

Natasha da Cunha Peixoto

**ESTRATÉGIAS DE ARQUITETURA
BIOCLIMÁTICA PARA A
MELHORIA DAS CONDIÇÕES DE
CONFORTO E DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA DE UM HOTEL EM
NOVA FRIBURGO - RJ, BRASIL.**

Dissertação de Mestrado

Engenharia de Construção e Reabilitação

Professor Doutor Ricardo M. dos Santos Ferreira de
Almeida



Fevereiro de 2021

À Deus,
aos meus Pais
aos meus irmãos
e ao meu namorado Gabriel

“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar.”

Josué 1:9

Bíblia Sagrada Versão NVI.

RESUMO

A Arquitetura Bioclimática coloca o utilizador no centro da sua atenção, estabelecendo a ligação arquitetónica entre o clima (ambientes interiores e exteriores) e o homem. A arquitetura bioclimática engloba as disciplinas da construção e da arquitetura, juntando-as à climatologia e ao conforto humano. Todos estes fatores são atributos que devem atrair uma maior atenção para este tema, pois um edifício com mais atributos naturais e menos artificiais, pode aliar uma melhor qualidade arquitetónica com uma maior eficiência energética e, principalmente, com uma melhoria das condições de conforto dos seus utilizadores.

O objetivo principal deste trabalho é identificar estratégias utilizadas na arquitetura bioclimática para analisar e quantificar a redução do desconforto por sobreaquecimento de um edifício hoteleiro no Brasil, selecionado como caso de estudo. Foi ainda realizada uma análise de sensibilidade em diferentes regiões climáticas do Brasil. Para tal começou-se por fazer um levantamento do estado da arte sobre estratégias de arrefecimento passivo e sobre o contexto climático brasileiro.

O estudo que foi desenvolvido assentou na simulação numérica do desempenho térmico e energético de um edifício real.

Para tal, utilizou-se o software de simulação *EnergyPlus* associado à interface gráfica, *DesignBuilder*. O caso de estudo que foi selecionado foi o edifício do Hotel Park São Clemente, em Nova Friburgo, no estado do Rio de Janeiro no, Brasil. A metodologia adotada no trabalho inclui a avaliação da eficiência de técnicas de arrefecimento passivo quando aplicadas em diferentes climas do Brasil.

Definiu-se um plano de simulação, em que se realizaram oito simulações anuais em cada zona climática, totalizando quarenta simulações. O plano de simulações inclui alterações no modelo correspondentes à aplicação das diferentes estratégias bioclimáticas de arrefecimento passivo, nomeadamente o sombreamento, a ventilação natural, a aplicação de uma pintura refletante nas envolventes exteriores e a aplicação de uma cobertura jardim.

Os resultados obtidos neste estudo permitiram concluir que a aplicação das estratégias de sombreamento, ventilação e pintura refletante podem ser bastante eficazes, especialmente se aplicadas em conjunto. Por outro lado, a cobertura jardim, para este caso de estudo, não se revelou particularmente eficaz.

PALAVRAS-CHAVE: Arquitetura Bioclimática, estratégias bioclimáticas, sombreamento, ventilação natural, pintura refletante, cobertura jardim, simulação numérica, EnergyPlus.

ABSTRACT

Bioclimatic Architecture, puts the user in the center of its attention, establishing the architectural connection between the climate (indoor and outdoor environments) and man. Bioclimatic architecture encompasses the disciplines of construction and architecture, joining them with climatology and human comfort. All these factors are attributes that should attract more attention to this subject, because a building with more natural and less artificial attributes, can combine better architectural quality with greater energy efficiency and, above all, with an improvement in the comfort conditions of its users.

The main objective of this work is to identify strategies used in bioclimatic architecture to analyze and quantify the reduction of discomfort due to overheating of a case study located in different climatic regions of Brazil. For this purpose, a state of the art survey on passive cooling strategies and on the Brazilian climatic context was started.

The study that was developed was based on the numerical simulation of the thermal and energy performance of a real building.

To this end, the EnergyPlus simulation software associated with the graphic interface, DesignBuilder, was used. The case study that was selected was the building of the Hotel Park São Clemente, in Nova Friburgo, Rio de Janeiro State in Brazil. The methodology adopted at work includes the evaluation of the efficiency of passive cooling techniques when applied in different climates in Brazil.

A simulation plan was defined, in which eight annual simulations were performed in each climate zone, totaling forty simulations. The simulation plan includes model changes corresponding to the application of different passive cooling bioclimatic strategies, namely shading, natural ventilation, the application of a reflective painting on the exterior surroundings and the application of a garden cover.

The results obtained in this study allowed us to conclude that the application of shading, ventilation and reflective painting strategies are quite effective and can be applied together. On the other hand, the garden cover, for this case of study, did not prove particularly effective.

KEYWORDS: Bioclimatic Architecture, bioclimatic strategies, shading, natural ventilation, reflective paint, garden cover, numerical simulation, EnergyPlus.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus, pela promessa cumprida de um diploma internacional, sem Ele nada disso seria possível, nenhuma dessas palavras seriam escritas. À Ele devo toda minha gratidão.

Deixo meu agradecimento especial ao Professor Doutor Ricardo M. Dos Santos Ferreira de Almeida, pela confiança, disponibilidade, simpatia, ajuda, paciência, motivação, conhecimento, experiência e competência demonstradas na elaboração da presente tese de mestrado. E não menos importantes, a todos os docentes que contribuíram e lecionaram cada disciplina deste mestrado.

Aos meus pais, Sergio Peixoto e Heloisa Peixoto, por todo amor, toda confiança, todo apoio emocional e financeiro, que com certeza me fizeram mais forte e com coragem de chegar até o final e não desistir.

Aos meus irmãos, Thiago Cunha e Lara Peixoto, por todas as ligações, todas as palavras de coragem e conforto que me deram ao longo dessa conquista.

Ao meu namorado, Gabriel Mombra, que esteve presente em todas as dificuldades e conquistas deste mestrado e me fez acreditar que podia chegar até o fim, obrigada por todo amor e carinho.

Por fim, aos amigos que fiz no Instituto Politécnico de Viseu, em especial Charif Reda, que dedicou parte de seu tempo e conhecimento relacionados com o tema para grande ajuda.

A todos, Muito Obrigada.

ÍNDICE GERAL

RESUMO

ABSTRACT

AGRADECIMENTOS

ÍNDICE GERAL	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE TABELAS	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento geral	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Organização e estrutura	3
2. ESTADO DA ARTE	5
2.1 A Arquitetura Bioclimática.....	5
2.1.1 Conceito e história da arquitetura bioclimática	5
2.1.2 Estratégias bioclimáticas	7
2.2 Conforto térmico, carta bioclimática e normalização	18
2.3 A Arquitetura Bioclimática no Brasil	22
2.3.1 Zoneamento bioclimático e estratégias bioclimáticas mais utilizadas no Brasil	22
2.3.2 Análise de alguns projetos que beneficiaram com o uso de estratégias bioclimáticas	24
3. METODOLOGIA.....	29
3.1 Considerações gerais.....	29
3.2 Software <i>EnergyPlus</i> + <i>DesignBuilder</i>	30
3.3 Caso de estudo	32
3.3.1 Localização e clima principais	32
3.3.2 Descrição da geometria	33
3.3.3 Elementos construtivos e propriedades dos materiais	34
3.4 Apresentação do modelo de simulação.....	35
3.4.1 Modelação	35

3.5	Cenários de simulação.....	37
4.	RESULTADOS.....	40
4.1	Apresentação dos resultados	40
4.1.1	Cenários base	40
4.1.2	Cenários com estratégias de arrefecimento passivo.....	44
4.2	Discussão dos resultados	48
4.2.1	Cenários Base.....	48
4.2.2	Cenários com estratégias de arrefecimento passivo.....	50
5.	CONCLUSÕES	53
5.1	Considerações finais.....	53
5.2	Conclusões a partir dos resultados	53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - ILUSTRAÇÃO DE VENTILAÇÃO CRUZADA HORIZONTAL E VERTICAL .	8
FIGURA 2 - EDIFICAÇÃO ESTUDADA EM ITAARA.	9
FIGURA 3 - TÚNEL DE AR ABERTO NO SUBSOLO	9
FIGURA 4 - DUTOS PARA VENTILAÇÃO VERTICAL.	10
FIGURA 5 - SAÍDAS DE AR DENTRO DOS DORMITÓRIOS	10
FIGURA 6 - ILUSTRAÇÃO DE SISTEMA DE SOMBREAMENTO.	11
FIGURA 7 - ESBOÇO DA FACHADA VIVA.	12
FIGURA 8 – ILUSTRAÇÃO DE SISTEMA SOLAR PASSIVO	13
FIGURA 9 - FOTO DE UMA PAREDE DE TROMBE	14
FIGURA 10 - ÁBACO PSICOMÉTRICO DA CIDADE DE PASSO FUNDO	15
FIGURA 11 – GRÁFICO DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA AO LONGO DO TEMPO	16
FIGURA 12 – ILUSTRAÇÃO DE UMA COBERTURA JARDIM	17
FIGURA 13 – ADEGA MAYOR – COBERTURA VERDE	17
FIGURA 14 – CARTA BIOCLIMÁTICA DE OLGYAY	19
FIGURA 15 – MODELO DE CONFORTO ADAPTATIVO DA ASHRAE 55	20
FIGURA 16 – MODELO DE CONFORTO ADAPTATIVO DA EN 15251	21
FIGURA 17 – ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO DO BRASIL	23
FIGURA 18 - CARTA BIOCLIMÁTICA DO BRASIL	23
FIGURA 19 – CASA FOLHA, ANGRA DOS REIS – RJ, BRASIL – COBERTURA	25
FIGURA 20 – CASA FOLHA, ANGRA DOS REIS – RJ, BRASIL – PÉ DIREITO	25
FIGURA 21 – IEL – FÁBRICA DE PINCEIS E EMBALAGENS – ALÇADO	26
FIGURA 22 – EDIFÍCIO VENTURA CORPORATE TOWERS – ALÇADO	27
FIGURA 23 – DIAGRAMA DA ESTRATÉGIA UTILIZADA.	29
FIGURA 24 – SISTEMA DE ORGANIZAÇÃO INTERNA DO ENERGYPLUS	31
FIGURA 25 – AMBIENTE DE TRABALHO DO DESIGNBUILDER	31
FIGURA 26 – LOCALIAÇÃO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO NO BRASIL E DA CIDADE DE NOVA FRIBURGO NO RIO DE JANEIRO.	32
FIGURA 27 - TEMPERATURA MÁXIMA (LINHA VERMELHA) E MÍNIMA (LINHA AZUL) MÉDIAS DA CIDADE DE NOVA FRIBURGO.	32
FIGURA 28 - ALÇADOS NORTE E OESTE DO HOTEL PARK SÃO CLEMENTE.	33
FIGURA 29 - PISO TÉRREO	33
FIGURA 30 - PISO 1	34
FIGURA 31 - REPRESENTAÇÃO DO MODELO NO DESIGNBUILDER - ALÇADO NORTE	35
FIGURA 32 - REPRESENTAÇÃO DO MODELO NO DESIGNBUILDER - ALÇADO SUL	35
FIGURA 33 - REPRESENTAÇÃO DA DIVISÃO DOS QUARTOS NO PISO 1	36
FIGURA 34 - MENU CONSTRUCTION, DADOS DOS ELEMENTOS DAS ENVOLVENTES	36
FIGURA 35 – MENU ACTIVITY, DADOS DOS GANHOS INTERNOS DO QUARTO	36
FIGURA 36 – MENU LIGHTING, DADOS DA ILUMINAÇÃO DOS QUARTOS	37
FIGURA 37 - TEMPERATURAS INTERNAS RESULTANTE DAS SIMULAÇÕES S1.1, S1.2, S1.3 E S1.4 (ZONA CLIMÁTICA Z2 – NOVA FRIBURGO).	40
FIGURA 38 - TEMPERATURAS INTERNAS RESULTANTE DAS SIMULAÇÕES S2.1, S2.2, S2.3 E S2.4 (ZONA CLIMÁTICA Z4 – BRASÍLIA).	41
FIGURA 39 - TEMPERATURAS INTERNAS RESULTANTE DAS SIMULAÇÕES S3.1, S3.2, S3.3 E S3.4 (ZONA CLIMÁTICA Z5 – GOVERNADOR VALADARES).	41

FIGURA 40 - TEMPERATURAS INTERNAS RESULTANTE DAS SIMULAÇÕES S4.1, S4.2, S4.3 E S4.4 (ZONA CLIMÁTICA Z7 – SENHOR DO BONFIM).....	41
FIGURA 41 - TEMPERATURAS INTERNAS RESULTANTE DAS SIMULAÇÕES S5.1, S5.2, S5.3 E S5.4 (ZONA CLIMÁTICA Z8 – RIO DE JANEIRO).....	42
FIGURA 42 – APLICAÇÃO DO MODELO DE CONFORTO DA NORMA EN 15251: A) SIMULAÇÃO S1.1; B) SIMULAÇÃO S1.4; C) SIMULAÇÃO S2.1; D) SIMULAÇÃO S2.4; E) SIMULAÇÃO S3.1; F) SIMULAÇÃO S3.4; G) SIMULAÇÃO S4.1; H) SIMULAÇÃO S4.4; I) SIMULAÇÃO S5.1; J) SIMULAÇÃO S5.4	43
FIGURA 43 - APLICAÇÃO DO MODELO DE CONFORTO DA NORMA EN 15251: A) SIMULAÇÃO S1.5; B) SIMULAÇÃO S1.6; C) SIMULAÇÃO S2.5; D) SIMULAÇÃO S2.6; E) SIMULAÇÃO S3.5; F) SIMULAÇÃO S3.6; G) SIMULAÇÃO S4.5; H) SIMULAÇÃO S4.6; I) SIMULAÇÃO S5.5; J) SIMULAÇÃO S5.6	45
FIGURA 44 - APLICAÇÃO DO MODELO DE CONFORTO DA NORMA EN 15251: A) SIMULAÇÃO S1.7; B) SIMULAÇÃO S1.8; C) SIMULAÇÃO S2.7; D) SIMULAÇÃO S2.8; E) SIMULAÇÃO S3.7; F) SIMULAÇÃO S3.8; G) SIMULAÇÃO S4.7; H) SIMULAÇÃO S4.8; I) SIMULAÇÃO S5.7; J) SIMULAÇÃO S5.8.	47
FIGURA 45 – ÍNDICES DE DESCONFORTO OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES Si.1 E Si.2 E RESPETIVAS DIFERENÇAS.....	49
FIGURA 46 – ÍNDICES DE DESCONFORTO OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES Si.3 E Si.4 E RESPETIVAS DIFERENÇAS.....	49
FIGURA 47 – ÍNDICES DE DESCONFORTO OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES Si.1 E Si.4 E RESPETIVAS DIFERENÇAS.....	49
FIGURA 48 – ÍNDICES DE DESCONFORTO OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES Si.1, Si.5, Si.4 E Si.6 E RESPETIVAS DIFERENÇAS.	50
FIGURA 49 - ÍNDICES DE DESCONFORTO OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES Si.1, Si.7, Si.4 E Si.8 E RESPETIVAS DIFERENÇAS.....	51

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - DADOS CLIMÁTICOS DA CIDADE DE PASSO FUNDO [20].....	15
TABELA 2 - EQUAÇÕES DOS LIMITES DE ACEITABILIDADE, ADAPTADAS DE [25].....	20
TABELA 3 - EQUAÇÕES DOS LIMITES DE ACEITABILIDADE DO MODELO DA NORMA EN 15251, ADAPTADO DE [31]	22
TABELA 4 – ZONAS DA CARTA BIOCLIMÁTICA DO BRASIL, ADAPTADA DE [33].	24
TABELA 5 – ELEMENTOS CONSTRUTIVOS E SUAS PROPRIEDADES	34
TABELA 6 - TABELA SÍNTESE DAS ZONAS BIOCLIMÁTICAS DO BRASIL SIMULADAS	37
TABELA 7 – SIMULAÇÕES (I) E PARAMETROS QUE FORAM VARIADOS.....	38
TABELA 8 - ÍNDICES DE DESCONFORTO NOS CENÁRIOS BASE, NAS 5 ZONAS TÉRMICAS.....	44
TABELA 9 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES S1.5 E S1.6.....	46
TABELA 10 – RESULTADO DAS SIMULAÇÕES SI.7 E SI.8.....	48

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral

Ao longo do processo do desenvolvimento da arquitetura e do ambiente construído, a proteção face ao clima exterior é um dos fatores iniciais a ter em consideração [1]. A concepção arquitetônica tem um processo lógico, que consiste em trabalhar em equilíbrio com os materiais que a natureza oferece, adaptando os edifícios ao clima em que estão implantados. A relação entre zonas climáticas e as características arquitetônicas é o princípio primordial da *Arquitetura Bioclimática*, que procura diminuir os impactos causados pela intervenção do meio urbano e atingir uma ligação entre o construído e a paisagem [2].

