



**Mariana Henriques  
Lopes**

**Sistema portátil de cozinha solar tipo caixa com  
apoio elétrico**





**Mariana Henriques  
Lopes**

## **Sistema portátil de cozinha solar tipo caixa com apoio elétrico**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de Vítor António Ferreira da Costa, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, e de Celestino Rodrigues Ruivo, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Algarve.

Este trabalho teve o apoio financeiro dos projetos UIDB/00481/2020 e UIDP/00481/2020 - FCT - Fundação para Ciência e Tecnologia; e CENTRO-01-0145-FEDER-022083 - Programa Operacional Regional do Centro (Centro2020), no âmbito do Acordo de Parceria Portugal 2020, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional.



**O júri / The jury**

Presidente / President

**Prof. Doutor Fernando José Neto da Silva**

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

**Prof. Doutor Celestino Rodrigues Ruivo**

Professor Adjunto da Universidade do Algarve (co-orientador)

**Prof. Doutor José Joaquim da Costa**

Professor Associado da Universidade de Coimbra (arguente)



## **Agradecimentos / Acknowledgements**

Agradeço a todas as pessoas que, de uma forma ou de outra, fizeram parte do meu percurso académico. Um agradecimento especial aos meus pais que fizeram com que tudo fosse sempre possível. À minha irmã por ser uma fonte de inspiração e motivação. Aos meus avós e tios pelo apoio constante. À Marialex por ter estado sempre do meu lado. Ao Eng. Pedro Rendeiro por me ter ajudado sempre e por ser um amigo para a vida. Aos docentes do departamento por todo o conhecimento que me possibilitaram, ao meu orientador Professor Vítor Costa e co-orientador Professor Celestino Ruivo pela ajuda incansável no decorrer desta etapa.



**Palavras-chave**

Energia Solar; Cozinha Solar do Tipo Caixa; Modelo Matemático.

**Resumo**

Cozinhar é uma necessidade primária e uma importante atividade doméstica para todas as famílias. A cozinha solar é uma alternativa muito interessante em países com muita exposição solar. No entanto, a utilização de sistemas de cozinha solar em residências ou restaurantes é praticamente inexistente. Esta dissertação foi desenvolvida pela constatação de as propostas existentes de cozinhas solares do tipo caixa serem geralmente baseadas em experiência e em conhecimento empírico e não o resultado de estudos de transferência de calor. O modelo matemático apresentado tem como base as equações que regem as trocas de calor numa cozinha solar do tipo caixa, com apoio elétrico. A metodologia utilizada passou por compreender a geometria, os materiais e as condições exteriores e, a partir desses dados, construir um modelo que fosse capaz de traduzir a evolução da temperatura dos elementos da cozinha, com especial incidência na temperatura da comida a ser cozinhada. Estabelecido e implementado o modelo, estudou-se o impacto dos componentes da caixa e do apoio elétrico na temperatura máxima atingida, e no tempo necessário para a atingir. Os resultados obtidos indicaram as temperaturas esperadas nos tempos desejados. Fica estabelecida a metodologia para a realização de estudos mais refinados e/ou aprofundados, baseados numa análise energética detalhada, deste tipo de cozinhas solares que representa um avanço considerável.



**Keywords**

Solar energy; Solar kitchen of box type; Mathematical model

**Abstract**

Cooking is a primary necessity, and an important household activity for all families. Solar cooking is a very interesting alternative in countries with lot of sun exposure. However, the use of solar cooker systems in homes or restaurants is practically non-existent. This dissertation was developed by the observation that existing proposals for box-type solar cookers are generally based on experience and empirical knowledge, and not the result of heat transfer studies. The mathematical model presented is based on heat exchange's equations in a box-type solar cookers, with electrical support. The methodology used consisted of understanding the geometry, materials and external conditions and, based on these data, building a model capable of predicting the temperature evolution of the cooker elements, with a special focus on the temperature of the food to be cooked. Once the model was established and implemented, the impact of the components of the box and the electrical support on the maximum temperature reached, and on the time necessary to reach it, was studied. The results obtained indicated the expected temperatures at the desired times. The methodology for conducting more refined and/or in-depth studies is established, based on a detailed energy analysis, of this type of solar cookers, which represents a considerable advance.



# Índice

<b>I</b>	<b>Enquadramento</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>3</b>
1.1	Enquadramento . . . . .	3
1.2	Motivação . . . . .	4
1.3	Objetivos . . . . .	4
1.4	Estrutura do documento . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Revisão bibliográfica</b>	<b>7</b>
2.1	Energia solar . . . . .	7
2.1.1	Constante solar . . . . .	7
2.1.2	Definições . . . . .	7
2.1.3	Radiação solar . . . . .	8
2.2	Tipos de cozinha solar . . . . .	9
2.2.1	Cozinha solar do tipo caixa ( <i>Box cookers</i> ) . . . . .	10
2.2.2	Cozinha solar do tipo parabólico ( <i>Parabolic cookers</i> ) . . . . .	10
2.2.3	Cozinha solar do tipo painel ( <i>Panel cookers</i> ) . . . . .	11
2.2.4	Cozinha solar do tipo cilindro parabólico ( <i>Throught cookers</i> ) . . . . .	14
2.2.5	Cozinha solar do tipo tubo ( <i>Evacuated cookers</i> ) . . . . .	14
2.2.6	Vantagens e desvantagens dos tipos de cozinha solar . . . . .	15
2.3	Cozinha solar tipo caixa . . . . .	15
2.3.1	Dimensões . . . . .	15
2.3.2	Envidraçado . . . . .	15
2.3.3	Refletores . . . . .	16
2.3.4	Isolamento Térmico . . . . .	16
2.3.5	Tintas para o interior . . . . .	17
2.3.6	Recipientes . . . . .	17
2.3.7	Armazenamento de energia térmica . . . . .	17
2.3.8	Apoio elétrico . . . . .	17
<b>II</b>	<b>Métodos e Modelos</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>Trocas de calor por condução, convecção e radiação</b>	<b>21</b>
3.1	Transferência de calor por condução . . . . .	21
3.2	Transferência de calor por convecção . . . . .	21
3.3	Transferência de calor combinada por convecção e condução . . . . .	22
3.4	Transferência de calor por radiação . . . . .	23

3.4.1	Trocas de calor por radiação entre superfícies reais . . . . .	23
3.4.2	Fluxo radiante que deixa uma superfície . . . . .	26
3.5	Equação de conservação de energia . . . . .	28
3.5.1	Balço energético para o meio não participante que preenche a cavidade . . . . .	29
3.5.2	Balço energético para um meio semitransparente . . . . .	29
3.5.3	Balço energético para os meios opacos . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Estabelecimento do modelo da cozinha solar do tipo caixa</b>	<b>31</b>
4.1	Dimensões da cozinha solar . . . . .	31
4.1.1	Caixa . . . . .	33
4.1.2	Vidros . . . . .	34
4.1.3	Recipiente e sólido (comida) . . . . .	36
4.2	Materiais e propriedades . . . . .	36
4.3	Fator de forma . . . . .	38
4.4	Sistema de equações das radiosidades . . . . .	39
4.5	Definição da radiação solar incidente . . . . .	41
4.6	Equações de balanço energético para os vários volumes . . . . .	42
<b>III</b>	<b>Resultados e discussão</b>	<b>53</b>
<b>5</b>	<b>Resultados e discussão</b>	<b>55</b>
5.1	Implementação do modelo . . . . .	55
5.2	Resultados . . . . .	56
5.2.1	Propriedades das superfícies e dos vidros . . . . .	57
5.2.2	Geometria do modelo . . . . .	62
5.2.3	Características do exterior . . . . .	63
5.2.4	Apoio elétrico . . . . .	65
5.3	Análise de resultados . . . . .	67
5.3.1	Emissividade do alumínio do recipiente e da comida . . . . .	67
5.3.2	Refletividade do alumínio das paredes e da base . . . . .	67
5.3.3	Transmissividade do vidro . . . . .	67
5.3.4	Massa volúmica do sólido (comida) . . . . .	67
5.3.5	Espessura das paredes e base da caixa . . . . .	67
5.3.6	Características do exterior . . . . .	68
5.3.7	Apoio elétrico . . . . .	68
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>69</b>
6.1	Sugestões de trabalhos futuros . . . . .	70
<b>Bibliografia</b>		<b>70</b>
.1	Código Python . . . . .	73

# Lista de Tabelas

4.1	Numeração das superfícies . . . . .	32
4.2	Numeração dos volumes . . . . .	33
4.3	Propriedades dos materiais utilizados . . . . .	37
5.1	Temperatura final da comida para diferentes emissividades do recipiente .	58
5.2	Temperatura final da comida para diferentes emissividades da comida . . .	59
5.3	Temperatura final da comida para diferentes refletividades do alumínio que cobre o interior das paredes e da base da caixa . . . . .	60
5.4	Temperatura final da comida para diferentes transmissividades do vidro .	61
5.5	Temperatura final da comida para diferentes massas volúmicas do sólido .	61
5.6	Temperatura final da comida para diferentes espessuras das paredes e da base . . . . .	63
5.7	Temperatura final da comida para diferente temperatura ambiente . . . .	64
5.8	Temperatura final da comida para diferentes valores do coeficiente de transferência de calor por convecção exterior . . . . .	65
5.9	Temperatura da comida ao fim de diferentes tempos, para diferentes po- tências de apoio elétrico . . . . .	66



# Lista de Figuras

1.1	Consumo Final de Energia total por setor, Portugal 1990-2018 . . . . .	4
2.1	Ângulos para o cálculo da radiação solar . . . . .	9
2.2	Cozinha solar do Tipo Caixa - <i>All American Sun Oven</i> . . . . .	10
2.3	Cozinha solar do tipo parabólico . . . . .	11
2.4	Cozinha solar <i>Cookit</i> . . . . .	12
2.5	Cozinha solar do tipo para-brisas . . . . .	12
2.6	Cozinha solar <i>The Hot Pot</i> . . . . .	12
2.7	Cozinha solar <i>The Copenhagen</i> . . . . .	12
2.8	Cozinha solar do Tipo Funil . . . . .	13
2.9	Cozinha solar <i>Molly Baker</i> . . . . .	13
2.10	Cozinha solar do tipo duplo ângulo . . . . .	13
2.11	Cozinha solar <i>Parvati</i> . . . . .	13
2.12	Cozinha solar do tipo cilindro parabólico ( <i>Throught Solar cookers</i> ) . . . . .	14
2.13	Cozinha solar do tipo tubo evacuado ( <i>Evacuated cookers</i> ) . . . . .	14
2.14	Cozinha solar <i>FIT</i> . . . . .	16
3.1	Transferência de calor combinada por convecção e condução . . . . .	22
3.2	Fatores de forma associado à troca de radiação entre elementos das superfícies de área $dA_i$ e $dA_j$ . . . . .	24
3.3	Regra da sobreposição . . . . .	25
3.4	Cavidade com $N$ superfícies onde algumas são opacas e outras são semitransparentes . . . . .	26
3.5	Trocas de radiação entre superfícies opacas . . . . .	26
3.6	Trocas de radiação em superfícies semitransparentes . . . . .	27
3.7	Esquema de cavidade preenchido com um meio não participante . . . . .	29
3.8	Esquema para estabelecimento do balanço energético para o meio semitransparente . . . . .	29
3.9	Esquema para estabelecimento do balanço energético para meios opacos . . . . .	30
4.1	Cozinha solar do tipo caixa modelada . . . . .	31
4.2	Caixa solar com numeração das superfícies . . . . .	32
4.3	Caixa solar com numeração dos volumes . . . . .	33
4.4	Dimensões da caixa em mm . . . . .	34
4.5	Dimensões do vidro da tampa da caixa em mm . . . . .	35
4.6	Dimensões do vidro da tampa do recipiente em mm . . . . .	35
4.7	Dimensões do recipiente que contém a comida em mm . . . . .	36
4.8	Retângulos opostos, paralelos e idênticos . . . . .	38

4.9	Retângulo para um disco coaxial num plano paralelo . . . . .	38
4.10	Cilindro e retângulo com duas arestas paralelas ao eixo do cilindro e de comprimento igual ao cilindro . . . . .	38
4.11	Dois retângulos tendo uma aresta comum e formando um ângulo de 90° entre si . . . . .	38
4.12	Matriz de fatores de forma $F_{i,j}$ . . . . .	38
4.13	Esquema da radiação refletida pelo refletor para o interior da caixa . . . . .	41
4.14	Esquema Trocas de Calor no Volume 1 . . . . .	42
4.15	Esquema Trocas de Calor no Volume 3 . . . . .	43
4.16	Esquema das trocas de calor do volume 2 . . . . .	44
4.17	Esquema das trocas de calor no volume 5 . . . . .	46
4.18	Esquema das trocas de calor do Volume 6 + 7 . . . . .	47
4.19	Esquema das trocas de calor no volume 8 . . . . .	48
4.20	Esquema das trocas de calor no volume 9 . . . . .	49
4.21	Esquema das trocas de calor no volume 10 . . . . .	50
4.22	Esquema das trocas de calor no volume 11 . . . . .	51
4.23	Esquema das trocas de calor no volume 12 . . . . .	52
5.1	Resultado da Implementação . . . . .	56
5.2	Influência da emissividade do recipiente na evolução da temperatura da comida . . . . .	57
5.3	Influência da emissividade da comida na evolução da temperatura da comida . . . . .	58
5.4	Influência da refletividade do alumínio protetor das paredes e base da caixa na evolução da temperatura da comida . . . . .	59
5.5	Influência da transmissividade do vidro na evolução da temperatura da comida . . . . .	60
5.6	Influência da massa volúmica do sólido na evolução da temperatura do sólido que representa a comida . . . . .	61
5.7	Influência da espessura das paredes e da base na evolução da temperatura da comida . . . . .	62
5.8	Influência da temperatura ambiente na evolução da temperatura da comida . . . . .	63
5.9	Influência do coeficiente de transferência de calor por convecção exterior na evolução da temperatura da comida . . . . .	64
5.10	Influência do apoio elétrico na evolução da temperatura da comida . . . . .	65



Parte I

Enquadramento



# Capítulo 1

## Introdução

A energia tem um papel fundamental na atividade humana dentro e fora das residências, sendo necessário racionalizar a forma como a consumimos e avaliar as consequências económicas e ambientais destes consumos.

A produção de energia, que na grande maioria dos casos, provém de combustíveis fósseis, origina emissões de gases de efeito de estufa que trazem malefícios para o ambiente e para a saúde pública. A energia obtida através de fontes renováveis, como a energia eólica, hídrica e solar, tem tido um contributo relevante para que o impacto ambiental da utilização da energia seja cada vez mais atenuado. Hoje em dia, já é comum a tecnologia das energias renováveis estar nas nossas casas, como por exemplo, painéis fotovoltaicos e painéis solares térmicos.

Cozinhar é uma atividade praticamente obrigatória para as famílias e, atualmente, pode-se cozinhar de diversas formas, desde o fogão a lenha, o fogão elétrico, o fogão a gás, etc. A cozinha solar, apesar de não ser muito utilizada na Europa e, conseqüentemente, em Portugal, pode dar um contributo relevante para a redução do consumo de energia proveniente de combustíveis fósseis.

O que se propõe nesta dissertação é a análise energética e simulação de uma cozinha solar do tipo caixa que é uma tecnologia de baixo custo e fácil manuseamento.

### 1.1 Enquadramento

O princípio básico das cozinhas solares do tipo caixa consiste na utilização da radiação solar para permitir o aquecimento da comida até que esta se cozinhe. A radiação solar incidente passa através de um vidro e, depois de sucessivas reflexões, acaba por ser absorvida pela comida permitindo o seu aquecimento.

A eficácia destas cozinhas é geralmente determinada pela área disponível para captar a radiação solar e pela capacidade do interior da caixa de reter a energia térmica absorvida. Uma cozinha solar do tipo caixa necessita de uma exposição solar por diversas horas, e de ser protegida de ventos fortes. [1]

Esta dissertação foi desenvolvida a partir da constatação de as propostas existentes de cozinhas solares serem geralmente baseadas em experiência e em conhecimento empírico, e não tanto em conhecimento técnico e científico. O objetivo é estabelecer o modelo de uma cozinha solar do tipo caixa, implementá-lo, e usá-lo para prever a evolução das temperaturas da cozinha solar e, muito especialmente, da comida a cozinhar.

## 1.2 Motivação

Em 2018, em todo o mundo, 29,6% da eletricidade foi produzida a partir de fontes renováveis. Desta percentagem, 11% foi produzida por energia solar. Em Portugal, o cenário é um pouco mais interessante do ponto de vista de energias renováveis, mas não no caso concreto da energia solar. 47,8% da produção de eletricidade em Portugal, no ano de 2019, proveio de energias renováveis. A energia eólica é a mais importante, seguida da energia hídrica e, em terceiro lugar, a energia solar. [2]

Em 2019, 26% de energia na União Europeia foi consumida no setor residencial. A maior parte deste consumo proveio do gás natural (32%), da eletricidade (25%) e das energias renováveis (25%). Deste consumo, a maior parte dos equipamentos para cozinhar equivalem a 5,6% da energia consumida nas habitações. [3; 4]

Em Portugal, em 2018, o terceiro setor maior consumidor de energia foi o setor residencial, com 2655 tep. [5]

A Figura 1.1 demonstra o consumo final de energia total por setor em Portugal do ano 1990 ao ano de 2018.

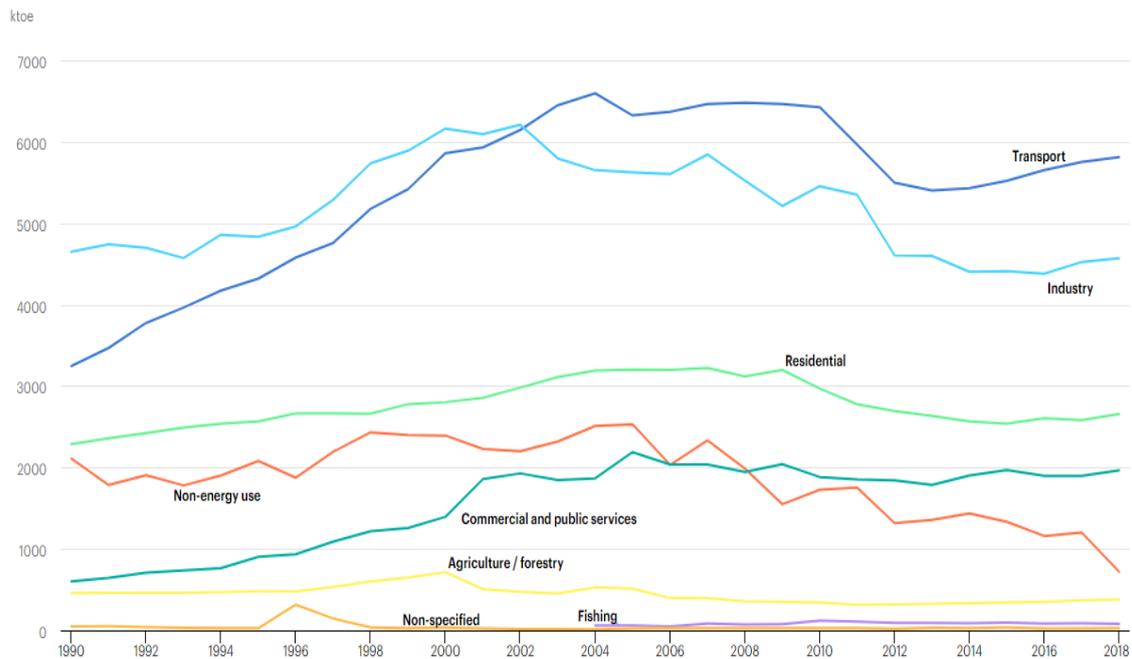


Figura 1.1: Consumo Final de Energia total por setor, Portugal 1990-2018

[5]

A motivação desta dissertação reside no facto de a cozinha solar pode dar um contributo importante para a redução da dependência das energias provenientes de combustíveis fósseis para cozinhar.

## 1.3 Objetivos

Pretende-se desenvolver um modelo capaz de prever o comportamento térmico dos componentes de uma cozinha solar tipo caixa com apoio elétrico. Uma vez desenvolvido,

o modelo é implementado, e a sua utilização permite estimar a evolução temporal da temperatura dos componentes da cozinha solar e, muito especialmente, da comida a cozinhar.

A solução a desenvolver nesta dissertação é baseada num modelo, sendo possível depois, variando as suas dimensões e disposição dos componentes, poder ser usada para outros do mesmo tipo. Assim sendo, os objetivos prioritários a alcançar são:

1. Conhecer os sistemas portáteis de cozinha, nomeadamente a cozinha solar tipo caixa;
2. Estabelecer o modelo energético da cozinha solar do tipo caixa;
3. Prever a evolução temporal da temperatura dos componentes da cozinha solar, com maior ênfase na comida a cozinhar;
4. Extrair algumas conclusões sobre os parâmetros deste modelo de cozinha solar.

## 1.4 Estrutura do documento

O documento dividiu-se em 6 Capítulos:

1. Introdução ao tema, enquadramento, objetivos e estrutura do documento;
2. Estudo bibliográfico do tema e de soluções propostas com base no conhecimento empírico, científico e técnico;
3. Estabelecimento do modelo físico da cozinha solar do tipo caixa;
4. Implementação do modelo para simulação numérica do comportamento do sistema;
5. Apresentação e discussão dos resultados;
6. Conclusões, com propostas de trabalhos futuros.



## Capítulo 2

# Revisão bibliográfica

Este capítulo pretende resumir a pesquisa que foi efetuada sobre o tema. Primeiro estudaram-se os conceitos associados à energia solar e à sua definição e, depois, estudaram-se os tipos de cozinha solar existentes, com maior ênfase na cozinha solar do tipo caixa.

### 2.1 Energia solar

Esta secção resume os conceitos relevantes relativamente ao Sol e à energia solar, incluindo a irradiação solar e a forma como esta interage com a atmosfera e com a superfície terrestre.

#### 2.1.1 Constante solar

A constante solar,  $G_s$ , é o fluxo de radiação solar recebido numa superfície perpendicular à direção de propagação da radiação na distância média Terra-Sol. Inicialmente este valor foi medido no solo depois de ter atravessado a atmosfera. Existia, portanto uma parte absorvida e espalhada pelos componentes da atmosfera. Hoje em dia, a estimativa deste valor é realizada a partir de aeronaves, variando de acordo com o local e dia do ano. A constante solar adota o valor de  $1367 \text{ [W/m}^2\text{]}$ . [6]

#### 2.1.2 Definições

**Radiação solar direta** - A radiação Solar recebida sem ter sido distribuída e/ou espalhada pela atmosfera;

**Radiação solar difusa** - A radiação solar recebida depois da sua orientação ter sido alterada ao atravessar a atmosfera;

**Radiação solar total** - Soma da radiação solar direta e difusa;

**Irradiação**  $[\text{W/m}^2]$  - Fluxo de energia radiante que incide numa superfície;

**Radiosidade**  $[\text{W/m}^2]$  - Fluxo de energia radiante que deixa uma superfície, combinando emissão, reflexão e transmissão;

**Poder Emissivo**  $[W/m^2]$  – Fluxo de energia radiante emitido por uma superfície.

Em relação à variação da posição relativa do Sol ao longo do dia, e da forma como a radiação solar interage com a Terra, são apresentados também alguns conceitos. [7]

### Hora solar

A hora solar é a hora baseada no movimento aparente do Sol e, por isso, não coincide com a hora local. Esta hora é corrigida duas vezes. É corrigida uma primeira vez através de uma correção constante para a diferença entre a longitude do observador e a do meridiano no qual o horário padrão se baseia. O Sol, no seu movimento aparente, demora 4 minutos a percorrer  $1^\circ$  de longitude. A segunda correção leva em consideração as perturbações da rotação da terra que afetam o tempo em que o Sol cruza o meridiano do observador.

