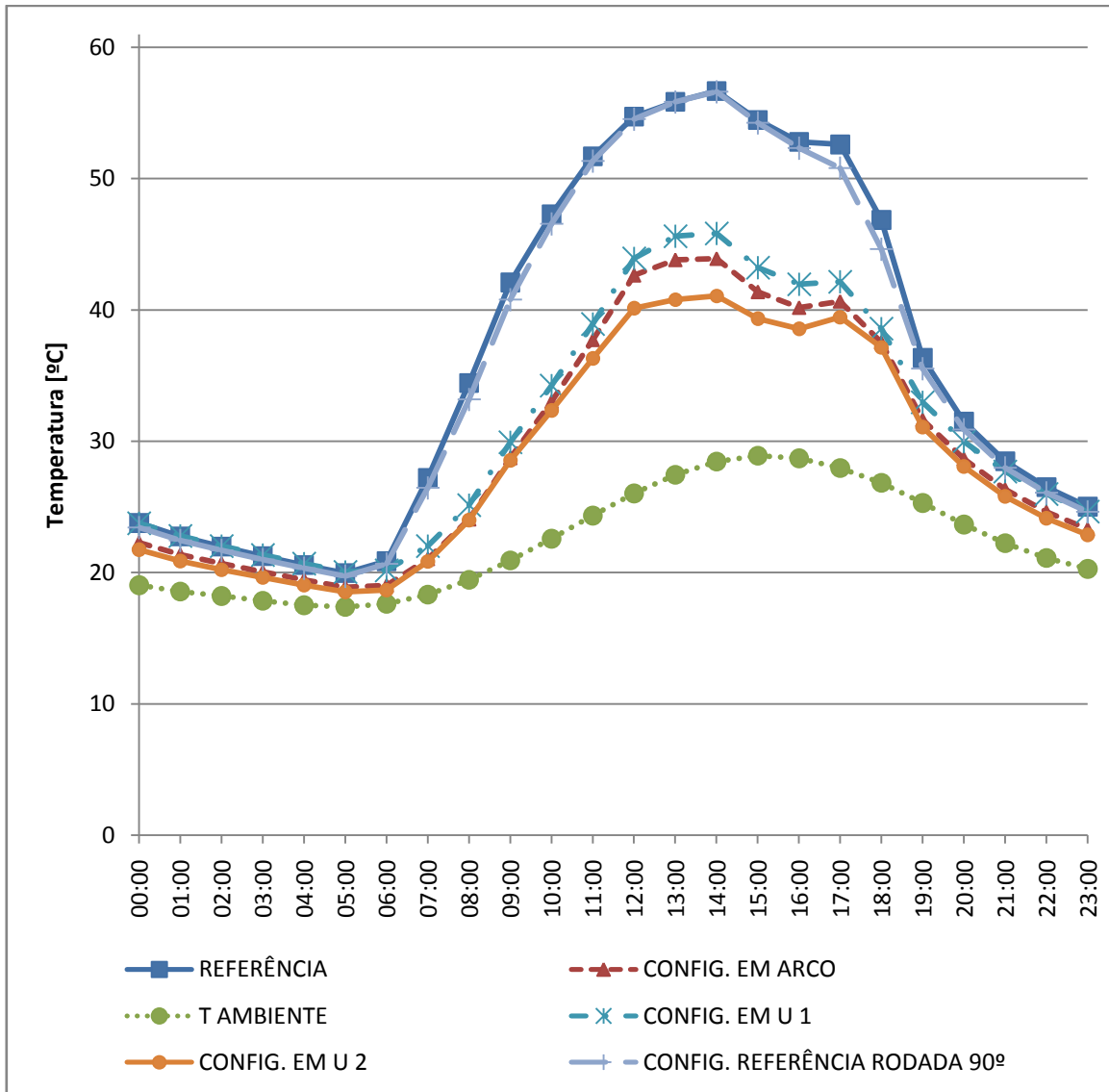


Figura 4.18 - Gráfico de 15 julho comparativo da temperatura interior dos ensaios EC1 a EC4.

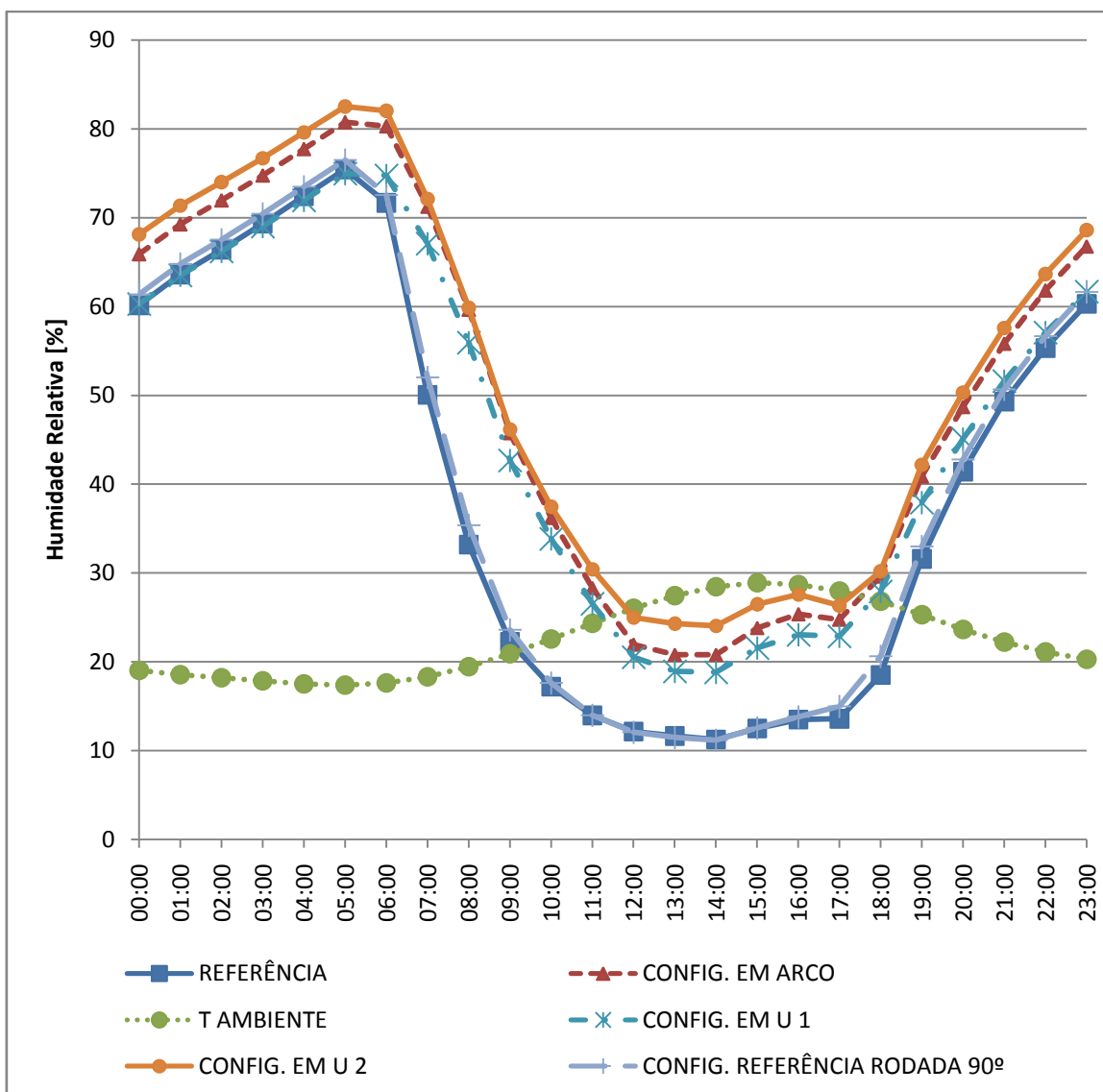


Figura 4.19 - Gráfico de 15 julho comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC1 a EC4.

Neste conjunto de estudos é possível ver que as variantes que alteraram a geometria da estufa de referência sofreram todas reduções da temperatura no seu interior geral durante todo o ano, com os gráficos diários a mostrarem que a redução deu-se praticamente na totalidade durante o período de exposição solar. Esta situação é explicada pelo facto de haver uma redução da radiação solar absorvida, que deriva da redução da área exposta à radiação.

É de notar, no entanto, que a estufa com menor área exposta de todas, a estufa EC2, assinalada como "CONFIG. EM U 1" nas legendas, não foi a que apresentou menores temperaturas, o que contraria a explicação dada anteriormente. A razão para esta situação tem que ver com a relação de área exposta e volume interior, relação esta que para esta é mais elevada que as das outras configurações nas quais a área exposta também foi reduzida.

No ensaio EC4 existe uma ligeira variação das temperaturas relativamente à referência, sendo mais acentuada durante o dia dos dias com menor número de horas de exposição solar, muito ligeira nos dias mais longos de verão, e imperceptível durante o período noturno do ano todo. A configuração deste ensaio levou a um aumento da sul e também da parede norte, que potencialmente se cancelaram uma à outra de modo geral visto que estas paredes têm tipicamente efeitos opostos. Outra possível justificação para os resultados obtidos é facto de o volume da estufa ser exatamente o mesmo.

O aumento da humidade relativa também é expectável nos períodos de redução da temperatura, sendo então coerente com todos os ensaios.

As figuras 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25 ilustram os resultados do ensaio EC5.

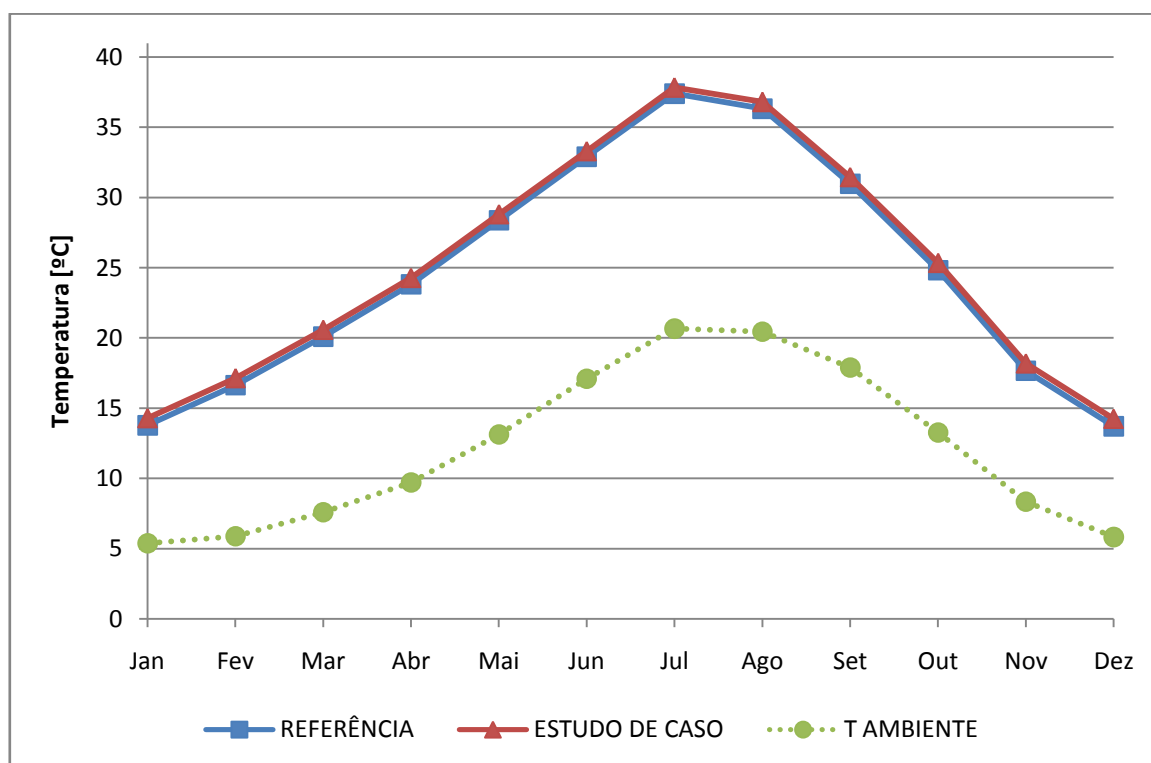


Figura 4.20 - Gráfico anual comparativo da temperatura interior do ensaio EC5.

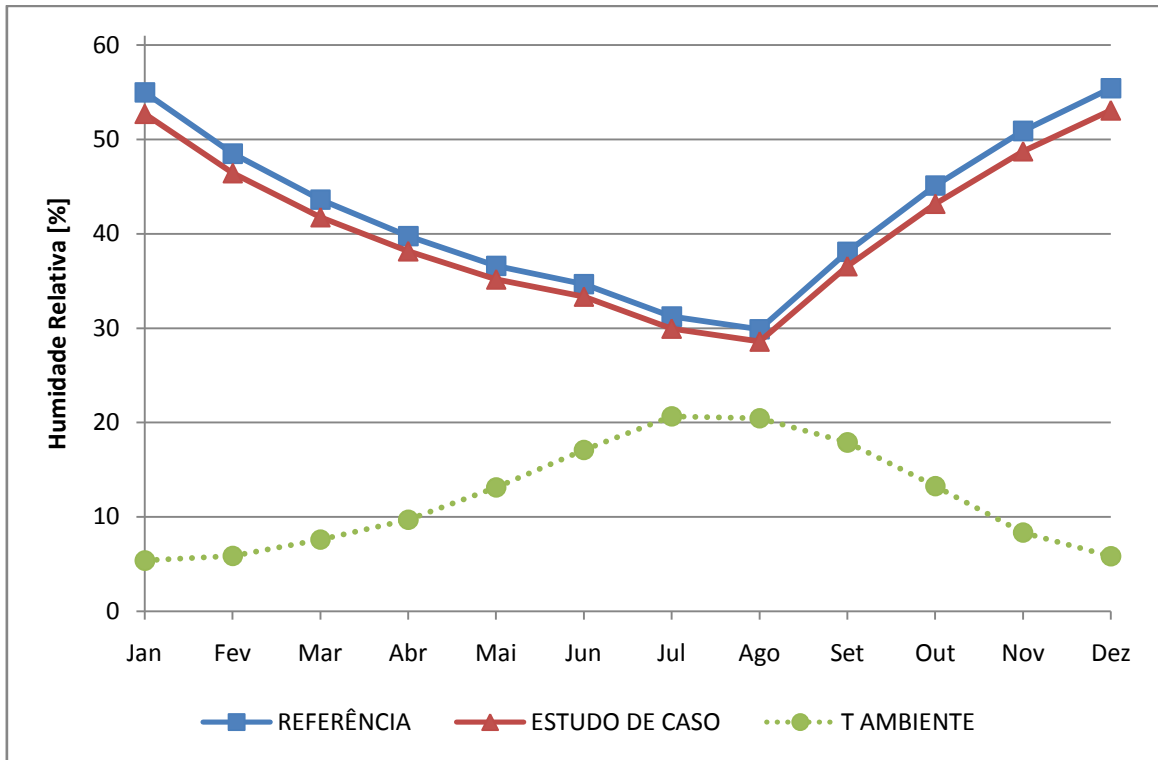


Figura 4.21 - Gráfico anual comparativo da umidade relativa interior do ensaio EC5.

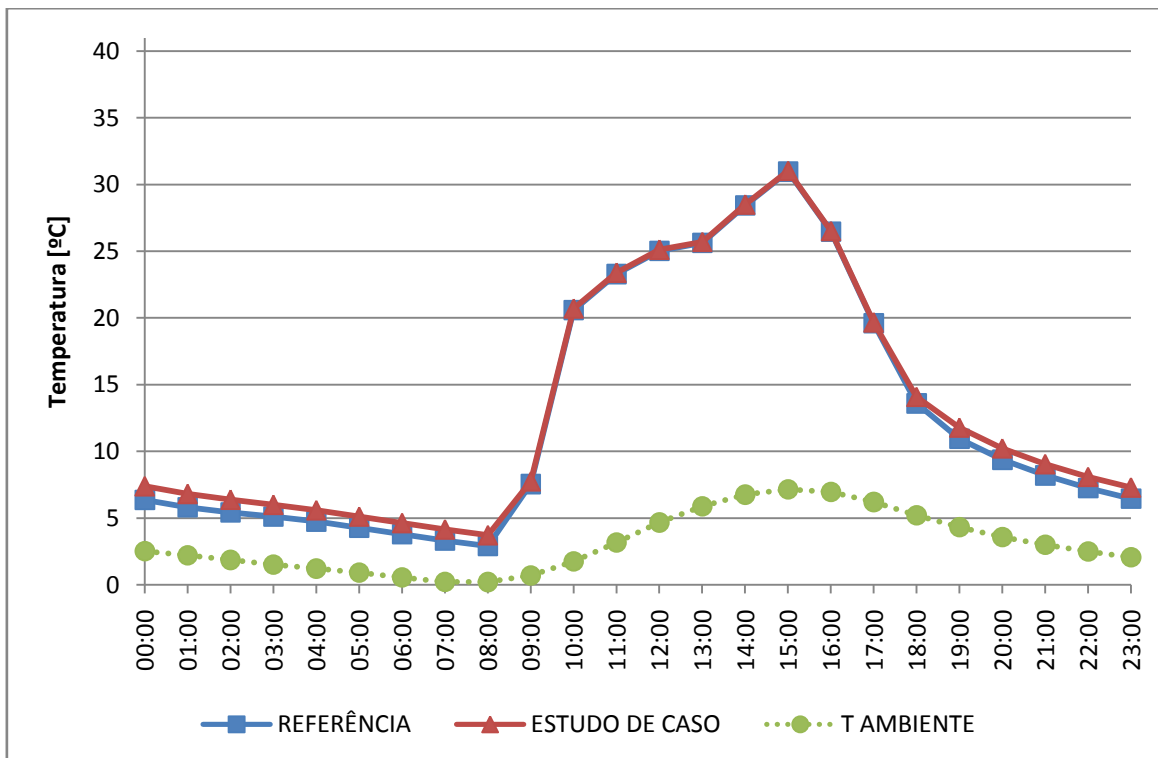


Figura 4.22 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da temperatura interior do ensaio EC5.

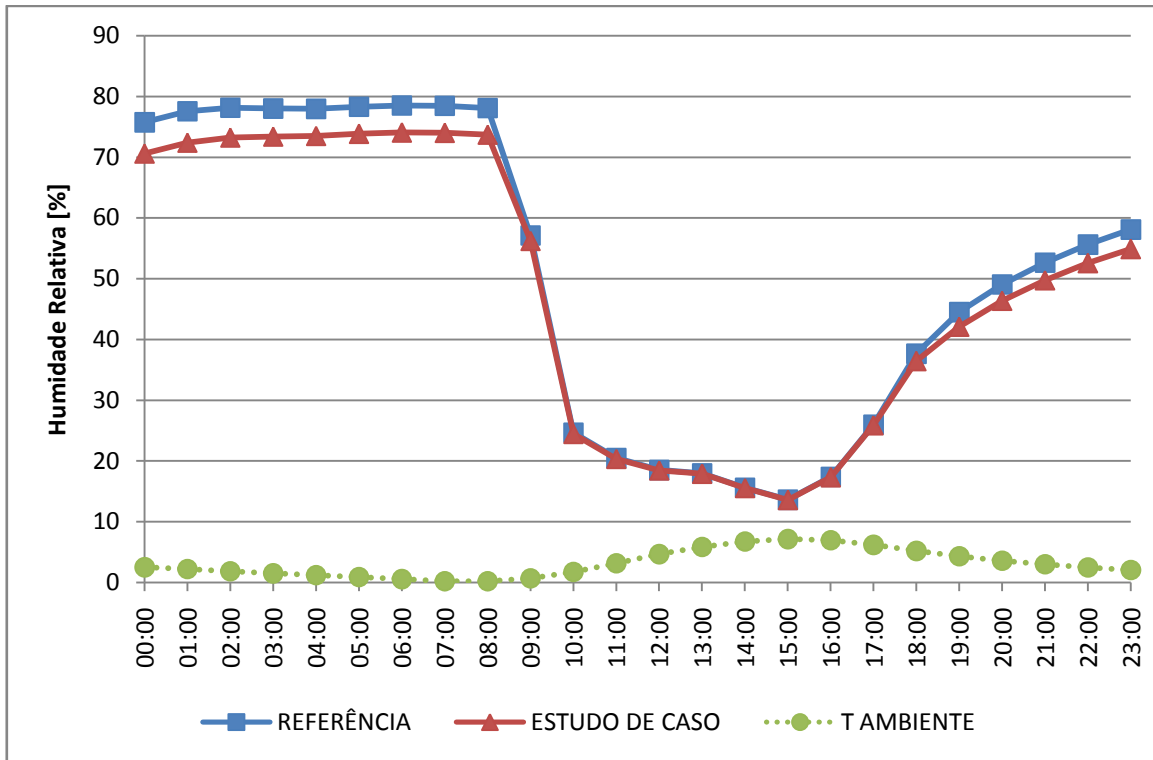


Figura 4.23 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da umidade relativa interior do ensaio EC5.

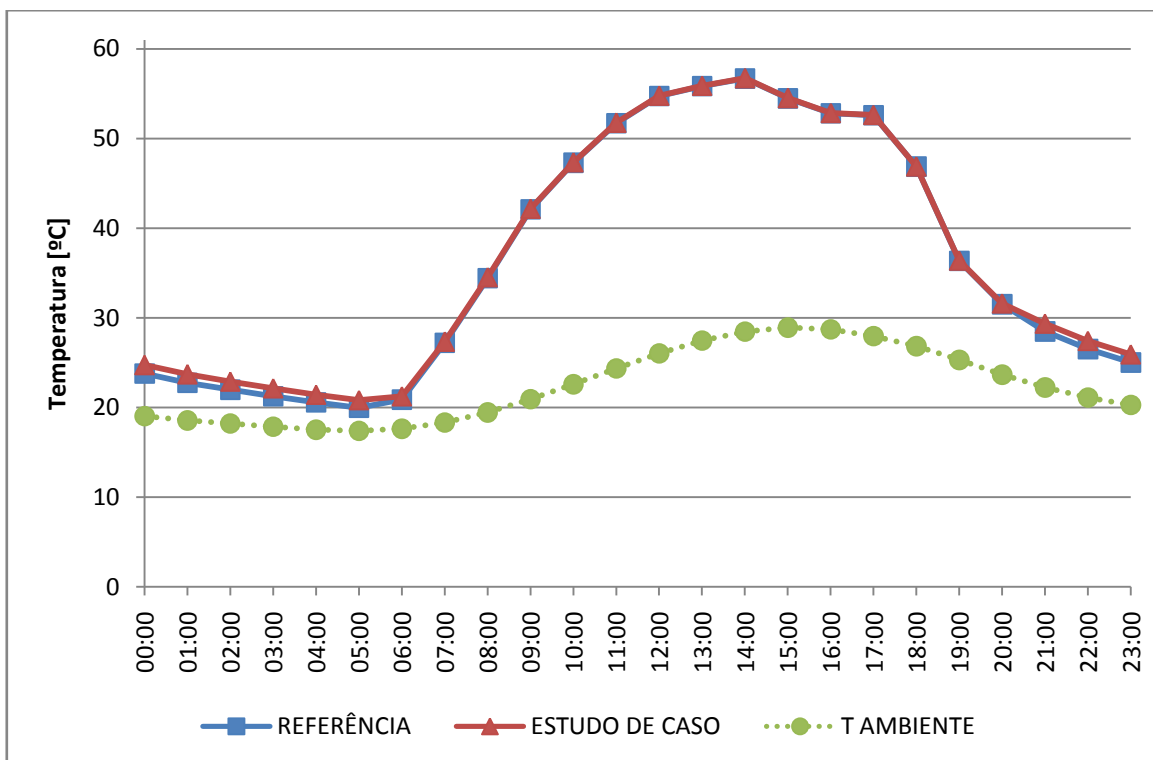


Figura 4.24 - Gráfico de 15 julho comparativo da temperatura interior do ensaio EC5.

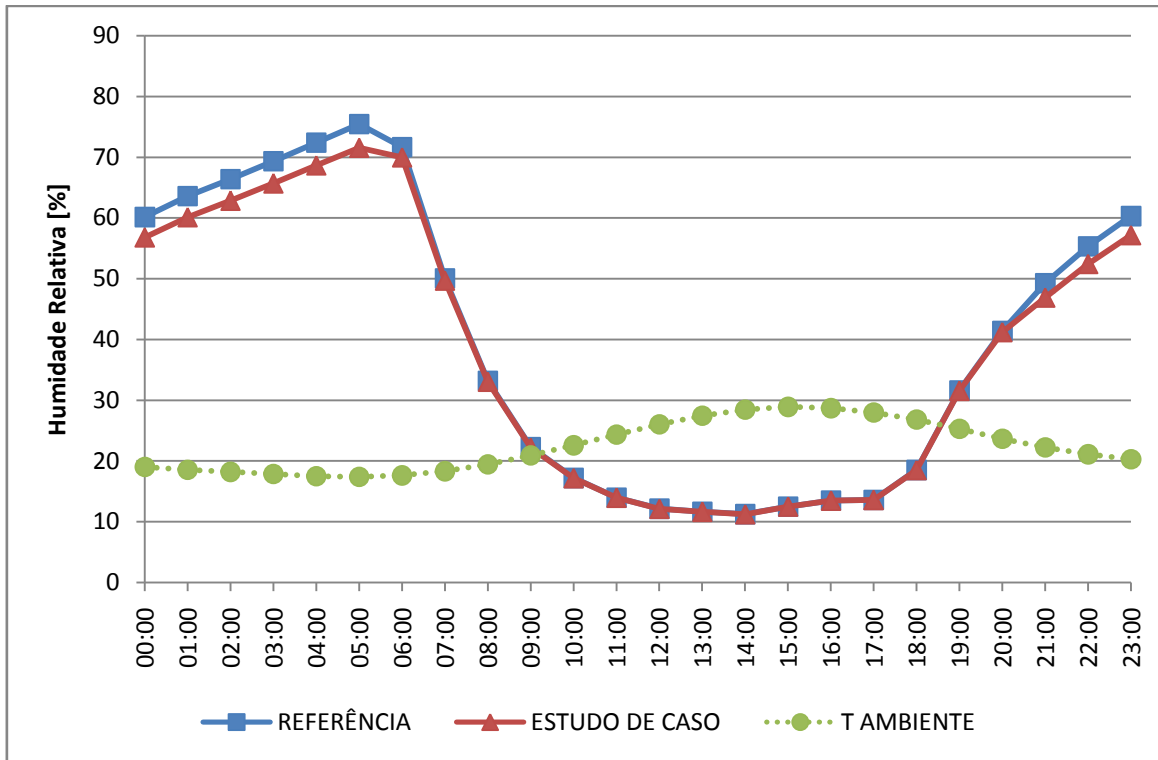


Figura 4.25 - Gráfico de 15 julho comparativo da humidade relativa interior do ensaio EC5.