No caso específico de climas quentes a principal preocupação é muitas vezes o controlo do sobreaquecimento. A solução óbvia passa pela utilização de sistemas de ar condicionado, com consequências evidentes no desempenho energético do edifício. Também neste contexto a Arquitetura Bioclimática pode desempenhar um papel relevante através da implementação de estratégias de arrefecimento passivo, que contribuem para a melhoria do conforto térmico do edifício sem impacto no consumo de energia. O objetivo destas estratégias passa, por exemplo, por atuar na redução dos ganhos solares ou incrementar a ventilação nos períodos em que ela é favorável, contribuindo assim para a redução da temperatura no interior do edifício, minimizando os períodos e severidade do sobreaquecimento.

Nesse sentido, vários trabalhos têm sido realizados com o intuito de avaliar o efeito da implementação de estratégias de arrefecimento passivo em climas quentes. Muitos deles apresentam resultados encorajadores, mostrando que estas técnicas, quando devidamente projetadas, podem ter um impacto muito positivo no desempenho dos edifícios. Nesta

dissertação, pretende-se avaliar o resultado da implementação de algumas estratégias bioclimáticas de arrefecimento passivo através da simulação dinâmica do desempenho térmico e energético.

As escolhas das estratégias bioclimáticas de arrefecimento passivo utilizadas nas simulações, foram feitas tendo por ponto de partida as técnicas já utilizadas no país escolhido para o estudo, o Brasil. Após esta escolha, as estratégias são aplicadas no modelo para realizar as simulações, procedendo-se a uma análise comparativa, geral e parcial, de maneira a avaliar-se quais as estratégias bioclimáticas que mais se adequam ao clima de cada zona bioclimática brasileira.

1.2 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é identificar estratégias utilizadas na arquitetura bioclimática e analisar o seu impacto na redução da temperatura interior, aplicando-as num modelo de simulação numérica, utilizando como ferramenta principal o *software* EnergyPlus. Para esta análise, foi selecionado como caso de estudo um edifício destinado a ser utilizado como hotel, no Brasil. A avaliação realizada inclui ainda uma análise de sensibilidade em que foram analisados cinco climas diferentes, selecionados de acordo com as zonas bioclimáticas do Brasil.

Para atingir este objetivo, é necessário definir algumas metas intermediárias para orientar este trabalho até ao destino proposto:

- Pesquisa e estudo de referências associadas ao tema: levantamento do estado da arte;
- Caracterização de algumas estratégias bioclimáticas através da literatura selecionada;
- Estudo do contexto bioclimático brasileiro para escolha das localizações para serem simuladas;
- Construção do modelo no programa *DesignBuilder* e definição do plano de simulações;
- Execução das simulações e posterior análise, interpretação e comparação dos resultados de cada simulação e cenário;
- Conclusões face ao efeito no sobreaquecimento das técnicas de arrefecimento passivas utilizadas.

1.3 Organização e estrutura

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos.

Capítulo 1 – Introdução. Neste capítulo apresenta-se o enquadramento geral do tema da dissertação, determina-se os objetivos e descreve-se como este trabalho foi estruturado.

Capítulo 2 – Estado da Arte. Tem como objetivo conceituar e caracterizar a Arquitetura Bioclimática, explicando sua importância para o conforto térmico e para o mundo. Pormenorização de algumas estratégias bioclimáticas gerais utilizadas globalmente e a normalização utilizada. O Contexto Brasileiro. Contextualização da Arquitetura Bioclimática no Brasil. Apresentação das diferentes zonas bioclimáticas e as estratégias mais utilizadas, mostrando alguns projetos beneficiados por tais estratégias.

Capítulo 3 – Estratégia Metodológica. Enuncia-se qual a metodologia utilizada e apresenta a principal ferramenta utilizada nas simulações, o software *EnergyPlus*. Apresenta-se localizações e climas onde ocorrerão as simulações, descrição da geometria e apresentação do modelo, suas propriedades e parâmetros gerais utilizados nos cenários de cada simulação.

Capítulo 4 – Resultados. São descritos e apresentados os resultados das várias simulações e é realizada uma discussão dos mesmos, com ênfase no impacto das diferentes técnicas na redução do sobreaquecimento.

Capítulo 5 – Conclusões. Neste último capítulo, são apontadas as considerações finais sobre o tema em estudo e as conclusões que se retiraram da aplicação das estratégias bioclimáticas.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 A Arquitetura Bioclimática

2.1.1 Conceito e história da arquitetura bioclimática

A conceção arquitetónica tem um processo lógico, que consiste em trabalhar em equilíbrio com os materiais que a natureza oferece, adaptando os edifícios ao clima em que estão implantados. A relação entre zonas climáticas e as características arquitetónicas é o princípio primordial da *Arquitetura Bioclimática*, que procura diminuir os impactos causados pela intervenção do meio urbano e atingir uma ligação entre o construído e a paisagem [2].

Ainda que este conceito retome a arquitetura vernacular – construções espontâneas caracterizadas pelo uso de materiais e conhecimentos locais – a expressão “arquitetura bioclimática” segundo Vazquez [3], surgiu na década de 1960, a partir de pesquisas pelos irmãos Victor e Aladar Olgyay [4], que começaram a aplicar o termo bioclimático, até que se tornou obrigatório para arquitetos entrando no campo, tendo como objetivo expressar a arquitetura que procura agradar as condições de conforto através de materiais e técnicas acessíveis, conforme as condições climáticas locais.

Na década de 70, devido às crises sofridas no setor dos recursos energéticos do mundo, houve uma conscientização nesse setor, que resultou na necessidade de prevenção ambiental: *“Después de la reciente crisis energética, se advierte un nuevo interés por las técnicas que permiten economizar energía y, en particular, por las técnicas naturales.”* [5]. Em seguimento,

vem uma preocupação na área de construção e arquitetura, com os impactos causados ambientalmente.

Deste modo, reaparece a arquitetura bioclimática definida como uma arquitetura que traz, na sua essência, o clima e o contexto sociocultural locais como uma variável importante no processo projetual, em harmonia com a topografia e o entorno, utilizando os materiais e recursos naturais disponíveis na natureza, como orientação solar, vegetação, ventilação e iluminação naturais atentando ao conforto térmico, acústico, luminoso e procurando minimizar o máximo possível a necessidade de sistemas mecanizados [6].

“Es tarea del arquitecto la utilización máxima de todos los medios naturales para producir una vivienda lo más sana y agradable posible, al mismo tiempo deberá buscar el ahorro en los costes, reduciendo al mínimo la necesidad de ayudas mecánicas para el control climático.” [4]

Em 2009, Davies [7] resumiu as etapas de Olgyay [4] para alcançar o controle ambiental trabalhando com o clima:

- **Etapa 1.** Pesquisar o clima local.
- **Etapa 2.** Avaliar o clima e a importância dos diversos elementos disponíveis.
- **Etapa 3.** Propor uma solução técnica para chegar ao conforto térmico, que devem incluir orientação solar do local, cálculo de sombreamento, forma da construção, ventilação e o equilíbrio da temperatura interior.
- **Etapa 4.** As três primeiras etapas devem ser incorporadas na solução definida no projeto arquitetônico.

Em busca de soluções inteligentes para a sociedade, que integrem o homem e o meio ambiente, arquitetos e engenheiros se esforçam em aplicar da maneira mais eficaz os sistemas construtivos que temos hoje e desenvolvem tecnologias para aprimorar o uso dos recursos naturais.

A arquitetura bioclimática, coloca o utente no centro de suas considerações, ela restabelece a ligação arquitetônica entre o clima (ambientes interiores e exteriores) e o homem. Engloba disciplinas de construção, arquitetura, climatologia e conforto humano [4].

Os fatores referidos acima, são vantagens para uma maior atenção a este tema, pois um edifício com mais atributos naturais e menos artificiais é de melhor qualidade arquitetônica e maior eficiência energética e o principal, garante melhores condições de conforto para os seus utilizadores [8].

2.1.2 Estratégias bioclimáticas

As estratégias bioclimáticas são alternativas ou soluções construtivas que influenciam a edificação, assim como, o seu processo e sistema construtivo, a forma e os materiais, e que podem ser adotadas conjuntamente em diferentes ambientes de uma mesma edificação. Nessa forma de arquitetura, o clima é um fator determinante para a elaboração do projeto, que reflete a compreensão e a reflexão sobre as condições locais antes de construir e habitar [9].

Apresentam-se de seguida algumas estratégias bioclimáticas gerais, utilizadas por todo o mundo com o objetivo de controlar a temperatura interior e, desta forma, contribuir de modo passivo para o conforto interior dos edifícios.

2.1.2.1 Ventilação natural

“The simplest strategy for improving comfort when the indoor temperature, under still air conditions, seems to be too warm is by daytime ventilation – providing comfort through higher indoor air speeds. [...] This is particularly the case when the humidity is high and so the higher air speed increases the rate of sweat evaporation from the skin, thus minimizing the discomfort from the wet skin.” [10]

A ventilação natural é um dos princípios básicos da boa arquitetura, afinal o vento é um recurso natural, gratuito e que pode ser utilizado para a renovação do ar de cada ambiente. O uso adequado desta fonte traz diversas vantagens para as edificações, mantendo a qualidade interna do ar pela troca constante, criando ambientes salubres e confortáveis, e também reduzindo os gastos energéticos, principalmente a diminuição do uso de ar-condicionado que é um dos principais consumidores de energia em climas quentes [9].

O ambiente interno das edificações, lugares onde as pessoas passam a maior parte do tempo diário, deve ser livre de compostos nocivos e intoxicantes. O melhoramento na qualidade do ar interno pode ser alcançado não somente com um bom projeto arquitetônico, como também com uma boa seleção de materiais e métodos construtivos. As características do ar interno dependem diretamente da qualidade do ar no ambiente externo, mas também podem ser afetadas pelas atividades realizadas dentro das edificações [11].

Os projetistas das edificações são os responsáveis por proporcionar um ambiente saudável aos utilizadores dos edifícios [12]. O aumento das taxas de ventilação - com um bom projeto de ventilação - aliado a uma boa seleção de materiais contribuem para a diminuição da concentração de poluentes no ar interior. Para garantir o conforto térmico por meio da ventilação, o caudal de ar de entrada deve ser o suficiente para manter um equilíbrio entre a temperatura ambiente e a pressão. Se não for planejada de maneira adequada, a ventilação natural pode causar desconforto e resfriamento desnecessário [13].

Existem duas principais estratégias de ventilação naturais: a ventilação cruzada horizontal e a ventilação cruzada vertical. A horizontal, ocorre quando existem no mínimo duas aberturas em lados opostos dos ambientes, permitindo a completa circulação do ar. O posicionamento das aberturas deve levar em conta a incidência dos ventos dominantes de cada região. A vertical, é a que retira o ar quente que se acumula nas partes mais elevadas no interior da edificação, por intermédio de um fluxo de ar ascendente gerado por aberturas em diferentes níveis [9]. A Figura 1 mostra esquematicamente estes dois processos de ventilação natural.

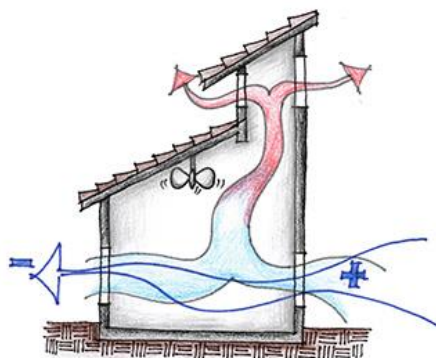


Figura 1 - Ilustração de ventilação cruzada horizontal e vertical [9].

- **Um estudo de caso: Túnel de ar no subsolo [14]**

Um estudo feito por alunos da Universidade Luterana do Brasil (ULBRA), teve como objetivo identificar e avaliar o efeito de estratégias bioclimáticas empregadas numa edificação na cidade de Itaara (Figura 2), Rio Grande do Sul, Brasil, tendo como base a caracterização climática do local e os estudos das diretrizes indicadas pela norma brasileira de conforto, a NBR 15220-3 [33].



Figura 2 - Edificação estudada em Itaara. [14]

Foi realizada uma pesquisa e estudo de caso exploratório nos meses de abril, maio e junho de 2016, analisando-se as estratégias bioclimáticas verificadas na edificação objeto de estudo. Ficou demonstrado no estudo que a implantação do túnel de ar no subsolo e a construção de dutos internos com objetivo de proporcionar ventilação cruzada, são elementos construtivos principais no modelo de utilização das estratégias bioclimáticas.

Primeiramente, implantaram um túnel de ar abaixo do subsolo, construído com pedras de basalto, com 25 m de comprimento, 2,80 m de largura e 1,80 m de altura, com a função de captar o ar natural da mata que permeia os fundos da edificação (Figura 3).



Figura 3 - Túnel de ar aberto no subsolo [14]

Para a distribuição desse ar natural para os dormitórios, conceberam pequenos dutos com aberturas voltadas para saída de ar do túnel, de forma a captar o ar e leva-lo para o interior da edificação (Figura 4).



Figura 4 - Dutos para ventilação vertical [14]

Esse ar natural captado através dos dutos, é introduzido por meio de aberturas próximas ao piso (Figura 5), retirando o ar quente por aberturas na parte superior, no lado oposto, promovendo assim as condições para que ocorra a ventilação cruzada.



Figura 5 - Saídas de ar dentro dos dormitórios [14]

O proprietário relata, que em dias quentes, em que a temperatura externa passa dos 35 °C, os ambientes internos da edificação apresentam temperatura em torno dos 25 °C com o uso da ventilação oriunda do túnel de vento, demonstrando assim a eficiência do uso destas estratégias bioclimáticas, que segundo a conclusão do estudo, consegue reduzir o consumo de energia elétrica e manter os ambientes sempre saudáveis.

2.1.2.2 Sombreamento

O sombreamento, tem como principal objetivo a proteção solar e consequente redução dos ganhos solares no interior do edifício. Estes elementos construtivos funcionam como uma estratégia passiva de arrefecimento. Atavés de um adequado sistema de sombreamento, devidamente projetado, também se garantem melhores condições de luz natural, protegendo a edificação, dos ganhos solares nos períodos mais quentes [9], contribuindo para o conforto e para a eficiência energética [15].

É importante que o projetista estude bem o local de implantação e a geometria solar de inverno e verão, pois, dependendo das sombras provenientes das edificações e vegetações vizinhas pode não ser necessário o uso de elementos adicionais nos alçados [9].

No mercado existem diversos tipos de elementos de sombreamento, cada um adequado a necessidades técnicas e funcionais diferentes. Os elementos de sombreamento são habitualmente classificados em função da sua localização no edifício, podendo ser interiores ou exteriores. Também podem ser classificados como elementos fixos ou móveis (Figura 6).

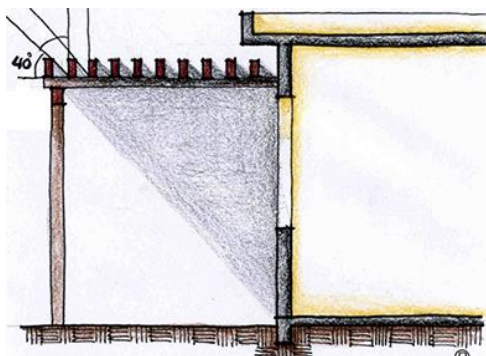


Figura 6 - Ilustração de sistema de sombreamento [9].

- **Um estudo de caso: Fachada viva**

Noa Estes [16], com o objetivo de estudar o efeito da redução dos ganhos solares e a disponibilidade de luz natural no ambiente interior, desenvolveu um protótipo à base de polietileno para controle da luz do sol, que funciona como atuador e sensor.

Este protótipo, procura simular uma fachada viva (Figura 7), composta por uma peça vertical que não deixa passar a luz, que inclui um vidro e uma persiana veneziana com movimento. Através deste mecanismo, o sombreamento causado passa a ser dinâmico, podendo ser total ou parcial dependendo da incidência solar e da temperatura. O mecanismo funciona através de uma placa de polietileno interligada a uma alavanca e a um sistema de cabos que regulam a inclinação das lâminas da veneziana.

Os ensaios nesse protótipo foram realizados durante os meses de agosto e setembro, no Campus Solar da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, com a fachada orientada a nascente. Após vários testes e avaliações, os objetivos propostos foram alcançados e com sucesso, concluindo-se até que há a oportunidade de integrar módulos fotovoltaicos nas lâminas da veneziana estantes de luz, controlando assim a entrada da luz solar automaticamente e sem consumo de energia.

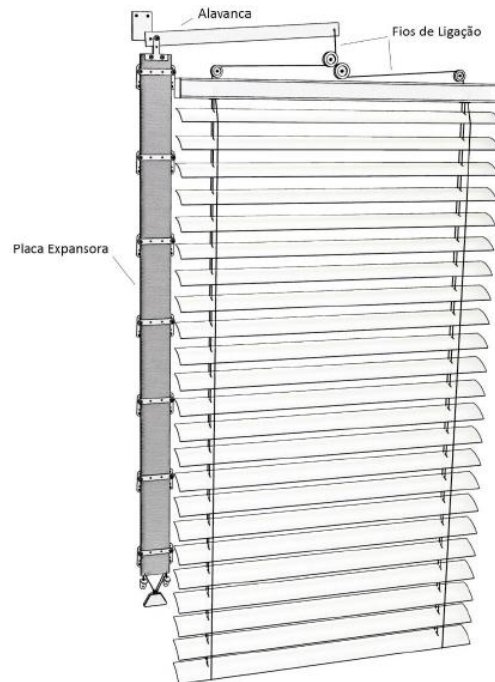


Figura 7 - Esboço da Fachada Viva

2.1.2.3 Aquecimento solar passivo

“Passive solar design takes advantage of a building’s site, climate, and materials to minimize energy use. A well-designed passive solar home first reduces heating and cooling loads through energy-efficiency strategies and then meets those reduced loads in whole or part with solar energy. Because of the small heating loads of modern homes it is very important to avoid oversizing south-facing glass and ensure that south-facing glass is properly shaded to prevent overheating and increased cooling loads in the spring and fall. “ [17]

O aquecimento solar passivo é uma estratégia que consiste na utilização da radiação solar direta para o aquecimento do ambiente interior dos edifícios. A sua eficiência está dependente da relação criteriosa entre os elementos construtivos que constituem o edifício e o entendimento das características do local onde ele vai ser construído, como a dimensão dos edifícios e da vegetação envolvente, os ventos dominantes, a morfologia do terreno, a posição geográfica, entre outros aspectos.