A diferença, em minutos, entre a hora solar e a hora padrão é de:

$$\text{Hora Solar} - \text{Hora Padrão} = 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (2.1)$$

onde  $L_{st}$  é o meridiano padrão local e  $L_{loc}$  é a longitude do local onde está o observador. O parâmetro da equação do tempo,  $E$ , é dado por:

$$E = 229,2(0,000075 + 0,001868 \times \cos\beta - 0,032077 \times \sin\beta - 0,014615 \times \cos(2\beta) - 0,04089 \times \sin(2\beta)) \quad (2.2)$$

onde

$$\beta = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (2.3)$$

e  $n$  é o dia do ano,  $1 \leq n \leq 365$ .

### 2.1.3 Radiação solar

Para descrever na perfeição as relações entre uma superfície na Terra e a posição do Sol relativamente a esse plano, é necessário definir um conjunto de ângulos.

**Latitude** - Localização angular ao norte ou ao sul do equador, sendo o norte positivo.  $-90^\circ \leq \emptyset \leq 90^\circ$ .

**Declinação Solar** - Posição angular do Sol ao meio-dia em relação ao plano do equador, sendo o norte positivo.  $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$ .

A declinação solar pode ser calculada como:

$$\delta = 23,45 \sin \left( 360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (2.4)$$

**Inclinação** - ângulo entre o plano da superfície em questão e a horizontal.  $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ .

**Ângulo de azimute da superfície** - Desvio da projeção num plano horizontal da normal para a superfície do meridiano local, com zero ao sul, este negativo e oeste positivo.  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ .

**Ângulo horário** - Deslocamento angular do sol a este ou oeste do meridiano local devido à rotação da Terra no seu eixo, a  $15^\circ$  por hora. De manhã é negativo e de tarde positivo.

**Ângulo de incidência** - É o ângulo entre a radiação direta que incide numa superfície e a normal a essa superfície, podendo ser calculado como:

$$\theta = \cos^{-1} (\sin\delta \sin\vartheta \cos\beta - \sin\delta \cos\vartheta \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\vartheta \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \sin\vartheta \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\vartheta \sin\gamma \sin\omega) \quad (2.5)$$

**Ângulo zenital** - É o ângulo entre a vertical e a linha com o sol, ou seja, o ângulo de incidência da radiação numa superfície horizontal, podendo ser calculado como:

$$\cos\theta_z = \cos\vartheta \cos\delta \cos\omega + \sin\vartheta \sin\delta \quad (2.6)$$

A Figura 2.1 representa estes ângulos descritos para o cálculo da radiação solar.

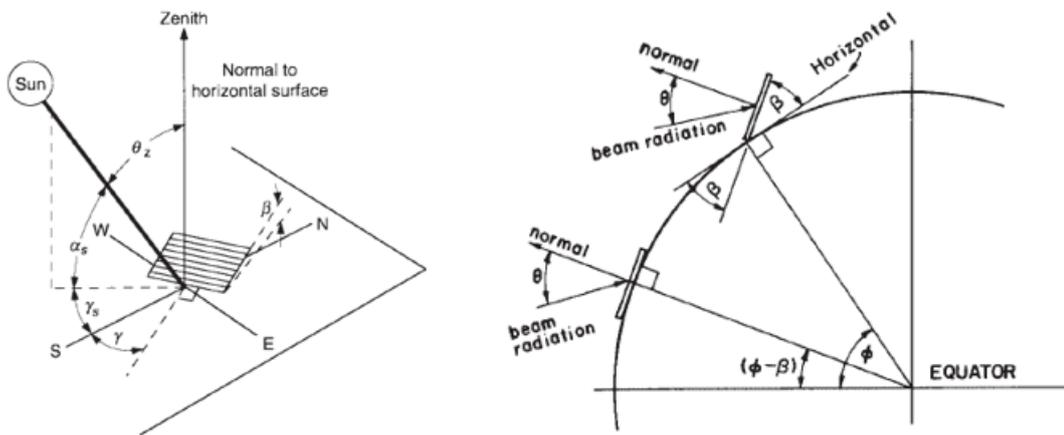


Figura 2.1: Ângulos para o cálculo da radiação solar [6]

## 2.2 Tipos de cozinha solar

Faz-se aqui um resumo dos tipos de cozinha solar existentes, e quais os seus componentes e particularidades, procurando compreender o propósito de cada componente e de que forma influenciam o desempenho da cozinha solar. Referem-se também as vantagens e desvantagens dos vários tipos de cozinha solar. [8]

### 2.2.1 Cozinha solar do tipo caixa (*Box cookers*)

As cozinhas do tipo caixa são as mais comuns, atingindo temperaturas entre 90 e 200 °C, demorando entre 1 e 3 horas para cozinhar.

Esta é constituída por uma caixa, geralmente de madeira, coberta por uma tampa de vidro e pode conter um ou mais refletores, podendo suportar vários recipientes de comida. As laterais e o fundo da caixa são isolados termicamente para diminuir as perdas térmicas para o exterior.

Os *designs* mais conhecidos são o *Easy Lid Cooker*, o *Minimum Solar Box Cooker* e o *All American Sun Oven*. Este último é apresentado na Figura 2.2.

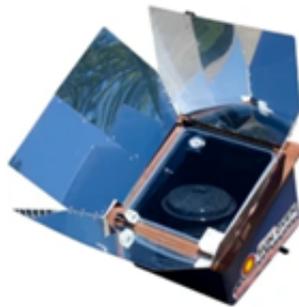


Figura 2.2: Cozinha solar do Tipo Caixa - *All American Sun Oven*  
[8]

### 2.2.2 Cozinha solar do tipo parabólico (*Parabolic cookers*)

As cozinhas solares do tipo parabólico não operam com efeito de estufa, ao contrário das cozinhas do tipo caixa. As cozinhas deste tipo requerem que, a cada 15 minutos, se altere a sua direção para ter a maior área possível a captar radiação solar. Este posicionamento tem de ser feito de acordo com o posicionamento aparente do sol, o que restringe a sua utilização.

Como este tipo de cozinha Solar tem as extremidades abertas, a ação do vento reduz sua eficácia. Os olhos e a pele do utilizador devem ser protegidos, para não serem atingidos pela ação da radiação refletida pela cozinha Solar.

Estas cozinhas podem chegar aos 350 °C, existindo a possibilidade de fritar.

Com estas características, o tempo de cozedura pode ser comparável ao de um fogão convencional elétrico ou a gás. A quantidade de comida a ser cozinhada depende da superfície parabólica. Superfícies menores, que geralmente têm cerca de 1 metro de diâmetro, destinam-se a aquecer uma panela. As superfícies maiores, que podem ter até 5 metros de diâmetro, geralmente não são usados para aquecer uma panela diretamente, mas, em vez disso, são usados para criar vapor ao direcionar a radiação solar para tubos de água. Este vapor é direcionado para superfícies de cozedura de uma cozinha que pode ser controlado e regulado por válvulas. A Figura 2.3 mostra uma cozinha solar do tipo parabólico.

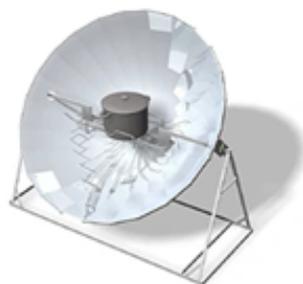


Figura 2.3: Cozinha solar do tipo parabólico  
[8]

### 2.2.3 Cozinha solar do tipo painel (*Panel cookers*)

Cozinhas solares do tipo painel contêm componentes do tipo caixa e parabólico combinados. Geralmente, têm uma área refletora como o tipo parabólico, e a panela tem um invólucro para poder reter o calor, da mesma forma que a cozinha solar do tipo caixa. Podem atingir aproximadamente 150 °C.

Devido à facilidade de construção e aos materiais de baixo custo, são as cozinhas Solares mais simples de construir e as mais económicas. Uma característica interessante e diferenciadora é a facilidade de transporte e armazenamento.

#### Cozinha solar *CooKit*

Em 1999, em França, foi apresentado um modelo muito simples de cozinha solar de baixo custo pelo Professor Roger Bernard, o modelo *Cookit*.

Apesar de não ser o mais simples, este dobra-se ficando do tamanho de um grande caderno, sendo, por isso, uma das cozinhas solares mais populares.

#### Cozinha solar do tipo para-brisas (*Windshield shades*)

Kathy Dahl-Bredine desenvolveu o *windshield shades*, enquanto se preparava para introduzir cozinhas Solares em comunidades indígenas no sul do México. Trata-se de uma maneira simples de fazer uma cozinha Solar portátil instantânea, necessitando apenas de uma proteção de para-brisas do carro.

As Figuras 2.4 e 2.5 demonstram as cozinhas solares Cookit e para-brisas.

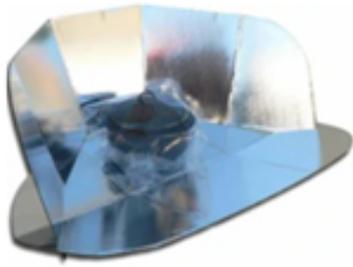


Figura 2.4: Cozinha solar *Cookit*  
[8]

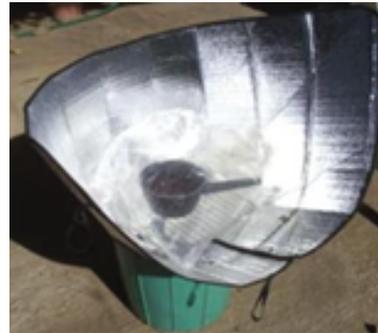


Figura 2.5: Cozinha solar do tipo para-brisas  
[8]

### Cozinha solar panela quente (*The HotPot*)

A cozinha solar *HotPot* é um painel comprovado e especialmente projetado por Darwin Curtis e Louise Meyer da *Solar Household Energy*, que usa um recipiente de vidro com uma panela de metal preta. O refletor é construído com painéis dobráveis. Este modelo de cozinha solar ganhou uma bolsa do Banco Mundial para poder distribuir esta cozinha.

### Cozinha solar *The Copenhagen*

A cozinha solar *The Copenhagen* foi projetada por Sharon Clausson dos EUA e é bastante simples, mas ainda assim eficaz, sendo composta por painéis revestidos de vinil. Estes refletores, que podem ser dobrados, são fixados a uma placa firme e rígida. No centro, uma panela é mantida num saco de plástico transparente. Estes refletores podem ser dobrados e mantidos na posição com molas de suporte.



Figura 2.6: Cozinha solar *The Hot Pot*  
[8]



Figura 2.7: Cozinha solar *The Copenhagen*  
[8]

### Cozinha solar do Tipo Funil (*Funnel cookers*)

Esta cozinha solar, criada por Steven Jones, tem inúmeras vantagens. É simples de construir e armazenar e há pouco desperdício de materiais de construção.

O seu suporte foi o maior desafio para este modelo, no entanto, molas, pequenos paus ou pedras, podem ser utilizados para apoiar a parte de trás do funil, mantendo-o na

posição correta.

Molly Baker apresentou uma variação deste tipo de cozinha Solar composta por tecido duro e forro interno de um material refletor. Quando a dobra é aberta, e são inseridos tubos de plástico na parte superior e interior, a cozinha forma um cone rígido pronto para cozinhar.



Figura 2.8: Cozinha solar do Tipo Funil  
[8]



Figura 2.9: Cozinha solar *Molly Baker*  
[8]

### Cozinha solar do tipo duplo ângulo

Este tipo de cozinha possui características de ambas as cozinhas de painel e parabólicas. Teong Tan produziu uma cozinha chamada *DATS*, que significa fogão solar de doze lados de dois ângulos.

A cozinha solar *Parvati* foi desenvolvida na Índia e tem a base do fogão mais larga que o *DATS* para colocar as panelas de lado. Este tem as laterais mais altas para empilhar as panelas para uma melhor cozedura. Desta forma, torna-se inconveniente verificar o estado de cozedura dos alimentos.



Figura 2.10: Cozinha solar do tipo duplo  
ângulo  
[8]



Figura 2.11: Cozinha solar *Parvati*  
[8]

Para além destas cozinhas solares mais comuns, há ainda as cozinhas Solares do tipo cilindro parabólico (*Throught cookers*) e cozinhas solares do tipo tubo (*Evacuated tube cookers*).

### 2.2.4 Cozinha solar do tipo cilindro parabólico (*Throught cookers*)

Este tipo de cozinha solar usa um refletor curvo. Em vez de focar a radiação num único ponto, como uma típica parábola, a radiação é refletida ao longo de uma linha focal. Esta linha de radiação concentrada é direcionada para uma câmara de tubo de vidro que contém os alimentos prontos a ser cozinhados. O tubo tem um elevado isolamento térmico, sendo esta, uma das grandes vantagens deste tipo de cozinha solar. Requerem, no entanto, uma bandeja de cozedura longa e bastante estreita.



Figura 2.12: Cozinha solar do tipo cilindro parabólico (*Throught Solar cookers*)  
[8]

### 2.2.5 Cozinha solar do tipo tubo evacuado (*Evacuated cookers*)

Neste tipo de cozinha, a câmara de cozedura é construída com duas camadas de vidro soprado na forma de tubo fechado, sendo o ar removido entre as camadas. A perdas térmicas ocorrem, principalmente, por trocas de calor por condução e por convecção através do meio. Sem o ar entre as camadas do vidro, a câmara é bem isolada e adequada para a cozedura. É bastante eficaz e, por vezes, nem precisa de um grande refletor para captar a radiação. Pode ser inserida uma bandeja de cozedura numa extremidade, sendo a outra extremidade vedada com uma rolha ou fechada durante o processo de fabrico.



Figura 2.13: Cozinha solar do tipo tubo evacuado (*Evacuated cookers*)  
[8]

### 2.2.6 Vantagens e desvantagens dos tipos de cozinha solar

Este documento aborda com maior detalhe o sistema de cozinha solar tipo caixa. Este tem duas grandes vantagens: o facto de ser construído de forma simples a partir de materiais baratos, e operar com radiação difusa e direta. Uma desvantagem deste tipo de cozinha solar é o tempo de cozedura que é superior ao tempo que todos os outros sistemas levam para conseguir cozinhar.

O tipo de cozinha solar parabólica tem a característica de ter uma eficiência energética muito elevada, no entanto, é muito sensível ao vento.

Os sistemas de cozinha solar do tipo painel também têm vantagens relativamente à sua geometria: são pequenos e têm um baixo custo, no entanto, tal como os sistemas tipo parabólico, são muito sensíveis ao vento.

## 2.3 Cozinha solar tipo caixa

A cozinha solar do tipo caixa (*Solar Box Cooker*) é uma das cozinhas solares mais populares, tendo sido projetado em 1767 pelo Suíço Horace-de-Saussure (1740-1799). Este sabia que o vidro tinha a possibilidade de transmitir a energia térmica e retê-la e então testou um conjunto de 5 caixas de vidro quadradas, encaixando-as sucessivamente umas nas outras. Dentro da caixa mais interna do conjunto, registou uma temperatura de 87°C. De seguida, encorajado por esta descoberta, construiu uma pequena caixa retangular de placas de pinho com meia polegada de espessura, e forrou-a com folhas de cortiça preta, e cobriu-a com vidro. A temperatura atingida foi de 108°C. Para evitar perdas, isolou as laterais e o fundo com lã e colocou-a numa caixa maior, atingindo então 110°C. Em 1881, o americano Samuel Pierpont Langley testou este projeto no topo do Monte Whitney e constatou que se podia ferver água em campos cobertos de neve. Já em 1945, um cientista indiano melhorou o desempenho deste projeto ao adicionar-lhe um refletor para aumentar a área de captação de radiação recebida pela caixa.

### 2.3.1 Dimensões

Este tipo de cozinha solar consiste, geralmente, numa caixa com elevado isolamento térmico e coberta com uma tampa de vidro. O tamanho da caixa é geralmente de 625x625x200 mm e é construída de placas de madeira. A altura do recipiente fica, normalmente, condicionada entre 195 e 250 mm.

No exterior da caixa, existe a possibilidade de colocar um ou mais refletores. Estes refletores podem ser abertos e inclinados com intenção de direcionar o máximo de radiação Solar para dentro da caixa.

### 2.3.2 Envidraçado

Geralmente o envidraçado é constituído por vidros duplos. Para se evitarem fugas entre a caixa e a porta de vidro, existe necessidade de adicionar um cordão, geralmente de neoprene ou de feltro.

O material recomendado de envidraçado é o vidro temperado com 3 mm de espessura. Uma folha de plástico transparente ou uma combinação de folha de plástico transparente de policarbonato também é comum.

### 2.3.3 Refletores

Em 1945, Gosh foi o primeiro a utilizar um refletor para aumentar o desempenho das cozinhas solares do tipo caixa. Nos últimos anos, testaram-se diferentes tipos e quantidades de refletores, mas, nos EUA, as cozinhas solares sem refletores continuam a ser as mais populares.

Um refletor de boa qualidade com um mínimo de 65% de refletividade é recomendado. Nos últimos anos, também se utilizaram folhas refletoras de plástico de boa qualidade. Estes são também utilizados nas cozinhas solares do tipo parabólico. A temperatura de estagnação de uma única caixa refletora ronda os 120 a 130°C, e com a adição dos refletores pode chegar aos 200°C. Acompanhar o movimento aparente do sol melhora o desempenho da cozinha solar.

O projeto *FIT* de Bowman poderá estar inserido na categoria de cozinha solar de caixa invertida. Os raios solares são refletidos na caixa para cozinhar por 14 a 20 tiras de espelhos fixados linearmente sob a caixa. Essas tiras podem facilmente girar e mudar o ângulo de altitude, enquanto as rodas na base se responsabilizam pelo ângulo azimutal do Sol. Com alguma alteração no projeto, este pode ser fixado na janela de uma casa voltada para o sul, tendo assim a vantagem da cozedura poder ser feita dentro de uma cozinha.

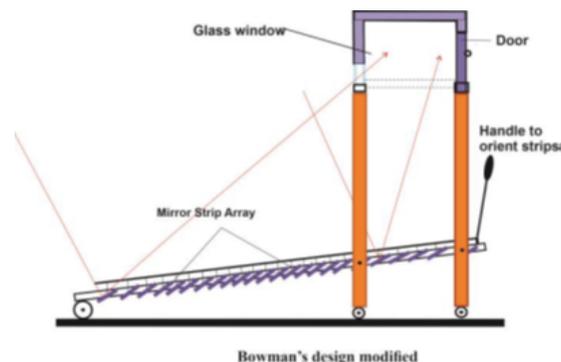


Figura 2.14: Cozinha solar *FIT*  
[1]

### 2.3.4 Isolamento Térmico

O isolamento térmico tem um papel fundamental para evitar as perdas de calor da cozinha Solar. De-Saussure utilizou lã de ovelha para este efeito, no entanto, o isolamento mais popular nos dias de hoje é a fibra de vidro ou lã de rocha, de 40 a 50 mm de espessura.

No caso de isolamento térmico de baixo custo, temos como exemplo a casca de arroz ou o serrim compacto.

Recentemente, também se têm utilizado tubos de vácuo. Contudo, a sua utilização em cozinhas Solares tipo caixa ainda não é conhecida, seria dispendiosa e muito complicado utilizar uma caixa de vidro a vácuo como cozinha solar.

O esferovite é um excelente isolante térmico podendo ser conformado numa caixa com quaisquer dimensões; no entanto, uma vez deformado, o seu desempenho diminui. A espuma de vidro é também uma opção por ser rígida, e preta.

### 2.3.5 Tintas para o interior

A tinta preta tornou-se parte da tecnologia de cozinha solar. A tinta para quadro negro é a tinta predominante no mercado.

Maria Telkis, em 1978, sugeriu a mistura de sulfato de cobre, zinco e hidróxido de sódio para obtenção de tinta preta. Recentemente, os recipientes pretos "mate" revestidos a pó tornaram-se populares, uma vez que o revestimento não descasca facilmente como a tinta preta. Também são recomendadas tintas comerciais à base de crómio.

### 2.3.6 Recipientes

Os recipientes mais utilizados para a cozinha Solar são compostos de alumínio. Geralmente, utiliza-se recipientes com 200 mm de diâmetro com tampa. Foi sugerido que estas caixas deveriam ser equipadas com 'orelhas' na lateral e um botão na tampa do recipiente para um manuseio mais confortável quando os recipientes aquecem.

Mauricio Gonzalez-Aviles utilizou uma mistura de fuligem preta como tinta para recipientes de cozinha e recomenda-a como opção de baixo custo para revestir recipientes usados para a cozinha solar.

### 2.3.7 Armazenamento de energia térmica

É difícil compreender a evolução do armazenamento de calor na cozinha solar. O procedimento terá sido semelhante ao da cozinha tradicional. Na cozinha tradicional em chama, uma vez cozido o alimento e atingida a temperatura necessária, este era removido do fogo aberto e era colocado numa caixa isolada. Na cozinha solar, para permitir o cozimento ou pelo menos o aquecimento de alimentos após o pôr do sol, esta técnica também é utilizada. No entanto, existe muito trabalho de pesquisa relativamente a materiais de baixo custo como areia para este fim. Qualquer que seja o material a reter o calor, é provável que este o perca lentamente. Mesmo que a perda de calor seja minimizada pelo isolamento, seria um desafio cozinhar uma refeição completa durante a noite.

Esta falha levou muitos cientistas a explorar a possibilidade de armazenar energia solar na forma de energia elétrica. Puttaraj, um cientista na Índia, capta energia solar através de pequenos painéis fotovoltaicos de cerca de 250 W e armazena-a num conjunto de baterias. Esta energia alimenta um fogão de indução. Desta forma, poderá cozinhar a qualquer hora com energia proveniente do Sol.

### 2.3.8 Apoio elétrico

Muitas vezes o calor retido solar não é suficiente para confecionar os alimentos. Isto pode acontecer, por exemplo, com a passagem prolongada de uma nuvem. Desta forma, a exposição solar diminui e, conseqüentemente, a temperatura da cozinha diminui também.

Alguns modelos foram criados para que uma compensação desta falta de energia acontecesse. Como o exemplo do "all American Sun Oven" já anteriormente falado. Este, não só compensa a falha de energia solar como também permite que a temperatura chegue aos 180-200°C.

A construção de modelos do tipo híbrido, onde existe uma componente elétrica que compense esta falha de energia solar, tem sido uma solução e alvo de pesquisas e estudos

recentes.

Parte II

Métodos e Modelos



## Capítulo 3

# Trocas de calor por condução, convecção e radiação

Para a elaboração de um modelo, é necessário identificar e definir as trocas térmicas que ocorrem no sistema a analisar. Neste capítulo, demonstrar-se-á os pressupostos teóricos para este estudo. As trocas térmicas ocorrem por condução, por convecção e por radiação, dependendo da forma como o calor é transferido de elemento para elemento [9; 10; 11].

