

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Desenvolvimento de um sistema renovável autónomo  
para habitação unifamiliar em contexto rural do  
sudeste brasileiro

Ana Filipa Nunes da Silva

**Dissertação**

**Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente**

**2013**



UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Desenvolvimento de um sistema renovável autónomo  
para habitação unifamiliar em contexto rural do  
sudeste brasileiro

Ana Filipa Nunes da Silva

**Dissertação**

**Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente**

Orientadores: Guilherme Carrilho da Graça (FCUL)

**2013**



## **Abstract**

Nowadays, buildings are responsible for about 40% of the world primary energy consumption. Thus, the implementation of energy efficiency measures in these has a major impact in terms of reducing energy consumption. By allowing the assessment of impacts of different optimizing design options, dynamic simulation has a crucial role in the design phase of buildings. Also legislation has an important role in the promotion of energy efficiency measures. In Brazil, the creation of the Regulamento Técnico para Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ -R) led to an important step in promoting energy efficiency in buildings. With the construction of self-sustainable houses, also Fazenda Catuçaba aims to promote sustainable buildings. The present work aims the evaluation of the energy performance of one of these self-sustainable houses according to RTQ-R and the design of its energy production system. In order to achieve that, simulation tools are used: *EnergyPlus* to allow the dynamic thermal simulation of the building, and *Homer* to allow the simulation of the energy production system.

**Keywords:** *Dynamic Simulation, Energy Plus, Homer, off-grid, RTQ-R*

## **Resumo**

O setor dos edifícios representa cerca de 40% da energia primária consumida a nível mundial. A implementação de medidas de eficiência energética nestes tem, assim, um grande impacto no que toca a redução de consumos de energia.

A simulação apresenta um papel crucial na fase de projeto dos edifícios, por permitir avaliar os impactos e otimizar diferentes opções de projeto. A legislação tem também um caráter importante na promoção de medidas de eficiência energética. No Brasil, a criação do Regulamento Técnico para Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) permitiu dar um importante passo na promoção da eficiência energética dos edifícios. Com a construção de habitações auto-sustentáveis, também a Fazenda Catuçaba pretende promover os edifícios sustentáveis. O presente trabalho consiste na avaliação do desempenho energético de uma das habitações auto-sustentáveis da Fazenda Catuçaba de acordo com o RTQ-R e no dimensionamento do sistema de produção de energia da mesma. Para tal utilizam-se ferramentas de simulação: o *EnergyPlus* para a simulação térmica dinâmica do edifício e o *Homer*, para a simulação dos sistemas de produção de energia elétrica.

**Palavras-chave:** Simulação dinâmica, *Energy Plus*, *Homer*, *off-grid*, *RTQ-R*

## Índice

1.	Introdução.....	1
2.	Conceitos teóricos .....	2
2.1	Transferência de calor .....	2
2.2	Conforto térmico .....	4
2.3	Balço térmico e necessidades térmicas de um edifício.....	5
2.4	Simulação térmica de edifícios.....	6
2.5	Edifícios autônomos .....	6
2.5.1	Recuperador de calor.....	7
2.5.2	Sistema solar térmico .....	7
2.5.3	Sistema solar fotovoltaico .....	7
2.5.4	Aerogerador.....	7
2.6	Ferramentas de simulação .....	9
2.6.1	EnergyPlus.....	9
2.6.2	HOMER.....	11
3.	Caso de estudo.....	13
3.1	Localização e clima .....	13
3.2	Arquitetura .....	14
3.3	Primeira fase: medidas de otimização .....	15
3.4	Soluções construtivas .....	16
3.5	Enquadramento regulamentar brasileiro para a eficiência energética .....	18
4.	Análise Regulamentar: RTQ-R .....	20
4.1	Avaliação da Envolvente.....	22
4.1.1	Método prescritivo .....	22
4.1.2	Método da simulação.....	23
4.1.3	<i>Equivalente numérico da envolvente</i> .....	29

4.2	Avaliação do <i>Sistema de Aquecimento de Água</i> .....	30
4.2.1	Determinação da eficiência do Sistema de Aquecimento de Água .....	30
4.2.1	<i>Equivalente numérico do Sistema de Aquecimento de Água</i> .....	31
4.3	<i>Bonificações</i> .....	31
4.4	Avaliação final .....	32
4.5	RTQ-R, RCCTE e <i>Passivhaus</i> .....	32
5.	Previsão de necessidades energéticas.....	37
5.1	Condições de simulação .....	37
5.2	Resultados obtidos - necessidades energéticas.....	39
6.	Dimensionamento de sistemas .....	43
6.1	Recuperador de calor.....	43
6.2	Sistema autónomo híbrido.....	43
6.2.1	<i>Sistemas simulados no Homer</i> .....	45
6.2.1	<i>Resultados</i> .....	46
7.	Conclusão .....	49
8.	Referências .....	50
	Anexos.....	54

## Índice de tabelas

Tabela 1 – Valores de PMV (escala de sensibilidade térmica) .....	4
Tabela 2 – Caracterização do exterior para o interior das soluções construtivas utilizadas [8] .....	17
Tabela 3 – Nível de eficiência atribuído a cada Equivalente Numérico (EqNum) .....	20
Tabela 4 – Classificação do nível de eficiência de acordo com a pontuação obtida .....	20
Tabela 5 – <i>Equivalentes numéricos da envoltória</i> de acordo com o método prescritivo .....	22
Tabela 6 – Resultados obtidos na avaliação da <i>envoltória</i> pelo método prescritivo .....	23
Tabela 7 – Padrões de ocupação, iluminação e utilização de equipamentos considerados .....	24
Tabela 8 – <i>Equivalentes numéricos da envoltória</i> para o método da simulação .....	28
Tabela 9 – Resultados obtidos na avaliação da <i>envoltória</i> pelo método da simulação .....	28
Tabela 10 – Propriedades do coletor solar térmico Buderus SKN 3.0 .....	30
Tabela 11 – Classificação de sistemas solares térmicos .....	31
Tabela 12 – Coeficientes de transmissão térmica máximos admissíveis para diferentes climas .....	32
Tabela 13 – Pré-requisitos da envolvente para a ZB3 .....	33
Tabela 14 – Áreas do apartamento “tipo” .....	34
Tabela 15 – Constituição das fachadas do apartamento “tipo” .....	35
Tabela 16 – Cálculo da classe de inércia do apartamento tipo .....	35
Tabela 17 – Comparação entre os diferentes regulamentos .....	36
Tabela 18 – Padrões de ocupação e iluminação conforme projeto .....	37
Tabela 19 – Consumo de eletrodomésticos considerado .....	39
Tabela 20 – Potência de aquecimento necessária .....	41
Tabela 21 – Equipamento referência – Recuperador de calor .....	43
Tabela 22 – Equipamento de referência: custos .....	45
Tabela 23 – Configurações do sistema autônomo testadas .....	46

## Índice de Figuras

Figura 1 – Intervalos de aceitação de temperaturas operativas interiores de acordo com o <i>standard</i> 55-2010 da ASHRAE (adaptado de [9]).....	4
Figura 2 – Esquema de um sistema autônomo híbrido PV/eólico [adaptado de <a href="http://www.superiorwindturbines.com/wind_energy_off_grid.php">http://www.superiorwindturbines.com/wind_energy_off_grid.php</a> ].....	9
Figura 3 – Esquema base do <i>EnergyPlus</i> [adaptado de [15]].....	10
Figura 4 – Localização do edifício em estudo [adaptado de <a href="http://www.bing.com/maps/">http://www.bing.com/maps/</a> ] .....	13
Figura 5 – Dados meteorológicos de Catuçaba: Médias mensais diárias.....	14
Figura 6 – Número de horas anual de ocorrência de temperaturas (esquerda) e relação entre temperatura máxima diária e amplitude térmica diária (direita) .....	14
Figura 7 – Corte longitudinal da habitação em estudo, vista de Norte (projeto de arquitetura).....	15
Figura 8 – Planta da habitação em estudo, Sul para cima (projeto de arquitetura) .....	15
Figura 9 – ENCE tipo (à esquerda) [de <a href="http://www2.inmetro.gov.br/pbe/a_etiqueta.php">http://www2.inmetro.gov.br/pbe/a_etiqueta.php</a> ] e Selo PROCEL (à direita) [ <a href="http://www.eletronbras.com/elb/procel/">http://www.eletronbras.com/elb/procel/</a> ] .....	19
Figura 10 – Esquema resumo da metodologia do RTQ-R para Unidades Habitacionais Autônomas ..	21
Figura 11 – Zonamento adotado para a simulação.....	23
Figura 12 – Modelo do edifício, vista da fachada norte (imagem do <i>Google Sketchup</i> ) .....	24
Figura 13 – Padrões de sombreamento e de temperatura de abertura de janelas e aberturas de topo das fachadas.....	26
Figura 14 – Esquema do objeto PTHP ( <i>Package Terminal Heat Pump</i> ), adaptado de [9] .....	27
Figura 15 – Temperaturas operativas verificadas na simulação do edifício com ventilação natural ....	28
Figura 16 – Temperaturas operativas verificadas na simulação do edifício com climatização.....	29
Figura 17 – Gráfico comparativo de Coeficientes de Transmissão Térmica dos diferentes regulamentos .....	33
Figura 18 – Temperaturas operativas verificadas na simulação do edifício com climatização.....	34
Figura 19 - Planta de um apartamento “tipo” .....	34
Figura 20 – Novos padrões de sombreamento e de temperatura de abertura de janelas e aberturas de topo das fachadas .....	38

Figura 21 – Distribuição das temperaturas operativas verificadas durante todo o ano na simulação do edifício com ventilação natural .....	39
Figura 22 – Distribuição das temperaturas operativas verificadas durante os meses entre Abril e Outubro (inclusive) na simulação do edifício com ventilação natural .....	40
Figura 23 – Distribuição das temperaturas operativas verificadas durante todo o ano na simulação do edifício com sistema de <i>ideal loads</i> .....	40
Figura 24 – Distribuição das temperaturas operativas verificadas durante os meses entre Abril e Outubro (inclusive) na simulação do edifício com sistema de <i>ideal loads</i> .....	41
Figura 25 – Diagrama de consumo – 2 <sup>a</sup> feira, 4 <sup>a</sup> feira e sábado .....	41
Figura 26 – Diagrama de consumo – 3 <sup>a</sup> feira, 6 <sup>a</sup> feira e domingo .....	42
Figura 27 – Diagrama de consumo – 5 <sup>a</sup> feira .....	42
Figura 28 – Curva de potência do aerogerador .....	46
Figura 29 – Curva de capacidade das baterias.....	46
Figura 29 – Valores horários médios mensais de produção e consumo de energia .....	47
Figura 30 – Distribuição estatística do estado de carga das baterias.....	47
Figura 30 – Configuração final do sistema de produção de energia elétrica.....	48

## **Acrónimos e Siglas**

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

NREL - *National Renewable Energy Laboratory*

IEC – *International Electrotechnical Commission*

DOE – *US Department of Energy*

COP – *Coefficient of Performance*

AQS – Águas quentes sanitárias

Procel - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

CB3E – Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações

OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

RTQ-R - Regulamento Técnico para Eficiência Energética de Edificações Residenciais

ENCE - Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

PBE - Programa Brasileiro de Etiquetagem

Inmetro - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios





## 1. Introdução

A crise energética dos anos setenta despertou a consciência mundial para o limite de disponibilidade de petróleo e necessidade de produção de energia por fontes renováveis, apoiadas pela implementação de medidas de incentivo à eficiência energética e de redução do consumo energético.

Atualmente, o setor dos edifícios, é um dos mais responsáveis pelo consumo de energia, utilizando entre 30 a 40% da energia primária consumida a nível mundial [1]. Os edifícios, quer sejam residenciais ou de serviços, tornam-se essenciais ao desenvolvimento de atividades humanas por criarem condições ao desenvolvimento destas. Nos Estados Unidos da América e na China, existem, respetivamente, 81 e 26 m<sup>2</sup> de área construída por habitante. Na Europa, este valor é de 48 m<sup>2</sup> e 75% do total de edifícios pertence ao setor residencial. Este setor foi responsável pelo consumo de 68% do total de energia final consumida pelos edifícios em 2009 [2].

Em 2011, o setor residencial foi responsável por 27% do consumo europeu de energia final [3]. De acordo com a Agência Internacional de Energia, nos países da OCDE o valor de consumo de energia final referente ao setor residencial é de 19% e nos países não OCDE de 28% [4].

O elevado consumo energético associado aos edifícios torna-os um alvo óbvio para implementação de medidas de eficiência energética e é cada vez mais relevante a atenção dada à temática. É neste contexto que surge esta dissertação: os proprietários da Fazenda de Catuçaba, uma fazenda que aposta no turismo de charme e natureza localizada no interior de São Paulo, Brasil, lotearam parte da área de terreno disponível para a construção de casas auto-sustentáveis e de elevada performance energética.

Também no Brasil a eficiência energética de edifícios está a ser alvo de atenção, com a criação de dois regulamentos: o RTQ-C, Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos, publicado em fevereiro de 2009; e o RTQ-R, Regulamento Técnico para Eficiência Energética de Edificações Residenciais, publicado em novembro de 2010. Neste país, em 2012, o setor residencial foi responsável por 9,4% do consumo total de energia final e pelo consumo de 23,6% do consumo final de energia elétrica, que representa 42,6% do consumo total de energia do setor residencial [5].

Assim, este trabalho visa avaliar uma das casas auto-sustentáveis projetadas para a Fazenda de acordo com o regulamento aplicável, o RTQ-R, e estudar medidas que promovam a eficiência energética e redução dos consumos desta, nomeadamente medidas de otimização passivas. Para além disto visa dimensionar o sistema produtor e de armazenamento de eletricidade e de águas quentes sanitárias para que, mesmo não estando ligada à rede elétrica, a casa possa operar como qualquer outra habitação, promovendo o conforto dos seus utilizadores.

Começar-se-á por fazer um resumo de conceitos teóricos de transferência de calor em edifícios, sistemas energéticos e ferramentas de simulação, seguido da apresentação do caso em estudo detalhadamente, e da sua análise regulamentar. Posteriormente, de acordo com a previsão de necessidades energéticas obtida por meio de simulação dinâmica, dimensionar-se-á o sistema de produção e armazenamento de energia elétrica.

## 2. Conceitos teóricos

Os mecanismos de transferência de calor têm um papel fundamental na avaliação do desempenho de um edifício. O facto de os edifícios serem construídos para albergar as atividades humanas e protegê-las das condições exteriores, está diretamente ligado com a criação de condições ambiente interiores diferentes das exteriores. E para que as condições ambiente interiores sejam adequadas ao nível de conforto térmico e saúde dos ocupantes, é importante ter uma perceção do comportamento térmico do edifício. Esta perceção permite otimizar o modo como o edifício e os sistemas energéticos nele instalados cumprem o seu propósito.

### 2.1 Transferência de calor

Tendo em conta os Princípios da Termodinâmica, a existência de gradientes de temperatura – diferentes temperaturas em diferentes pontos – leva à existência de transferência de calor (energia térmica) de modo a atingir-se um equilíbrio. A transferência de calor, que ocorre sempre do corpo mais quente para o mais frio, pode dar-se por condução, por convecção e por radiação [6]:

**Condução** – transferência de calor através de um material. O fluxo de calor transmitido unidireccionalmente por unidade de área por condução é traduzido pela lei de Fourier:

$$q_{cond} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Onde:

$q_{cond}$  – fluxo de calor transmitido por condução por unidade de área [ $W/m^2$ ]

$\lambda$  – Condutividade térmica de um material, define a facilidade com que o material transfere calor [ $W/(m \cdot ^\circ C)$ ]

$\frac{dT}{dx}$  – Gradiente de temperatura entre dois pontos do material [ $^\circ C/m$ ]

O sinal negativo indica a orientação do fluxo de calor, que toma o sentido positivo quando realizado no sentido da temperatura mais baixa.

Mas mesmo sendo possível determinar a diferença de temperatura entre as duas faces de um material, só a Lei de Fourier não permite analisar o efeito transiente (a evolução da distribuição de temperaturas e energia armazenada) da condução de calor através de superfícies. Isto torna-se possível caso se considere a Equação de Difusão de Calor, Equação 3, que se baseia no princípio de Conservação da Energia, expresso na Equação 2, num volume de controlo infinitesimal.

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_{gen} = \dot{E}_{st} \quad (2)$$

Onde:

$\dot{E}_{in} = q_x + q_y + q_z$  – Calor transferido para o sistema [W]

$\dot{E}_{out} = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz}$  – Calor pelo sistema [W]

$\dot{E}_{gen} = \dot{q} \cdot dx \cdot dy \cdot dz$  – Calor gerado no sistema [W]

$\dot{E}_{st} = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\delta T}{\delta t} dx \cdot dy \cdot dz$  – Calor armazenado no sistema [W]

De acordo com o Princípio da Conservação da Energia, a Primeira Lei da Termodinâmica, num sistema fechado, em que não existe transferência de massa, a energia total deste sistema é conservada. O que significa que a única maneira de a energia total de um sistema fechado ser alterada é através de fluxos de energia nas suas fronteiras.

$$\frac{\delta}{\delta x} \left( \lambda \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left( \lambda \frac{\delta T}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left( \lambda \frac{\delta T}{\delta z} \right) + \dot{q} = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\delta T}{\delta t} \quad (3)$$

Onde:

$\frac{\delta}{\delta x} \left( \lambda \frac{\delta T}{\delta x} \right)$  – Calor transferido por condução no sentido do eixo coordenado x [W/m<sup>3</sup>]

$\frac{\delta}{\delta y} \left( \lambda \frac{\delta T}{\delta y} \right)$  – Calor transferido por condução no sentido do eixo coordenado y [W/m<sup>3</sup>]

$\frac{\delta}{\delta z} \left( \lambda \frac{\delta T}{\delta z} \right)$  – Calor transferido por condução no sentido do eixo coordenado z [W/m<sup>3</sup>]

$\dot{q}$  – Taxa de energia gerada por unidade de volume [W/m<sup>3</sup>]

$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\delta T}{\delta t}$  – Taxa de variação de energia térmica armazenada num volume [W/m<sup>3</sup>], onde  $\rho \cdot c_p$  é a capacidade térmica volúmica do material, que descreve a sua capacidade armazenar energia [J/(m<sup>3</sup>.K)]

**Convecção** – transferência de calor entre um meio sólido e um fluido que escoia sobre esse sólido. A troca de calor por convecção num corpo de área A pode ser traduzida pela Lei de Newton do arrefecimento:

$$Q_{conv} = A \cdot h_c \cdot (T_s - T_\infty) \quad (4)$$

Onde:

$Q_{conv}$  – Calor transmitido por convecção [W]

$h_c$  – Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/(m<sup>2</sup>.°C)]

$T_s$  – Temperatura da superfície [°C]

$T_\infty$  – Temperatura a que o fluido que não sofre o efeito da superfície se encontra [°C]

**Radiação** – todos os corpos que estejam a uma temperatura diferente do zero absoluto (0 K) emitem radiação, associada às mudanças de configuração dos eletrões constituintes dos átomos ou moléculas. A energia do campo radiativo é transmitida por fotões, que não necessitam de matéria para se propagarem. O calor emitido por radiação por um corpo negro está relacionado com a sua temperatura absoluta e é quantificado matematicamente através da Lei de Stefan-Boltzmann. O calor emitido por uma superfície real é afetado pela sua emissividade,  $\varepsilon$ , (quão eficiente é a emissão da superfície em relação à do corpo negro), sendo expresso por:

$$Q_{rad} = A_s \varepsilon \sigma T^4 [W] \quad (5)$$

Onde:

$A_s$  – Área da superfície do corpo [m<sup>2</sup>]

$\varepsilon$  – Emissividade do corpo

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$  W/(m<sup>2</sup>.K) – constante de Stefan-Boltzmann

$T$  – Temperatura do corpo [K]

A troca de calor por radiação entre dois corpos é expressa por:

$$Q_{rad(1,2)} = A_1 h_r (T_1 - T_2) \quad (6)$$

Onde:

$h_r$  – Coeficiente de transferência de calor por radiação [W/(m<sup>2</sup>.°C)]

$T_1$  – Temperatura do corpo 1 [°C]

$T_2$  – Temperatura do corpo 2 [°C]

De um modo geral, o calor transmitido através de uma superfície de área A vem:

$$Q = A \cdot U \cdot dT [W] \quad (7)$$

$U$  é o coeficiente de condutibilidade térmica do meio de propagação [ $W/(m^2.K)$ ], inverso da resistência térmica  $R$  [ $(m^2.K)/W$ ].  $U$  mede a capacidade de um material propagar calor, tendo em conta os diferentes coeficientes de transferência de calor.

## 2.2 Conforto térmico

É o balanço entre a produção de calor do corpo humano e a sua transferência com o ambiente que determina a sensação de conforto térmico de um indivíduo. Esta sensação é influenciada quer pela atividade física e vestuário mas também por parâmetros ambientais tais como a temperatura do ar, a temperatura média radiante do ambiente (temperatura das superfícies), a velocidade do ar e a humidade [7]. Geralmente o desconforto térmico surge quando o corpo é exposto a fontes de aquecimento ou de arrefecimento indesejadas, mas também devido a assimetrias térmicas radiativas (devido a corpos a uma temperatura muito diferente da temperatura ambiente), excessiva velocidade do ar, diferenças de temperatura verticais, humidade relativa inadequada, etc.

O *standard 55* da ASHRAE, define conforto térmico como a condição de satisfação com o ambiente térmico, apresentando-o como dependente de fatores físicos, fisiológicos e psicológicos. Este *standard* afirma que o conforto térmico ocorre quando o esforço fisiológico de regulação é minimizado [8] e propõe duas metodologias para o avaliar: uma válida para todos os edifícios, baseada no estudo de Fanger, que assume o modelo PMV (*Predicted Mean Vote*), e outra, para edifícios naturalmente ventilados.

O modelo PMV baseia-se nos diferentes fluxos de calor entre o ocupante e o ambiente e a sua taxa metabólica, considerando que o ocupante está confortável quando o balanço entre as suas perdas térmicas e a sua taxa metabólica é nulo. O modelo agrupa a sensibilidade térmica numa escala de 7 pontos, conforme a Tabela 1.

O modelo para edifícios naturalmente ventilados baseia-se em modelos adaptativos: quando não existe um sistema de condicionamento de ar, e é permitido abrir janelas, os ocupantes adaptam-se às condições térmicas do espaço, sendo mais flexíveis na aceitação destas. A Figura 1 traduz as gamas de temperaturas operativas (média entre a temperatura radiante de um espaço e a temperatura do ar nesse espaço) interiores admissíveis para os espaços em função da temperatura média mensal exterior. A zona de conforto correspondente a 80 % de aceitação aplica um limite de 7°C de diferença em torno da temperatura neutra e considera-se aplicável a situações correntes. A zona de conforto correspondente a 90 % de aceitação aplica um limite de 5°C de diferença em torno da temperatura neutra e considera-se aplicável em situações em que se exige um conforto térmico mais elevado.

Tabela 1 – Valores de PMV (escala de sensibilidade térmica)

+3	Muito quente
+2	Quente
+1	Ligeiramente quente
0	Neutro
-1	Ligeiramente fresco
-2	Fresco
-3	Frio

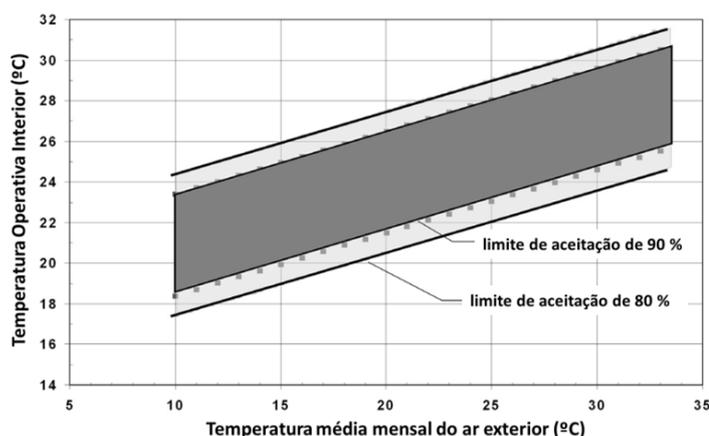


Figura 1 – Intervalos de aceitação de temperaturas operativas interiores de acordo com o *standard 55-2010* da ASHRAE (adaptado de [9])

### 2.3 Balanço térmico e necessidades térmicas de um edifício

As características construtivas, a exposição solar, os equipamentos utilizados no interior e a ocupação são fatores com uma importante influência no comportamento térmico de um edifício.

Por este motivo, a influência destes fatores deve ser estudada de modo a avaliar estratégias que permitam suprir as necessidades térmicas essenciais à criação e manutenção das condições de saúde e conforto térmico necessárias para os ocupantes. A equação 8 permite concretizar este estudo, ao descrever de um modo simplificado, o balanço térmico de um edifício:

$$G_i + G_s + G_v + G_c = \rho \cdot c_p \cdot V_s \cdot \frac{\Delta T}{\delta t} + \sum_{n=1}^k (T_i - T_e) \cdot A_n \cdot U_n \quad (8)$$

Onde:

$G_i$  – Ganhos internos [W]

$G_s$  – Ganhos solares [W]

$G_v = \rho \cdot c_p \cdot \dot{V} (T_{ext} - T_{int})$  – Ganhos de ventilação [W]

$G_c = \rho \cdot c_p \cdot \dot{V} (T_{ins} - T_{int})$  – Ganhos de climatização [W]

$\rho \cdot c_p \cdot V_s \cdot \frac{\Delta T}{\delta t}$  – energia armazenada no ar interior [W]

$\sum_{n=1}^k (T_i - T_e) \cdot A_n \cdot U_n$  – transferência de calor através das superfícies [W]

Com:

$\rho$  – massa volúmica do fluído [kg/m<sup>3</sup>]

$V_s$  – volume do fluído [m<sup>3</sup>]

$c_p$  – calor específico do fluído [J/(kg.K)]

$\Delta T$  – variação de temperatura [K]

$\dot{V}$  – caudal volúmico de ventilação [m<sup>3</sup>/s]

$\delta t$  – variação de tempo [s]

$T_{ext}$  – temperatura do ar exterior [°C]

$A_n$  – área da superfície n [m<sup>2</sup>]

$T_{int}$  – temperatura do ar no interior do edifício [°C]

$U_n$  – Coeficiente de transmissão térmica da superfície n [W/(m<sup>2</sup>.K)]

$T_{ins}$  – temperatura a que o ar climatizado é insuflado no edifício [°C]

Os ganhos internos de um edifício são, por exemplo, devidos à ocupação, utilização de equipamentos e iluminação.

Os ganhos solares devem-se à incidência, direta ou indireta, de radiação solar nas superfícies não opacas do edifício e dependem fundamentalmente do recurso solar e das características das superfícies. O recurso solar depende do local, da altura do ano e hora do dia, e das condições atmosféricas. Tendencialmente num dia sem nebulosidade a componente direta da radiação solar é a mais relevante para os ganhos solares, mas em dias com nebulosidade, ou em superfícies em que não exista incidência direta de radiação solar, também a radiação difusa (resultado da difusão da radiação devido à presença de um meio – o ar – e os seus constituintes) e a refletida por outras superfícies têm uma influência importante. As características das superfícies influenciam o modo como a radiação solar é refletida, absorvida ou transmitida por estas.

O balanço térmico de um edifício avalia as diferentes trocas de calor que neste ocorrem simultaneamente. Permite obter informação sobre a influência de fatores como a temperatura exterior e a incidência de radiação solar nas condições interiores de um edifício e no seu comportamento térmico. O balanço térmico de um edifício permite ainda avaliar quais as necessidades térmicas para

que no seu interior existam condições de conforto para os ocupantes. É possível determinar se as necessidades térmicas são supridas apenas com soluções passivas, promovendo-se a manutenção das condições interiores sem recurso a sistemas de climatização, ou se é inevitável a instalação destes sistemas. Caso se verifique que a instalação de sistemas de climatização é inevitável, é possível proceder ao seu dimensionamento e otimização.

## 2.4 Simulação térmica de edifícios

A equação 8 expressa simplificada o balanço térmico de um edifício. Mas, apesar de ter em consideração a transferência de calor através das superfícies, o efeito transiente desta transferência, conforme definido na Equação de Difusão de Calor (3), não é considerado. Normalmente, devido à sua complexidade, este efeito só é tido em conta quando é possível utilizar modelos numéricos computacionais. E é por permitir uma análise mais pormenorizada e rápida de todas as trocas energéticas inerentes à utilização de um edifício que a simulação térmica de edifícios é utilizada.

São utilizados modelos, de diferente complexidade, que permitem estudar o comportamento térmico de edifícios e testar diferentes opções de projeto e medidas de otimização. E é permitido fazê-lo durante a fase de projeto dos edifícios, antes de estes estarem construídos, quando ainda é possível tomar decisões que impliquem maiores desempenhos térmicos e energéticos do edifício sem que isso signifique grandes reabilitações e custos adicionais.

Geralmente, a simulação térmica de edifícios é feita para as 8760 h de um ano climático típico e permite modelar, para além da envolvente do edifício, variações horárias de ocupação, potência de iluminação e equipamentos, ventilação natural e sistemas de condicionamento artificial.

Através dos resultados da simulação é possível identificar as necessidades energéticas de um edifício, dimensionar os seus sistemas energéticos se aplicável, e prever o consumo energético anual, permitindo uma estimativa de períodos de retorno económico.