Com o estudo de caso EC5 é possível visualizar um ligeiro aumento da temperatura durante o período noturno, especialmente durante os dias de inverno, o que vai de encontro com a realidade pois a proteção noturna reduz a capacidade de libertação de energia pelos envidraçados. O comportamento da humidade relativa também vai de encontro ao expectável para temperaturas ligeiramente mais altas.

As figuras 4.26, 4.27, 4.28, 4.29, 4.30 e 4.31 ilustram os resultados dos ensaios EC6 a EC10.

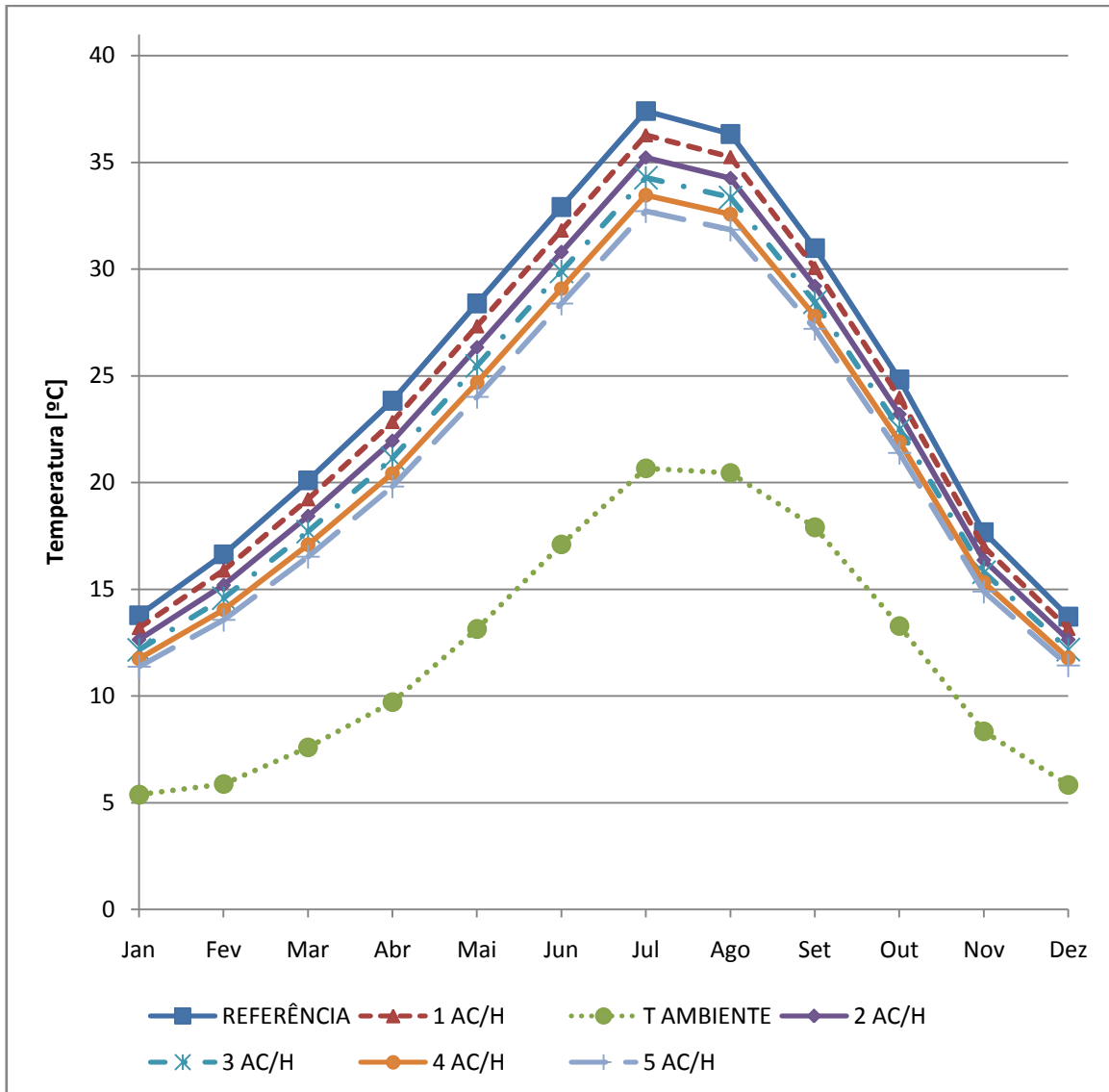


Figura 4.26 - Gráfico anual comparativo da temperatura interior dos ensaios EC6 a EC10.

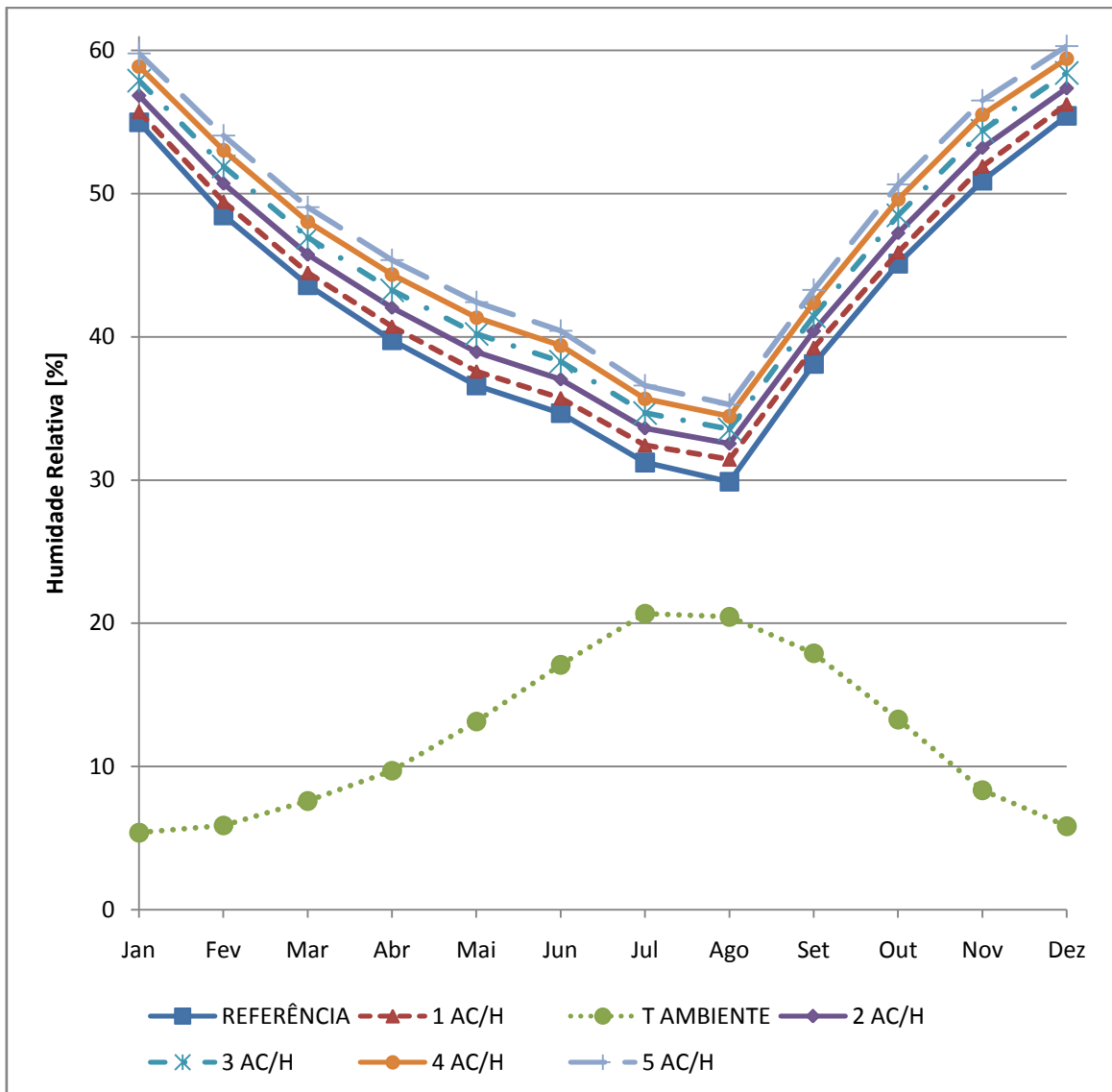


Figura 4.27 - Gráfico anual comparativo da umidade relativa interior dos ensaios EC6 a EC10.

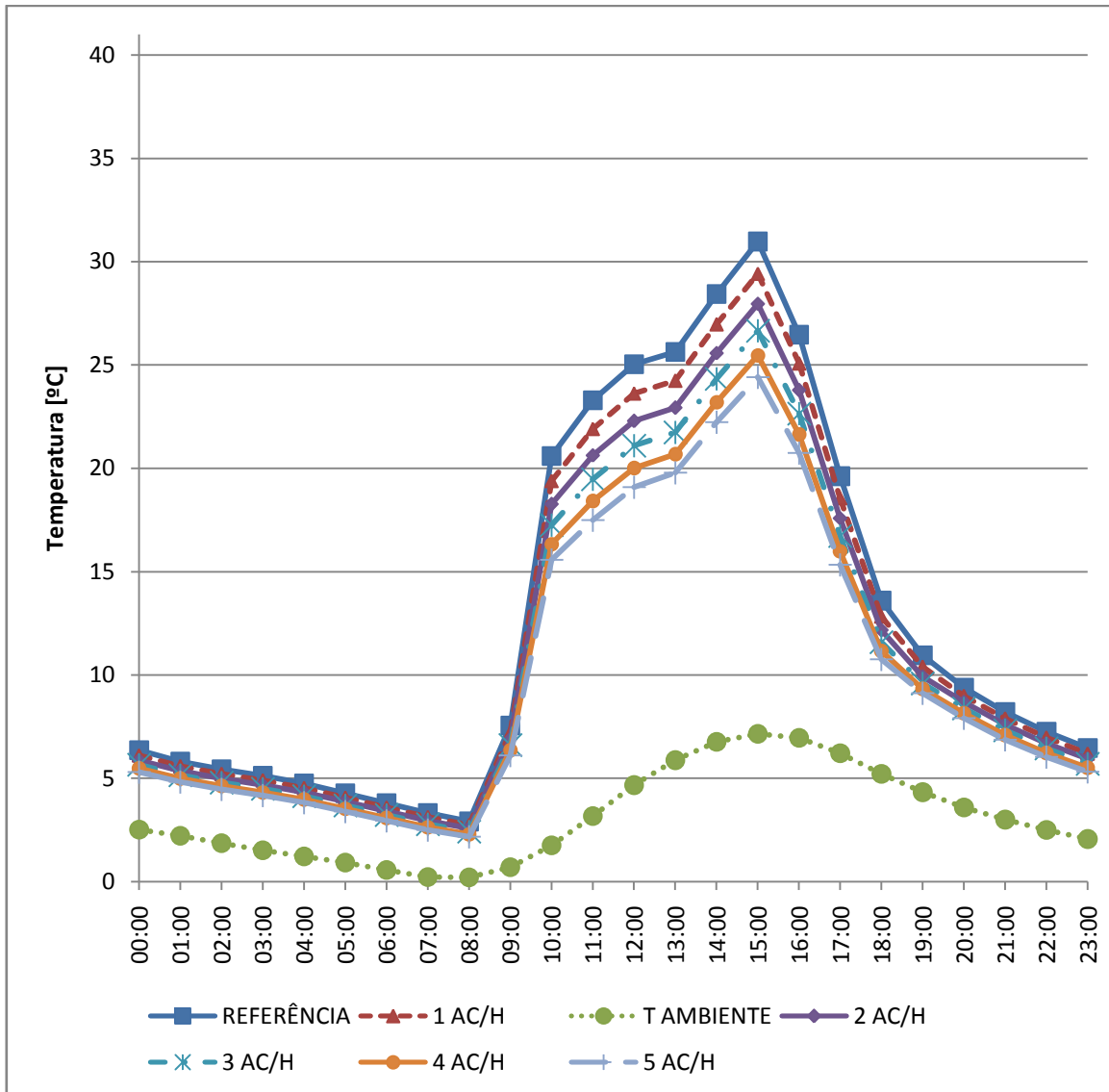


Figura 4.28 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da temperatura interior dos ensaios EC6 a EC10.

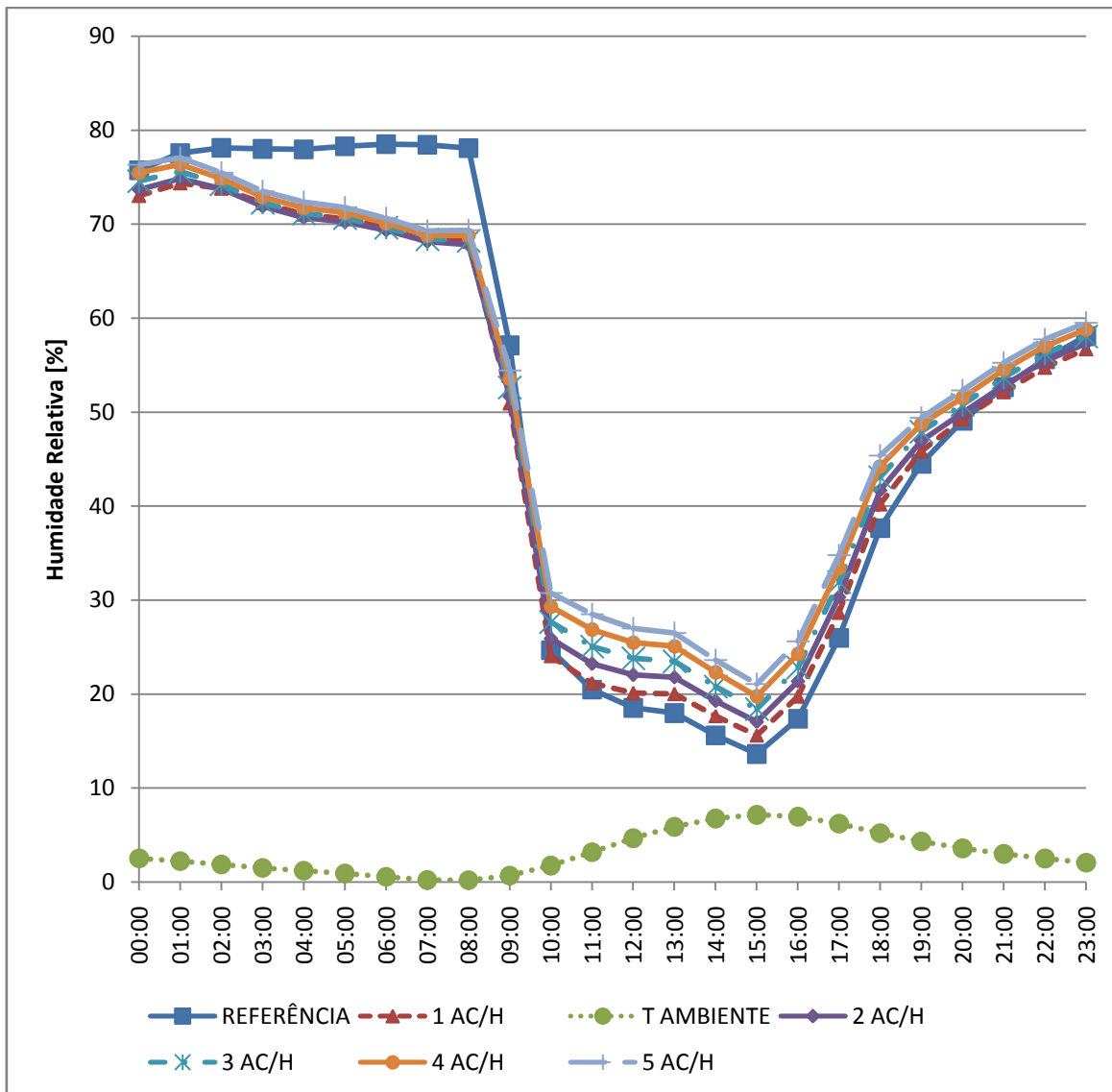


Figura 4.29 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC6 a EC10.

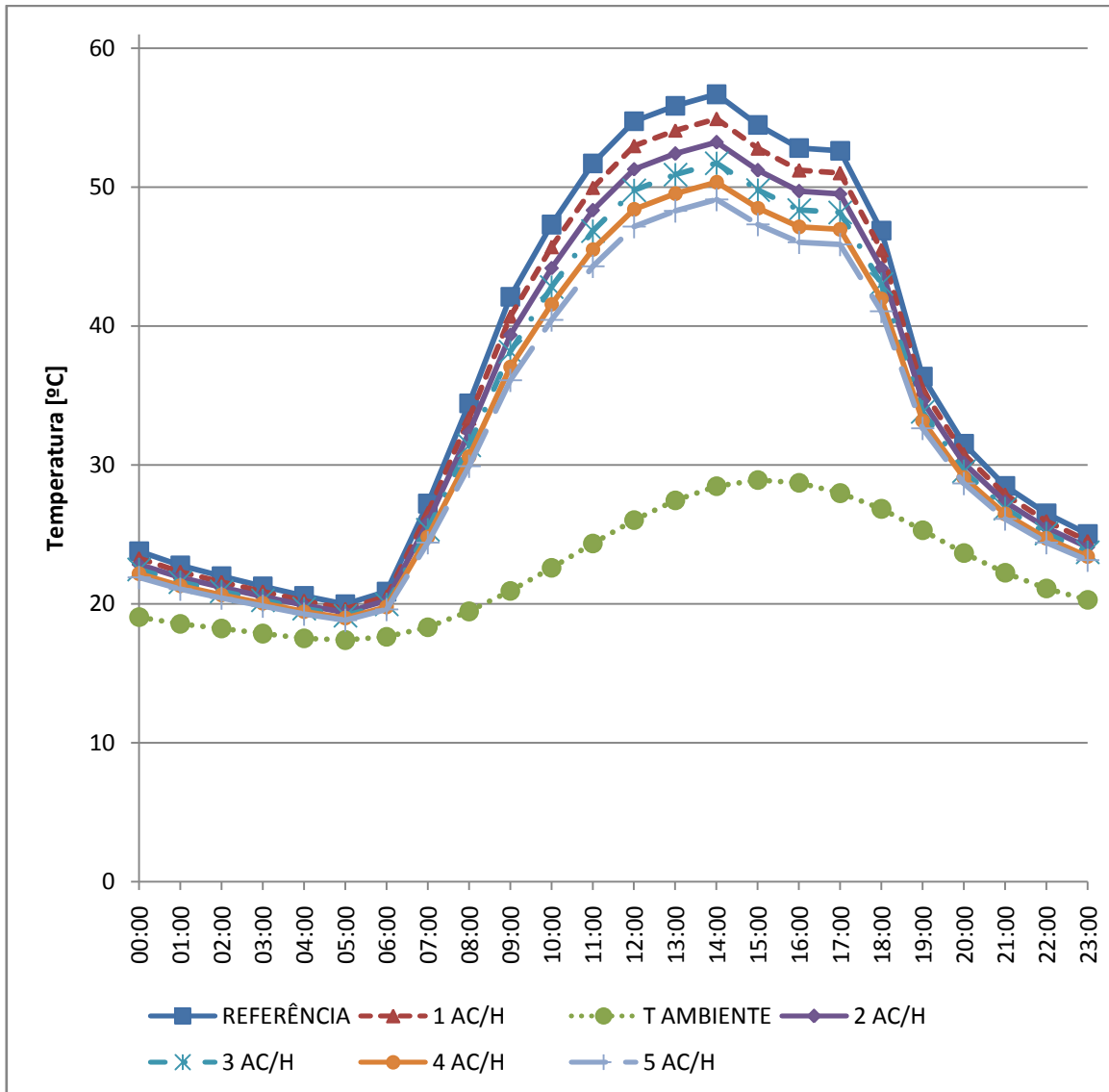


Figura 4.30 - Gráfico de 15 julho comparativo da temperatura interior dos ensaios EC6 a EC10.

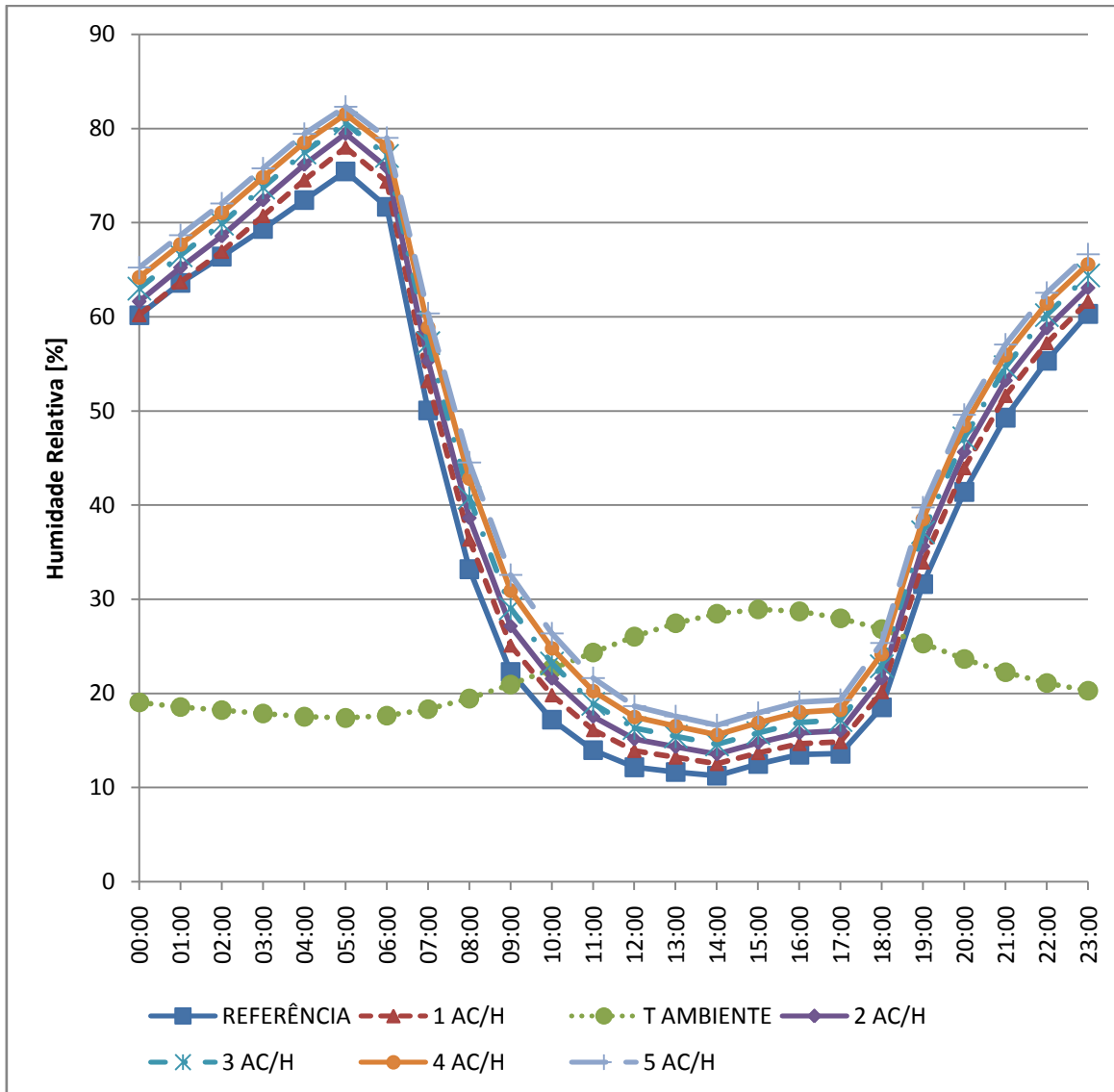


Figura 4.31 - Gráfico de 15 julho comparativo da umidade relativa interior dos ensaios EC6 a EC10.

No conjunto dos estudos de caso EC6 a EC10 verifica-se a capacidade da ventilação mecânica em reduzir a carga térmica no interior da estufa. Esta capacidade é mais visível durante o dia, período este onde a carga térmica é maior. No período noturno o aumento das renovações de ar por hora não produz efeito significativo visto que a estufa de referência, que não tem ventilação forçada, atinge temperaturas próximas da temperatura ambiente exterior, logo a introdução de mais ar exterior pela ventilação mecânica que está a temperatura semelhante não vai induzir alterações significativas no clima da estufa.

As figuras 4.50, 4.51, 4.52, 4.53, 4.54 e 4.55 ilustram os resultados dos ensaios EC11 e EC12.