### 3.1 Transferência de calor por condução

É possível quantificar a transferência de calor por condução através da lei de Fourier:

$$q''_x = k \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

O fluxo de calor  $q''_x$  [W/m<sup>2</sup>] é a taxa de transferência de calor na direção x por unidade de área perpendicular à direção de transferência, e é proporcional ao gradiente de temperatura  $\frac{dT}{dx}$  nessa mesma direção. O coeficiente  $k$  é a condutividade térmica [W/mK], que é uma característica do material, onde ocorre a transferência de calor por condução.

### 3.2 Transferência de calor por convecção

A transferência de calor por convecção ocorre quando a energia é transferida pelo volume ou movimento macroscópico do fluido. Este movimento do fluido está associado ao facto de, a qualquer momento, um grande número de moléculas definido se movimenta coletivamente ou como agregados, movimento esse que na presença de uma diferença de temperatura, gera uma transferência de calor por convecção.

Independentemente da natureza das partículas no processo de troca de calor por convecção, a troca de calor é calculada usando a Lei de Arrefecimento de Newton:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (3.2)$$

O fluxo de calor  $q''$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] é proporcional à diferença de temperaturas da superfície e do fluido,  $T_s$  e  $T_\infty$ , respectivamente. O parâmetro  $h$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ] é coeficiente de transferência de calor por convecção, que depende das condições da camada limite, que são influenciadas pela geometria da superfície, a natureza do movimento do fluido e uma variedade de propriedades termofísicas do fluido.

### 3.3 Transferência de calor combinada por convecção e condução

Existe a conveniência, em alguns casos, de representar as trocas de calor por convecção e condução através de um circuito térmico, como o que acontece no caso de paredes. O circuito térmico, da mesma forma que um circuito elétrico, é composto com resistências, que neste caso são as resistências térmicas condutivas e convectivas. Um esquema deste tipo é representado na Figura 3.1.

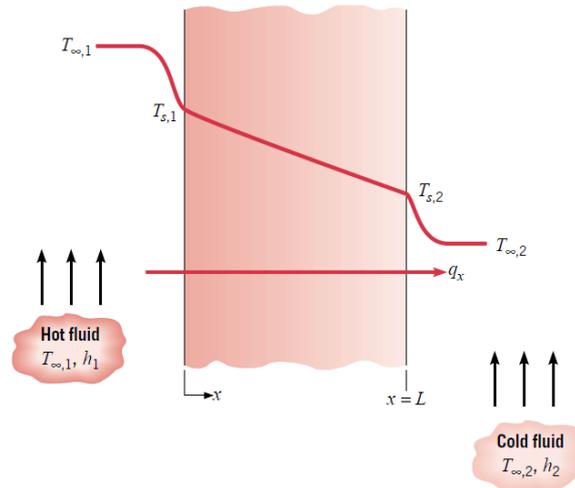


Figura 3.1: Transferência de calor combinada por convecção e condução [9]

Estas resistências calculam-se, respetivamente, como:

$$R_{t,cond} = \frac{L}{kA} \quad (3.3)$$

$$R_{t,conv} = \frac{1}{hA} \quad (3.4)$$

onde  $L$  é a espessura da parede,  $k$  a condutividade térmica,  $h$  o coeficiente de convecção e  $A$  a área da parede onde ocorre esta transferência de calor. Olhando para o caso da parede, da esquerda para a direita, temos uma resistência convectiva, seguida de uma resistência condutiva e, por fim, uma outra resistência convectiva. Temos então, 3 resistências térmicas em série e, por isso, a resistência térmica total é a sua soma.

$$R_{t,total} = R_{t,conv} + R_{t,cond} + R_{t,conv} \quad (3.5)$$

$$R_{t,total} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A} \quad (3.6)$$

Para o cálculo da taxa de transferência de calor, analogamente à lei de arrefecimento de Newton, pode-se definir o coeficiente global de transferência de calor,  $U$ .

$$U = \frac{1}{R_{t,total}} \quad (3.7)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A}} \quad (3.8)$$

Tendo-se então,

$$q_x = AU \Delta T \quad (3.9)$$

### 3.4 Transferência de calor por radiação

A transferência de calor por radiação ocorre através de ondas eletromagnéticas e, ao contrário da condução e convecção, esta não necessita de um meio material para ocorrer.

A radiação emitida por uma superfície provém da energia térmica da matéria delimitada pela superfície, e a taxa a qual a energia é libertada por unidade de área [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] é denominada poder emissivo da superfície. O limite superior para o poder emissivo corresponde ao poder emissivo do corpo negro dado pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (3.10)$$

onde  $T_s$  é a temperatura absoluta da superfície [K] e  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann,  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ [W}/(\text{m}^2\text{K}^4)]$ .

#### 3.4.1 Trocas de calor por radiação entre superfícies reais

Na maioria das superfícies ocorrem alguns processos radiativos de absorção, reflexão e transmissão. É importante definir estes conceitos para melhor compreender de que forma é que a radiação se transmite entre superfícies de diversos tipos. Uma superfície opaca, não é atravessada pela radiação, o que não acontece com uma superfície parcialmente transparente.

A absorptividade é uma propriedade que determina a fração da irradiação absorvida por uma superfície. De forma análoga, definem-se os conceitos de refletividade e transmissividade como as frações da radiação incidente (irradiação) refletida e transmitida, respetivamente. Estes coeficientes dependem das condições da superfície, do comprimento de onda da radiação e da composição e espessura do meio atravessado pela radiação. No entanto, podemos utilizar valor médios independentes do comprimento de onda, que dependem sobretudo do material e do seu estado superficial.

Estes coeficientes relacionam-se através da equação de balanço de radiação:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (3.11)$$

em que  $\rho$  é a refletividade,  $\alpha$  a absorptividade e  $\tau$  a transmissividade.

Para superfícies opacas,  $\tau=0$ , e para superfícies cinzentas difusas  $\alpha=\epsilon$ , em que  $\epsilon$  é a emissividade, sendo de reter que muitas das superfícies reais podem ser tomadas como superfícies cinzentas difusas.

Analisados os processos radiativos que ocorrem numa superfície apenas, considera-se agora as trocas de calor por radiação entre duas ou mais superfícies. Estas trocas dependem inteiramente da geometria e orientação das superfícies, e das suas propriedades radiativas. Assuma-se também que o meio que separa as superfícies não participa nas trocas radiativas, sendo considerado um meio radiativamente não participante. Começa-se por definir as características geométricas das superfícies e, por isso, começamos por definir os fatores de forma. Este é o ponto de partida para calcular as trocas de calor por radiação entre quaisquer duas ou mais superfícies.

### Fator de forma

O fator de forma  $F_{ij}$  é definido como a fração da radiação que deixa a superfície  $i$  e que, diretamente, atinge a superfície  $j$ . Para definir  $F_{ij}$ , consideram-se as áreas elementares de cada superfície  $dA_i$  e  $dA_j$ , distanciadas  $R$ , formando os ângulos polares  $\theta_i$  e  $\theta_j$  com as normais das superfícies  $n_i$  e  $n_j$ , respetivamente. Os valores de  $R$ ,  $\theta_i$  e  $\theta_j$  variam com o posicionamento das áreas das superfícies. Estes parâmetros encontram-se esquematizados na Figura 3.2.

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (3.12)$$

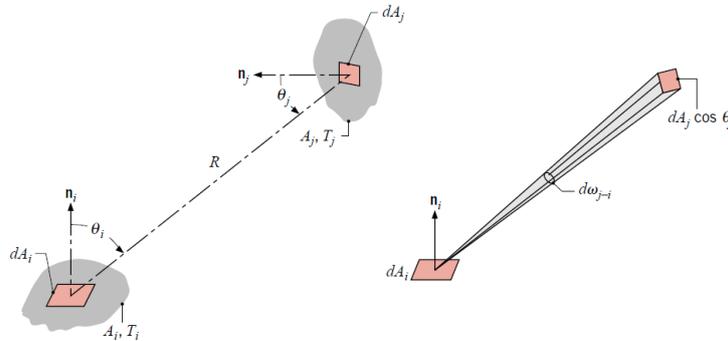


Figura 3.2: Fatores de forma associado à troca de radiação entre elementos das superfícies de área  $dA_i$  e  $dA_j$

[9]

Alguns fatores de forma podem ser obtidos a partir da definição de outros, através de relações disponíveis para o efeito. A primeira é a relação da reciprocidade:

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (3.13)$$

Esta relação é útil para determinar um fator de forma conhecendo outro. Outra relação importante diz respeito aos fatores de forma das  $N$  superfícies de uma cavidade

fechada, denominada regra da soma:

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \quad (3.14)$$

Outra relação entre fatores de forma é a regra da sobreposição, como uma forma de expressar uma geometria cujo fator de forma é desconhecido em função da soma ou da diferença de fatores de forma conhecidos.

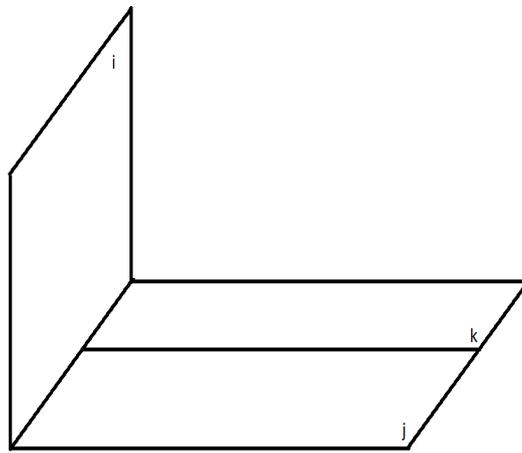


Figura 3.3: Regra da sobreposição

A seguinte expressão exemplifica esta relação:

$$F_{i-(j,k)} = F_{i-j} + F_{i-k} \quad (3.15)$$

Outra é a regra da simetria, que dita que superfícies com a mesma geometria face a uma terceira superfície, têm um igual fator de forma.

## Radiosidade

A radiosidade, em  $W/m^2$ , é o fluxo radiante total que abandona uma superfície, incluindo a parte refletida da irradiação e a radiação emitida.

### 3.4.2 Fluxo radiante que deixa uma superfície

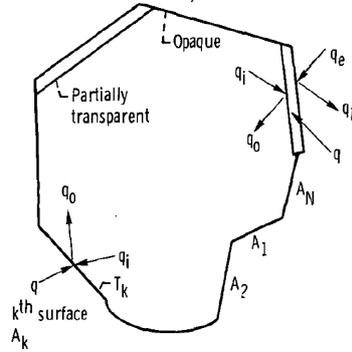


Figura 3.4: Cavidade com  $N$  superfícies onde algumas são opacas e outras são semitransparentes

[12]

O fluxo de radiação perdido por uma superfície,  $q_k$ , é igual à diferença entre a radiosidade da superfície e a irradiação (fluxo radiante incidente na superfície).

Quando uma das superfícies da cavidade é parcialmente transparente, a radiação pode entrar e sair diretamente do sistema.

Para efeitos de cálculos das trocas de calor por radiação, assume-se que um meio semitransparente é como um vidro, pode ser caracterizado por uma única temperatura em toda a sua espessura. Sabemos que, num vidro, a radiação refletirá principalmente de forma especular, de modo a que a pressuposição da reflexão difusa é violada. No entanto, dentro de uma cavidade, existem múltiplos reflexos e a direcionalidade de cada reflexão perde a sua importância.

As componentes  $\alpha^o$  e  $\rho^o$  são relativas às frações de radiação incidente da radiação que são absorvidas e refletidas, respetivamente, enquanto a componente  $\tau^o$  representa a fração da radiação incidente na parte exterior do meio semitransparente que é transmitida através do meio. Uma notação semelhante é utilizada para parte interior da superfície.

### Trocas de calor por radiação entre superfícies opacas

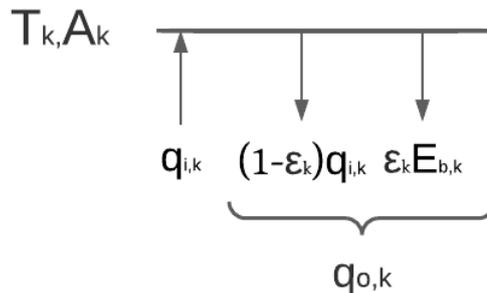


Figura 3.5: Trocas de radiação entre superfícies opacas

Para as  $m$  superfícies da cavidade que são opacas, as equações convencionais de radiação podem ser escritas como:

$$q_k = q_{o,k} - q_{i,k} \quad (3.16)$$

onde  $k$  será maior que 1, mas sempre menor ou igual a  $m$ . A radiosidade consiste no fluxo radiativo que é emitido e refletido:

$$q_{o,k} = \varepsilon_k \sigma T_k^4 + (1 - \varepsilon_k) q_{i,k} \quad (3.17)$$

A irradiação sobre a superfície interna da superfície K resulta das radiosidades das superfícies internas da cavidade, podendo ser expresso como

$$A_k q_{i,k} = \sum_{j=1}^N q_{o,j} A_j F_{j-k} \quad (3.18)$$

e, usando a relação de reciprocidade Eq. 3.13, e simplificando

$$q_{i,k} = \sum_{j=1}^N q_{o,j} F_{k-j} \quad (3.19)$$

Combinando as equações anteriores para relacionar o  $q$ ,  $T$  e  $q_o$  obtém-se

$$q_k = \frac{\varepsilon_k}{1 - \varepsilon_k} (\sigma T_k^4 - q_{o,k}), \quad (3.20)$$

e combinando as equações restantes para relacionar  $q_o$ 's e  $T$ ,

$$q_{o,k} - (1 - \varepsilon_k) \sum_{j=1}^N q_{o,j} F_{k-j} = \varepsilon_k \sigma T_k^4 \quad (3.21)$$

### Trocas de calor por radiação entre superfícies semitransparentes

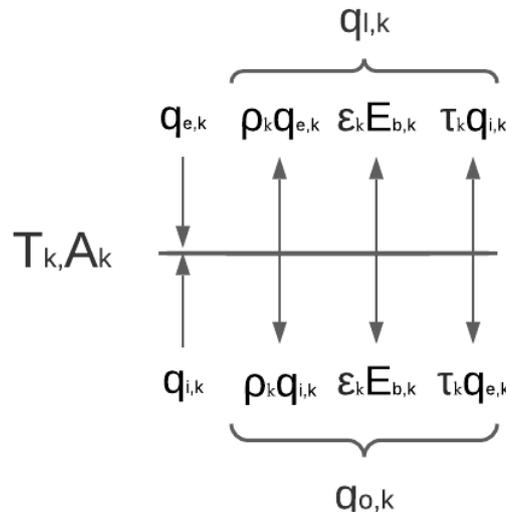


Figura 3.6: Trocas de radiação em superfícies semitransparentes

Agora considera-se uma superfície parcialmente transparente. Usando a equação geral do balanço energético, temos que:

$$q_k = q_{o,k} - q_{i,k} + q_{l,k} - q_{e,k} \quad (3.22)$$

em que, no caso de arrefecimento do meio semitransparente,  $q_k$  é positivo. O fluxo radiativo que abandona a superfície interna de um meio semitransparente consiste na energia emitida, energia refletida e o fluxo incidente transmitido da parte exterior, isto é, a sua radiosidade é

$$q_{o,k} = \varepsilon_k^i \sigma T_k^4 + \rho_k^i q_{i,k} + \tau_k^o q_{e,k} \quad (3.23)$$

De forma semelhante, o fluxo radiante perdido através da superfície exterior do meio semitransparente é dado por:

$$q_{l,k} = \varepsilon_k^o \sigma T_k^4 + \rho_k^o q_{e,k} + \tau_k^i q_{i,k} \quad (3.24)$$

A irradiação da superfície interior  $k$  é obtido através de

$$q_{i,k} = \sum_{j=1}^N q_{o,j} F_{k-j} \quad (3.25)$$

Estas últimas equações são validas para  $m + 1 \leq k \leq N$ .

Se se combinar as equações 3.22 e 3.24, consegue-se eliminar a variável  $q_l$  e fica-se com:

$$q_k - \varepsilon_k^o \sigma T_k^4 + q_{e,k} (1 - \rho_k^o) = q_{o,k} - q_{i,k} (1 - \tau_k^i) \quad (3.26)$$

### 3.5 Equação de conservação de energia

A taxa de variação de energia interna,  $\dot{E}_{st}$ , é dada por [9; 10]

$$\dot{E}_{st} = \rho v c_p \frac{dT}{dt} \quad (3.27)$$

Fazendo um balanço energético, a taxa de acumulação de energia é igual à diferença entre as taxas de entrada e de saída de energia no sistema

Sob forma de equação vem

$$\dot{E}_{st} = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} \quad (3.28)$$

ou seja

$$m c_p \frac{dT}{dt} = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} \quad (3.29)$$

Os termos  $\dot{E}_{in}$  e  $\dot{E}_{out}$  referem-se a todas as trocas de calor que ocorrerem no volume de controlo por condução, convecção e radiação, que já foram mencionadas anteriormente.

### 3.5.1 Balanço energético para o meio não participante que preenche a cavidade

Numa cavidade em que o meio não participa nas trocas de calor por radiação, considera-se que apenas há trocas de calor por convecção para todas as  $N$  superfícies envolventes, que delimitam o interior da cavidade e a equação de conservação de energia para o meio que preenche a cavidade vem

$$m_i c_{p,i} \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^N h_j^i A_j (T_j - T_i) \quad (3.30)$$

cuja forma discretizada no tempo vem

$$T_i^{t+\Delta t} = T_i^t + \frac{\Delta t}{m_i c_i} \sum_{j=1}^N h_j^i A_j (T_j - T_i) \quad (3.31)$$

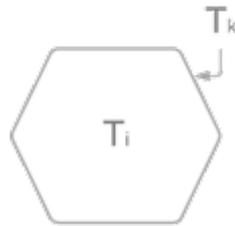


Figura 3.7: Esquema de cavidade preenchido com um meio não participante

### 3.5.2 Balanço energético para um meio semitransparente

Em meios semitransparentes temos que contabilizar as trocas de calor por radiação e convecção. Analisando a Figura 3.8 sabemos que a componente radiativa entra com 4 termos que já foram explicadas anteriormente; na componente convectiva, tem-se convecção nas duas superfícies do meio semitransparente.

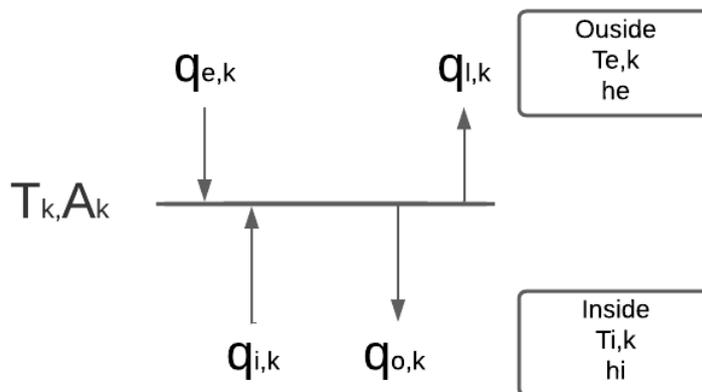


Figura 3.8: Esquema para estabelecimento do balanço energético para o meio semitransparente

$$m_k c_{p,k} \frac{dT_k}{dt} = A_k [q_{e,k} - q_{l,k} + q_{i,k} - q_{o,k}] + h_{e,k} A_k (T_e - T_k) + h_{i,k} A_k (T_i - T_k) \quad (3.32)$$

cuja forma discretizada no tempo vem

$$T_k^{t+\Delta t} = T_k^t + \frac{\Delta t A_k}{m_k c_k} [[q_{e,k} - q_{l,k} + q_{i,k} - q_{o,k}] + h_{e,k} A_k (T_e - T_k^t) + h_{i,k} A_k (T_i - T_k^t)] \quad (3.33)$$

### 3.5.3 Balanço energético para os meios opacos

As trocas de calor contabilizadas para meios opacos é muito semelhante ao que anteriormente foi feito para os meios semitransparentes. A grande diferença é que a transmissividade dos meios opacos, ao contrário dos meios semitransparentes é nula. Desta forma, os termos de radiação transmitida são nulos,  $\tau_k=0$ , e  $\rho_k + \varepsilon_k = 1$ .

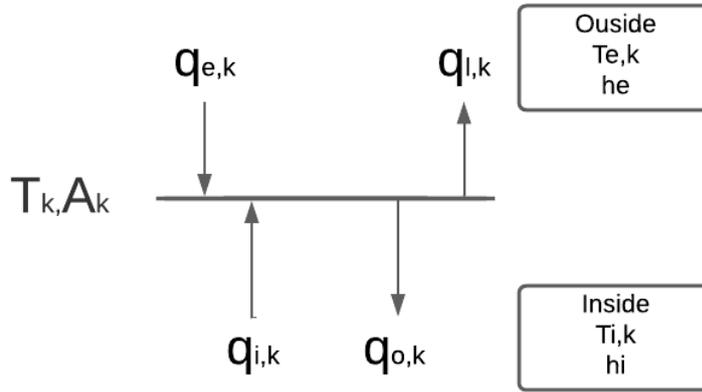


Figura 3.9: Esquema para estabelecimento do balanço energético para meios opacos

A equação de balanço de energia para o meio opaco vem

$$m_k c_{p,k} \frac{dT_k}{dt} = A_k [q_{e,k} - q_{l,k} + q_{i,k} - q_{o,k}] + h_{e,k} A_k (T_e - T_k) + h_{i,k} A_k (T_i - T_k) \quad (3.34)$$

Então, de forma a termos a variação de temperatura por incrementos de tempo, temos que:

$$T_k^{t+\Delta t} = T_k^t + \frac{\Delta t A_k}{m_k c_k} [[q_{e,k} - q_{l,k} + q_{i,k} - q_{o,k}] + h_{e,k} A_k (T_e - T_k^t) + h_{i,k} A_k (T_i - T_k^t)] \quad (3.35)$$

## Capítulo 4

# Estabelecimento do modelo da cozinha solar do tipo caixa

Este capítulo inclui os passos para o estabelecimento do modelo da cozinha solar do tipo caixa, tendo em conta todos os pressupostos anteriores.

### 4.1 Dimensões da cozinha solar

Recorrendo aos resultados da pesquisa efetuada, decidiu-se implementar o modelo para uma geometria algo semelhante aos modelos *30-60* e *All American Sun Oven*. Estes têm a particularidade de uma das faces da caixa ser mais pequena de modo a existir uma maior captação de raios solares. As dimensões da caixa foram resultado do estudo de modelos existentes, e os materiais escolhidos e as suas propriedades foram modificadas ao longo da implementação até se chegar à melhor solução.

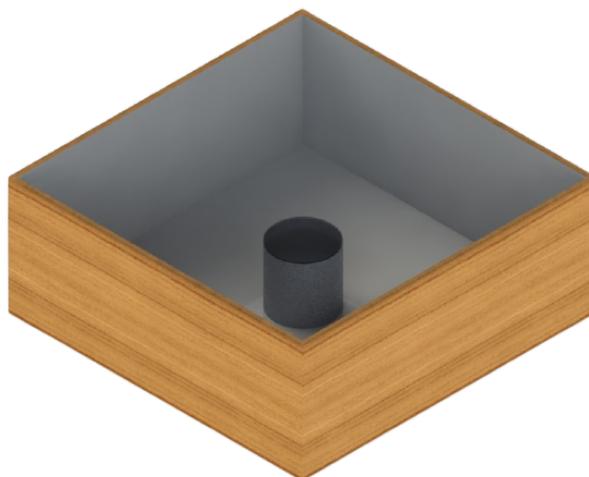


Figura 4.1: Cozinha solar do tipo caixa modelada

O modelo é composto por 13 superfícies e 12 volumes, estando a sua numeração resumida nas tabelas seguintes.