O aquecimento solar passivo, representado na Figura 8, pode ser conseguido por duas formas distintas; ganho direto ou ganho indireto. O ganho direto consiste em permitir o acesso da radiação solar diretamente ao interior, através de aberturas laterais ou zenitais, gerando o “efeito estufa” quando necessário, para aquecer os ambientes interiores. Já o ganho indireto é conseguido, por exemplo, através da adoção de jardins de inverno, que captam a radiação solar e depois a distribuem indiretamente pelo interior do edifício [9].

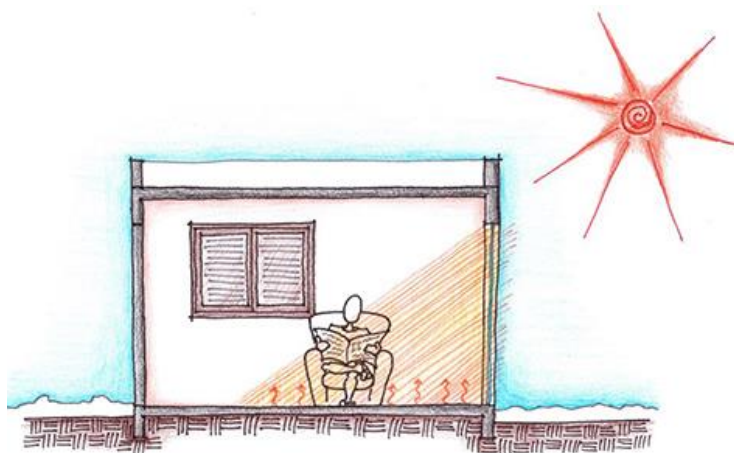


Figura 8 – Ilustração de sistema solar passivo [9].

- **Um estudo de caso: Paredes de Trombe**

As Paredes de Trombe (Figura 9) possuem um grande potencial pra a promoção do conforto térmico de um edifício, já que podem ser empregues com a intenção de melhorar a inércia térmica, promover o aquecimento solar e até a ventilação natural. [18]

Estas paredes são alocadas nos alçados que recebem mais incidência solar direta durante um período do ano. O seu princípio de funcionamento assenta no aproveitamento do calor que se acumula durante o dia para aquecer nos períodos frios que ocorre durante a noite. Em termos de impacto visual, vista pelo lado exterior esta parede é idêntica a uma janela e pelo lado interior, a uma parede comum.



Figura 9 - Foto de uma Parede de Trombe [19]

Basicamente, as paredes de trombe, são uma pequena “estufa”, constituída por uma pele de vidro no exterior, uma caixa de ar e uma parede de grande densidade e espessura moderada, constituída por exemplo por pedra ou argila ou tijolo maciço [19].

Um estudo feito pelos alunos do IMED, Brasil, [20] teve o objetivo de apresentar e explicar algumas técnicas de aquecimento solar passivo para a cidade de Passo Fundo, no estado do Rio Grande do Sul. Através de análises do contexto climático anual da cidade, o estudo procurou demonstrar que as técnicas realmente são viáveis para serem aplicadas em projetos na região. Uma das técnicas que foi analisada no âmbito deste trabalho foi a Parede de Trombe. Segundo os autores, quando se analisa as técnicas de aquecimento solar passivo, deve-se considerar que estas são eficientes apenas em regiões onde as temperaturas oscilam entre 10,5°C e 14°C ao longo do ano. Os resultados deste trabalho mostraram que, se a temperatura exterior variar em níveis mais altos ou mais baixos, estas técnicas reduzem consideravelmente a sua eficácia na melhoria do conforto térmico.

A cidade em estudo, Passo Fundo, está localizada numa região montanhosa com altitude média de 690 metros. A sua temperatura média anual é de 17,5°C podendo chegar a 28°C no verão e a uma temperatura mínima de -1°C no inverno, que costuma ser húmido e com temperaturas baixas.

Tabela 1 - Dados climáticos da cidade de Passo Fundo [20]

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Temperatura média (°C)	22,1	21,9	20,6	17,6	14,3	12,7	12,8	14	14,8	17,7	19,8	21,5
Temperatura máxima (°C)	28,3	28	26,7	23,7	20,7	18,4	18,5	19,9	21,2	23,8	26	27,8
Temperatura mínima (°C)	17,5	17,5	16,3	13,5	10,9	8,9	8,9	9,9	11	12,9	14,8	16,5
Umidade Relativa (%)	71	74	75	74	75	76	75	73	72	69	67	67
Insolação (horas)	238,8	208,1	207	185,2	181,1	153,7	162,6	161,1	154,9	202,3	220,6	254,2

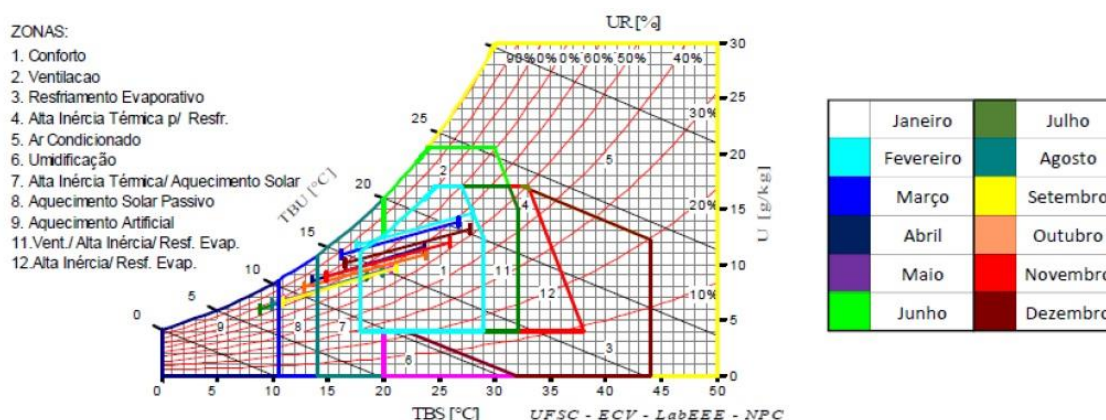


Figura 10 - Ábaco psicométrico da cidade de Passo Fundo [20]

Após análise dos dados climáticos e do ábaco psicométrico, que é uma excelente ferramenta de consulta para propor métodos de conforto térmico, conseguiram concluir que entre os meses de abril até novembro, o uso de sistemas de aquecimento passivo é viável, já que as temperaturas atingem o intervalo ideal para esses sistemas serem eficientes [20].

2.1.2.4 Pintura refletante

Os revestimentos de alta refletância são aqueles que refletem a maior parte da radiação solar e, portanto, têm uma temperatura superficial mais baixa durante o dia do que outros materiais convencionais. Uma temperatura da superfície mais baixa no elemento construtivo resultaria em menos transferência de calor para o interior do ambiente, reduzindo assim a necessidade de energia. Portanto, quando utilizados em climas quentes, estes revestimentos contribuem para manter um ambiente térmico confortável, resultando na melhoria do desempenho térmico das edificações [21].

Castro [22] considera que a arquitetura bioclimática utiliza recursos que a natureza oferece para obter ganhos e perdas de calor através da envolvente dos edifícios. A concepção bioclimática permite garantir que tais ganhos ou perdas de calor sejam proveitosos para os ocupantes do edifício, criando condições de conforto físico e psicológico, não necessitando recorrer a

sistemas mecânicos de aquecimento ou arrefecimento, ou pelo menos, diminuir a necessidade de uso destes equipamentos.

A utilização de tintas refletivas pode também reduzir significativamente a temperatura superficial das coberturas das edificações, contribuindo assim não só para a melhoria do desempenho térmico do edifício, mas também para a própria durabilidade dos sistemas construtivos.

- **Um estudo de caso: Utilização de tintas refletivas**

Segundo Ikematsu [23], que realizou uma série de estudos no Instituto de Pesquisa Tecnológicas de São Paulo – IPT (Figura 11), observa-se que é notável a diminuição da temperatura na superfície do material que recebeu a aplicação da tinta refletiva, quando comparada com um elemento idêntico sem esta pintura.

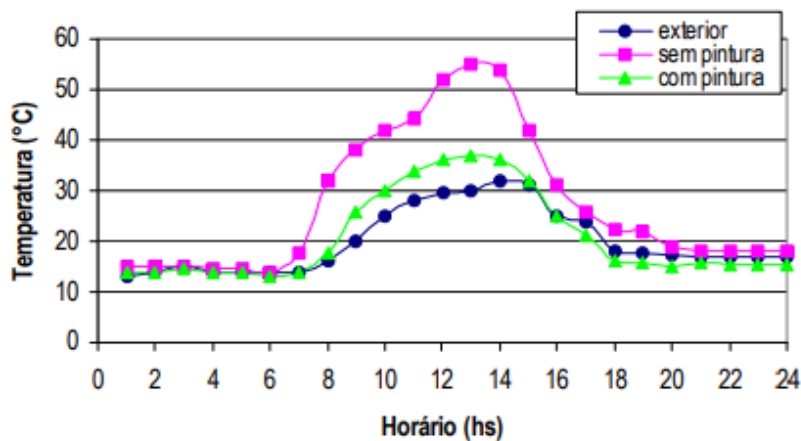


Figura 11 – Gráfico de variação de temperatura ao longo do tempo [23]

Estudos de Synnefa [23] feitos com 14 amostras de revestimentos refletivos mostram que as tintas refletivas melhoram significativamente o desempenho térmico dos sistemas construtivos nas quais são aplicadas. Comparando-se a tinta refletiva branca com as tintas convencionais, nota-se que as tintas convencionais embora também reduzam a temperatura na superfície, ainda apresentam altas temperaturas no interior das edificações. Por outro lado, os sistemas com materiais de elevada refletância atingem temperaturas mais baixas quando expostos à radiação solar, reduzindo a transferência de calor para o interior.

2.1.2.5 Cobertura Jardim

A cobertura jardim (Figura 12) é um sistema construtivo caracterizado por uma cobertura vegetal feita de grama ou plantas. É aplicado em tetos ou mesmo em coberturas tradicionais e consiste em camadas de impermeabilização e drenagem, para as quais são transferidos o solo e a vegetação indicados no projeto. Além das suas qualidades estéticas, as coberturas verdes funcionam bem como isolantes térmicos em telhados de edifícios. No contexto da cidade, as coberturas verdes, são uma forma de área vegetal que contribui simultaneamente para a melhoria da qualidade do ar e para a minimização do efeito ilha de calor em larga escala [24].

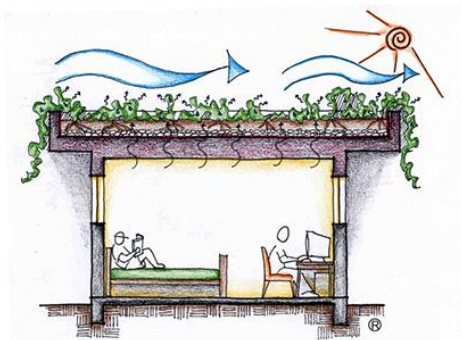


Figura 12 – Ilustração de uma cobertura jardim [9]

- **Um estudo de caso: Adega Mayor [24]**

A Adega Mayor (Figura 13), construída em 2007, é uma estrutura que exigiu grande espaço, volumetria e condições específicas. Teve no seu projeto / execução a aplicação do conceito de cobertura jardim com espelho de água, minimizando assim o impacto paisagístico na região onde se localiza (Portalegre - Alentejo). O edifício foi projetado da superfície para o subsolo procurando um enquadramento ambiental e estético ao qual se associou a especificidade de ambiente térmico interno necessário à produção e conservação do vinho, numa região climática de grandes amplitudes térmicas. A solução da cobertura adotada nesta estrutura acabou por desempenhar um papel preponderante no cumprimento das elevadas exigências em termos de ambiente térmica.



Figura 13 – Adega Mayor – cobertura verde

2.2 Conforto térmico, carta bioclimática e normalização

Segundo a ASHRAE 55 [25], o conforto térmico é um estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa. Se o balanço de todas as trocas de calor a que está submetido o corpo for nulo e a temperatura da pele e o suor estiverem dentro de certos limites, pode-se dizer que o homem sente conforto térmico. Em geral define-se a temperatura de conforto de um determinado espaço como sendo aquela que provoca uma sensação térmica neutra.

De acordo com Humphreys [26] a temperatura de conforto não é uma constante, variando de acordo com a estação do ano e as temperaturas as quais as pessoas estão habituadas. Nesse sentido, definiu-se, o modelo de conforto adaptativo, aplicável para a delimitação da zona de conforto térmico. Dessa forma, a abordagem adaptativa considera fatores físicos e psicológicos que interagem na percepção térmica. Givoni [27] refere ainda que o ser humano é capaz de se adaptar ao ambiente no qual ele está localizado, e por conta disso, os limites da zona de conforto se podem adaptar, assumindo com valores maiores ou menores de acordo com a região em que se insere o edifício.

De acordo com Lamberts [28], a avaliação do conforto térmico de um ambiente, depende de algumas variáveis, nomeadamente:

- Temperatura do Ar (T_{AR} - °C);
- Temperatura Radiante (TRM - °C);
- Umidade Relativa (UR - %);
- Velocidade do Ar (V - m/s);
- Atividade física (MET - *met* ou W/m^2);
- Vestimenta (I_{CLO} - *clo* ou m^2 °C/W);

Na década de 60, os irmãos Olgyay aplicaram a bioclimatologia na arquitetura, como já dito no capítulo 1, afim de desenvolver estratégias de adaptação da arquitetura ao clima, com o objetivo de manter o conforto térmico. Foi criado um diagrama chamado, carta bioclimática que era estritamente para as condições externas, e através desses estudos, de Olgyay, em 1969 Giovanni elaborou também uma carta bioclimática, só que baseadas nas temperaturas internas dos edifícios, corrigindo algumas limitações do diagrama de Olgyay [28].

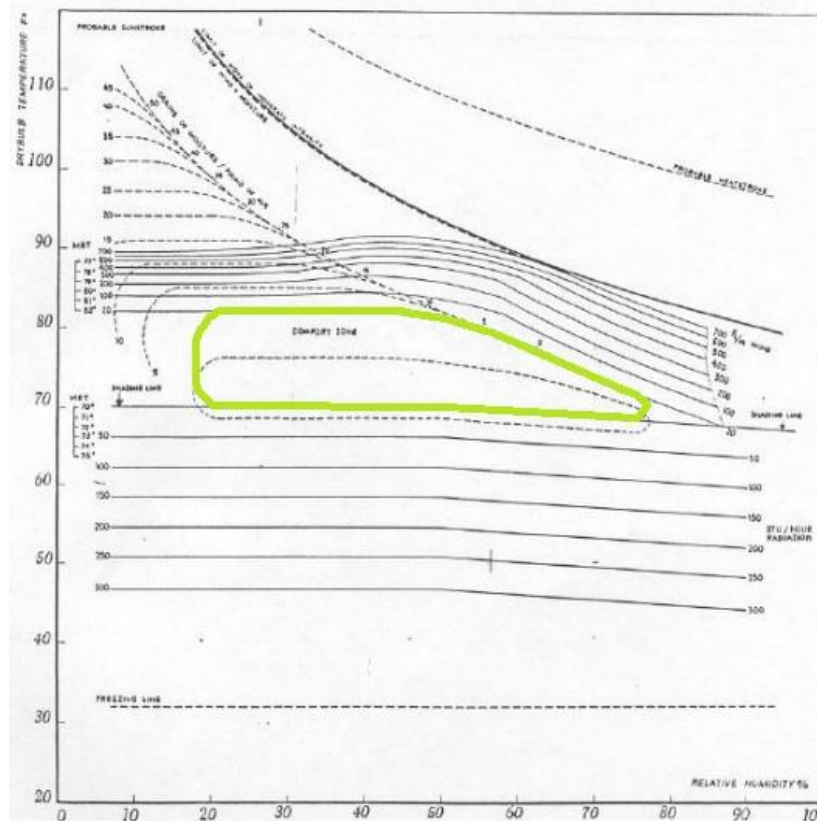


Figura 14 – Carta Bioclimática de Olgay [11]

Segundo Maragno [29], “as cartas bioclimáticas são elaboradas a partir das zonas de conforto térmico e proporcionam de maneira integrada informações sobre comportamento climático do entorno e previsão de estratégias para a correção desse comportamento quando fora da zona correspondente ao conforto térmico”.