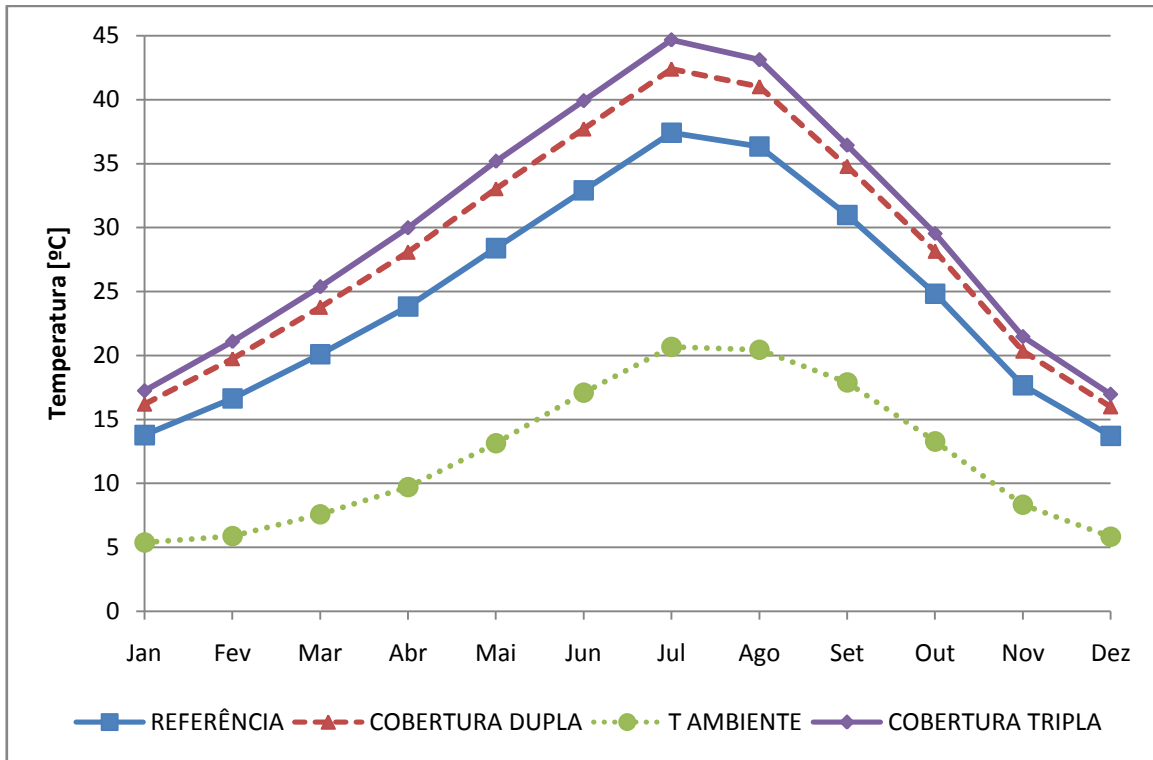


Figura 4.32 - Gráfico anual comparativo da temperatura interior dos ensaios EC11 e EC12.

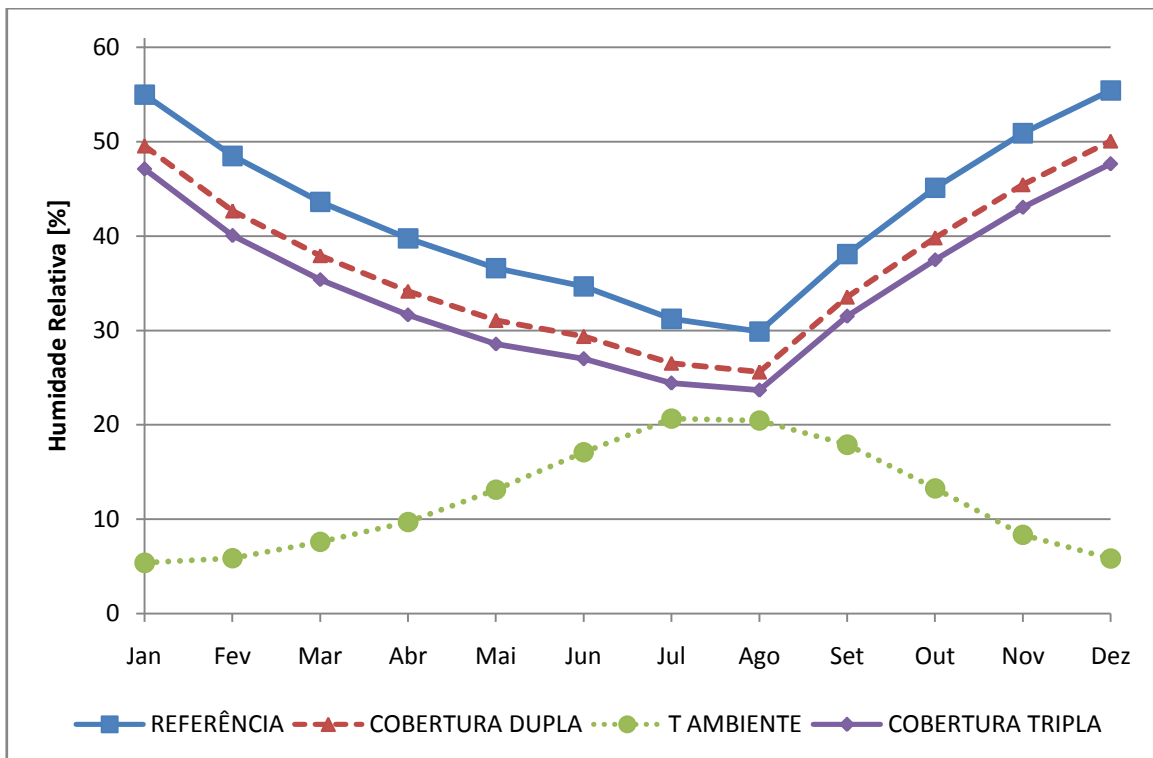


Figura 4.33 - Gráfico anual comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC11 e EC12.

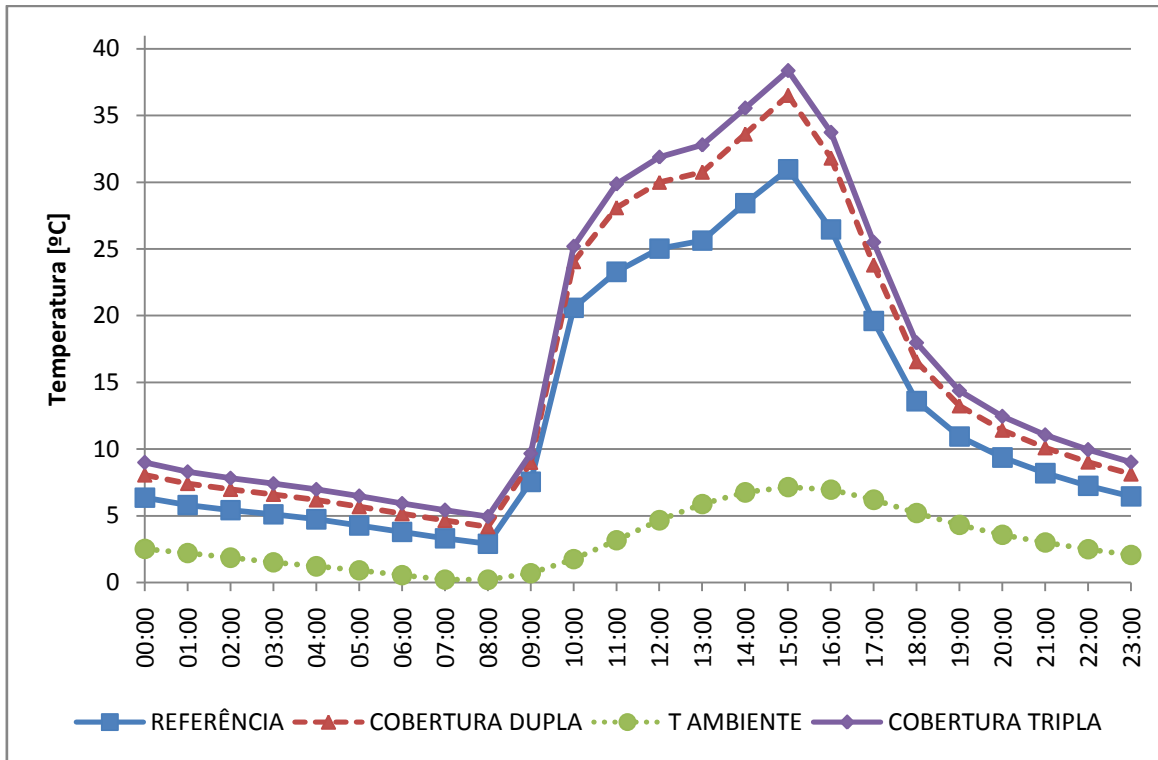


Figura 4.34 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da temp. interior dos ensaios EC11 e EC12.

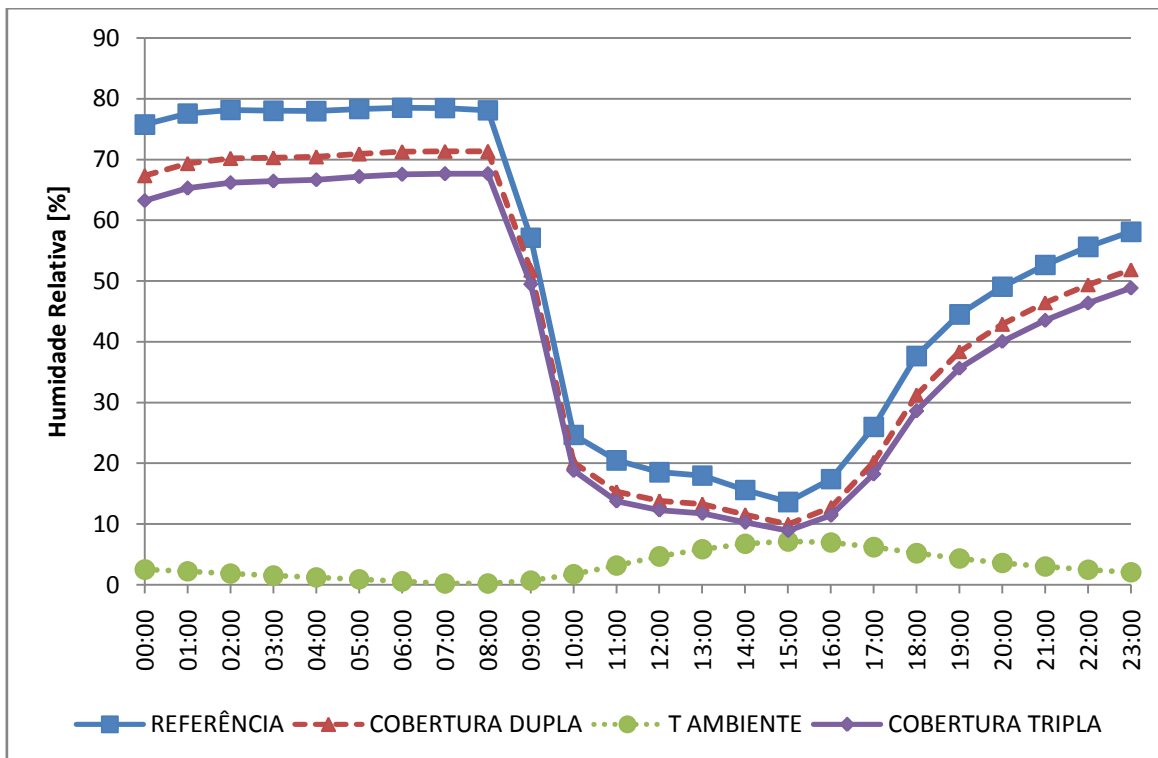


Figura 4.35 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC11 e EC12.

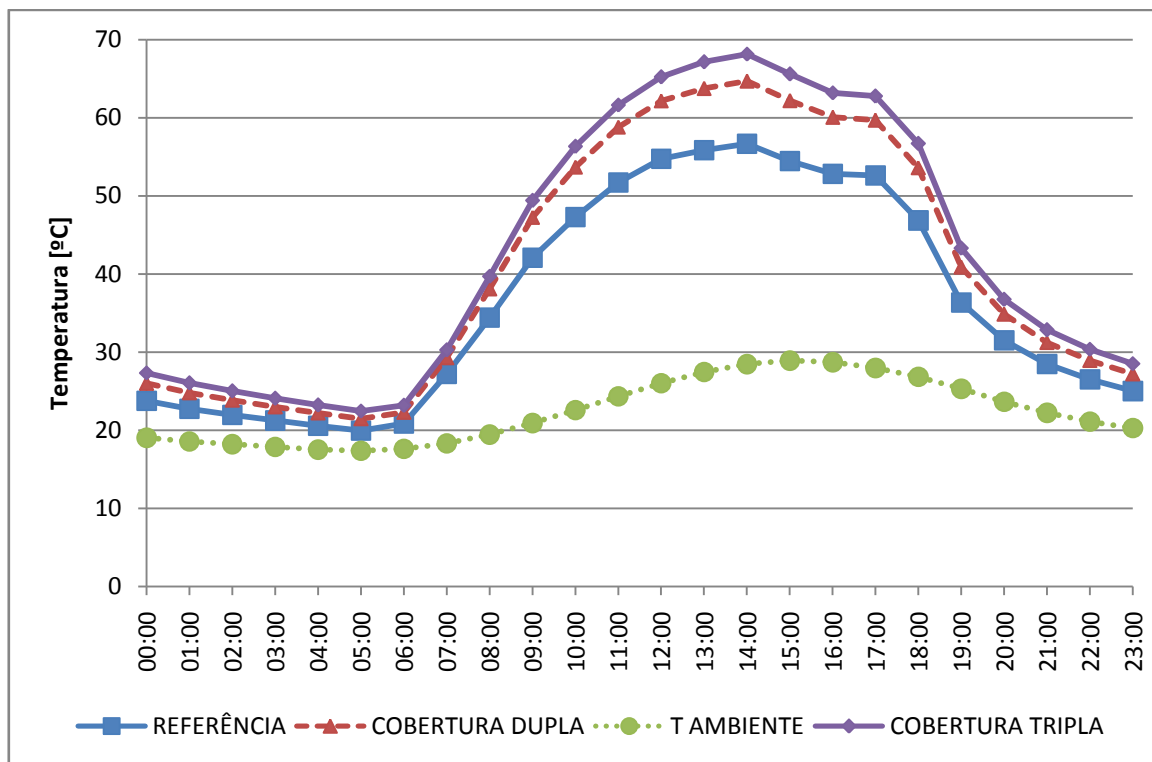


Figura 4.36 - Gráfico de 15 julho comparativo da temperatura interior dos ensaios EC11 e EC12.

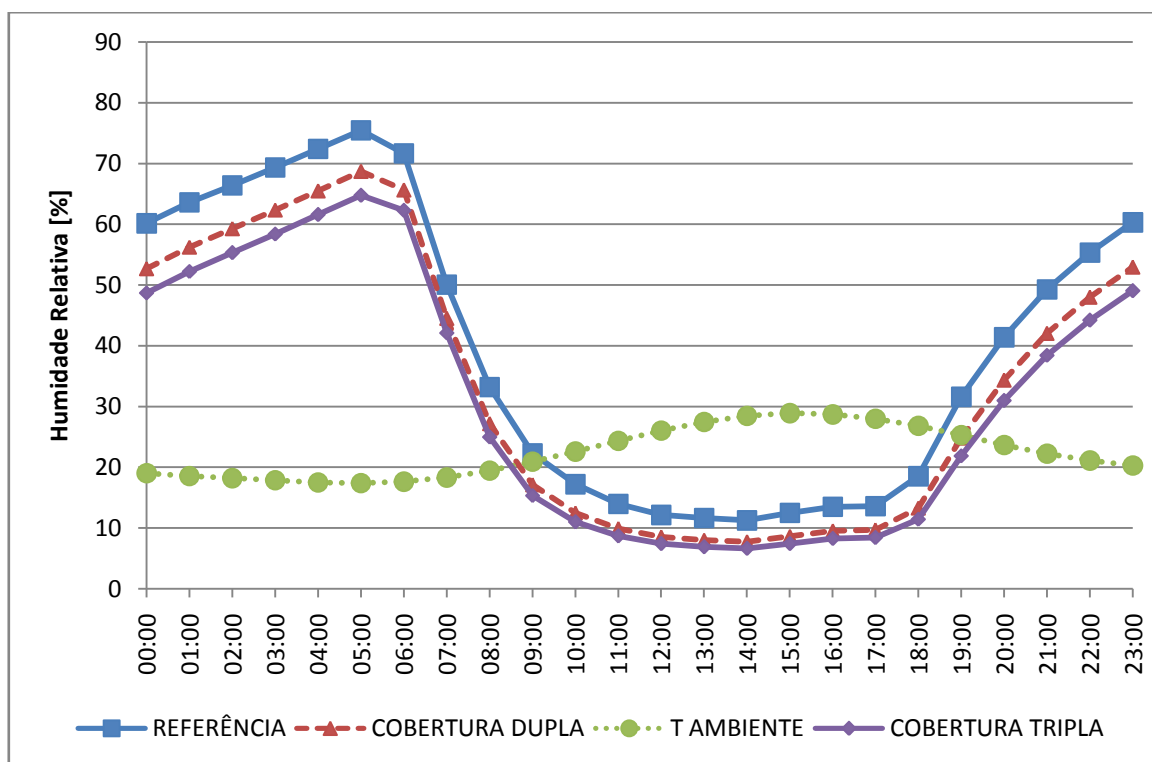


Figura 4.37 - Gráfico de 15 julho comparativo da umidade relativa interior dos ensaios EC11 e EC12.

Os resultados dos ensaios EC11 e EC12 mostram claramente os efeitos das coberturas dupla e tripla na capacidade de retenção do calor absorvido, sendo particularmente eficaz para elevar a temperatura durante o dia. Também é possível concluir que o investimento numa cobertura dupla é o mais rentável visto que a diferença entre este e a referência é clara, enquanto que a diferença entre cobertura dupla e tripla é menor, fazendo da cobertura tripla um investimento com menor retorno, comparativamente.

As figuras 4.38, 4.39, 4.40, 4.41, 4.42 e 4.43 ilustram os resultados dos ensaios EC13 a EC16.

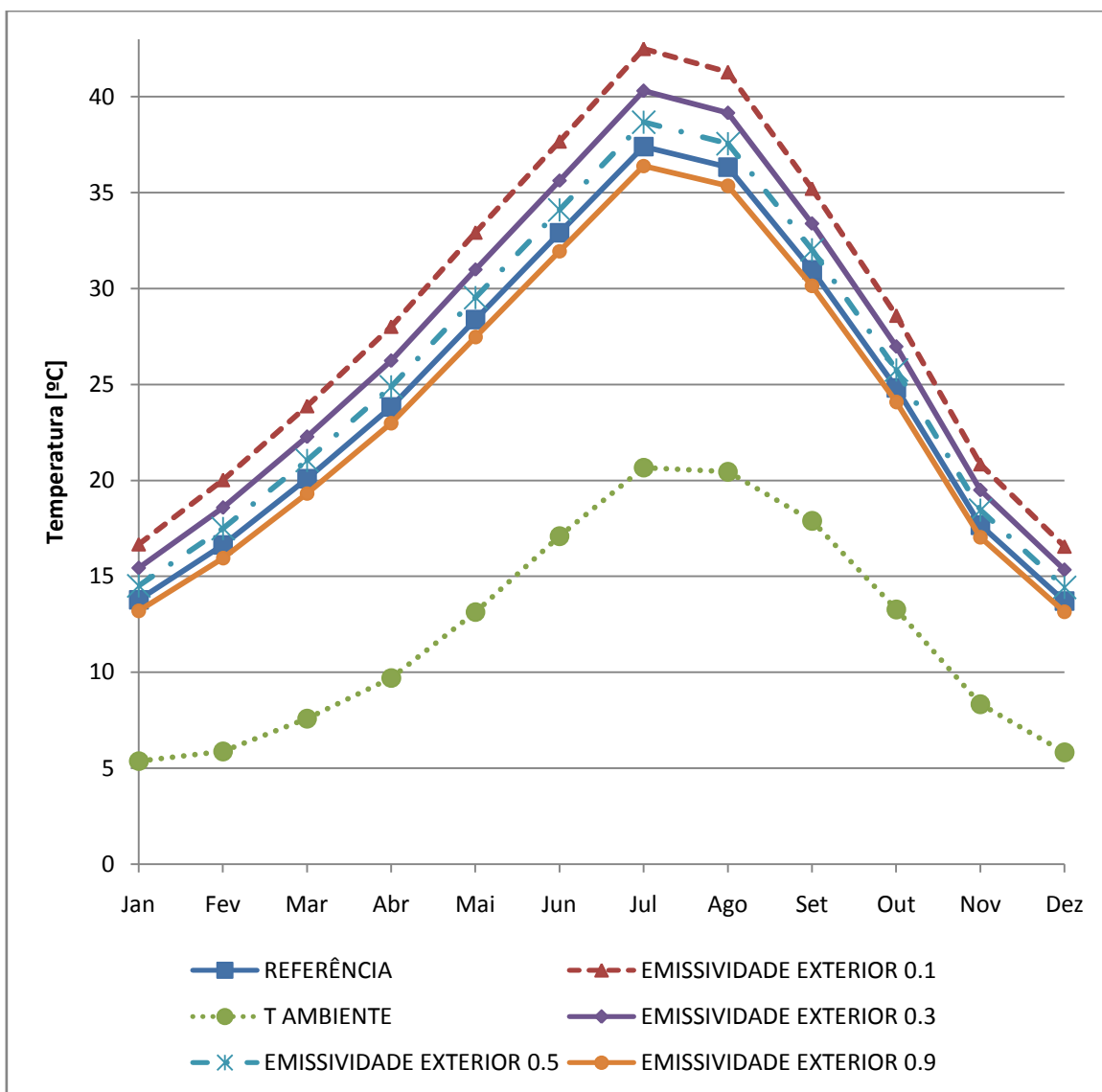


Figura 4.38 - Gráfico anual comparativo da temperatura interior dos ensaios EC13 a EC16.

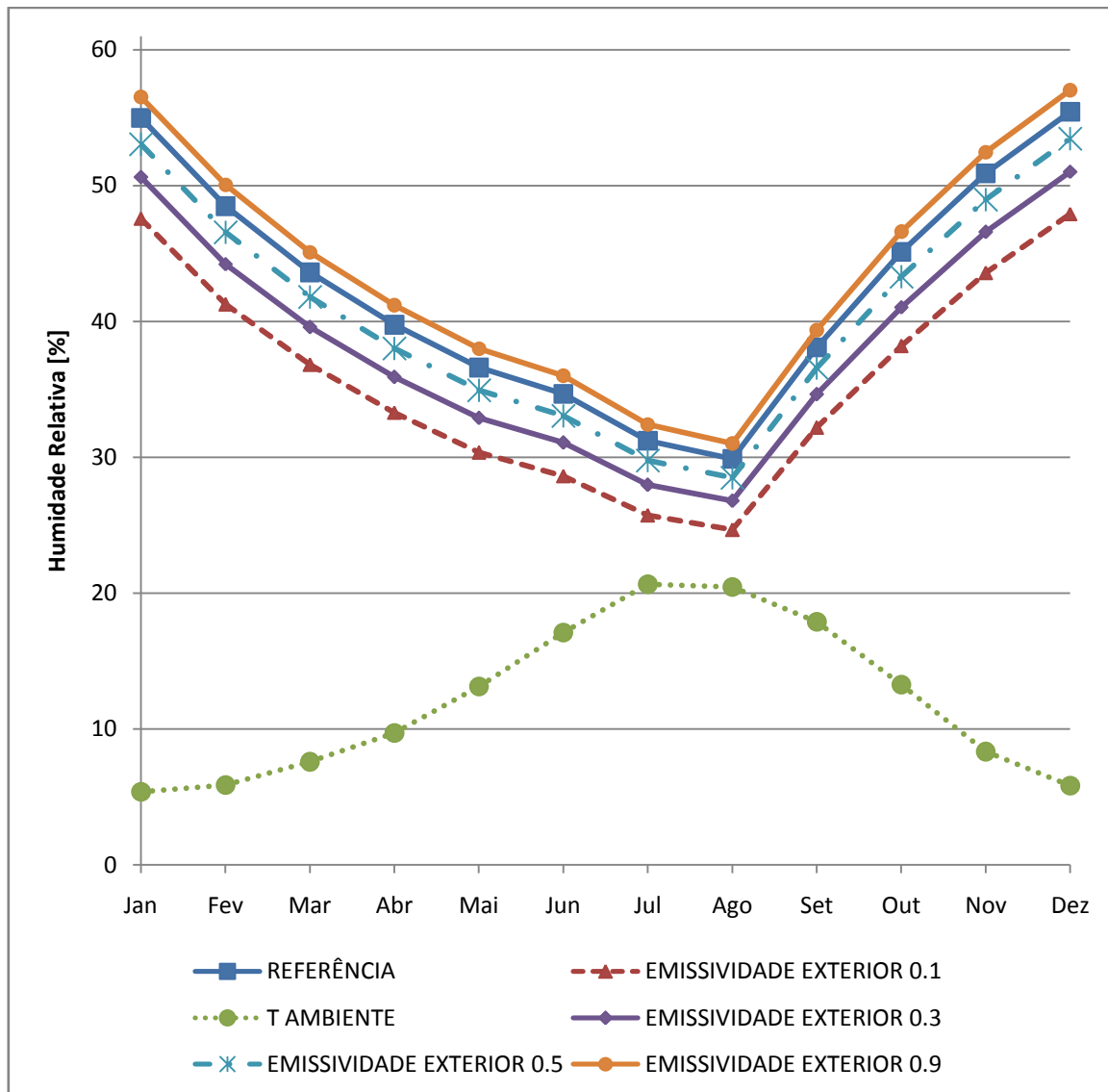


Figura 4.39 - Gráfico anual comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC13 a EC16.