Tabela 4.1: Numeração das superfícies

Número da Superfície	Nomenclatura	Descrição
1	s1	face superior da tampa da caixa
2	s2	face inferior da tampa da caixa
3	s3	parede esquerda
4	s4	parede direita
5	s5	parede de frente
6	s6	parede de trás
7	s7	face superior da tampa do recipiente
8	s8	face inferior da tampa do recipiente
9	s9	superfície exterior da parte inferior do recipiente
10	s10	superfície exterior da parte superior do recipiente
11	s11	superfície interior da parte superior do recipiente
12	s12	superfície interior da base da caixa
13	s13	superfície da parte superior do sólido (comida)

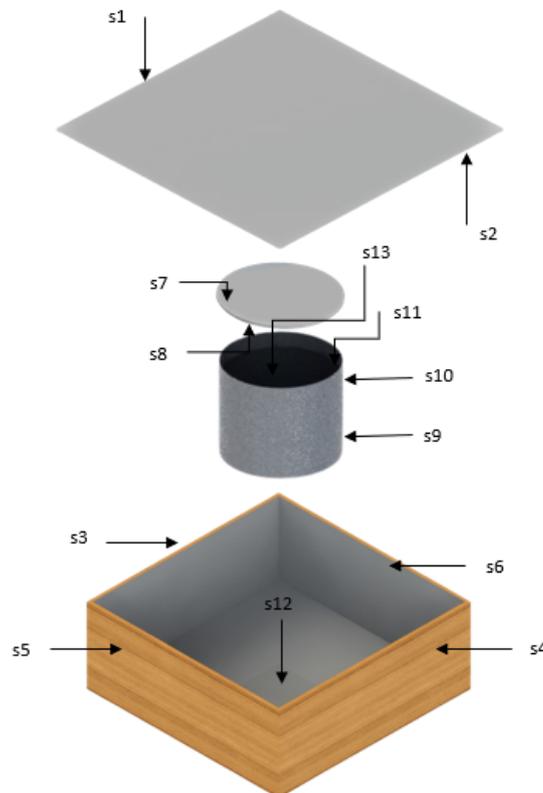


Figura 4.2: Caixa solar com numeração das superfícies

Tabela 4.2: Numeração dos volumes

Número do Volume	Nomenclatura	Descrição
1	v1	vidro da tampa da caixa
2	v2	ar no interior da caixa
3	v3	vidro da tampa do recipiente
4	v4	ar no interior do recipiente
5	v5	parte superior do recipiente (sem comida)
6	v6	sólido (comida)
7	v7	parte inferior do recipiente (com comida)
8	v8	parede esquerda
9	v9	parede direita
10	v10	parede de frente
11	v11	parede de trás
12	v12	base da caixa

A Figura 4.2 mostra a representação dos volumes no modelo.

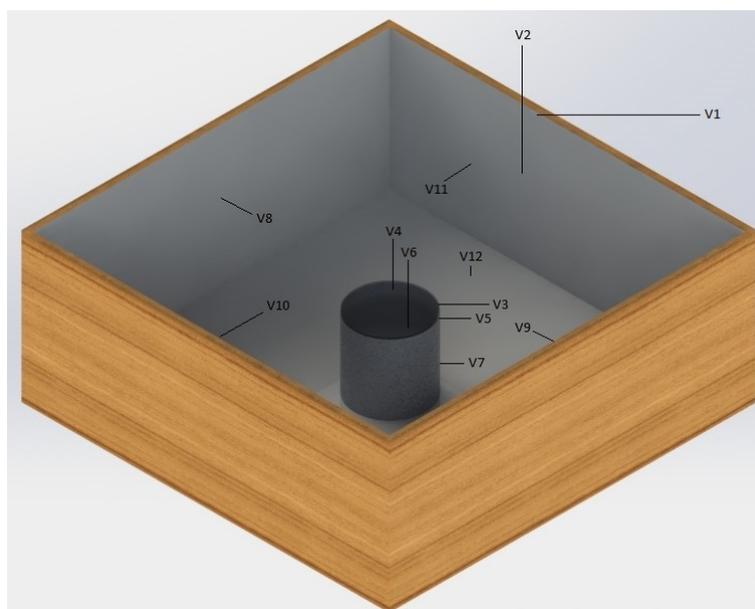


Figura 4.3: Caixa solar com numeração dos volumes

#### 4.1.1 Caixa

A caixa é a estrutura base da cozinha solar, e é construída de madeira com revestimento interior com folhas de alumínio para aumentar a refletividade e diminuir as perdas de energia. As dimensões estão detalhadas na Figura 4.3.

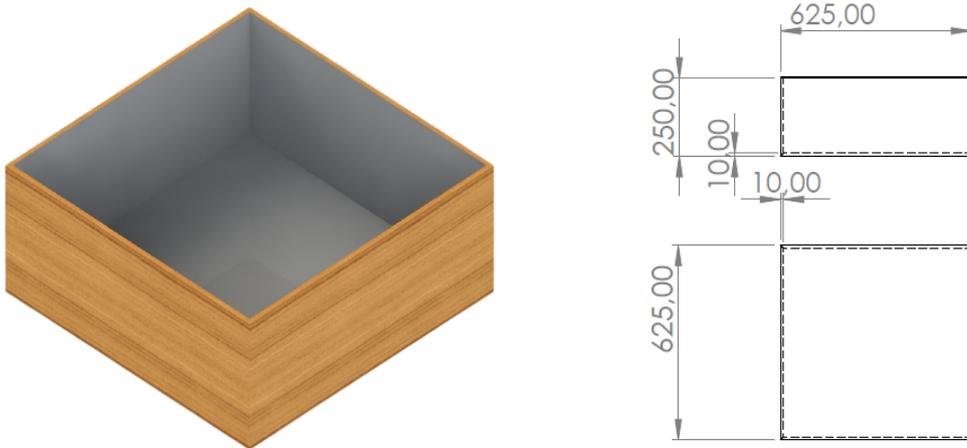


Figura 4.4: Dimensões da caixa em mm

As paredes da caixa têm as dimensões de 625 mm x 250 mm, com uma espessura de 10 mm. A caixa é composta por 4 paredes iguais e pela base, que tem dimensões 625 mm x 625 mm, também com espessura de 10 mm. Sabendo isto, fica definida a área destas superfícies e os correspondentes volumes. Estipulou-se a massa volúmica da madeira como igual a  $200 \text{ kg/m}^3$ .

Para a parede esquerda, como exemplo,

$$\begin{cases} A_{s3} = 0,156 \text{ m}^2 \\ V_{v8} = 0,00156 \text{ m}^3 \\ m_{v8} = 0,313 \text{ kg} \end{cases}$$

Valores que são também os das outras paredes da caixa

$$\begin{cases} A_{s12} = 0,3793 \text{ m}^2 \\ V_{v12} = 0,00379 \text{ m}^3 \\ m_{v12} = 0,7586 \text{ kg} \end{cases}$$

#### 4.1.2 Vidros

##### Tampa da caixa

A tampa da caixa é feita de vidro para que ocorra efeito de estufa no seu interior, isto é, para que haja entrada de radiação e retenção no seu interior. Este volume é delimitado por duas superfícies semitransparentes, 1 e 2. As dimensões estão detalhadas na Figura 4.4.

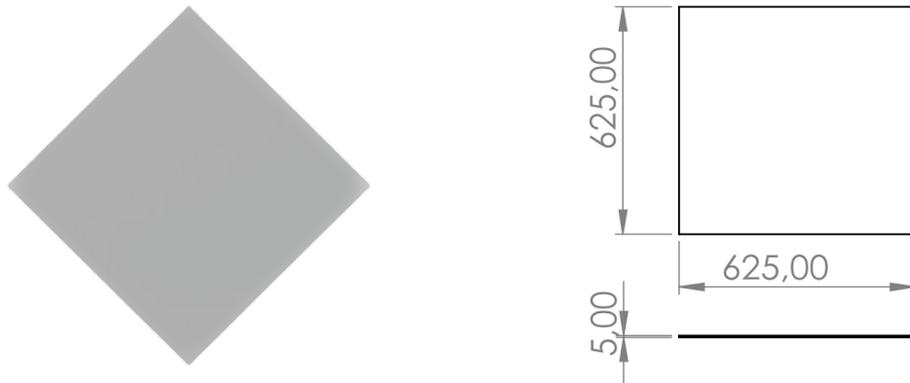


Figura 4.5: Dimensões do vidro da tampa da caixa em mm

A tampa da caixa tem as dimensões de 625 mm x 625 mm e uma espessura de 5 mm. Com estes dados, assume-se que a massa volúmica é de 2500 kg/m<sup>3</sup>.

$$\begin{cases} A_{s1} = A_{s2} = 0,3906 \text{ m}^2 \\ V_{v1} = 0,001953 \text{ m}^3 \\ m_{v1} = 4,8828 \text{ kg} \end{cases}$$

#### Vidro da tampa do recipiente

A tampa do recipiente, também feita de vidro, tem a mesma finalidade de deixar que a radiação penetre o recipiente e fique aí retida o mais possível. Este vidro tem as superfícies 7 (superior) e 8 (inferior) e as suas dimensões estão discriminadas na Figura 4.5.

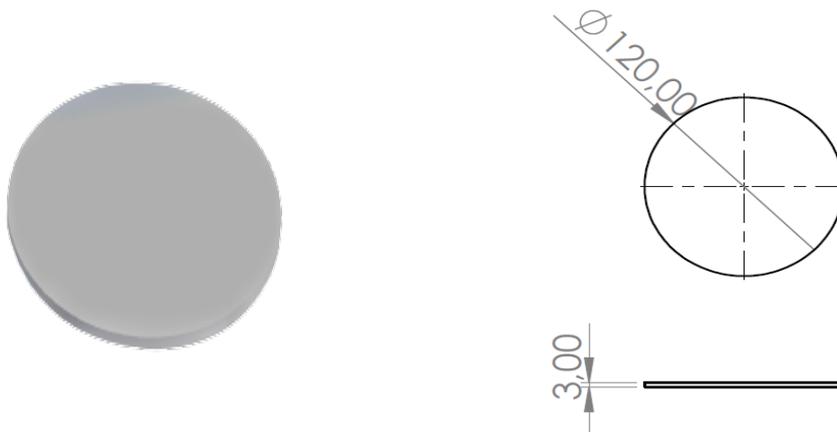


Figura 4.6: Dimensões do vidro da tampa do recipiente em mm

$$\begin{cases} A_{s7} = A_{s8} = 0,01131 \text{ m}^2 \\ V_{v3} = 0,000003 \text{ m}^3 \\ m_{v3} = 0,0848 \text{ kg} \end{cases}$$

### 4.1.3 Recipiente e sólido (comida)

O recipiente que contém a comida é de alumínio, estando as duas dimensões do recipiente detalhadas na Figura 4.6.

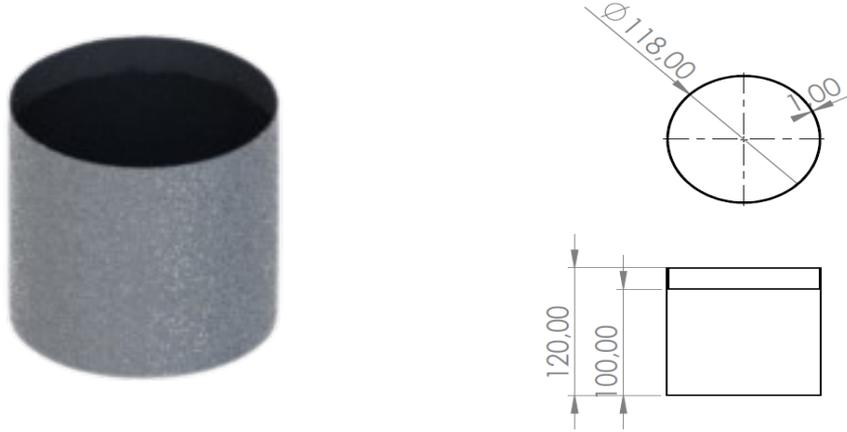


Figura 4.7: Dimensões do recipiente que contém a comida em mm

O recipiente é composto pelas superfícies 9, 10 e 11. A superfície 13 representa a superfície superior da comida. Fizeram-se duas divisões ao volume do recipiente, tendo então, representando o volume 5 a parte superior do recipiente que não contém comida no interior, o volume 6 representativo da comida e o volume 7, representativo da parte do volume do recipiente que contém, de facto, a comida.

A altura do recipiente é de 120 mm, onde 100 mm estão preenchidos com a comida, e o seu diâmetro é de 120 mm. A espessura do recipiente é de 1 mm.

A massa volúmica do alumínio é de  $2770 \text{ kg/m}^3$  e a do sólido é de  $800 \text{ kg/m}^3$ . A massa volúmica do ar foi definida como sendo  $1,161 \text{ kg/m}^3$ .

Para o recipiente da comida temos então

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{s9} = 0,00741 \text{ m}^2 \\ A_{s10} = 0,0075 \text{ m}^2 \\ A_{s11} = 0,0377 \text{ m}^2 \\ A_{s13} = 0,0109 \text{ m}^2 \\ V_{v5} = 0,00001 \text{ m}^3 \\ V_{v6} = 0,00005 \text{ m}^3 \\ V_{v7} = 0,0011 \text{ m}^3 \\ m_{v5} = 0,0207 \text{ kg} \\ m_{v6} = 0,1338 \text{ kg} \\ m_{v7} = 0,8661 \text{ kg} \end{array} \right.$$

## 4.2 Materiais e propriedades

O vidro tem o papel de permitir transmitir a radiação para o interior da caixa e, ao mesmo tempo, de a reter para aumentar a temperatura do sistema, sendo a transmissi-

vidade a sua propriedade mais importante, tomada como sendo de 0,90.

Ao contrário do vidro, a folha de alumínio que é utilizado para cobrir as paredes da caixa tem um papel refletor, sendo a sua propriedade radiativa dominante a refletividade. O oposto é pretendido para o alumínio fosco do recipiente, cuja absorvidade é a propriedade mais relevante.

Tabela 4.3: Propriedades dos materiais utilizados

Material	$\alpha$	$\rho$	$\tau$	$c_p$ [J/kgK]	$k$ [W/mK]	$m_v$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Vidro	0,05	0,05	0,90	700	0,8	-
Alumínio refletor	0,04	0,96	-	875	-	-
Alumínio recipiente	0,96	0,04	-	875	-	-
Ar	-	-	-	1007	-	1,161
Madeira	-	-	-	1700	0,1	200
Sólido (comida)	0,95	0,05	-	3350	-	-

### 4.3 Fator de forma

Utilizando as leis dos fatores de forma enunciadas anteriormente e sabendo que temos 13 superfícies no sistema, tal resulta uma matriz quadrada 13x13 para os fatores de forma

Os fatores de forma  $F_{i,i}$  são nulos na superfície 11, que é a única superfície côncava (vê-se a si própria).

De acordo com a bibliografia, existem equações predefinidas para os fatores de forma correspondentes a determinada geometria. Alguns exemplos que foram utilizados estão descritos nas Figuras seguintes. [13]

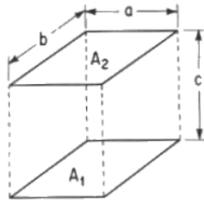


Figura 4.8: Retângulos opostos, paralelos e idênticos

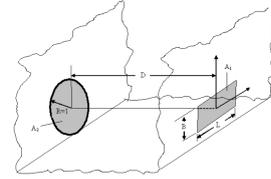


Figura 4.9: Retângulo para um disco coaxial num plano paralelo

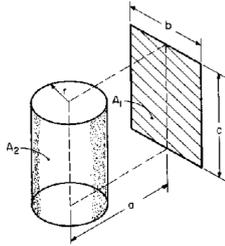


Figura 4.10: Cilindro e retângulo com duas arestas paralelas ao eixo do cilindro e de comprimento igual ao cilindro

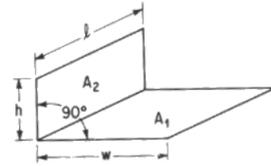


Figura 4.11: Dois retângulos tendo uma aresta comum e formando um ângulo de 90° entre si

Depois, com base nas relações da reciprocidade, da soma e da sobreposição, e partindo do cálculo de alguns fatores de forma, pode-se chegar aos restantes valores.

A matriz de  $F_{i,j}$  é dada por

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0,1148	0,1148	0,1148	0,1148	0,0197	0	0,0015	0,0005	0	0,5191	0
3	0	0,287	0	0,0208	0,133	0,133	0,0003	0	0,11	0,05	0	0,2659	0
4	0	0,287	0,0208	0	0,133	0,133	0,0003	0	0,11	0,05	0	0,2659	0
5	0	0,287	0,133	0,133	0	0,0208	0,0003	0	0,11	0,05	0	0,2659	0
6	0	0,287	0,133	0,133	0,0208	0	0,0003	0	0,11	0,05	0	0,2659	0
7	0	0,9777	0,0056	0,0056	0,0056	0,0056	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,338	0	0,662
9	0	0,187	0,1453	0,1453	0,1453	0,1453	0	0	0	0	0	0,4	0
10	0	0,0311	0,1922	0,1922	0,1922	0,1922	0	0	0	0	0	0,2	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0,3959	0	0	0,2083	0	0,3958
12	0	0,5297	0,1085	0,1085	0,1085	0,1085	0	0	0,0328	0,0033	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0,7174	0	0	0,2826	0	0

Figura 4.12: Matriz de fatores de forma  $F_{i,j}$

#### 4.4 Sistema de equações das radiosidades

Passando a designar as radiosidades pelo símbolo  $J$ , as superfícies opacas são caracterizadas pela seguinte equação de radiosidade

$$J_k - (1 - \varepsilon_k) \sum_{j=1}^N J_j F_{k-j} = \varepsilon_k \sigma T_k^4 \quad (4.1)$$

Conhecidas as superfícies opacas do nosso sistema e por isso, apresenta-se as suas equações:

- Superfície 3

$$J_3 = \varepsilon_3 \sigma T_3^4 + (1 - \varepsilon_3) (J_2 F_{3-2} + J_4 F_{3-4} + J_5 F_{3-5} + J_6 F_{3-6} + J_7 F_{3-7} + J_9 F_{3-9} + J_{10} F_{3-10} + J_{12} F_{3-12}) \quad (4.2)$$

- Superfície 4

$$J_4 = \varepsilon_4 \sigma T_4^4 + (1 - \varepsilon_4) (J_2 F_{4-2} + J_3 F_{4-3} + J_5 F_{4-5} + J_6 F_{4-6} + J_7 F_{4-7} + J_9 F_{4-9} + J_{10} F_{4-10} + J_{12} F_{4-12}) \quad (4.3)$$

- Superfície 5

$$J_5 = \varepsilon_5 \sigma T_5^4 + (1 - \varepsilon_5) (J_2 F_{5-2} + J_3 F_{5-3} + J_4 F_{5-4} + J_6 F_{5-6} + J_7 F_{5-7} + J_9 F_{5-9} + J_{10} F_{5-10} + J_{12} F_{5-12}) \quad (4.4)$$

- Superfície 6

$$J_6 = \varepsilon_6 \sigma T_6^4 + (1 - \varepsilon_6) (J_2 F_{6-2} + J_3 F_{6-3} + J_4 F_{6-4} + J_5 F_{6-5} + J_7 F_{6-7} + J_9 F_{6-9} + J_{10} F_{6-10} + J_{12} F_{6-12}) \quad (4.5)$$

- Superfície 9

$$J_9 = \varepsilon_9 \sigma T_9^4 + (1 - \varepsilon_9) (J_2 F_{9-2} + J_3 F_{9-3} + J_4 F_{9-4} + J_5 F_{9-5} + J_6 F_{9-6} + J_{12} F_{9-12}) \quad (4.6)$$

- Superfície 10

$$J_{10} = \varepsilon_{10} \sigma T_{10}^4 + (1 - \varepsilon_{10}) (J_2 F_{10-2} + J_3 F_{10-3} + J_4 F_{10-4} + J_5 F_{10-5} + J_6 F_{10-6} + J_{12} F_{10-12}) \quad (4.7)$$

- Superfície 11

$$J_{11} = \varepsilon_{11} \sigma T_{11}^4 + (1 - \varepsilon_{11}) (J_8 F_{11-8} + J_{11} F_{11-11} + J_{13} F_{11-13}) \quad (4.8)$$

- Superfície 12

$$J_{12} = \varepsilon_{12}\sigma T_{12}^4 + (1 - \varepsilon_{12})(J_2F_{12-2} + J_3F_{12-3} + J_4F_{12-4} + J_5F_{12-5} + J_6F_{12-6} + J_9F_{12-9} + J_{10}F_{12-10}) \quad (4.9)$$

- Superfície 13

$$J_{13} = \varepsilon_{13}\sigma T_{13}^4 + (1 - \varepsilon_{13})(J_8F_{13-8} + J_{11}F_{13-11}) \quad (4.10)$$

Nas superfícies semitransparentes a equação geral da radiosidade é a seguinte:

$$J_k - \rho_k \sum_{j=1}^N J_j F_{k-j} = \varepsilon_k \sigma T_k^4 + \tau_k q_{e,k} \quad (4.11)$$

e as equações das radiosidades para as superfícies dos meios transparentes vem

- Superfície 1

$$J_1 = \varepsilon_1 \sigma T_1^4 + \tau q_{e,2} + \rho_1 q_{e,1} \quad (4.12)$$

$$q_{e,2} = J_3F_{2-3} + J_4F_{2-4} + J_5F_{2-5} + J_6F_{2-6} + J_7F_{2-7} + J_9F_{2-9} + J_{10}F_{2-10} + J_{12}F_{2-12} \quad (4.13)$$

- Superfície 2

$$J_2 = \varepsilon_2 \sigma T_2^4 + \tau q_{e,1} + \rho_2 q_{e,2} \quad (4.14)$$

$$q_{e,1} = Gs(t) + Gs(t) * \rho_{refletor} \times \cos(\alpha) \quad (4.15)$$

onde  $\alpha$  é o ângulo de inclinação do refletor relativamente à horizontal e  $\rho_{refletor}$  é a refletividade do refletor que, por ter o objetivo de refletir a maior parte de radiação possível para dentro da caixa, é considerada ser de 0,95. [14; 15; 16]

Este ângulo de inclinação do refletor,  $\alpha$ , pode ser calculado de forma a que este seja otimizado ao máximo através de:

$$\alpha = 30^\circ - \left(\frac{\beta}{3}\right) - \left(\frac{2}{3} \times \theta_z\right) [17] \quad (4.16)$$

onde  $\beta$  é o ângulo entre a superfície da tampa da caixa e a horizontal e é definido como zero, ou seja, esta está na horizontal e  $\theta_z$  é o ângulo zenital solar. [18; 19]

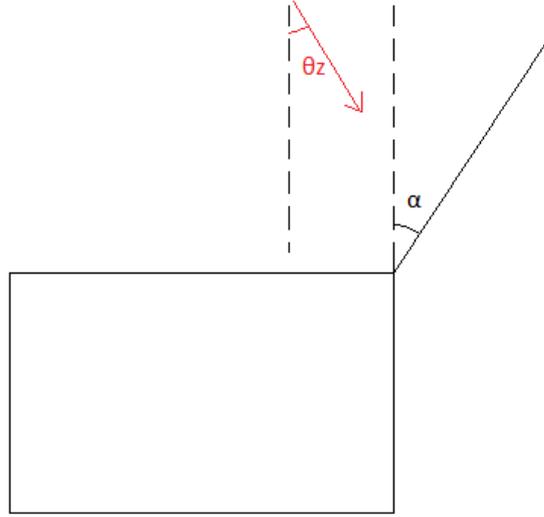


Figura 4.13: Esquema da radiação refletida pelo refletor para o interior da caixa

- **Superfície 7**

$$J_7 = \varepsilon_7 \sigma T_7^4 + \tau q_{e,8} + \rho_7 q_{e,7} \quad (4.17)$$

$$q_{e,7} = J_2 F_{7-2} + J_3 F_{7-3} + J_4 F_{7-4} + J_5 F_{7-5} + J_6 F_{7-6} \quad (4.18)$$

$$q_{e,8} = J_{11} F_{8-11} + J_{13} F_{8-13} \quad (4.19)$$

- **Superfície 8**

$$J_8 = \varepsilon_8 \sigma T_8^4 + \tau q_{e,7} + \rho_8 q_{e,8} \quad (4.20)$$

Juntando todas as equações das radiosidades num sistema de equações, conseguem-se calcular os 13 valores de radiosidade  $J_i$ .