## 2.5 Edifícios autónomos

Como já referido, para promover o conforto térmico dos ocupantes de um edifício, é necessária energia. Mas para que existam condições que permitam aos ocupantes desenvolver as suas atividades, também. Assim, quer seja energia para manter as condições de conforto ou para iluminação, entretenimento, comunicações, preservação e confeção de alimentos ou aquecimento de água, a energia elétrica e a energia térmica são as mais relevantes.

A energia elétrica é simples de obter: liga-se o interruptor ou liga-se um equipamento a uma tomada. Esta energia é, na maior parte dos edifícios, fornecida pela rede elétrica disponível no local. A energia térmica pode ser obtida simplesmente promovendo os ganhos solares ou a ventilação natural ou utilizando equipamentos que convertam energia elétrica em calor, ou frio, ou através da queima de gás ou biomassa. Mas existem edifícios que, ou porque esta não existe no local, ou porque os seus proprietários assim o desejam, não se encontram ligados à rede elétrica. Estes edifícios têm instalados equipamentos que produzem a energia que permite satisfazer as necessidades energéticas inerentes à sua utilização: são edifícios autónomos.

O edifício em estudo será um edifício deste tipo, baseando-se na produção energética a partir de fontes renováveis: serão instalados recuperadores de calor, um sistema solar térmico, um fotovoltaico e um aerogerador.

É importante referir que, para além de estar sujeito às condicionantes do local, do edifício, e do seu proprietário, a viabilidade de um edifício autónomo está fortemente relacionada com a eficiência energética e a gestão responsável de consumos.

Por outro lado, devido à variabilidade dos recursos, e ao facto de a produção e o consumo não se igualarem instantaneamente, o armazenamento de energia tem um papel crucial para a satisfação das necessidades, permitindo a utilização da energia com um desfasamento temporal da sua produção.

### **2.5.1 Recuperador de calor**

Os recuperadores de calor a biomassa florestal permitem, através da queima desta biomassa, fornecer energia térmica ao espaço onde estão instaladas. São semelhantes a uma lareira convencional, mas são fechados. Os gases resultantes da queima não penetram diretamente na chaminé: contornam um sistema de deflectores, que permitem recuperar a energia residual destes gases e conferem um rendimento ao equipamento superior ao de uma lareira convencional.

### **2.5.2 Sistema solar térmico**

Os sistemas solares térmicos utilizam a radiação solar para o aquecimento de água através de um princípio de funcionamento muito simples: o efeito de estufa. Para produção de águas quentes sanitárias o equipamento mais utilizado é o coletor solar plano: a radiação solar incide sobre a cobertura de vidro que compõe a parte superior do coletor, penetra no seu interior e transfere o calor para o fluido térmico que circula em tubagens integradas no próprio coletor.

O dimensionamento destes sistemas deve ter como objetivo cobrir a maior percentagem possível das necessidades, minimizando simultaneamente os excedentes de energia no verão e os custos da instalação. Deste modo, e também devido à variabilidade do recurso solar, o sistema solar térmico poderá não ser suficiente para satisfazer integralmente as necessidades de aquecimento de água, sendo por isso necessária a instalação de um sistema de apoio de energia convencional, que só deverá ser utilizado quando o aquecimento solar térmico for insuficiente. Para além disso, a produção e o consumo não são obrigatoriamente simultâneos, pelo que é importante a existência de um depósito de acumulação de água quente.

### **2.5.3 Sistema solar fotovoltaico**

Os sistemas solares fotovoltaicos utilizam a radiação solar para a produção de energia elétrica, com base no efeito fotovoltaico. A incidência de radiação solar nas células fotovoltaicas, constituídas por materiais semicondutores (material cuja condutividade elétrica aumenta quando exposto à radiação), gera uma diferença de potencial e o movimento dos eletrões gera eletricidade. Grande parte dos painéis fotovoltaicos instalados no mundo é constituída por células de silício cristalino, mas existem também de silício amorfo, ou de filmes finos [10].

A produção energética de um módulo está sempre dependente das suas características, nomeadamente da sua potência nominal, ou pico, medida sob condições *STC* – *standard test conditions* (incidência de radiação de  $1000 \text{ W/m}^2$ , temperatura da célula de  $25^\circ\text{C}$  e espectro solar de referência AM 1,5, de acordo com o *standard* IEC 61215).

O dimensionamento deste sistema estará dependente do recurso disponível, das necessidades energéticas a suprir, das características do equipamento e da existência ou não de outros sistemas renováveis.

### **2.5.4 Aerogerador**

Os aerogeradores aproveitam a energia cinética do vento convertendo-a em energia mecânica (a rotação das pás) e de seguida, através de uma máquina elétrica, em energia elétrica. Existem aerogeradores para as mais distintas aplicações, mas mesmo o mais básico é constituído por, pelo menos, 3 elementos: pás (onde o vento incide e a sua energia cinética é transformada em energia mecânica rotacional); eixo (elemento que liga as pás ao gerador, transferindo a sua energia mecânica

rotacional); gerador (onde, com base nos princípios da indução eletromagnética, a energia mecânica rotacional é transformada em energia elétrica).

A capacidade dos aerogeradores produzirem eletricidade é limitada, não só pela disponibilidade do vento, mas também pela sua curva de potência, que caracteriza a potência gerada em função da velocidade do vento a que o aerogerador é submetido.

### *Sistemas autónomos híbridos*

No caso da energia elétrica, o facto de a disponibilidade de vento e de radiação solar não ser constante influencia a produção. Dado serem recursos distintos e terem os seus períodos de maior disponibilidade, grande parte das vezes, em diferentes alturas do dia e do ano, são considerados complementares. Assim, num edifício autónomo, ter instalados sistemas que aproveitem ambos os recursos permite uma produção energética mais constante e, portanto, mais fiável, tirando o melhor proveito dos recursos disponíveis no local.

Por outro lado, o facto de os edifícios autónomos serem isolados da rede elétrica, e o facto de existir excesso ou défice de produção em relação às necessidades energéticas em praticamente todos os momentos, o armazenamento de energia é indispensável para que se consiga armazenar o excesso de energia produzida e ter energia disponível caso a produção seja inferior ao que é necessário. As baterias são o meio de armazenamento mais comum.

É também necessária a instalação de equipamentos de controlo sofisticados e eficientes para uma correta integração das várias formas de produção de energia, conforme Figura 2.

Aos sistemas de produção de energia elétrica que utilizem mais de um recurso, e que consigam satisfazer as necessidades energéticas sem importação de energia da rede, dá-se o nome de sistema autónomo híbrido. De uma forma geral, os componentes que constituem um sistema autónomo híbrido PV/eólico são:

- Painel fotovoltaico
- Aerogerador
- Controlador
- Inversor
- Bateria(s)
- Diversa cabelagem

O controlador controla o fluxo de energia entre o gerador e a carga (onde existe necessidade de energia), tendo capacidade de determinar se a energia produzida é diretamente fornecida à carga ou se será armazenada. É também responsável por verificar se a energia armazenada nas baterias permite a sua carga ou descarga.

O inversor permite converter corrente contínua em corrente alternada e vice-versa, estabilizando-a para a frequência e tensão desejáveis.

As baterias consistem em dispositivos eletroquímicos, constituídas por um eléctrodo negativo (ânodo), um eléctrodo positivo (cátodo) e um eletrólito, que funcionam como dispositivos de armazenamento de energia, convertendo energia química em energia elétrica aquando do processo de descarga. As baterias recarregáveis convertem também energia elétrica em energia química durante o processo de carregamento. Durante o processo de carga e descarga, devido às reações químicas internas, as baterias perdem energia sob a forma de calor, conduzindo a um rendimento inferior a 100%.

As baterias são caracterizadas pela sua curva de capacidade, que define a capacidade de descarga da bateria de acordo com a corrente de descarga (geralmente, quanto maior a corrente pedida à bateria, menor a sua capacidade); pelo seu rendimento; pela sua tensão nominal; pela sua profundidade de descarga - carga mínima da bateria sem que sejam causados danos irreversíveis; pelo número de ciclos de carga e descarga - número de vezes que esta pode carregar e descarregar até precisar de ser substituída; e pela curva de tempo de vida, que ilustra o número de ciclos que a bateria suporta de

acordo com a profundidade de cada ciclo (geralmente, o número de ciclos suportado diminui com o aumento de profundidade de cada ciclo).

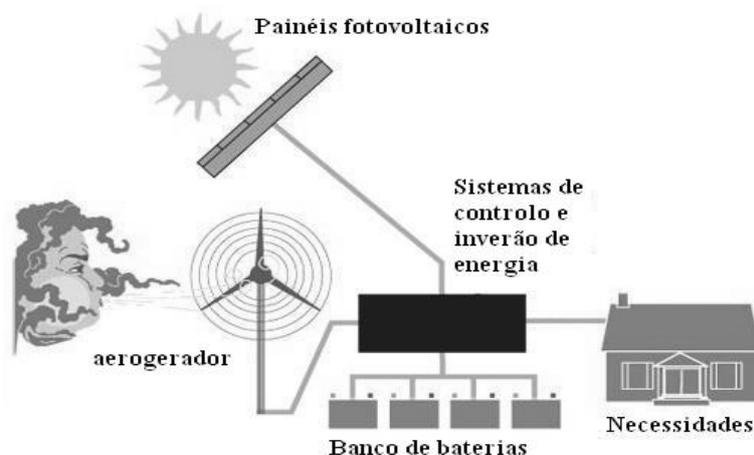


Figura 2 – Esquema de um sistema autónomo híbrido PV/eólico [adaptado de [http://www.superiorwindturbines.com/wind\\_energy\\_off\\_grid.php](http://www.superiorwindturbines.com/wind_energy_off_grid.php)]

## 2.6 Ferramentas de simulação

Como já referido, a simulação energética de um edifício permite, através da utilização de modelos, estudar o seu comportamento térmico e testar medidas de otimização antes de o construir. Também os sistemas de produção de energia podem ser simulados de modo a testar o seu comportamento e medidas de otimização.

Neste trabalho foram utilizados dois programas de simulação: o *EnergyPlus*, versão 7.2.0.006, para simulação térmica dinâmica de edifícios, e o *Homer*, versão 2.68, para simulação do sistema de produção e armazenamento de energia elétrica.

O *EnergyPlus* é um programa informático específico para a análise térmica e energética de edifícios, que resulta da junção de dois outros *softwares*, o DOE-2 e o BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*), desenvolvidos pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (DOE) nos anos 70 e 80. A sua primeira versão foi lançada em 2001 e tem sido um dos programas mais utilizados para o efeito, servindo de base a outros. É um programa validado pela norma 140-2004 da ASHRAE para simulação energética de edifícios [11].

O *Homer* é um programa informático desenvolvido pelo NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), laboratório do DOE, cujo objetivo é a otimização de modelos de sistemas de produção de energia elétrica, quer interligados à rede elétrica ou desconectados desta, permitindo a comparação entre várias tecnologias e tipos de utilização. Foi utilizado em muitos outros casos de estudo e de validação de sistemas de energias renováveis [12], sendo o mais utilizado em trabalhos relacionados com sistemas energéticos híbridos [13].

### 2.6.1 EnergyPlus

O *EnergyPlus* é um programa *open source* de simulação térmica dinâmica de edifícios, que se baseia na descrição que o utilizador oferece do edifício quanto à geometria, construção, sistemas, utilização, etc, e nas condições ambiente em que se encontra. A geometria é normalmente definida noutro programa, já que o *EnergyPlus* não tem uma interface gráfica. Neste trabalho foi utilizado o *Google Sketchup* cujo *plugin Legacy OpenStudio*, desenvolvido também pelo DOE, no NREL, permite exportar a geometria num formato pronto a utilizar pelo *EnergyPlus*. As condições ambiente são definidas através de um ficheiro climático representativo do clima do local.

O programa, com base na informação fornecida pelo utilizador, e cumprindo o balanço de energia e massa, calcula as temperaturas do ar das diferentes zonas térmicas definidas, as cargas térmicas necessárias para manter determinadas temperaturas, caudais de infiltração e de ventilação (caso existam), ganhos solares e outros parâmetros relativos a incidência solar, ganhos internos, etc, através da interação de módulos individuais.

Para simplificar o cálculo, o programa assume que a massa de ar de cada zona térmica se encontra perfeitamente bem misturada e apresenta uma temperatura uniforme em toda a zona, o que não representa exatamente a realidade, mas cuja alternativa passa pela simulação dinâmica de fluídos (CFD). A simulação CFD é exigente computacionalmente e nem sempre conduz a resultados diferenças relevantes [14]. Para além da consideração mencionada, o programa assume ainda:

- Distribuição homogénea da temperatura de cada superfície com a qual se estabelecem trocas de calor;
- Trocas de calor homogéneas entre o ar e as superfícies envolventes;
- Igual emissividade das superfícies para todos os comprimentos de onda;
- Superfícies opacas, à exceção dos materiais constituintes das janelas;
- Condução de calor unidirecional;

A simulação é iniciada pelo módulo de simulação do balanço térmico que começa por atualizar as condições de todas as zonas. Os resultados obtidos são utilizados como *input* do módulo de sistemas, que determina as cargas de aquecimento e arrefecimento de acordo com o intervalo de tempo definido, e estes resultados são utilizados pelo módulo de simulação do balanço térmico que procederá à atualização das condições de cada zona. Para além das condições do ar de uma zona, também as condições das suas superfícies são avaliadas, conforme o que é referido no capítulo 2.4 sobre a difusão de calor (Equação 3). O *EnergyPlus* simula o efeito transiente da energia armazenada e a distribuição de temperatura no interior das superfícies resolvendo a referida equação utilizando algoritmos como funções de transferência por condução ou diferenças finitas. Nas fronteiras das paredes é ainda aplicada transferência de calor por convecção e ganhos radiativos.

Conforme esquematizado na Figura 3, o processo é, no seu todo, controlado pela componente de gestão da simulação.

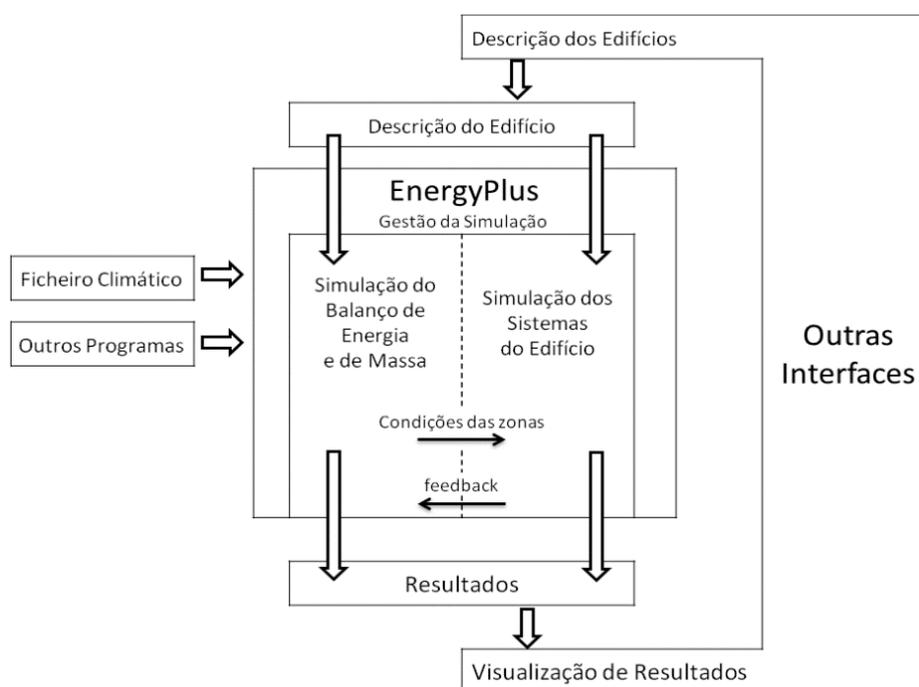


Figura 3 – Esquema base do *EnergyPlus* [adaptado de [15]]

Equação de balanço térmico do ar utilizada pelo *EnergyPlus* numa zona  $z$  [9]:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_s) + \dot{Q}_{sis} \quad (9)$$

Onde:

$C_z \frac{dT_z}{dt}$  – Energia armazenada no ar

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$  – Somatório dos ganhos internos convectivos

$\sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$  – Transferência convectiva de calor das superfícies

$\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$  – Trocas de calor por mistura de ar entre zonas

$\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_s)$  – Trocas de calor por infiltração de ar exterior

$\dot{Q}_{sis}$  – Carga térmica do sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) introduzida na zona

### 2.6.2 HOMER

O *Homer* é um programa de simulação e otimização de sistemas de produção de energia elétrica, interligados ou não à rede, que permite integrar diversas combinações de tecnologias: aerogeradores, painéis fotovoltaicos, turbinas hidroelétricas, geradores a biomassa ou a diesel, pilhas de combustível, baterias, etc. O utilizador fornece informação sobre as tecnologias a utilizar, as suas características, o custo dos componentes e a disponibilidade dos recursos, e o programa avalia diversas configurações, permitindo uma análise económica e técnica destas.

A simulação é efetuada para 8760 h por ano e, em cada hora, é comparada a necessidade energética e a produção do sistema, calculando-se os fluxos de energia entre os seus diversos componentes. Com base nesta informação, o programa tem a capacidade de decidir se as baterias deverão ser carregadas ou descarregadas. Caso a configuração simulada seja viável, ou seja, se o sistema simulado for suficiente para suprir as necessidades energéticas de acordo com as condições especificadas, o programa estima o custo de instalação e operação do sistema durante o tempo de vida do projeto.

#### *Modelação dos painéis fotovoltaicos*

Para que o programa consiga modelar um sistema com produção a partir de módulos fotovoltaicos, o utilizador tem de fornecer não só as características do equipamento, mas também dados de radiação do local. Esses dados são depois processados pelo *HOMER*, que obtém a radiação incidente nos módulos. A potência fornecida pelos painéis fotovoltaicos é calculada da seguinte forma [16]:

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \frac{\bar{G}_T}{\bar{G}_{T,STC}} [1 + \alpha_P (T_c - T_{c,STC})] \quad (10)$$

Onde:

$P_{PV}$  – Potência fornecida pelo painel fotovoltaico [kW]

$Y_{PV}$  – Potência de pico, ou nominal, do painel fotovoltaico [kW]

$f_{PV}$  – Fator de perdas devido a poeira, perdas de transmissão e outras [%]

$\bar{G}_T$  – Radiação solar global incidente no painel no instante considerado [kW/m<sup>2</sup>]

$\bar{G}_{T,STC}$  – Radiação solar global incidente no painel em condições  $STC = 1 \text{ kW/m}^2$

$\alpha_P$  – Coeficiente de temperatura [% / °C]

$T_c$  – Temperatura da célula fotovoltaica no instante considerado[°C]

$T_{c,STC}$  – Temperatura da célula fotovoltaica em condições  $STC = 25^\circ\text{C}$

### **Modelação do aerogerador**

A modelação da produção de um aerogerador requer, para além das características do equipamento, os dados de velocidade de vento de um ano típico no local e a altitude a que são obtidos. O programa calcula a distribuição de Weibull de velocidade do vento (distribuição por classes de velocidade e determinação da frequência de ocorrência dessa velocidade), a correlação entre a velocidade de vento num instante e no instante anterior, e o seu perfil diário, incluindo hora de pico de velocidade. Caso os dados de vento fornecidos não sejam referentes à altitude a que o aerogerador se encontrará, é utilizada a lei das potências ou a logarítmica, de acordo com a escolha do utilizador, para determinar os parâmetros de vento à altitude de instalação. Assim, para modelar a potência fornecida pelo aerogerador, que é modelado como um equipamento que converte a energia cinética do vento em energia elétrica em corrente alternada ou contínua, o programa utiliza a curva de potência deste e, para cada hora, executa 4 passos:

- 1º passo: Determinação da a velocidade média do vento à altura do anemómetro, para cada hora, de acordo com os dados de vento fornecidos;
- 2º passo: Cálculo da velocidade do vento à altitude do aerogerador, utilizando-se a lei logarítmica ou das potências;
- 3º passo: Cálculo da potência fornecida pelo equipamento de acordo com a sua curva de potência e a velocidade do vento no instante, assumindo-se a massa volúmica do ar *standard*:  $1,225 \text{ kg/m}^3$ ;
- 4º passo: Normalização da potência fornecida de acordo com as características do ar no local - multiplicação da potência calculada no passo anterior pelo quociente de massa volúmica (quociente entre a massa volúmica verificada e a *standard*, considerado constante ao longo do ano).

### **Modelação do banco de baterias**

As baterias são modeladas pelo *Homer* como um equipamento que permite armazenar energia elétrica. As suas características são introduzidas pelo utilizador e incluem: curva de capacidade, eficiência de carga e descarga, tensão nominal, profundidade de descarga e curva de tempo de vida.

Fatores externos, como a temperatura, não são considerados como prejudiciais às propriedades da bateria, sendo considerado que estas se mantêm constantes ao longo do tempo de vida do equipamento.

O programa não permite que as baterias sejam descarregadas além da sua profundidade de descarga máxima. Para determinar a carga e descarga máxima das baterias durante a sua operação, o *Homer* modela-as de acordo com o modelo proposto por Manwell e McGowan em “*Lead acid battery storage model for hybrid energy systems*”: parte da capacidade de armazenamento de energia está sempre disponível para carregar ou descarregar, mas a restante tem um limite químico que depende do tempo de descarga e dos processos de carga e descarga ocorridos anteriormente.

### 3. Caso de estudo

#### 3.1 Localização e clima

O edifício em estudo localiza-se na Fazenda Catuçaba, na região de São Luiz do Paraitinga, estado de São Paulo, a cerca de 1000 m de altitude. De acordo com a ABNT NBR 15575-1 [17], localiza-se na zona bioclimática 3 (ZB3). A Fazenda desenvolve alguma atividade agrícola e pecuária para abastecimento próprio mas a principal aposta é no turismo. Recentemente a construção de casas auto-sustentáveis surgiu em plano, procedendo-se ao loteamento de parte da área da fazenda, criando-se 20 lotes de aproximadamente 5 hectares, com licença de construção de uma habitação por lote. O edifício em estudo é uma destas habitações.

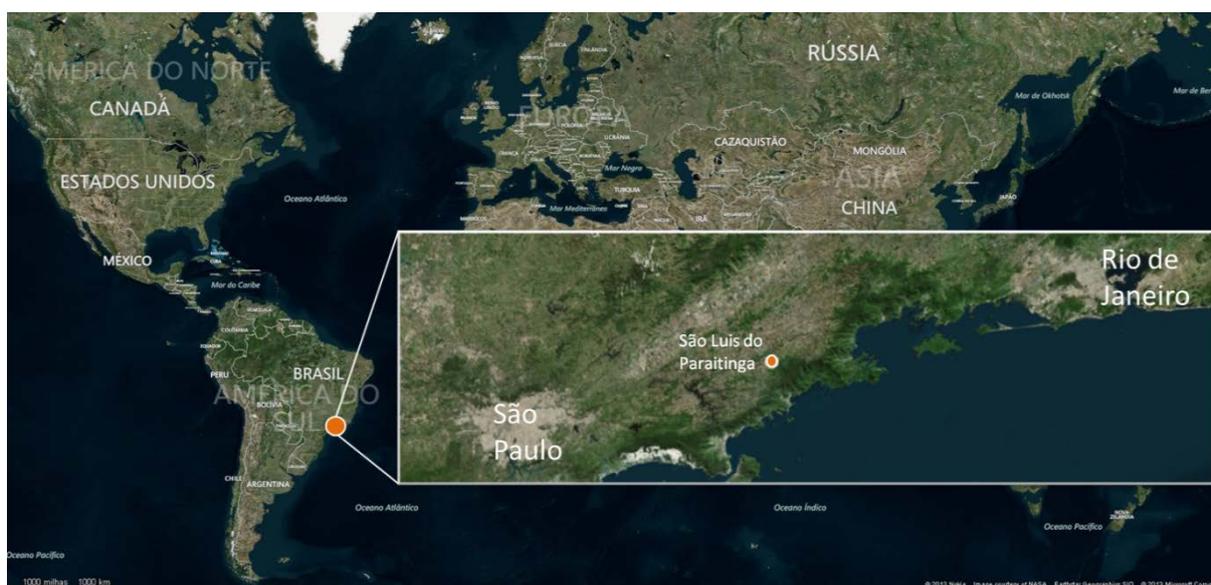


Figura 4 – Localização do edifício em estudo [adaptado de <http://www.bing.com/maps/>]

Através de dados obtidos a partir do *software* Meteornorm e de informações fornecidas pelo proprietário da Fazenda, foi possível a criação de um ficheiro climático representativo de um ano típico, em base horária, que permite caracterizar o clima do local.

Por se encontrar a alguma altitude, o clima de Catuçaba, com temperaturas médias mensais entre os 19,3°C (Fevereiro) e 12,8°C (Julho), tem amplitudes térmicas diárias significativas, sendo a amplitude média diária do mês mais quente de 7,6°C. Ocorrem por vezes períodos de nevoeiro intenso e persistente, tipicamente nos meses de Maio e Julho, que duram até 3 a 4 dias, levando a que, devido à elevada humidade que se faz sentir, a sensação de temperatura seja até 8°C inferior à temperatura de bolbo seco registada.

Apesar disso, é um local com elevados níveis de radiação (radiação solar total, em plano horizontal: ~1500 kWh/m<sup>2</sup>.ano), relativamente consistente ao longo do ano.

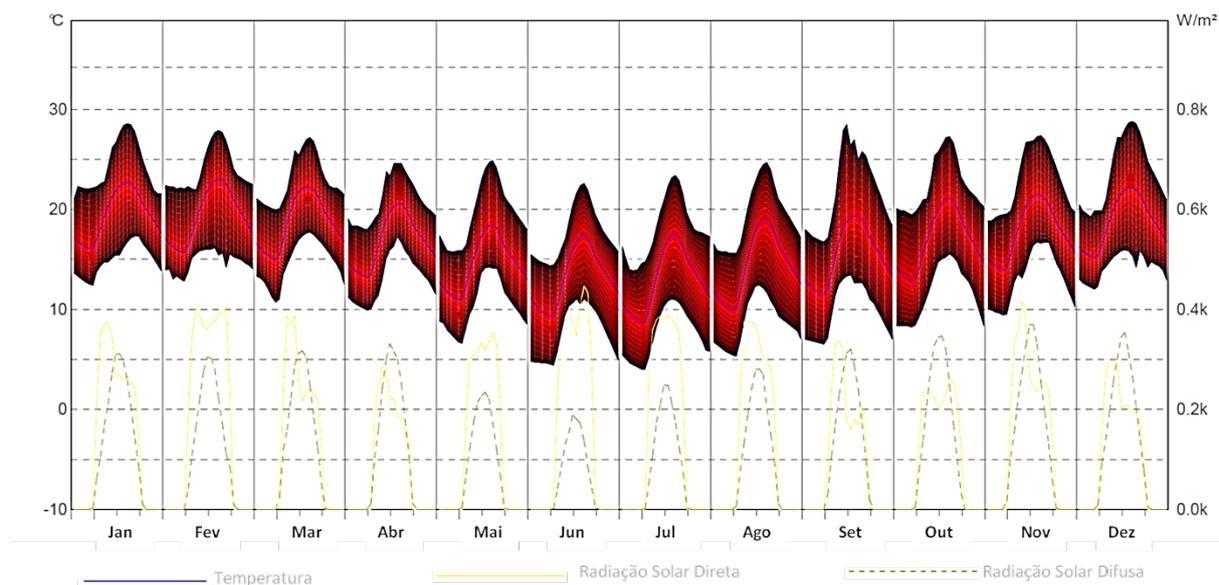


Figura 5 – Dados meteorológicos de Catuçaba: Médias mensais diárias

Na figura abaixo pode-se verificar que a temperatura em Catuçaba, na maior parte do ano, encontra-se entre os 13°C e os 21°C (63% do tempo). Destaque para a gama de temperaturas entre os 17°C e os 25°C que ocorre em 44% do ano e que contribui positivamente para a possibilidade de obtenção de conforto térmico sem necessidade de recurso a sistemas de climatização. Na mesma figura, à direita, é possível observar que existe uma coincidência entre temperaturas máximas baixas e ligeiras amplitudes térmicas diárias, bem como entre temperaturas máximas mais elevadas e maiores amplitudes térmicas diárias.