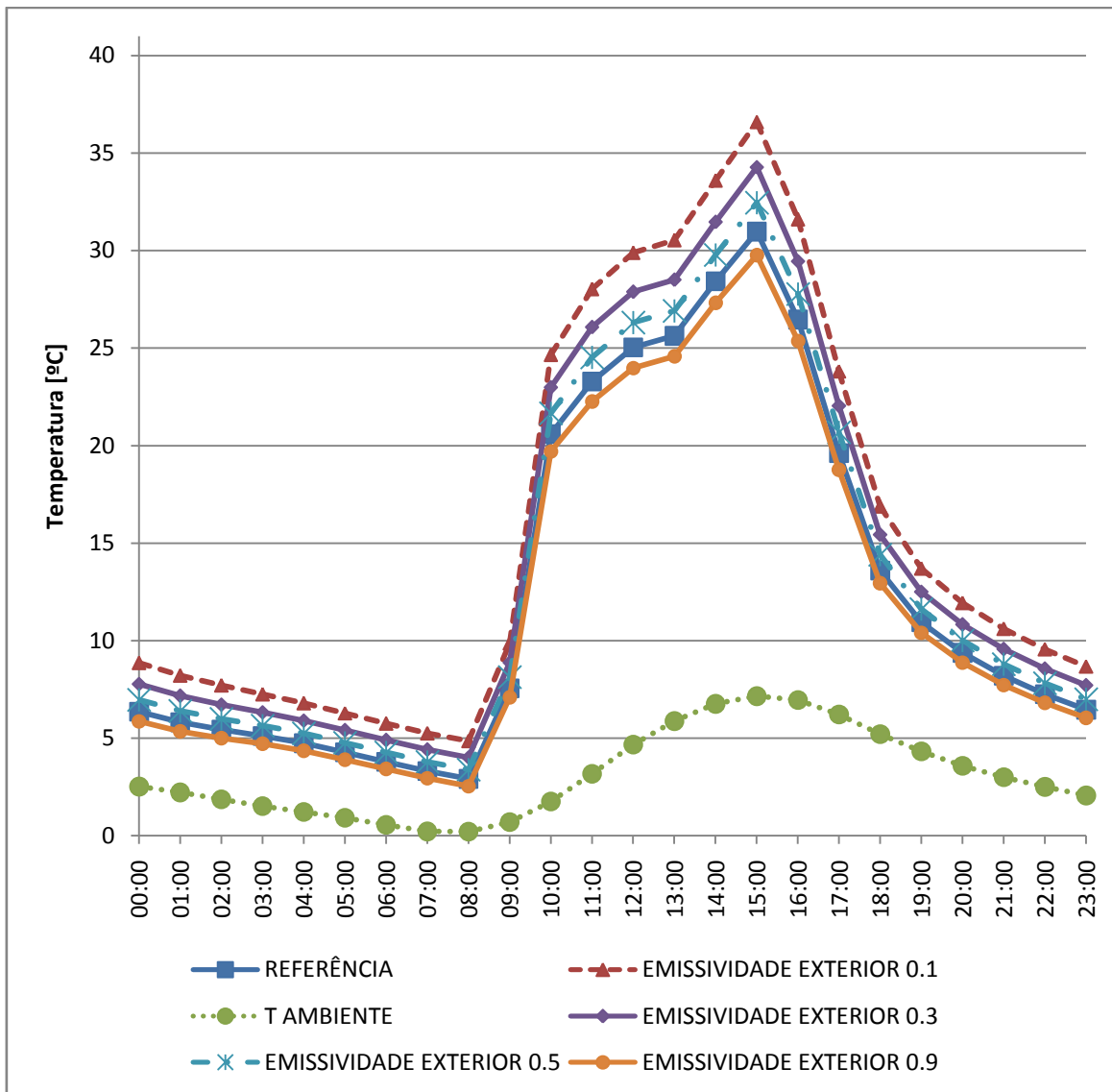


Figura 4.40 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da temperatura interior dos ensaios EC13 a EC16.

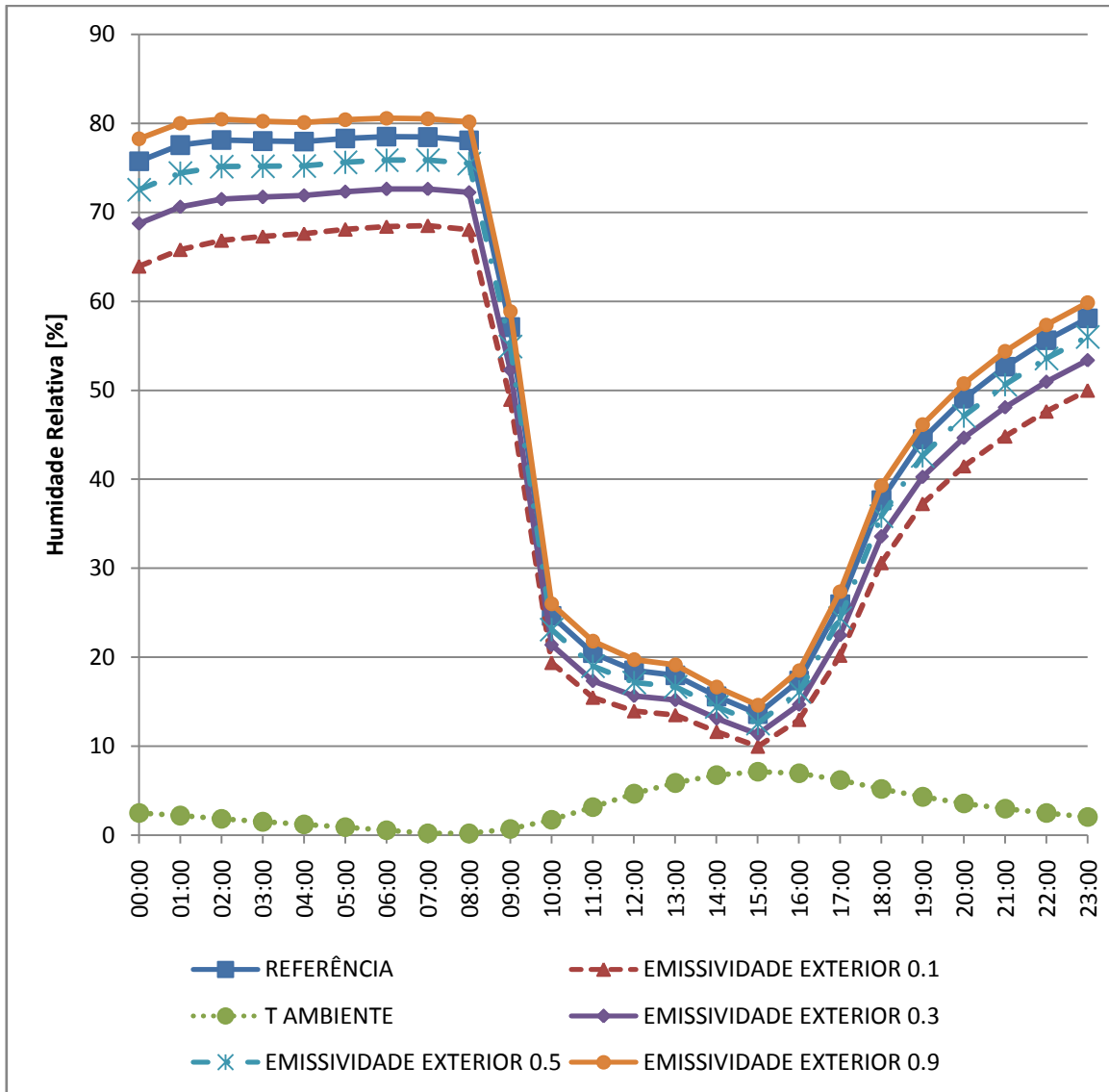


Figura 4.41 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC13 a EC16.

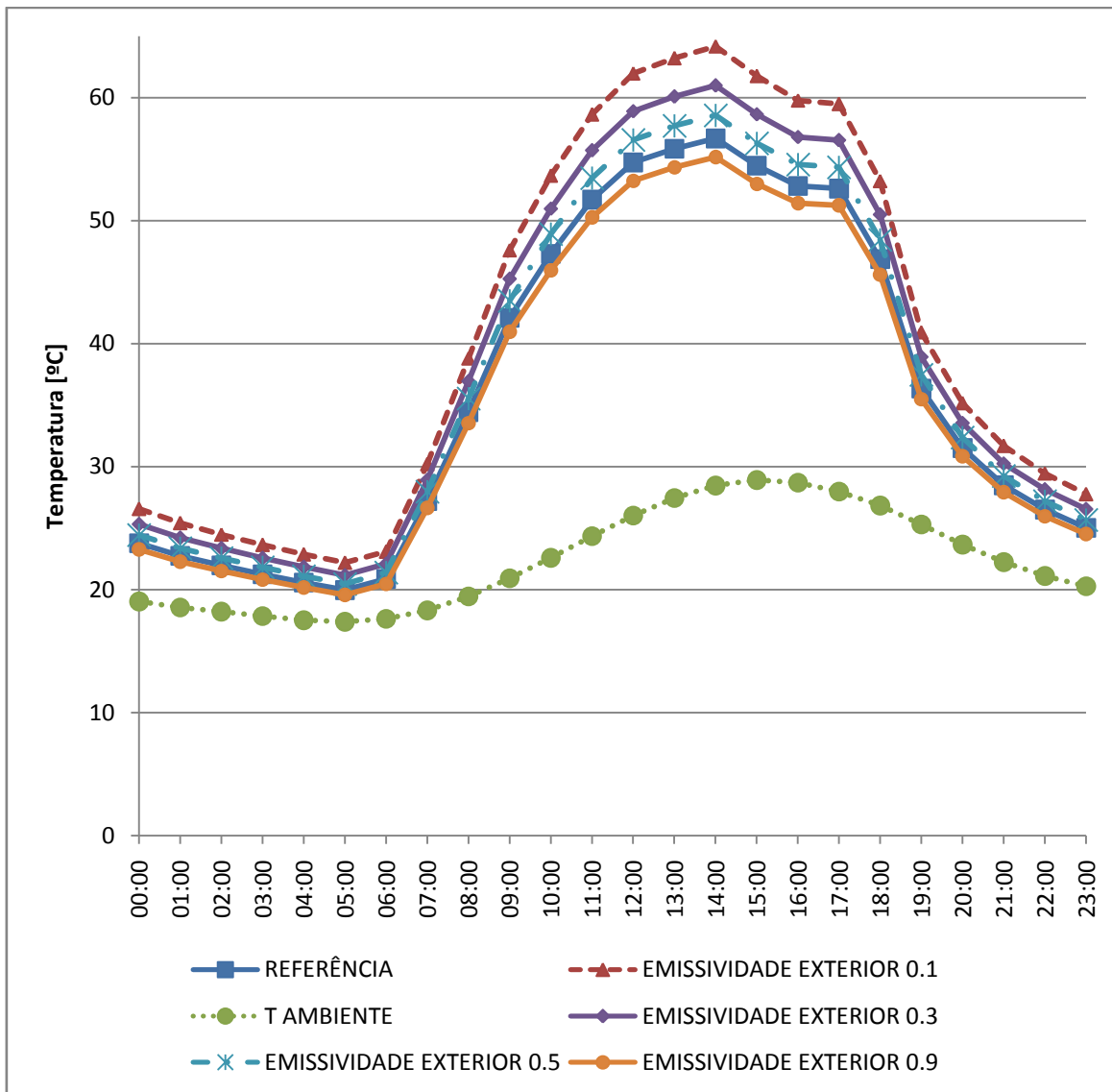


Figura 4.42 - Gráfico de 15 julho comparativo da temperatura interior dos ensaios EC13 a EC16.

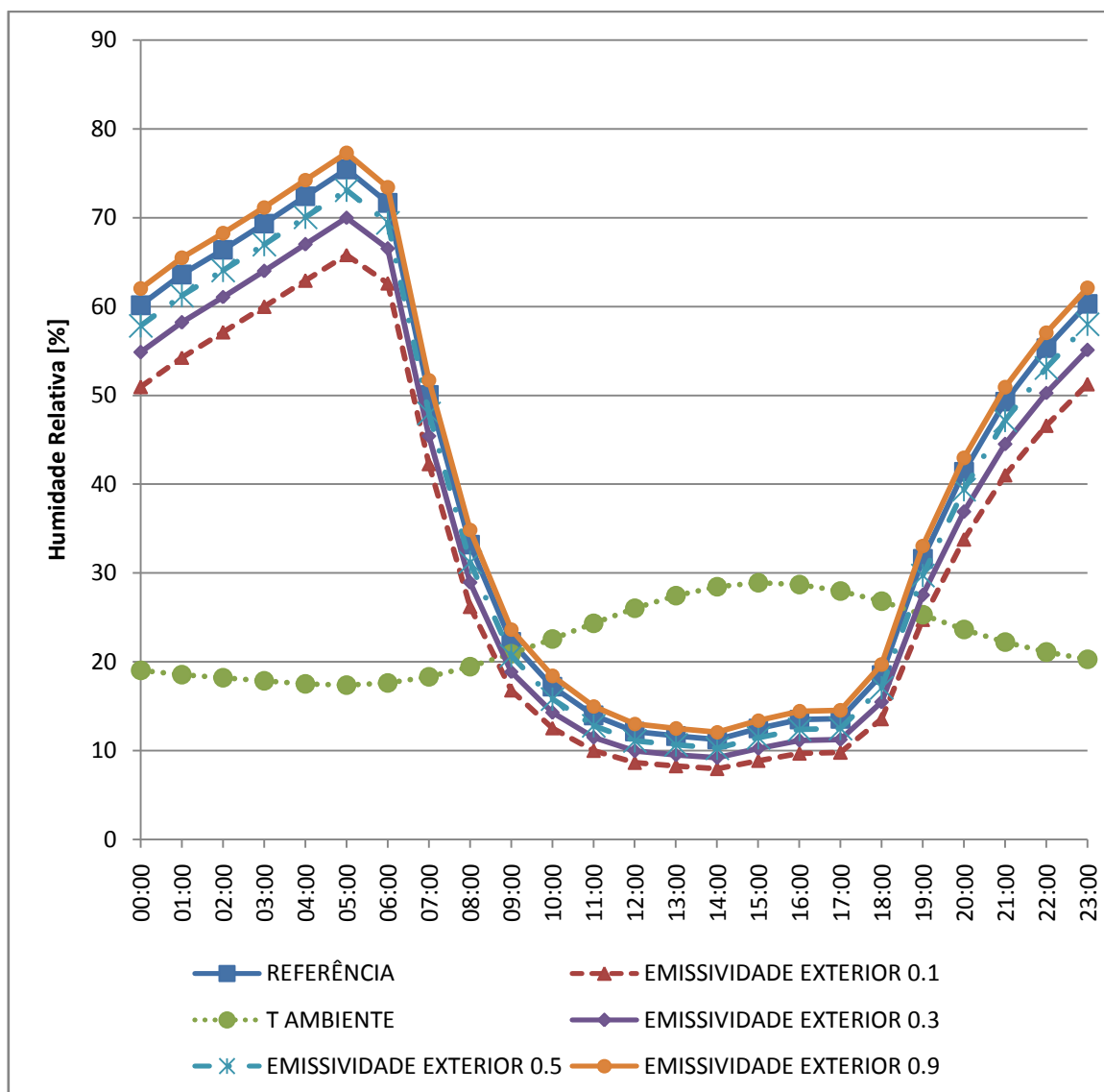


Figura 4.43 - Gráfico de 15 julho comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC13 a EC16.

Com os ensaios EC13 a EC16 verifica-se que a redução da emissividade do lado exterior do envidraçado leva a uma redução da temperatura no interior da estufa a qualquer hora e em qualquer dia do ano, fazendo uma diferença mais acentuada durante o período de exposição solar. Esta redução de emissividade do lado exterior da cobertura contribui de forma efectiva para uma redução da permuta de radiação entre a estufa e a sua envolve exterior.

As figuras 4.44, 4.45, 4.46, 4.47, 4.48 e 4.49 ilustram os resultados dos ensaios EC17 a EC20.

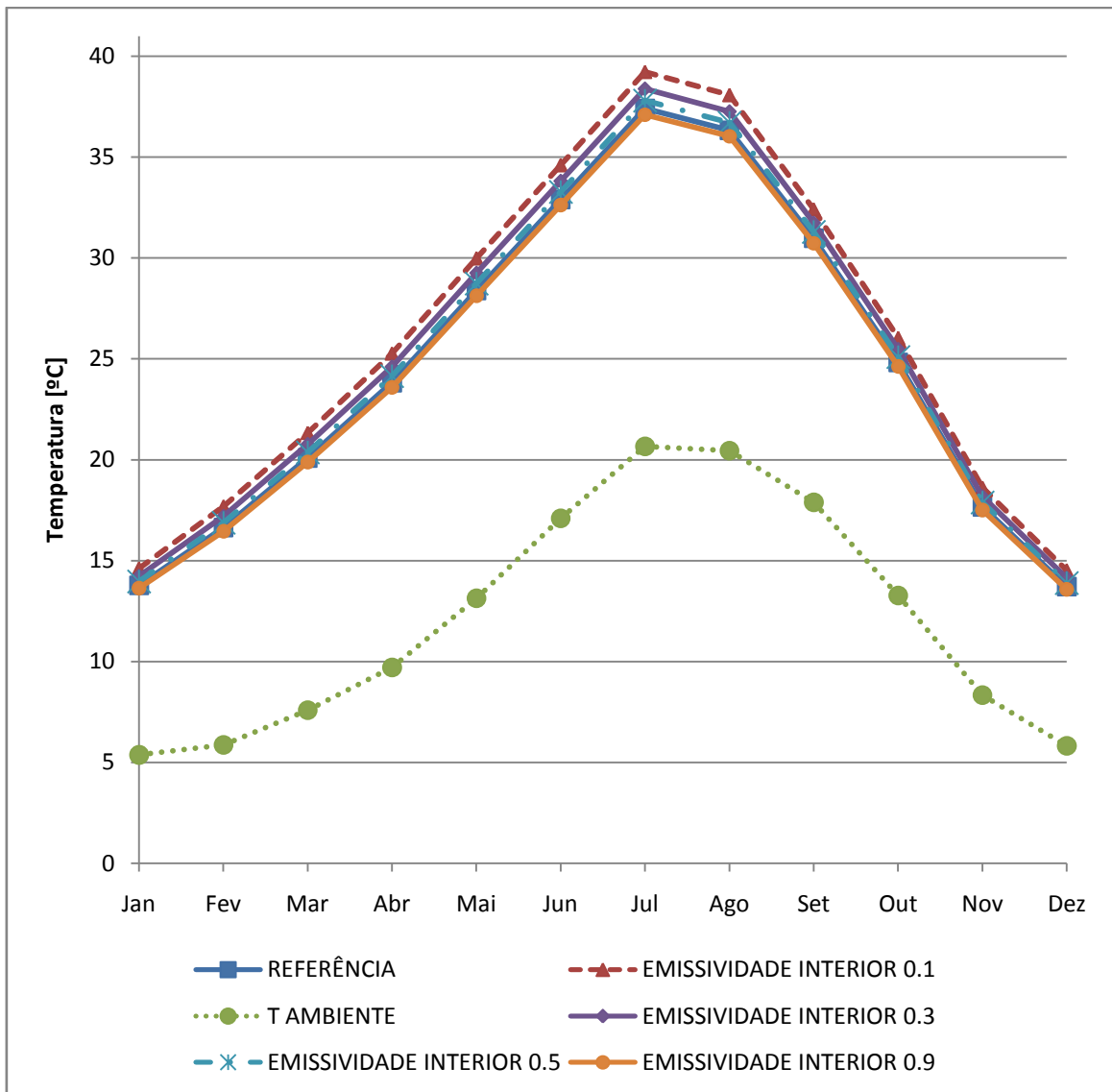


Figura 4.44 - Gráfico anual comparativo da temperatura interior dos ensaios EC17 a EC20.

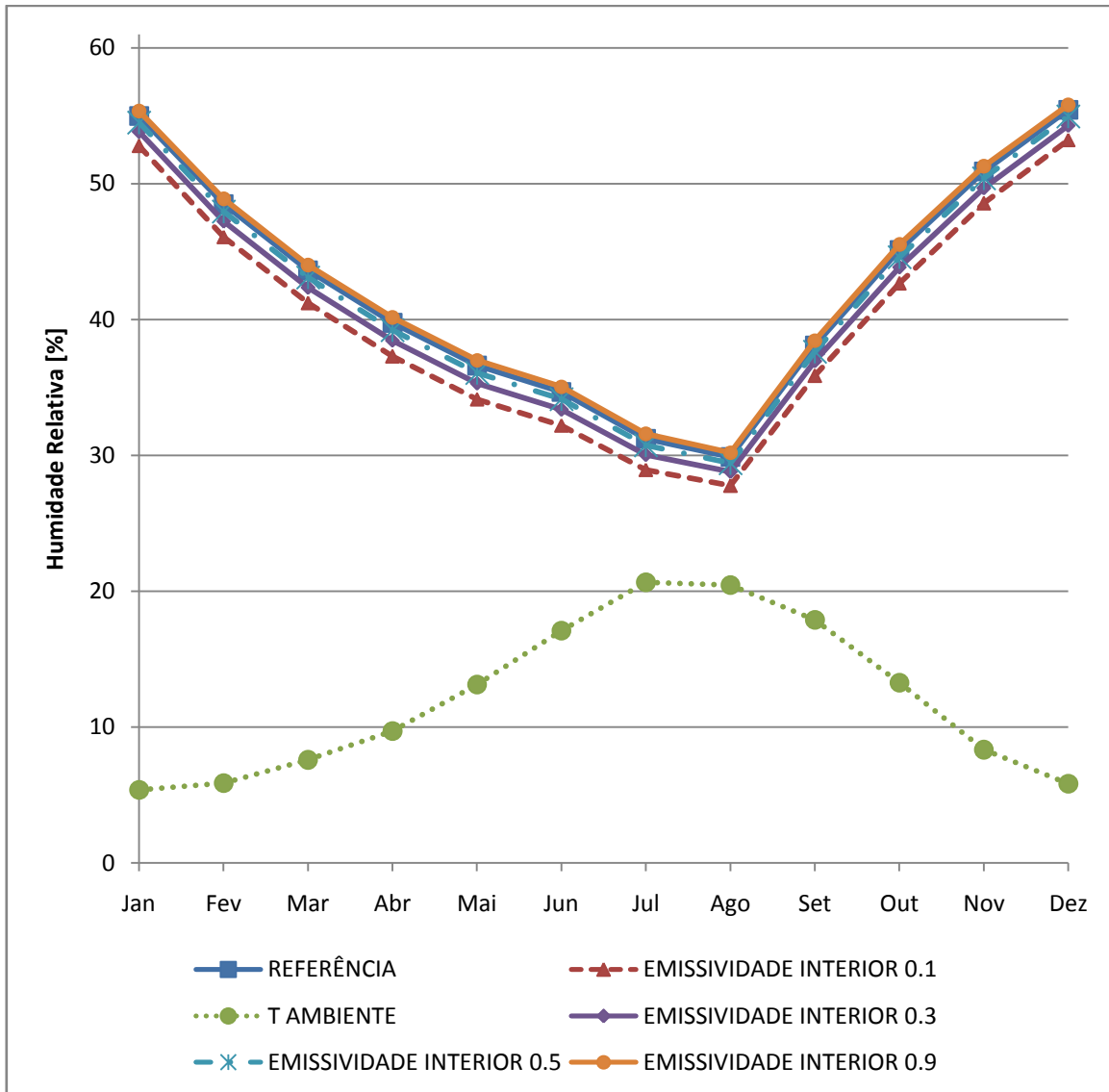


Figura 4.45 - Gráfico anual comparativo da umidade relativa interior dos ensaios EC17 a EC20.