## 4.5 Definição da radiação solar incidente

A cidade escolhida como exemplo para a implementação do modelo foi Aveiro, Portugal. A irradiação solar durante um dia, em Aveiro, respeita a seguinte correlação onde  $G_s$  está em  $\text{W/m}^2$  e  $t$  em segundos (contados a partir das 00:00 horas de cada dia).

$$G_s(t) = -0,000001 \times t^2 + 0,0893 \times t - 1204,3 \quad (4.21)$$

A temperatura ambiente avaliou-se pela correlação seguinte, onde  $T$  está em Kelvin e o tempo em segundos (contados a partir das 00:00 horas de cada dia). [20]

$$T_{amb}(t) = -9 \times 10^{-9} t^2 + 0,001 t + 276,31 \quad (4.22)$$

Para atribuição de valores ao ângulo são necessários os valores de latitude, declinação, ângulo do plano da superfície e ângulo de azimute da superfície. Através do conhecimento da latitude de Aveiro, calcula-se a declinação. O ângulo horário foi considerado o seu valor máximo de zero, que é o valor no ponto mais intenso da radiação.

Conseguiu-se saber qual o melhor ângulo de inclinação do refletor,  $\alpha$ , mediante a equação 4.16. [16]

Daí resultou

$$\begin{cases} \emptyset = 40,6804^\circ \\ \delta = 22,0396^\circ \\ \beta = 0^\circ \\ \omega = 0^\circ \\ \theta_z = 38,5^\circ \\ \alpha = 4,4^\circ \end{cases}$$

## 4.6 Equações de balanço energético para os vários volumes

### Volume 1 - Tampa da caixa em vidro

Este volume, com as superfícies 1 e 2, é representado esquematicamente na Figura 4.12.

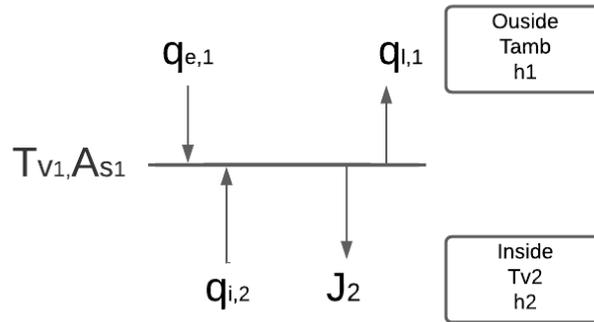


Figura 4.14: Esquema Trocas de Calor no Volume 1

### Trocas de calor por radiação

O fluxo radiante na superfície superior,  $q_{e,1}$ , resulta da soma de dois tipos de radiação: direta do sol e refletida pelo refletor externo da caixa, sendo

$$q_{e,1} = \overbrace{G_s(t)}^{\text{Radiação Direta}} + \overbrace{G_s(t) * \rho_{refletor} * \cos(\alpha)}^{\text{Radiação Refletida}} \quad (4.23)$$

Ainda no estudo da superfície superior, temos a taxa radiativa que abandona a superfície 1,  $q_{l,1}$

$$q_{l,1} = \varepsilon_{vidro} \sigma T_1^4 + \rho_{vidro} q_{e,1} + \tau_{vidro} q_{i,2} \quad (4.24)$$

Para a superfície 2, a superfície inferior deste volume, define-se o fluxo radiante que nela entra como

$$q_{i,2} = J_3 F_{2-3} + J_4 F_{2-4} + J_5 F_{2-5} + J_6 F_{2-6} + J_7 F_{2-7} + J_9 F_{2-9} + J_{10} F_{2-10} + J_{12} F_{2-12} \quad (4.25)$$

A radiosidade  $J_2$  é conhecida da resolução dos sistemas de equações de radiosidade incremental, ao longo do tempo de estudo.

### Trocas de calor por convecção

As trocas de calor por convecção ocorrem através das duas superfícies 1 e 2. Na superfície superior, a convecção acontece com o ambiente e na superfície inferior a convecção acontece com o ar interior da caixa. Para definir estas trocas, necessita-se de dois coeficientes de transferência de calor por convecção,  $h_1$  e  $h_2$ , respetivamente.

A equação discretizada do balanço de energia para o volume 1, vem então:

$$T_{v1}^{t+\Delta t} = T_{v1}^t + \frac{\Delta t A_{s1}}{m_{v1} c_{p,vidro}} \left[ \overbrace{(q_{e,1} - q_{l,1}) + (q_{i,2} - J_2)}^{\text{radiação}} + \overbrace{h_1 (T_{amb} - T_{v1}) + h_2 (T_{v2} - T_{v1})}^{\text{convecção}} \right] \quad (4.26)$$

Um dos pressupostos do modelo é que a temperatura de um volume de meio semi-transparente é igual à temperatura das superfícies que o constituem, então, podemos assumir que:

$$T_{s1}^{t+\Delta t} = T_{s2}^{t+\Delta t} = T_{v1}^{t+\Delta t} \quad (4.27)$$

### Volume 3 - Tampa do recipiente em vidro

De forma análoga ao volume 1, encontra-se na Figura 4.13 a representação esquemática das trocas térmicas para este volume.

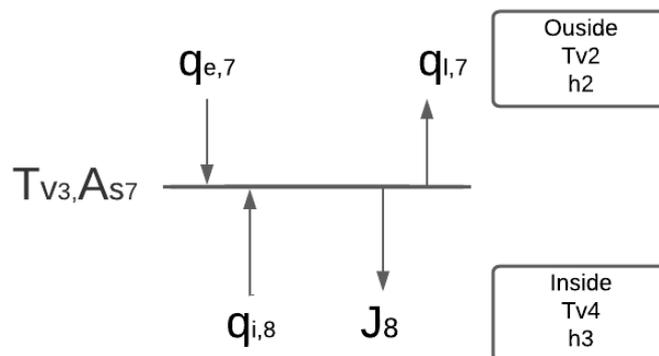


Figura 4.15: Esquema Trocas de Calor no Volume 3

### Trocas de calor por radiação

Começamos por definir o fluxo radiativo incidente na superfície superior da tampa, a superfície 7.

$$q_{e,7} = J_2 F_{7-2} + J_3 F_{7-3} + J_4 F_{7-4} + J_5 F_{7-5} + J_6 F_{7-6} \quad (4.28)$$

Na superfície inferior, o fluxo radiativo incidente é

$$q_{e,8} = J_{11} F_{8-11} + J_{13} F_{8-13} \quad (4.29)$$

As radiosidades destas superfícies são conhecidas da resolução do sistema de equações das radiosidades.

### Trocas de calor por convecção

As trocas de calor por convecção ocorrem nas duas superfícies 7 e 8. Na superfície superior, a convecção acontece com o ar contido no interior da caixa, e na superfície inferior a convecção acontece com o ar contido no interior do recipiente. Para definir estas trocas, necessita-se de dois coeficientes de transferência de calor por convecção,  $h_2$  e  $h_3$ , respetivamente.

A equação discretizada do balanço de energia para o volume 3, vem então:

$$T_{v3}^{t+\Delta t} = T_{v3}^t + \frac{\Delta t A_{s7}}{m_{v3} c_{p,vidro}} \left[ \overbrace{(q_{e,7} - J_7) + (q_{i,8} - J_8)}^{\text{radiação}} + \underbrace{h_2 (T_{v2} - T_{v3}) + h_3 (T_{v4} - T_{v3})}_{\text{convecção}} \right] \quad (4.30)$$

Sabendo que

$$T_{s7}^{t+\Delta t} = T_{s8}^{t+\Delta t} = T_{v3}^{t+\Delta t} \quad (4.31)$$

### Volume 2 - Ar contido no interior da caixa

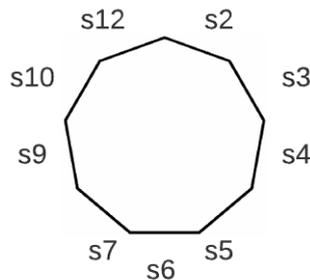


Figura 4.16: Esquema das trocas de calor do volume 2

### Trocas de calor por convecção

As trocas de calor por convecção do ar no interior da caixa acontecem com os volumes exteriores do recipiente, volumes 5 e 7 onde o coeficiente de convecção responsável é o  $h_2$ .

### Trocas de calor combinadas por convecção e condução

As transferências de calor combinadas ocorrem através das paredes e através dos vidros, sendo levando em consideração o coeficiente global de transferência de calor calculado.

Tem-se três coeficientes U diferentes, dependendo de onde acontece a troca de calor: paredes da caixa, vidro da tampa do recipiente, e vidro da tampa da caixa. Temos então que:

1. Paredes da caixa

$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\text{delta}}{k} + \frac{1}{h_e}} = 1,179 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (4.32)$$

onde  $\text{delta}$  é a espessura da madeira da caixa em m e k a sua condutividade térmica em W/mK.

2. Tampa de vidro da caixa

$$U_2 = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\text{delta}}{k} + \frac{1}{h_e}} = 1,324 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (4.33)$$

onde  $\text{delta}$  é a espessura da tampa da caixa em m e k a sua condutividade térmica em W/mK.

3. Tampa de vidro do recipiente

$$U_3 = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\text{delta}}{k} + \frac{1}{h_e}} = 1,195 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (4.34)$$

onde  $\text{delta}$  é a espessura da tampa do recipiente em m e k a sua condutividade térmica em W/mK.

O balanço energético do volume 2 na sua forma discretizada vem então

$$T_{v2}^{t+\Delta t} = T_{v2}^t + \frac{\Delta t}{m_{v2}c_{p,ar}} \left[ A_{s2}U_2(T_{amb} - T_{v2}) + 4 \times A_{s3}U_1(T_{amb} - T_{v2}) + A_{s7}U_3(T_{v4} - T_{v2}) + A_{s9}h_2(T_{v7} - T_{v2}) + A_{s10}h_2(T_{v5} - T_{v2}) + A_{s12}U_1(T_{amb} - T_{v2}) \right] \quad (4.35)$$

### Volume 4 - Volume de ar no interior do recipiente

Este volume é retratado de forma análoga ao volume 2.

### Trocas de calor por convecção

As trocas de calor por convecção do ar no interior do recipiente acontecem com os volumes interiores do recipiente e com o sólido (comida), volumes 5 e 6, onde o coeficiente de transferência de calor por convecção é  $h_3$ .

### Trocas de calor combinadas por convecção e condução

Avaliam-se da mesma forma que as trocas através do coeficiente global de transferência de calor para o volume 2.

A forma discretizada do balanço de energia para o volume 4 vem que

$$T_{v4}^{t+\Delta t} = T_{v4}^t + \frac{\Delta t}{m_{v4}c_{p,ar}} [U_2 A_{s8}(T_{v2} - T_{v4}) + h_3 A_{s11}(T_{v5} - T_{v4}) + h_2 A_{s13}(T_{v6} - T_{v4})] \quad (4.36)$$

### Volume 5 - Anel superior do recipiente que não contém comida no interior

O volume 5 representa o anel superior do recipiente que não contém sólido (comida) no interior.

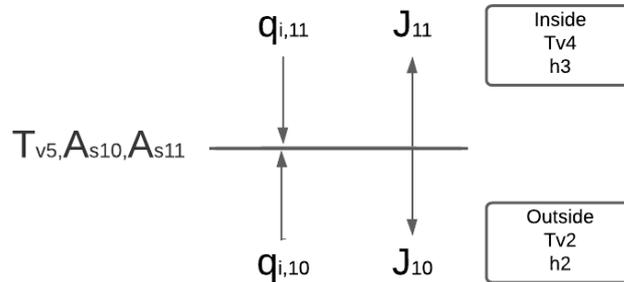


Figura 4.17: Esquema das trocas de calor no volume 5

### Trocas de calor por radiação

Começamos por definir o fluxo radiante incidente na superfície exterior do anel, que é a superfície 10.

$$q_{i,10} = J_2 F_{10-2} + J_3 F_{10-3} + J_4 F_{10-4} + J_5 F_{10-5} + J_6 F_{10-6} + J_{12} F_{10-12} \quad (4.37)$$

Por sua vez, o fluxo radiante incidente na superfície 11 é dado por

$$q_{i,11} = J_8 F_{11-8} + J_{13} F_{11-13} + J_{11} F_{11-11} \quad (4.38)$$

As radiosidades são conhecidas por resolução do sistema de equações para as radiosidades.

### Trocas de calor por convecção

As trocas de calor por convecção ocorrem nas duas superfícies 10 e 11. Na superfície exterior, a convecção acontece com o ar do interior da caixa, e na superfície interior a convecção acontece com o ar do interior do recipiente.

A forma discretizada do balanço de energia do volume 5 vem:

$$T_{v5}^{t+\Delta t} = T_{v5}^t + \frac{\Delta t}{m_{v5}c_{p,aluminio}} \left[ \overbrace{A_{s11}(q_{i,11} - J_{11}) + A_{s10}(q_{i,10} - J_{10})}^{Radiação} + \overbrace{A_{s10}h_2(T_{v2} - T_{v5}) + A_{s11}h_3(T_{v4} - T_{v5})}^{Convecção} \right] \quad (4.39)$$

sabendo que,

$$T_{s11}^{t+\Delta t} = T_{s10}^{t+\Delta t} = T_{v5}^{t+\Delta t} \quad (4.40)$$

### Volume 6 + 7 - Conjunto da parte inferior do recipiente e do sólido

O volume 6 + 7 representa o conjunto da parte inferior do recipiente e do sólido representativo da comida. Este é o volume mais importante desta análise.

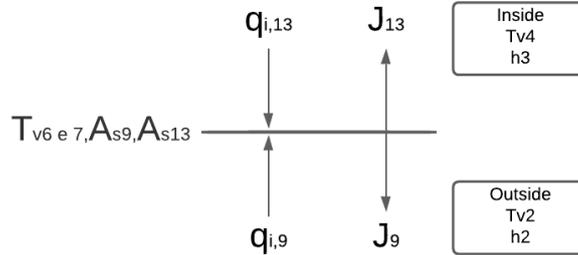


Figura 4.18: Esquema das trocas de calor do Volume 6 + 7

### Trocas de calor por radiação

O fluxo radiante incidente na superfície 9 vem

$$q_{i,9} = J_2F_{9-2} + J_3F_{9-3} + J_4F_{9-4} + J_5F_{9-5} + J_6F_{9-6} + J_{12}F_{9-12} \quad (4.41)$$

Na superfície do sólido (comida), superfície 13, o fluxo radiante é

$$q_{i,13} = J_8F_{13-8} + J_{11}F_{13-11} \quad (4.42)$$

As radiosidades são conhecidas por resolução do sistema de equações para as radiosidades.

O apoio elétrico surge, neste volume, como um fluxo radiante extra. É adicionado assim às trocas de calor por radiação como um fluxo positivo.

### Trocas de calor por convecção

As trocas de calor por convecção ocorrem através duas superfícies 9 e 13. Na superfície exterior, a convecção acontece com o ar do interior da caixa e na superfície interior a convecção acontece com o ar do interior do recipiente.

A forma discretizada do balanço de energia do volume 6+7 vem:

$$T_{v6}^{t+\Delta t} = T_{v6}^t + \frac{\Delta t}{m_{v6}c_{v6} + m_{v7}c_{v7}} \left[ \underbrace{A_{s13}(q_{i13} - J_{13}) + A_{s9}(q_{i9} - J_9)}_{\text{Radiação}} + \underbrace{h_2 A_9 (T_{v2} - T_{v6}) + h_3 A_{13} (T_{v4} - T_{v6})}_{\text{Convecção}} + \underbrace{Q_{eletric}}_{\text{Apoio Eletrico}} \right] \quad (4.43)$$

sabendo que,

$$T_{s13}^{t+\Delta t} = T_{s9}^{t+\Delta t} = T_{v6}^{t+\Delta t} = T_{v7}^{t+\Delta t} \quad (4.44)$$

### Volume 8 - Parede esquerda da caixa

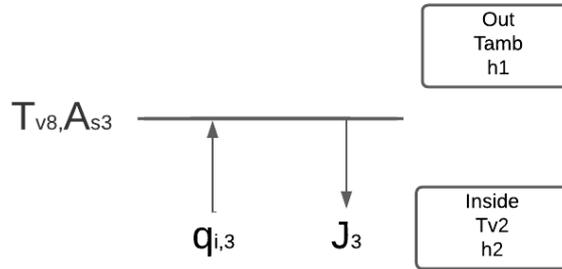


Figura 4.19: Esquema das trocas de calor no volume 8

### Trocas de calor por radiação

O fluxo radiante incidente na superfície 3 é

$$q_{i,3} = J_2 F_{3-2} + J_4 F_{3-4} + J_5 F_{3-5} + J_6 F_{3-6} + J_7 F_{3-7} + J_9 F_{3-9} + J_{10} F_{3-10} + J_{12} F_{3-12} \quad (4.45)$$

As radiosidades são conhecidas por resolução do sistema de equações para as radiosidades.

### Trocas de calor por convecção

As trocas de calor por convecção do volume 8 ocorrem com o ambiente, com intervenção do coeficiente  $h_1$ , e com o ar do interior da caixa, com intervenção do coeficiente  $h_2$ .

A forma discretizada do balanço de energia do volume 8 vem:

$$T_{v8}^{t+\Delta t} = T_{v8}^t + \frac{\Delta t A_{s3}}{m_{v8} c_{v8}} \left[ \overbrace{(q_{i\_3} - J_3)}^{\text{Radiação}} + \overbrace{h_1 (T_{amb} - T_{v8}) + h_2 (T_{v2} - T_{v8})}^{\text{Convecção}} \right] \quad (4.46)$$

sabendo que,

$$T_{v8}^{t+\Delta t} = T_{s3}^{t+\Delta t} \quad (4.47)$$

### Volume 9 - Parede direita da caixa

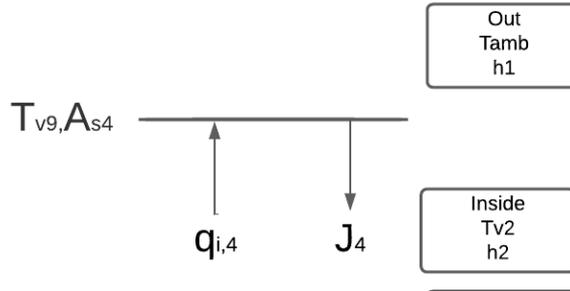


Figura 4.20: Esquema das trocas de calor no volume 9

### Trocas de calor por radiação

O fluxo radiante incidente na superfície 4 é

$$q_{i,4} = J_2 F_{4-2} + J_3 F_{4-3} + J_5 F_{4-5} + J_6 F_{4-6} + J_7 F_{4-7} + J_9 F_{4-9} + J_{10} F_{4-10} + J_{12} F_{4-12} \quad (4.48)$$

As radiosidades são conhecidas por resolução do sistema de equações para as radiosidades.

### Trocas de calor por convecção

As trocas de calor por convecção do volume 9 ocorrem com o ambiente, com intervenção do coeficiente  $h_1$ , e com o ar do interior da caixa, com intervenção do coeficiente  $h_2$ .

A forma discretizada do balanço de energia do volume 9 vem:

$$T_{v9}^{t+\Delta t} = T_{v9}^t + \frac{\Delta t A_{s4}}{m_{v9} c_{v9}} \left[ \overbrace{q_{i\_4} - J_4}^{\text{Radiação}} + \overbrace{h_1 (T_{amb} - T_{v9}) + h_2 (T_{v2} - T_{v9})}^{\text{Convecção}} \right] \quad (4.49)$$

sabendo que,

$$T_{v9}^{t+\Delta t} = T_{s4}^{t+\Delta t} \quad (4.50)$$

### Volume 10 - Parede da frente da caixa

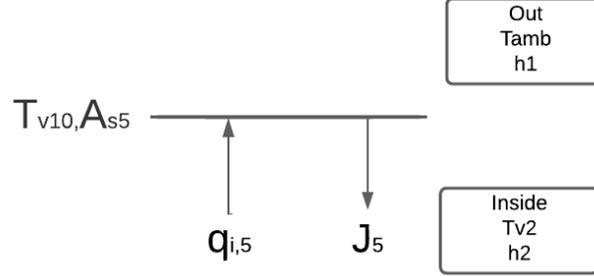


Figura 4.21: Esquema das trocas de calor no volume 10

### Trocas de calor por radiação

O fluxo radiante incidente na superfície 5 é

$$q_{i,5} = J_2 F_{5-2} + J_3 F_{5-3} + J_4 F_{5-4} + J_6 F_{5-6} + J_7 F_{5-7} + J_9 F_{5-9} + J_{10} F_{5-10} + J_{12} F_{5-12} \quad (4.51)$$

As radiosidades são conhecidas por resolução do sistema de equações para as radiosidades.

### Trocas de calor por convecção

As trocas de calor por convecção do volume 10 ocorrem com o ambiente, com intervenção do coeficiente  $h_1$ , e com o ar do interior da caixa, com intervenção do coeficiente  $h_2$ .

A forma discretizada do balanço de energia do volume 10 vem:

$$T_{v10}^{t+\Delta t} = T_{v10}^t + \frac{\Delta t A_{s5}}{m_{v10} c_{v10}} \left[ \overbrace{q_{i,5} - J_5}^{\text{Radiação}} + \overbrace{h_1 (T_{amb} - T_{v10}) + h_2 (T_{v2} - T_{v10})}^{\text{Convecção}} \right] \quad (4.52)$$

sabendo que,

$$T_{v10}^{t+\Delta t} = T_{s5}^{t+\Delta t} \quad (4.53)$$

### Volume 11 - Parede de trás da caixa

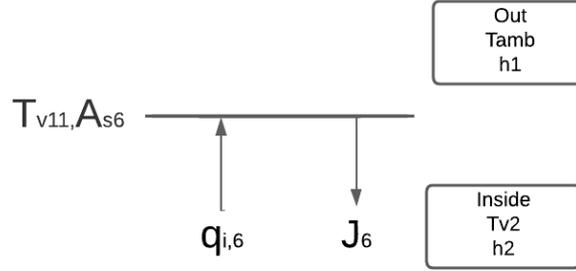


Figura 4.22: Esquema das trocas de calor no volume 11

### Trocas de calor por radiação

O fluxo radiante incidente na superfície 6 é

$$q_{i,6} = J_2 F_{6-2} + J_3 F_{6-3} + J_4 F_{6-4} + J_5 F_{6-5} + J_7 F_{6-7} + J_9 F_{6-9} + J_{10} F_{6-10} + J_{12} F_{6-12} \quad (4.54)$$

As radiosidades são conhecidas por resolução do sistema de equações para as radiosidades.