Na carta bioclimática são identificadas várias zonas. A zona de conforto, que está indicada na Figura 14 em verde, é uma delas e corresponde às situações, em que há uma grande probabilidade das pessoas se sentirem em conforto térmico. De acordo com os estudos de Giovani [27], em países em desenvolvimento, esta condição é possível de se verificar em condições de ambientes com temperatura variando de 18°C a 29°C e umidade relativa variando entre 20% e 80%. De acordo em este trabalho, quando o ambiente interior tiver com temperaturas próximas a 18 °C, deve-se minimizar o impacto do vento e em temperaturas próximas a 29 °C deve-se controlar a incidência de radiação solar.

As três normas de referência no domínio do conforto térmico: a ISO 7730 [30], a ASHRAE 55 [25] e a EN 15251 [31]. Os modelos de avaliação do conforto térmico apresentados nestas normas foram desenvolvidos a partir dos resultados de estudos realizados com pessoas em ambientes térmicos controlados. No entanto, apenas as duas últimas apresentam modelos de conforto adaptativos.

- **ASHRAE-55**

Desenvolvida pela American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers (ASHRAE), a norma ASHRAE-55 [25] propõe um modelo de conforto térmico adaptativo que indica as condições de conforto térmico necessárias para garantir que, 80% ou 90% dos utilizadores com atividades sedentárias, menor ou igual a 1,2 met, consideram o ambiente como confortável e é aconselhada para espaços ocupados e seus sistemas de climatização.

O modelo adaptativo é apresentado sob forma gráfica (Figura 12) e é o mais indicado para espaços ventilados naturalmente. Este método estabelece que os ocupantes do espaço podem utilizar vestuários que se adaptam às temperaturas exteriores e interiores e a sua aplicação pressupõe que chegam cumpridos os seguintes limites:

- Temperatura média mensal: 10 a 33,5°C;
- Taxa de metabolismo: 1,0 a 1,3 met;
- Resistência térmica do vestuário: 0,5 a 1 clo;
- O espaço em estudo não pode possuir sistema mecânico de arrefecimento;

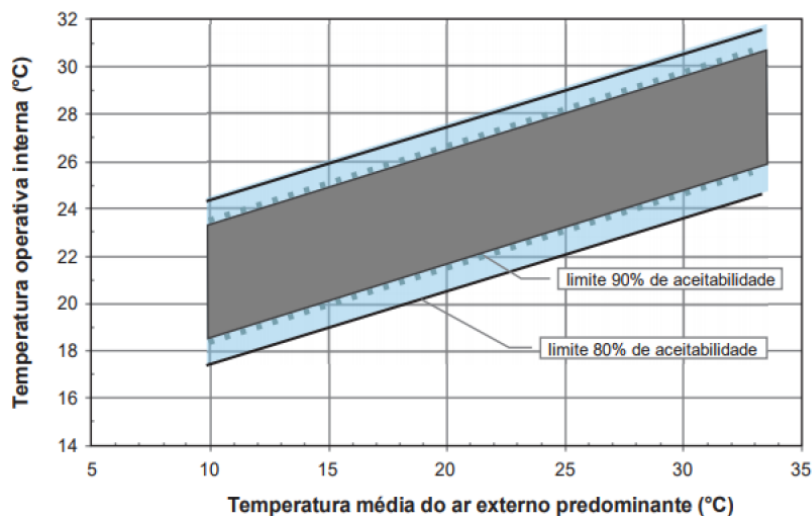


Figura 15 – Modelo de conforto adaptativo da ASHRAE 55 [25].

Os limites da temperatura operativa de conforto dependem assim da temperatura média exterior do mês anterior, e são resultado da aplicação das expressões expostas na Tabela 2, para 80% ou para 90% de aceitabilidade dos utilizadores do espaço estudado.

Tabela 2 - Equações dos limites de aceitabilidade, adaptadas de [25]

	Limite máximo	Limite mínimo
80%	$0,31 \cdot tpm_{out} + 21,3$	$0,31 \cdot tpm_{out} + 14,3$
90%	$0,31 \cdot tpm_{out} + 20,3$	$0,31 \cdot tpm_{out} + 15,3$

*os limites de 90% de aceitabilidade são definidos a título adicional

- **EN 15251**

A norma EN 15251 [31] também sugere um método adaptativo para as condições aceitáveis de conforto térmico. Este modelo, todavia, apresenta os limites da temperatura operativa de conforto a partir a temperatura exterior exponencialmente ponderada, T_{mp} , determinada pela seguinte equação:

$$T_{mp} = \frac{T_{n-1} + 0,8.T_{n-2} + 0,6.T_{n-3} + 0,5.T_{n-4} + 0,4.T_{n-5} + 0,3.T_{n-6} + 0,2.T_{n-7}}{3,8}$$

T_{n-1} : Temperatura média exterior do dia i anterior.

De acordo com a equação acima apresentada, a temperatura exterior exponencialmente ponderada é influenciada pelos registos dos 7 dias anteriores ao dia em análise.

Este método é aplicável em edifícios sem sistemas mecânicos de arrefecimento, com presença de pessoas que demonstram facilidade de adaptação às condições ambientais e com atividades sedentárias. O método indica ainda que o utilizador do edifício deve ter acesso à abertura e fecho de janelas e para o controlo das condições térmicas. Na Figura 16 estão representados os limites inferiores e superiores de aceitabilidade. O modelo estabelece ainda três categorias de desempenho, que correspondem a diferentes níveis de exigências.

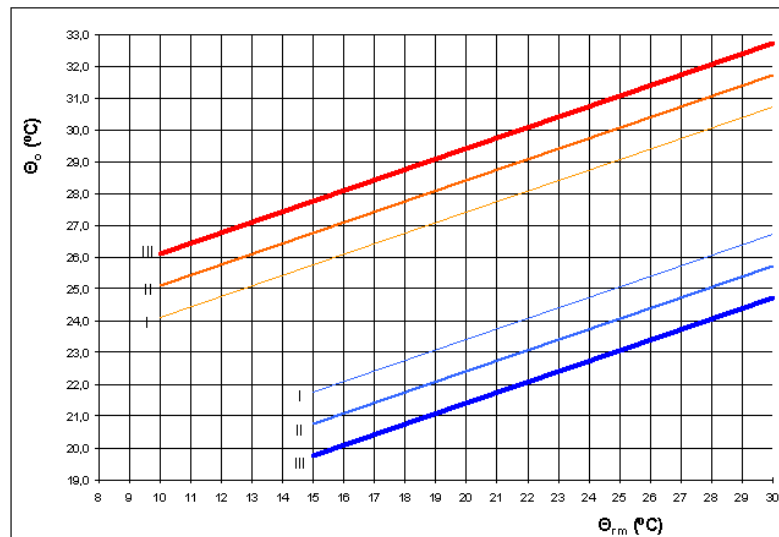


Figura 16 – Modelo de conforto adaptativo da EN 15251 [31]

A categoria II é indicada para a avaliação de edifícios existentes e para edifícios reabilitados, tendo sido a adotada nesta dissertação. A Tabela 3 mostra as equações utilizadas para calcular os limites de aceitabilidade.

Tabela 3 - Equações dos limites de aceitabilidade do modelo da norma EN 15251, adaptado de [31]

	Limite máximo	Limite mínimo
<i>Categoria II</i>	$0,33.T_{mp} + 18,8 + 3$	$0,31.T_{mp} + 18,8 - 3$

2.3 A Arquitetura Bioclimática no Brasil

No Brasil, através dos planos de integração nacional, foi incentivado pelo governo militar atentar a arquitetura a princípios bioclimáticos, que ganhou força na década de 60. Os arquitetos atuavam em regiões afastadas dos centros, o que revelava uma necessidade cada vez maior de utilizar as condições locais para a construção, principalmente na realidade do interior que é muito diversa da existente nas capitais. Dessa forma, realizavam-se obras utilizando sistemas construtivos tradicionais e materiais locais, seja por harmonização à cultura, seja por necessidade de adaptação às condicionantes específicas de determinada região. A arquitetura foi assim adquirindo diferenças em distintas regiões, passando a apresentar alguma expressão fora do eixo Rio – São Paulo.

A questão da crise energética reforçou o debate sobre o assunto, levando inclusive à realização do “Seminário de Arquitetura Bioclimática”, que ocorreu em 1983, no Rio de Janeiro, onde tópicos sobre a produção e conservação de energia foram debatidos por vários peritos.

Na década de 70, houve um retorno da discussão sobre o conceito da arquitetura bioclimática, que por culpa da arquitetura moderna acabou sendo deixado de lado. Foi nesta época que se intensificaram os debates ecológicos. Nos dias de hoje é um assunto bastante valorizado na área da arquitetura, especialmente porque na maior parte das regiões do Brasil existem elementos climáticos favoráveis que devem ser aproveitados na construção, tendo em conta as importantes mais-valias que podem daí resultar [32].

2.3.1 Zoneamento bioclimático e estratégias bioclimáticas mais utilizadas no Brasil

De acordo com o zoneamento bioclimático atualmente em vigor, o Brasil pode ser dividido em oito zonas homogêneas quanto ao clima (Figura 17). A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) [33] adotou na composição da NBR 15220-3 de 2005 o zoneamento climático que havia sido apresentado em 1999. Adicionalmente, esta norma estabelece ainda

um conjunto de recomendações técnico construtivas para cada zona, tendo por base a garantia das condições de conforto térmico dos utilizadores dos edifícios e com o objetivo de otimizar o desempenho térmico das edificações, ajustando-o em função do clima do local onde estas se inserem. Esta metodologia está sintetizada na figura 18 e na Tabela 4.

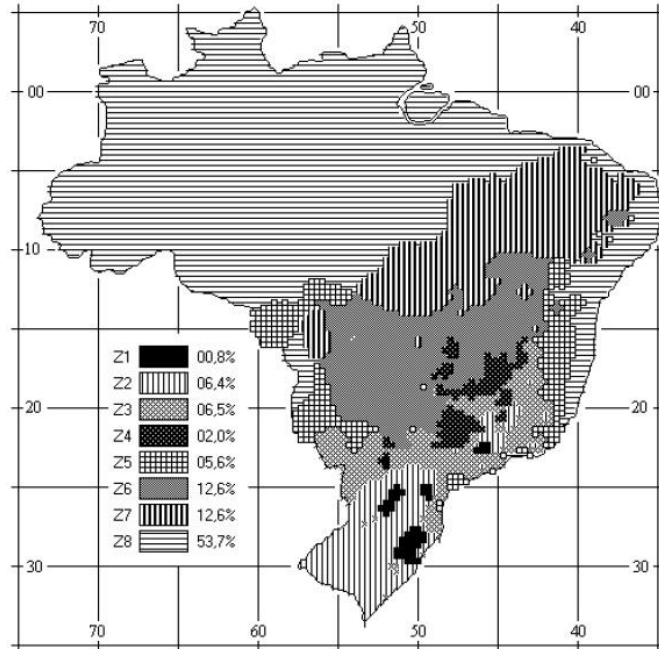


Figura 17 – Zoneamento Bioclimático do Brasil [33].

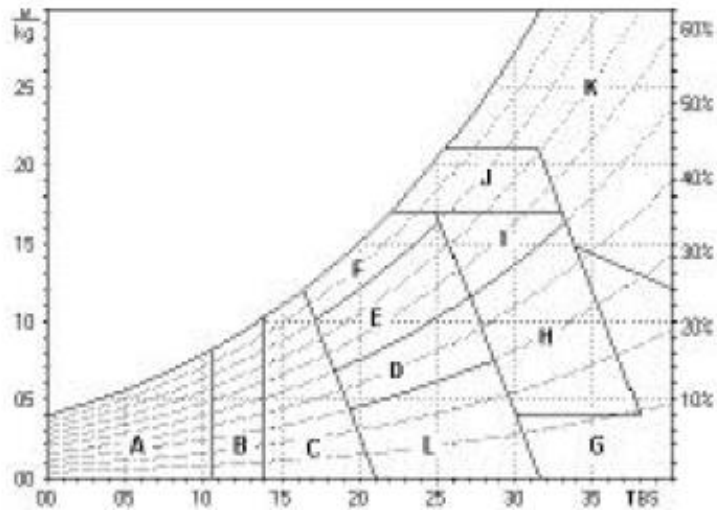


Figura 18 - Carta Bioclimática do Brasil [33].

Tabela 4 – Zonas da Carta Bioclimática do Brasil, adaptada de [33].

ZONAS DA CARTA	ESTRATÉGIAS
A	Zona de aquecimento artificial (calefação)
B	Zona de aquecimento solar da edificação
C	Zona de massa térmica para aquecimento
D	Zona de Conforto Térmico (baixa umidade)
E	Zona de Conforto Térmico (não precisa fazer nada)
F	Zona de desumidificação (renovação do ar)
G + H	Zona de resfriamento evaporativo
H + I	Zona de massa térmica de refrigeração
I + J	Zona de ventilação
K	Zona de refrigeração artificial
L	Zona de umidificação do ar

Analisando as propostas apresentadas da Norma Brasileira de Conforto, NBR 15220-3 [33], verifica-se que as estratégias bioclimáticas mais adequadas para utilização nas várias regiões do Brasil são:

- Ventilação natural;
- Aquecimento solar;
- Ar-condicionado;
- Vedações internas pesadas (inércia térmica);
- Resfriamento evaporativo;

2.3.2 Análise de alguns projetos que beneficiaram com o uso de estratégias bioclimáticas

2.3.2.1 Casa da Folha

O “Projeto Casa da Folha” (Figura 19) foi desenvolvido pelo escritório Mareines + Patalano Arquitetura, situado em Angra dos Reis, Rio de Janeiro, pertencente à Zona Bioclimática 8. É considerada a primeira casa sustentável, que buscou inspiração em arquiteturas brasileiras indígenas e tem como destaque uma cobertura em formato de folha que é responsável pela proteção solar de cada compartimento da casa.



Figura 19 – Casa Folha, Angra dos Reis – RJ, Brasil – Cobertura [34]

O fato de ser uma casa em frente ao mar, permite que o vento dominante do Sudeste venha em direção à casa que, com o seu pé direito alto (Figura 20), possibilita a entrada de ventilação natural em todas as áreas da casa, originando-se assim um sistema de arrefecimento passivo.

Além da utilização da ventilação natural como estratégia bioclimática, a elevada humidade do local, devido às brisas que chegam do mar, a localização entre uma área de vegetação densa, que facilita o processo de evapotranspiração e sombreamento, contribuem de forma significativa para o conforto térmico interno. [34]



Figura 20 – Casa Folha, Angra dos Reis – RJ, Brasil – Pé direito [34]

Resumindo, as estratégias bioclimáticas utilizadas nesse projeto são as seguintes:

- Ventilação Natural;
- Sombreamento;
- Humidificação;
- Arrefecimento Evaporativo.

2.3.2.2 IPEL – Fábrica de Pinceis e Embalagens

O “Projeto IPEL – Fábrica de Pinceis e Embalagens” (Figura 21) foi desenvolvido pelo arquiteto Sidonio Porto, localizado em um condomínio industrial, na cidade de Cajamar, São Paulo, na Zona Bioclimática 3. É uma fábrica de pinceis e embalagens para produtos de beleza e maquiagens e seu conceito básico é o respeito ao meio ambiente. Um dos recursos utilizados é a iluminação natural indireta, com a construção dos beirais da cobertura generosos, visando proteger os ambientes internos da exposição solar, mas também da humidade.



Figura 21 – IEL – Fábrica de Pinceis e embalagens – Alçado [34]

Outro recurso é a cobertura de shed, proporcionando a ventilação natural, pintada na cor branca que permite maximizar a reflexão. Adicionalmente, há uma grande área verde à volta do edifício, que proporciona o arrefecimento evaporativo e o sombreamento de algumas áreas.

Resumindo, as estratégias bioclimáticas utilizadas nesse projeto são as seguintes:

- Ventilação Natural;
- Uso de cores claras;
- Uso de proteção solar;
- Arrefecimento evaporativo.

2.3.2.3 Edifício Ventura Corporate Towers

O “Projeto Edifício Ventura Corporate Towers” (Figura 22) foi desenvolvido em conjunto pela Kohn Pedersen Fox (KPF) sediada em Nova York e pelo escritório de arquitetura Aflalo & Gasperini no Brasil. Localizado no centro empresarial na cidade do Rio de Janeiro, pertencente à Zona Bioclimática 8.

O edifício é um arranha céu composto por duas torres gêmeas, e foi o primeiro empreendimento a receber a certificação LEED Gold no Rio de Janeiro. Desde o projeto inicial, teve um

planeamento para impossibilitar grandes impactos ambientais, com preocupações que vão desde os materiais que foram utilizados até outras medidas do caráter ambiental.