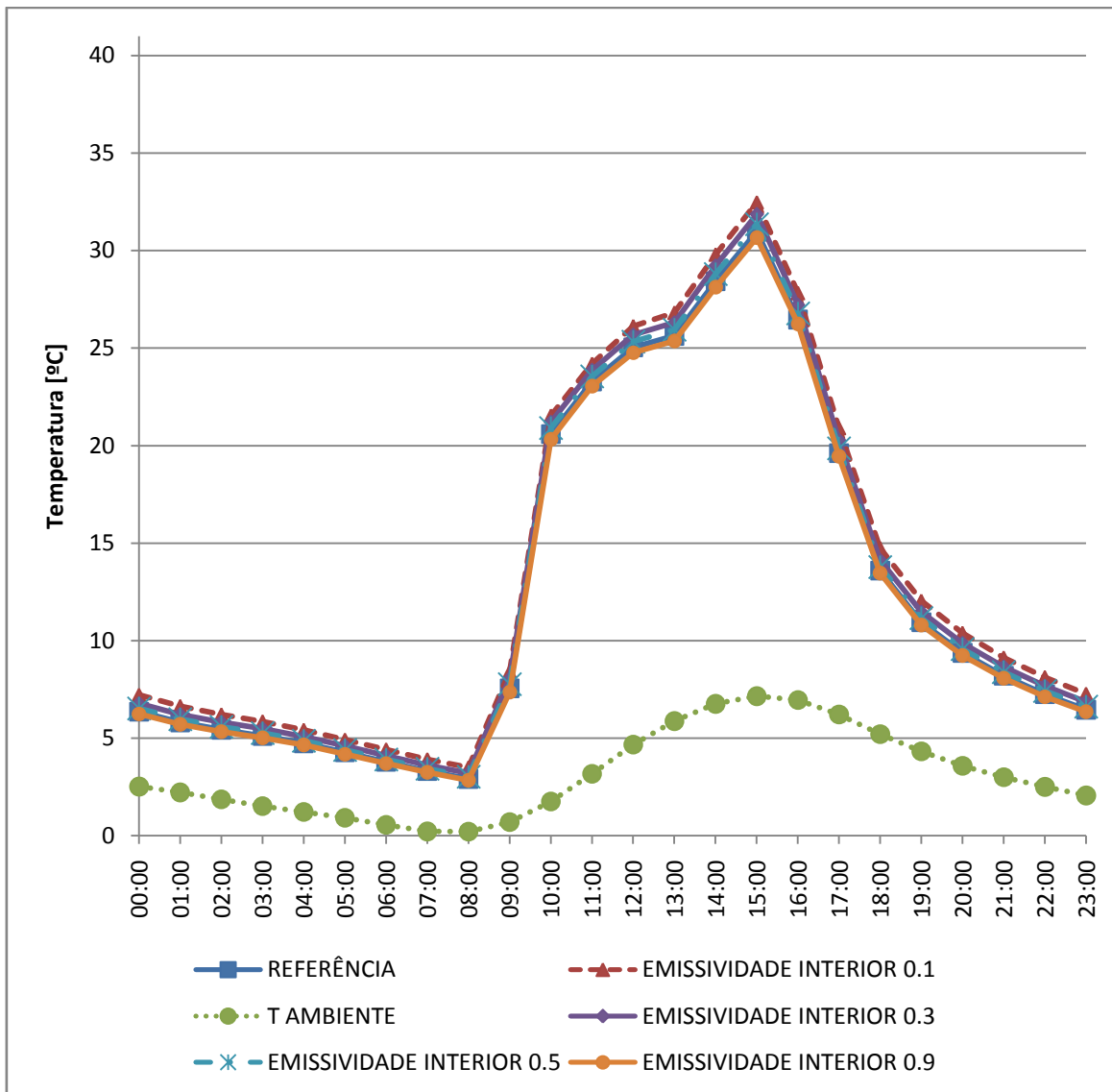


Figura 4.46 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da temperatura interior dos ensaios EC17 a EC20.

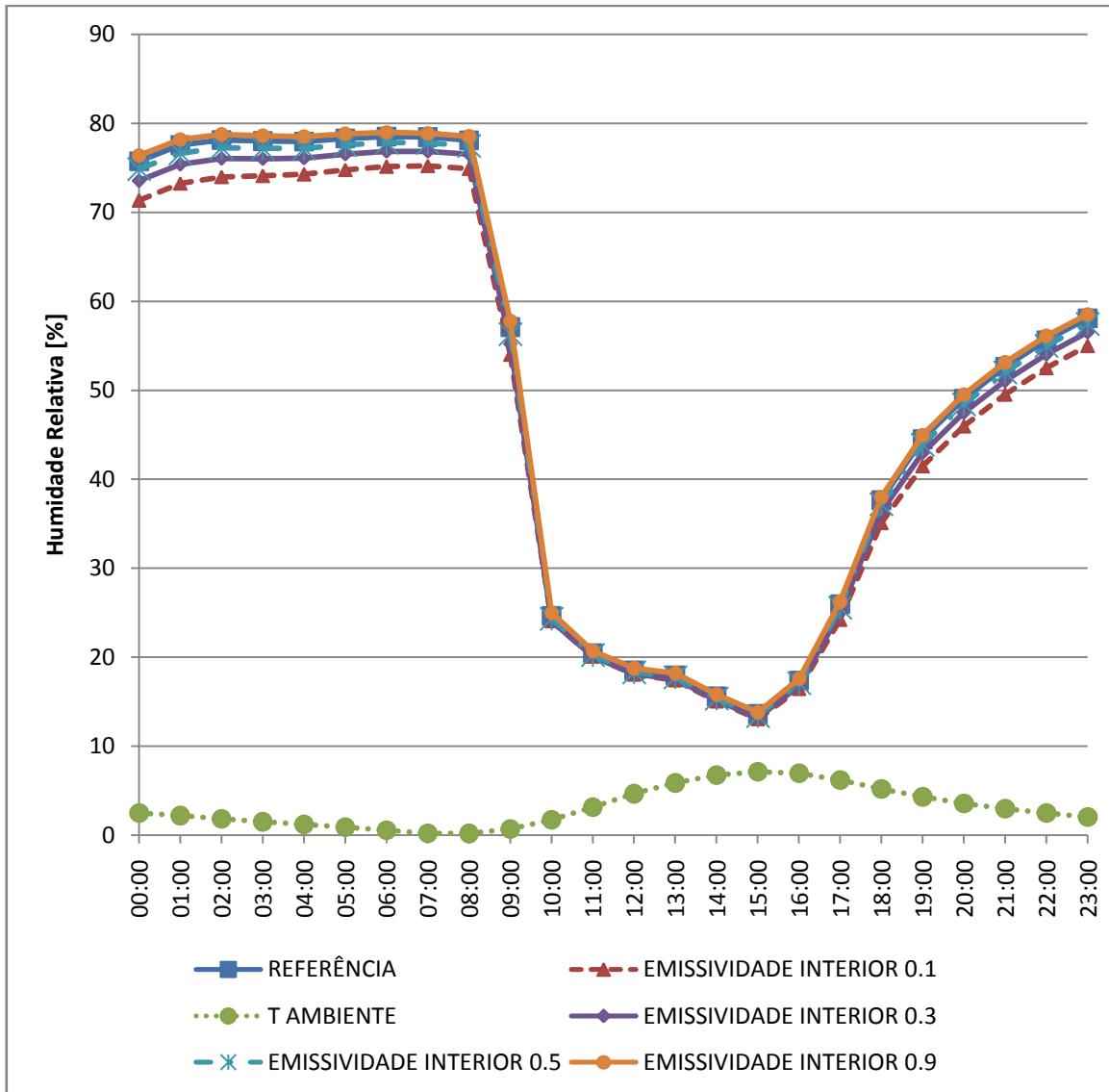


Figura 4.47 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da umidade relativa interior dos ensaios EC17 a EC20.

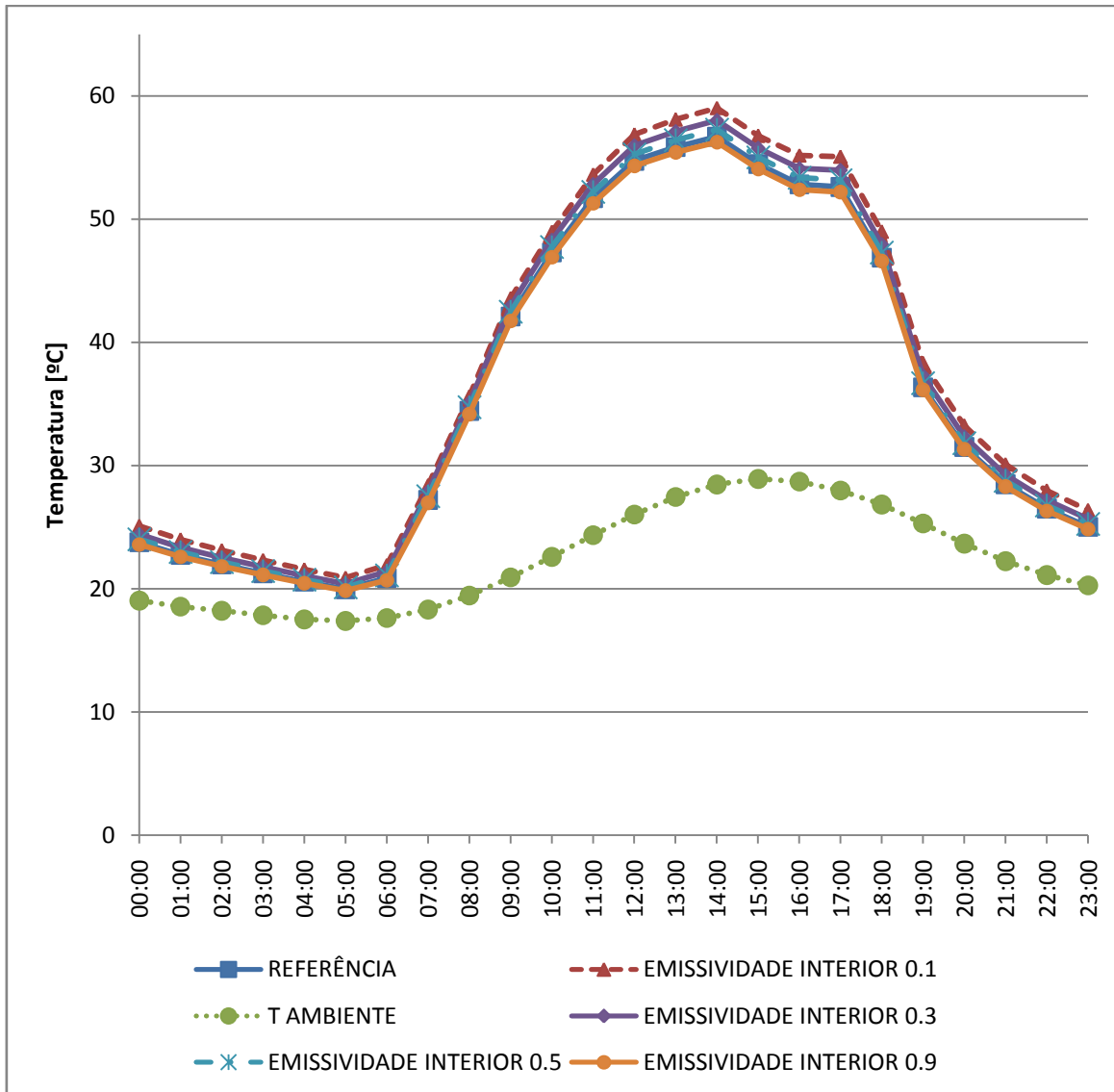


Figura 4.48 - Gráfico de 15 julho comparativo da temperatura interior dos ensaios EC17 a EC20.

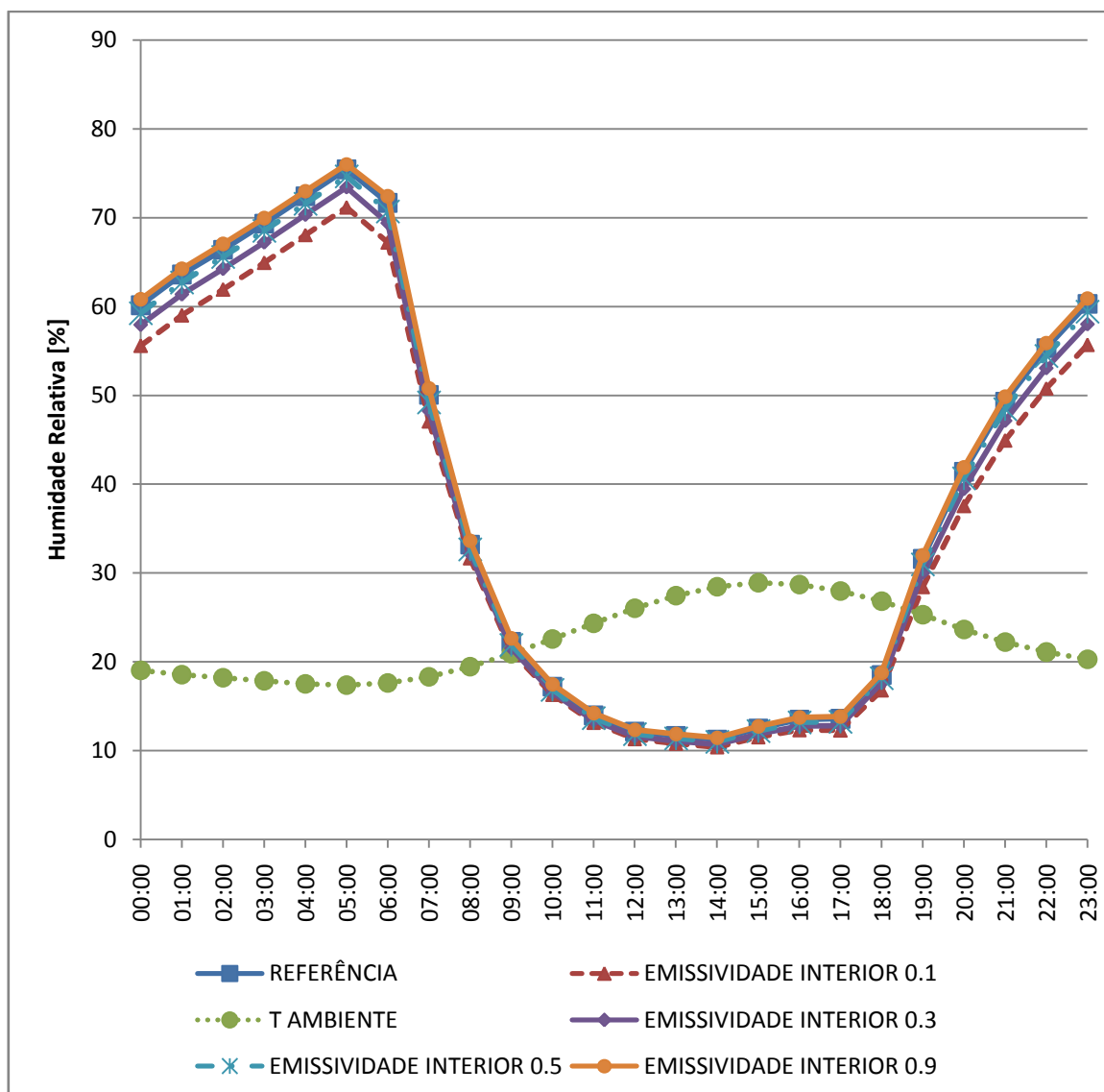


Figura 4.49 - Gráfico de 15 julho comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC17 a EC20.

No grupo de ensaios EC17 a EC20 constam resultados semelhantes aos do grupo EC13 a EC16, sendo o raciocínio análogo, exceto com a particularidade de a redução da emissividade do lado interior neste grupo ter menor impacto na temperatura interior, podendo ser explicado pelo facto de a redução de emissividade do lado interior contribuir para uma redução das trocas de calor por radiação, maioritariamente de grande comprimento de onda, entre a superfície interior da cobertura e, na presente situação, com a envolvente interior da estufa.

As figuras 4.50, 4.51, 4.52, 4.53, 4.54 e 4.55 ilustram os resultados dos ensaios EC21 a EC23.

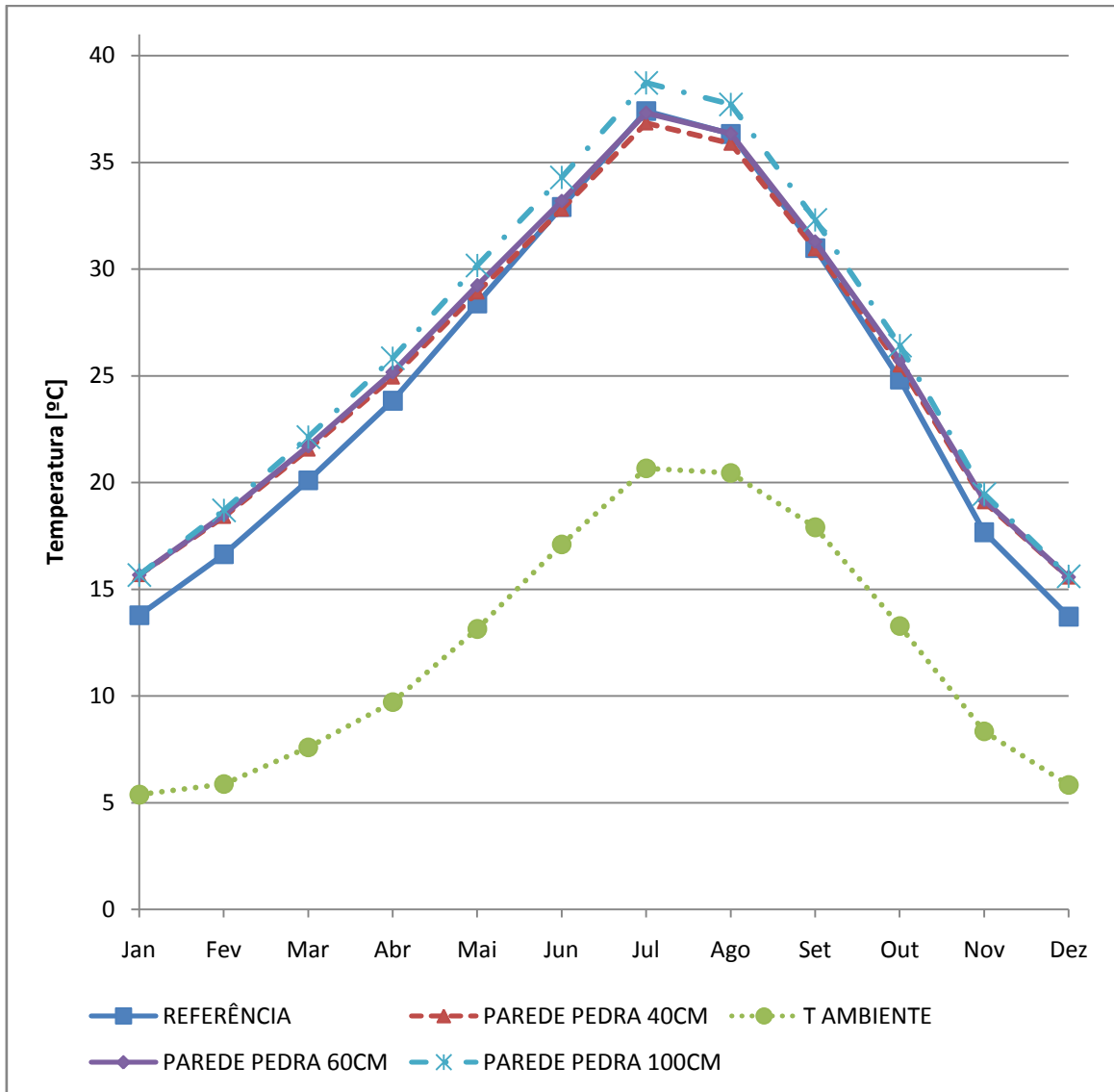


Figura 4.50 - Gráfico anual comparativo da temperatura interior dos ensaios EC21 a EC23.

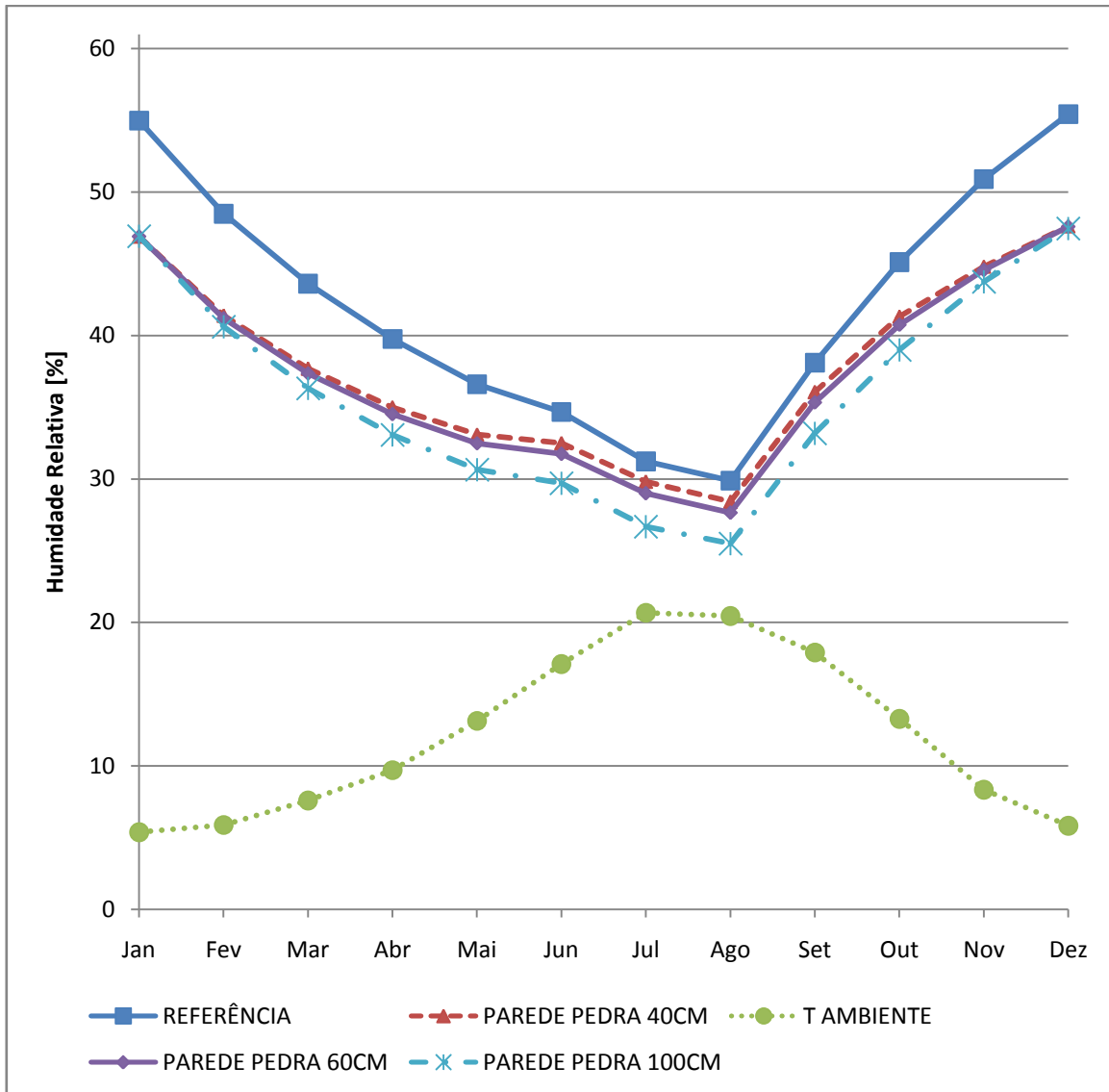


Figura 4.51 - Gráfico anual comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC21 a EC23.

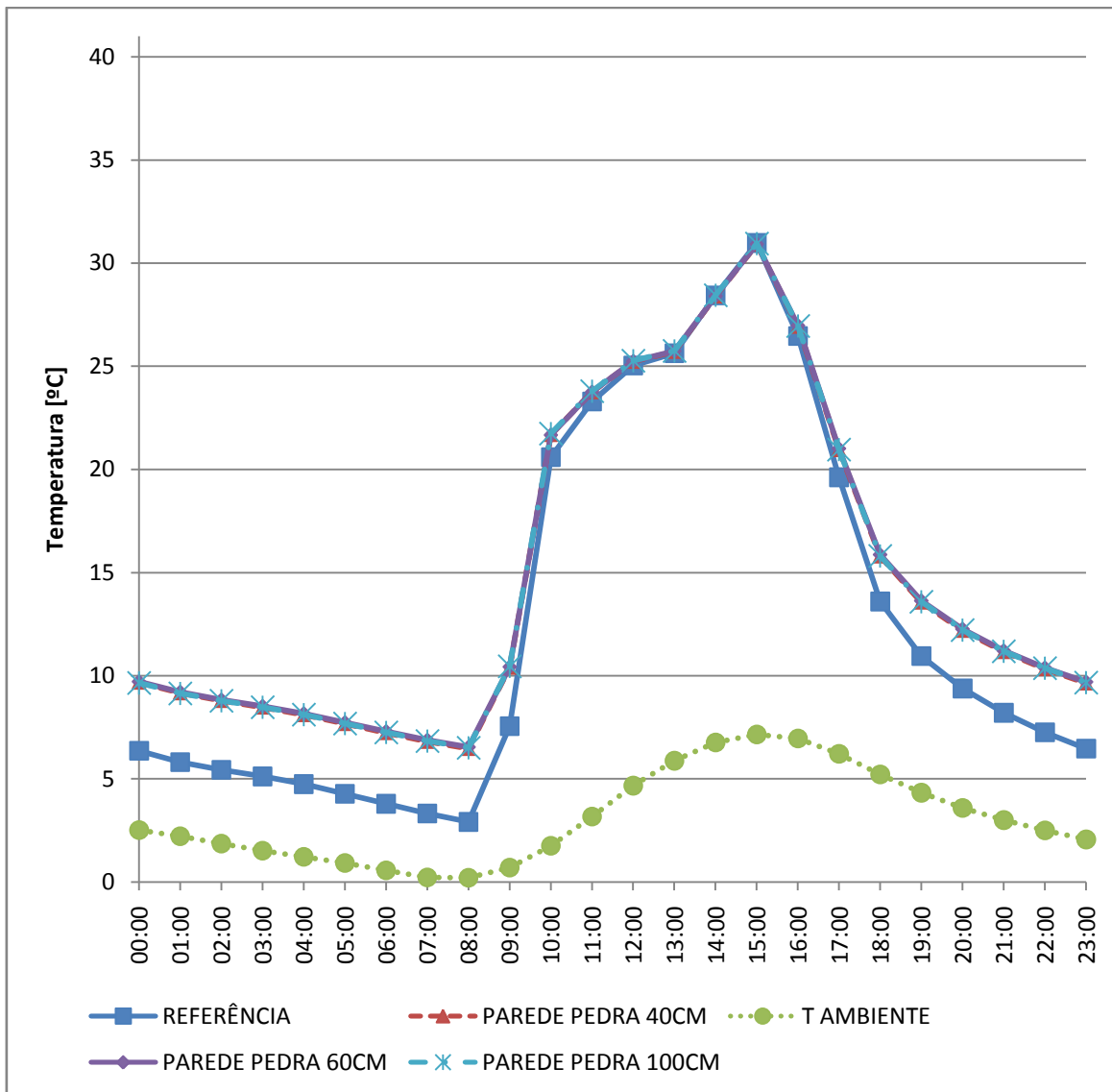


Figura 4.52 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da temperatura interior dos ensaios EC21 a EC23.