### Trocas de calor por convecção

As trocas de calor por convecção do volume 11 ocorrem com o ambiente, com intervenção do coeficiente  $h_1$ , e com o ar do interior da caixa, com intervenção do coeficiente  $h_2$ .

A forma discretizada do balanço de energia do volume 11 vem:

$$T_{v11}^{t+\Delta t} = T_{v11}^t + \frac{\Delta t A_{s6}}{m_{v11} c_{v11}} \left[ \overbrace{q_{i,6} - J_6}^{\text{Radiação}} + \overbrace{h_1 (T_{amb} - T_{v11}) + h_2 (T_{v2} - T_{v11})}^{\text{Convecção}} \right] \quad (4.55)$$

sabendo que,

$$T_{v11}^{t+\Delta t} = T_{s6}^{t+\Delta t} \quad (4.56)$$

## Volume 12 - Base da caixa

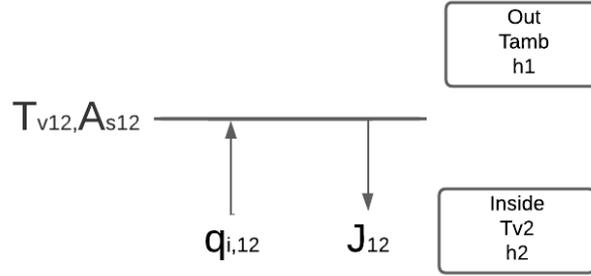


Figura 4.23: Esquema das trocas de calor no volume 12

### Trocas de calor por radiação

O fluxo radiante incidente na superfície 6 é

$$q_{i,12} = J_2 F_{12-2} + J_3 F_{12-3} + J_4 F_{12-4} + J_5 F_{12-5} + J_6 F_{12-6} + J_9 F_{12-9} + J_{10} F_{12-10} \quad (4.57)$$

As radiosidades são conhecidas por resolução do sistema de equações para as radiosidades.

### Trocas de calor por convecção

As trocas de calor por convecção na base da caixa ocorrem com o ambiente através do coeficiente  $h_1$  com o ar do interior da caixa através do coeficiente  $h_2$ . É importante mencionar que a convecção com o ar do interior da caixa conta com a área da base da caixa sem a área da base do recipiente, enquanto que a convecção com o ar exterior se dá através de toda a área da base da caixa.

A forma discretizada do balanço de energia do volume 12 vem:

$$T_{v12}^{t+\Delta t} = T_{v12}^t + \frac{\Delta t}{m_{v12} c_{v12}} \left( A_{s12,in} \left[ \overbrace{q_{i,12} - J_{12}}^{\text{Radiação}} + \overbrace{h_2 (T_{v2} - T_{v12})}^{\text{Convecção}} \right] + A_{s12,out} \left[ \overbrace{h_1 (T_{amb} - T_{v12})}^{\text{Convecção}} \right] \right) \quad (4.58)$$

sabendo que,

$$T_{v12}^{t+\Delta t} = T_{s12}^{t+\Delta t} \quad (4.59)$$

[18; 19]

## Parte III

# Resultados e discussão



## Capítulo 5

# Resultados e discussão

### 5.1 Implementação do modelo

A implementação do modelo foi realizada em software Python e o código de programação encontra-se em anexo. A estratégia utilizada passou pelos seguintes passos para  $\Delta T$  inicial e subsequentes:

1. Definição de constantes dos materiais e sua geometria;
2. Definição dos fatores de forma;
3. Criação de uma matriz A para o cálculo das radiosidades, através da equação  $Ax=B$ ;
4. Definição de funções:  $G_s$ ,  $w$ ,  $\Theta$ ;
5. Definição de temperatura inicial e ambiente de todas as temperaturas relevantes para o estudo;
6. Definição de coeficientes de transferência de calor por convecção, coeficientes globais de transferência de calor;
7. Num ciclo for, a realizar de 1 em 1 segundo:
  - (a) Criação da matriz B para o cálculo das radiosidades, através da equação  $Ax=B$ ;
  - (b) Cálculo das novas temperaturas em cada um dos volumes;
8. Registo dos resultados da simulação.

No final destas etapas volta-se a simular, de forma sistemática, voltando ao ponto 3. Desta forma, consegue-se obter o resultado para  $t = t + \Delta T$ .

## 5.2 Resultados

Os resultados da implementação estão apresentados nas figuras seguintes, através dos quais se pode analisar a evolução da temperatura de cada volume ao longo do tempo (temperatura em [°C] e o tempo em [h]).

Nestas figuras, tem-se as curvas para todos os volumes e, a azul escuro, a curva da temperatura do recipiente que contém a comida a cozinhar.

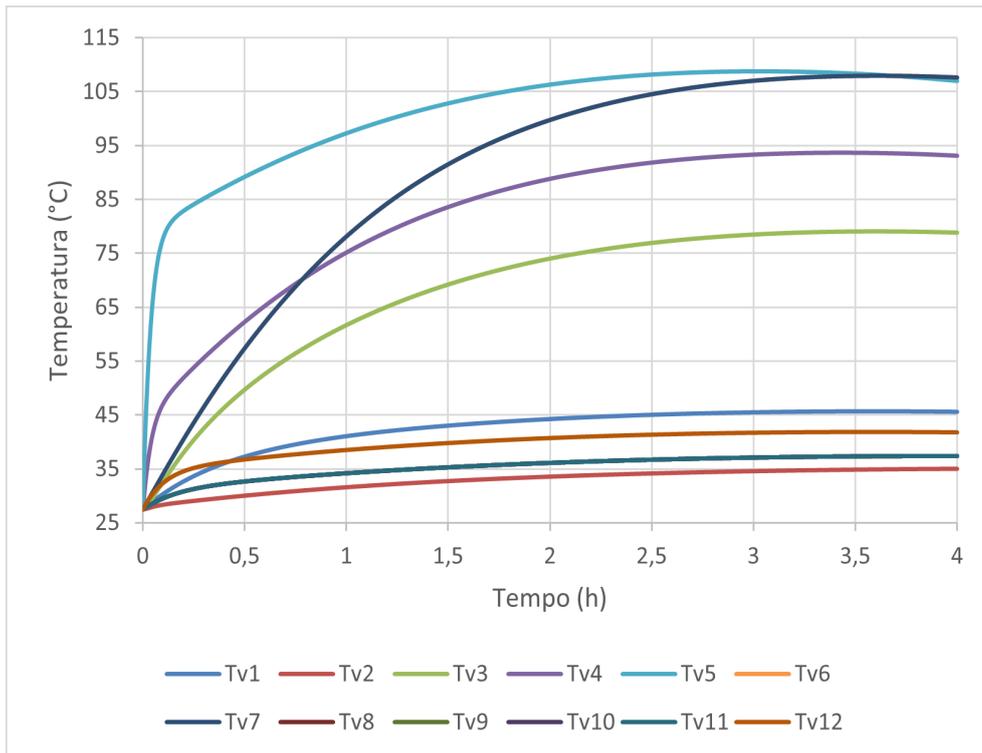


Figura 5.1: Resultado da Implementação

Conseguimos compreender que, através deste modelo, a temperatura da comida atinge o máximo de 105 °C em 4 horas, começando com uma temperatura inicial de 25 °C. Esta simulação realizou-se sem apoio elétrico, apenas contando com a energia solar de entrada.

Para se estudar a sensibilidade paramétrica do funcionamento deste sistema interessa alterar alguns dos parâmetros para compreender o seu impacto no resultado final. Entre eles, temos a emissividade e refletividade das superfícies, a transmissividade dos vidros, densidade do sólido que representa a comida, as características do exterior como a temperatura ambiente e o coeficiente de transferência de calor por convecção exterior, e ainda alguns parâmetros geométricos como a espessura das paredes.

Nas próximas secções avaliar-se-á o impacto de cada um destes parâmetros no desempenho do sistema.

### 5.2.1 Propriedades das superfícies e dos vidros

#### Emissividade

Sabe-se que a emissividade é uma propriedade importante, na medida em que corresponde à capacidade de uma superfície emitir, e absorver radiação térmica. Aqui falar-se-á da emissividade do recipiente da comida, e emissividade da própria comida.

- Emissividade do alumínio do recipiente

A emissividade do alumínio do recipiente que contém a comida é, naturalmente, elevada. Experimentou-se assim este parâmetro de 0,8 a 0,96.

A Figura 5.2 representa o impacto da emissividade na evolução da temperatura da comida em que se verifica que para valores elevados da emissividade a variação do seu valor induz apenas ligeiras variações na temperatura da comida.

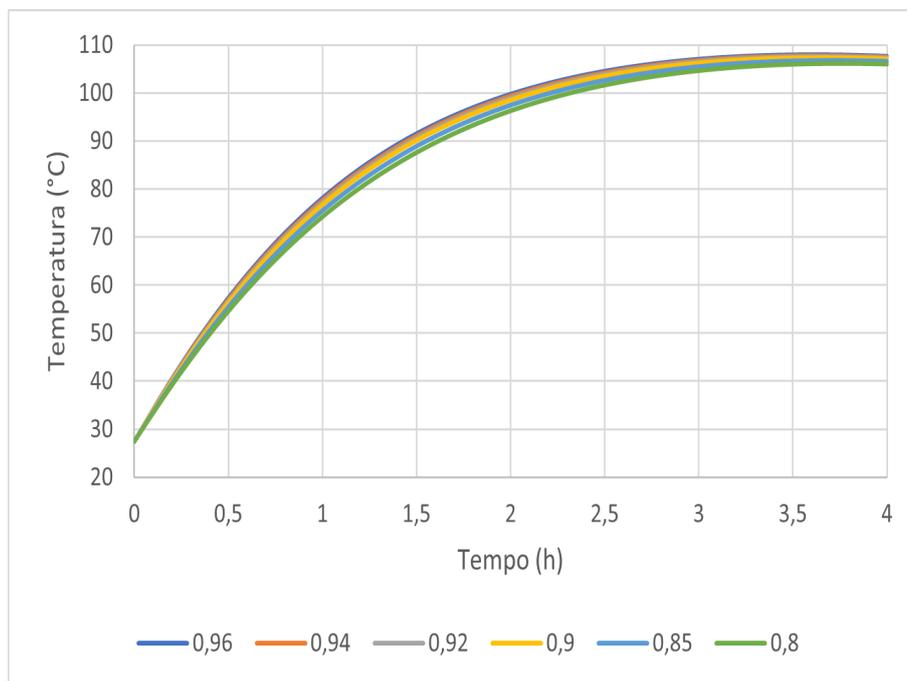


Figura 5.2: Influência da emissividade do recipiente na evolução da temperatura da comida

A Tabela 5.1 resume os valores da temperatura final da comida no tempo estimado de estudo, 4 horas.

Tabela 5.1: Temperatura final da comida para diferentes emissividades do recipiente

Emissividade	Temperatura em 4 horas [°C]
0,96	107,63
0,94	107,46
0,92	107,28
0,90	107,09
0,85	106,59
0,80	106,02

- Emissividade da Comida

De forma análoga, experimentou-se a mesma variação da emissividade da comida. A Figura 5.3 representa o comportamento da temperatura em análise para os valores de emissividade da comida entre 0,8 e 0,95, sendo notória a pouca relevância do valor deste parâmetro, desde que seja elevado.

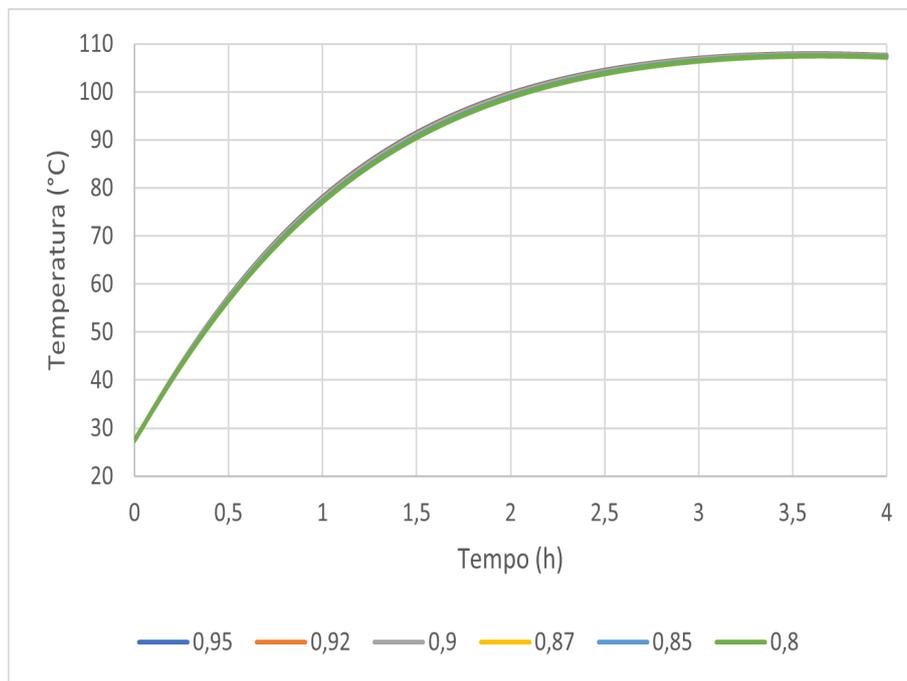


Figura 5.3: Influência da emissividade da comida na evolução da temperatura da comida

A Tabela 5.2 resume os valores da temperatura final da comida para diferentes valores da emissividade da comida.

Tabela 5.2: Temperatura final da comida para diferentes emissividades da comida

Emissividade	Temperatura em 4 horas [°C]
0,95	107,62
0,92	107,54
0,90	107,48
0,87	107,39
0,85	107,33
0,80	107,18

### Refletividade do alumínio das paredes e da base

Outro parâmetro é a refletividade do alumínio que cobre o interior das paredes e da base da caixa, que se experimentou variar de 0,8 a 0,96, apresentando este valor um efeito considerável sobre a temperatura da comida.

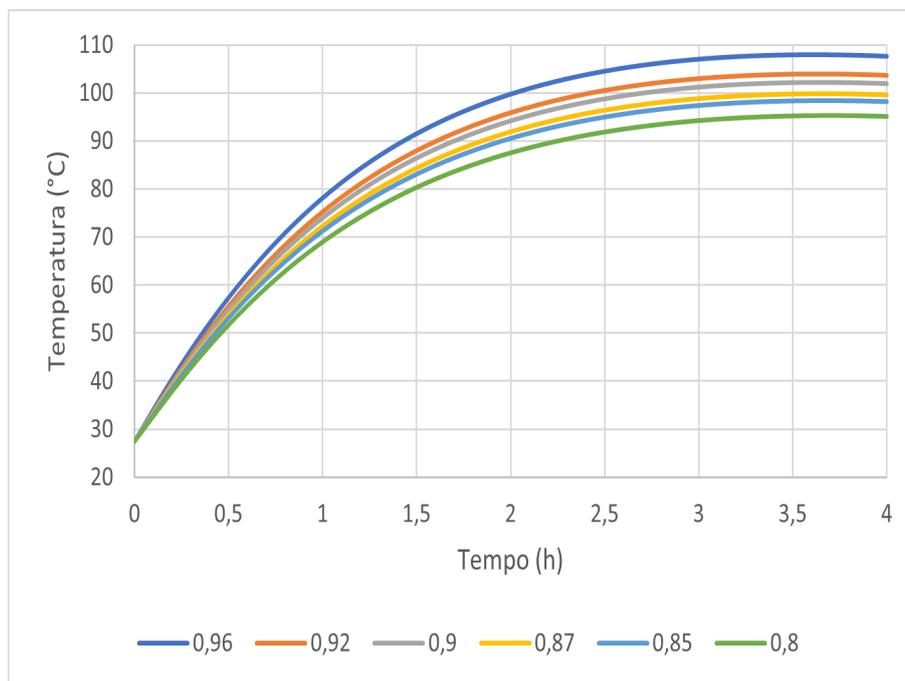


Figura 5.4: Influência da refletividade do alumínio protetor das paredes e base da caixa na evolução da temperatura da comida

A Tabela 5.3 resume os valores da temperatura final da comida para diferentes valores da refletividade do alumínio que cobre o interior das paredes e da base da caixa.

Tabela 5.3: Temperatura final da comida para diferentes refletividades do alumínio que cobre o interior das paredes e da base da caixa

Refletividade	Temperatura em 4 horas [°C]
0,96	107,63
0,92	103,67
0,90	101,94
0,87	99,60
0,85	98,19
0,80	95,18

### Transmissividade do vidro

O vidro tem um papel fundamental neste modelo: transmitir energia solar para dentro da caixa de forma a que esta capte o máximo de energia e consiga a reter. Experimentou-se variar este parâmetro de 0,8 a 0,95, sendo moderadamente notória a influência deste parâmetro sobre a evolução da temperatura da comida.

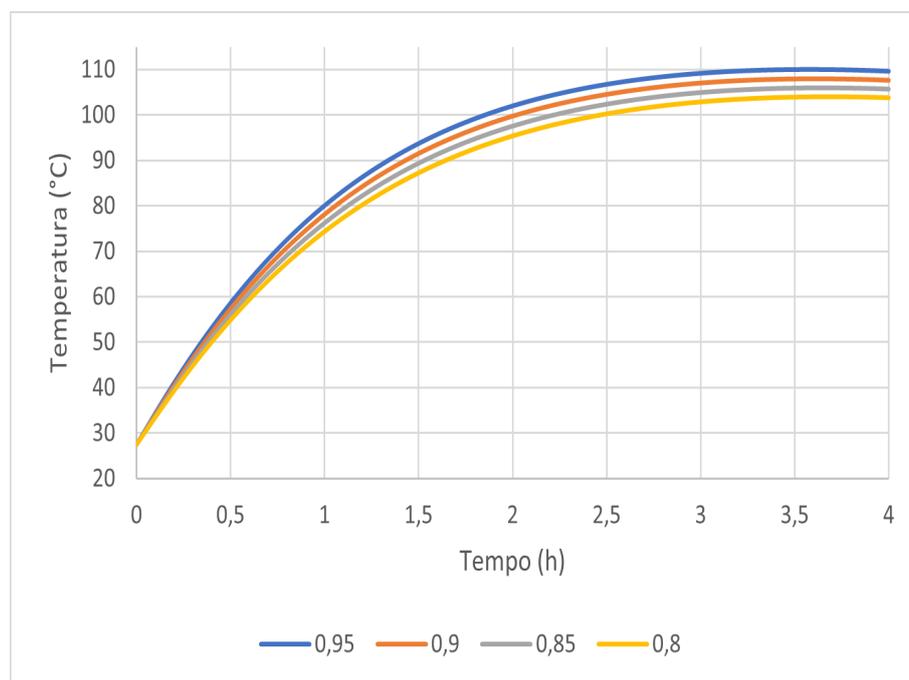


Figura 5.5: Influência da transmissividade do vidro na evolução da temperatura da comida

A Tabela 5.4 resume os valores da temperatura final da comida para diferentes valores da transmissividade do vidro.

Tabela 5.4: Temperatura final da comida para diferentes transmissividades do vidro

Transmissividade	Temperatura em 4 horas [°C]
0,95	109,62
0,90	107,63
0,85	105,69
0,80	103,79

### Massa volúmica do sólido (comida)

Um outro parâmetro estudado foi a massa volúmica do sólido que representa a comida, que se experimentou entre 800 a 1000 kg/m<sup>3</sup>, sendo notória a sua influência na evolução da temperatura da comida. A Figura 5.6 representa esta influência.

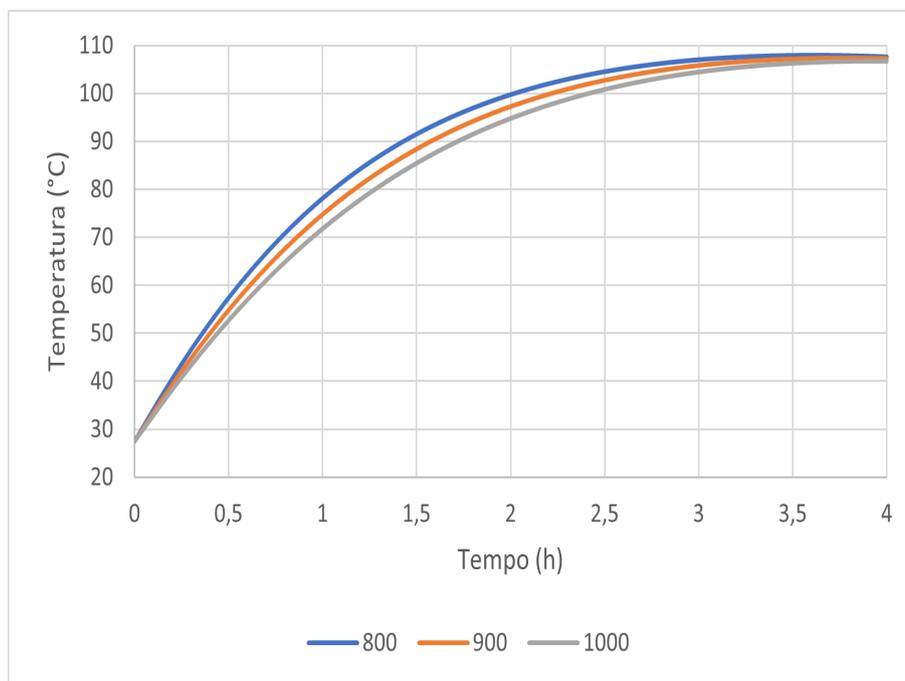


Figura 5.6: Influência da massa volúmica do sólido na evolução da temperatura do sólido que representa a comida

A Tabela 5.5 resume os valores da temperatura final da comida para diferentes valores de massa volúmica do sólido.

Tabela 5.5: Temperatura final da comida para diferentes massas volúmicas do sólido

Densidade [Kg/m <sup>3</sup> ]	Temperatura em 4 horas [°C]
1000	106,7
900	107,0
800	107,6

### 5.2.2 Geometria do modelo

A geometria escolhida para o modelo teve como base a bibliografia estudada. No entanto, sabemos que a sua alteração conduzirá a resultados diferentes. A alteração da geometria deste modelo não é toda possível de estudar visto que uma alteração no tamanho da caixa faria mudar parâmetros já calculados previamente, como os fatores de forma; no entanto, a espessura da estrutura (paredes e base) pode ser alvo de estudo.

#### Espessura das paredes e da base

A Figura 5.7 representa o comportamento da temperatura em análise para os valores da espessura das paredes e da base de 5 a 15 mm, sendo a influência deste parâmetro sobre a temperatura da comida apenas residual.