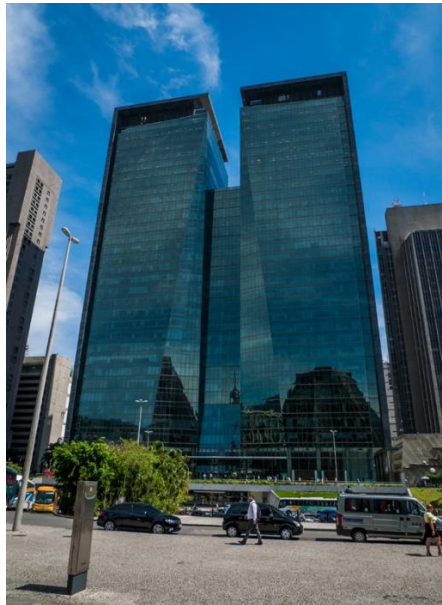


Figura 22 – Edifício Ventura Corporate Towers – Alçado [34]

O edifício possui uma fachada com vidros laminados, refletivos verdes, de baixa transmissão térmica de calor, para garantir uma iluminação natural e reduzir o consumo de energia pelo ar-condicionado. Foi construído um teto verde no edifício garagem com a finalidade de diminuir os ganhos de calor e os índices de refletância solar.

Resumindo, as estratégias bioclimáticas utilizadas nesse projeto são as seguintes:

- Ventilação Natural;
- Uso de cores claras;
- Uso de vidros especiais;
- Arrefecimento evaporativo;
- Ar-condicionado;
- Iluminação natural.

3. METODOLOGIA

3.1 Considerações gerais

A estratégia metodológica adotada neste trabalho inclui quatro fases: escolha do edifício, criação do modelo, identificação dos problemas e procura de soluções. A Figura 23 mostra a representação esquemática da estratégia.

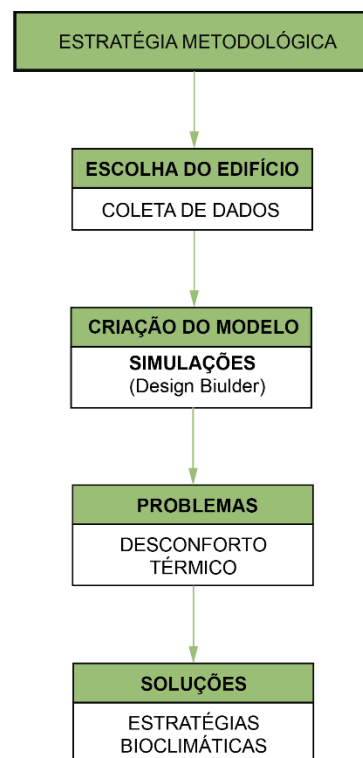


Figura 23 – Diagrama da estratégia utilizada.

A primeira fase consistiu na recolha das informações, relativas ao edifício hoteleiro, Park Hotel São Clemente, localizado no Brasil, nomeadamente no que se refere à sua ocupação, propriedades dos materiais e a sua geometria, entre outros *inputs* essenciais para a criação do modelo.

Na segunda fase foi criado um modelo do edifício no software, *DesignBuilder* para dar início às simulações referentes ao conforto térmico interno dos quartos do hotel. Este programa utiliza o algoritmo do *EnergyPlus* como motor de simulação. Já com o modelo criado, foi realizada a primeira simulação, com o clima referente a cidade de Nova Friburgo, RJ – Brasil, local de implantação do edifício.

Já na terceira fase, optou-se por fazer simulações para cinco climas diferentes, com o objetivo de analisar as alterações no desempenho do edifício perante situações climáticas distintas.

Após as cinco simulações iniciais, uma em cada zona climática diferente, foram quantificadas as taxas de desconforto térmico e, para minimizar tal desconforto foram aplicadas e simuladas estratégias bioclimáticas passivas de arrefecimento.

3.2 Software *EnergyPlus* + *DesignBuilder*

O software *EnergyPlus* [35] foi o programa escolhido para a realização das simulações deste trabalho. Este programa foi criado com o objetivo de executar a simulação e o cálculo de perdas e ganhos térmicos e a análise energética de edificações e dos seus sistemas. Para tal, requer, inúmeros dados de entrada que são primeiramente definidos e configurados no modelo em estudo. Esses dados incluem, entre outros, a localização, o clima local, a orientação, a geometria e a ocupação do edifício a ser estudado. Outros aspectos como os materiais e as suas propriedades térmicas e físicas são também fundamentais para o rigor da simulação. A Figura 24 mostra fluxo de transferência de informação adotado na organização interna no *EnergyPlus*.

Após as simulações, a partir dos resultados, é possível verificar quais os impactos, que os elementos em análise geram no conforto térmico do ambiente interior, e trabalhar em encontrar soluções construtivas mais eficazes, sustentáveis e económicas, dentro dos requisitos mínimos de conforto térmico associados à regulamentação em vigor [35].

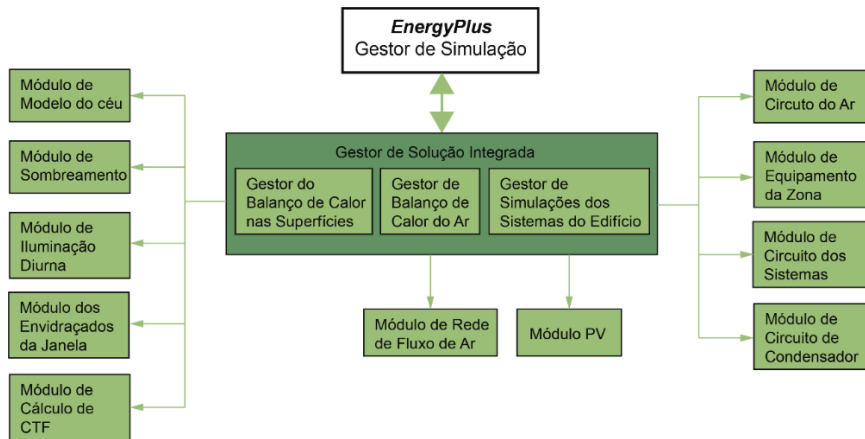


Figura 24 – Sistema de Organização Interna do EnergyPlus [Adaptado de 35]

Neste caso de estudo utilizou-se o software *EnergyPlus*, com extensão *DesignBuilder*, [36] que é um programa que tem um conjunto integrado de ferramentas aprofundadas de alta produtividade para auxiliar no projeto e avaliação de edifícios sustentáveis, ressaltando-se as características abaixo, listadas por Pereira [37].

- Criação rápida de modelos 3D de edifícios, permitindo importar plantas e usar ferramentas de desenho;
- Divisão do edifício por zonas, usando ferramentas próprias;
- Introdução de sistemas (AVAC, águas sanitárias e iluminação) com facilidade para todo o edifício ou para cada zona;
- Visualização gráfica do modelo em 3D;
- Introdução de ganhos da atividade de forma rápida e fácil;
- Facilidade na exportação dos resultados das simulações.

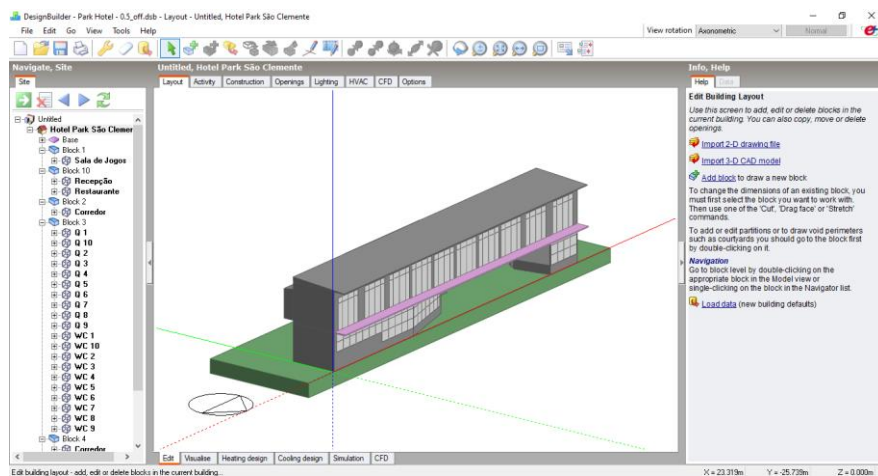


Figura 25 – Ambiente de trabalho do DesignBuilder

3.3 Caso de estudo

3.3.1 Localização e clima principais

O edifício caso de estudo localiza-se na cidade de Nova Friburgo, no estado do Rio de Janeiro no Brasil (Figura 23).

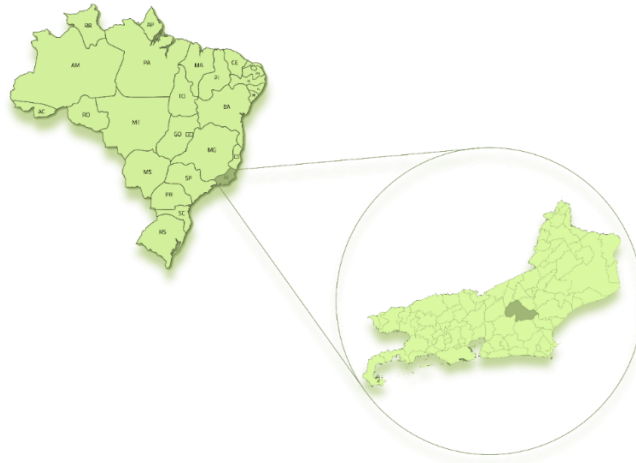


Figura 26 – Localiação do estado do Rio de Janeiro no Brasil e da cidade de Nova Friburgo no Rio de Janeiro.

O clima desta região apresenta algumas diferenças ao longo do ano: na época de chuva a temperatura é amena, a sensação térmica é de abafado e de céu quase encoberto; já na época mais seca a sensação térmica é mais agradável, com o céu com poucas nuvens. A temperatura média diária varia entre os 10 °C (mínima) e os 27 °C (máxima), e raramente é inferior a 7 °C ou superior a 31 °C. Conhecer a variação da temperatura do local é o primeiro passo para um projeto bioclimático, pois ela vai condicionar o tipo de envolvente, a dimensão das aberturas, os tipos de proteção, etc [38].

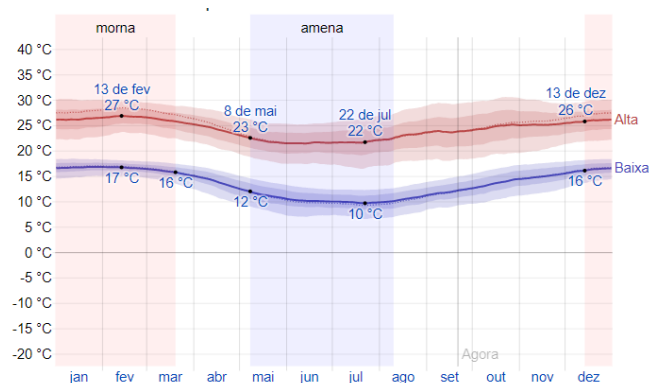


Figura 27 - Temperatura máxima (linha vermelha) e mínima (linha azul) médias da cidade de Nova Friburgo [38].

3.3.2 Descrição da geometria

O edifício alvo de estudo está construído numa zona isolada do centro da cidade e como se pode observar na Figura 28, não existem edifícios adjacentes que lhe possam proporcionar qualquer tipo de sombreamento.



Figura 28 - Alçados Norte e Oeste do Hotel Park São Clemente

O edifício tem dois pisos e inclui os seguintes espaços:

- Piso Térreo (Figura 29):
 - Receção;
 - Sala de Jogos;
 - Área de Estar;
 - Restaurante;
 - Instalação Sanitária;
 - Serviços.

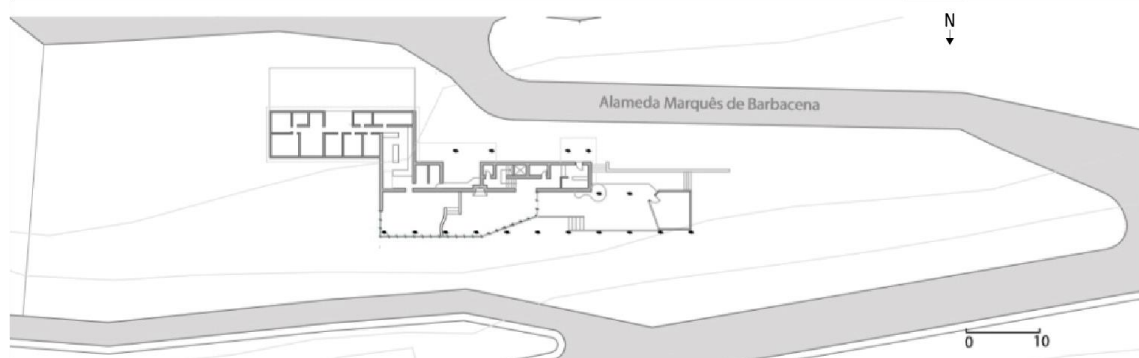


Figura 29 - Piso Térreo

- Piso 1 (Figura 30):
 - 10 Quartos;
 - Arrumos.



Figura 30 - Piso 1

3.3.3 Elementos construtivos e propriedades dos materiais

O hotel foi inteiramente construído com materiais naturais com matérias-primas disponíveis no local. Na Tabela 5 apresenta-se a constituição dos elementos construtivos principais, incluindo as propriedades térmicas mais relevantes dos materiais que os constituem.

Tabela 5 – Elementos construtivos e suas propriedades

Elemento	Material	e [m]	λ [W/m.°C]	C_p [J/kg.K]	ρ [Kg/m³]	U [W/m².°C]	g
Parede Externa	Pedra	0,40	2,300	1000	2600	2,908	—
	Reboco	0,025	0,500	1000	1300		
Parede Interna	Tijolo maciço	0,10	0,620	800	1700	2,319	—
	Reboco	0,025	0,500	1000	1300		
Piso	Madeira	0,40	0,140	1200	650	0,326	—
Cobertura	Telha	0,025	1000	800	2000	0,739	—
	Madeira	0,095	0,080	2000	600		
Vãos Envidraçados	Vidro	0,006	—	—	—	6,121	0,591

Legenda:

e – Espessura

λ – Condutividade

ρ – Densidade

C_p – Calor Específico

U – Coeficiente de Transmissão Térmica

g – Fator Solar

3.4 Apresentação do modelo de simulação

3.4.1 Modelação

Como já descrito anteriormente, a modelação foi realizada no *software DesignBuilder + EnergyPlus*, que disponibiliza uma base de dados bastante completa, englobando equipamentos, materiais construtivos e climas. As potencialidades deste programa estão amplamente validadas e os modelos, quando bem detalhados, conduzem a resultados muito próximos da realidade. Assim, esta ferramenta é uma peça fundamental para estudar o desempenho energético e térmico dos edifícios, bem como para suportar estudos de melhoria reabilitação energética.

Numa primeira fase da modelação, foi introduzida no software, de forma simples, a geometria do edifício. Nas Figuras 31, 32 e 33 é apresentado o modelo construído e as suas envolventes.

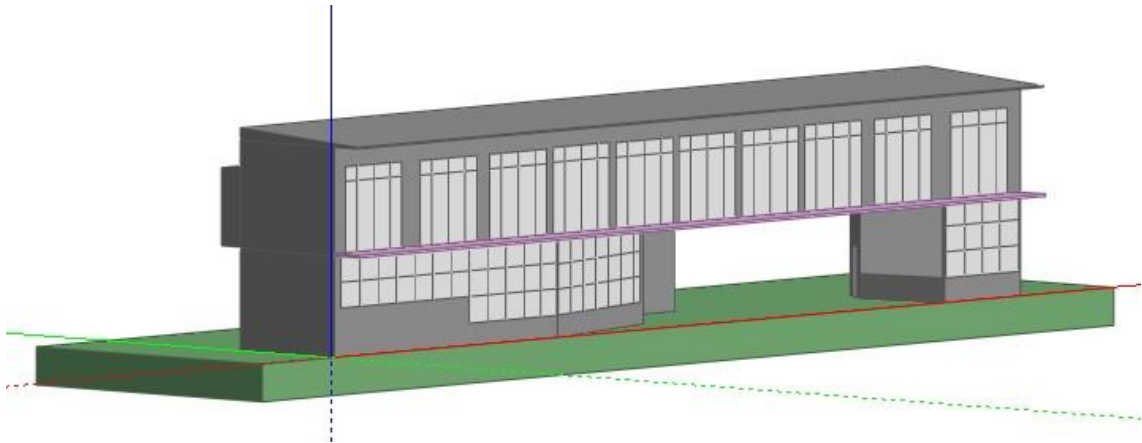


Figura 31 - Representação do modelo no DesignBuilder - Alçado Norte

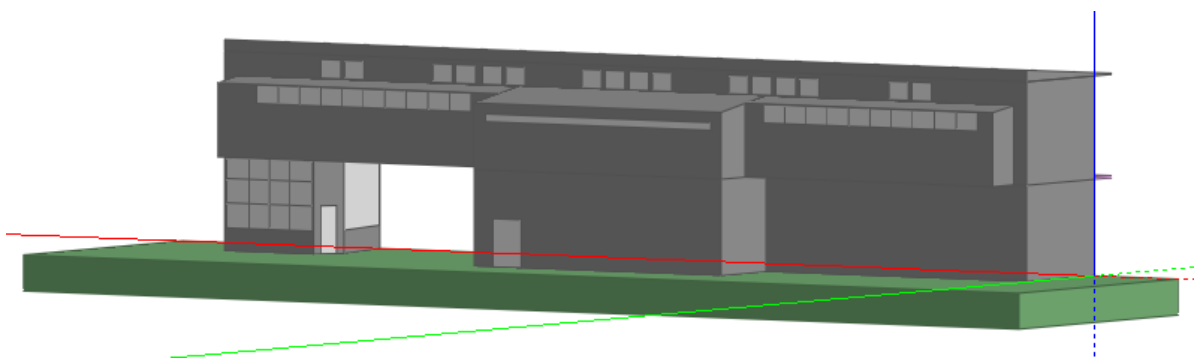


Figura 32 - Representação do modelo no DesignBuilder - Alçado Sul

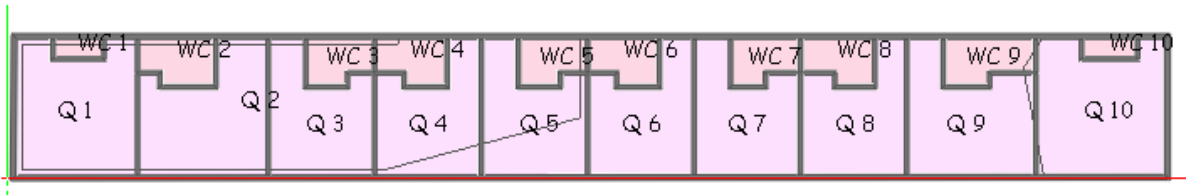


Figura 33 - Representação da divisão dos quartos no Piso 1

Depois da geometria, foram inseridos os materiais, com as respectivas propriedades térmicas (Tabela 5), utilizados nos elementos construtivos principais do edifício. Na Figura 34, está representado o menu *construction* com os elementos das envolventes e dados da ventilação, esses utilizados na primeira simulação, que foram variando entre as demais simulações.