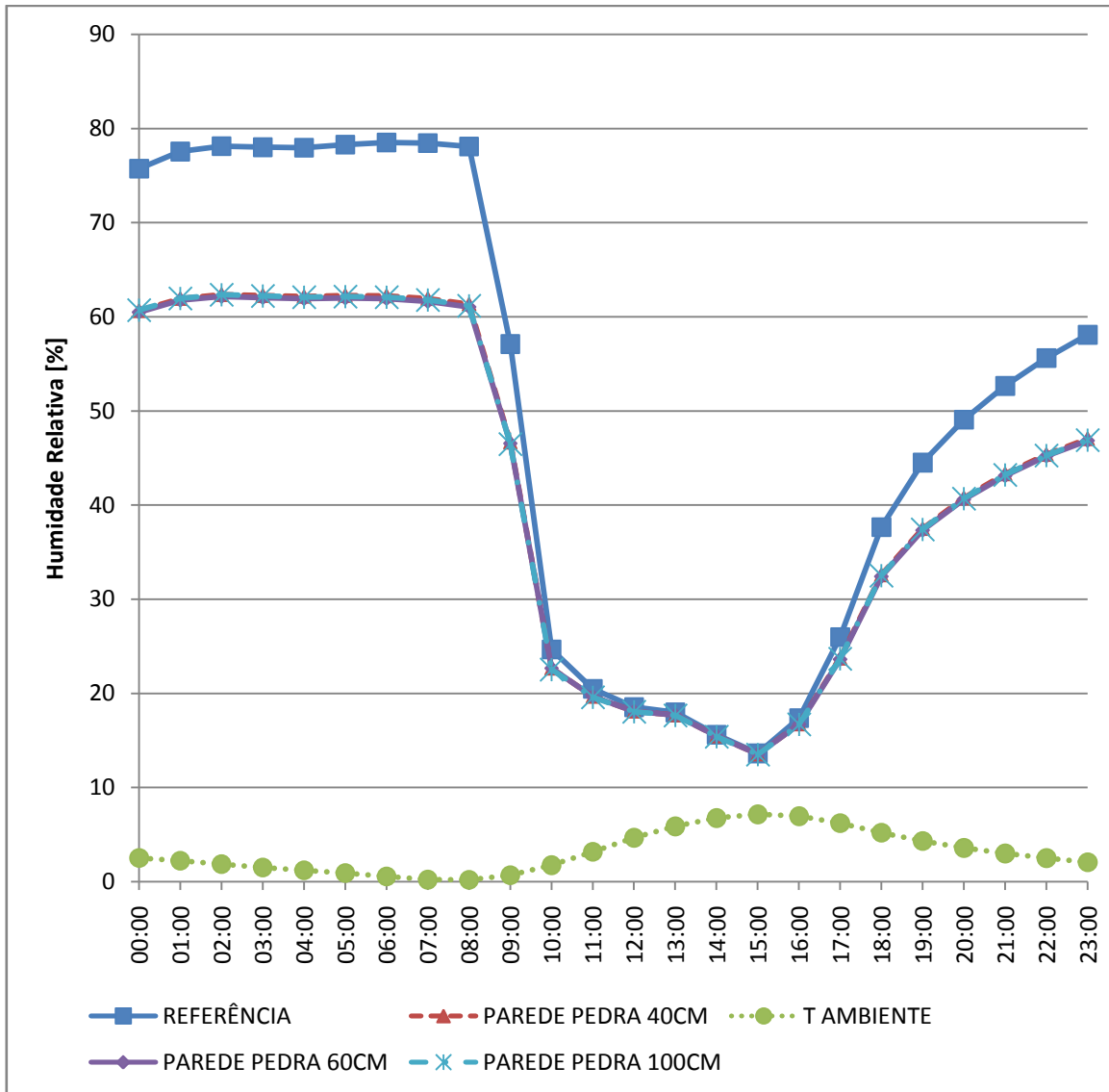


Figura 4.53 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC21 a EC23.

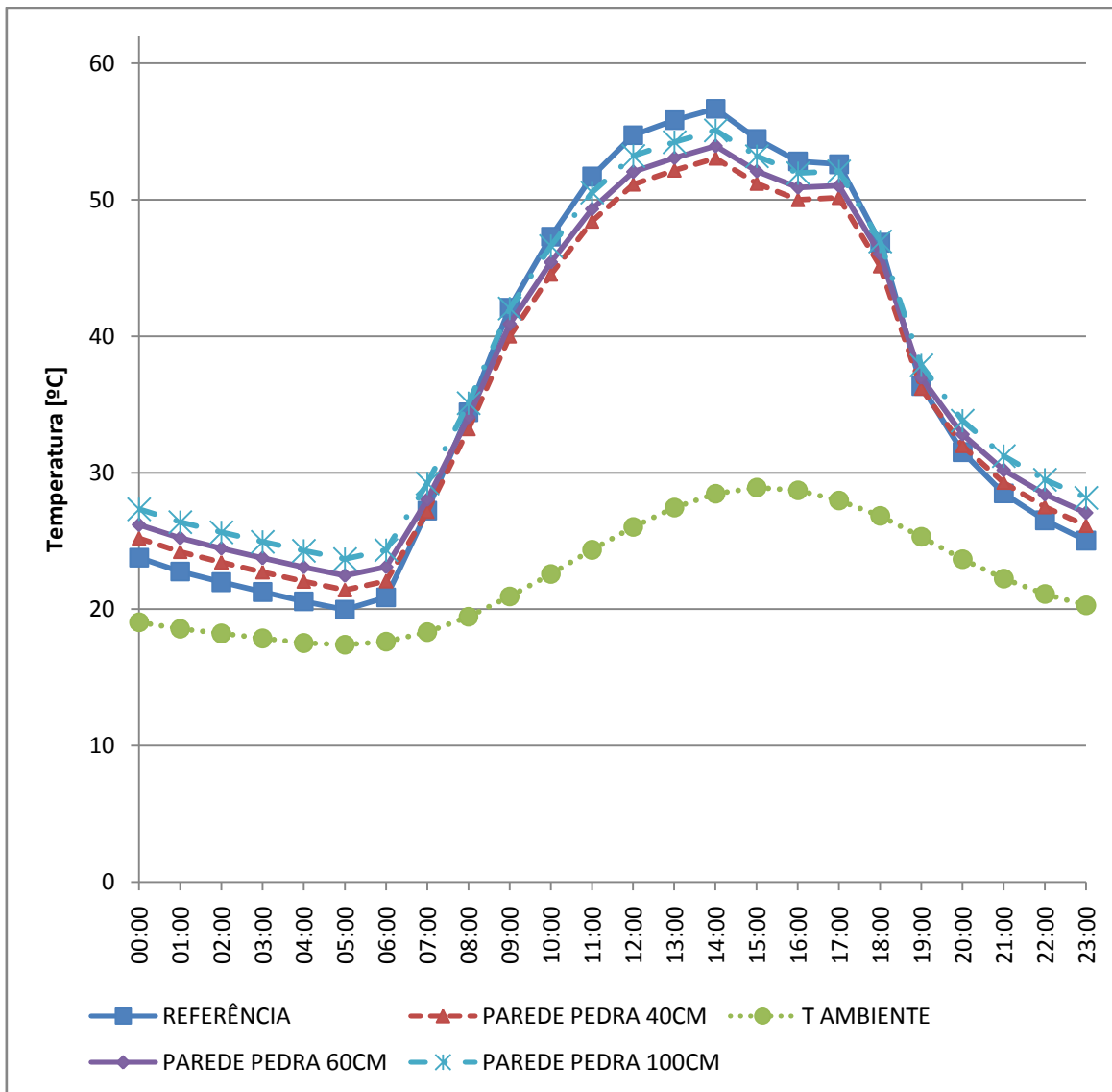


Figura 4.54 - Gráfico de 15 julho comparativo da temperatura interior dos ensaios EC21 a EC23.

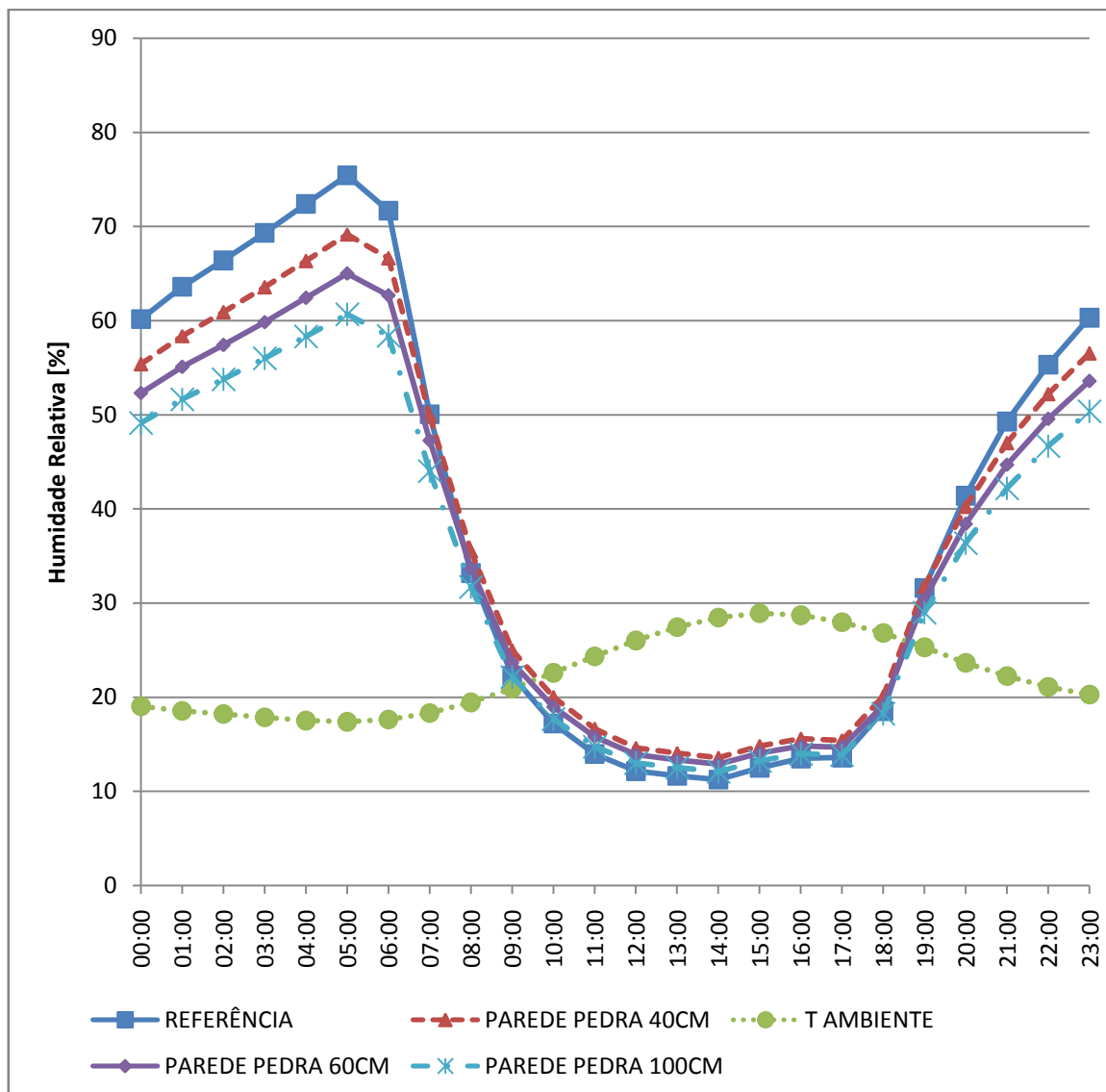


Figura 4.55 - Gráfico de 15 julho comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC21 a EC23.

Os ensaios EC21 a EC23 estudam o efeito de uma parede em rocha granítica de espessura elevada aplicada na parede norte com o intuito de reduzir as perdas por essa parede que não recebe radiação solar e atuar como um acumulador de calor que armazena energia excedente durante o dia e a liberta para o interior da estufa durante a noite. Os resultados mostram que a utilização da parede influenciou as temperaturas ao longo de todo o ano, sendo que as diferentes espessuras para a parede apenas produziram resultados diferentes durante a época de verão. Embora não haja vantagem em aumentar desnecessariamente a espessura da parede (ver figura 4.50, para a maior espessura), se devidamente dimensionada ela contribui de facto para uma atenuação da temperatura interior da estufa durante o dia e representa uma

proteção térmica adicional para a estufa particularmente durante a noite e para a situação de inverno.

As figuras 4.56, 4.57, 4.58, 4.59, 4.60 e 4.61 ilustram os resultados dos ensaios EC24 e EC25.

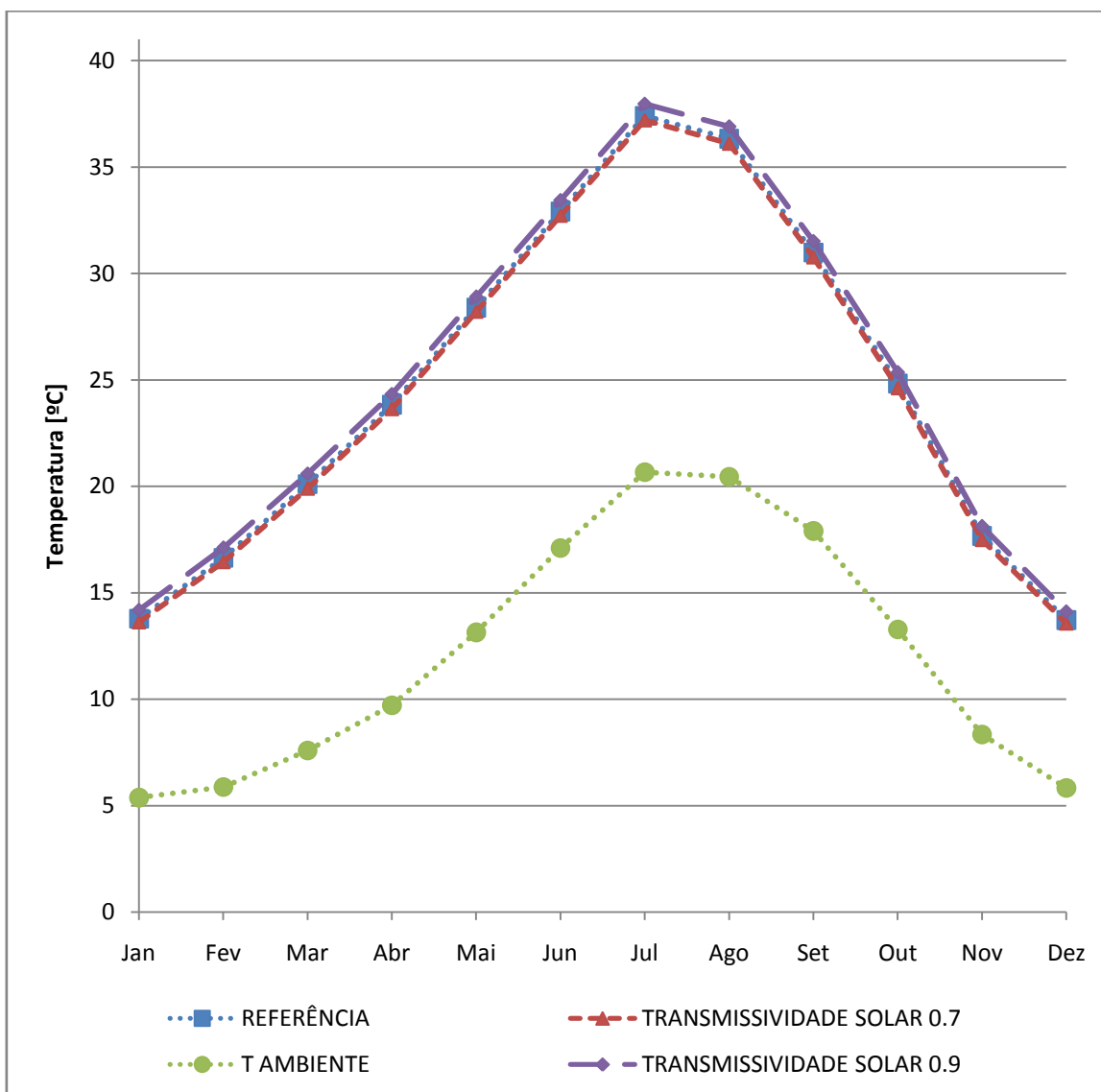


Figura 4.56 - Gráfico anual comparativo da temperatura interior dos ensaios EC24 e EC25.

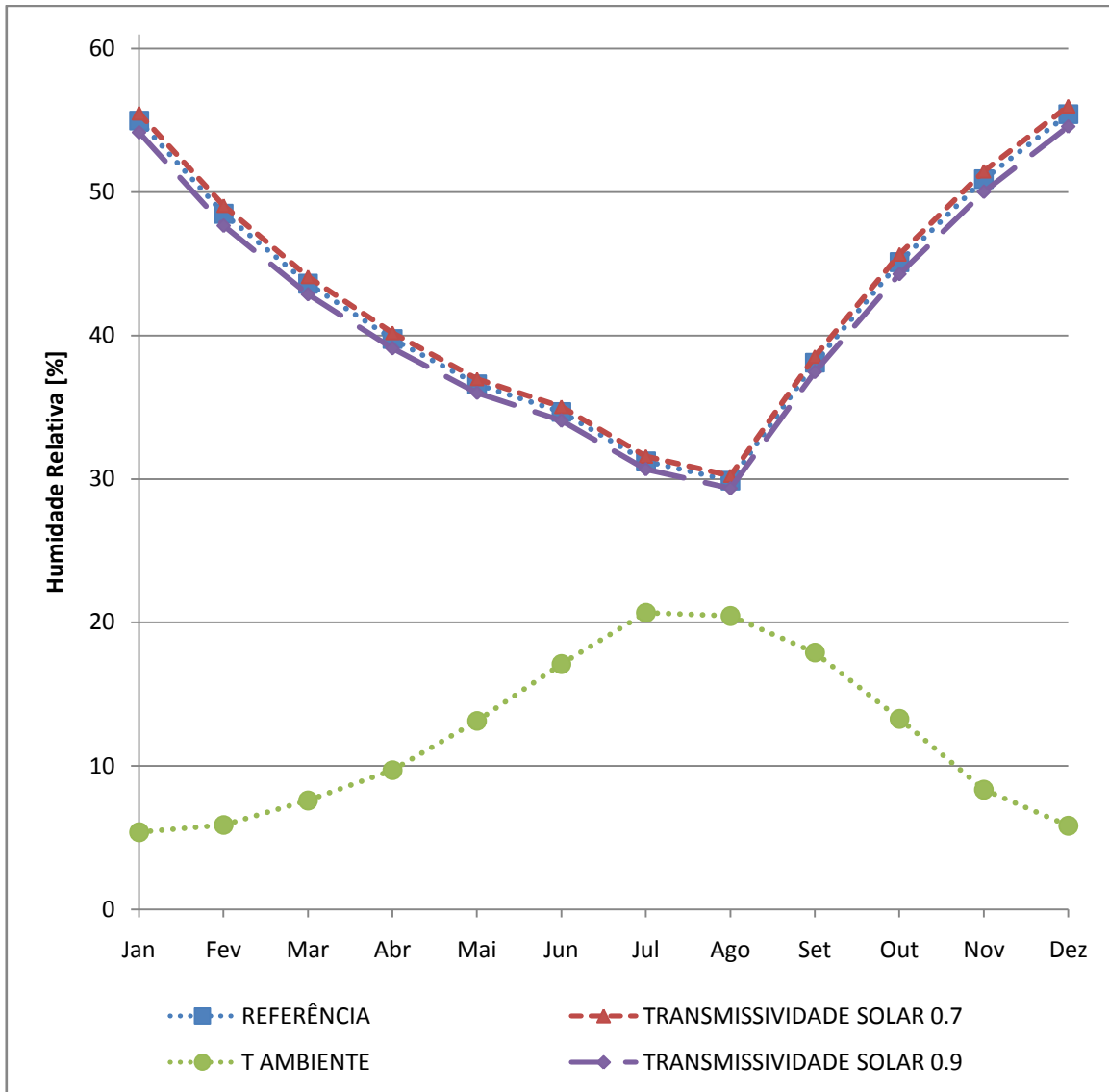


Figura 4.57 - Gráfico anual comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC24 e EC25.

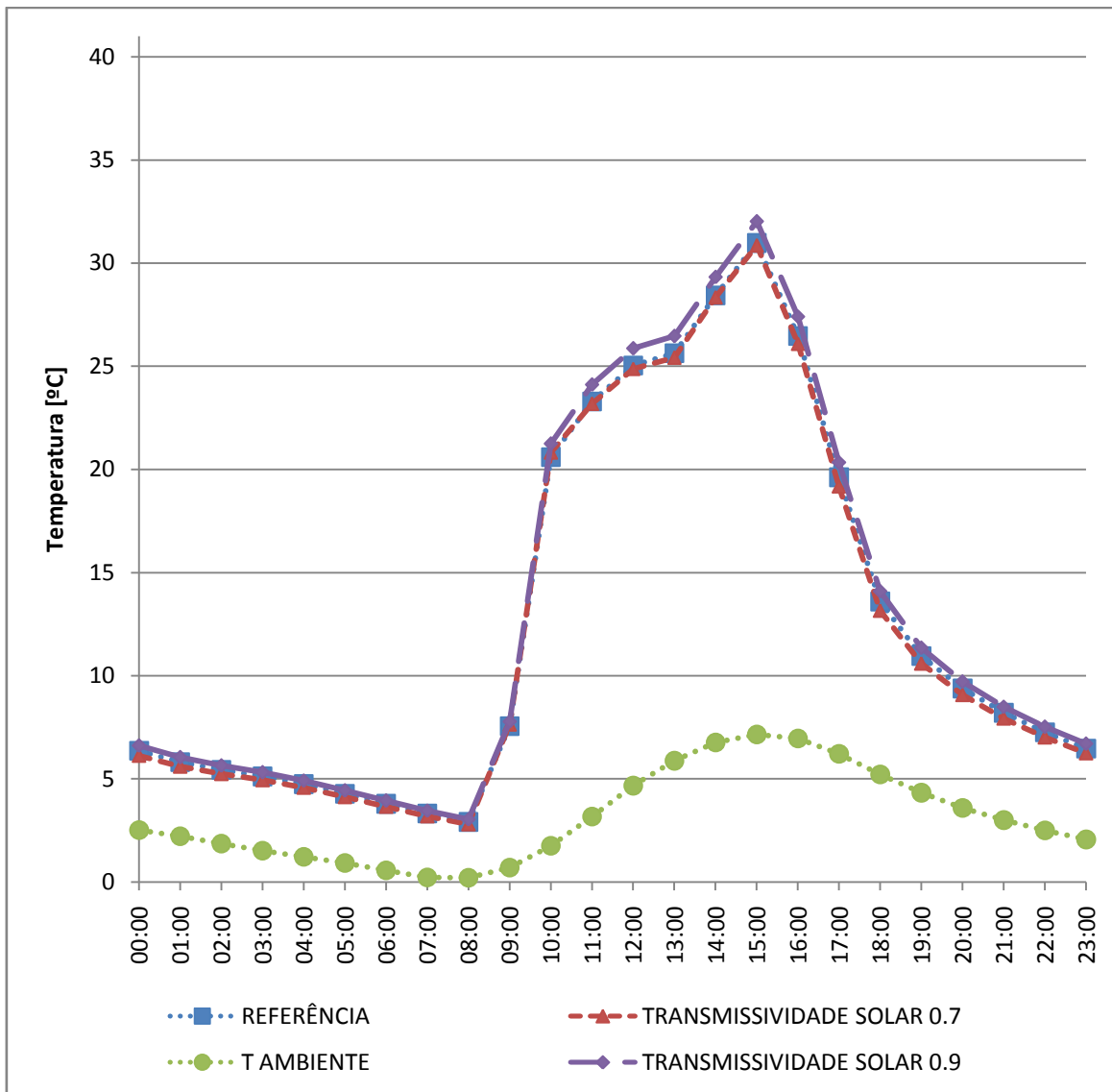


Figura 4.58 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da temperatura interior dos ensaios EC24 e EC25.