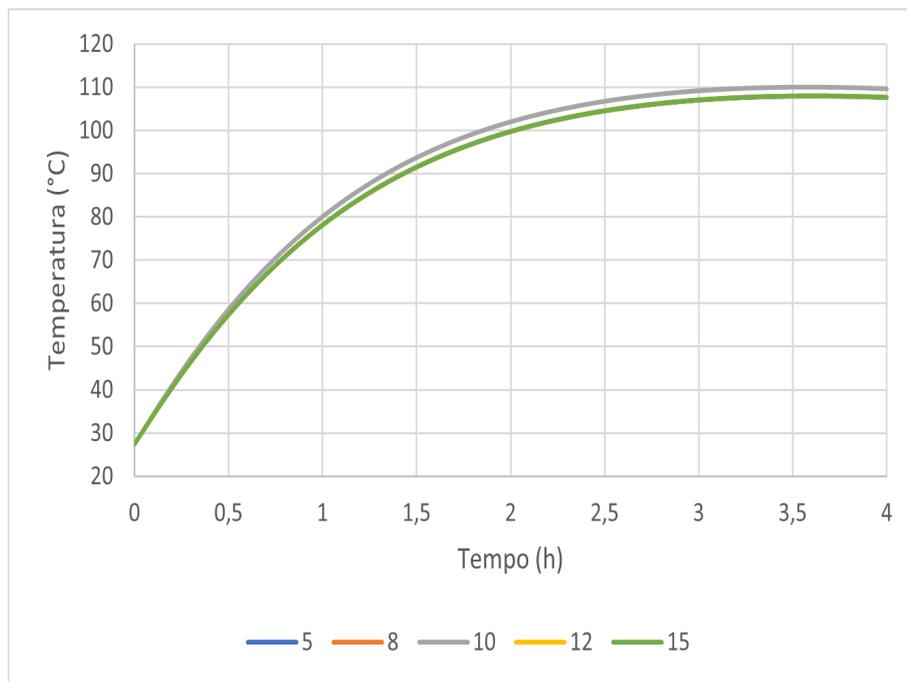


Figura 5.7: Influência da espessura das paredes e da base na evolução da temperatura da comida

A Tabela 5.6 resume os valores da temperatura final da comida para diferentes valores da espessura da madeira.

Tabela 5.6: Temperatura final da comida para diferentes espessuras das paredes e da base

Espessura [mm]	Temperatura em 4 horas [°C]
15	108,5
12	108,1
10	107,5
8	107,0
5	106,7

### 5.2.3 Características do exterior

Sabemos que a fonte de energia principal deste sistema de cozinha é a energia solar; no entanto, não é só esta componente exterior que afeta a sua performance.

#### Temperatura ambiente

Começamos por estudar de que forma é que a temperatura ambiente altera o propósito da cozinha solar. A temperatura ambiente foi baseada numa correlação base de acordo com a bibliografia e a forma escolhida para avaliar a influência da sua variação foi somando um valor fixo de temperatura a esta correlação. A Figura 5.8 representa o comportamento da temperatura em análise para os valores da variação da temperatura ambiente, sendo a influência deste parâmetro sobre a temperatura da comida muito pouco notória.

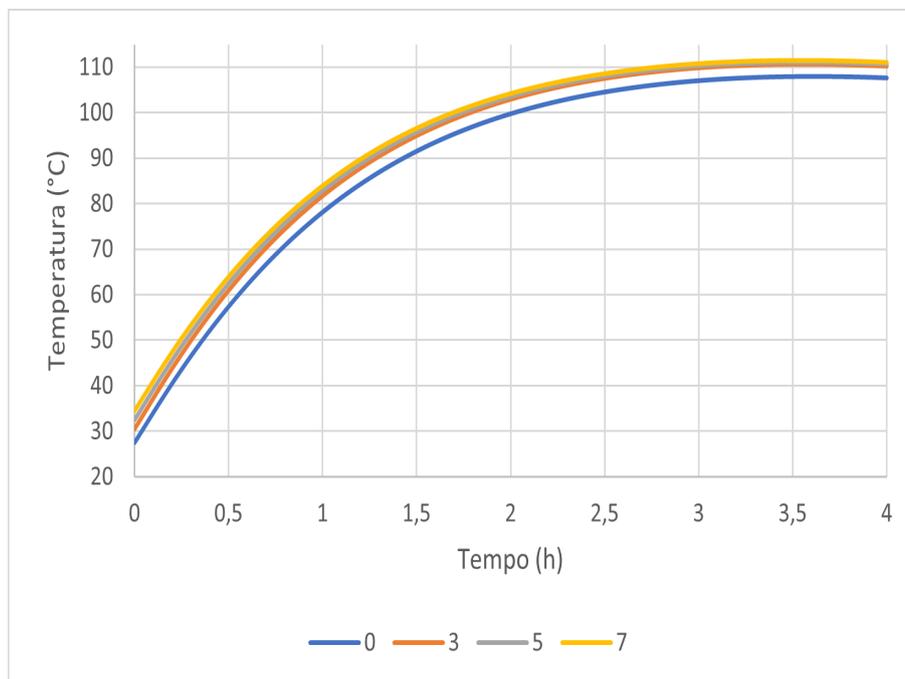


Figura 5.8: Influência da temperatura ambiente na evolução da temperatura da comida

A Tabela 5.7 resume os valores da temperatura final da comida para diferentes valores da temperatura ambiente.

Tabela 5.7: Temperatura final da comida para diferente temperatura ambiente

Acréscimo temperatura ambiente [°C]	Temperatura em 4 horas [°C]
0	107,6
3	108,4
5	109,3
7	109,9

### Coefficiente de transferência de calor por convecção exterior

Outro valor externo à caixa é o coeficiente de transferência de calor por convecção exterior que, neste modelo, se intitulou de  $h_1$ . Para avaliar a influência deste parâmetro experimentou-se variar o seu valor de  $2 \text{ W/m}^2\text{a}$   $8 \text{ W/m}^2\text{C}$ , sendo de notar na Figura 5.9 que a variação na evolução da temperatura da comida é praticamente nula.

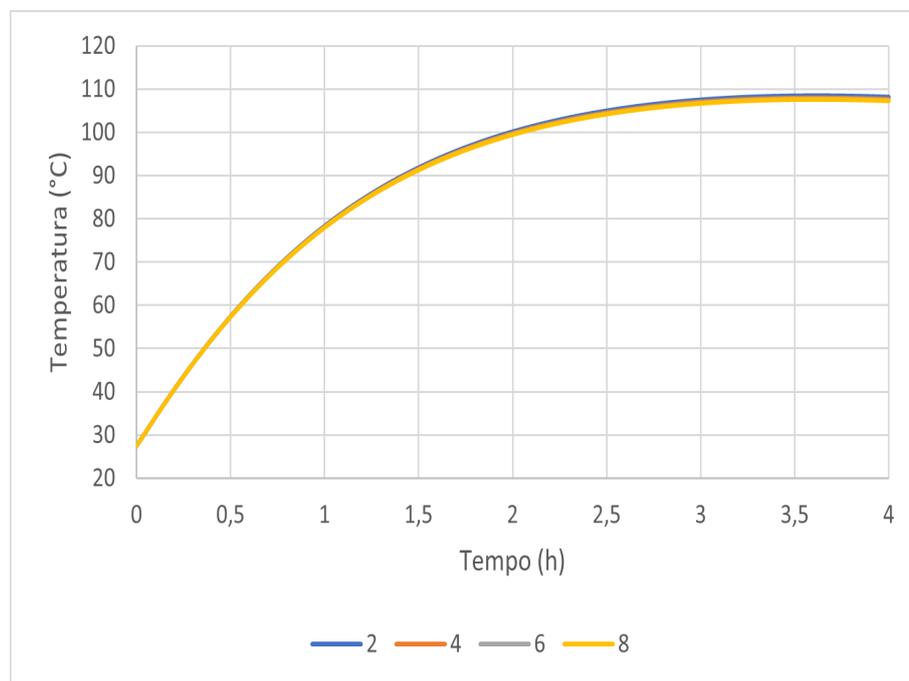


Figura 5.9: Influência do coeficiente de transferência de calor por convecção exterior na evolução da temperatura da comida

A Tabela 5.8 resume os valores da temperatura final da comida para diferentes valores do coeficiente de transferência de calor por convecção exterior.

Tabela 5.8: Temperatura final da comida para diferentes valores do coeficiente de transferência de calor por convecção exterior

$h_1$ [W/m <sup>2</sup> K]	Temperatura em 4 horas [°C]
8	107,3
6	107,53
4	107,75
2	108,1

### 5.2.4 Apoio elétrico

A implementação foi efetuada sem ativar o apoio elétrico. Para avaliar a sua importância experimentou-se variar este parâmetro de 0 a 70 W, mostrando a Figura 5.10 que tem uma influência notória na evolução da temperatura da comida. Os restantes parâmetros foram fixados nos valores iniciais.

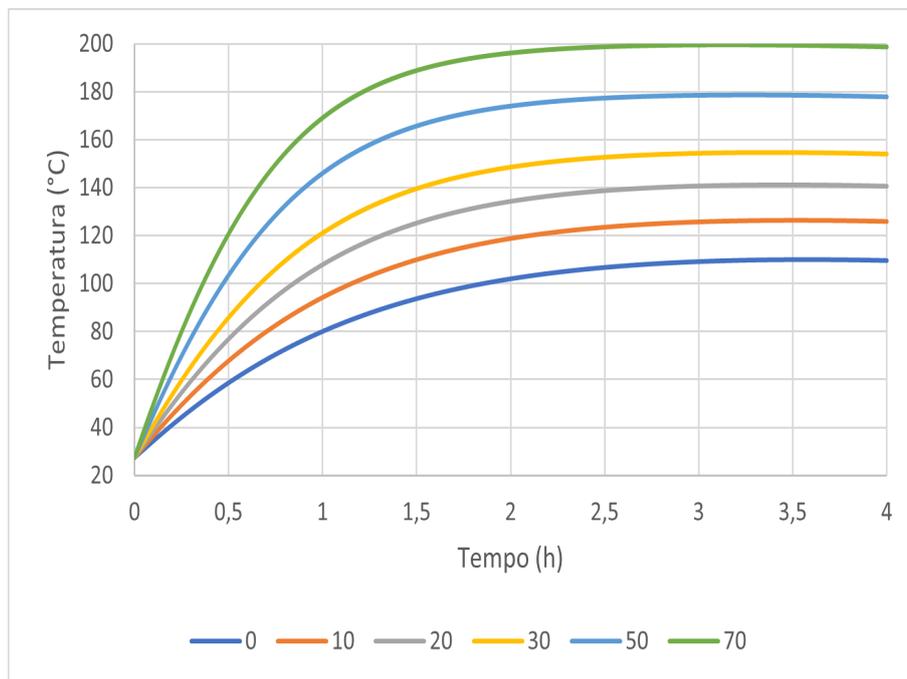


Figura 5.10: Influência do apoio elétrico na evolução da temperatura da comida

A Tabela 5.9 resume os valores da temperatura final da comida para diferentes potências de apoio elétrico.

Tabela 5.9: Temperatura da comida ao fim de diferentes tempos, para diferentes potências de apoio elétrico

$Q_{ext}$ [W]	Tempo [hr]	Temperatura [°C]
10	1	94,23
	1,5	109,98
	2	118,82
	3	125,73
	4	125,91
20	1	107,91
	1,5	125,25
	2	134,29
	3	140,70
	4	140,61
30	1	121,10
	1,5	139,59
	2	148,56
	3	154,35
	4	154,03
50	1	146,04
	1,5	165,72
	2	174,02
	3	178,51
	4	177,87
70	1	169,12
	1,5	188,87
	2	196,14
	3	199,49
	4	198,68

### 5.3 Análise de resultados

Avaliando o último subcapítulo onde se estudou a influência dos diversos parâmetros no desempenho do sistema, podemos então melhor compreender o seu impacto no objetivo final desta dissertação. Esta análise pode ser utilizada para perceber que parâmetro e componente interessa mais e onde é que interessa investir mais para que a performance do sistema seja a desejada. Importante é ainda mencionar que, qualquer temperatura superior a 100 °é analisada a título indicativo sem considerar qualquer transformação latente do sólido que representa a comida.

#### 5.3.1 Emissividade do alumínio do recipiente e da comida

A emissividade do alumínio do recipiente da comida é um parâmetro importante. Se se alterar a emissividade em 20%, faz variar a temperatura da comida em 1,6 °C. Apesar de ser um parâmetro importante, desde que assuma valores elevados, a sua influência é pouco considerável.

Quanto à emissividade da comida, analisando a figura 5.3, variando 20%, o resultado da temperatura final varia apenas 0,44 °C. Assim, o efeito da emissividade da comida na evolução da sua temperatura é apenas residual.

#### 5.3.2 Refletividade do alumínio das paredes e da base

Quanto à refletividade do interior da caixa, já se consegue compreender o seu impacto. Uma alteração de 20% neste parâmetro produz uma variação final de quase 12,45 °C na temperatura da comida. É obviamente um parâmetro relevante, como era expectável.

#### 5.3.3 Transmissividade do vidro

A transmissividade do vidro também foi analisada e, com a mesma variação percentual deste parâmetro, atingiu-se uma variação de temperatura final da comida de 5,83 °C, que é já significativo.

#### 5.3.4 Massa volúmica do sólido (comida)

A massa volúmica do sólido que representa a comida foi analisada e consegue-se compreender que este parâmetro tem influência para tempos de estudo mais pequenos. Por exemplo, para 1 hora e meia de estudo, a variação de 20% deste parâmetro faz variar a temperatura final da comida de 6 °C mas, no decorrer da evolução temporal, esta influência vai decrescendo cada vez mais.

#### 5.3.5 Espessura das paredes e base da caixa

O impacto da espessura das paredes e da base da caixa na temperatura da comida é praticamente irrelevante, pelo que se podem considerar paredes e base mais finas sem comprometer o desempenho da cozinha solar.

### 5.3.6 Características do exterior

Quanto à temperatura ambiente e ao coeficiente de transferência de calor por convecção exterior, verifica-se que o coeficiente de transferência de calor por convecção tem um efeito muito reduzido na evolução da temperatura da comida e, que, a influência da temperatura ambiente se vai esbatendo à medida que o tempo vai passando.

Um acréscimo de  $7^{\circ}\text{C}$  na temperatura ambiente cria um acréscimo de  $0,8^{\circ}\text{C}$  na temperatura da comida ao fim de 4 horas.

### 5.3.7 Apoio elétrico

O apoio elétrico serve para satisfazer a falta de radiação solar ou, como muitas vezes acontece, atenuar as perturbações na sua captação provocadas, por exemplo, pela passagem de nuvens.

O objetivo de estudar a influência do apoio elétrico era compreender que potência seria necessária para atingir os valores de temperatura desejados, nos períodos desejados. O primeiro estudo tentou compreender que potência seria necessária para que o sistema atingisse os  $100^{\circ}\text{C}$ , temperatura final em 4 horas, em metade do tempo, 1 hora e meia, tendo-se chegado ao valor de 10 W. Com esta potência extra, o sistema, no mesmo tempo de 4 horas de estudo, é capaz de chegar perto dos  $125^{\circ}\text{C}$ , temperatura capaz de ferver água.

Aumentando este valor de potência, compreendeu-se que impacto teria no tempo de cozedura. Se esta potência aumentasse para 50 W, conseguiríamos atingir perto de  $170^{\circ}\text{C}$  em 4 horas de cozedura.

Para chegar aos  $200^{\circ}\text{C}$  de cozedura (mais alto que o requerido pelo guisar ou fritar) em 4 horas, necessitaríamos de 70 W de potência, fazendo com que este se tornasse muito competitivo em relação a um forno convencional apenas com uma potência incrivelmente baixa de 70 W. Conclui-se que esta potência pode ser necessária para dar um impulso inicial ao funcionamento do sistema e satisfazer as falhas ou perturbações da radiação solar.

## Capítulo 6

# Conclusões

Construiu-se um modelo para o estudo da evolução da temperatura no interior de uma cozinha solar do tipo caixa. O modelo utilizado teve como base a bibliografia enunciada e as transferências energéticas (radiativas, condutivas e convectivas).

Como primeira etapa, estudaram-se todos os tipos de cozinhas solares e a sua importância e utilização no dia-a-dia. Foi dado maior destaque às cozinhas solares do tipo caixa, compreendendo-se as suas características, e que estudos e evoluções a que já tinham sido sujeitas.

Em seguida, reviram-se os pressupostos teóricos necessários para a elaboração convenientes de um modelo baseado nas trocas de calor, por condução, convecção e radiação. Importante mencionar que o estudo das trocas de calor por radiação foi o mais desafiante, na medida em que se estudaram trocas de calor por radiação entre superfícies semitransparentes (tema geralmente ausente no estudo das trocas de calor por radiação).

Já na modelação, foram obtidos fatores de forma e estabelecidas as equações das radiosidades.

Por fim, estabelecendo os balanços energéticos para cada um dos volumes envolvidos, chegou-se às equações capazes de prever a evolução temporal da temperatura de cada um desses volumes e, de entre eles, muito especialmente da temperatura da comida.

O principal objetivo desta dissertação foi desde o início criar um modelo fiável capaz de representar uma cozinha solar do tipo caixa e, por alteração de parâmetros, prever o impacto de cada um deles no desempenho da cozinha solar.

Concluiu-se que a refletividade do alumínio do interior da estrutura, a potência de apoio elétrico e a transmissividade do vidro das tampas da caixa e recipiente são os mais relevantes, e onde a atenção se deve focar.

A evolução das temperaturas, sem o apoio elétrico, ficaram aquém do esperado. No entanto, o estudo, por si só, considera-se um avanço considerável.

O modelo da cozinha solar adotado mostrou-se viável; no entanto, sem o apoio elétrico, torna-se insuficiente para o objetivo principal. Conseguiu-se compreender que, com um apoio elétrico de potência muito baixa torna-se mais competitivo em relação a um fogão convencional. Fica também provado que, com materiais de baixo custo e de fácil construção, é possível atingir temperaturas de cozedura interessantes.

Apesar de os resultados não terem sido os expectáveis, considera-se que este documento tem uma boa base para ajudar na compreensão e estabelecimento do modelo de simulação de cozinhas solares.

## 6.1 Sugestões de trabalhos futuros

Do trabalho realizado resultaram algumas ideias de trabalhos que se deixam aqui como sugestões para trabalhos futuros:

1. Análise experimental da cozinha solar do tipo caixa, para validação do modelo elaborado;
2. Estudo do aumento de refletores e do seu impacto no desempenho da cozinha solar;
3. Estudo da influência das densidades dos restantes materiais;
4. Análise mais detalhada do apoio elétrico no desempenho do sistema (Estar ligado apenas no início? Só no fim? Sempre ligado? Potência variável?);
5. Agilização dos fatores de forma por simulação 3D para melhorar a sua exatidão;

# Bibliografia

- [1] Kundapur, A. (2020). 250 Years Saga of Solar Box Cookers. *International Alternate Energy Trust*, 3138-3142
- [2] International Energy Agency. (2019) *World Energy Outlook*. Consultado em Mar. 2021. Disponível em <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>
- [3] Eurostat. (2019). *Energy consumption and use by households*. Consultado em Mar. 2021. Disponível em <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN-20190620-1>
- [4] International Energy Agency. (2019) *Europe – Countries & Regions*. Consultado em Mar. 2021. Disponível em <https://www.iea.org/regions/europe>
- [5] International Energy Agency. (2020) *Portugal - Countries & Regions*. Consultado em Mar. 2021. Disponível em <https://www.iea.org/countries/portugal>
- [6] Duffie, J. A., & Beckman, W. A., & McGowan, J. (1985) Solar Engineering of Thermal Processes. *American Journal of Physics*. (Vol. 53).
- [7] Rajendran, P., & Smith, H. (2016). Modelling of solar irradiance and daylight duration for solar-powered UAV sizing. *Energy Exploration and Exploitation*, 34(2), 235–243.
- [8] SOLAR COOKERS INTERNACIONAL (2021) *Solar Cooking Wiki*. Consultado em Mar. 2021. Disponível em [https://solarcooking.fandom.com/wiki/Solar\\_Cooking\\_Wiki\\_](https://solarcooking.fandom.com/wiki/Solar_Cooking_Wiki_)
- [9] Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. Solution Manual : *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6th edition). United States of America: John Wiley and Sons.
- [10] Rohsenow, W. M., & Hartnett, J. R. (1999). *Handbook of Heat Transfer*. Choice Reviews Online (Vol. 36).
- [11] *Modest, M. F. Radiative Heat Transfer* (2nd edition). United States of America: Academic Press

- 
- [12] Siegel, R., & Siegel, R. Note. (1973) *Net Radiation Method for Enclosure Systems Involving*. Washinton, D.C.
- [13] Araújo, F. C., & Fialho, R. R. (2015). *Cálculo numérico do fator de forma considerando efeitos de sombra*. Universidade de Brasília, Brasília.
- [14] Talbi, S., Kassmi, K., Lamkaddem, A., & Malek, R. (2018). Design and realization of a box type solar cooker with thermal storage dedicated to the rural regions of the oriental district. *Journal of Materials and Environmental Sciences*. (Vol. 9, 1266-1284)
- [15] Saxena, A., & Agarwal, N. (2018). Performance characteristics of a new hybrid solar cooker with air duct. *Solar Energy*, 159(August 2017), 628–637.
- [16] Yettou, F., Azoui, B., Malek, A., & Gama, A. (2013). Réalisation et expérimentation d ' un cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée muni d ' un réflecteur plan. *Revue des Energies Renouvelables*. (Vol. 16, N°4, 629 – 640)
- [17] Feuermann, D. (2020). Box Cooker Glazing : Sloped or Horizontal ? A Study of the Optical Efficiency CONSOLFOOD 2020 Basis for comparison and assumptions : .
- [18] Guidara, Z., Souissi, M., Morgenstern, A., & Maalej, A. (2017). Thermal performance of a solar box cooker with outer reflectors: Numerical study and experimental investigation. *Solar Energy*, 158, 347–359.
- [19] Sethi, V. P., Pal, D. S., & Sumathy, K. (2014). Performance evaluation and solar radiation capture of optimally inclined box type solar cooker with parallelepiped cooking vessel design. *Energy Conversion and Management*. 81, 231-241
- [20] Grupo de meteorologia e climatologia da Universidade de Aveiro. Aveiro - Radiação Solar - Horário Verão. Consultado em Mar. 2021. Disponível em <http://climetua.fis.ua.pt/weather/solarradiation/aveiro>

## .1 Código Python

---

```
#!/usr/bin/env python
# coding: utf-8

# In[ ]:

from math import *
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

#constantes
sigma = 5.67*(10**(-8))

#Dimens es
X = 0.625
Y = 0.625
Z = 0.250

espessura_vidro = 0.005
espessura_tampa = 0.003
h_recipiente = 0.120
h_solido = 0.100
raio_recipiente_ext = (0.060)
raio_recipiente_int = (0.059)

# Vidro
t_vidro = 0.95
e_vidro = (1-t_vidro)/2
r_vidro = (1-t_vidro)/2
k_vidro = 0.8

densidade_vidro = 2500
cp_vidro = 700

# Vidro tampa
area_vidro = X*Y
volume_vidro = area_vidro*espessura_vidro
m_vidro = volume_vidro*densidade_vidro

# Vidro testo
area_vidro_2 = pi*(raio_recipiente_ext)**2
volume_vidro_2 = area_vidro_2*espessura_tampa
m_vidro_2 = volume_vidro_2*densidade_vidro

# Madeira
densidade_madeira = 200
cp_madeira = 1700
espessura_madeira= 0.01
k_madeira = 0.1

area_madeira = Y*Z
volume_madeira = area_madeira*espessura_madeira
m_madeira = volume_madeira*densidade_madeira

area_base = X*Y - area_vidro_2
```

```

volume_base = area_madeira*espessura_madeira
m_base= volume_base*densidade_madeira