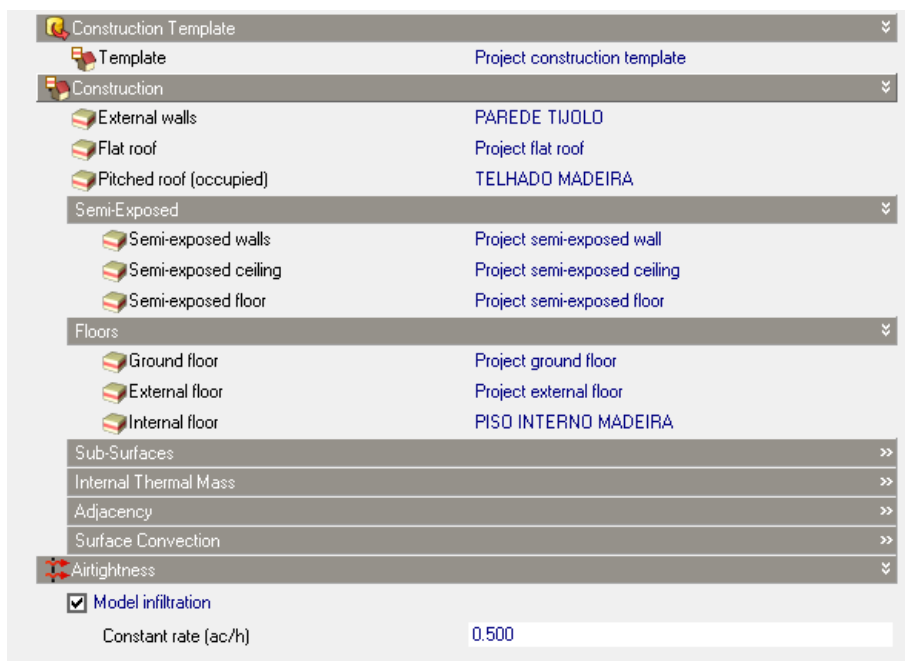


Figura 34 - Menu construction, dados dos elementos das envolventes

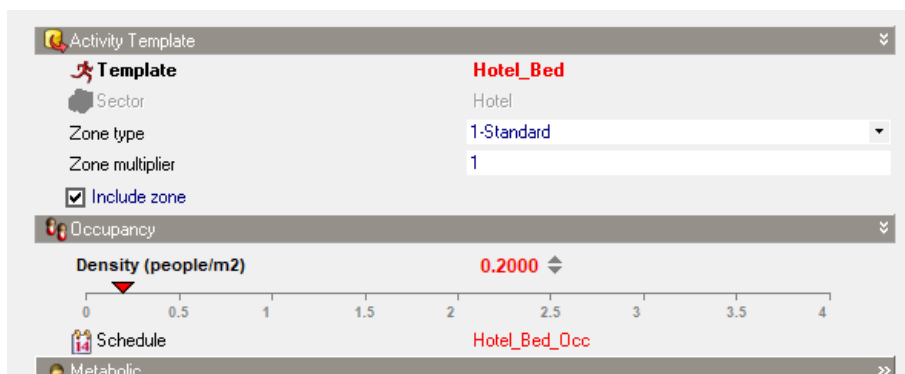


Figura 35 – Menu activity, dados dos ganhos internos do quarto

Na Figura 35, está representado o menu *activity* com os dados dos ganhos internos. A ocupação utilizada, em todas as simulações, foi de duas pessoas por quarto e o metabolismo foi usado o referente ao homem (1).

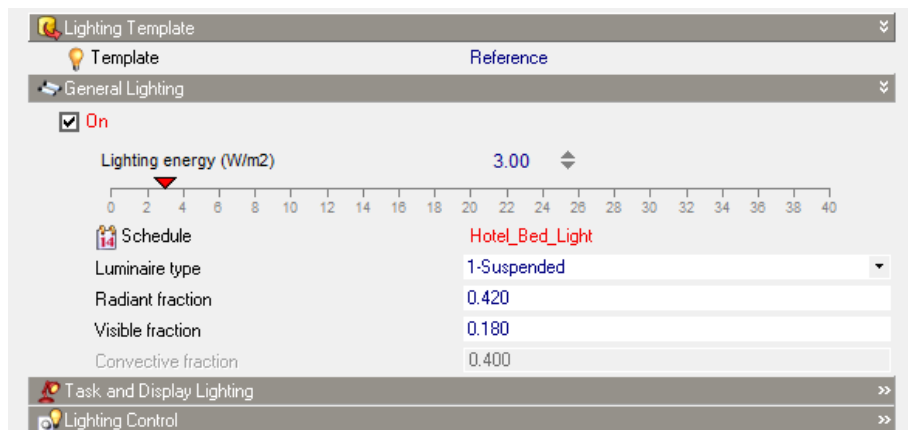


Figura 36 – Menu lighting, dados da iluminação dos quartos

Na Figura 36, está representado o menu *lighting* com os dados da iluminação, utilizou-se 3,00 W/m².

3.5 Cenários de simulação

Apresentam-se de seguida os distintos casos de simulação, selecionados com o objetivo de obter informação, analisar e entender o comportamento do edifício na sua atual situação e quando modificados alguns de seus materiais, propriedades, clima e localização. Toda a análise foi focada apenas num dos quartos do hotel, mais especificamente o quarto 2, sinalizado em verde na Figura 30, considerando como representativo do comportamento do edifício. Como já descrito anteriormente, as simulações foram feitas em cinco zonas bioclimáticas diferentes do Brasil, indicadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Tabela síntese das zonas bioclimáticas do Brasil simuladas

<i>Simulação</i>	Localização	Zonas Bioclimáticas
<i>S1</i>	Nova Friburgo - RJ	Z ₂
<i>S2</i>	Brasília - DF	Z ₄
<i>S3</i>	Governador Valadares - MG	Z ₅
<i>S4</i>	Senhor do Bonfim - BA	Z ₇
<i>S5</i>	Rio de Janeiro - RJ	Z ₈

As simulações foram agrupadas em dois cenários. O cenário um é o base e referente as simulações Si.1, Si.2, Si.3 e Si.4, realiza-se as simulações com as propriedades existentes hoje no hotel e será alterado os parâmetros de sombreamento e de ventilação.

Após análise dos resultados das simulações referidas no parágrafo anterior, verificou-se duas grandes diferenças de conforto térmico, uma com temperaturas internas menos agradáveis e outra mais agradável, referente as simulações Si.1 e Si.4, respectivamente. Tais simulações foram utilizadas para a fase seguinte.

O segundo cenário, refere-se as estratégias de arrefecimento passivo e engloba as simulações Si.5, Si.6, Si.7 e Si.8, onde Si.5 e Si.6 serão resultados das alterações dos parâmetros da emissividade e da absorção solar das paredes exteriores das envolventes e Si.7 e Si.8 onde é alterada a natureza da cobertura. A Tabela 7 indica o resumo das simulações a executar junto com os parâmetros que serão trocados.

Tabela 7 – Simulações (i) e parâmetros que foram variados

<i>Simulação</i>	Sombreamento*	Ventilação**	ϵ	α	Cob. Jardim
<i>Cenário Base</i>					
<i>Si.1</i>	OFF	0.5	0.9	0.7	-
<i>Si.2</i>	ON	0.5	0.9	0.7	-
<i>Si.3</i>	OFF	2.0	0.9	0.7	-
<i>Si.4</i>	ON	2.0	0.9	0.7	-
<i>Estratégias de Arrefecimento Passivo</i>					
<i>Si.5</i>	OFF	0.5	0.6	0.3	-
<i>Si.6</i>	ON	2.0	0.6	0.3	-
<i>Si.7</i>	OFF	0.5	0.9	0.7	SIM
<i>Si.8</i>	ON	2.0	0.9	0.7	SIM

Legenda:

i – simulação por zonas bioclimáticas diferentes (Tabela 6)

*OFF – sem cortina interna; ON – com cortina interna

**Infiltração constante de ar por hora

ϵ - Emissividade

α – Absorção solar

4. RESULTADOS

4.1 Apresentação dos resultados

4.1.1 Cenários base

As Figuras 37 a 41 apresentam, para as 5 zonas climáticas que foram analisadas, a variação anual das temperaturas internas, no quarto 2 do hotel. Estes valores correspondem aos resultados obtidos através das Simulações Si.1, Si.2, Si.3 e Si.4 (cenários base) e permitem compreender desde logo o perfil de flutuação de temperatura interior que existe atualmente no edifício.

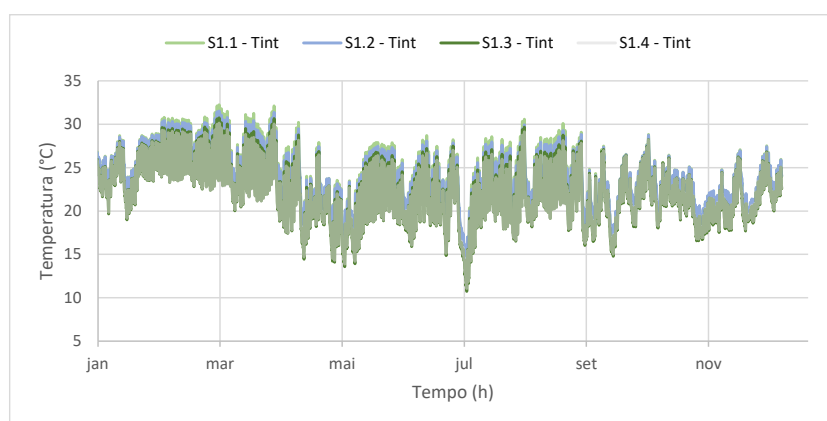


Figura 37 - Temperaturas internas resultante das simulações S1.1, S1.2, S1.3 e S1.4 (zona climática Z2 – Nova Friburgo).

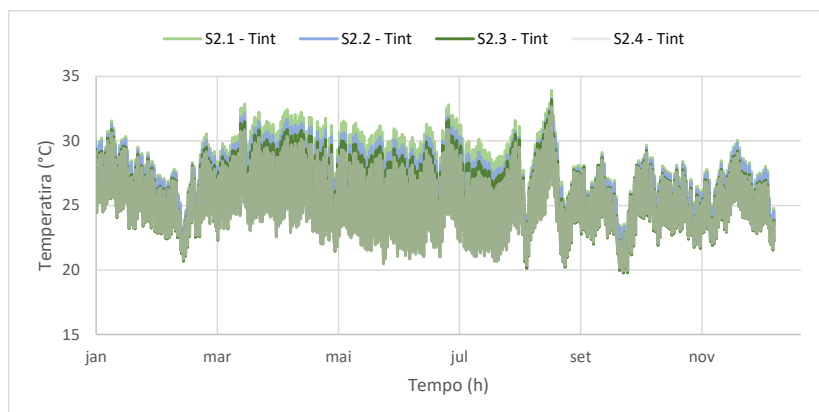


Figura 38 - Temperaturas internas resultante das simulações S2.1, S2.2, S2.3 e S2.4 (zona climática Z4 – Brasília).

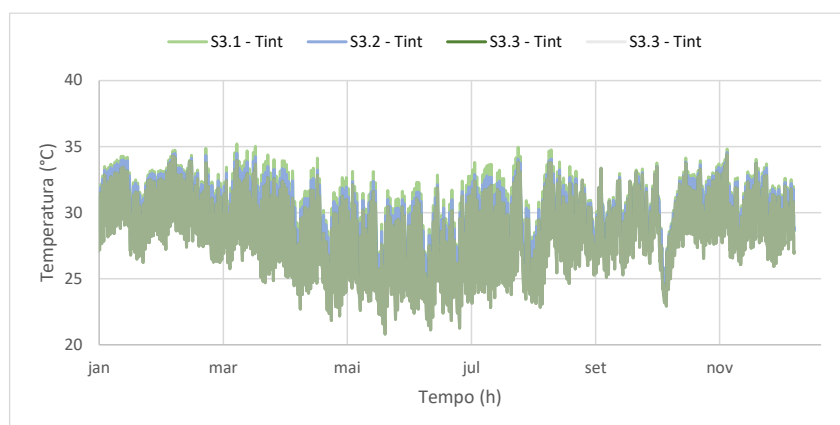


Figura 39 - Temperaturas internas resultante das simulações S3.1, S3.2, S3.3 e S3.4 (zona climática Z5 – Governador Valadares).

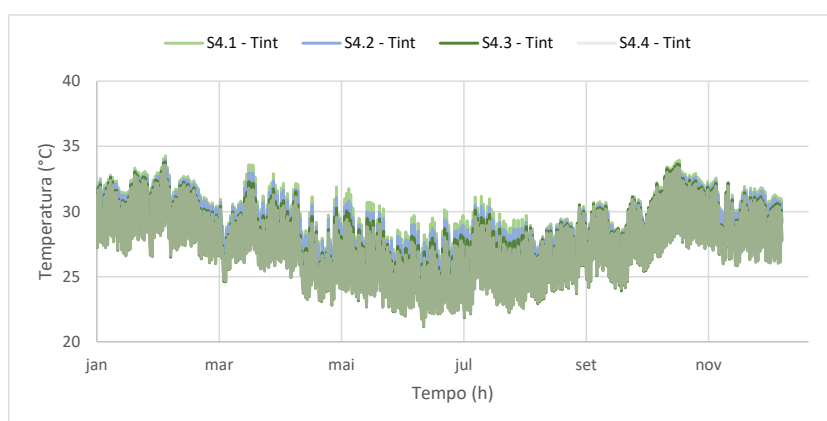


Figura 40 - Temperaturas internas resultante das simulações S4.1, S4.2, S4.3 e S4.4 (zona climática Z7 – Senhor do Bonfim).

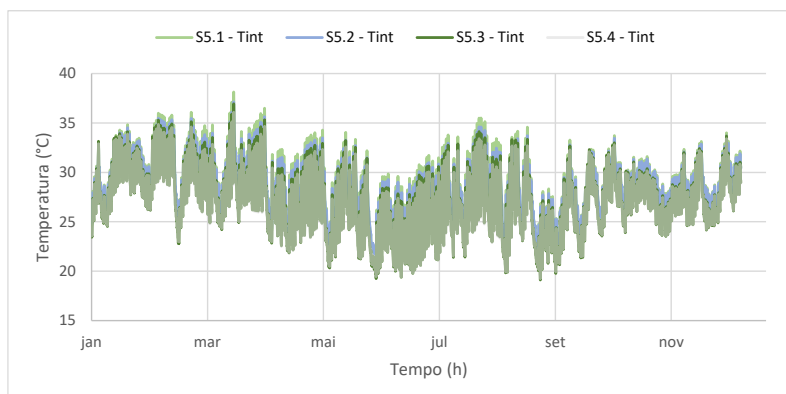
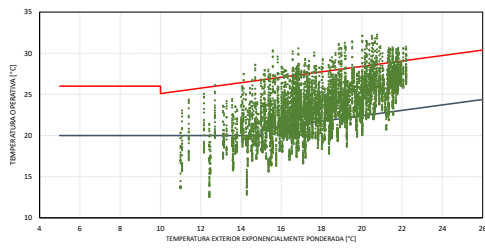


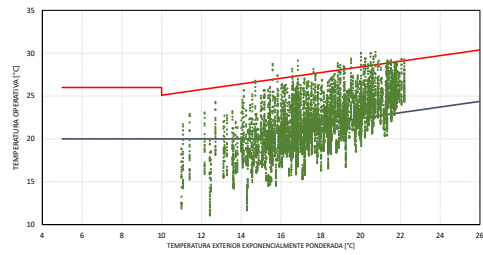
Figura 41 - Temperaturas internas resultante das simulações S5.1, S5.2, S5.3 e S5.4 (zona climática Z8 – Rio de Janeiro).