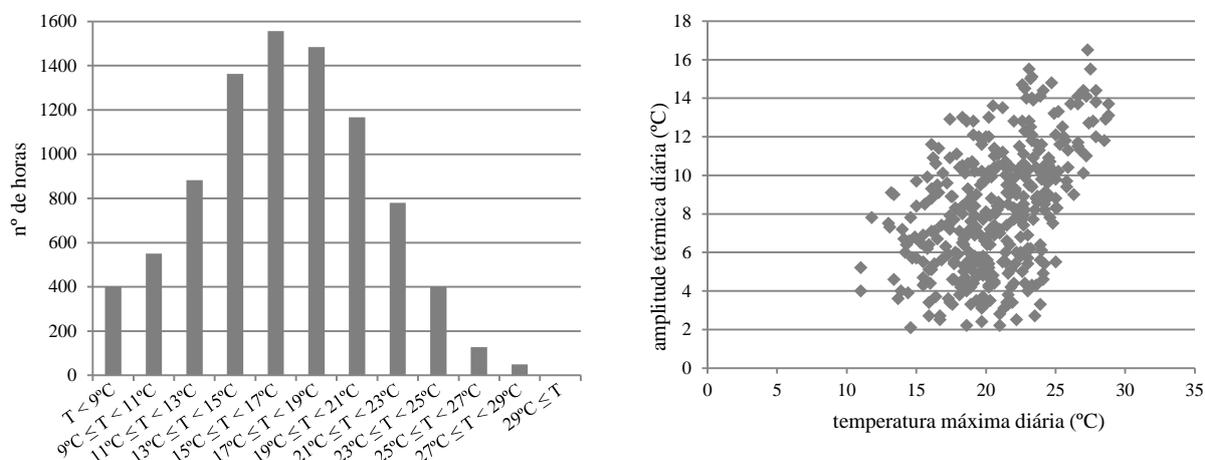


Figura 6 – Número de horas anual de ocorrência de temperaturas (esquerda) e relação entre temperatura máxima diária e amplitude térmica diária (direita)

### 3.2 Arquitetura

O edifício é de planta retangular, composto por 3 quartos, um deles com casa de banho individual, sala com zona de estar, de refeições e cozinha, circulação e uma casa de banho comum. Devido à inclinação da colina em que será implantado, o edifício será parcialmente suspenso, não havendo contacto entre o pavimento e o terreno (com exceção da zona técnica que será semienterrada). Existirá um *deck* na lateral Oeste, que se estenderá ao alçado Norte e ao Sul, permitindo a existência de um espaço de estar exterior, que será coberto. A solução construtiva será em geral leve permitindo uma reduzida massa da casa, um método construtivo simplificado e uma rápida construção. A sala terá a

sua envolvente vertical em vidro, e existirão vãos nos quartos de modo a permitir o benefício de ganhos solares nos dias mais frios. Para evitar os ganhos solares em dias quentes, e manutenção de privacidade, existirão grandes ripados de madeira móveis e portadas de correr que permitirão sombrear a fachada norte e o espaço de estar coberto.

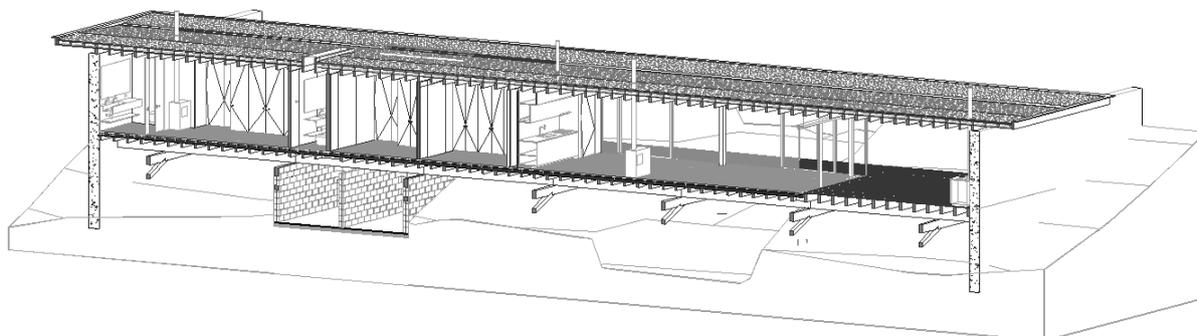


Figura 7 – Corte longitudinal da habitação em estudo, vista de Norte (projeto de arquitetura)

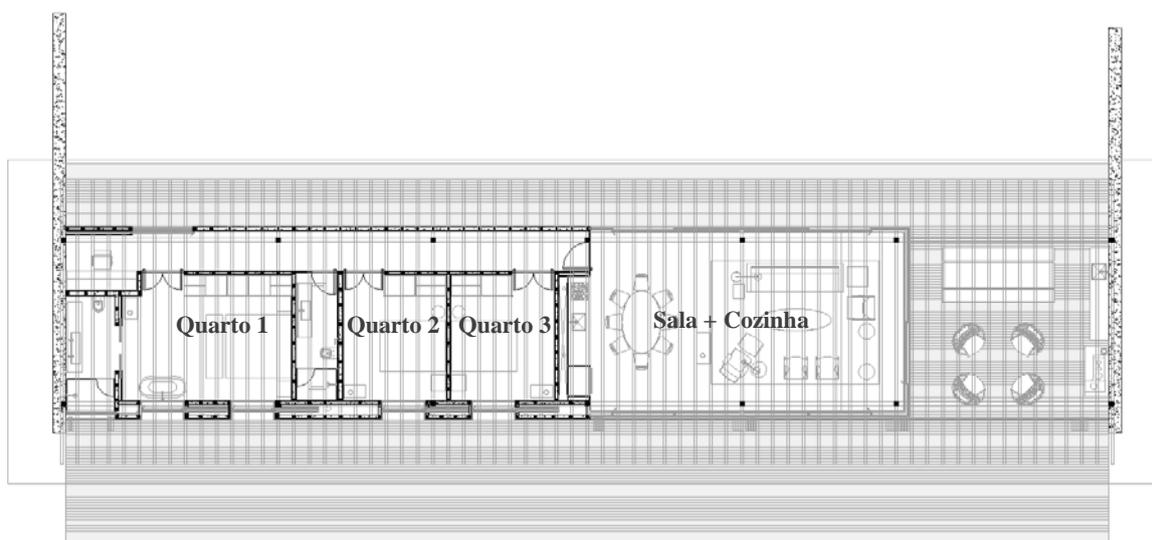


Figura 8 – Planta da habitação em estudo, Sul para cima (projeto de arquitetura)

### 3.3 Primeira fase: medidas de otimização

Numa análise ao projeto inicial do edifício, foram identificados alguns aspetos que comprometiam o seu comportamento térmico. De acordo com isto, foram impostas algumas alterações importantes do ponto de vista de desempenho térmico e conforto da habitação:

#### *Isolamento térmico da cobertura*

Inicialmente estava prevista a construção de uma cobertura verde, que permitisse a redução do efeito de ilha de calor e gestão das águas pluviais, funcionando também como elemento com alguma inércia e isolamento térmico. No entanto, a sobrecarga estrutural inerente, necessidade de manutenção, possibilidade de sombreamento dos sistemas de captação solar e o facto de, em meio rural, a redução da ilha de calor não ter elevada relevância, optou-se por deixar de parte esta opção. Assim, e de modo a diminuir a perda de calor durante a estação fria e os ganhos térmicos durante a estação quente, surgiu

a necessidade de colocação de isolamento térmico reforçado, que preencherá os espaços de ar da solução.

### ***Inércia Térmica no pavimento***

A inércia térmica tem um papel fundamental no desempenho térmico dos edifícios e no conforto térmico dos ocupantes, permitindo que a temperatura interior do edifício não tenha flutuações tão relevantes como a temperatura no exterior, podendo-se conseguir uma diferença superior a 10°C entre a temperatura exterior e a interior de um edifício, em climas com amplitude térmica diária superior a 10°C [18]. Assim, pelo facto de a construção ser leve e dado ter-se amplitudes térmicas consideráveis nos dias mais quentes torna-se essencial a existência de inércia térmica no edifício em estudo, que assegure menores amplitudes térmicas no seu interior. Optou-se por aplicar uma camada pesada no pavimento de todo o edifício, isolando-o pelo exterior.

### ***Ventilação natural***

Uma estratégia importante de arrefecimento passivo é a combinação da inércia térmica com a ventilação natural, que permita arrefecimento noturno nos dias mais quentes. A implementação de aberturas a nível alto nas fachadas e entre os quartos e o corredor favorece a ventilação natural por efeito chaminé, permitindo a remoção de calor sem efeitos incómodos de velocidade excessiva de ar na zona ocupada. Estas aberturas possibilitam também a admissão de ar novo, promovendo a qualidade do ar interior da habitação.

### ***Orientação***

Um controlo solar relevante (sombreamento exterior fixo e móvel) combinado com ventilação natural permitem que diferentes orientações tenham pequenas diferenças em termos de necessidades de arrefecimento. Deste modo, a orientação da habitação deverá ter em consideração a melhor exposição a ganhos solares úteis [19]. Assim, os quartos e espaços de permanência prolongada deverão estar orientados a norte e os espaços de circulação a sul. No entanto, uma discrepância de cerca de 25° em relação ao norte puro não tem um impacto significativo, pelo que a implantação poderá estar em consonância com a orografia, que neste local, tem a sua vertente inclinada desviada do puro norte 24° para oeste.

### ***Vidro duplo e redução de área de envidraçado***

O vidro considerado no projeto inicial era vidro simples, uma solução corrente no Brasil, mesmo em regiões mais frias. No entanto, dada a grande área de envidraçado da casa, o facto de a transferência de calor através de um vidro simples ser cerca de 6 vezes superior à verificada através de uma parede leve com 9 cm de isolamento é bastante relevante e leva a grandes assimetrias térmicas que provocam desconforto dos ocupantes. Assim, optou-se por alterar os vãos para vidro duplo.

Para além disso, para um clima temperado, uma elevada área de envidraçado leva a grandes necessidades de arrefecimento, muitas vezes não passíveis de controlo por ventilação natural [19]. No caso da habitação em estudo, e dado não estar previsto um sistema de arrefecimento ativo, esta situação pode levar a desconforto térmico dos utilizadores, pelo que foi também pedida uma redução da área de vidro. Devido à localização da habitação e à necessidade de se proporcionar contato com o exterior, a área de envidraçado apenas foi reduzida no corredor.

## **3.4 Soluções construtivas**

As paredes exteriores, que constituem envolvente norte dos quartos, casas de banho e sala/cozinha, são paredes leves com dupla estrutura de madeira isolada termicamente na caixa-de-ar, espaçadas entre si o suficiente para permitir a recolha dos vãos de correr, e forro exterior em ripado de eucalipto.

A parede exterior que constitui envolvente sul do corredor é uma parede leve com estrutura de madeira isolada termicamente na caixa-de-ar.

A parede exterior que constitui envolvente este do corredor e da casa de banho da *suite* (quarto 1) é uma parede de solo-cimento.

Existem ainda outros elementos de envolvente opaca vertical: Vigas de madeira longitudinais, uma a norte e outra a sul, protegidas por chapa de aço corten, sobre as quais assentam as vigas transversais em madeira que suportam a cobertura. O espaço entre as vigas transversais é ocupado por pequenas placas, também de madeira, com possibilidade de abertura ou não – esta solução é também utilizada no interior da habitação para permitir trocas de ar entre os quartos e o corredor sem ser necessária a abertura de portas.

As paredes interiores da habitação são também leves, em painéis duplos de gesso cartonado isolados na caixa-de-ar (acusticamente importante).

A cobertura é constituída por uma placa cimentícia exterior, isolada termicamente e forrada a madeira pelo interior.

O pavimento é apoiado numa placa cimentícia, isolada termicamente pelo exterior, sobre a qual assenta o piso em tijolo maciço. Esta é a única solução construtiva com papel relevante na inércia do edifício.

Tabela 2 – Caracterização do exterior para o interior das soluções construtivas utilizadas [8]

Material	Espessura [m]	Condutibilidade térmica [W/(m.K)]	Resistência térmica [(m <sup>2</sup> .K)/W]	Massa volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]	Calor específico [J/(kg.K)]	U total* [W/m <sup>2</sup> .K]	Capacidade térmica** [kJ/(kg.K)]
<b>Parede exterior norte</b>							
Placa OSB	0.008	0.11	0.07	650	1880		
Montantes de madeira preenchidos com lâ de PET	0.09	0.065	0.95				
Placa OSB	0.008	0.11	0.07	650	1880		
Caixa-de-ar	0.338		0.18				
Placa OSB	0.008	0.11	0.07	650	1880		
Montantes de madeira preenchidos com lâ de PET	0.09	0.065	0.95				
Placa OSB	0.008	0.11	0.07	650	1880	<b>0.40</b>	<b>9.78</b>
<b>Parede exterior sul</b>							
Placa OSB	0.008	0.11	0.07	650	1880		
Montantes de madeira preenchidos com lâ de PET	0.09	0.065	0.95	0	0		
Placa OSB	0.008	0.11	0.07	650	1880	<b>0.79</b>	<b>9.78</b>
<b>Parede exterior este</b>							
Solo-cimento	0.4	1.1	0.36	1800	880	<b>1.89</b>	<b>633.6</b>
<b>Viga longitudinal</b>							
Chapa aço corten	0.008	45.3	0	7830	500		
Madeira maciça	0.14	0.16	0.88	600	1630	<b>0.95</b>	<b>168.24</b>

Material	Espessura [m]	Condutibilidade térmica [W/(m.K)]	Resistência térmica [(m <sup>2</sup> .K)/W]	Massa volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]	Calor específico [J/(kg.K)]	U total* [W/m <sup>2</sup> .K]	Capacidade térmica** [kJ/(kg.K)]
<b>Viga transversal este e oeste</b>							
Madeira maciça	0.08	0.16	0.50	600	1630	<b>1.49</b>	<b>78.24</b>
<b>Aberturas e placas entre vigas</b>							
Madeira	0.015	0.16	0.09	600	1630	<b>3.85</b>	<b>14.67</b>
<b>Pavimento</b>							
Montantes de madeira preenchidos com lã de PET	0.05	0.065	1.091				
Painel Wall	0.055	0.14	0.39	682	1000		
Lajeta de concreto	0.045	1.65	0.03	2080	850		
Massa de assentamento	0.015	1.4	0.01	1400	840		
Piso tijolo maciço	0.05	0.875	0.06	1920	800	<b>0.56</b>	<b>174</b>
<b>Cobertura</b>							
Painel Wall	0.04	0.10	0.40	800	1000		
Vigas de madeira preenchidos com lã de PET	entre 7 e 15 cm	0.04	1.30				
Forro de madeira	0.02	0.16	0.13	600	1630	<b>0.51</b>	<b>19.56</b>
<b>Paredes interiores</b>							
Placas dupla de gesso cartonado	0.025	0.16	0.16	640	1150		
Lã de PET	0.075	0.065	1.15	0	0		
Placas dupla de gesso cartonado	0.025	0.16	0.16	640	1150	<b>0.58</b>	<b>18.4</b>

\* Os valores apresentados incluem resistências térmicas superficiais

\*\* Apenas se considerou a capacidade térmica das camadas do lado interior do isolamento térmico

Os vãos envidraçados, em vidro duplo corrente, são constituídos por: vidro exterior tipo SGG Planilux ou equivalente com 6mm; caixa-de-ar de 8mm; e vidro interior tipo SGG Planilux de 6mm ou equivalente, caixilharia em madeira,  $U=3,3 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ . Os vãos sul e oeste não são sombreados. Os vãos dos quartos são protegidos por portadas de madeira totalmente opacas (com sombreamento 100% ativo  $U=2,5 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ ), e os da sala (a norte) e casa de banho da suite por painéis de correr em ripado (com sombreamento 100% ativo  $U=2,8 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ ).

O vão horizontal da casa de banho social será constituído por: vidro exterior de baixa emissividade tipo SGG SKN 154 de 8mm, caixa-de-ar de 8mm; e vidro interior tipo SGG Planilux ou equivalente de 8mm, caixilharia em madeira,  $U=3,08 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ . [20]

### 3.5 Enquadramento regulamentar brasileiro para a eficiência energética

No Brasil, o primeiro programa de promoção de eficiência energética, o Programa Conserve, dedicado à indústria, foi criado em 1981. Em 1985, a criação do PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Energética – teve como objetivo a integração de outras ações de conservação de energia elétrica no país que foram sendo desenvolvidas. Apesar disto, foram sucessivos os problemas na

produção e distribuição de energia elétrica em 2001. A necessidade do racionamento desta levou à criação da Lei da Eficiência Energética (Lei nº 10295). Esta Lei, que dispõe sobre a política nacional de conservação e uso racional de energia, estabelece, entre outros, que o Poder Executivo é responsável por desenvolver mecanismos para a promoção da eficiência energética nos edifícios construídos no país [21]. Em 2003 é criado o PROCEL Edifica - Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações.

Ao abrigo deste programa, em 2010 é lançado o RTQ-R – Regulamento Técnico para Eficiência Energética de Edificações Residenciais, que, apesar de não ser obrigatório, tem como objetivo criar condições para a classificação da eficiência energética de edifícios residenciais e, assim, promovê-la, especificando os requisitos técnicos necessários.

O RTQ-R permite a obtenção de uma ENCE (Etiqueta Nacional de Conservação de Energia) do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro) para os edifícios estudados. As ENCE, no entanto, não são apenas atribuídas a edifícios mas também a eletrodomésticos, veículos e diversos equipamentos, classificando os produtos de acordo com a sua eficiência por meio de atribuição de letras entre A (mais eficiente) e G (menos eficiente – dependendo do produto a classificação menos eficiente pode estar escalada entre C e G) e fornecendo outras informações relevantes como o consumo anual de energia, ou de água, por exemplo.

Para além das ENCE existe também o Selo PROCEL, instituído em 1993, que é atribuído aos equipamentos mais eficientes de entre cada categoria. É expectável que os produtos contemplados com um Selo PROCEL sejam classificados com uma ENCE A.

Para além de facultar ao consumidor informações sobre a eficiência dos produtos que adquire, com estas medidas é esperado estimular o fabrico e comercialização de produtos mais eficientes.

A premissa para o caso em estudo é a obtenção de ENCE A pela aplicação do RTQ-R e a utilização de eletrodomésticos com Selo PROCEL ou ENCE A ou B.



Figura 9 –ENCE tipo (à esquerda) [de [http://www2.inmetro.gov.br/pbe/a\\_etiqueta.php](http://www2.inmetro.gov.br/pbe/a_etiqueta.php)] e Selo PROCEL (à direita) [<http://www.eletronbras.com/elb/procel/> ]

#### 4. Análise Regulamentar: RTQ-R

O RTQ-R permite atribuir uma classificação aos edifícios sujeitos a avaliação, seguindo um padrão muito semelhante ao que é utilizado a nível Europeu: é atribuída uma letra que varia entre A (mais eficiente) e E (menos eficiente).

Podem ser avaliadas *Unidades habitacionais autónomas*, *Edificações multifamiliares* ou *Áreas de Uso Comum de edificações multifamiliares ou de condomínios de edificações residenciais*.

A avaliação das unidades habitacionais autónomas (edifícios unifamiliares ou frações autónomas de edifícios multifamiliares), tipo de edifício em foco, compreende a avaliação obrigatória da envolvente do edifício – *envoltória* – e do sistema de aquecimento de água. Esta avaliação resulta numa pontuação atribuída a cada aspeto avaliado: o *Equivalente Numérico da Envoltória* (*EqNumEnv*) e o *Equivalente Numérico do Sistema de Aquecimento de Água* (*EqNumAA*).

À pontuação atribuída corresponde a um nível de eficiência, de acordo com a Tabela 3:

Tabela 3 – Nível de eficiência atribuído a cada Equivalente Numérico (EqNum)

EqNum	Nível de Eficiência
5	A
4	B
3	C
2	D
1	E

A classificação final do desempenho energético da *Unidade Habitacional* (UH) é obtida através da ponderação dos dois itens avaliados, sendo ainda possível a obtenção de pontuação extra relativa a *Bonificações*, tal como definido pela Equação 11.

$$PT_{UH} = (a \times EqNumEnv) + [(1 - a) \times EqNumAA] + Bonificações \quad (11)$$

A ponderação é definida pelo coeficiente  $a$ , que depende da região geográfica em que o caso em estudo se localiza. Dado o edifício em estudo se encontrar na região sudeste do Brasil,  $a$  toma o valor 0,65.

As *bonificações* referem-se a sete itens: *ventilação e iluminação natural, uso racional da água, condicionamento artificial de ar, iluminação artificial, ventiladores de teto, refrigeradores e medição individualizada*, podendo atingir o máximo de 1 ponto.

O nível de eficiência da *Unidade Habitacional Autónoma* é definido de acordo com a Tabela 4, tendo em consideração a pontuação total obtida.

Tabela 4 – Classificação do nível de eficiência de acordo com a pontuação obtida

Pontuação (PT)	Nível de Eficiência
$PT \geq 4,5$	A
$3,5 \leq PT < 4,5$	B
$2,5 \leq PT < 3,5$	C
$1,5 \leq PT < 2,5$	D
$PT < 1,5$	E

No esquema seguinte pode-se encontrar o resumo do método de Avaliação da Eficiência da *Unidade Habitacional Autónoma* de acordo com o RTQ-R.

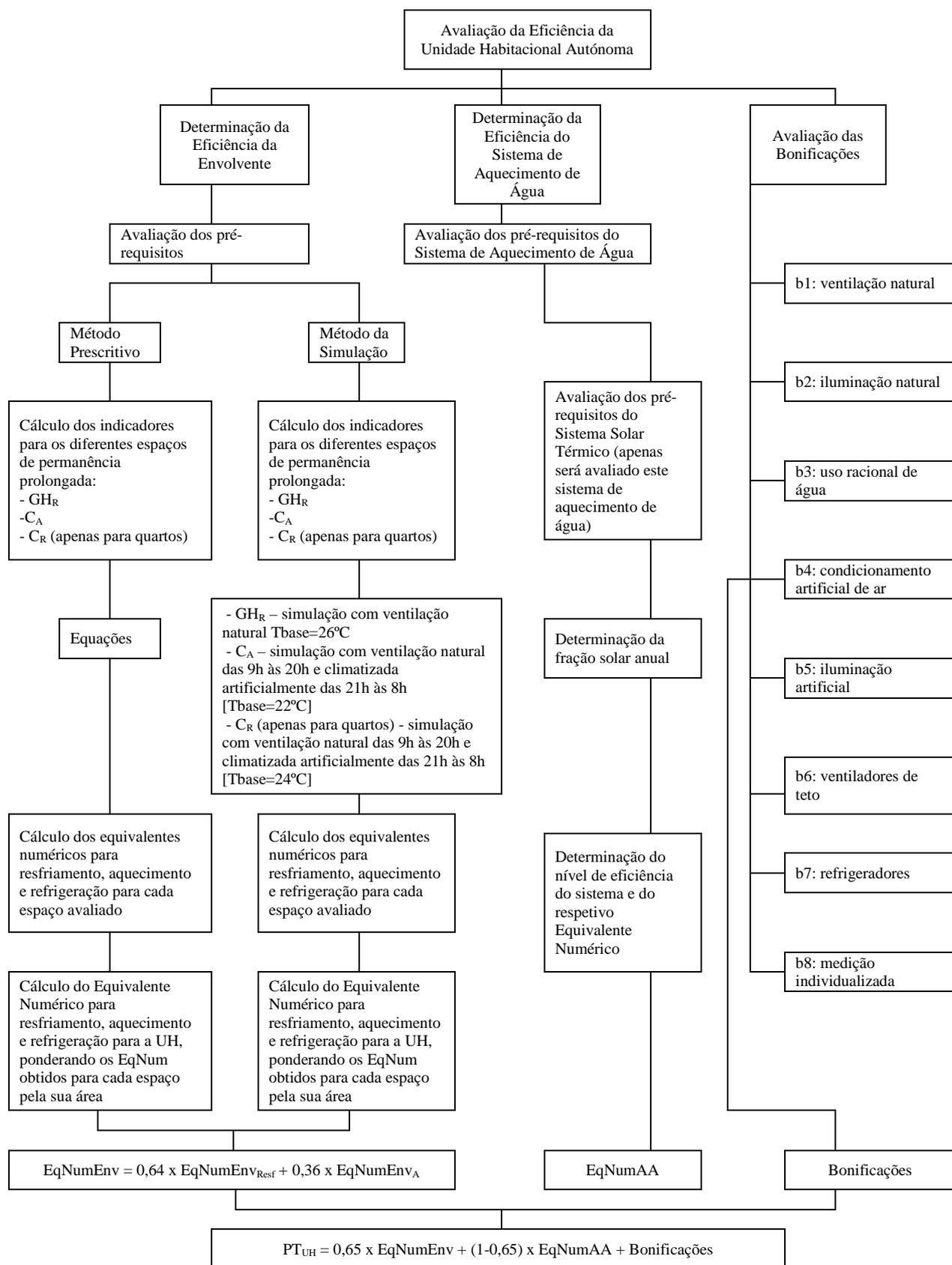


Figura 10 – Esquema resumo da metodologia do RTQ-R para Unidades Habitacionais Autónomas

## 4.1 Avaliação da Envolvente

A avaliação da envolvente tem como objetivo verificar a existência de conformidade entre esta e o padrão construtivo existente (e o referente consumo energético) para as condições climáticas predominantes em cada região.

A envolvente é avaliada através do seu equivalente numérico, calculado com base no *equivalente numérico da envoltória para resfriamento* ( $EqNumEnv_{Resf}$ ) e no *equivalente numérico da envoltória para aquecimento* ( $EqNumEnv_A$ ). Estes parâmetros são inicialmente obtidos para cada um dos espaços a avaliar e, posteriormente, é feita uma ponderação dos resultados obtidos para cada espaço pela área do espaço em questão de modo a aferir-se o equivalente numérico global do edifício.

Para determinar estes equivalentes numéricos obtém-se um indicador de *graus hora de resfriamento* ( $GH_R$ ) e um indicador de *consumo relativo para aquecimento* ( $C_A$ ). É ainda obtido um indicador de *consumo relativo para refrigeração* ( $C_R$ ) que tem um caráter apenas indicativo.

- O indicador de *graus hora de resfriamento* ( $GH_R$ ) pretende avaliar o desempenho térmico da habitação quando naturalmente ventilada, utilizando uma temperatura de referência, independente de temperaturas de conforto. Este indicador representa o somatório anual de graus-hora, calculado para a temperatura base de 26°C para resfriamento. O cálculo é realizado através da temperatura operativa do ambiente, apenas para diferenças positivas.

- O indicador de *consumo relativo para aquecimento* ( $C_A$ ) pretende contabilizar o consumo anual de energia que é necessária para aquecimento de um espaço durante o período das 21h às 8h, todos os dias do ano, com manutenção da temperatura em 22°C. Este consumo tem um caráter relativo, utilizado para avaliar o desempenho da envolvente, não refletindo o consumo real. O indicador é obtido para todos os ambientes de permanência prolongada (exemplo: quartos e salas. No caso de a cozinha não estar separada da sala, a sua área é contabilizada como fazendo parte desta). Este indicador é calculado apenas para os edifícios localizados nas zonas bioclimáticas 1 a 4.

- O indicador de *consumo relativo para refrigeração* ( $C_R$ ), de caráter apenas indicativo, pretende contabilizar o consumo anual de energia que é necessária para arrefecimento de um espaço durante o mesmo período que o anterior, com manutenção da temperatura em 24°C. Este consumo, tal como o anterior, tem um caráter relativo.

Os indicadores acima descritos podem ser obtidos por dois métodos, o método prescritivo e o método da simulação, apresentados nos capítulos 4.1.1 e 4.1.2, respetivamente.

O RTQ-R impõe ainda pré-requisitos para a envolvente, que serão discutidos no capítulo 4.5.

### 4.1.1 Método prescritivo

O método prescritivo é um método simplificado que permite o cálculo dos indicadores apresentados através da aplicação de equações lineares de regressão múltipla. Estas equações constam do RTQ-R, tendo sido obtidas através da simulação energética de diversos casos, para diferentes zonas bioclimáticas. (Na secção ii) do Anexo I pode ser encontrada informação mais completa sobre o método de cálculo)

Neste trabalho foi utilizada uma folha de cálculo disponibilizado no *site* do CB3E (Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações) [22] que auxilia a avaliação dos edifícios em estudo e que atribui os equivalentes numéricos de acordo com as condições expressas na tabela seguinte.

Tabela 5 – *Equivalentes numéricos da envoltória* de acordo com o método prescritivo

Eficiência	$EqNumEnv_{Amb_{Resf}}$	Condição	$EqNumEnv_{Amb_A}$	Condição [kWh/(m <sup>2</sup> .ano)]
A	5	$GH_R \leq 822$	5	$C_A \leq 6,429$
B	4	$822 < GH_R \leq 1643$	4	$6,429 < C_A \leq 12,858$
C	3	$1643 < GH_R \leq 2465$	3	$12,858 < C_A \leq 19,287$
D	2	$2465 < GH_R \leq 3286$	2	$19,287 < C_A \leq 25,716$
E	1	$GH_R > 3286$	1	$C_A > 25,716$

Após preenchimento da folha de cálculo referida (secção i) do Anexo II), foram obtidos os seguintes resultados:

Tabela 6 – Resultados obtidos na avaliação da *envoltória* pelo método prescritivo

Espaço	Área	$C_{R_2}$ [kWh/(m <sup>2</sup> .ano)]	GH <sub>R</sub>	EqNumEnv <sub>Resf</sub>	$C_A$ [kWh/(m <sup>2</sup> .ano)]	EqNumEnv <sub>A</sub>
Quarto 1	20,69	11,248	1416	4,00	8,348	4,00
Quarto 2	12,94	13,837	1581	4,00	8,010	4,00
Quarto 3	13,02	13,788	1574	4,00	7,966	4,00
Sala + Cozinha	58,83	8,541	2372	3,00	10,496	4,00
<b>Total</b>	105,49			<b>3,44</b>		<b>4,00</b>

Pode verificar-se que, por ser um espaço com a sua envolvente vertical totalmente envidraçada, e por isso mais exposto às condições exteriores, a Sala e Cozinha têm um desempenho pior que os quartos no que toca a arrefecimento passivo, necessitando também de mais energia para aquecimento.

#### 4.1.2 Método da simulação

O método da simulação permite o cálculo dos mesmos indicadores que o método anterior mas definindo parâmetros para modelação e simulação energética do edifício em estudo, permitindo uma análise mais detalhada e de edifícios mais complexos.

Para poderem ser utilizados na aplicação deste método, o regulamento explicita características que tanto o programa de simulação como o ficheiro climático a utilizar têm de cumprir.