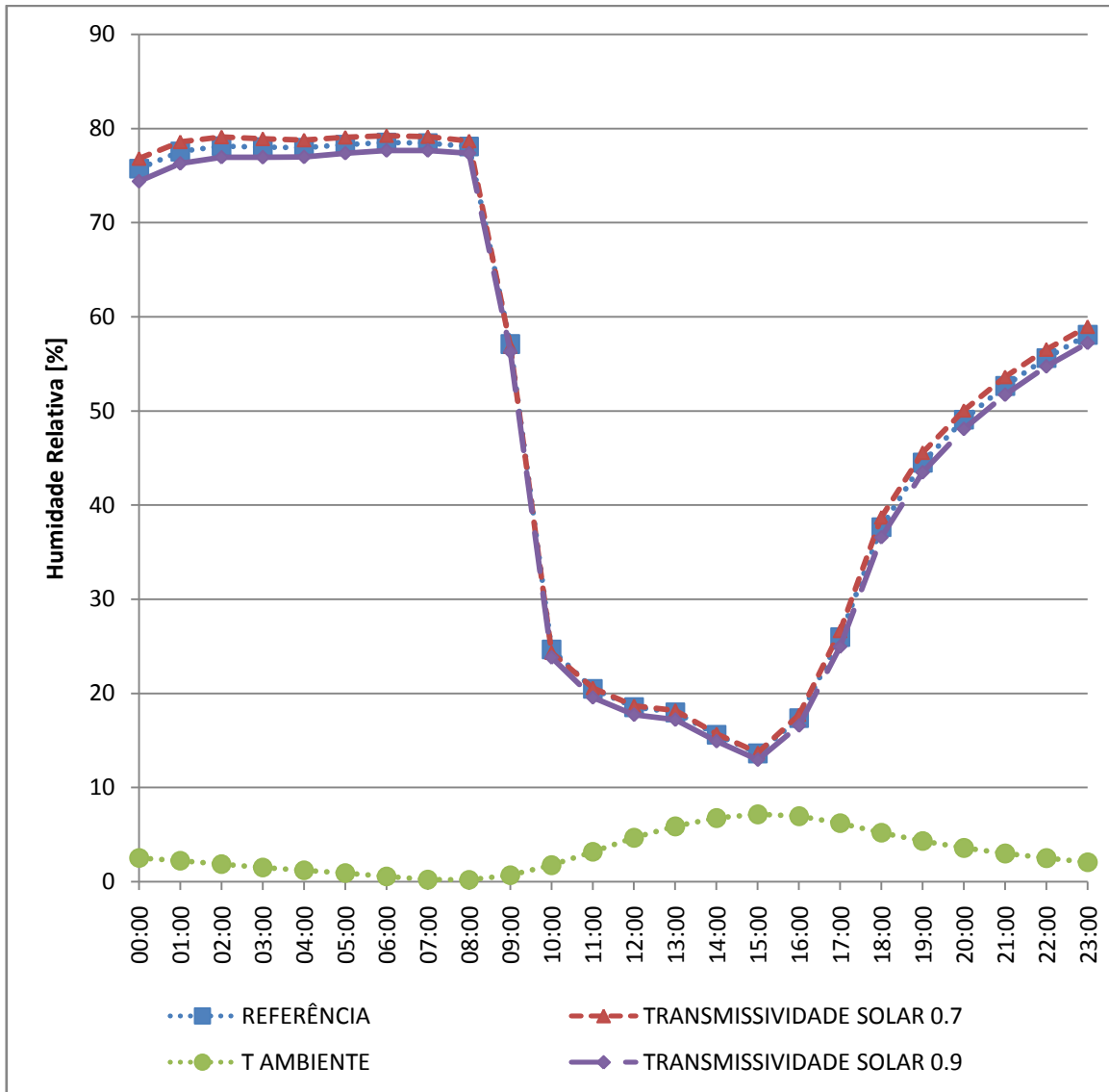


Figura 4.59 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC24 e EC25.

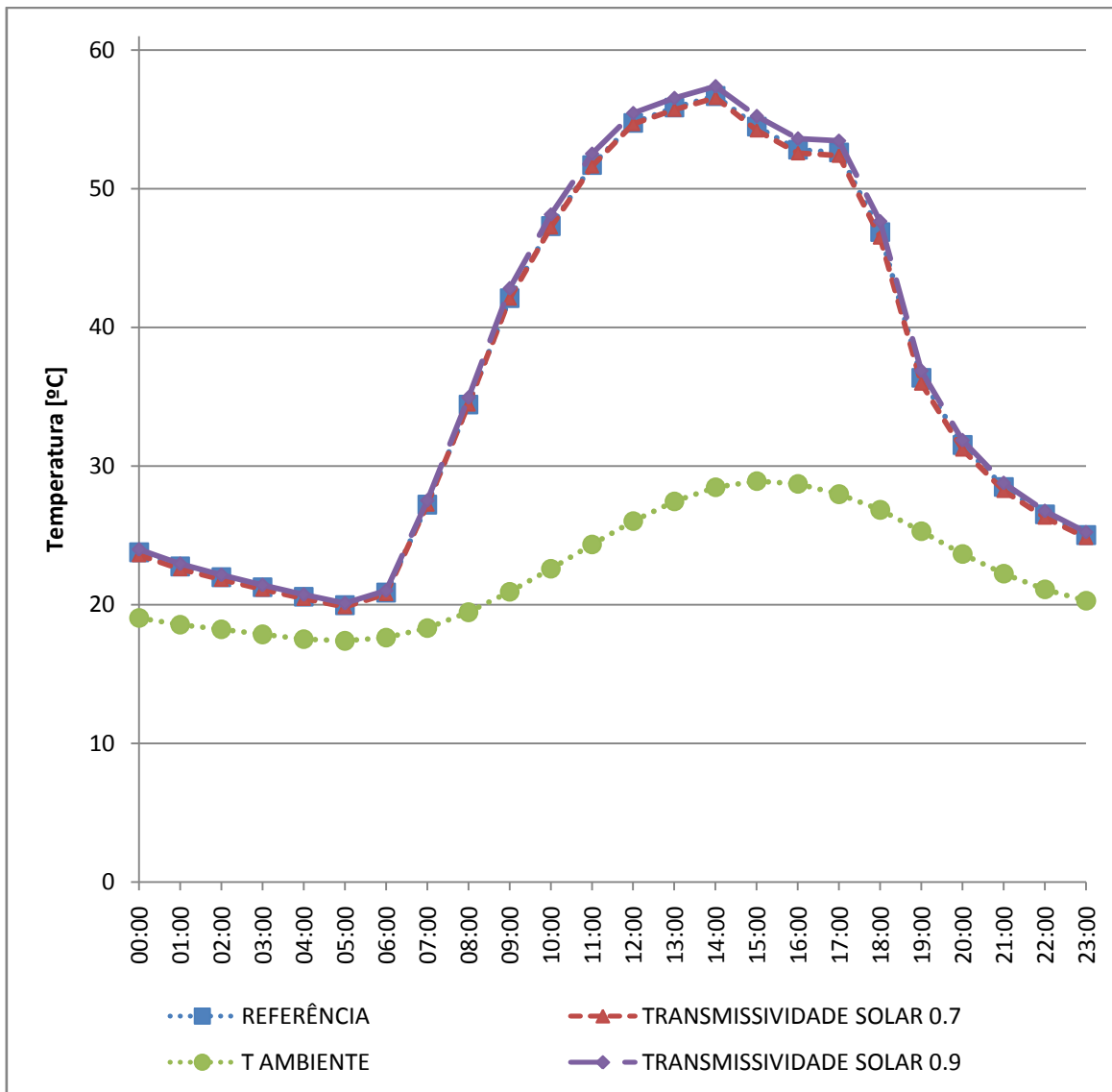


Figura 4.60 - Gráfico de 15 julho comparativo da temperatura interior dos ensaios EC24 e EC25.

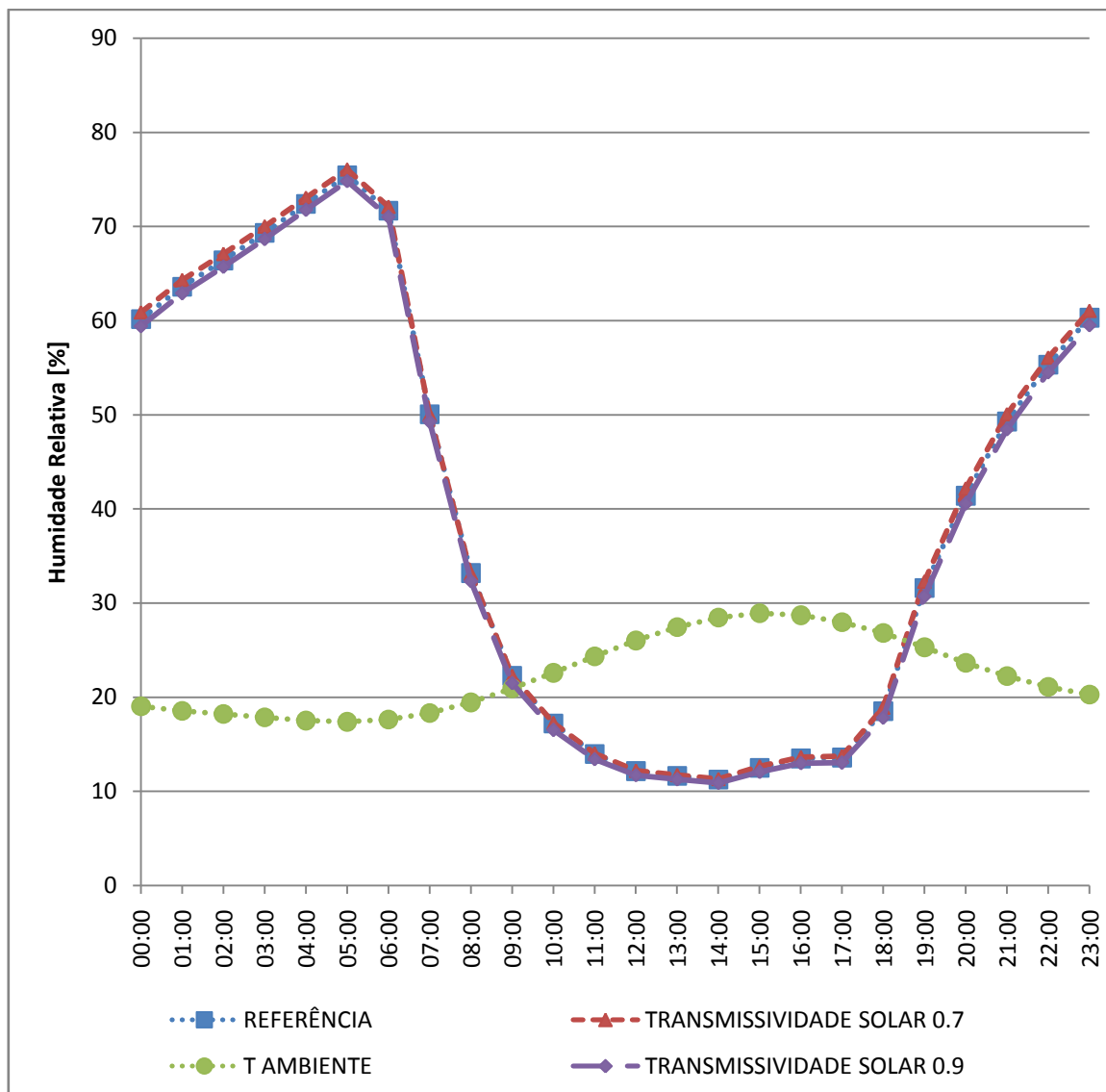


Figura 4.61 - Gráfico de 15 julho comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC24 e EC25.

A visualização dos resultados dos ensaios EC24 e EC25 é algo difícil devido à grande proximidade dos valores de todas as simulações. Os resultados mostram um aumento ligeiro de temperatura durante os períodos de exposição solar quer no inverno quer no verão consoante o valor de transmissividade solar aumenta, o que era expectável pois com uma maior admissão de radiação de pequeno comprimento de onda, maior será a temperatura no interior.

Por fim, as figuras 4.62, 4.63, 4.64, 4.65, 4.66, 4.67, 4.68, 4.69, 4.70 ilustram os resultados dos ensaios EC26 e EC27.

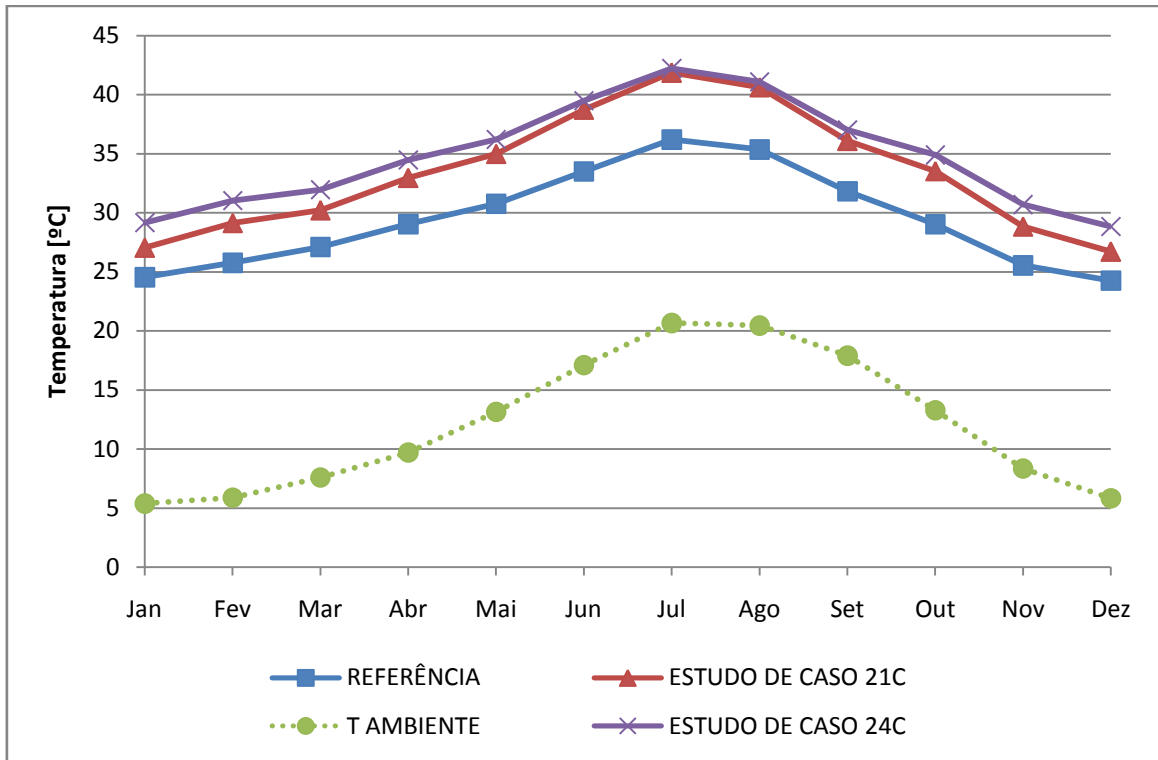


Figura 4.62 - Gráfico anual comparativo da temperatura interior dos ensaios EC26 e EC27.

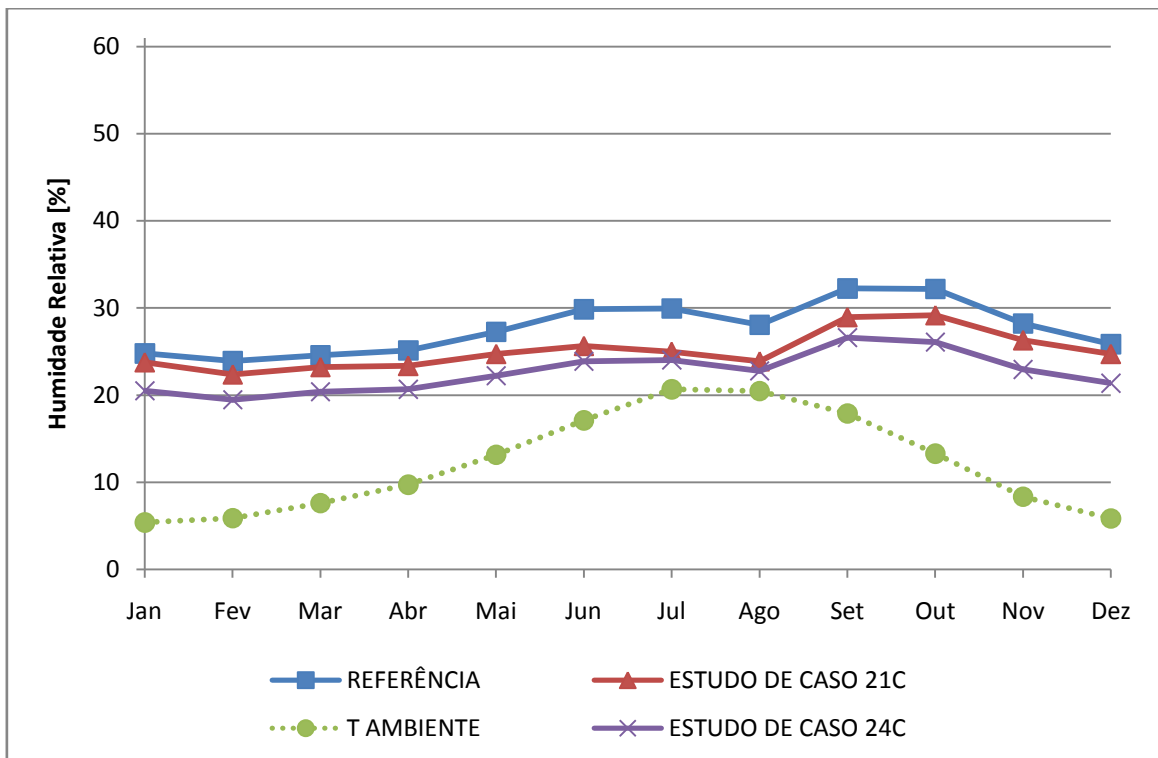


Figura 4.63 - Gráfico anual comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC26 e EC27.

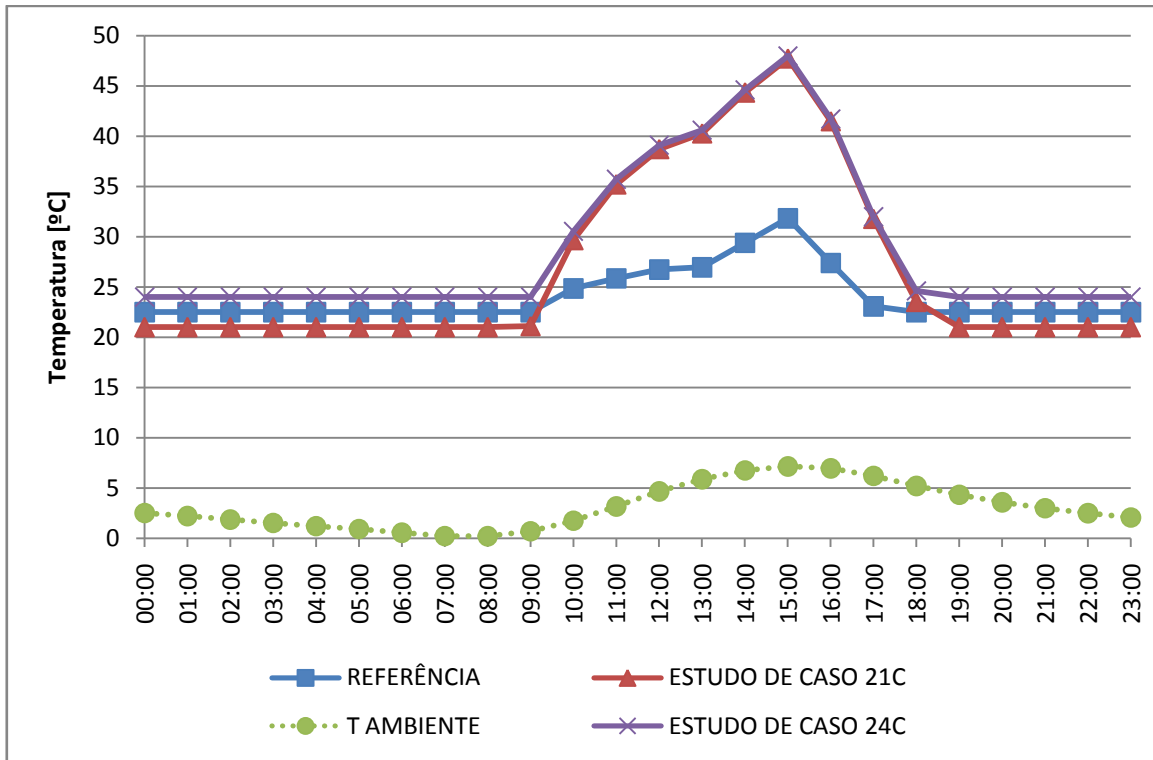


Figura 4.64 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da temp. interior dos ensaios EC26 e EC27.

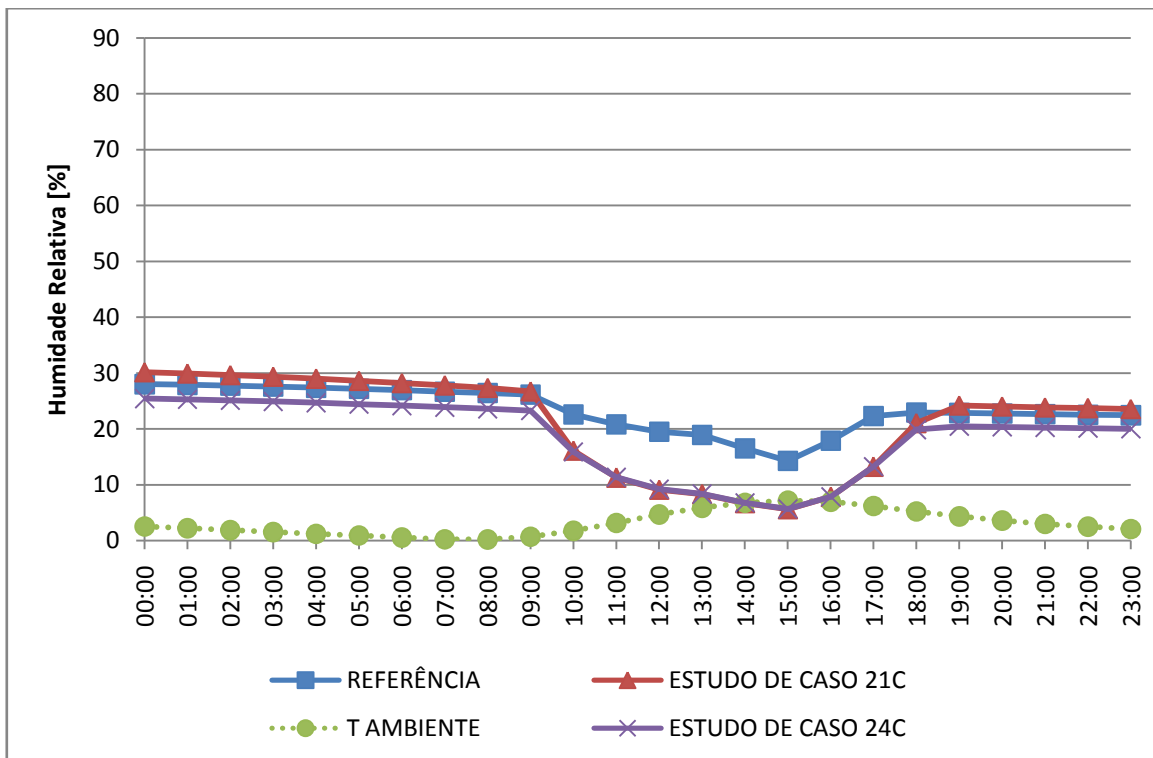


Figura 4.65 - Gráfico de 15 janeiro comparativo da umidade relativa interior dos ensaios EC26 e EC27.

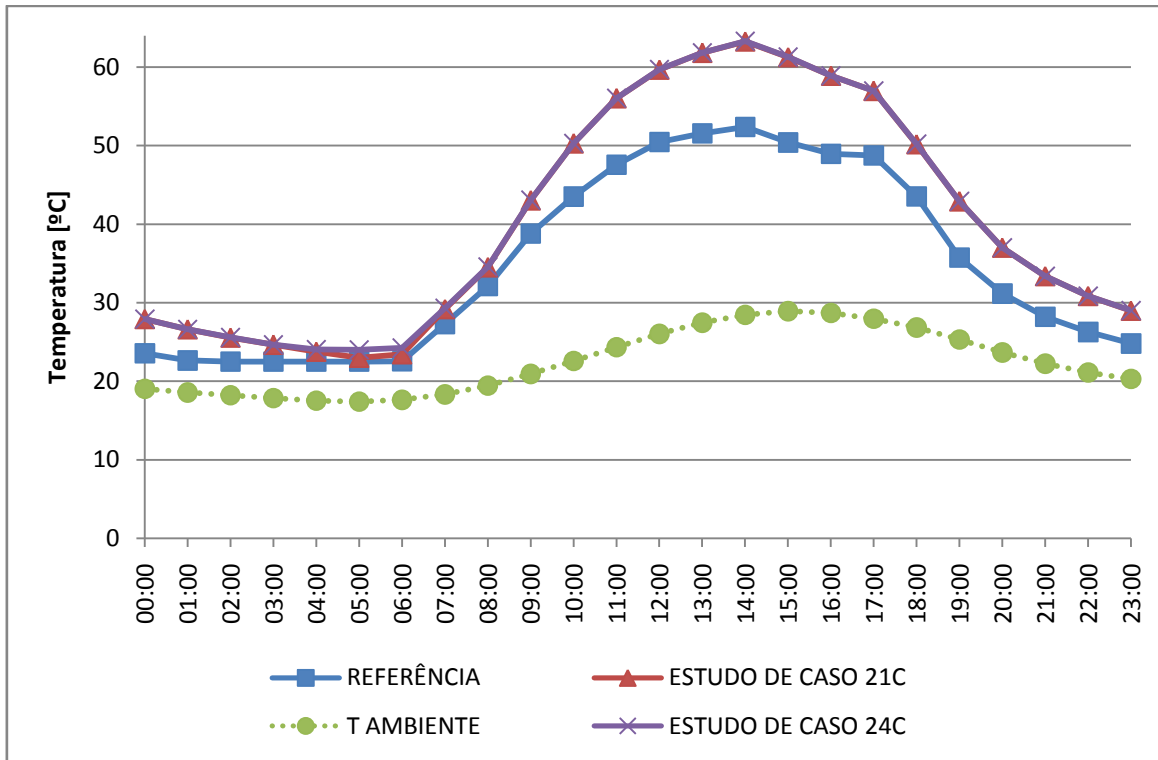


Figura 4.66 - Gráfico de 15 julho comparativo da temperatura interior dos ensaios EC26 e EC27.