Analisando as Figuras, pode-se desde logo observar que o sobreaquecimento é um problema transversal a todas as zonas climáticas, sendo particularmente expressivo na zona Z8 (Figura 41). No entanto, mesmo na zona Z2 (Figura 37), que corresponde às simulações com temperaturas menos elevadas, observam-se períodos significativos em que a temperatura no interior do quarto 2 se encontra acima dos 25 °C. Embora sem permitir uma análise profunda e detalhada, os resultados também sugerem que as diferenças entre os 4 cenários simulados não são muito relevantes. Desta forma, parece fundamental recorrer a estratégias adicionais de arrefecimento, para se conseguir manter um nível adequado de conforto no interior dos quartos do edifício.

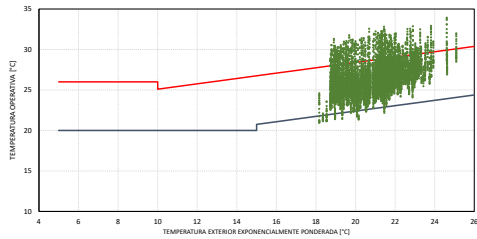
O conforto térmico foi avaliado através do modelo adaptativo proposto na norma EN 15251, considerando os limites da categoria II, que é a indicada pela norma para a avaliação de edifícios em contexto de reabilitação. Este é um modelo bastante flexível que impõe limites à temperatura interior em função da média exponencialmente ponderada da temperatura exterior dos últimos 7 dias (em que os dias mais próximos têm mais peso). A Figura 42 apresenta o resultado da aplicação do modelo de conforto a este caso de estudo.



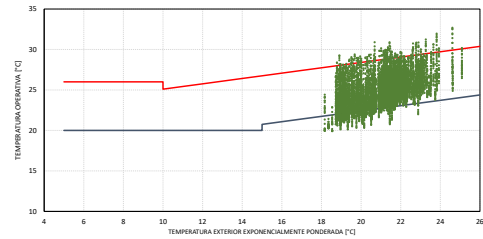
a)



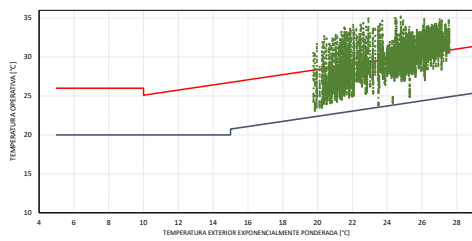
b)



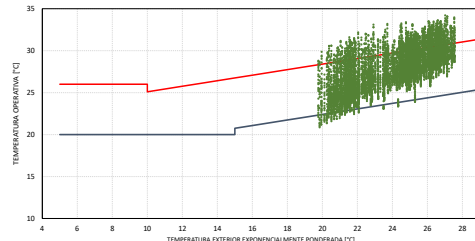
c)



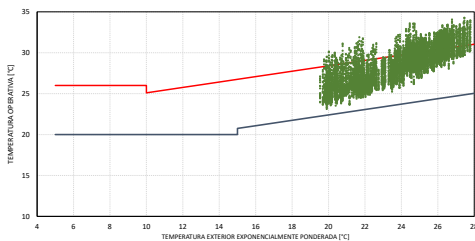
d)



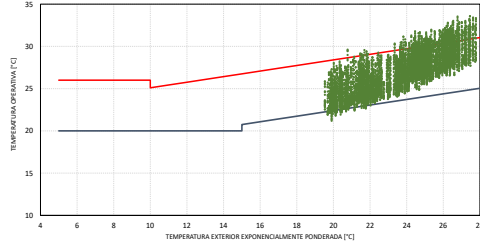
e)



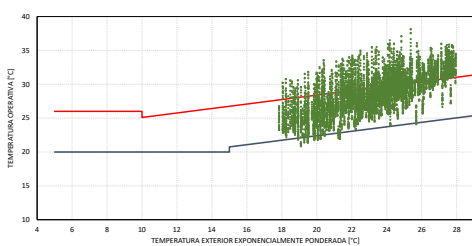
f)



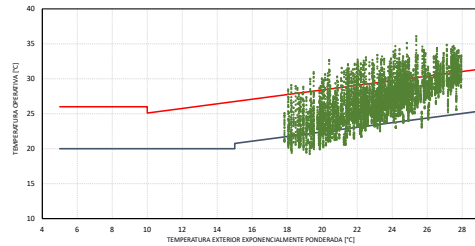
g)



h)



i)



j)

Figura 42 – Aplicação do modelo de conforto da norma EN 15251: **a)** simulação S1.1; **b)** simulação S1.4; **c)** simulação S2.1; **d)** simulação S2.4; **e)** simulação S3.1; **f)** simulação S3.4; **g)** simulação S4.1; **h)** simulação S4.4; **i)** simulação S5.1; **j)** simulação S5.4

As manchas de pontos confirmam claramente a existência de períodos relevantes de sobreaquecimento. No entanto, para facilitar a interpretação dos resultados e comparação de desempenho das diferentes soluções, nos diferentes climas, foram calculados dois índices de desconforto:

- o índice ID_1 (%), representa a percentagem de tempo em que o edifício permanece desconfortável termicamente durante o período de ocupação. É calculado através do rácio entre o número de ocorrências fora da zona de conforto e o total de ocorrências;
- e o índice ID_2 (°C.h), que mede o somatório das diferenças entre os limites de conforto e a temperatura simulada, quando esta se encontra fora da zona de conforto. Este indicador complementa o anterior, permitindo avaliar a severidade do desconforto térmico.

Os resultados do cálculo dos dois indicadores de desconforto relativos às simulações dos cenários base nas 5 zonas térmicas encontram-se sintetizados na Tabela 8.

Tabela 8 - Índices de desconforto nos cenários base, nas 5 zonas térmicas.

Zona	Si.1		Si.2		Si.3		Si.4	
	ID ₁ (%)	ID ₂ (°C.h)	ID ₁ (%)	ID ₂ (°C.h)	ID ₁ (%)	ID ₂ (°C.h)	ID ₁ (%)	ID ₂ (°C.h)
Z ₂	5,00	468	3,74	269	1,47	94	0,83	43
Z ₄	13,46	1462	10,09	835	5,41	381	3,22	194
Z ₅	47,48	6303	44,13	5219	23,71	2989	21,06	2491
Z ₇	28,62	2732	25,15	2185	13,86	1191	11,94	970
Z ₈	35,39	5815	32,77	4874	18,3	2619	16,45	2077

Como se pode verificar, a zona Z5 (Governador Valadares) é a mais severa, conduzindo a uma percentagem de desconforto de quase 50% no cenário Si.1. Por outro lado, a zona Z2 é a menos gravosa, apresentando níveis de desconforto residuais, atingindo apenas 5% no pior cenário. Os resultados também permitem verificar que ao longo das simulações, da Si.1 para a Si.4, o nível de desconforto vai diminuindo, resultado da aplicação das estratégias bioclimáticas de arrefecimento.

4.1.2 Cenários com estratégias de arrefecimento passivo

4.1.2.1 Pintura refletante

Como já mencionado anteriormente, os revestimentos de alta refletância são aqueles que refletem uma parte significativa da radiação solar e, portanto, apresentam uma temperatura superficial mais baixa do que outros materiais. As simulações Si.5 e Si.6 consideram uma pintura refletante nas paredes do edifício, correspondendo em termos de parâmetros de entrada

na simulação a uma redução de 0.3 na emissividade e de 0.4 no coeficiente de absorção. Na simulação Si.5 a taxa de renovação de ar é de apenas $0,5 \text{ h}^{-1}$ e não se consideram dispositivos de sombreamento, enquanto na simulação Si.6 a ventilação aumenta para $2,0 \text{ h}^{-1}$ e são incluídos dispositivos de sombreamento. A Figuras 43 apresenta o resultado da aplicação do modelo de conforto a este caso de estudo.

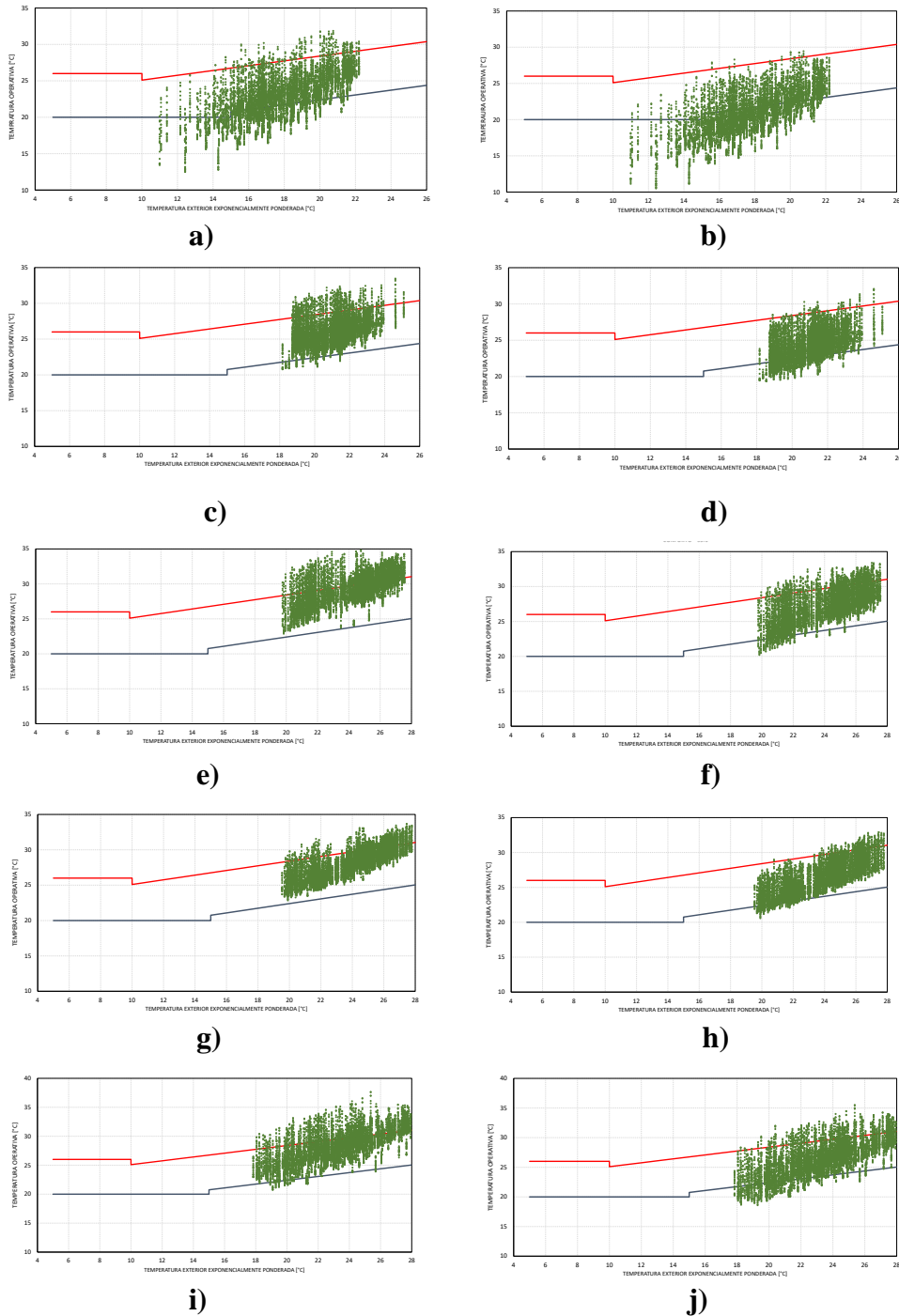


Figura 43 - Aplicação do modelo de conforto da norma EN 15251: **a)** simulação S1.5; **b)** simulação S1.6; **c)** simulação S2.5; **d)** simulação S2.6; **e)** simulação S3.5; **f)** simulação S3.6; **g)** simulação S4.5; **h)** simulação S4.6; **i)** simulação S5.5; **j)** simulação S5.6

Os resultados relativos ao cálculo dos índices de desconforto, ID₁ e ID₂, nas simulações dos cenários com pintura refletante e nas 5 zonas térmicas encontram-se sintetizados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados das simulações S1.5 e S1.6

Zona	Si.5		Si.6	
	ID ₁ (%)	ID ₂ (°C.h)	ID ₁ (%)	ID ₂ (°C.h)
Z ₂	3.82	329	0.29	10.25
Z ₄	10.30	1033	1.31	69
Z ₅	39.65	4852	13.84	1057
Z ₇	20.46	1681	6.64	484
Z ₈	28.60	4441	12.16	1692

Analisando a Tabela 9 e comparando-a com a Tabela 8 dos cenários base, pode-se observar uma ligeira redução de percentagem de desconforto, verificando-se que a aplicação da pintura refletante na envolvente exterior surtiu um efeito positivo no desempenho do edifício.

4.1.2.2 Cobertura Jardim

A cobertura jardim é um sistema caracterizado por uma cobertura vegetal feita de grama ou plantas. É montado habitualmente em coberturas planas, mas também pode ser usado em coberturas tradicionais, e consiste em camadas de impermeabilização e drenagem, para as quais são transferidos o solo e a vegetação indicados no projeto. Além das suas qualidades estéticas, as coberturas verdes, quando devidamente dimensionadas, também podem funcionar bem como isolantes térmicos em telhados de edifícios. Para as cidades, são uma forma de área vegetal que contribui para a melhoria da qualidade do ar e minimização do efeito ilha de calor em larga escala [39].

Nas simulações com cobertura jardim (Si7 e Si.8) foi necessário alterar alguns parâmetros da cobertura, nomeadamente a introdução de uma laje em betão que serviu de suporte à cobertura jardim. A diferença entre as duas simulações reside na taxa de ventilação e na existência de dispositivos de sombreamento, tal como descrito anteriormente. A Figura 44 apresenta o resultado da aplicação do modelo de conforto a este caso de estudo.

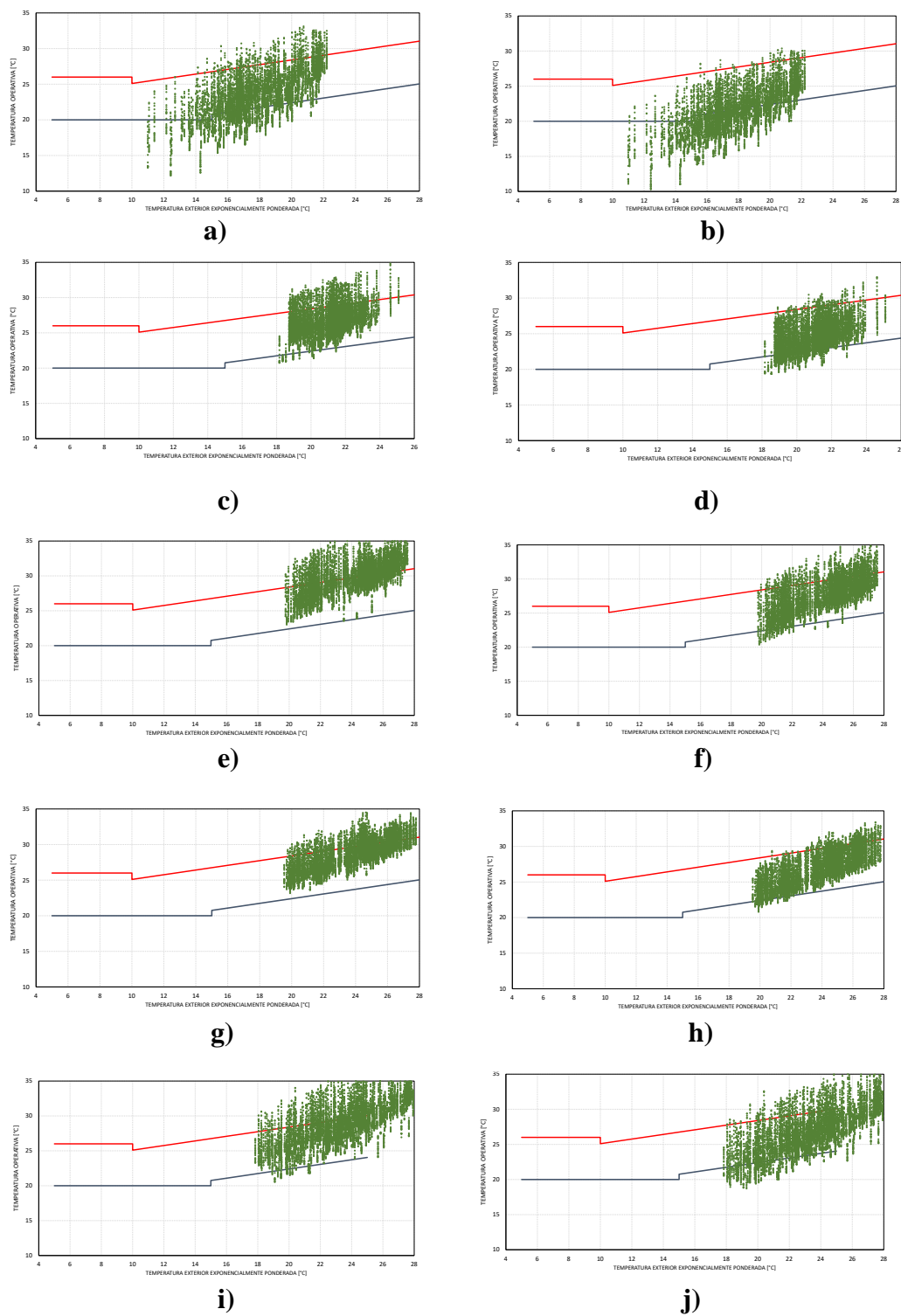


Figura 44 - Aplicação do modelo de conforto da norma EN 15251: **a)** simulação S1.7; **b)** simulação S1.8; **c)** simulação S2.7; **d)** simulação S2.8; **e)** simulação S3.7; **f)** simulação S3.8; **g)** simulação S4.7; **h)** simulação S4.8; **i)** simulação S5.7; **j)** simulação S5.8.