Por cumprir os pré-requisitos indicados optou-se por simular o edifício em *EnergyPlus*, descrito em 2.6.1. O ficheiro climático utilizado foi o de São Paulo (TRY – *Test Reference Year*) [23], por ser representativo da Zona Bioclimática em que o edifício se encontra.

Apesar de ser disponibilizado um ficheiro climático de um local mais próximo da Fazenda Catuçaba, o de São Luiz do Paraitinga, ainda não existem tabelas de classificação para este local, pelo que não é possível, utilizando este ficheiro, atribuir os indicadores requeridos.

##### 4.1.2.1 Zonamento e modelo geométrico

O regulamento indica que a envolvente deve ser definida tal como consta no projeto do edifício em avaliação. Cada espaço do edifício deve ser modelado como uma zona térmica, mesmo que seja espectável que tenha um comportamento térmico semelhante a outros espaços, devendo ser caracterizado em termos de geometria, soluções construtivas, sombreamento e orientação conforme projeto. Assim, considerando o projeto de arquitetura (Figura 7 e Figura 8), definiu-se o seguinte zonamento:

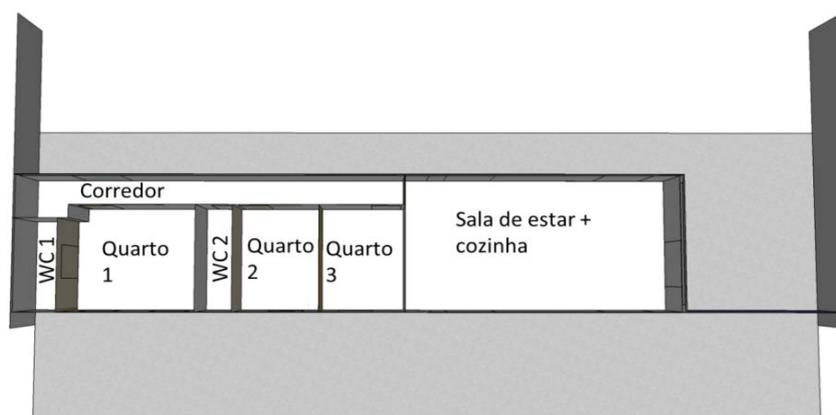


Figura 11 – Zonamento adotado para a simulação

O modelo geométrico foi construído com recurso ao *plugin Legacy OpenStudio* do *Google Sketchup*, e posteriormente caracterizado de acordo com as soluções construtivas (Tabela 2) do edifício no *EnergyPlus*:

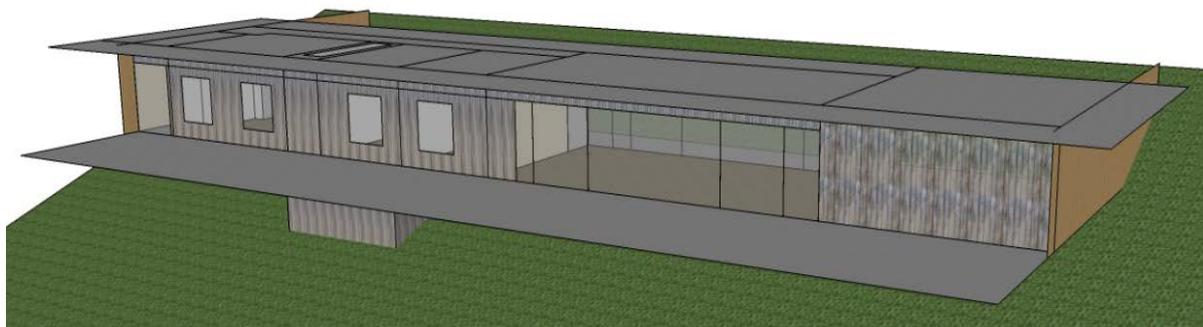


Figura 12 – Modelo do edifício, vista da fachada norte (imagem do *Google Sketchup*)

#### 4.1.2.2 Condições de simulação

Para obter os indicadores necessários são necessárias duas simulações. A primeira, para obter o indicador de *graus hora de resfriamento* ( $GH_R$ ), simula a habitação quando é naturalmente ventilada. A segunda, para obter os indicadores de consumo para aquecimento e arrefecimento ( $C_A$  e  $C_R$ ), considera a habitação naturalmente ventilada, de acordo com as condições de simulação utilizadas para a obtenção do indicador de  $GH_R$ , das 9h às 20h, e climatizada mecanicamente durante o restante período, das 21h às 8h.

Apesar de serem duas simulações, existem condições que se mantêm em ambas: o padrão de ocupação, de iluminação, de utilização de equipamentos e taxa metabólica. Estes padrões, expostos na Tabela 7, são descritos no RTQ-R, independentemente do que é projetado (por exemplo, todos os quartos terão de ser simulados com 2 ocupantes, apesar de poderem ser quartos de solteiro).

Tabela 7 – Padrões de ocupação, iluminação e utilização de equipamentos considerados

Quartos		Sala	
Semana	Fim de semana	Semana	Fim de semana
<b>Ocupação</b>			
00h - 07h: 100%	00h - 09h: 100%	00h - 14h: 0%	00h - 10h: 0%
07h - 20h: 0%	09h - 10h: 50%	14h - 18h: 25%	10h - 11h: 25%
20h - 21h: 50%	10h - 20h: 0%	18h - 19h: 100%	11h - 12h: 75%
21h - 24h: 100%	20h - 21h: 50%	19h - 21h: 50%	12h - 13h: 0%
	21h - 24h: 100%	21h - 24h: 0%	13h - 14h: 75%
			14h - 17h: 50%
			17h - 19h: 25%
			19h - 21h: 50%
			21h - 24h: 0%
<b>Taxa metabólica</b>			
Calor produzido (W/m <sup>2</sup> )			
45		60	
Calor produzido para área de pele = 1,80 m <sup>2</sup>			
81		108	

Quartos				Sala			
Semana		Fim de semana		Semana		Fim de semana	
<b>Iluminação</b>							
00h - 06h:	0%	00h - 08h:	0%	00h - 16h:	0%	00h - 10h:	0%
06h - 07h:	100%	08h - 09h:	100%	16h - 21h:	100%	10h - 12h:	100%
07h - 20h:	0%	09h - 20h:	0%	21h - 24h:	0%	12h - 16h:	0%
20h - 22h:	100%	20h - 22h:	100%			16h - 21h:	100%
22h - 24h:	0%	22h - 24h:	0%			21h - 24h:	0%
<b>Densidade de potência instalada de iluminação (W/m<sup>2</sup>)</b>							
5				6			
<b>Cargas internas de equipamentos (W/m<sup>2</sup>)</b>							
0				1.5		01h - 24h: 100%	

Para além destes padrões, outros aspetos são mantidos entre simulações, como os algoritmos de modelação de sombreamento, transferência de calor e de balanço de energia – os adotados por defeito pelo programa. Também são mantidos os parâmetros de simulação da ventilação natural, conforme requisitos do RTQ-R:

- Todas as aberturas para ventilação são modeladas de acordo com o projeto;
- O coeficiente de rugosidade do terreno é definido como 0,33 (apesar de representar um terreno de centro urbano no qual pelo menos 50% dos edifícios têm uma altura superior a 21m);
- Os coeficientes de pressão superficial ( $C_p$ ) são definidos através do banco de dados de estudos em túnel de vento *CP Generator* (disponível em [cpgen.bouw.tno.nl/cp/](http://cpgen.bouw.tno.nl/cp/));
- O coeficiente de descarga ( $C_D$ ) de janelas e portas é definido como 0,60;
- O coeficiente de fluxo de ar por frestas ( $C_Q$ ) para janelas e portas é definido como 0,001 kg/(s.m) e o expoente deste fluxo como 0,65;

### ***Habitação naturalmente ventilada***

Para além dos parâmetros já indicados, para obter o indicador de *graus hora de resfriamento* ( $GH_R$ ) é necessário definir as condições necessárias para que as portas e janelas possam abrir e para que os sombreamentos móveis se apliquem. Optou-se por uma estratégia de controlo através de temperatura e padrões horários. Para cada hora, consoante um padrão definido, o sombreamento é aplicado se o padrão o permitir e, de acordo com a temperatura definida, as portas e janelas poderão ser abertas se:

$$\text{Temperatura da zona} > \text{Temperatura exterior e}$$

$$\text{Temperatura da zona} > \text{Temperatura definida no padrão}$$

Por se tratar de condições que podem ser alteradas consoante a altura do ano, optou-se por as diferenciar para cada 3 meses, de modo a adaptá-las a temperaturas exteriores e padrões de conforto diferentes. Por outro lado, dado os espaços terem comportamentos térmicos diferentes, criaram-se 3 padrões diferentes:

- Padrão do quarto 1, por este ter um comportamento diferente dos restantes quartos: tem uma maior área, duas janelas e, portanto, maiores perdas térmicas;
- Padrão do quarto 2 e 3, que têm um comportamento bastante semelhante;
- Padrão da Sala e Cozinha, espaço com um comportamento térmico completamente diferente dos restantes por apresentar as suas fachadas envidraçadas – está muito mais exposto às condições exteriores, sendo mais difícil mantê-lo com condições de conforto.

Dado a temperatura base para cálculo do indicador ser de 26°C, optou-se por permitir a abertura de janelas de modo a prevenir que esta temperatura seja atingida nos diferentes espaços, recorrendo

também à ventilação noturna, para temperaturas que não prejudiquem o conforto dos ocupantes, mas permitindo um ligeiro arrefecimento nos dias mais quentes.

Com a abertura das janelas e aberturas do topo das fachadas, conjugou-se a utilização dos sombreamentos móveis, que, para além de serem aplicados durante a noite, se pretende que atuem como controlo solar, evitando ganhos excessivos nos dias mais quentes e nos dias de maior incidência solar - esta última apenas nos espaços que atingem temperaturas mais elevadas (quartos 2 e 3 e Sala e Cozinha).

O padrão de sombreamento (preenchimento cinza nas horas em que estão aplicados) e de temperaturas definidas para abertura das janelas e aberturas de topo das fachadas consta na Figura 13, onde se pode observar também as temperaturas horárias médias para cada 3 meses:

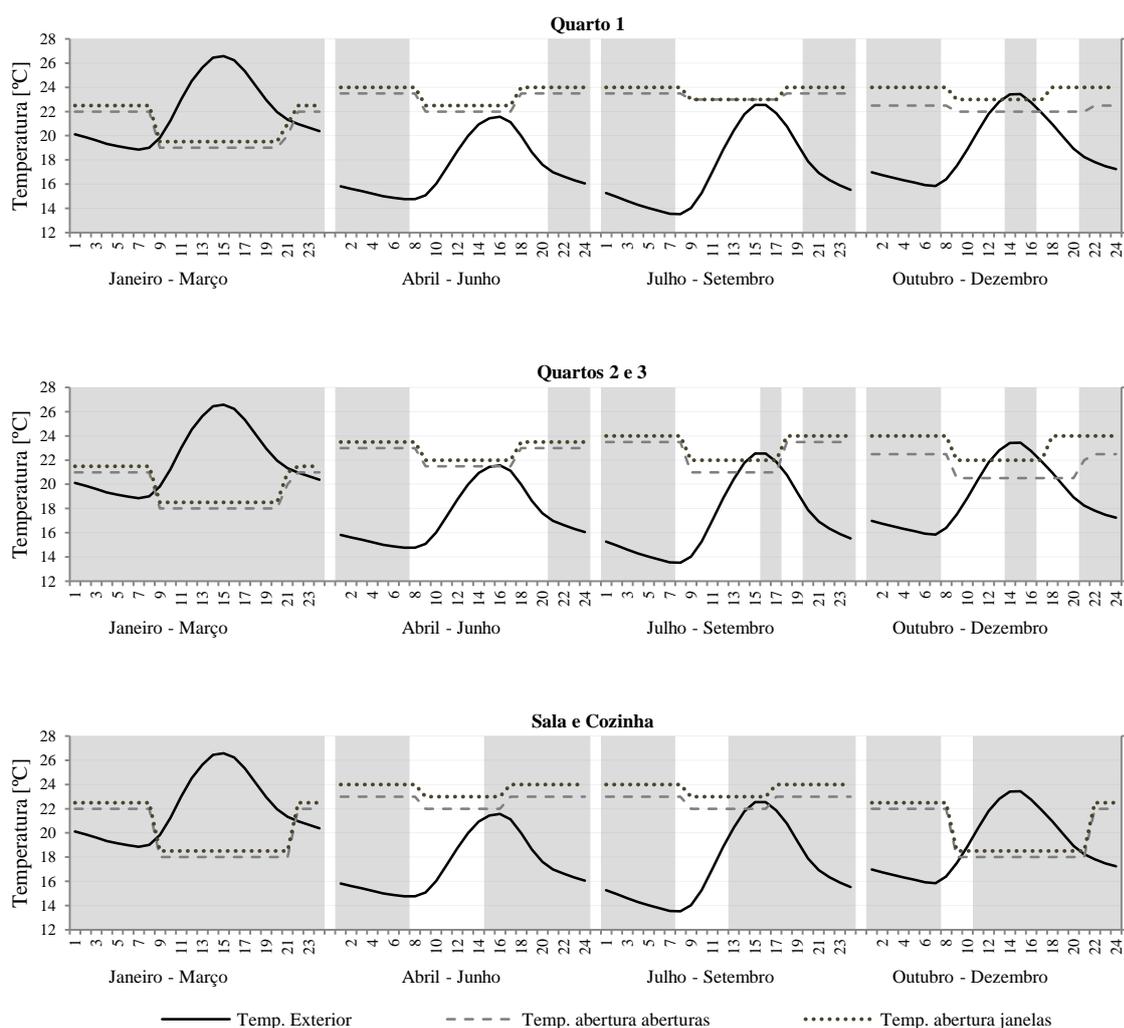


Figura 13 – Padrões de sombreamento e de temperatura de abertura de janelas e aberturas de topo das fachadas

### Habitação com climatização mecânica

Para obter os indicadores de *consumo relativo para aquecimento* ( $C_A$ ) e *refrigeração* ( $C_R$ ), mantêm-se todos os parâmetros definidos anteriormente, incluindo os descritivos do sistema de ventilação natural, embora estes apenas sejam aplicados entre as 9h e as 20h.

Nas restantes horas, das 21h às 8h, é utilizado um sistema de climatização mecânica nos espaços de permanência prolongada: quartos e cozinha e sala. Optou-se por utilizar o objeto *Package Terminal Heat Pump*, um modelo de um sistema de climatização conforme esquematizado na Figura 14.

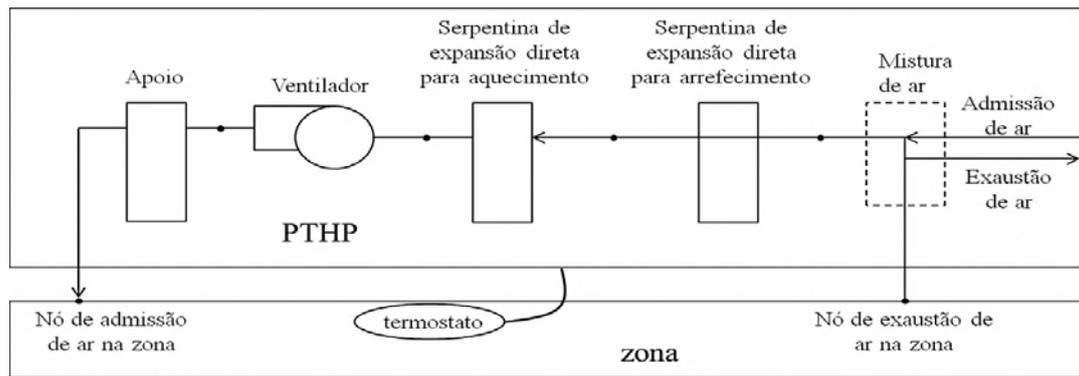


Figura 14 – Esquema do objeto PTHP (*Package Terminal Heat Pump*), adaptado de [9]

Considerou-se ainda, conforme requerido pelo RTQ-R:

- A temperatura do termostato para aquecimento de 22°C e de arrefecimento de 24°C;
- Taxa de fluxo de ar por pessoa de 0,00944 m<sup>3</sup>/s;
- Modo de operação do ventilador contínuo com eficiência total de 0,7 e eficiência do motor de 0,9;
- COP de arrefecimento de 3,0 e de aquecimento de 2,75;
- Capacidade do sistema dimensionada automaticamente pelo programa de simulação, com período a considerar para dimensionamento de arrefecimento de 1 de Janeiro a 31 de Março e de aquecimento de 1 de Junho a 31 de Agosto;
- Sistema de apoio elétrico dimensionado automaticamente.

#### 4.1.2.3 Resultados obtidos

Para calcular o indicador de *graus hora de resfriamento* ( $GH_R$ ) pediu-se como *output* da primeira simulação as temperaturas operativas, para cada hora, de cada espaço. Para os espaços de permanência prolongada procedeu-se ao cálculo do indicador conforme a Equação 12:

$$GH_R = \sum_{i=1}^{8760} (T_{O_i} - 26)^+ \quad (12)$$

Para calcular os indicadores de *consumo relativo para aquecimento* ( $C_A$ ) e *refrigeração* ( $C_R$ ), pediu-se como *output* o consumo horário de eletricidade do objeto PTHP para cada espaço e a potência de aquecimento e arrefecimento fornecida aos espaços (*Packaged Terminal Heat Pump Total Zone Heating Rate*[W] e *Packaged Terminal Heat Pump Total Zone Cooling Rate*[W]).

Verificou-se que o objeto só funciona nas horas requeridas e, consoante a função a cada hora (aquecimento ou arrefecimento), somaram-se distintamente os seus consumos elétricos horários:

$$\dot{Q}_{heating} > \dot{Q}_{cooling} \rightarrow C_A = \sum_{i=1}^{8760} (PTHP_{Electricity}) \quad (13)$$

$$\dot{Q}_{heating} < \dot{Q}_{cooling} \rightarrow C_R = \sum_{i=1}^{8760} (PTHP_{Electricity}) \quad (14)$$

Após o cálculo dos indicadores é possível obter os respetivos equivalentes numéricos da envolvente dos espaços em estudo através da Tabela 8, aplicável ao ficheiro climático utilizado – São Paulo TRY.

Tabela 8 – *Equivalentes numéricos da envoltória* para o método da simulação

Eficiência	EqNumEnvAmb <sub>Resf</sub>	Condição	EqNumEnvAmb <sub>A</sub>	Condição [kWh/(m <sup>2</sup> .ano)]
A	5	$GH_R \leq 412$	5	$C_A \leq 8,630$
B	4	$412 < GH_R \leq 597$	4	$8,630 < C_A \leq 17,895$
C	3	$597 < GH_R \leq 863$	3	$17,895 < C_A \leq 31,780$
D	2	$863 < GH_R \leq 1374$	2	$31,780 < C_A \leq 41,080$
E	1	$GH_R > 1374$	1	$C_A > 41,080$

Na tabela seguinte podem-se observar os resultados obtidos: tal como o que sucede para o método prescritivo, a envolvente da Sala e Cozinha volta a ter um pior desempenho térmico que a dos quartos, quer com ventilação natural quer com climatização. No entanto, para a simulação com o edifício com ventilação natural, o desempenho da Sala e Cozinha mostra-se bastante pior que os restantes espaços. Tendo em conta a adaptação das estratégias de ventilação e sombreamento a este espaço, pode-se concluir que o método prescritivo não é suficientemente sensível à influencia de grandes envidraçados nos espaços avaliados. Averiguou-se se existiria uma relação com o sombreamento, mas, removendo o sombreamento no método prescritivo, a performance do espaço melhora, o que é contraditório quando se trata de arrefecimento.

Tabela 9 – Resultados obtidos na avaliação da *envoltória* pelo método da simulação

Espaço	Área	$C_R$ [kWh/(m <sup>2</sup> .ano)]	$GH_R$	EqNumEnv <sub>Resf</sub>	$C_A$ [kWh/(m <sup>2</sup> .ano)]	EqNumEnv <sub>A</sub>
Quarto 1	20,69	9,234	255	5	8,260	5
Quarto 2	12,94	12,201	399	5	6,917	5
Quarto 3	13,02	11,767	377	5	7,007	5
Sala + Cozinha	58,83	7,003	2281	1	17,523	4
<b>Total</b>	105,49			<b>2,77</b>		<b>4,44</b>

Analisando as temperaturas operativas que ocorrem nos diferentes espaços, verifica-se que grande parte do tempo estas se encontram em intervalos de temperatura que proporcionam conforto aos seus ocupantes.

No caso em que só se tem ventilação natural, Figura 15, os quartos têm a sua temperatura operativa entre os 20°C e os 26°C em 90% das horas do ano. Na sala e cozinha este valor desce para 73%.

Quando se conjuga a climatização durante a noite com a ventilação natural durante o dia, Figura 16, passa-se a ter temperaturas operativas entre os 20°C e os 26°C em 95% das horas do ano nos quartos. Na sala e cozinha este valor passa a 85%.

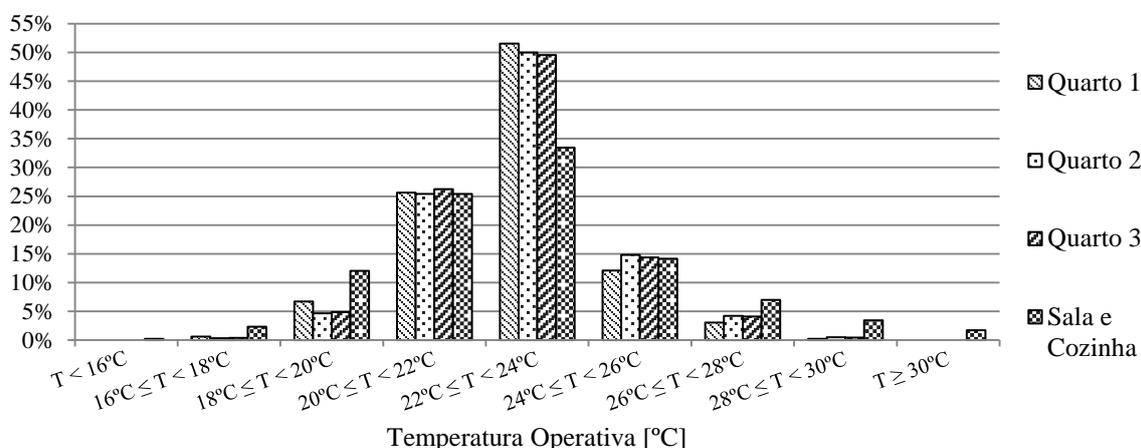


Figura 15 – Temperaturas operativas verificadas na simulação do edifício com ventilação natural

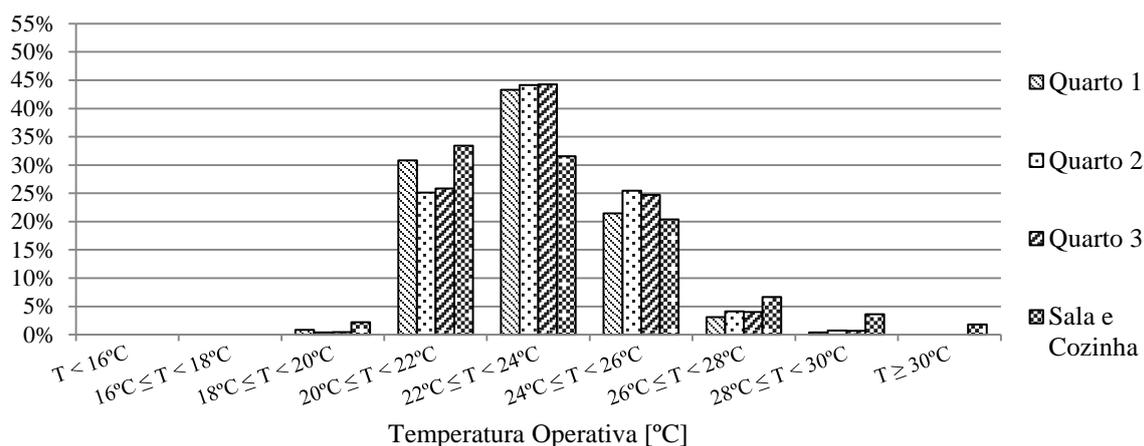


Figura 16 – Temperaturas operativas verificadas na simulação do edifício com climatização

Comparando ambas as situações, constata-se que existe uma redução do número de horas com temperaturas operativas inferiores a 20°C. Isto significa que, com ventilação natural, estas ocorriam principalmente durante a noite. Posto isto, seria espectável a existência de um aumento na ocorrência de temperaturas entre os 22°C e os 24°C, mas, verifica-se a ocorrência de um decréscimo, que é equilibrado pelo aumento do nº de horas em que a temperatura está entre os 24°C e os 26°C.

Deduz-se que, embora haja um aquecimento dos espaços durante a noite, dado o impedimento de os arrefecer durante este período, a sua temperatura durante o dia aumenta, verificando-se o aumento do nº de horas com temperaturas operativas entre os 24°C e os 26°C.

As temperaturas mais quentes, a partir dos 26°C, dado serem atingidas apenas durante o dia, não são alteradas de uma simulação para outra: durante o dia não há climatização e as temperaturas exteriores não permitem a existência de um arrefecimento eficaz.

#### 4.1.3 Equivalente numérico da envolvente

Após a determinação dos equivalentes numéricos da envolvente do edifício para *Resfriamento* e para *Aquecimento*, por qualquer um dos métodos apresentados, o *Equivalente Numérico da Envolvente*, pode ser obtido aplicando-se a Equação 15 (válida para a ZB3):

$$EqNumEnv = 0,64 \times EqNumEnv_{Resf} + 0,36 \times EqNumEnv_A \quad (15)$$

##### Método Prescritivo

Retomando os valores da Figura 6/Tabela 6 tem-se:

$$EqNumEnv = 0,64 \times 3,44 + 0,36 \times 4,00 = 3,64 \quad (16)$$

##### Método da Simulação

Retomando os valores da Tabela 9/Figura 6 tem-se:

$$EqNumEnv = 0,64 \times 2,77 + 0,36 \times 4,44 = 3,77 \quad (17)$$

## 4.2 Avaliação do Sistema de Aquecimento de Água

A avaliação dos sistemas de aquecimento de água é realizada através de equações definidas no RTQ-R. A exceção são os sistemas solares térmicos que podem ser avaliados também através de simulação, de acordo com o método *F-Chart*.

Neste trabalho, para proceder à avaliação do sistema solar térmico, foi utilizada uma folha de cálculo que, tal como a folha de cálculo utilizada no método prescritivo de avaliação da envolvente, é disponibilizada no *site* do CB3E [22] e incorpora as equações definidas no regulamento.

Tal como a envolvente, também o sistema de aquecimento de água tem de cumprir pré-requisitos que, por estarem previstos em projeto e não influenciarem a avaliação do edifício em estudo, apenas são apresentados na secção iii) do Anexo I.

### 4.2.1 Determinação da eficiência do Sistema de Aquecimento de Água

O nível de eficiência do sistema de aquecimento de água é obtido após o cálculo do *Equivalente Numérico de Aquecimento de Água (EqNumAA)*.

Caso o sistema de aquecimento de água de uma habitação seja um misto entre um sistema solar térmico (que não é obrigatório) e um sistema de apoio, o nível de eficiência deste é:

- O maior dos equivalentes numéricos obtidos caso exista uma combinação de sistemas solares térmicos com aquecimento a gás ou bomba de calor;
- O equivalente numérico do sistema solar térmico, quando este for combinado com aquecimento elétrico, desde que o sistema solar térmico corresponda a uma fração solar mínima de 70%;

#### *Sistema de solar térmico*

##### *Procedimento para determinação da eficiência: Método do dimensionamento*

A classificação da eficiência do sistema de aquecimento de água por coletores solares é obtida de acordo com a fração solar anual – percentagem da necessidade anual de água quente que o sistema solar térmico consegue sustentar. A fração solar é obtida de acordo com o cálculo especificado no regulamento e para o qual foi utilizada a folha de cálculo disponibilizada pelo CB3E, presente na secção ii) do Anexo II.

Admitiu-se o consumo diário de 50l de água a 45°C por pessoa e a existência de duas pessoas por quarto – 6 ocupantes no total. A temperatura de armazenamento da água é igual à de consumo, 45°C.

Considerou-se a instalação de dois coletores solares Buderus SKN 3.0. Estes coletores estão certificados pelo Inmetro com uma ENCE A [24] e detêm Selo Procel [25].

Considerou-se ainda um depósito de 300l para armazenamento.

Tabela 10 – Propriedades do coletor solar térmico Buderus SKN 3.0

Eficiência energética média	63,2
Pressão funcionamento [kPa]	600
Área externa [m <sup>2</sup> ]	2,37
$F_R(\tau\alpha)_n$	0,743
$F_R U_L$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]	3,933
$(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$	0,911
Área de absorção [m <sup>2</sup> ]	2,26

$F_R(\tau\alpha)_n$  – fator de eficiência ótica do coletor, obtido nas tabelas do PBE para coletores solares

$F_R U_L$  – coeficiente global de perdas do coletor, obtido nas tabelas do PBE para coletores solares

$(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$  – modificador do ângulo de incidência

#### 4.2.1 *Equivalente numérico do Sistema de Aquecimento de Água*

É de acordo com a Tabela 11 que a classificação de um sistema solar térmico é atribuída. Tendo em conta a obtenção de uma fração solar de 77,33%, o sistema solar térmico considerado obtém um equivalente numérico de 5.