```

```

#Aluminio_protetor

```

```

r_aluminio_p = 0.96
e_aluminio_p = 1- r_aluminio_p

```

```

# Ar

```

```

cp_ar = 1007
densidade_ar = 1.1614
volume_ar_2 = (X*Y*Z-(pi*(raio_recipiente_ext)**2)*(h_recipiente+espessura_tampa))
volume_ar_3 = ((pi*(raio_recipiente_int)**2)*(h_recipiente-h_solido))
m_ar_2 = volume_ar_2*densidade_ar
m_ar_3 = volume_ar_3*densidade_ar

```

```

#Aluminio

```

```

e_aluminio = 0.96
r_aluminio = 1-e_aluminio
densidade_aluminio = 2770
cp_aluminio = 875

```

```

area_aluminio_cima_ext = (2*pi*(raio_recipiente_ext))*(h_recipiente-h_solido)
area_aluminio_baixo_ext = (2*pi*(raio_recipiente_ext))*(h_solido)

```

```

area_aluminio_cima_int = (2*pi*(raio_recipiente_int))*(h_recipiente-h_solido)

```

```

volume_aluminio_cima = pi*((raio_recipiente_ext)**2)*(h_recipiente-h_solido)-
pi*((raio_recipiente_int)**2)*(h_recipiente-h_solido)
volume_aluminio_baixo = pi*((raio_recipiente_ext)**2)*(h_solido)-
pi*((raio_recipiente_int)**2)*(h_solido-0.001)

```

```

m_aluminio_cima = volume_aluminio_cima*densidade_aluminio
m_aluminio_baixo = volume_aluminio_baixo*densidade_aluminio

```

```

#S lido

```

```

e_solido = 0.95
r_solido = 1-e_solido
densidade_solido = 800
cp_solido = (3350/2)

```

```

area_solido = pi*(raio_recipiente_int)**2
volume_solido = area_solido*h_solido
m_solido = volume_solido*densidade_solido

```

```

#Fatores de Forma

```

```

#2 - Vidro de baixo

```

```

F2_3 = 0.114813944
F2_4 = 0.114813944
F2_5 = 0.114813944
F2_6 = 0.114813944
F2_7 = 0.019658335
F2_9 = 0.0015
F2_10 = 0.0005
F2_12 = 0.519085888

```

*#3 - Parede Esquerda*

F3\_2 = 0.287034861  
F3\_4 = 0.020815701  
F3\_5 = 0.132990695  
F3\_6 = 0.132990695  
F3\_7 = 0.000279911  
F3\_9 = 0.11  
F3\_10 = 0.05  
F3\_12 = 0.265888137

*#4 - Parede Direita*

F4\_2 = 0.287034861  
F4\_3 = 0.020815701  
F4\_5 = 0.132990695  
F4\_6 = 0.132990695  
F4\_7 = 0.000279911  
F4\_9 = 0.11  
F4\_10 = 0.05  
F4\_12 = 0.265888137

*#5 - Parede Frente*

F5\_2 = 0.287034861  
F5\_3 = 0.132990695  
F5\_4 = 0.132990695  
F5\_6 = 0.020815701  
F5\_7 = 0.000279911  
F5\_9 = 0.11  
F5\_10 = 0.05  
F5\_12 = 0.265888137

*#6 - Parede Trás*

F6\_2 = 0.287034861  
F6\_3 = 0.132990695  
F6\_4 = 0.132990695  
F6\_5 = 0.020815701  
F6\_7 = 0.000279911  
F6\_9 = 0.11  
F6\_10 = 0.05  
F6\_12 = 0.265888137

*#7 - Tampa Recipiente Cima*

F7\_2 = 0.977725358  
F7\_3 = 0.00556866  
F7\_4 = 0.00556866  
F7\_5 = 0.00556866  
F7\_6 = 0.00556866

*#8 - Tampa Recipiente Baixo*

F8\_11 = 0.338807315  
F8\_13 = 1 - 0.338807315

*#9 - Recipiente Fora Solido*

F9\_2 = 0.01865097  
F9\_3 = 0.145337258  
F9\_4 = 0.145337258  
F9\_5 = 0.145337258

F9\_6 = 0.145337258  
 F9\_12 = 0.4

*#10 – Recipiente Fora Anel*

F10\_2 = 0.03108495  
 F10\_3 = 0.192228763  
 F10\_4 = 0.192228763  
 F10\_5 = 0.192228763  
 F10\_6 = 0.192228763  
 F10\_12 = 0.2

*#11 – Recipiente Dentro Anel*

F11\_8 = 0.395833333  
 F11\_11 = 0.208333333  
 F11\_13 = 0.395833333

*#12 – Base*

F12\_2 = 0.529736879  
 F12\_3 = 0.108537532  
 F12\_4 = 0.108537532  
 F12\_5 = 0.108537532  
 F12\_6 = 0.108537532  
 F12\_9 = 0.032829995  
 F12\_10 = 0.003282999

*#13 – Superfície s lido*

F13\_8 = 0.717439979  
 F13\_11 = 0.282560021

```
m_list = [[1,0,-t_vidro*F2_3,-t_vidro*F2_4,
           -t_vidro*F2_5,-t_vidro*F2_6,
           -t_vidro*F2_7,0,-t_vidro*F2_9,
           -t_vidro*F2_10,0,-t_vidro*F2_12,0],
          [0,1,-r_vidro*F2_3,-r_vidro*F2_4,
           -r_vidro*F2_5,-r_vidro*F2_6,
           -r_vidro*F2_7,0,-r_vidro*F2_9,
           -r_vidro*F2_10,0,-r_vidro*F2_12,0],
          [0,-(1-e_aluminio_p)*F3_2,1,
           -(1-e_aluminio_p)*F3_4,-(1-e_aluminio_p)*F3_5,
           -(1-e_aluminio_p)*F3_6,-(1-e_aluminio_p)*F3_7,0,
           -(1-e_aluminio_p)*F3_9,-(1-e_aluminio_p)*F3_10,
           0,-(1-e_aluminio_p)*F3_12,0],
          [0,-(1-e_aluminio_p)*F4_2,-(1-e_aluminio_p)*F4_3,1,
           -(1-e_aluminio_p)*F4_5,-(1-e_aluminio_p)*F4_6,
           -(1-e_aluminio_p)*F4_7,0,-(1-e_aluminio_p)*F4_9,
           -(1-e_aluminio_p)*F4_10,0,-(1-e_aluminio_p)*F4_12,0],
          [0,-(1-e_aluminio_p)*F5_2,-(1-e_aluminio_p)*F5_3,
           -(1-e_aluminio_p)*F5_4,1,
           -(1-e_aluminio_p)*F5_6,-(1-e_aluminio_p)*F5_7,0,
           -(1-e_aluminio_p)*F5_9,
           -(1-e_aluminio_p)*F5_10,0,-(1-e_aluminio_p)*F5_12,0],
          [0,-(1-e_aluminio_p)*F6_2,-(1-e_aluminio_p)*F6_3,
           -(1-e_aluminio_p)*F6_4,
           -(1-e_aluminio_p)*F6_5,1,-(1-e_aluminio_p)*F6_7,0,
           -(1-e_aluminio_p)*F6_9,
           -(1-e_aluminio_p)*F6_10,0,-(1-e_aluminio_p)*F6_12,0],
          [0,-r_vidro*F7_2,-r_vidro*F7_3,-r_vidro*F7_4,
```

```

-r_vidro*F7_5,-r_vidro*F7_6,1,0,0,0,
-t_vidro*F8_11,0,-t_vidro*F8_13],
[0,-t_vidro*F7_2,-t_vidro*F7_3,-t_vidro*F7_4,
-t_vidro*F7_5,-t_vidro*F7_6,0,1,0,0,
-r_vidro*F8_11,0,-r_vidro*F8_13],
[0,-(1-e_aluminio)*F9_2,-(1-e_aluminio)*F9_3,
-(1-e_aluminio)*F9_4,-(1-e_aluminio)*F9_5,
-(1-e_aluminio)*F9_6,0,0,1,0,0,-(1-e_aluminio)*F9_12,0],
[0,-(1-e_aluminio)*F10_2,-(1-e_aluminio)*F10_3,
-(1-e_aluminio)*F10_4,-(1-e_aluminio)*F10_5,
-(1-e_aluminio)*F10_6,0,0,0,1,0,
-(1-e_aluminio)*F10_12,0],
[0,0,0,0,0,0,0,-(1-e_aluminio)*F11_8,0,0,
1-(1-e_aluminio)*F11_11,0,-(1-e_aluminio)*F11_13],
[0,-(1-e_aluminio_p)*F12_2,-(1-e_aluminio_p)*F12_3,
-(1-e_aluminio_p)*F12_4,
-(1-e_aluminio_p)*F12_5,-(1-e_aluminio_p)*F12_6,0,0,
-(1-e_aluminio_p)*F12_9,
-(1-e_aluminio_p)*F12_10,0,1,0],
[0,0,0,0,0,0,0,-(1-e_solido)*F13_8,0,0,-(1-e_solido)*F13_11,0,1]]

```

```
A = np.array(m_list)
```

```
#fun oes
```

```
def Gs(time_sec):
    return (-0.000001*((time_sec)**2) + 0.0893*(time_sec) - 1204.3)
```

```
def w(time_sec):
    return (0.0042*(time_sec) - 180)
```

```
def T_amb(time_sec):
    return (-9*(10**(-9))*((time_sec)**2) + 0.001*(time_sec) + 276.31)
```

```
tempo_inicial = 10
```

```
tempo_final = 14
```

```
T_init = T_amb(tempo_inicial*60*60)
```

```
T_template = {
    "Ts1": T_init,
    "Ts2": T_init,
    "Ts3": T_init,
    "Ts4": T_init,
    "Ts5": T_init,
    "Ts6": T_init,
    "Ts7": T_init,
    "Ts8": T_init,
    "Ts9": T_init,
    "Ts10": T_init,
    "Ts11": T_init,
    "Ts12": T_init,
    "Ts13": T_init,
    "Tamb": T_init,
    "Tv1": T_init,
    "Tv2": T_init,
    "Tv3": T_init,
    "Tv4": T_init,
}
```

```

    "Tv5": T_init ,
    "Tv6": T_init ,
    "Tv7": T_init ,
    "Tv8": T_init ,
    "Tv9": T_init ,
    "Tv10": T_init ,
    "Tv11": T_init ,
    "Tv12": T_init}

step = 1 #sec
deltat = 1 #sec

h_1 = 4
h_2 = 2
h_3 = 3

#Madeira
U1 = 1/(1/(h_2)+(espessura_madeira/k_madeira)+(1/h_1))

#TampaVidro
U2 = 1/(1/(h_2)+(espessura_vidro/k_vidro)+(1/h_1))

#TampaRecipiente
U3 = 1/(1/(h_3)+(espessura_tampa/k_vidro)+(1/h_2))

time = np.arange(tempo_inicial*60*60, tempo_final*60*60, step)

r_refletor = 0.96

T = [T_template.copy() for x in range(len(time))]

for i in range(0, len(time) - 1):

    T[i]["Tamb"] = T_amb(float(time[i]))

    angulo_refletor = 4.7

    q_e_1 = (Gs(float(time[i]))+ Gs(float(time[i]))*r_refletor*cos(angulo_refletor))

    m_list_B = [[e_vidro*sigma*pow(T[i]["Ts1"], 4) + r_vidro*q_e_1],
                 [e_vidro*sigma*pow(T[i]["Ts2"], 4) + t_vidro*q_e_1],
                 [e_aluminio_p*sigma*pow(T[i]["Ts3"], 4)],
                 [e_aluminio_p*sigma*pow(T[i]["Ts4"], 4)],
                 [e_aluminio_p*sigma*pow(T[i]["Ts5"], 4)],
                 [e_aluminio_p*sigma*pow(T[i]["Ts6"], 4)],
                 [e_vidro*sigma*pow(T[i]["Ts7"], 4)],
                 [e_vidro*sigma*pow(T[i]["Ts8"], 4)],
                 [e_aluminio*sigma*pow(T[i]["Ts9"], 4)],
                 [e_aluminio*sigma*pow(T[i]["Ts10"], 4)],
                 [e_aluminio*sigma*pow(T[i]["Ts11"], 4)],
                 [e_aluminio_p*sigma*pow(T[i]["Ts12"], 4)],
                 [e_solido*sigma*pow(T[i]["Ts13"], 4)]]

    B = np.array(m_list_B)
    X = np.linalg.inv(A).dot(B)[: ,0]

```

*# Volume 1 – Tampa Caixa (sup 1 e 2)*

```

q_i_2 = F2_3*X[2] + F2_4*X[3] + F2_5*X[4] + F2_6*X[5] +
F2_7*X[6] + F2_9*X[8] + F2_10*X[9] + F2_12*X[11]
T[i]["q_i_2"] = q_i_2
q_l_1 = (e_vidro)*sigma*pow(T[i]["Ts1"], 4) + (r_vidro)*q_e_1 +
(t_vidro)*q_i_2
T[i]["q_l_1"] = q_l_1

```

```

T[i+1]["Tv1"] = T[i]["Tv1"] + ((deltat*area_vidro)/(m_vidro*cp_vidro)) *
(q_e_1 - q_l_1 + q_i_2 - X[1] + h_1*(T_amb(float(time[i])) - T[i]["Tv1"]) +
h_2*(T[i]["Tv2"] - T[i]["Tv1"]))
T[i+1]["Ts1"] = T[i+1]["Tv1"]
T[i+1]["Ts2"] = T[i+1]["Tv1"]

```

*# Volume 2 – Inner 2*

```

T[i+1]["Tv2"] = T[i]["Tv2"] + (deltat/(m_ar_2*cp_ar)) *
(area_vidro*U2*(T_amb(float(time[i]))-T[i]["Tv2"]) +
area_madeira*U1*(T_amb(float(time[i]))-T[i]["Tv2"]) +
area_madeira*U1*(T_amb(float(time[i]))-T[i]["Tv2"]) +
area_madeira*U1*(T_amb(float(time[i]))-T[i]["Tv2"]) +
area_madeira*U1*(T_amb(float(time[i]))-T[i]["Tv2"]) +
area_base*U1*(T_amb(float(time[i]))-T[i]["Tv2"]) +
area_aluminio_baixo_ext*h_2*(T[i]["Tv7"]-T[i]["Tv2"]) +
area_aluminio_cima_ext*h_2*(T[i]["Tv5"]-T[i]["Tv2"]) +
area_vidro_2*U3*(T[i]["Tv4"]-T[i]["Tv2"]))

```

*#Volume 3 – Tampa Recipiente (sup 7 e 8)*

```

q_i_8 = F8_11*X[10] + F8_13*X[12]
q_e_7 = F7_2*X[1] + F7_3*X[2] + F7_4*X[3] + F7_5*X[4] + F7_6*X[5]
q_l_7 = (e_vidro)*sigma*pow(T[i]["Ts7"], 4) + (r_vidro)*q_e_7 + (t_vidro)*q_i_8

T[i+1]["Tv3"] = T[i]["Tv3"] + ((deltat*area_vidro_2)/(m_vidro_2*cp_vidro)) *
(q_e_7 - q_l_7 + q_i_8 - X[7] + h_2 * (T[i]["Tv2"] - T[i]["Tv3"]) +
h_3 * (T[i]["Tv4"] - T[i]["Tv3"]))
T[i+1]["Ts7"] = T[i+1]["Tv3"]
T[i+1]["Ts8"] = T[i+1]["Tv3"]

```

*# Volume 4 – Inner 3*

```

T[i+1]["Tv4"] = T[i]["Tv4"] + ((deltat)/(m_ar_3*cp_ar)) *
(area_vidro_2*U3*(T[i]["Tv2"]-T[i]["Tv4"]) +
(area_aluminio_cima_int)*h_3*(T[i]["Tv5"]-T[i]["Tv4"]) +
area_solido*h_3*(T[i]["Tv6"]-T[i]["Tv4"]))

```

*# Volume 5 – Recipiente Cima (sup 10 e 11)*

```

q_i_11 = (F11_8*X[7] + F11_13*X[12]+ F11_11*X[10])
q_i_10 = (F10_2*X[1] + F10_3*X[2] + F10_4*X[3] +
F10_5*X[4] + F10_6*X[5] + F10_12*X[11])

```

```

T[i+1]["Tv5"] = T[i]["Tv5"] + (deltat/(m_aluminio_cima*cp_aluminio))*
(area_aluminio_cima_int*(q_i_11-X[10]) + area_aluminio_cima_ext*(q_i_10-X[9])+
area_aluminio_cima_ext*h_2*(T[i]["Tv2"] - T[i]["Tv5"]) +
area_aluminio_cima_int*h_3*(T[i]["Tv4"] - T[i]["Tv5"]))
T[i+1]["Ts10"] = T[i+1]["Tv5"]
T[i+1]["Ts11"] = T[i+1]["Tv5"]

```

*# Volume 6 e 7 – solido e Recipiente Baixo (sup 9 e 13)*

```

q_i_13 = (F13_8*X[7] + F13_11*X[10])

```

$$q_{i\_9} = (F9\_2*X[1] + F9\_3*X[2] + F9\_4*X[3] + F9\_5*X[4] + F9\_6*X[5] + F9\_12*X[11])$$

$$q_{ext} = 0$$

$$T[i+1][\text{"Tv6"}] = T[i][\text{"Tv6"}] +$$

$$(\text{deltat} / ((m\_aluminio\_baixo*cp\_aluminio) +$$

$$(m\_solido*cp\_solido))) * (\text{area\_solido} * (q_{i\_13} - X[12]) +$$

$$\text{area\_aluminio\_baixo\_ext} * (q_{i\_9} - X[8]) +$$

$$h\_2 * (\text{area\_aluminio\_baixo\_ext}) * (T[i][\text{"Tv2"}] - T[i][\text{"Tv6"}]) +$$

$$h\_3 * \text{area\_solido} * (T[i][\text{"Tv4"}] - T[i][\text{"Tv6"}]) + q_{ext})$$

$$T[i+1][\text{"Ts9"}] = T[i+1][\text{"Tv6"}]$$

$$T[i+1][\text{"Ts13"}] = T[i+1][\text{"Tv6"}]$$

$$T[i+1][\text{"Tv7"}] = T[i+1][\text{"Tv6"}]$$

*# Volume 8 Parede Esquerda (sup 3)*

$$q_{i\_3} = (F3\_2*X[1] + F3\_4*X[3] + F3\_5*X[4] + F3\_6*X[5] +$$

$$F3\_7*X[6] + F3\_9*X[8] + F3\_10*X[9] + F3\_12*X[11])$$

$$T[i+1][\text{"Tv8"}] = T[i][\text{"Tv8"}] + ((\text{deltat} * \text{area\_madeira}) / (m\_madeira * cp\_madeira)) *$$

$$(q_{i\_3} - X[2] + h\_2 * (T[i][\text{"Tv2"}] - T[i][\text{"Tv8"}]) +$$

$$h\_1 * (T_{amb}(\text{float}(\text{time}[i])) - T[i][\text{"Tv8"}]))$$

$$T[i+1][\text{"Ts3"}] = T[i+1][\text{"Tv8"}]$$

*# Volume 9 Parede Direita (sup 4)*

$$q_{i\_4} = (F4\_2*X[1] + F4\_3*X[2] + F4\_5*X[4] + F4\_6*X[5] + F4\_7*X[6] +$$

$$F4\_9*X[8] + F4\_10*X[9] + F4\_12*X[11])$$

$$T[i+1][\text{"Tv9"}] = T[i][\text{"Tv9"}] + ((\text{deltat} * \text{area\_madeira}) / (m\_madeira * cp\_madeira)) *$$

$$(q_{i\_4} - X[3] + h\_2 * (T[i][\text{"Tv2"}] - T[i][\text{"Tv9"}]) +$$

$$h\_1 * (T_{amb}(\text{float}(\text{time}[i])) - T[i][\text{"Tv9"}]))$$

$$T[i+1][\text{"Ts4"}] = T[i+1][\text{"Tv9"}]$$

*# Volume 10 Parede Frente (sup 5)*

$$q_{i\_5} = (F5\_2*X[1] + F5\_3*X[2] + F5\_4*X[3] + F5\_6*X[5] + F5\_7*X[6] +$$

$$F5\_9*X[8] + F5\_10*X[9] + F5\_12*X[11])$$

$$T[i+1][\text{"Tv10"}] = T[i][\text{"Tv10"}] + ((\text{deltat} * \text{area\_madeira}) / (m\_madeira * cp\_madeira)) *$$

$$(q_{i\_5} - X[4] + h\_2 * (T[i][\text{"Tv2"}] - T[i][\text{"Tv10"}]) +$$

$$h\_1 * (T_{amb}(\text{float}(\text{time}[i])) - T[i][\text{"Tv10"}]))$$

$$T[i+1][\text{"Ts5"}] = T[i+1][\text{"Tv10"}]$$

*# Volume 11 - Parede Tr s (sup 6)*

$$q_{i\_6} = (F6\_2*X[1] + F6\_3*X[2] + F6\_4*X[3] + F6\_5*X[4] +$$

$$F6\_7*X[6] + F6\_9*X[8] + F6\_10*X[9] + F6\_12*X[11])$$

$$T[i+1][\text{"Tv11"}] = T[i][\text{"Tv11"}] + ((\text{deltat} * \text{area\_madeira}) / (m\_madeira * cp\_madeira)) *$$

$$(q_{i\_6} - X[5] + h\_2 * (T[i][\text{"Tv2"}] - T[i][\text{"Tv11"}]) +$$

$$h\_1 * (T_{amb}(\text{float}(\text{time}[i])) - T[i][\text{"Tv11"}]))$$

$$T[i+1][\text{"Ts6"}] = T[i+1][\text{"Tv11"}]$$

*# Volume 12 - Base (sup 12)*

$$q_{i\_12} = (F12\_2*X[1] + F12\_3*X[2] + F12\_4*X[3] + F12\_5*X[4] +$$

$$F12\_6*X[5] + F12\_9*X[8] + F12\_10*X[9])$$

$$T[i+1][\text{"Tv12"}] = T[i][\text{"Tv12"}] + ((\text{deltat}) / (m\_base * cp\_madeira)) *$$

$$(\text{area\_base} * (q_{i\_12} - X[11] + h\_2 * (T[i][\text{"Tv2"}] - T[i][\text{"Tv12"}])) +$$

$$\text{area\_madeira} * h\_1 * (T_{amb}(\text{float}(\text{time}[i])) - T[i][\text{"Tv12"}]))$$

$$T[i+1][\text{"Ts12"}] = T[i+1][\text{"Tv12"}]$$

```
#grafico

plt.plot(time/(3600),
         [data['Tv1'] - 273.15 for data in T],
         time/(3600),
         [data['Tv2'] - 273.15 for data in T],
         time/(3600),
         [data['Tv3'] - 273.15 for data in T],
         time/(3600),
         [data['Tv4'] - 273.15 for data in T],
         time/(3600),
         [data['Tv5'] - 273.15 for data in T],
         time/(3600),
         [data['Tv6'] - 273.15 for data in T], 'r.',
         time/(3600),
         [data['Tv7'] - 273.15 for data in T], 'r.',
         time/(3600),
         [data['Tv8'] - 273.15 for data in T],
         time/(3600),
         [data['Tv9'] - 273.15 for data in T],
         time/(3600),
         [data['Tv10'] - 273.15 for data in T],
         time/(3600),
         [data['Tv11'] - 273.15 for data in T],
         time/(3600),
         [data['Tv12'] - 273.15 for data in T],)

plt.xlabel('Tempo_(hr)')
plt.ylabel('Temperatura_( C )')
plt.grid()
plt.legend([k for k in T_template.keys() if 'Tv' in k],
          loc='center_right', bbox_to_anchor=(1.25, 0.5))
```

---