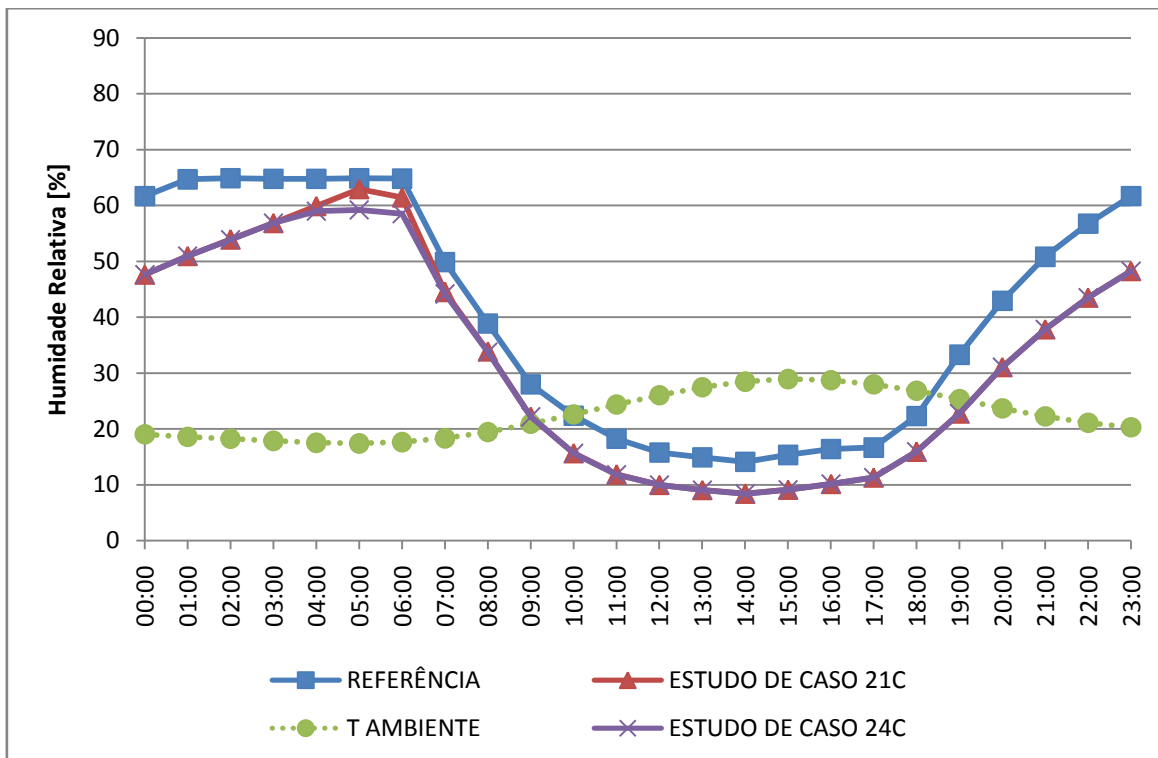


Figura 4.67 - Gráfico de 15 julho comparativo da humidade relativa interior dos ensaios EC26 e EC27.

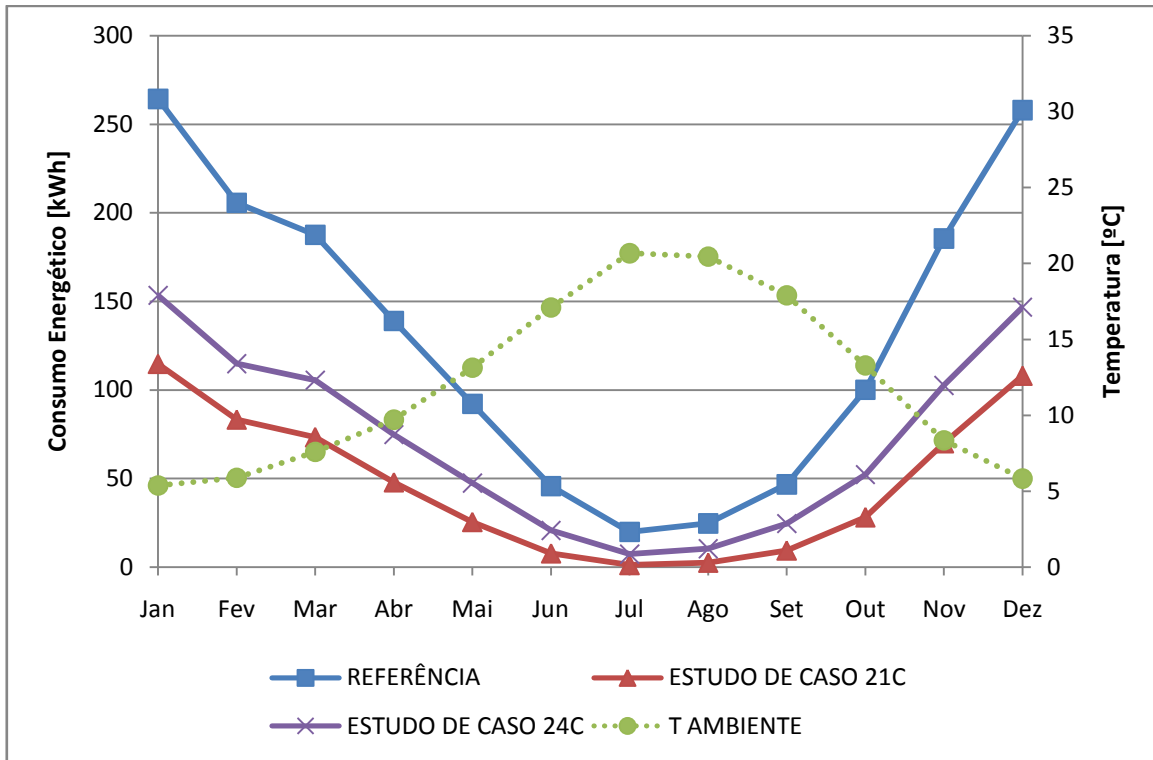


Figura 4.68 - Gráfico anual comparativo do consumo energético dos ensaios EC26 e EC27.

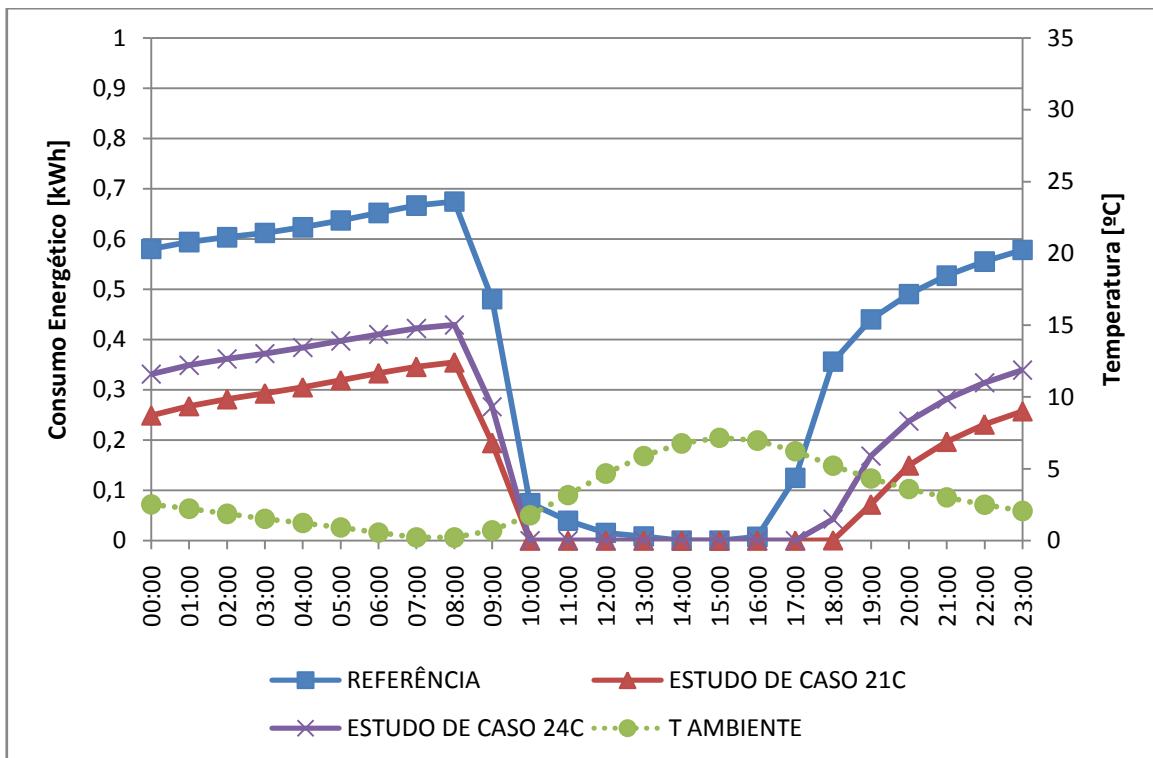


Figura 4.69 - Gráfico de 15 de janeiro comparativo do consumo energético dos ensaios EC26 e EC27.

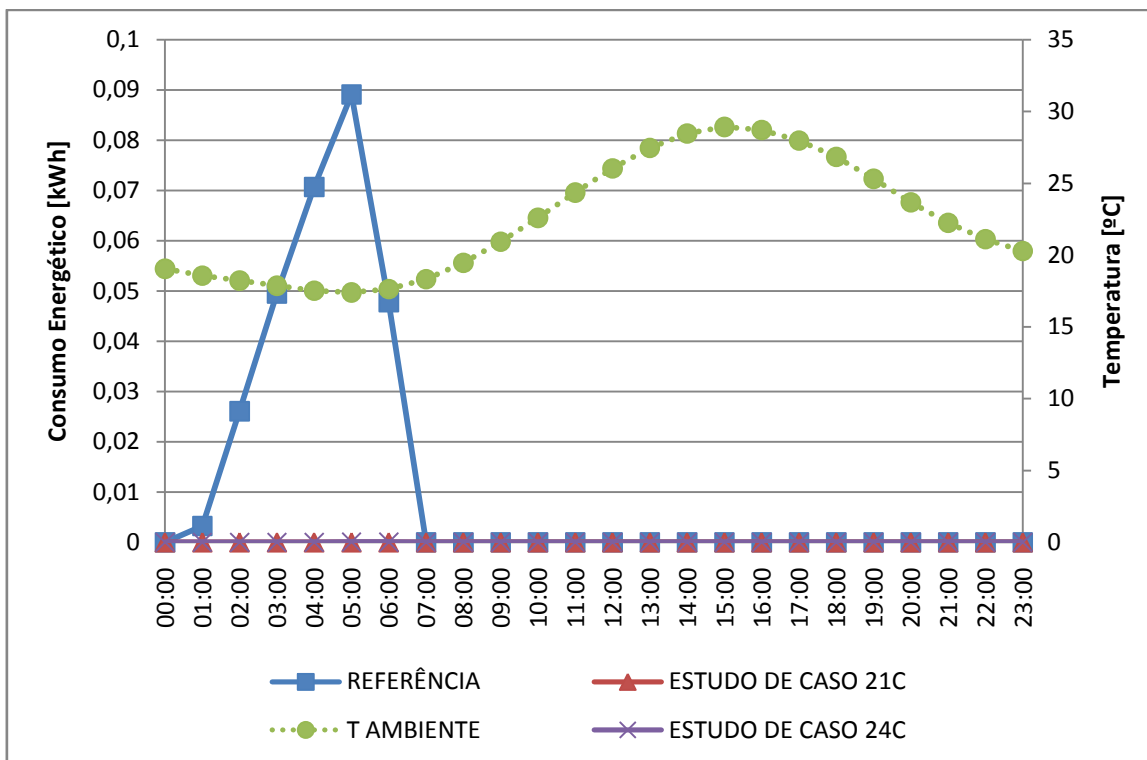


Figura 4.70 - Gráfico de 15 julho comparativo do consumo energético dos ensaios EC26 e EC27.

Os dados da temperatura ambiente permitem concluir que as medidas adotadas permitiram elevar a temperatura média mensal da estufa acima da de referência, mesmo para a estufa EC26 que tem um "setpoint" 1,5°C mais baixo que a de referência.

Olhando para os gráficos dos dias típicos, percebe-se que o "setpoint" mais alto da estufa de referência faz com que esta esteja mais quente nos dias de inverno do que a estufa EC26, mas devido ao isolamento melhorado, os ganhos durante o dia são tão maiores que fazem com que o valor médio mensal se situe acima do valor de referência. Durante o verão esta situação não se sucede porque as estufas EC26 e EC27 aquecem tanto durante o dia que não dissipam calor durante a noite suficiente para estabilizarem nas temperaturas de "setpoint"; apenas a estufa de referência o faz, afirmação esta corroborada pelo gráfico da potência energética exigida pelos sistemas de aquecimento, que é nula para todo o período para os ensaios EC26 e EC27 mas não nula para a estufa de referência.

Também é possível afirmar que o esquema de ventilação definido não é capaz de manter as estufas a temperaturas relativamente constantes.

4.3. Nota conclusiva

Os estudos de caso que foram realizados permitiram averiguar a influência de vários parâmetros, permitindo com esta informação a construção de uma estufa mais otimizada às necessidades das plantações a cultivar.

Os resultados obtidos permitiram concluir que das configurações estudadas, a configuração de referência rodada de 90° é a que tem maiores ganhos térmicos, e que a taxa de renovações de ar, a utilização de envidraçado duplo ou triplo, e a variação da emissividade exterior do envidraçado são as que têm mais impacto no comportamento térmico, com a parede granítica a ter um impacto também significativo mas um não totalmente esperado antes da realização da simulação.

Os últimos dois ensaios permitiram avaliar a diferença de consumo energético de uma estufa nas quais várias alterações de ensaios anteriores foram implementadas, podendo esta ser de seguida estudada pormenorizadamente com o intuito de otimizar esse mesmo consumo energético.

5. Conclusão

No capítulo final desta dissertação faz-se uma síntese das conclusões retiradas ao longo da mesma, e por fim sugerem-se possíveis estudos a realizar no futuro relacionados com os temas desta dissertação, com o intuito de aprofundar.

5.1. Recapitulação

A procura por uma alimentação variada e o exponencial crescimento populacional a nível global faz com que o estudo dos princípios de funcionamento das estufas e investigação para otimização das mesmas seja um contributo essencial para que estas necessidades sejam satisfeitas. O elevado consumo energético durante todo o processo de produção e distribuição alimentar combinado com a crise energética global torna imprescindível o melhoramento deste processo.

A otimização de uma estufa requer compreender os fenómenos que ocorrem à superfície e no interior da mesma para que possam ser adotadas medidas que permitam o melhor aproveitamento da energia proveniente do Sol, reduzindo assim a necessidade de fontes de energia auxiliares. É também necessário conhecer quais as condições ambientais ideais do cultivo a ser desenvolvido na estufa para adaptar a estufa de modo a atingir essas condições.

A modelação numérica permite fazer um estudo célere da influência de parâmetros construtivos e operacionais de uma estufa, reduzindo drasticamente o custo do processo de otimização.

A modelação de uma estufa existente foi feita para avaliar as capacidades do aplicativo DesignBuilder, cuja consequente validação experimental mostrou que os resultados obtidos pelo software permitem a utilização do mesmo para o estudo da estufa.

Uma série de estudos de caso foram de seguida definidos para a sua influência ser observada.

O primeiro grupo de estudos, EC1 a EC4, avaliou o impacto de diferentes configurações geométricas da estufa, mantendo a mesma área de implementação.

O estudo EC5 testou o efeito da utilização da proteção noturna dos envidraçados, que mostrou esta ser capaz de reduzir as perdas térmicas durante a noite.

Os ensaios EC6 a EC10 variaram a taxa de renovação do ar interior da estufa, que revelou ter um impacto significativo durante o dia. Os ensaios EC11 e EC12 testaram a utilização de envidraçado duplo e triplo, cujos resultados mostraram um impacto durante todo o ano destes

envidraçados, com maior destaque para o envidraçado duplo devido a este proporcionar uma maior redução das perdas térmicas comparativamente à referência do que o envidraçado triplo comparativamente ao envidraçado duplo.

O grupo de ensaios EC13 a EC16 e EC17 a EC20 foram dedicados à variação da emissividade exterior e interior da cobertura, respetivamente. Em ambos os cenários a redução gradual da emissividade produziu reduções graduais nas perdas térmicas durante todo o ano.

O conjunto EC21 a EC23 analisou o efeito da utilização de uma parede granítica em contacto com o solo como parede norte, que revelou que a utilização de uma parede deste tipo tem capacidade para manter a estufa mais quente durante o período de inverno, sendo que neste período as espessuras estudadas para estas paredes não causaram diferenças entre estas, e que no período de verão este tipo de parede tem capacidade de estabilizar a variação de temperatura na estufa durante 24 horas por dia, com o detalhe de a parede mais espessa ser capaz de manter a estufa mais quente durante a noite, o que é tipicamente desejável, mas também capaz de manter a estufa mais quente durante o dia, o que não é tipicamente vantajoso no verão.

Os estudos EC24 e EC25 incidiram na variação da transmissividade solar, cujos resultados mostraram um impacto ao longo de todo o ano.

Por fim, os ensaios EC26 e EC27 estudaram a implementação de uma combinação de algumas das medidas simuladas nos ensaios anteriores, assim como a implementação de uma fonte de calor auxiliar, com o intuito de avaliar o potencial para redução de consumo energético quando as medidas simuladas são adotadas. Os resultados mostraram um impacto elevado destas medidas no consumo energético da estufa.

5.2. Sugestão para trabalho futuro

Esta dissertação foi focada em parte na validação das capacidades do software utilizado para simular a estufa em estudo e em parte na influência de parâmetros característicos nas condições da estufa.

Possíveis estudos a realizar poderão se focar apenas numa destas partes que constituem esta dissertação, como por exemplo o estudo mais detalhado da modelação da estufa existente e dos valores experimentais de modo a obter uma melhor concordância entre os resultados numéricos e os experimentais, nomeadamente: a utilização de dados de temperatura ambiente experimentais recolhidos por equipamento de estação meteorológica; a utilização de dados de radiação solar como critério de comparação dos dias mais adequados para serem comparados no processo de validação; ou a utilização de uma cobertura experimental para a qual o fabricante da mesma disponibilize as características técnicas necessárias para a simulação.

Outro exemplo de trabalho futuro poderá ser a investigação mais aprofundada das características que foram alteradas na estufa nos vários estudos de caso, nomeadamente a avaliação da capacidade que o aumento ou redução gradual das propriedades estudadas nesta dissertação tem na produção de resultados gradualmente variados, assim como o estudo dos impactos de outras características dos ensaios que possam ser variados que não foram abordadas nesta dissertação, tais como a localização geográfica da estufa.

Referências bibliográficas

Cleland, J., "World Population Growth: Past, Present and Future", *Environmental and Resource Economics*, vol. 55, no. 4, pp. 543-554, 2013.

Cook, E., "The Flow of Energy in an Industrial Society", *Scientific American*, vol. 225, no. 3, pp. 134-147, 1971.

K. Rupp - 40 Years of Microprocessor Trend Data, <https://www.karlrupp.net/2015/06/40-years-of-microprocessor-trend-data>, 2015.

Gupta, M.J., Chandra, P., "Effect of greenhouse design parameters on conservation of energy for greenhouse environmental control", *Energy*, 27, pp. 777-794, 2002.

Sethi, V.P., "On the selection of shape and orientation of a greenhouse: Thermal modeling and experimental validation", *Solar Energy*, 83, pp. 21-38, 2009.

Gupta, R., Tiwari, G.N., Kumar, A., Gupta, Y., "Calculation of total solar fraction for different orientation of greenhouse using 3D-shadow analysis in Auto-CAD", *Energy and Buildings*, 47, pp. 27-34, 2012.

Fabrizio, E., "Energy reduction measures in agricultural greenhouses heating: Envelope, systems and solar energy collection", *Energy and Buildings*, 53, pp. 57-63, 2012.

Mashonjowa, E., Ronsse, F., Milford, J.R., Pieters, J.G., "Modelling the thermal performance of a naturally ventilated greenhouse in Zimbabwe using a dynamic greenhouse climate model", *Solar Energy*, 91, pp. 381-393, 2013.

Chen, C., Li, Y., Li, N., Wei, S., Yang, F., Ling, H., Yu, N., Han, F., "A computational model to determine the optimal orientation for solar greenhouses located at different latitudes in China", *Solar Energy*, 165, pp. 19-26, 2018.

Baxevanou, C., Fidaros, D., Bartzanas, T., Kittas, C., "Yearly numerical evaluation of greenhouse cover materials", *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, pp. 54-70, 2018.

Ma, D., Carpenter, N., Maki, H., Rehman, T.U., Tuinstra, M.R., Jin, J., "Greenhouse environment modeling and simulation for microclimate control", *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, pp. 134-142, 2019.

- Baglivo, C., Mazzeo, D., Panico, S., Bonuso, S., Matera, N., Congredo, P.M., Oliveti, G., "Complete greenhouse dynamic simulation tool to assess the crop thermal well-being and energy needs", *Applied Thermal Engineering*, 179, pp. 1-28, 2020.
- Esmaeli, H., Roshandel, R., "Optimal design for solar greenhouses based on climate conditions", *Renewable Energy*, 145, pp. 1255-1256, 2020.
- Ali, R.B., Bouadila, S., Mami, A., "Experimental validation of the dynamic thermal behaviour of two types of agricultural greenhouses in the Mediterranean context", *Renewable Energy*, 147, pp. 118-129, 2020.
- Zhang, Y., Henke, M., Li, Y., Yue, X., Xu, D., Liu, X., Li, T., "High resolution 3D simulation of light climate and thermal performance of a solar greenhouse model under tomato canopy structure", *Renewable Energy*, 160, pp. 730-745, 2020.
- Chahidi, L.O., Fossa, M., Priarone, A., Mechaqrane, A., "Energy saving strategies in sustainable greenhouse cultivation in the mediterranean climate - A case study", *Applied Energy*, 282, pp. 1-12, 2021.
- Cheng, X., Li, D., Shao, L., Ren, Z., "A virtual sensor simulation system of a flower greenhouse coupled with a new temperature microclimate model using three-dimensional CFD", *Computers and Electronics in Agriculture*, 181, pp. 1-14, 2021.
- Daintith, J., "A Dictionary of Physics", 6^a Edição, OUP Oxford, 2009.
- Kurpaska, S., "Energy Effects During Using the Glass with Different Properties in a Heated Greenhouse", *Technical Sciences*, 17, pp. 351-360, 2014.
- Li, A., Huang, L., Zhang, T., "Field test and analysis of microclimate in naturally ventilated single-sloped greenhouses", *Energy and Buildings*, 138, pp. 479-489, 2017.
- Tewolde, F.T., Lu, N., Shiina, K., Maruo, T., Takagaki, M., Kozai, T., Yamori, W., "Nighttime Supplemental LED Inter-lighting Improves Growth and Yield of Single-Truss Tomatoes by Enhancing Photosynthesis in Both Winter and Summer", *Frontiers in Plant Science*, 7, pp. 1-10, 2016.
- Stuhlfauth, T., Fock, H.P., "Effect of Whole Season CO₂ Enrichment on the Cultivation of a Medicinal Plant, *Digitalis lanata*", *Journal of Agronomy and Crop Science*, 164, pp. 145-216, 1990.
- Stacey, N., Fox, J., Hildebrandt, D., "Reduction in Greenhouse Water Usage through Intel CO₂ Enrichment", *AIChE Journal*, 64, pp. 2324-2328, 2018.
- Crawley, D.B., Hand, J.W., Kummert, M., Griffith, B., "Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs", *Building and Environment*, 43, pp. 661-673, 2008.

Østergård, T., Jensen, R.L., Maagaard, S.E., "Building simulations supporting decision making in early design - A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, pp. 187-201, 2016.

Crawley, D.B., Lawrie, L.K., Winkelmann, F.C., Buhl, W.F., Huang, Y.J., Pedersen, C.O., Strand, R.K., Liesen, R.J., Fisher, D.E., Witte, M.J., Glazer, J., "EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program", *Energy and Buildings*, 33, pp. 321-331, 2001.

Tronchin, L., Fabbri, K., "Energy performance building evaluation in Mediterranean countries: Comparison between software simulations and operating rating simulation", *Energy and Buildings*, 40, pp. 1176-1187, 2008.

Godinho, N., "Utilização de permutadores de calor ar-solo na climatização de estufas agrícolas", *Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Eletromecânica*, Universidade da Beira Interior, 2019.

Kempkes, F.L.K., Hemming, S., "Calculation of NIR effect on greenhouse climate in various conditions", *Acta Horti (Wageningen)*, 927, pp. 543-550, 2012.

Vitale, Z., "Earth-to-air heat exchanger application in passive greenhouse heating or cooling for agricultural use: a practical case", *Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Eletromecânica*, Universidade da Beira Interior, 2020.

Tüzel, Y., Öztekin, G.B., Gruda, N., Sallaku, G., Balliu, A., Drăghici, E.M., Brezeanu, P.M., Muñoz, P., Brezeanu, Maršić, N.K., Gvozdanovic-Varga, J., Rosca, V., Benko, B., Ilin, Ž.M., Adamović, B.Đ., Ilin, S.Z., Žnidarčič, D., Lieten, P., Gallace, N., "Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable production in the South East European countries - Principles for sustainable intensification of smallholder farms", *FAO Plant Production And Protection Paper*, 230, pp. 271-413, 2017.