Tabela 11 – Classificação de sistemas solares térmicos

Dimensionamento	Classificação	EqNum
Equivalente à fração solar anual mínima de 70%	A	5
Equivalente à fração solar anual entre 60% e 69%	B	4
Equivalente à fração solar anual entre 50% e 59%	C	3
Equivalente à fração solar anual menor que 50%	D	2

Dado o nível de eficiência do sistema de aquecimento de água ser obtido após o cálculo do *Equivalente Numérico de Aquecimento de Água (EqNumAA)* e este ser o maior dos equivalentes numéricos obtidos quando o sistema de aquecimento de água contempla apenas um sistema solar térmico com *backup* num sistema de aquecimento a gás, tem-se:

$$EqNumAA = 5$$

#### 4.3 *Bonificações*

As bonificações pretendem valorizar as iniciativas que aumentem a eficiência dos edifícios, atribuindo até 1 ponto à sua classificação geral. A cada item passível de avaliação para obtenção de bonificações é atribuída uma pontuação, que será somada às restantes, até ao máximo referido, conforme Equação 18. Cada item é independente dos restantes, podendo ser parcialmente alcançado.

$$Bonificações = b1 + b2 + b3 + b4 + b5 + b6 + b7 + b8 \quad (18)$$

Onde:

- b1 - bonificação referente à ventilação natural, cuja pontuação varia de zero a 0,40 pontos;
- b2 - bonificação referente à iluminação natural, cuja pontuação varia de zero a 0,30 pontos;
- b3 - bonificação referente ao uso racional de água, cuja pontuação varia de zero a 0,20 pontos;
- b4 - bonificação referente ao condicionamento artificial de ar, cuja pontuação varia de zero a 0,20 pontos;
- b5 - bonificação referente à iluminação artificial, cuja pontuação varia de zero a 0,10 pontos;
- b6 - bonificação referente a ventiladores de teto instalados na UH, cuja pontuação obtida é zero ou 0,10 pontos;
- b7 - bonificação referente a refrigeradores instalados na UH, cuja pontuação obtida é zero ou 0,10 pontos;
- b8 - bonificação referente à medição individualizada, cuja pontuação obtida é zero ou 0,10 pontos.

A descrição de cada item é apresentado na secção v) do Anexo I. Na secção i) do Anexo II - na folha de cálculo fornecida pelo CB3E, que também contempla esta avaliação - pode-se observar a pontuação atribuída a cada item e a pontuação total atribuída ao edifício:

$$Bonificações = 0,12 + 0,2 + 0,2 + 0 + 0,1 + 0 + 0,1 + 0 = 0,72 \quad (19)$$

#### 4.4 Avaliação final

Após os cálculos realizados segundo a metodologia descrita, é possível obter a classificação final do desempenho energético do edifício aplicando a Equação 11.

##### Método Prescritivo

$$PT_{UH} = (0,65 \times 3,64) + [(1 - 0,65) \times 5] + 0,72 = 4,84 \quad (20)$$

##### Método da Simulação

$$PT_{UH} = (0,65 \times 3,77) + [(1 - 0,65) \times 5] + 0,72 = 4,92 \quad (21)$$

Tanto num método como no outro, o edifício obtém o nível de eficiência A.

#### 4.5 RTQ-R, RCCTE e Passivhaus

Parte interessante de se conhecer um regulamento em vigor num país estrangeiro é perceber qual a semelhança com o regulamento correspondente em vigor em Portugal e uma norma internacionalmente reconhecida. Optou-se por comparar o RTQ-R com o RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios [26], regulamento em vigor em Portugal, e com a norma *Passivhaus*, desenvolvida desde o início da década de 90 pelos Professores Bo Adamson (Suécia) e Wolfgang Feist (Alemanha), para o clima da Europa Central [27].

A principal diferença entre o RTQ-R e a *Passivhaus* e o RCCTE é o facto de os primeiros serem facultativos e o último obrigatório para novos edifícios e grandes remodelações de edifícios existentes. Para além disso, o RCCTE e a *Passivhaus* têm uma exigência mínima de nível de eficiência a atingir, o que não sucede com o RTQ-R.

Atentando nos pré-requisitos da envolvente, tal como o RTQ-R, também o RCCTE tem exigências mínimas para os coeficientes de transmissão térmica, dependendo da região climática em questão. A norma *Passivhaus* apresenta ainda outros valores, muito inferiores. O resumo dos  $U_s$  máximos aceitáveis para os diferentes casos pode ser encontrado na tabela seguinte. Note-se que, no caso do Brasil, se considerou o  $U$  admissível mais baixo (correspondente ao fator solar superior).

Tabela 12 – Coeficientes de transmissão térmica máximos admissíveis para diferentes climas

	Zona Bioclimática / Climática	$U_{\text{máximo Paredes}} [W/(m^2K)]$	$U_{\text{máximo cobertura}} [W/(m^2K)]$
RTQ-R Brasil	1 e 2 (mais frio)	2,5	2,3
	3 a 6	2,5	1,5
	7	2,5	1,5
	8 (mais quente)	2,5	1,5
RCCTE Portugal	1 (menos frio)	1,80	1,25
	2	1,60	1,00
	3 (mais frio)	1,45	0,90
Norma <i>Passivhaus</i>	Europa Central Obtido para $T_{out}=-10^{\circ}C$ e $T_{in}=20^{\circ}C$	0,15	

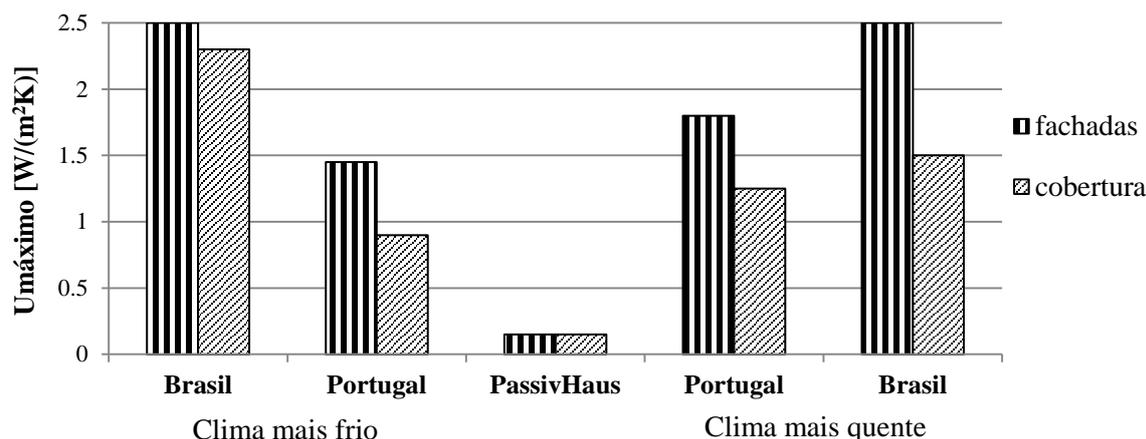


Figura 17 – Gráfico comparativo de Coeficientes de Transmissão Térmica dos diferentes regulamentos

Já no caso da capacidade térmica (CT), a abordagem é diferente nos três regulamentos:

- O RTQ-R exige que a média ponderada da capacidade térmica das paredes em contato com o exterior e das paredes interiores de um espaço seja superior a 130 kJ/(m²K) em todas as zonas bioclimáticas exceto na 8;

- O RCCTE, não expressa qualquer exigência mas o facto de existir uma maior inércia térmica é considerado benéfico. No entanto, não é a capacidade térmica a ser considerada, mas antes a massa superficial útil de todos os elementos construtivos (massa dos elementos construtivos que se encontra do lado interior de um material isolante). Ao edifício/fração autónoma é atribuída uma classe de inércia, de acordo com o indicado na Tabela 13, que influencia o fator de utilização dos ganhos térmicos. Este fator influencia as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (Nic) e as necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento (Nvc):

- Nic: quanto maior for a maior inércia térmica, maiores são os ganhos úteis e menor é o valor de Nic do edifício ou fração autónoma;
- Nvc: quanto maior for a inércia térmica, menores são as cargas térmicas (solares e internas) e menor é o valor de Nvc do edifício ou fração autónoma;

- A *Passivhaus*, por ser dedicada a climas frios, e por exigir um U tão baixo, não exige qualquer valor, já que, neste caso, a inércia não é uma mais-valia no desempenho térmico do edifício.

Tabela 13 – Pré-requisitos da envolvente para a ZB3

	Zona Bioclimática / Classe de inércia	CT Parede [kJ/(m²K)]	Massa superficial útil por unidade de área de pavimento [kg/m²]
RTQ-R Brasil	1 e 2 (mais frio)	CT > 130	-
	3 a 6	CT > 130	-
	7	CT > 130	-
	8 (mais quente)	-	-
RCCTE Portugal	Fraca	-	I <sub>t</sub> < 150
	Média	-	150 ≤ I <sub>t</sub> ≤ 400
	Forte	-	I <sub>t</sub> > 400
Norma Passivhaus	Europa Central Obtido para Tout=-10°C e Tin=20°C	-	-

Se se comparar a temperatura máxima atingida em São Paulo (de acordo com o ficheiro climático utilizado no método da simulação) e a amplitude térmica do seu mês mais quente (valor médio das diferenças registadas entre as temperaturas máxima e mínima diárias) com as temperaturas de projeto

e amplitudes térmicas de Lisboa e do concelho português com maior temperatura externa de projeto e maior amplitude térmica, Mourão:

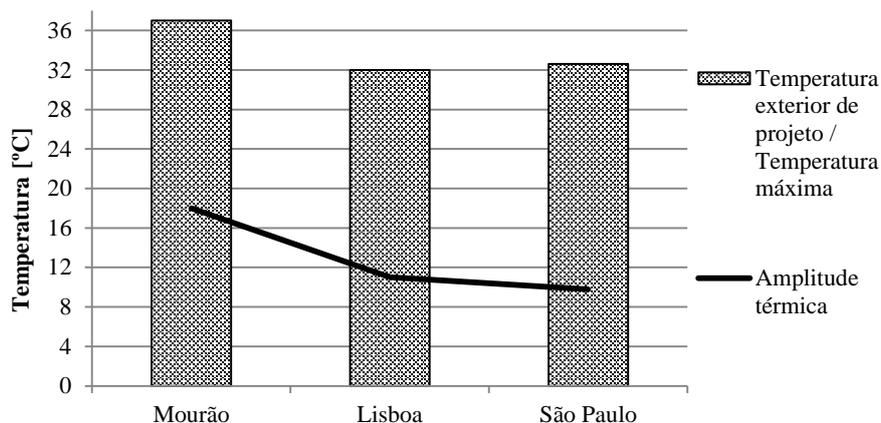


Figura 18 – Temperaturas operativas verificadas na simulação do edifício com climatização

Verifica-se que, a nível de temperaturas, o clima de São Paulo é muito semelhante ao de Lisboa, pelo que o efeito da inércia térmica deverá ser semelhante em ambos os locais. Já o de Mourão verifica uma amplitude térmica bastante mais elevada, o que potencia o benefício da utilização de massa térmica numa construção. De notar que o clima de São Paulo é, juntamente com o de outras cidades com clima subtropical (Porto Alegre (ZB3) e Santa Maria (ZB2), por exemplo), um dos climas brasileiros que atinge temperaturas mais elevadas aliadas a grandes amplitudes térmicas.

Como termo de comparação das exigências de capacidade térmica e de inércia dos diferentes regulamentos, considere-se um apartamento “tipo” com a configuração da Figura 19 e áreas conforme a

Tabela 14.

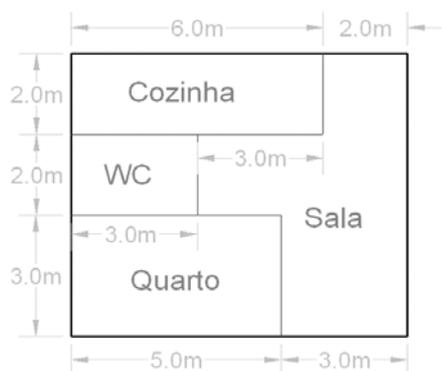


Tabela 14 – Áreas do apartamento “tipo”

	Área de pavimento (m <sup>2</sup> )	Pé-Direito (m)	Área de fachada em contato com o exterior (m <sup>2</sup> )
Quarto	15	2,8	22,4
Sala	23	2,8	33,6
Cozinha	12	2,8	22,4
WC	6	2,8	5,6
<b>Total</b>	<b>56</b>	-	<b>84</b>

Figura 19 - Planta de um apartamento “tipo”

Considere-se ainda que este apartamento tem as suas fachadas constituídas por uma das soluções construtivas mais utilizadas nas novas habitações em Portugal: parede dupla em alvenaria de tijolo furado com isolamento na caixa de ar.

Se, tal como é descrito no RCCTE, se considerar apenas a massa superficial localizada do lado interior do isolamento térmico, e se considerar o mesmo para a capacidade térmica, as fachadas podem ser caracterizadas conforme a Tabela 15 [20]. De notar que o RTQ-R considera todas as camadas constituintes da solução construtiva - um erro quando existe isolamento térmico dado que a capacidade térmica dos materiais do lado exterior do isolamento não tem influência no interior do edifício.

Tabela 15 – Constituição das fachadas do apartamento “tipo”

Descrição	Espessura (m)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (J/kg.K)	Capacidade Térmica (kJ/m <sup>2</sup> K)	Massa superficial útil (kg/m <sup>2</sup> )
Reboco exterior + tijolo furado + isolamento térmico + caixa-de-ar					
Reboco	0,02	1600	840	27	32
Alvenaria de tijolo furado	0,15	687	840	87	103
Reboco	0,02	1600	840	27	32
<b>Total</b>				<b>140,32</b>	<b>167,05</b>

Caso se contabilize apenas a massa superficial das paredes externas, num limite de 150 kg/m<sup>2</sup>, tal como descrito no RCCTE, e se considere que apenas 70% da área das fachadas é parede dupla (desconto de vãos e pontes térmicas planas), tem-se, numa análise conservativa (os restantes elementos da envolvente e interiores não são contabilizados), uma classe de inércia média:

Tabela 16 – Cálculo da classe de inércia do apartamento tipo

Massa superficial útil (kg/m <sup>2</sup> )	Área de fachada	Massa total (kg)	Massa por área de pavimento (kg/m <sup>2</sup> )
150	84 x 0,7 = 58,8	150 x 58,8 = 9822,5	157,5
<b>Classe de inércia</b>			<b>Média</b>

Assim, e porque o RTQ-R apenas tem exigências de capacidade térmica para a ponderação entre a capacidade térmica das paredes em contacto com o exterior e as interiores, é possível afirmar que, para que se cumpra o pré-requisito deste regulamento, de acordo com o RCCTE é obrigatória uma classe de inércia média.

No que toca à iluminação natural, apenas o RTQ-R tem exigências mínimas de áreas de janela, mas sem qualquer requisito para os vidros e caixilhos. Apesar de considerar o facto de estes serem sombreados por dispositivos de proteção solar exteriores, o RTQ-R não tem em consideração a sua orientação. O RCCTE permite distinguir diferentes tipos de vidro, exigindo sempre um fator solar mínimo dos vãos (quociente entre a energia solar transmitida através dos vãos envidraçados e o respetivo dispositivo de proteção para o interior e a energia solar nele incidente) para vãos com mais de 5% da área útil do espaço que servem. A *Passivhaus* tem também requisitos mínimos para os vãos envidraçados (inclui vidro e caixilho), não permitindo que estes tenham um U superior a 0,80 W/(m<sup>2</sup>K) para fatores solares na ordem dos 50%. Os vãos envidraçados orientados a este ou oeste ou cujo ângulo de inclinação seja inferior a 75° em relação à horizontal, não podem ter uma área superior a 15% da área útil do espaço que servem sem que disponham de dispositivos de controlo solar que permitam uma redução de 75% dos ganhos solares. Para os vãos orientados a sul, este valor não pode ser superior a 25% da área útil do espaço que servem.

Quanto à ventilação natural, enquanto o RTQ-R exige áreas mínimas para ventilação, adequadas às características e localização dos edifícios em estudo, o RCCTE considera que os edifícios devem ser ventilados em permanência por um caudal mínimo de ar que garanta as condições adequadas de higiene e conforto dos ocupantes. É requerido um caudal mínimo de 0,6 renovações por hora (sob condições médias de funcionamento), considerando-se as necessidades térmicas para compensar esta renovação de ar durante a estação fria. Este caudal pode ser assegurado por ventilação natural, mecânica (aumenta o consumo de energia), ou mista. A *Passivhaus*, para o clima frio da Europa Central, exige um teste de pressurização a 50 Pascal, de forma a aferir que as infiltrações não são superiores a 0,6 RPH (do volume total do edifício) mas requer que exista um sistema de ventilação com recuperação de calor que promova a ventilação dos espaços e as condições de higiene do ar de acordo com o *standard* alemão para ventilação natural (DIN 1946).

A instalação de sistemas solares térmicos é avaliada e considerada de modo diferente no RTQ-R e no RCCTE. De acordo com o RTQ-R, a instalação destes sistemas não é obrigatória, podendo-se obter elevados níveis de eficiência com outros sistemas. No entanto, caso sejam instalados, tanto coletores como depósitos devem estar conforme os requisitos das normas brasileiras aplicáveis e, para que se obtenha um bom nível de eficiência, devem ter ENCE A ou B ou Selo Procel. Para a instalação do sistema deve ser dada preferência a instaladores qualificados pelo Programa de qualificação de fornecedores de sistemas de aquecimento solar - QUALISOL BRASIL. O RCCTE obriga a que, desde que exista uma cobertura com exposição adequada e área suficiente, sejam instalados coletores solares na proporção de 1 m<sup>2</sup> por ocupante nominal em todos os edifícios, novos ou sujeitos a reabilitação, por ele abrangidos. Obriga ainda a que os coletores sejam certificados pela Certif (Associação para a Certificação) ou Solar Keymark; que os instaladores sejam técnicos acreditados pela Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) com Certificado de Aptidão Profissional (CAP) válido por 5 anos; e que exista uma garantia de manutenção por um período mínimo de 6 anos após a instalação. A *Passivhaus* não obriga a instalação destes sistemas.

No que é referente à classificação final da habitação/fração autónoma, verifica-se uma certa disparidade. Como já referido, o RTQ-R não visa calcular o consumo real dos edifícios. Para além de determinar a eficiência do sistema de produção de AQS e o benefício de ter outras soluções eficientes, o regulamento pretende apenas comparar a sua envolvente com as envolventes mais típicas do sistema construtivo brasileiro com as mesmas condições de utilização e equipamentos instalados; já o RCCTE pretende comparar a energia primária total utilizada para manter a habitação confortável e produzir água quente para os seus ocupantes todo o ano, de acordo com condições padronizadas de uso dos equipamentos realmente instalados na habitação - a classe energética é definida de acordo com a razão entre as necessidades energéticas do edifício em estudo e as necessidades energéticas dos edifícios de referência, mais antigos, cuja classe é B-/C. Assim, para reduções de consumo entre 25% a 50% do consumo de referência, a habitação será classificada com classe A; a certificação *Passivhaus* só é atribuída a edifícios que não tenham necessidades de aquecimento superiores a 15 kWh/(m<sup>2</sup>.ano) e cuja energia primária necessária para o habitual funcionamento do mesmo (aquecimento, AQS e eletricidade) não exceda 120 kWh/(m<sup>2</sup>.ano).

Tabela 17 – Comparação entre os diferentes regulamentos

<b>Critério</b>	<b>RTQ-R</b>	<b>RCCTE</b>	<b><i>Passivhaus</i></b>
<b>Obrigatoriedade</b>	Não	Sim	Não
<b>U máximo da envolvente opaca</b>	Sim	Sim	Sim
<b>Inércia térmica mínima</b>	Sim	Não	Não
<b>Iluminação Natural regulada</b>	Sim Área mínima de vão obrigatória	Sim Área máxima de vão sem proteção solar	Sim Área máxima de vão sem proteção solar
<b>U máximo da envolvente não opaca</b>	Não	Não	Sim
<b>Ventilação Natural regulada</b>	Sim Área mínima de vão obrigatória	Não Ventilação mínima definida por caudal	Não Ventilação mínima definida por caudal
<b>Sistema Solar térmico</b>	Facultativo Pouco regulado	Obrigatório Muito regulado	Facultativo
<b>Classificação final mínima</b>	Não	Sim	Sim

## 5. Previsão de necessidades energéticas

Após terem sido identificadas as medidas que permitem otimizar a eficiência térmica do edifício e este ter sido avaliado de acordo com o regulamento em vigor, importa agora perceber quais as necessidades de energia elétrica para, posteriormente, ser possível dimensionar o sistema de produção de eletricidade. É também importante conhecer quais as necessidades reais de energia térmica que conduzem ao conforto térmico dos ocupantes.

Neste sentido o edifício voltou a ser simulado no *EnergyPlus*, manteve-se o modelo geométrico e o zonamento já definidos, mas utilizou-se o ficheiro climático apresentado no capítulo 3.1 por ser representativo do local de construção. Para além disso, adaptou-se as condições de utilização do edifício às que se espera que correspondam à realidade e identificaram-se as necessidades de energia elétrica de acordo com os eletrodomésticos típicos de uma habitação.

### 5.1 Condições de simulação

De acordo com o projeto do edifício, o quarto principal (quarto 1) terá dois ocupantes e os restantes apenas 1 ocupante. Mantendo apenas as taxas metabólicas e a densidade de iluminação instalada em cada divisão, delinearam-se os novos padrões de ocupação e de iluminação:

Tabela 18 – Padrões de ocupação e iluminação conforme projeto

Quartos	Sala	Corredor
<b>Ocupação</b>		
Quarto 1: 2 ocupantes	4 ocupantes	
Quartos 2 e 3: 1 ocupante		
00h - 09h: 100%	00h - 09h: 0%	
09h - 23h: 0%	09h - 23h: 100%	
23h - 24h: 100%	23h - 24h: 0%	
<b>Taxa metabólica</b>		
Calor produzido (W/m <sup>2</sup> )		
45	60	
Calor produzido para área de pele = 1,80 m <sup>2</sup>		
81	108	
<b>Iluminação</b>		
Densidade de potência instalada (W/m <sup>2</sup> )		
5	6	4
Perfil de utilização		
00h - 23h: 0%	00h - 17h 0%	00h - 17h 0%
23h - 24h 100%	17h - 23h 100%	17h - 23h 100%
	23h - 24h 0%	23h - 24h 0%

De modo a analisar o comportamento térmico do edifício no novo clima, testou-se o seu desempenho térmico sem apoio de sistemas de climatização, otimizando os parâmetros de ventilação natural anteriormente definidos. Definiram-se novos coeficientes de pressão para as aberturas existentes, baseados num terreno de floresta e não de cidade, e adaptaram-se os padrões de sombreamento e controlo de ventilação de modo a aproximar as temperaturas interiores às temperaturas de conforto definidas pela ASHRAE (Figura 1). De acordo com a metodologia já utilizada, fez-se uma diferenciação de padrões entre o quarto 1, os quartos 2 e 3 e a sala/cozinha. Mais uma vez, estes padrões foram adaptados às diferentes estações do ano:

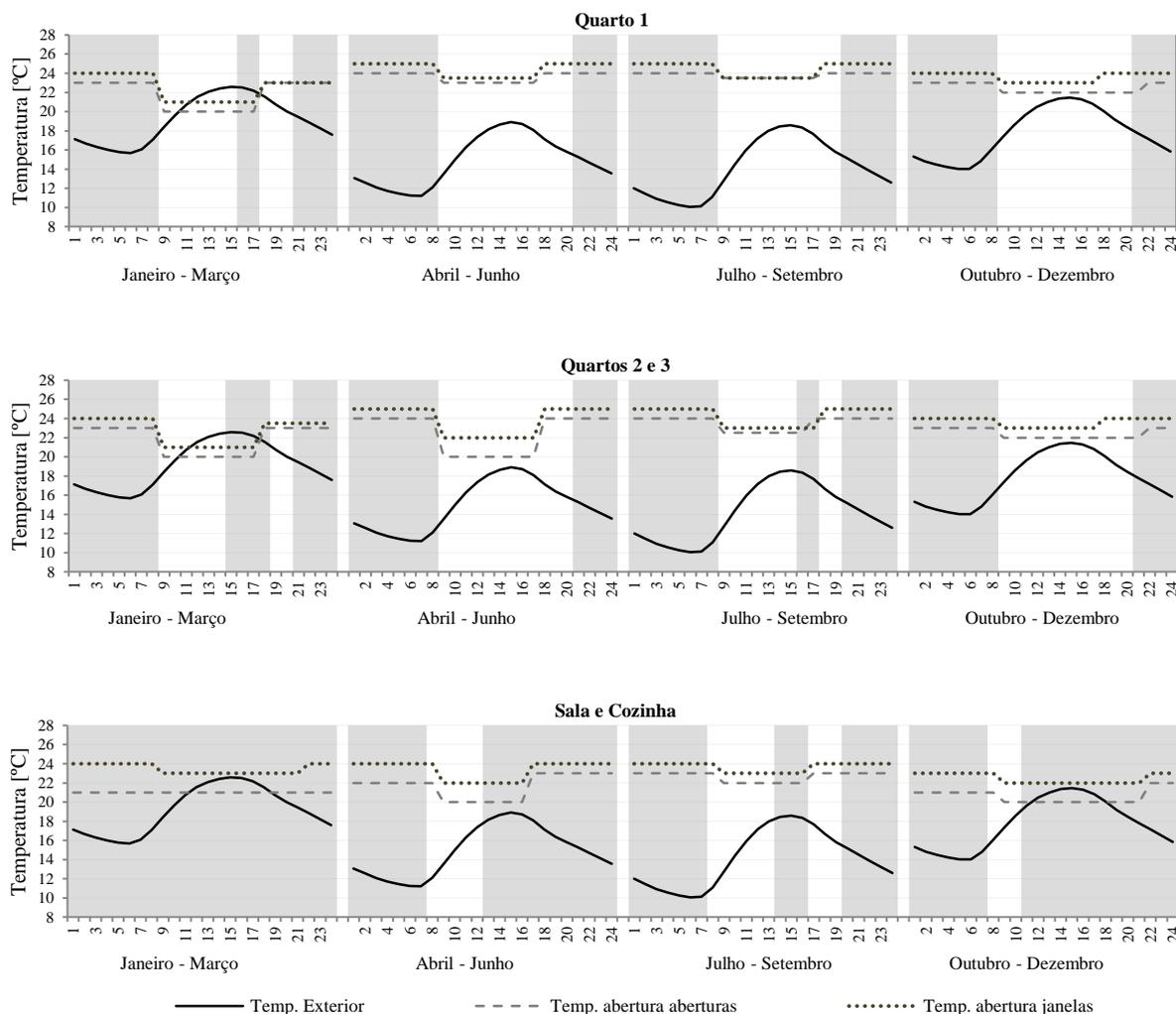


Figura 20 – Novos padrões de sombreamento e de temperatura de abertura de janelas e aberturas de topo das fachadas

Numa segunda simulação permitiu-se a utilização de um sistema de aquecimento durante os meses mais frios – de Abril a Setembro, inclusive. Dada a simplicidade da sua aplicação, utilizou-se o objeto *IdealLoadsAirSystem* que permite definir os parâmetros de temperatura e humidade relativa que se pretendem ter em cada espaço. O objeto *IdealLoadsAirSystem* fornece a energia necessária para que esses parâmetros sejam cumpridos, independentemente de onde vem o ar e de como é obtida essa energia. Assim, para os meses de Abril a Setembro, inibiu-se a utilização de ventilação natural e definiu-se como temperatura mínima os 22°C. Como o edifício não é estanque definiu-se ainda uma infiltração de 1 RPH. Apesar de ser superior ao valor habitual, 0,6 RPH, dada a configuração das aberturas de topo de fachada e a respetiva (não) estanquicidade, considera-se este valor adequado.

Os consumos anuais típicos de eletricidade para os diferentes eletrodomésticos foram definidos de acordo com um estudo já efetuado [19]. Foram considerados apenas equipamentos de elevada eficiência energética, a uma potência constante durante o seu horário de utilização (Tabela 19):

Tabela 19 – Consumo de eletrodomésticos considerados

	Consumo anual (kWh)	Utilização		Potência considerada (W)
		dias /semana	h/dia	
Frigorífico	140	7	24	16
Congelador	225	7	24	26
Máquina de Lavar Louça	264	3	2	846
Máquina de Lavar Roupa	180	3	2	577
Entretenimento (TV, Áudio, etc)	220	7	4	151
Aquecimento de Comida (Micro-ondas)	250	7	1	685
Outros: Iluminação Exterior		7	6	100

O horário de utilização de cada aparelho foi distribuído ao longo de cada dia de modo a não ser necessário sobredimensionar o sistema de produção.

## 5.2 Resultados obtidos - necessidades energéticas

Recorrendo à simulação em que a ventilação natural estava ativa, sem recurso a qualquer sistema de climatização, foram analisadas as temperaturas operativas dos diferentes espaços, Figura 21. Verifica-se que grande parte do tempo estas têm valores que proporcionam conforto aos ocupantes, no entanto, dado o clima de Catuçaba ser mais frio que o de São Paulo, existe uma maior ocorrência de temperaturas mais baixas, que o afetam. Observando o gráfico da Figura 22, que apesar de manter a percentagem de ocorrência relativa a todo o ano apenas contempla os meses de Abril a Outubro, observa-se que é neste período que as temperaturas mais baixas ocorrem, pelo que será o período a considerar para o dimensionamento do sistema de aquecimento.

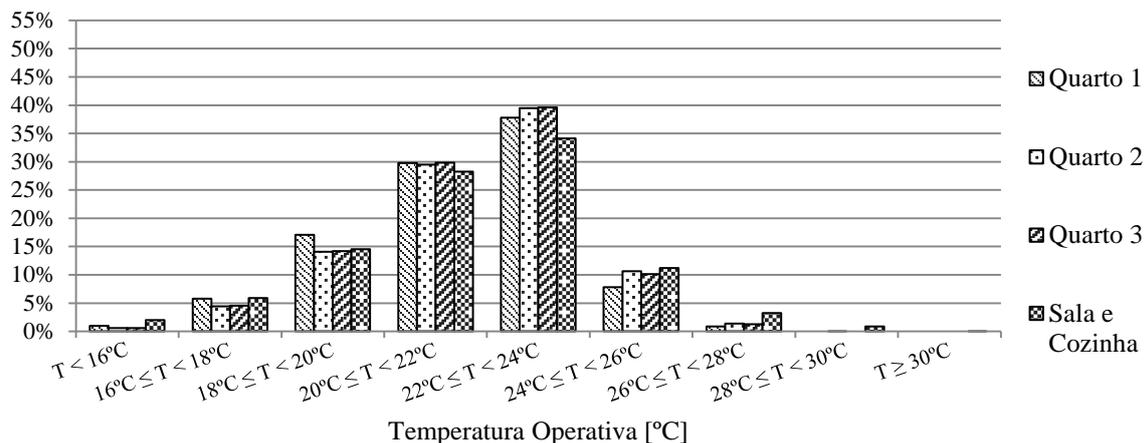


Figura 21 – Distribuição das temperaturas operativas verificadas durante todo o ano na simulação do edifício com ventilação natural

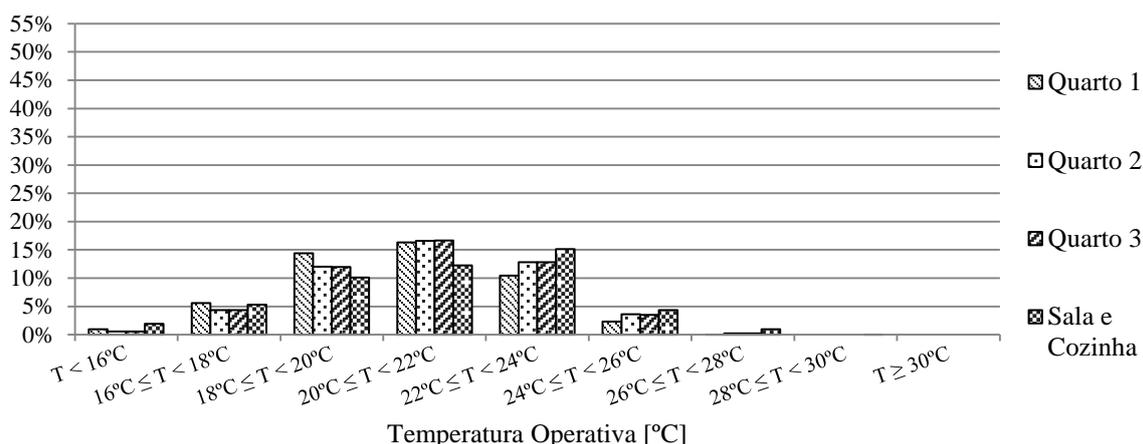


Figura 22 – Distribuição das temperaturas operativas verificadas durante os meses entre Abril e Outubro (inclusive) na simulação do edifício com ventilação natural

Aplicando o aquecimento com recurso ao objeto *IdealLoadsAirSystem*, verifica-se que, ao longo do ano - Figura 23 – a ocorrência de temperaturas mais baixas diminui bastante. No entanto, verifica-se um aumento da ocorrência de temperaturas mais altas, principalmente na Sala e Cozinha.

Por estranho que pareça, esta ocorrência mantém-se caso se observe a distribuição de temperaturas apenas entre Abril e Outubro, Figura 24. Isto significa que, por não ser possível baixar a temperatura além dos  $22^{\circ}\text{C}$ , o edifício não consegue harmonizar o aquecimento propositado com o aquecimento passivo (ganhos solares, por exemplo), sobreaquecendo.

Por outro lado, a ocorrência de temperaturas mais baixas deixa de existir. A Figura 24 permite ainda observar que o quarto 1 é o quarto mais frio.

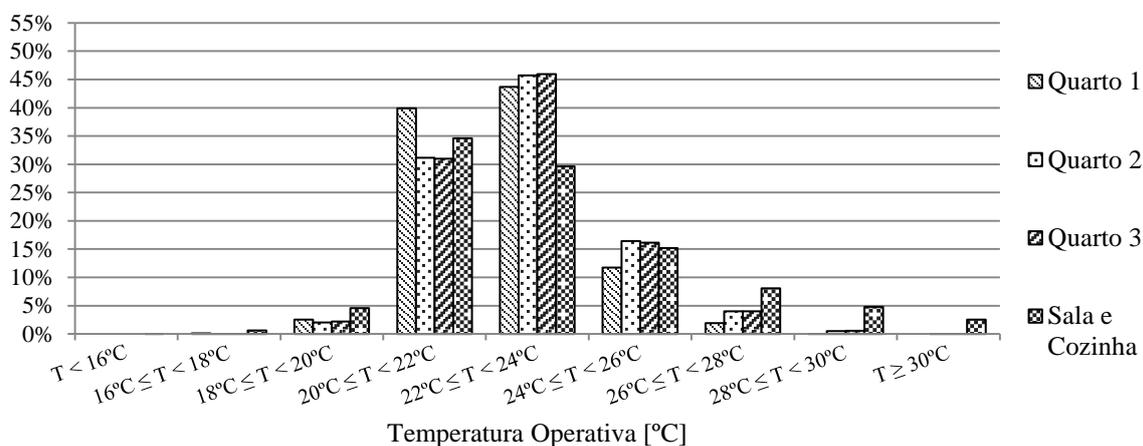


Figura 23 – Distribuição das temperaturas operativas verificadas durante todo o ano na simulação do edifício com sistema de *ideal loads*

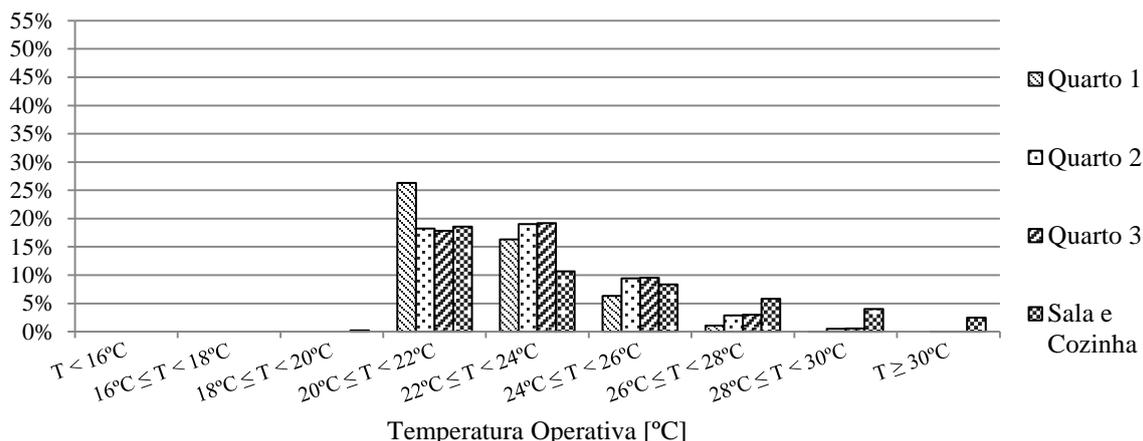


Figura 24 – Distribuição das temperaturas operativas verificadas durante os meses entre Abril e Outubro (inclusive) na simulação do edifício com sistema de *ideal loads*

Analisando os pedidos dos diferentes espaços ao objeto de climatização (Tabela 9), verifica-se que são relativamente baixos, o que pode ser explicado por o dimensionamento não estar a ser realizado para dias de projeto mas para valores de um ano típico. Por outro lado, o facto de o objeto estar sempre ligado condiciona a potência que lhe é pedida, na medida em que a temperatura está já controlada no instante anterior.

Tabela 20 – Potência de aquecimento necessária

Espaço	Área	Potência máxima fornecida ao espaço	
		[W]	[W/m <sup>2</sup> ]
Quarto 1	20,69	774	37
Quarto 2	12,94	521	40
Quarto 3	13,02	516	40
Sala + Cozinha	58,83	2644	45
<b>Total</b>	<b>105,49</b>	<b>4455</b>	<b>42</b>

Quanto às necessidades de energia elétrica, tendo em conta a distribuição de cargas referida em 5.1, determinaram-se os seguintes perfis de consumo, para diferentes dias da semana:

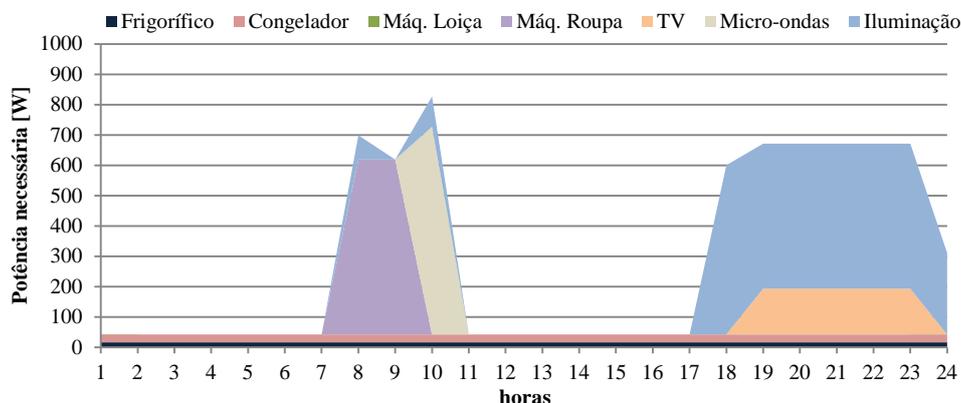


Figura 25 – Diagrama de consumo – 2<sup>a</sup>feira, 4<sup>a</sup>feira e sábado

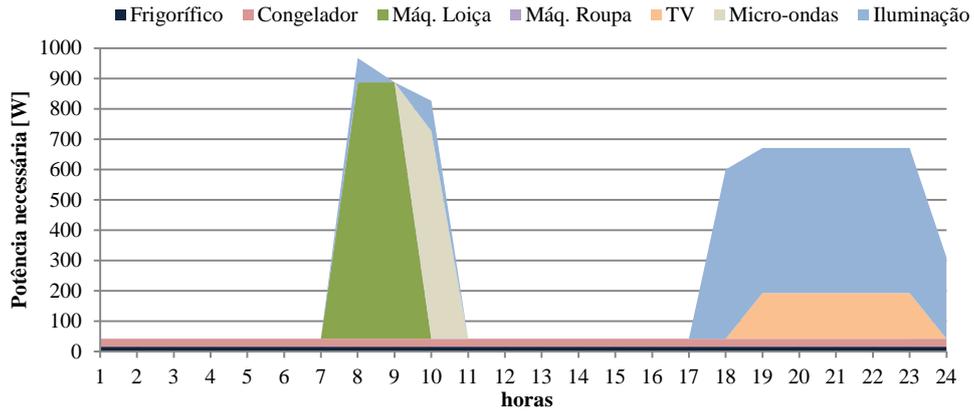


Figura 26 – Diagrama de consumo – 3ªfeira, 6ªfeira e domingo

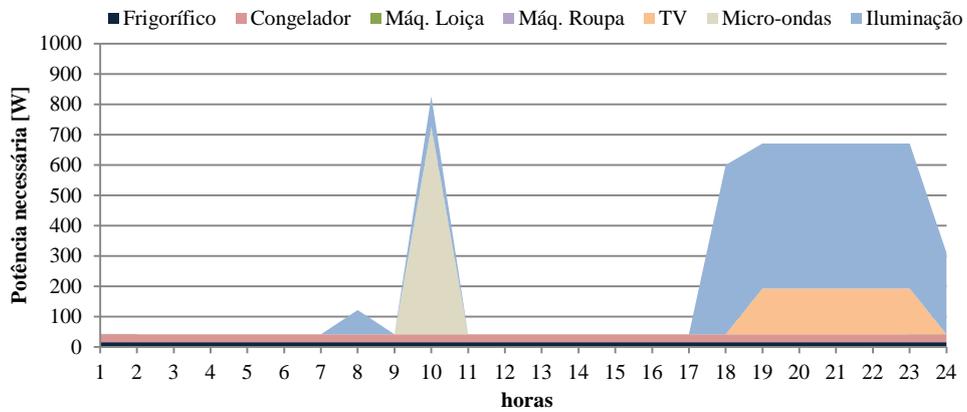


Figura 27 – Diagrama de consumo – 5ªfeira

## 6. Dimensionamento de sistemas

### 6.1 Recuperador de calor

Começando pelo sistema de aquecimento, e tendo em conta o referido, considera-se necessário um sobredimensionamento em relação ao sistema simulado para que as condições de conforto sejam asseguradas. Por outro lado, é uma premissa do projeto que o aquecimento seja feito com recurso a recuperadores de calor alimentados a biomassa florestal. O recuperador de calor a instalar na sala, por ser de centro, deverá ter duas faces.

O facto de a combustão emitir gases exige uma extração apropriada de modo a evitar riscos para a saúde dos ocupantes, pelo que cada recuperador de calor deverá ter um sistema de extração.

Por outro lado, para que exista combustão, é fundamental a disponibilidade de um comburente, o ar, pelo que deve ser previsto o fornecimento de ar exterior diretamente à base da grelha de combustão do recuperador através de uma conduta adequada. Este fornecimento permite que o ar exterior não seja forçado a entrar nos espaços pelas frinchas neles existentes por estes se encontrarem em depressão em relação ao exterior.

Os recuperadores de calor disponíveis no mercado que permitam os requisitos descritos têm, no entanto, potências nominais bastante superiores às necessárias. Considerando-se a *Stûv* como marca de referência optou-se pelos seguintes recuperadores de calor:

Tabela 21 – Equipamento referência – Recuperador de calor

Espaço	Área	Modelo a instalar			Custo (\$ USD)
		modelo	Potência nominal [kW]	Eficiência à potência nominal sem ventilador	
Quarto 1	20,69	16/58 in	6 – 8	80 %	5455
Quarto 2	12,94	16/58 in	6 – 8	80 %	5455
Quarto 3	13,02	16/58 in	6 – 8	80 %	5455
Sala + Cozinha	58,83	21/75 double face	9 – 15	71 %	15672

### 6.2 Sistema autónomo híbrido

Numa análise prévia ao diagrama anual constituído pelos diagramas de carga apresentados nas Figuras Figura 25, Figura 26 e Figura 27 e à disponibilidade do recurso solar e eólico, foi possível estimar quais as dimensões de cada um dos sistemas. Partindo do princípio que apenas se instalará um aerogerador, conhecida a sua potência nominal e curva de carga é possível estimar qual a produção necessária através do sistema PV e, assim, dimensioná-lo.

Quanto à capacidade de armazenamento das baterias, deverá ter-se em conta os maiores ciclos de carga e descarga, como descrito por Kellogg [28]:

$$\text{capacidade de armazenamento necessária} = \text{Max} \int \Delta P dt - \text{Min} \int \Delta P dt \quad (1)$$

Com necessidades horárias que não ultrapassem os 1000W, e tendo em conta fatores de capacidade típicos de cerca de 20%, 30% (percentagem de utilização da potência instalada), considerou-se necessária a instalação de cerca de 3 kW, estimando-se uma capacidade de armazenamento necessária de 600 Ah.

Com base na sua disponibilidade no mercado brasileiro, optou-se pela utilização dos seguintes produtos:

### ***Módulo Fotovoltaico***

REC 250PE BLK [29]– módulo multicristalino de 1,65 m<sup>2</sup>, com uma potência nominal de 250W, certificado de qualidade Solar Keymark e classificação A do Inmetro. Cada módulo é constituído por 3 conjuntos de 20 células ligadas em série (*string*), com 4 díodos by-pass (permitem que o módulo produza energia mesmo quando um grupo de células falha). As *strings* são ligadas em paralelo entre si. Garantia de 10 anos.

Características nas condições *STC* – *standard test conditions* (1000 W/m<sup>2</sup>, 25°C, AM 1,5):

- Potência Nominal ( $P_{MPP}$ ): 250W
- Tolerância: 0W/+5W
- Tensão de Máxima Potência ( $V_{mpp}$ ): 30,5V
- Corrente de Máxima Potência ( $I_{mpp}$ ): 8,20A
- Tensão de Circuito Aberto ( $V_{oc}$ ): 37,5V
- Corrente de Curto-circuito ( $I_{sc}$ ): 8,76A
- Eficiência do Módulo nas condições STC: 15,1%

Características nas condições *NOCT* – *Nominal Operating Cell Temperature* (800 W/m<sup>2</sup>, 20°C, AM 1,5, vento 1 m/s):

- Potência Nominal ( $P_{MPP}$ ): 182Wp
- Tensão de Máxima Potência ( $V_{mpp}$ ): 27,9V
- Corrente de Máxima Potência ( $I_{mpp}$ ): 6,56A
- Tensão de Circuito Aberto ( $V_{oc}$ ): 34,5V
- Corrente de Curto-circuito ( $I_{sc}$ ): 7,06A

Coeficientes de temperatura:

- Temperatura da célula em condições nominais (NOCT): 47,9 °C
- Coeficiente de potência: -0,43 %/°C
- Coeficiente de tensão: -0,33%/°C
- Coeficiente de corrente: 0,074%/°C

### ***Aerogerador***

Bergey Windpower Excel 1kW [30] - Aerogerador de magnetos permanentes de eixo horizontal com uma potência nominal de 1000W a uma velocidade de vento de 11 m/s. Inclui controlador de carga que permite carregar baterias com tensão nominal entre 12 e 48V e um sistema que permite abrandar o rotor caso as baterias estejam na sua capacidade máxima.

- Diâmetro do rotor: 2.5m
- Velocidade de vento para arranque: 3m/s

- Tensão: 12 - 48 VDC
- Potência nominal: 1000W (11 m/s)
- Número de Pás: 3
- Vento máximo suportado: 54 m/s
- Garantia: 5 anos

### ***Baterias***

Hoppecke OPzS solar.power 600Ah [31] [32] - Bateria de chumbo-ácido ventilada com tensão nominal de 2V e capacidade nominal de 600Ah.1800 ciclos com 80% de profundidade de descarga.

- Eficiência de carga e descarga: 86%
- Capacidade com descarga a 8h, 1.75V a 25°C: 695 Ah.
- Capacidade com descarga a 10h, 1.8V a 20°C: 686 Ah.
- Peso máximo: 46,1 kg
- Dimensões: 147mm x 208mm x 710mm

### ***Inversor/Controlador***

Apollo Solar PWP3.2KW [33] - Inversor/Controlador solar de 24V/3,2 kW com uma entrada e uma saída AC, três entradas DC, uma entrada para um gerador opcional.

#### **6.2.1 *Sistemas simulados no Homer***

Escolhidos os equipamentos, procedeu-se à sua caracterização no Homer. A caracterização foi baseada tanto nas fichas técnicas disponibilizadas pelas marcas como por informação já integrada no programa.

Os módulos fotovoltaicos foram caracterizados de acordo com a sua ficha técnica. Consideraram-se os painéis orientados a Norte, com um ângulo de inclinação de 34°C. A escolha deste ângulo teve como base a informação fornecida pelo CRESESB para o local: é a inclinação que permite que a produção do mês com menor disponibilidade solar seja mais elevada.

A curva de potência do aerogerador está já definida no programa, pelo que bastou caracterizar a altura do rotor (25m) e os custos associados.

A curva de capacidade das baterias também já está definida no programa. Indicou-se o número de baterias a considerar, o seu custo, e o tipo de ligação entre elas: 12 baterias ligadas em série – 24V, 600Ah.

Tabela 22 – Equipamento de referência: custos

PV	250 W	\$ 263
Eólico	1000 W	\$ 2790
Baterias	600 Ah, 2V	\$ 534
Inversor	3200 W, 24V	\$ 5000

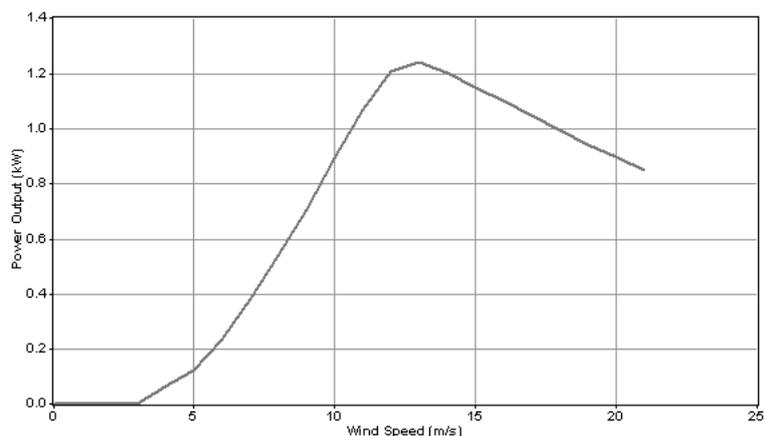


Figura 28 – Curva de potência do aerogerador

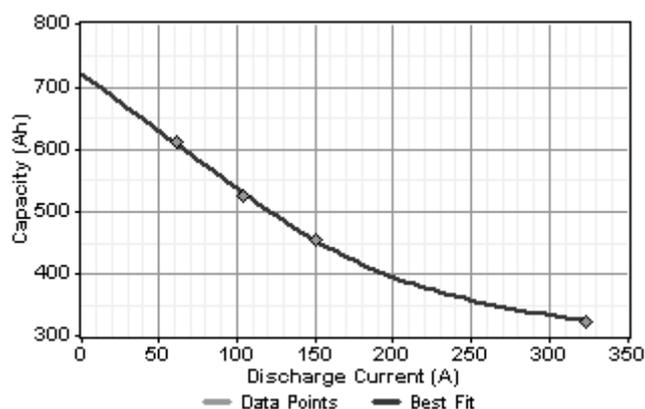


Figura 29 – Curva de capacidade das baterias

Caracterizados os equipamentos foi possível proceder à análise de sensibilidade de modo a escolher-se a combinação que, combinando custos e produção energética, melhor supre as necessidades de energia do edifício. Consideraram-se as seguintes possibilidades:

Tabela 23 – Configurações do sistema autónomo testadas

PV	Aerogeradores	Baterias	Inversor
250 W	1	12 baterias ligadas em série (24V, 600Ah)	3200 W
1000 W	2		
1500 W			
2000 W			
2500 W			
3000 W			

### 6.2.1 Resultados

De acordo com a análise efetuada pelo *Homer*, para falhas anuais máximas de fornecimento de energia de 1%, a configuração que melhor se adequa às necessidades do edifício é a que conjuga a utilização de 10 módulos fotovoltaicos e 1 aerogerador. A escolha de baterias e de controlador é adequada.

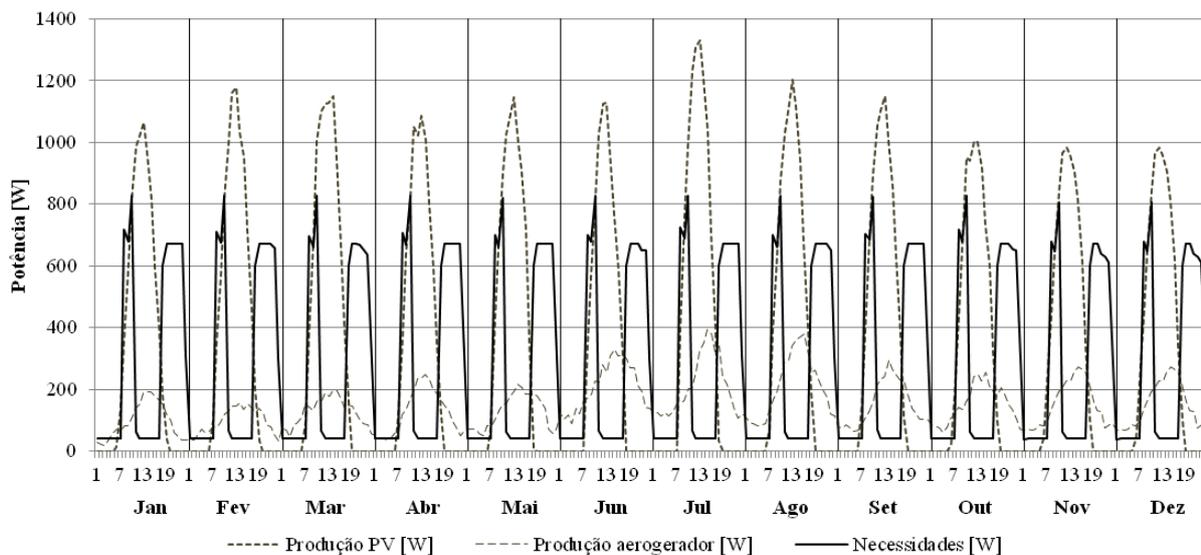


Figura 30 – Valores horários médios mensais de produção e consumo de energia

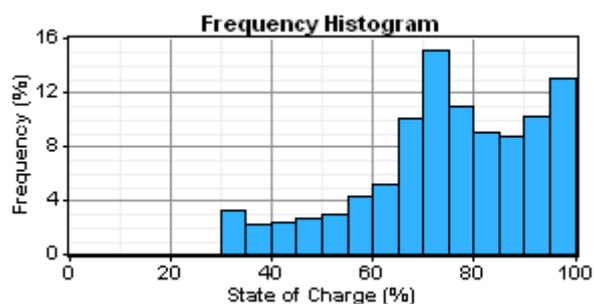


Figura 31 – Distribuição estatística do estado de carga das baterias

No gráfico da Figura 30 pode-se observar o comportamento horário médio mensal da produção dos painéis fotovoltaicos e do aerogerador, bem como a evolução das necessidades de energia.

No gráfico da Figura 31 pode-se verificar que a carga nas baterias é, na maior parte do tempo, superior a 70% da sua capacidade. Este é um fator importante que prolonga o seu ciclo de vida, permitindo um melhor aproveitamento do investimento.

Assim, o sistema funcionará da seguinte forma:

A energia elétrica produzida pelos painéis fotovoltaicos, sob a forma de corrente contínua, será convertida em corrente alternada no inversor/controlador e posteriormente distribuída à instalação ou armazenada no banco de baterias com capacidade de 600Ah, de acordo com as necessidades.

O aerogerador produz energia elétrica sob forma de corrente direta que é fornecida ao banco de baterias.

Na figura seguinte pode-se observar a configuração final do sistema:

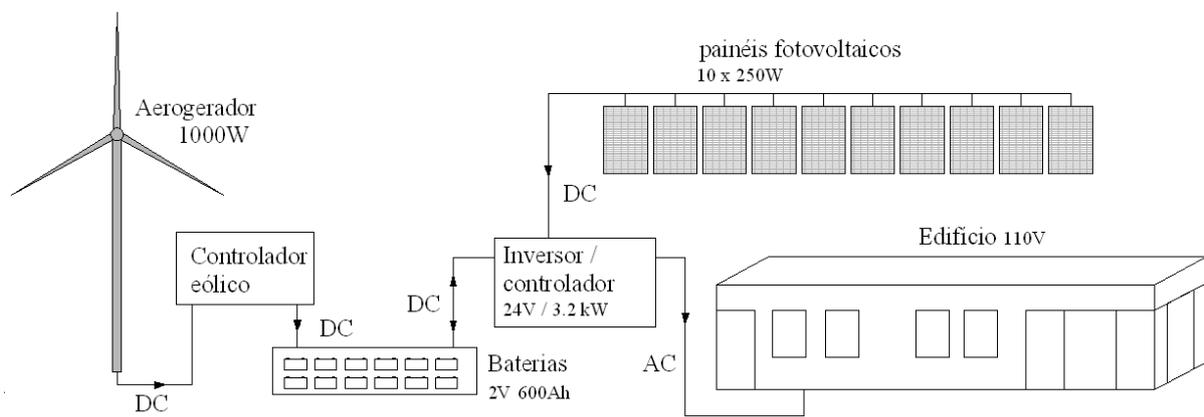


Figura 32 – Configuração final do sistema de produção de energia elétrica

## 7. Conclusão

A construção de edifícios sustentáveis é, cada vez mais, uma prioridade. Devido à complexidade e elevados custos das grandes remodelações com vista a melhorar o desempenho térmico e energético de um edifício, as medidas de eficiência energética e otimização devem ser planeadas desde a fase de projeto. A simulação computacional, por permitir avaliar os impactos das mais diversas medidas no desempenho de um edifício, ou de um sistema produtor de energia, tem assim um papel crucial.

A implementação de medidas de incentivo e de regulamentação tem também um papel fundamental na promoção da eficiência energética. No Brasil o novo Regulamento Técnico para Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ -R) permitirá certamente a construção de edifícios mais eficientes.

De acordo com a análise efetuada para o caso em estudo, o RTQ-R terá ainda alguns passos a dar, de modo a abranger diferentes tipos de construção. Apesar de não cumprir os pré-requisitos definidos no regulamento, o edifício em estudo tem um desempenho energético que lhe permite alcançar a melhor classificação – o nível A.

A instalação de um sistema autónomo constituído por 10 módulos fotovoltaicos de 250W, 1 aerogerador de 1 kW e um banco de 12 baterias de 2V ligadas em série permite que o edifício em estudo opere como um outro qualquer edifício, mesmo sem estar ligado à rede elétrica.

## 8. Referências

- [1] Global Buildings Performance, Buildings for Our Future, 2013.
- [2] Buildings Performance Institute Europe, Europe's buildings under the microscope, 2011.
- [3] European Commission - Eurostat, "Consumption of energy - statistics explained," Julho 2013. [Online]. Available: [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics\\_explained/index.php/Consumption\\_of\\_energy#Main\\_tables](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Consumption_of_energy#Main_tables). [Acedido em Outubro 2013].
- [4] International Energy Agency, "IEA Sankey Diagram," [Online]. Available: <http://www.iea.org/Sankey/>. [Acedido em Outubro 2013].
- [5] Empresa de Pesquisa Energética, Balanço Energético Nacional: Ano base 2012, Rio de Janeiro, 2013.
- [6] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman e A. S. Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th ed., John Wiley and Sons, 2007.
- [7] CEN, *EN ISO 7730:2005 - Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*, Bruxelas: European Committee for Standardization, 2005.
- [8] ASHRAE Handbook, Fundamentals, Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, 2009.
- [9] Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, EnergyPlus Engineering Reference, 2012.
- [10] "Electricidade Solar," Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, [Online]. Available: <http://solar.fc.ul.pt/solar.htm>. [Acedido em Setembro 2013].
- [11] U.S. Department of Energy, "EnergyPlus Energy Simulation Software: Testing and Validation," 2012. [Online]. Available: [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus\\_testing.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_testing.cfm). [Acedido em Setembro 2013].

- [12] W. Zhou, C. Lou, Z. Li, L. Lu e H. Yang, “Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar–wind power generation systems,” *Applied Energy*, vol. 87, p. 380–389, 2010.
- [13] G. Mendes, C. Ioakimidis e P. Ferrão, “On the planning and analysis of Integrated Community Energy Systems: A review and survey of available tools,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, p. 4836–4854, 2011.
- [14] D. B. Crawley, L. K. Lawrie, F. C. Winkelmann, W. Buhl, Y. J. Huang, C. O. Pedersen, R. K. Strand, R. J. Liesen, D. E. Fisher, M. J. Witte e J. Glazer, “EnergyPlus: creating a new-generation building,” *Energy and Buildings*, vol. 33, pp. 319-331, 2001.
- [15] Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Getting Started with EnergyPlus, 2012.
- [16] T. Lambert, P. Gilman e P. Lilienthal, “Micropower system modeling with HOMER,” em *Integration of Alternative Sources of Energy*, John Wiley & Sons, Inc., 2006, pp. 379-418.
- [17] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “ABNT NBR 15575-1:2013. Edificações Habitacionais - Desempenho; Parte 1: Requisitos gerais,” 2013.
- [18] C. A. Balaras, “The role of thermal mass on the cooling load of buildings. An overview of computational methods,” *Energy and Buildings*, vol. 24, n.º 1, pp. 1-10, 1996.
- [19] G. Carrilho da Graça, A. Augusto e M. M. Lerer, “Solar powered net zero energy houses for southern Europe: Feasibility study,” *Solar Energy*, vol. 86, n.º 1, pp. 634-646, 2012.
- [20] C. A. Pina dos Santos e L. Matias, Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios, Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2006.
- [21] Ministério de Minas e Energia, Plano Nacional de Eficiência Energética - Premissas e Diretrizes Básicas, 2011.
- [22] LabEEE, “CB3E,” 07 Dez 2012. [Online]. Available: <http://cb3e.ufsc.br/etiquetagem/residencial/downloads/planilhas-e-catalogos>. [Acedido em 30 Agosto 2013].
- [23] LabEEE, “Arquivos climáticos em formato EPW,” Novembro 2012. [Online]. Available: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-epw>. [Acedido em Julho 2013].
- [24] Inmetro, “Inmetro - Tabelas de Consumo / Eficiência Energética,” 2013. [Online]. Available:

- <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/ColetoresSolares-banho.pdf>. [Acedido em Outubro 2013].
- [25] PROCEL, “Equipamentos com Selo,” 04 Outubro 2013. [Online]. Available: <http://www.elektrobras.com/elb/main.asp?TeamID=%7B2DEB4057-D085-49A8-A66E-5D946249DC56%7D>. [Acedido em Outubro 2013].
- [26] “Decreto-Lei nº 80/2006 - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios,” *Diário da República I - Série-A, n.º67*, pp. 2468-2513, 04 Abril 2006.
- [27] Passive House Institute, “Passive House requirements,” 2012a. [Online]. Available: [http://www.passiv.de/en/02\\_informations/02\\_passive-house-requirements/02\\_passive-house-requirements.htm](http://www.passiv.de/en/02_informations/02_passive-house-requirements/02_passive-house-requirements.htm). [Acedido em Setembro 2013].
- [28] W. Kellogg, M. Nehrir, G. Venkataramanan e V. Gerez, “Generation unit sizing and cost analysis for stand-alone wind, fotovoltaic, and hybrid wind/PV systems,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 13, n.º 1, pp. 70-75, 1999.
- [29] REC, “Rec Peak Energy BLK Series,” Jan 2012. [Online]. Available: <http://www.recgroup.com/PageFiles/759/REC%20PE%20BLK%20Rev%20K%20ENG.pdf>. [Acedido em Setembro 2013].
- [30] Bergey wind power, “1 kW Bergey Excel 1,” 2012. [Online]. Available: <http://bergey.com/products/wind-turbines/bergey-excel-1>. [Acedido em Setembro 2013].
- [31] HOPPECKE Batterien, “HOPPECKE Batterien,” 2013. [Online]. Available: <http://www.hoppecke.com/content/view/full/1210>. [Acedido em Outubro 2013].
- [32] HOPPECKE Batterien, “OPzS - Hoppecke,” Junho 2012. [Online]. Available: [www.hoppecke.com](http://www.hoppecke.com). [Acedido em Outubro 2013].
- [33] Apollo Solar, 2011. [Online]. Available: <http://www.apollosolar.com/LinkClick.aspx?fileticket=n3I%2BWwq6RsE%3D&tabid=263>. [Acedido em Setembro 2013].
- [34] PROCEL Edifica, Desempenho Térmico e Eficiência Energética em Edificações, Rio de Janeiro, 2011.
- [35] Eletrobras/Procel Edifica/CB3E/LabEEE/InMetro, “Manual para aplicação do RTQ-R,” 2013.
- [36] INMETRO, “Portaria n.º 18, de 16 de janeiro de 2012: Regulamento Técnico de Qualidade para o Nível de Eficiência Energética em Edificações Residenciais,” 2012. [Online]. Available:

- <http://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/residencial/downloads/RTAC001788.pdf>. [Acedido em Fevereiro 2013].
- [37] “Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings,” *Official Journal of the European Union*, vol. 153, pp. 13-35, 18 Junho 2010.
- [38] ADENE, Perguntas e Respostas sobre o RCCTE, 2.0 ed., 2011.
- [39] Passive House Institute, “Criteria for Passive House Component certification,” 2012b. [Online]. Available:  
[http://www.passiv.de/en/03\\_certification/01\\_certification\\_components/02\\_certification\\_criteria/02\\_certification\\_criteria.htm](http://www.passiv.de/en/03_certification/01_certification_components/02_certification_criteria/02_certification_criteria.htm). [Acedido em Setembro 2013].
- [40] C. Candido, R. Lamberts, R. de Dear, L. Bittencourt e R. de Vecchi, “Towards a Brazilian standard for naturally ventilated buildings: guidelines for thermal and air movement acceptability,” *Building Research & Information*, vol. 39, pp. 145-153, 2011.
- [41] N. d. N. Batista, E. L. La Rovere e J. C. R. Aguiar, “Energy efficiency labeling of buildings: An assesment of the Brazilian case,” *Elsevier - Energy and Buildings 43 (2011)*, pp. 1179-1188, 8 Novembro 2010.
- [42] A. Moret Rodrigues, A. Canha da Piedade e A. M. Braga, *Térmica de Edifícios*, Lisboa: Edições Orion, 2009.
- [43] CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, “Potencial Energético Eólico - Atlas do Potencial Eólico Brasileiro,” [Online]. Available:  
[http://www.cresesb.cepel.br/atlas\\_eolico/index.php](http://www.cresesb.cepel.br/atlas_eolico/index.php). [Acedido em Outubro 2013].
- [44] A. Shukla, S. Venugopalan e B. Hariprakash, “Nickel-based rechargeable batteries,” *Journal of Power Sources*, vol. 100, p. 125–148, 2001.

## **Anexos**

<b>Anexo I</b>	<b>RTQ-R</b> .....	<b>I</b>
i)	Pré-requisitos do RTQ-R.....	<b>I</b>
ii)	Método Prescritivo .....	<b>II</b>
iii)	Pré-requisitos do Sistema de Aquecimento de Água.....	<b>V</b>
iv)	Sistema solar térmico .....	<b>VI</b>
v)	Bonificações .....	<b>VIII</b>
<b>Anexo II</b>	<b>Folhas de cálculo: métodos prescritivos</b> .....	<b>X</b>
i)	Folhas de cálculo utilizadas no método prescritivo para avaliação da envolvente.....	<b>X</b>
ii)	Folhas de cálculo utilizadas para análise do sistema solar térmico.....	<b>XIV</b>

## Anexo I RTQ-R

### i) Pré-requisitos do RTQ-R

#### *Transmitância térmica, capacidade térmica e absortância solar das superfícies*

O RTQ-R apresenta requisitos para paredes e coberturas de espaços de permanência prolongada de acordo com a zona bioclimática em que o edifício em estudo se localiza. Caso existam diferentes configurações de parede ou cobertura para o mesmo espaço, o valor a considerar deverá ser uma ponderação de acordo com as respectivas áreas. Esta avaliação visa apenas envolvente opaca.

De acordo com o RTQ-R, o não cumprimento destes pré-requisitos implica Equivalentes Numéricos de *Resfriamento, Aquecimento e Refrigeração* máximos de 3, equivalentes a um nível de eficiência C.

Esta indicação é considerada na folha de cálculo fornecida pelo CB3E utilizada na aplicação do método prescritivo, no entanto, neste trabalho, optou-se por se ignorar esta implicação por se considerar que as soluções construtivas leves, embora com o pavimento como elemento pesado capaz de conceder inércia ao edifício, mesmo não sendo consideradas energeticamente eficientes pelo presente regulamento, têm mais-valias ambientais que não deverão ser penalizadoras.

Os pré-requisitos da ZB3 podem ser consultados na Tabela 24.

Tabela 24 – Pré-requisitos da envolvente para a ZB3

Componente	Fator solar	Coefficiente de transmissão térmica U [W/(m <sup>2</sup> K)]	Capacidade Térmica [kJ/(m <sup>2</sup> K)]
Parede	$\alpha \leq 0,6$	$U \leq 3,70$	$CT \geq 130$
	$\alpha > 0,6$	$U \leq 2,50$	$CT \geq 130$
Cobertura	$\alpha \leq 0,6$	$U \leq 2,30$	Sem requisitos
	$\alpha > 0,6$	$U \leq 1,50$	Sem requisitos

#### *Ventilação natural*

##### *Percentual de áreas mínimas de abertura para ventilação*

O RTQ-R exige ainda que os espaços de permanência prolongada possuam áreas mínimas de aberturas para ventilação natural, sob pena de não se atingir um nível de eficiência da envolvente para *resfriamento* superior a C.

Assim, todos os espaços de permanência prolongada devem apresentar uma área mínima para ventilação natural superior a 8% da área útil do espaço.

Para além disso, nas ZB 1 a 7 e nos locais em que se verifiquem médias mensais de temperaturas mínimas abaixo de 20°C, as aberturas para ventilação devem ser passíveis de fechar (exceto as áreas de ventilação de segurança), e para que o edifício possa atingir o nível de eficiência A para a envolvente, pelo menos 50% das casas de banho com duche ou banheira, deve possuir ventilação natural.

##### *Ventilação cruzada*

Nas ZB 2 a 8, o edifício deve ainda possuir ventilação cruzada que proporcione o escoamento de ar entre aberturas situadas em duas fachadas em orientações diferentes, promovendo a existência de boa qualidade do ar interior.

Caso as aberturas não obedeçam ao indicado na Equação 2, o nível de eficiência da envolvente para *resfriamento* não poderá ser superior a C.

$$A_2/A_1 \geq 0,25 \quad (2)$$

Onde:

A<sub>1</sub>: somatório das áreas efetivas de aberturas para ventilação localizadas nas fachadas da orientação com maior área de abertura para ventilação (m<sup>2</sup>);

A2: somatório das áreas efetivas de aberturas para ventilação localizadas nas fachadas das restantes orientações (m<sup>2</sup>).

### **Iluminação natural**

O acesso à iluminação natural em espaços de permanência prolongada deve também ser garantido. A soma das áreas de aberturas para iluminação natural de cada espaço deve corresponder a, no mínimo, 12,5% da área útil do ambiente.

Caso este pré-requisito não seja cumprido, o nível de eficiência da envolvente para *resfriamento*, para *aquecimento* e para *refrigeração* não poderá ser superior a C.

## **ii) Método Prescritivo**

O método prescritivo é um método simplificado que permite o cálculo dos indicadores referidos através da aplicação de equações lineares de regressão múltipla. No total, o RTQ-R contempla 18 equações que deverão ser utilizadas de acordo com a zona bioclimática em que o edifício se encontra, conforme consta na Tabela 25.

Tabela 25 – Equações de acordo com a Zona Bioclimática

Zona Bioclimática (ZB)	1	2	3	4	5	6	7	8
Resfriamento	✓	✓	✓	✓	(*)	✓	✓	✓
Refrigeração	✓	✓	✓	✓	(*)	✓	✓	✓
Aquecimento	✓	✓	✓	✓				

(\*) utiliza a equação da ZB 8

Serão apenas apresentadas as equações relativas à zona bioclimática em que o edifício se localiza, a ZB3.

### **Graus hora de resfriamento**

O indicador de *graus hora de resfriamento* é obtido a partir da Equação 3, sendo as constantes substituídas de acordo com os valores definidos na

Tabela 26.

$$\begin{aligned}
 GH_R = & (a) + (b \times CT_{baixa}) + (c \times \alpha_{cob}) + (d \times somb) + (e \times solo \times AU_{amb}) \\
 & + (f \times \alpha_{par}) + (g \times PD/AU_{amb}) + (h \times CT_{cob}) + (i \times Ab_S) \\
 & + (j \times AP_{ambL} \times U_{par} \times \alpha_{par}) + (k \times A_{parInt} \times CT_{par}) + (l \times solo) \\
 & + (m \times U_{cob} \times \alpha_{cob} \times cob \times AU_{amb}) + (n \times F_{vent}) + (o \times AU_{amb}) \\
 & + (p \times somA_{par}) + (q \times AAb_O \times (1 - somb)) + (r \times AAb_L \times F_{vent}) \\
 & + (s \times CT_{par}) + (t \times AAb_S \times (1 - somb)) \\
 & + (u \times AP_{ambN} \times U_{par} \times \alpha_{par}) + (v \times pil) + (w \times P_{ambo}) \\
 & + (x \times AAb_N \times somb) + (y \times Ab_N) + (z \times P_{ambN}) + (aa \times AP_{ambN}) \\
 & + (ab \times (U_{cob} \times \alpha_{cob}/CT_{cob}) \times AU_{amb}) + (ac \times cob \times AU_{amb}) \\
 & + (ad \times CT_{alta}) + (ae \times U_{cob}) + (af \times AP_{ambS} \times U_{par} \times \alpha_{par}) \\
 & + (ag \times P_{ambL}) + (ah \times A_{parInt}) + (ai \times PD \times AU_{amb}) \\
 & + (aj \times P_{ambS}) + (ak \times AAb_S \times F_{vent}) + (al \times AAb_O \times F_{vent}) \\
 & + (am \times AAb_N \times F_{vent}) + (an \times AP_{ambo} \times U_{par} \times \alpha_{par}) \\
 & + (ao \times AP_{ambS}) + (ap \times AAb_N \times (1 - somb))
 \end{aligned} \tag{3}$$

Tabela 26 – Constantes utilizadas na Equação 3

a	836,4188	l	-605,5557	w	399,0021	ah	16,2740
b	1002,2853	m	25,1879	x	2,4466	ai	-20,4181
c	1248,7615	n	-830,6742	y	-379,5777	aj	126,6339
d	-1042,8507	o	34,1620	z	738,1763	ak	51,1530
e	-7,9675	p	-3,3292	aa	-4,2304	al	55,4249
f	1007,6786	q	16,9856	ab	5,5988	am	79,2095
g	2324,8467	r	70,1758	ac	-6,1829	an	15,3351
h	-0,3032	s	-0,0426	ad	-200,9447	ao	26,0925
i	-77,7838	t	-54,1796	ae	-103,1092	ap	-34,7777
j	26,3363	u	14,1195	af	3,8400		
k	-0,0016	v	-114,4985	ag	431,9407		

As variáveis utilizadas são as seguintes:

$AAb_L$ ,  $AAb_N$ ,  $AAb_O$ ,  $AAb_S$  ( $m^2$ ): área de abertura, incluindo caixilhos, nas fachadas orientadas a Este, Norte, Oeste e Sul, respetivamente;

$Ab_N$ ,  $Ab_S$ : variáveis binárias que indicam a existência de aberturas, a Norte e a Sul, respetivamente. Se existirem aberturas no espaço em estudo orientadas no quadrante referente, o valor a atribuir deve ser 1, caso contrário, o valor deve ser 0;

$APamb_L$ ,  $APamb_N$ ,  $APamb_O$ ,  $APamb_S$  ( $m^2$ ): área de parede (excluindo aberturas), do espaço em estudo, em contato com o exterior, medida pelo interior, orientada a Este, Norte, Oeste e Sul, respetivamente;

$AparInt$  ( $m^2$ ): área das paredes interiores, do espaço em estudo;

$AUamb$  ( $m^2$ ): área útil do espaço analisado;

$cob$ : variável que define se o espaço em análise tem cobertura em contato com o exterior;

$cob = 0$  se se tiver 0 a 25% de área de cobertura em contato com o exterior

$cob = 0,5$  se se tiver 25,1% a 75% de área de cobertura em contato com o exterior

$cob = 1$  se se tiver mais de 75% de área de cobertura em contato com o exterior

$CT_{alta}$  [ $kJ/(m^2K)$ ]: variável binária que define se a envolvente opaca do espaço em estudo possui capacidade térmica alta. É considerada a média ponderada das capacidades térmicas das paredes em contato com o exterior, interiores e cobertura pelas respetivas áreas. A capacidade térmica é considerada alta se for superior a  $250 kJ/m^2K$ , caso em que a variável assume o valor 1, caso contrário, deverá assumir o valor 0;

$CT_{baixa}$  [ $kJ/(m^2K)$ ]: variável binária que define se a envolvente opaca do espaço em estudo possui capacidade térmica baixa. A capacidade térmica é considerada baixa se for inferior a  $50 kJ/m^2K$ , caso em que a variável assume o valor 1, caso contrário, deverá assumir o valor 0;

Nota: caso a capacidade térmica seja superior a  $50 kJ/m^2K$  e inferior a  $250 kJ/m^2K$ , ambas as anteriores devem ter o valor 0.

$CT_{cob}$  [ $kJ/(m^2K)$ ]: capacidade térmica da cobertura. Deve ser calculada considerando-se todas as camadas entre o interior e o exterior do espaço em estudo. Se a cobertura não estiver em contato com o exterior o valor deve ser 1;

$CT_{par}$  [ $kJ/(m^2K)$ ]: média ponderada da capacidade térmica das paredes em contato com o exterior e das paredes interiores do ambiente pelas respetivas áreas;

$F_{vent}$  (adimensional): fator de abertura para ventilação. Razão entre a área do vão e a área de abertura para ventilação. Os valores variam entre 0 e 1.

$P_{amb_L}$ ,  $P_{amb_N}$ ,  $P_{amb_O}$ ,  $P_{amb_S}$  ( $m^2$ ): variáveis binárias que indicam a existência de parede em contato com o exterior, no espaço em estudo, orientada a Este, Norte, Oeste e Sul, respetivamente. Se existirem, o valor a atribuir à variável referente à orientação respetiva deve ser 1, caso contrário, o valor deve ser 0;

$PD$  (m): pé-direito médio do ambiente analisado;

*pil*: variável binária que indica a existência de pavimento em contato com o exterior, suportado por pilares;

*pil* = 0 se se tiver de 0 a 25% de área de pavimento em contato com o exterior

*pil* = 0,5 se se tiver de 25,1% a 75% de área de pavimento em contato com o exterior

*pil* = 1 se se tiver mais de 75% de área de pavimento em contato com o exterior

*solo*: variável binária que indica a existência de pavimento em o contato som o solo.

*solo* = 0 se se tiver de 0 a 25% de área de pavimento em contato com o solo

*solo* = 0,5 se se tiver de 25,1% a 75% de área de pavimento em contato com o solo

*solo* = 1 se se tiver mais de 75% de área de pavimento em contato com o solo

*SomA<sub>parext</sub>*: somatório das áreas de parede em contato com o exterior do espaço em estudo ( $SomA_{parext} = AP_{ambL} + AP_{ambN} + AP_{ambO} + AP_{ambS}$ );

*somb*: variável que define a presença de dispositivos de proteção solar exteriores aos vãos envidraçados. Os valores possíveis são:

*somb* = 0 se não existir qualquer dispositivos de proteção solar

*somb* = 1 se existirem venezianas que cubram mais de 75% do vão envidraçado quando fechadas

*somb* pode ainda tomar valores entre 0 e 0,5 caso os vãos sejam sombreados por beirais ou varandas

*U<sub>cob</sub>* [W/(m<sup>2</sup>K)]: Coeficiente de transmissão térmica da cobertura. Se a cobertura do ambiente não estiver em contato com o exterior o valor deve ser 0. Caso existam diferentes configurações o valor a utilizar deverá ser uma ponderação entre todas de acordo com as respectivas áreas.

*U<sub>par</sub>* [W/(m<sup>2</sup>K)]: Coeficiente de transmissão térmica das paredes de envolvente exterior. Caso existam diferentes configurações o valor a utilizar deverá ser uma ponderação entre todas de acordo com as respectivas áreas.

*α<sub>cob</sub>* (adimensional): coeficiente de absorção da superfície externa da cobertura. O valor deve situar-se entre 0,10 e 0,90 ou adotar o valor 0 quando a cobertura do ambiente não estiver em contato com o exterior;

*α<sub>par</sub>* (adimensional): coeficiente de absorção da face exterior das paredes em contato com o exterior. O valor deve situar-se entre 0,10 e 0,90;

### Consumo relativo para aquecimento

O indicador de *consumo relativo para aquecimento* (*C<sub>A</sub>*) é obtido a partir da Equação 4, sendo as constantes substituídas de acordo com os valores definidos na Tabela 27.

$$C_A = [(a) + (b \times CT_{par}) + (c \times AU_{amb}) + (d \times P_{ambS}) + (e \times CT_{baixa}) + (f \times solo) + (g \times pil) + (h \times U_{cob}) + (i \times \alpha_{par}) + (j \times CT_{cob}) + (k \times somA_{par}) + (l \times AAb_S) + (m \times Ab_N) + (n \times (U_{cob} \times \alpha_{cob} / CT_{cob}) \times AU_{amb}) + (o \times CT_{alta}) + (p \times U_{par}) + (q \times F_{vent}) + (r \times cob) + (s \times \alpha_{cob}) + (t \times PD) + (u \times somA_{parExt} \times CT_{par}) + (v \times AP_{ambN} \times \alpha_{par}) + (w \times AP_{ambS} \times \alpha_{par}) + (x \times PD / AU_{amb})] / 1000 \quad (4)$$

Tabela 27 – Constantes utilizadas na Equação 4

a	6981,8136	g	2479,9604	m	-543,4286	s	-3315,0119
b	0,3717	h	394,0458	n	14,0555	t	1262,6737
c	-122,4306	i	-2521,9122	o	-1583,9814	u	-0,0219
d	1557,3444	j	-1,2280	p	990,0915	v	-75,9370
e	2109,4866	k	65,4370	q	-1111,1099	w	-80,3345
f	2802,3931	l	131,7352	r	4323,9241	x	-15281,1938

### Consumo relativo para refrigeração

O indicador de *consumo relativo para Refrigeração* ( $C_R$ ) é obtido a partir da Equação 4, sendo as constantes substituídas de acordo com os valores definidos na Tabela 28.

$$\begin{aligned}
 C_R = & \left[ (a) + (b \times PD/AU_{amb}) + (c \times CT_{baixa}) + (d \times solo) + (e \times \alpha_{par}) \right. \\
 & + (f \times CT_{cob}) + (g \times somb) + (h \times Ab_S) + (i \times AU_{amb}) \\
 & + (j \times somA_{parExt} \times CT_{par}) + (k \times pil) + (l \times cob) \\
 & + (m \times U_{cob} \times \alpha_{cob} \times cob \times AU_{amb}) \\
 & + (n \times (U_{cob} \times \alpha_{cob}/CT_{cob} \times AU_{amb})) + (o \times cob \times AU_{amb}) \\
 & + (p \times Ab_N) + \left( q \times (U_{par} \times \alpha_{par}/CT_{par} \times somA_{par}) \right) \\
 & + (r \times somA_{par}) + (s \times \alpha_{cob}) + (t \times AAb_N \times somb) \\
 & + (u \times AAb_S \times F_{vent}) + (v \times AAb_L \times F_{vent}) + (w \times AAb_O \times F_{vent}) \\
 & + (x \times AAb_S) + (y \times P_{ambS}) + (z \times AP_{ambS} \times U_{par} \times \alpha_{par}) \\
 & + (aa \times AP_{ambS} \times \alpha_{par}) + (ab \times AAb_N \times F_{vent}) \\
 & \left. + (ac \times AAb_N \times (1 - somb)) \right] / 1000
 \end{aligned} \tag{5}$$

Tabela 28 – Constantes utilizadas na Equação 4

a	7867,8924	i	-79,8228	q	-7,4793	y	-660,4513
b	33900,9915	j	0,0211	r	31,0384	z	73,9340
c	-4066,2367	k	-1185,7252	s	1977,0195	aa	-112,7864
d	-4446,9250	l	-2582,5286	t	16,3096	ab	397,1551
e	6016,2116	m	92,4051	u	641,0082	ac	-247,9866
f	1,8199	n	-14,3024	v	493,2535		
g	-1827,6311	o	-46,8056	w	485,5657		
h	-877,7417	p	-351,0817	x	-199,1908		

### iii) Pré-requisitos do Sistema de Aquecimento de Água

#### Pré-requisitos gerais

Tal como a envolvente, também o sistema de aquecimento de água tem de cumprir certos pré-requisitos:

- As tubagens de água quente devem ser apropriadas para a sua função, obedecendo às normas técnicas aplicáveis. Para obtenção de nível A ou B, as tubagens metálicas de transporte de água quente devem estar isoladas termicamente por um material de condutividade térmica entre 0,032 e 0,040 W/(m.K). A espessura do isolamento dependerá do diâmetro da tubagem: para diâmetros inferiores a 40 mm, a espessura mínima deverá ser de 1,0 cm; para diâmetros superiores deverá ser de 2,5 cm. As tubagens não metálicas, independentemente do seu diâmetro, devem ser isoladas com um isolante térmico com a condutividade térmica já indicada, e uma espessura mínima de 1cm.
- Caso exista um depósito de água aquecida sem recurso a coletores solares, deve-se comprovar que a estrutura do depósito apresenta uma resistência térmica mínima de 2,2 (m<sup>2</sup>.K)/W.
- Nas regiões Norte e Nordeste, caso não exista um sistema de aquecimento de água instalado nas habitações em estudo, o nível de eficiência do sistema de aquecimento de água máximo é D. Nas restantes regiões, por o clima ser mais frio, este nível passa a E. Esta limitação deve-se ao facto de, nestes casos, a utilização do chuveiro elétrico ser a única opção.

### ***Pré-requisitos do sistema solar térmico***

- Os coletores solares devem ser instalados com orientação e ângulo de inclinação conforme especificações, manual de instalação e projeto. A orientação ideal dos coletores é segundo o Norte geográfico com desvio máximo de até 30°. A inclinação ideal dos coletores é a da latitude local acrescida de 10°.
- Para obtenção dos níveis de eficiência A ou B: os coletores solares deverão ter ENCE (Etiqueta Nacional de Conservação de Energia) A ou B ou Selo Procel (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica); os depósitos devem ter Selo Procel (caso o depósito tenha um volume superior aos classificados, deve-se utilizar um com desempenho igual ou superior a estes);
- Tanto os coletores como os depósitos devem cumprir os requisitos das normas brasileiras aplicáveis
- Deve-se dar preferência a instaladores que façam parte do programa de qualificação de fornecedores de sistemas solares térmicos – QUALISOL BRASIL.
- O depósito deve ter um isolamento térmico adequado e capacidade de armazenamento compatível com o dimensionamento: sistemas que apresentem o volume de armazenamento entre 40 e 50 litros por unidade de área de coletor, ou superior a 150 l/m<sup>2</sup> de coletor, poderão ter, no máximo, nível de eficiência D. Sistemas cujo volume de armazenamento real seja inferior a 40 l/m<sup>2</sup> de coletor poderão obter, no máximo, nível de eficiência D.

### **iv) Sistema solar térmico**

A fração solar é obtida de acordo com os seguintes passos:

#### **1) Cálculo do volume do sistema de armazenamento**

$$V_{\text{armaz}} = \frac{V_{\text{consumo}} \times (T_{\text{consumo}} - T_{\text{amb}})}{T_{\text{armaz}} - T_{\text{amb}}} \quad (6)$$

Onde:

$V_{\text{armaz}}$ : volume de armazenamento do sistema solar térmico (l);

$V_{\text{consumo}}$ : volume diário de água a ser aquecida (l/dia). Deve-se considerar no mínimo 50 l/pessoa/dia e a existência de duas pessoas por quarto;

$T_{\text{consumo}}$ : temperatura da água de consumo (°C). Deve-se considerar no mínimo 40°C;

$T_{\text{armaz}}$ : temperatura de armazenamento da água (°C). Esta temperatura deve ser, no mínimo, igual à temperatura de consumo;

$T_{\text{amb}}$ : temperatura ambiente média anual do ar exterior do local de instalação (°C), de acordo com o Anexo D da NBR 15569 – dado a norma não estar disponível para o público em geral, neste trabalho foram utilizadas as temperaturas do ficheiro climático de São Luiz do Paraitinga.

#### **2) Cálculo das necessidades de energia útil**

$$DE_{\text{mês}} = V_{\text{consumo}} \times N \times (T_{\text{consumo}} - T_{\text{AF}}) \times 1,16 \times 10^{-3} \quad (7)$$

Onde:

$DE_{\text{mês}}$ : demanda (necessidade) de energia (kWh/mês);

N: número de dias do mês considerado (dias/mês);

$T_{\text{AF}}$ : temperatura da água fria da rede (°C) – foi considerada igual à  $T_{\text{amb}}$

#### **3) Cálculo da fração solar (percentagem de energia solar que satisfaz as necessidades energéticas para AQS)**

**a. Cálculo da radiação solar mensal incidente sobre a superfície do coletor**

$$EI_{mês} = H_{dia} \times N \quad (8)$$

Onde:

$EI_{mês}$ : energia solar mensal incidente sobre as superfícies dos coletores (kWh/(m<sup>2</sup>.mês));

$H_{dia}$ : radiação solar incidente no plano inclinado (kWh/(m<sup>2</sup>.dia)), obtida em cartas solares (RTQ-R sugere o *site* do CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito – ou o programa Radiasol desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul). Foram utilizados os dados disponibilizados no *site* do CRESESB para Ubatuba (o município com dados disponíveis mais próximo do edifício em estudo).

**b. Cálculo do parâmetro  $D_1$**

$$D_1 = \frac{EA_{mês}}{DE_{mês}} \quad (9)$$

Onde:

$EA_{mês}$ : energia solar mensal absorvida pelos coletores (kWh/mês), com:

$$EA_{mês} = S_c \times F'_R(\tau\alpha) \times EI_{mês} \quad (10)$$

Onde:

$S_c$  – superfície de absorção do coletor (m<sup>2</sup>);

$F'_R(\tau\alpha)$  – fator adimensional calculado por:

$$F'_R(\tau\alpha) = F_R(\tau\alpha)_n \times \left[ \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} \right] \times \frac{F'_R}{F_R} \quad (11)$$

Onde:

$F_R(\tau\alpha)_n$  – fator de eficiência ótica do coletor, obtido nas tabelas do PBE para coletores solares (adimensional);

$[(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n]$  – modificador do ângulo de incidência (na ausência desta informação recomenda-se adotar 0,96 para coletores com cobertura de vidro);

$F'_R/F_R$  – fator de correção do conjunto coletor/permutador (na ausência desta informação recomenda-se adotar 0,95).

**c. Cálculo do parâmetro  $D_2$**

$$D_2 = \frac{EP_{mês}}{DE_{mês}} \quad (12)$$

Onde:

$EP_{mês}$ : energia solar mensal não aproveitada pelos coletores, calculada por:

$$EP_{mês} = S_c \times F'_R U_L \times (100 - T_{amb}) \times \Delta T \times K_1 \times K_2 \quad (13)$$

Com

$F'_R U_L$  – fator (kW/(m<sup>2</sup>K)) calculado por:

$$F'_R U_L = F_R U_L \times \frac{F'_R}{F_R} \times 10^{-3} \quad (14)$$

$F_R U_L$  – coeficiente global de perdas do coletor, obtido nas tabelas do PBE para coletores solares (W/(m<sup>2</sup>.K));

$\Delta T$  – período de tempo considerado (horas);

$K_1$  – fator de correção para armazenamento, calculado por:

$$K_1 = \left[ \frac{V_{armaz}}{75 \times S_c} \right]^{-0,25} \quad (15)$$

$K_2$  – fator de correção para o sistema solar térmico que relaciona as diferentes temperaturas, calculado por:

$$K_2 = \frac{11,6 + 1,18 T_{AC} + 3,86T_{AF} - 2,32T_{amb}}{100 - T_{amb}} \quad (16)$$

$T_{AC}$ : temperatura mínima admissível da água quente. Deve-se utilizar 45°C.

**d. Cálculo da fração solar mensal  $f$**

$$f = 1,029 D_1 - 0,065 D_2 - 0,245D_1^2 + 0,0018D_2^2 + 0,215D_1^3 \quad (17)$$

**e. Cálculo da energia útil mensal absorvida pelo sistema solar**

$$EU_{mês} = f \times DE_{mês} \quad (18)$$

**f. Cálculo da fração solar anual  $F$**

$$F = \frac{\sum_1^{12} EU_{mês}}{\sum_1^{12} DE_{mês}} \quad (19)$$

**v) Bonificações**

**Ventilação natural (até 0,40 pontos)**

- 0,12 pontos Para obtenção desta pontuação, é exigido se comprove que as UH até dois pavimentos tenham uma porosidade (razão entre a área efetiva de abertura para ventilação natural e a área da fachada) mínima de 20% em pelo menos duas fachadas de orientações distintas. Edifícios mais altos têm redução da exigência, que não será apresentada por não se enquadrar no caso de estudo;
- 0,16 pontos Todos os espaços de ocupação prolongada devem ter dispositivos que favoreçam o desempenho da ventilação natural mas que permitam o controlo da iluminação natural, incidência de chuva e manutenção de privacidade;
- 0,06 pontos Todos os espaços de ocupação prolongada devem ter aberturas exteriores cujo vão livre tenha o centro geométrico localizado entre 0,40 e 0,70 m acima do pavimento;
- 0,06 pontos Passíveis de atribuição apenas a UH localizadas na ZB8.

**Iluminação natural (até 0,30 pontos)**

**Método prescritivo**

- 0,20 pontos A maioria dos espaços de permanência prolongada, cozinha e áreas de serviço (50% + 1) com iluminação natural lateral devem ter profundidade máxima de 2,4 vezes a distância medida entre o pavimento e a altura máxima da abertura efetiva para iluminação (m);
- 0,10 pontos Cada espaços de permanência prolongada, cozinha e áreas de serviço deve ter a refletividade do teto superior a 60%.

**Método da simulação**

- 0,30 pontos Utilizando um *software* de simulação dinâmica de iluminação natural (como o *DaySim*, *Apolux* ou *Troplux*), a maioria dos espaços de permanência prolongada, cozinha e área de serviço (50% mais 1) sem proteção solar devem ter 60 lux em 70% da sua área, durante 70% da horas com disponibilidade solar do ano. E a maioria dos espaços de permanência prolongada (50% mais 1) com proteção solar devem ter 60 lux em 50% da sua área, durante 70% da horas com disponibilidade solar do ano.

### **Uso racional de água (até 0,20 pontos)**

0,20 pontos Nas UH devem ser instalados equipamentos economizadores e sistemas de uso de água da chuva, a bonificação é obtida de acordo com a equação seguinte:

$$b_3 = 0,07 (BS_{AP}/BS) + 0,04 (BS_E/BS) + 0,04 (CH_E/CH) + 0,02 (T_E/T) + 0,03 (outros_{AP}/outros) \quad (20)$$

Onde:

BS<sub>AP</sub>: quantidade de sanitas que utilizam água pluvial;

BS: quantidade de sanitas existentes;

BS<sub>E</sub>: quantidade sanitas com autoclismo com dupla descarga;

CH<sub>E</sub>: quantidade de chuveiros com limitadores de caudal;

CH: quantidade de chuveiros existentes;

T<sub>E</sub>: quantidade de torneiras com arejador de caudal constante (6 l/min), regulador de caudal ou limitador de caudal;

T: quantidade de torneiras existentes;

outros<sub>AP</sub>: quantidade de outros pontos que utilizam água pluvial;

outros: quantidade de outros pontos que utilizem água.

### **Condicionamento artificial de ar (até 0,20 pontos)**

0,20 pontos A envolvente da UH deve atingir nível A de eficiência quando condicionada artificialmente;

Os sistemas de climatização devem possuir ENCE A ou Selo Procel e estar de acordo com as normas brasileiras de condicionadores de ar domésticos;

Por não estar prevista a instalação de sistemas de climatização, este ponto não é aplicável.

### **Iluminação artificial (até 0,10 pontos)**

0,05 pontos 50% das fontes de iluminação artificial da UH deve ter uma eficiência superior a 75lm/W ou com Selo Procel em todos os espaços;

0,10 pontos 100% das fontes de iluminação artificial da UH deve ter uma eficiência superior a 75lm/W ou com Selo Procel em todos os espaços.

### **Ventiladores de teto (até 0,10 pontos)**

0,10 pontos Em 2/3 dos espaços de permanência prolongada da UH devem ser instalados ventiladores de teto com Selo Procel (caso a UH se localize nas ZB 2 a 8).

### **Refrigeradores (até 0,10 pontos)**

0,10 pontos Os frigoríficos/combinados/congeladores a utilizar na UH deve ter ENCE nível A ou Selo Procel e ser instalados garantindo as condições adequadas de instalação conforme as recomendações do fabricante, nomeadamente no que toca à distância mínima recomendada para ventilação da serpentina. Caso estas distâncias não sejam referidas no manual do equipamento, deve-se garantir uma distância de 10 cm nas laterais e 15 cm atrás e na parte superior livre. Deve-se também garantir que este equipamento nunca se encontra sob radiação solar e que não é instalado próximo de fontes de calor.

### **Medição individualizada (até 0,10 pontos)**

0,10 pontos Caso o sistema de aquecimento de água seja partilhado por mais que uma UH, deve existir medição individualizada.

Por não ser o caso do edifício em estudo, este ponto não é aplicável.

## Anexo II Folhas de cálculo: métodos prescritivos

### i) Folhas de cálculo utilizadas no método prescritivo para avaliação da envolvente



#### Análise da Envoltória e dos Pré-Requisitos dos Ambientes RTQ - Edificações Residenciais

Zona Bioclimática	ZB	DETALHE IMPORTANTE: após os cálculos não modificar a zona bioclimática da célula E10	ZB3	ZB3	ZB3	ZB3
Ambiente	azimute	graus	0	0	0	0
	Identificação		Sala+Cozinha	Quarto 3	Quarto 2	Quarto 1
Cobertura	AUamb	m <sup>2</sup>	58.83	13.02	12.94	20.69
	Ucob	W/m <sup>2</sup> .K	0.51	0.51	0.51	0.51
	CTcob	kJ/m <sup>2</sup> .K	19.56	19.56	19.56	19.56
Paredes Externas	αcob	adimensional	0.70	0.70	0.70	0.70
	Upar	W/m <sup>2</sup> .K	1.02	0.59	0.64	0.64
	CTpar	kJ/m <sup>2</sup> .K	65.40	22.57	22.56	24.44
Característica construtiva	αpar	adimensional	0.60	0.60	0.60	0.60
	CTbaixa	binário	0	0	0	0
	CTalta	binário	0	0	0	0
Situação do piso e cobertura	cob	adimensional	1	1	1	1
	solo	adimensional	0	0	0	0
	pil	adimensional	1	1	1	1
Áreas de Paredes Externas do Ambiente	APambN (m <sup>2</sup> )		7.70	7.05	7.00	10.77
	APambS (m <sup>2</sup> )		5.78	0.00	0.00	0.00
	APambL (m <sup>2</sup> )		0.00	0.00	0.00	0.00
	APambO (m <sup>2</sup> )		1.45	0.00	0.00	0.00
Áreas de Aberturas Externas	AAbN (m <sup>2</sup> )		21.52	1.89	1.89	3.78
	AAbS (m <sup>2</sup> )		21.52	0.00	0.00	0.00
	AAbL (m <sup>2</sup> )		0.00	0.00	0.00	0.00
	AAbO (m <sup>2</sup> )		14.00	0.00	0.00	0.00
Características das Aberturas	Fvent	adimensional	0.37	0.90	0.90	0.90
	Somb	adimensional	1.00	1.00	1.00	1.00
Características Gerais	AparInt	m <sup>2</sup>	15.4536	30.60856	30.75376	32.87726
	PD	m	2.74	2.74	2.74	2.74
	CaIura	adimensional	0.047	0.210	0.212	0.132
Características de Isolamento Térmico para ZB 1 e ZB2	isol	binário				
	vid	binário				
	Uvid	W/m <sup>2</sup> .K				
Indicador de Graus-hora para Resfriamento	GHR	°C.h	C	B	B	B
			2372	1574	1581	1416
Consumo Relativo para Aquecimento	CA	kWh/m <sup>2</sup> .ano	B	B	B	B
			10.496	7.966	8.010	8.348
Consumo Relativo para Refrigeração	CR	kWh/m <sup>2</sup> .ano	B	C	C	B
			8.541	13.788	13.837	11.248

Pré-requisitos por ambiente							
Pré Requisitos da Envoltória	Paredes externas	Upar, Ctpar e apar atendem?	Não	Não	Não	Não	
	Cobertura	Ucob, Ctcob e acob atendem?	Sim	Sim	Sim	Sim	
		O ambiente é um	Não	Sim	Sim	Sim	
	Iluminação natural	Área de abertura para iluminação	54.20	1.80	1.80	3.59	
		Ai/Auamb (%)	92.13	13.79	13.88	23.95	
		Atende 12,5%?	Sim	Sim	Sim	Sim	
		Área de abertura para ventilação	19.81225	1.79609375	1.79609375	3.5921875	
	Ventilação natural	Av/Auamb (%)	33.68	13.79	13.88	23.95	
		Atende % mínima?	Sim	Sim	Sim	Sim	
		Tipo de abertura	vão de correr	vão de correr	vão de correr	vão de correr	
		Abertura passível de fechamento?	Sim	Sim	Sim	Sim	
		ZB8 ou média mensal de temperatura mínima acima ou igual a 20°C?	Não	Não	Não	Não	
Atende?		Sim	Sim	Sim	Sim		

Pontuação não considerando o não cumprimento do pré-requisito de CT		Ponderação da nota pela área útil do ambiente	Sala+Cozinha	Quarto 3	Quarto 2	Quarto 1
	Envoltória para Verão	C	C	B	B	B
		3.44	3.00	4.00	4.00	4.00
	Envoltória para Inverno	B	B	B	B	B
		4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Envoltória se Refrigerada Artificialmente	B	B	C	C	B	
	3.75	4.00	3.00	3.00	4.00	



### Análise dos Pré-requisitos da Envoltória e Equivalente Numérico da Envoltória RTQ - Edificações Residenciais

Pré Requisitos da Envoltória	Medição individual de água?		Sim
	Medição individual de energia?		Sim
	Ventilação Cruzada	Área Aberturas orientação Norte	18.8566
		Área Aberturas orientação Sul	13.59706
		Área Aberturas orientação Leste	0
		Área Aberturas orientação Oeste	4.19573
		A2/A1	0.943584209
	Atende A2/A1 maior ou igual a 0,25?		Sim
	Banheiros com Ventilação Natural	Nº Banheiros	2
		Nº Banheiros com ventilação natural	1
Atende 50% ou mais dos banheiros com ventilação natural?		Sim	

Pontuação após avaliar os pré-requisitos gerais da UH		Nota anterior aos pré-requisitos	Nota posterior ao pré-requisito de ventilação cruzada
	Envoltória para Verão	C	C
		3.44	3.44
	Envoltória para Inverno	B	B
		4.00	4.00
Envoltória se Refrigerada Artificialmente	B	B	
	3.75	3.75	

Equivalente numérico da envoltória da UH	Nota anterior aos pré-requisitos restantes	Nota final da envoltória da UH
	B	B
	3.64	3.64



## Análise das Bonificações RTQ - Edificações Residenciais

Bonificações			
<b>Bonificação Ventilação Natural</b>	<b>Porosidade</b>	ATAVN (m <sup>2</sup> )	18.8566
		AATVS (m <sup>2</sup> )	13.83034
		AATVL (m <sup>2</sup> )	0
		AATVO (m <sup>2</sup> )	3.96245
		ATFN (m <sup>2</sup> )	69.28
		ATFS (m <sup>2</sup> )	76.09
		ATFL (m <sup>2</sup> )	14.70
		ATFNO (m <sup>2</sup> )	15.45
		Pavimento da UH	1 ou 2
		Porosidade a Atender	20.0%
		Porosidade Norte	27.2%
		Porosidade Sul	18.2%
		Porosidade Leste	0.0%
		Porosidade Oeste	25.6%
	Atende pelo menos 2 fachadas?	Sim	
	Bonificação	0.12	
	<b>Dispositivos Especiais</b>	Todos os APP apresentam dispositivos especiais?	Não
Quais dispositivos?			
Bonificação		0	
<b>Centro Geométrico</b>	Todos os APP apresentam abertura com centro geométrico entre 0,40 e 0,70m?	Não	
	Bonificação	0	
<b>Permeabilidade</b>	Todos APP apresentam abertura intermediária com área livre $\geq 30\%$ da área da abertura?		
	Bonificação	0	
<b>Bonificação Iluminação Natural</b>	<b>Profundidade</b>	50%+1 dos APP, cozinha e lavanderia atendem $P \leq 2,4 \cdot h_a$ ?	Sim
		Bonificação	0.2
	<b>Refletância Teto</b>	Todos os APPs, cozinha e lavanderia apresentam refletância do teto maior que 0,6?	Não
		Bonificação	0
<b>Outras Bonificações</b>	<b>Uso Racional de Água</b>	Bonificação de uso racional de água	0.2
	<b>Condicionamento Artificial de Ar</b>	Bonificação de condicionamento artificial de ar	
	<b>Iluminação Artificial</b>	Porcentagem das fontes de iluminação artificial com eficiência superior a 75 lm/W ou com Selo Procel (em todos os ambientes)	1
		Bonificação	0.1
	<b>Ventiladores de Teto</b>	Ventiladores de teto com Selo Procel em 2/3 dos ambientes de permanência prolongada?	Não
		Bonificação	0
	<b>Refrigeradores</b>	Apresenta refrigerador(es) com ENCE nível A ou Selo Procel?	Sim
		Bonificação	0.1
<b>Medição Individualizada de Aquecimento de Água</b>	Medição individualizada do sistema de aquecimento da água?	Não	
	Bonificação	0	
<b>Total de bonificações</b>			0.72

## Análise do aquecimento de Água RTQ - Edificações Residenciais

Pré-requisitos do sistema de aquecimento de água	As tubulações para água quente são apropriadas para a função de condução a que se destinam e atendem às normas técnicas de produtos aplicáveis?	Sim
	A edificação apresenta sistema de aquecimento de água?	Sim
	A edificação pertence a região Norte ou Nordeste?	Não
	O sistema apresenta aquecimento solar?	Sim
	A estrutura do reservatório apresenta resistência térmica maior ou igual a 2,20 (m <sup>2</sup> K)/W?	Sim
	Atende?	Sim
	As tubulações para água quente são metálicas?	Sim
	A condutividade térmica da tubulação está entre 0,032 e 0,040 W/(mK)?	Sim
	Diâmetro nominal da tubulação (cm)	2.8
	Espessura do isolamento (cm)	3
	Condutividade do material alternativo à temperatura média indicada para a temperatura da água (W/mK)	
	Atende?	Sim
<b>A maior classificação que a UH pode atingir em aquecimento de água é:</b>	<b>A</b>	

Sistema de aquecimento Solar	Os coletores solares possuem ENCE A ou B ou Selo Procel e os reservatórios apresentam Selo Procel?	Sim
	Qual é o volume de armazenamento real do reservatório (litros)?	300
	Qual é a área de coletores solares existente? (m <sup>2</sup> )	4.52
	Volume de reservatório por área de coletor (litros/m <sup>2</sup> )	66.37
	Sistemas de aquecimento solar com backup por resistência elétrica. Equivalente à fração solar anual.	de 70% ou mais
	Demanda	240
	<b>Classificação</b>	<b>A</b>
		5

Sistema de aquecimento Solar	Os coletores solares possuem ENCE A ou B ou Selo Procel e os reservatórios apresentam Selo Procel?	Sim
	Qual é o volume de armazenamento real do reservatório (litros)?	300
	Qual é a área de coletores solares existente? (m <sup>2</sup> )	4.52
	Volume de reservatório por área de coletor (litros/m <sup>2</sup> )	66.37
	Sistemas de aquecimento solar com backup por resistência elétrica. Equivalente à fração solar anual.	de 70% ou mais
	Demanda	240
<b>Classificação</b>	<b>A</b>	
	5	

Sistema de aquecimento a Gás	Pré-requisito: os aquecedores a gás do tipo instantâneo e de acumulação possuem ENCE A ou B?	Sim
	Demanda	60
	<b>Classificação</b>	<b>A</b>
	5	

Bombas de Calor	Insira o COP do Equipamento (W/W)	0
	Demanda	0
	<b>Classificação</b>	

Sistema de Aquecimento Elétrico		
Aquecedores elétricos de passagem, chuveiros elétricos e torneiras elétricas	Insira a Potência Máxima do Equipamento (W)	
	Demanda	
<b>Classificação</b>		
Aquecedor elétrico de Hidromassagem	Insira a Potência Máxima do Equipamento (W)	
	Demanda	
<b>Classificação</b>		
Aquecedores elétricos por acumulação (Boiler)	Escolha uma opção ao lado:	
	Demanda	
<b>Classificação</b>		

Caldeiras a óleo	Apresenta Caldeira a óleo?	
	Demanda	
	<b>Classificação</b>	

<b>Nota final para o aquecimento de água</b>	<b>A</b>
	5.00

### Análise da classificação final da UH RTQ - Edificações Residenciais

<b>Pontuação Total</b>	Identificação	Catuçaba
	Envolória para Verão	<b>C</b> 3.44
	Envolória para Inverno	<b>B</b> 4.00
	Aquecimento de Água	<b>A</b> 5.00
	Equivalente numérico da envolória	<b>B</b> 3.64
	Envolória se refrigerada artificialmente	<b>B</b> 3.75
	Bonificações	0.72
	Região	Sudeste
	Coeficiente a	0.65
<b>Classificação final da UH</b>		<b>A</b>
<b>Pontuação Total</b>		<b>4.84</b>

#### ii) Folhas de cálculo utilizadas para análise do sistema solar térmico

### Análise do Sistema de Aquecimento Solar de Água RTQ - Edificações Residenciais

Pessoas/dormitório	2	peessoas
N <sub>total</sub> pessoas na edificação	6	peessoas
Volume/pessoa/dia	50	litros/pessoa/dia
V <sub>consumo</sub>	300	litros/dia
T <sub>consumo</sub>	45	°C
T <sub>armaz</sub>	45	°C
T <sub>ambiente</sub>	19.71097032	°C
V <sub>armaz</sub>	300	litros
V <sub>água armazenada</sub>	300	litros

Mês	N (dias/mês)	T <sub>AF</sub> (°C)	DE <sub>mês</sub> (kWh/mês)
Jan	31	22.5	242.39
Fev	28	23.05877976	213.80
Mar	31	21.48709677	253.66
Abr	30	18.91375	272.34
Mai	31	15.8	314.74
Jun	30	15.74625	305.41
Jul	31	15.05658602	323.03
Ago	31	17.76276882	293.84
Set	30	18.8	273.98
Out	31	21.95040323	248.66
Nov	30	22.27791667	237.22
Dez	31	23.38682796	233.16

Mês	N (dias/mês)	H <sub>dia</sub> (kWh/(m <sup>2</sup> xdia))	EI <sub>mês</sub> (kWh/m <sup>2</sup> )
Jan	31	4.49	139.19
Fev	28	4.7	131.60
Mar	31	4.73	146.63
Abr	30	4.1	123.00
Mai	31	4.15	128.65
Jun	30	3.74	112.20
Jul	31	4.62	143.22
Ago	31	4.27	132.37
Set	30	4.35	130.50
Out	31	4.18	129.58
Nov	30	4.36	130.80
Dez	31	4.55	141.05

FR (τ <sub>a</sub> )n	0.743	adimensional
$\frac{(\tau_a)}{(\tau_a)n}$	0.911	
$\frac{F'_R}{F_R}$	0.95	
F'R (τ <sub>a</sub> )	0.64302935	
Área disponível	20	m <sup>2</sup>
Área do coletor	2.26	m <sup>2</sup>
Nº coletores	2	
S <sub>c</sub>	4.52	m <sup>2</sup>

Mês	DE <sub>mês</sub> (kWh/mês)	EI <sub>mês</sub> (kWh/m <sup>2</sup> )	EA <sub>mês</sub> (kWh/mês)	D <sub>1</sub>
Jan	242.39	139.19	404.55	1.6690491
Fev	213.80	131.60	382.49	1.7890689
Mar	253.66	146.63	426.18	1.6801377
Abr	272.34	123.00	357.50	1.31269
Mai	314.74	128.65	373.92	1.188024
Jun	305.41	112.20	326.11	1.0677757
Jul	323.03	143.22	416.27	1.2886372
Ago	293.84	132.37	384.73	1.3093474
Set	273.98	130.50	379.30	1.3844104
Out	248.66	129.58	376.62	1.5146174
Nov	237.22	130.80	380.17	1.6026118
Dez	233.16	141.05	409.96	1.7582591

F <sub>R</sub> U <sub>L</sub>	3.933	W/(m <sup>2</sup> .K)
$\frac{F'_R}{F_R}$	0.95	
F'R U <sub>L</sub>	0.00373635	

S <sub>c</sub>	4.52	m <sup>2</sup>
V <sub>água armazenada</sub>	300	litros
T <sub>ACS</sub>	45	°C
FR (τ <sub>a</sub> )n	0.743	
F'R (τ <sub>a</sub> )	0.64302935	

Mês	$DE_{mês}$ (kWh)	$T_{AMB}$ (°C)	$T_{AF}$ (°C)	$\Delta t$ (horas)	$K_1$	$K_2$	$EP_{mês}$ (kWh)	$D_2$
Jan	242.39	22.5	22.5	744	1.031025985	1.283095861	1 287.69	5.312545173
Fev	213.80	23.1	23.1	672	1.031025985	1.302429576	1 172.57	5.48453911
Mar	253.66	21.5	21.5	744	1.031025985	1.245529397	1 266.85	4.994319914
Abr	272.34	18.9	18.9	720	1.031025985	1.157128058	1 176.30	4.319212622
Mai	314.74	15.8	15.8	744	1.031025985	1.058154449	1 153.88	3.666127888
Jun	305.41	15.7	15.7	720	1.031025985	1.05573016	1 115.14	3.651305893
Jul	323.03	15.1	15.1	744	1.031025985	1.034655171	1 138.55	3.52461451
Ago	293.84	17.8	17.8	744	1.031025985	1.119379418	1 192.54	4.05854565
Set	273.98	18.8	18.8	720	1.031025985	1.151922387	1 173.27	4.28235496
Out	248.66	22.0	22.0	744	1.031025985	1.262064444	1 276.09	5.131879593
Nov	237.22	22.3	22.3	720	1.031025985	1.273872076	1 241.25	5.232505554
Dez	233.16	23.4	23.4	744	1.031025985	1.31460051	1 304.75	5.595853358

Mês	$D_1$	$D_2$	$f$
Jan	1.669049077	5.312545173	0.840399624
Fev	1.789068907	5.48453911	0.877530582
Mar	1.680137678	4.994319914	0.859497505
Abr	1.312690044	4.319212622	0.730048624
Mai	1.188024011	3.666127888	0.69862876
Jun	1.067775725	3.651305893	0.632242988
Jul	1.288637151	3.52461451	0.758433108
Ago	1.309347444	4.05854565	0.741398313
Set	1.384410371	4.28235496	0.76669658
Out	1.514617381	5.131879593	0.785032714
Nov	1.60261177	5.232505554	0.817503717
Dez	1.758259097	5.595853358	0.861336893

Mês	$DE_{mês}$ (kWh)	$f$	$EU_{mês}$ (kWh)
Jan	242.39	0.840399624	203.70
Fev	213.80	0.877530582	187.61
Mar	253.66	0.859497505	218.02
Abr	272.34	0.730048624	198.82
Mai	314.74	0.69862876	219.89
Jun	305.41	0.632242988	193.09
Jul	323.03	0.758433108	245.00
Ago	293.84	0.741398313	217.85
Set	273.98	0.76669658	210.06
Out	248.66	0.785032714	195.21
Nov	237.22	0.817503717	193.93
Dez	233.16	0.861336893	200.83
<b>TOTAL</b>	<b>3 212.21</b>		<b>2 484.00</b>

<b>F</b>	0.77329881
<b>Fração solar anual</b>	<b>77.33%</b>

<b>Verificação do volume de armazenamento do projeto</b>	
$V_{armaz}$	300
Nº coletores	2
Área do coletor	2.26
Área de coletores	4.52 $m^2$
$V_{armaz}/área_{coletores}$	66.37