Os resultados relativos ao cálculo dos índices de desconforto, ID₁ e ID₂, nas simulações dos cenários com cobertura jardim nas 5 zonas térmicas encontram-se sintetizados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultado das simulações Si.7 e Si.8

<i>Zona</i>	Si.7		Si.8	
	ID₁ (%)	ID₂ (°C.h)	ID₁ (%)	ID₂ (°C.h)
Z ₂	7.90	905	1.28	60
Z ₄	16.07	1873	2.74	158
Z ₅	51.12	7616	19.10	1979
Z ₇	32.24	3139	10.10	712
Z ₈	37.91	6837	15.63	2409

Analisando-se a Tabela 10 e comparando-a com a Tabela 8 do cenário base, pode-se observar um ligeiro aumento da percentagem de desconforto.

4.2 Discussão dos resultados

4.2.1 Cenários Base

Analisadas as quatro primeiras simulações correspondentes aos cenários base (Si.1, Si.2, Si.3 e Si.4) é possível analisar quer o efeito da introdução do dispositivo de sombreamento ativo (Si.1 versus Si.2 e Si.3 versus Si.4), quer da alteração do valor da taxa de renovação de ar (Si.1 versus Si.3 e Si.2 versus Si.4).

A Figura 45 mostra a diferença dos índices de desconforto entre as simulações Si.1 e nas simulações Si.2. A Figura inclui ainda uma tabela com as diferenças entre os dois cenários. Analisando os resultados verifica-se que a introdução do dispositivo de sombreamento reduz a percentagem de sobreaquecimento entre 1,3% na zona climática Z2, a menos quente, e 3,5% na zona Z7. Relativamente ao indicador ID₂, verifica-se que também reduz entre 199 °C.h, na zona Z2 e 1084 °C.h na zona Z5.

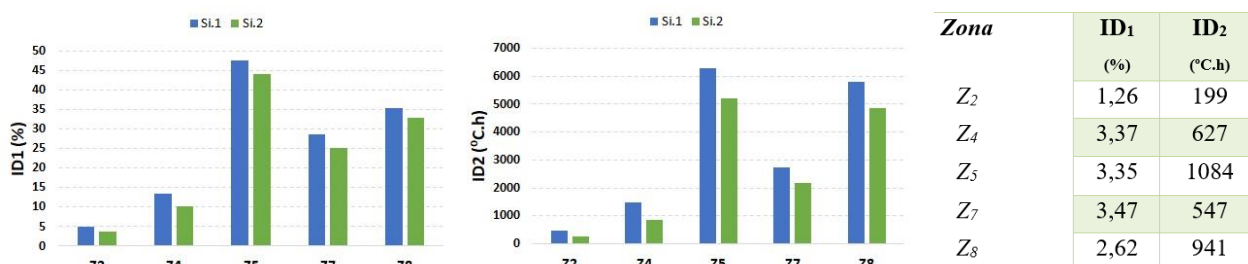


Figura 45 – Índices de desconforto obtidos nas simulações Si.1 e Si.2 e respetivas diferenças.

A Figura 46 mostra os resultados dos índices de desconforto nas simulações Si.3 e as simulações Si.4. Os resultados mostram que, embora continue a existir uma redução do período de desconforto, o efeito é menos notório do que na situação anterior. Este facto mostra que o aumento da taxa de renovação de ar implica uma diminuição da eficiência do dispositivo de sombreamento.



Figura 46 – Índices de desconforto obtidos nas simulações Si.3 e Si.4 e respetivas diferenças.

A Figura 47 mostra os resultados dos índices de desconforto nas simulações Si.1 e as simulações Si.4. Analisando os resultados verifica-se uma redução muito mais elevada do período de desconforto. Este facto mostra que, o dispositivo de sombreamento em conjunto com o aumento da taxa de renovação de ar, melhora o índice de desconforto do ambiente.

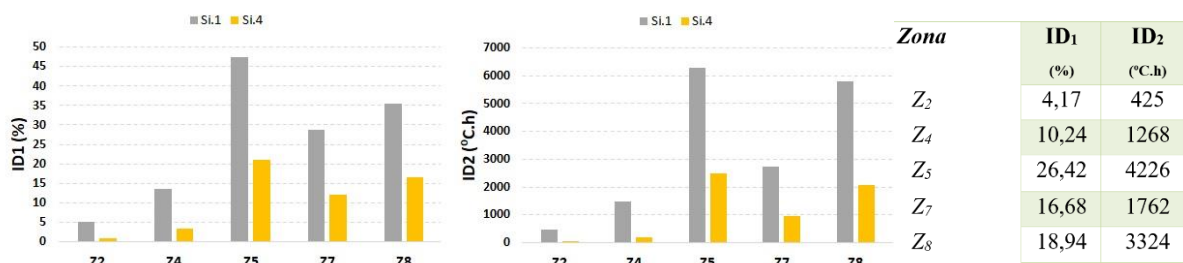
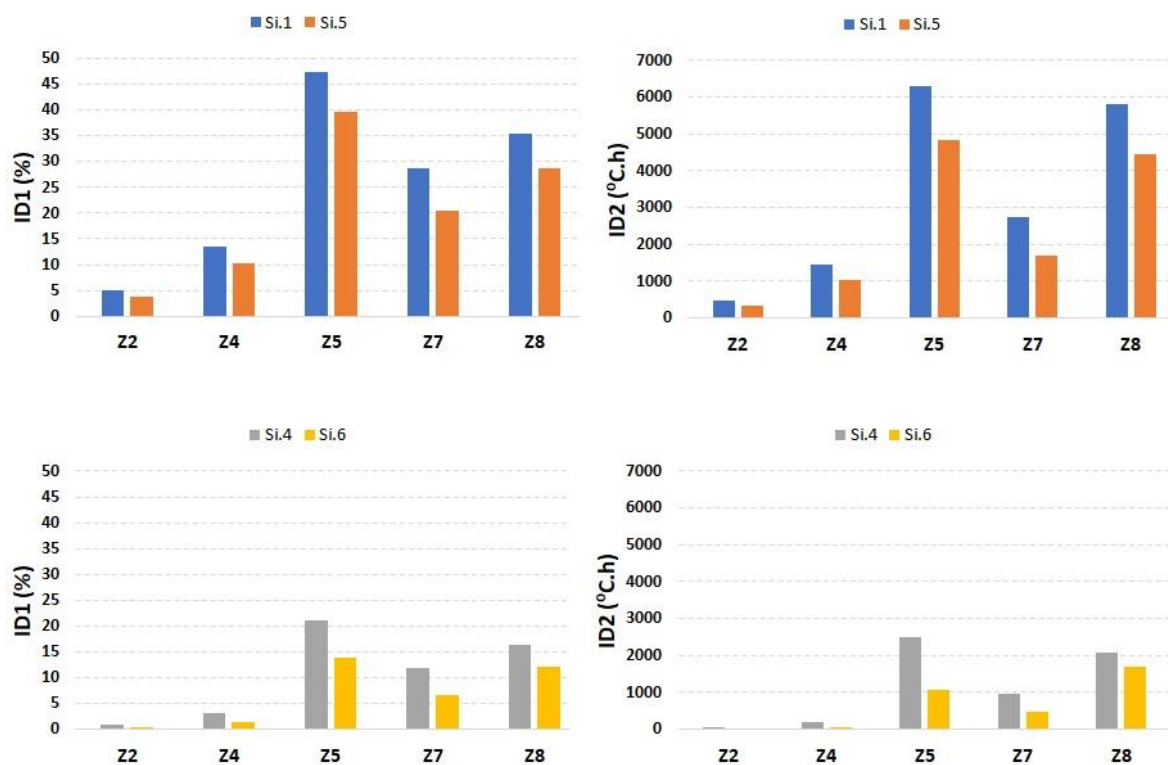


Figura 47 – Índices de desconforto obtidos nas simulações Si.1 e Si.4 e respetivas diferenças.

4.2.2 Cenários com estratégias de arrefecimento passivo

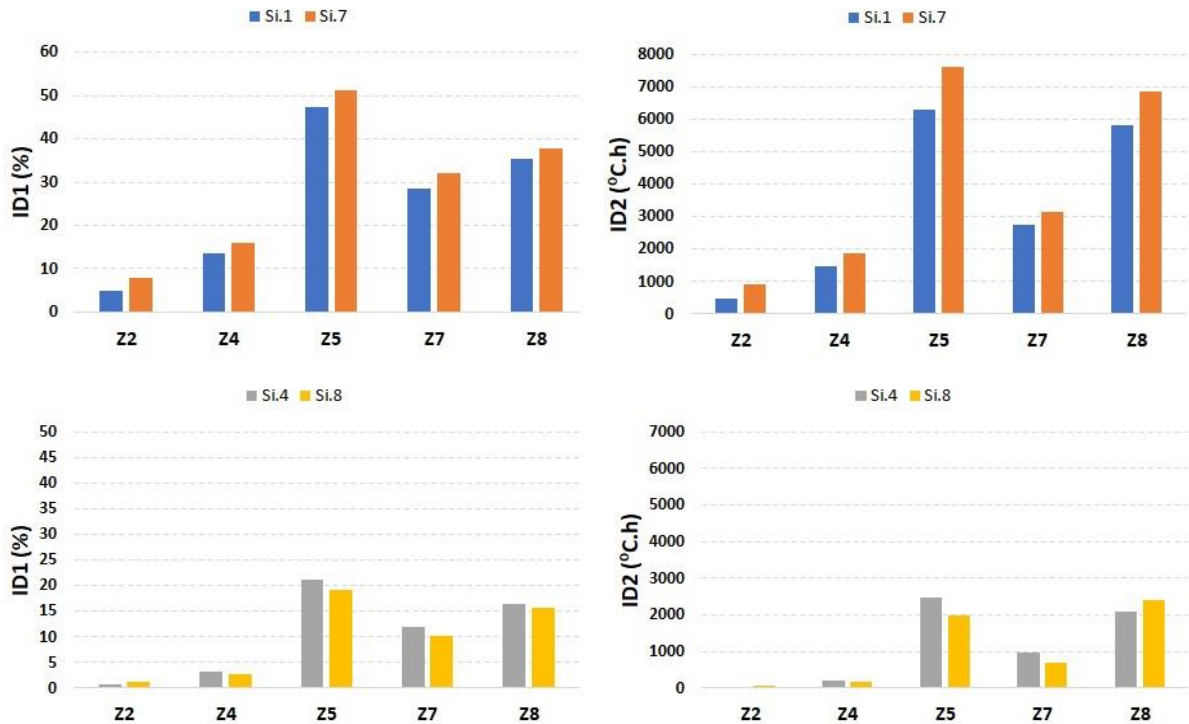
Na Figura 48, apresenta-se as diferenças dos índices de desconforto das simulações Si.1 para as simulações Si.5 e das simulações Si.4 para as simulações Si.6. Neste cenário, para além do parâmetro do sombreamento e de ventilação, altera-se os parâmetros de emissividade e de absorvância solar da envolvente exterior (Si.5 e Si.6), aplicando-se uma pintura refletante. Comparando os resultados Si.1 e Si.4 com Si.5 e Si.6 verifica-se um decréscimo do índice de desconforto. Este facto mostra que, a aplicação da pintura refletante melhora o conforto dentro dos quartos.



Zona	Si.1 → Si.5		Si.4 → Si.6	
	ID ₁ (%)	ID ₂ (°C.h)	ID ₁ (%)	ID ₂ (°C.h)
Z ₂	1.18	139	0.54	32.75
Z ₄	3.16	429	1.91	125
Z ₅	7.83	1451	7.22	1020
Z ₇	8.16	1051	5.3	486
Z ₈	6.79	1374	4.29	799

Figura 48 – Índices de desconforto obtidos nas simulações Si.1, Si.5, Si.4 e Si.6 e respetivas diferenças.

A Figura 49, mostra a diferença dos índices de desconforto das simulações Si.1 para as simulações Si.7 e das simulações Si.4 para as simulações Si.8. Neste caso faz-se outras duas simulações (Si.7 e Si.8) onde além dos parâmetros de sombreamento e ventilação, também é alterado o parâmetro da cobertura mantendo-se os valores de emissividade e absorvância solar das paredes exteriores das simulações do cenário base. Procedendo-se à análise entre os resultados das simulações Si.7 e Si.8 e comparando-as com Si.1 e Si.4, verifica-se um aumento do índice de desconforto.



Zona	Si.1 → Si.7		Si.4 → Si.8	
	ID ₁ (%)	ID ₂ (°C.h)	ID ₁ (%)	ID ₂ (°C.h)
Z ₂	2.90	437	0.45	17
Z ₄	2.61	412	0.48	36
Z ₅	3.64	1313	1.96	98
Z ₇	3.62	407	1.84	258
Z ₈	2.52	1022	0.82	82

Figura 49 - Índices de desconforto obtidos nas simulações Si.1, Si.7, Si.4 e Si.8 e respetivas diferenças.

5. CONCLUSÕES

5.1 Considerações finais

As estratégias bioclimáticas aplicadas aos edifícios visam minimizar o seu consumo de energia, potenciando o seu desempenho passivo, sem ignorar o conforto térmico dos utilizadores. Nesse sentido, é fundamental procurar a otimização do desempenho térmico e energético dos edifícios. É justamente essa demanda que os agentes da construção civil devem se esforçar para encontrar um equilíbrio entre as etapas de aquecimento e resfriamento da edificação por meio de soluções construtivas mais adequadas a diferentes realidades e cenários. Este trabalho utiliza o software de simulação numérica *EnergyPlus* e a sua interface gráfica *DesignBuilder* para simular a temperatura interior de um quarto, representativo de um modelo de um hotel, e avaliar se as medidas de arrefecimento passivo que são utilizadas, têm impacto no seu desempenho. Por meio da análise e compreensão dos resultados obtidos nas simulações, pode concluir-se se as estratégias bioclimáticas utilizadas devem ou não ser implementadas no edifício.

5.2 Conclusões a partir dos resultados

A partir dos resultados do conjunto de simulações que foi desenvolvido, é possível retirar as seguintes conclusões principais:

- Comparando as simulações Si.1 e Si.2, é possível observar o efeito do sombreamento devido a uma cortina pelo interior, que, genericamente, resultou numa diminuição das temperaturas internas do quarto. Assim, é possível concluir que a aplicação da cortina,

gera um sombreamento e uma ligeira redução das temperaturas internas. Na simulação Si.3, sem cortina e com aumento da taxa de ventilação, observaram-se também reduções de temperaturas. Pode-se concluir que o aumento da ventilação gera uma redução das temperaturas interiores mesmo sem a cortina no local. Já na simulação Si.4 podemos verificar diminuições bem mais acentuadas, devido a combinação da aplicação da cortina com o aumento da taxa de ventilação.

- Nas simulações Si.5 e Si.6 ocorreram descidas de temperaturas internas mais elevadas quando comparadas com as simulações do cenário base. Estas descidas indicam que a aplicação da tinta refletante nas envolventes exteriores como estratégia bioclimática de arrefecimento passivo é uma medida eficiente. Verificou-se ainda que a junção das três estratégias, sombreamento, ventilação e pintura refletante, é mais eficiente, como se pode ver nos resultados da temperatura interna na simulação Si.6.
- Nas simulações Si.7 e Si.8 ocorreram aumentos de temperaturas internas, em todas as localizações. Levou-se a concluir que a troca da cobertura do edifício, que antes era apenas um forro em madeira, estrutura em ripas de madeira e telhas cerâmicas, para a aplicação de uma laje em betão e cobertura jardim não surte o efeito desejado para tal situação. Obtendo como resultado o aumento do índice de desconforto interno do quarto. Conclui-se que essa estratégia bioclimática da colocação da cobertura jardim, para este caso em estudo não é eficiente.

Entre todas as simulações, os melhores resultados alcançados decorrem da simulação Si.6, onde combinam os parâmetros de sombreamento ON (com cortina), ventilação (2.0) e a aplicação da pintura refletante com os valores de emissividade e absorção solar baixos das envolventes exteriores do modelo.

Analisando-se as localizações em separado, os resultados da cidade de Nova Friburgo, na zona bioclimática 2, onde é localizado o edifício, os resultados na simulação S1.6 chegam quase a zero, tendo uma grande queda de índice de desconforto interno. Logo, conclui-se que as técnicas utilizadas são eficientes para minimizar o desconforto por sobreaquecimento no interior dos quartos. Já nas demais localizações, os melhores resultados obtiveram-se na simulação S5.6, localizada na cidade de Governador Valadares, na zona bioclimática 5. Nesta região, conseguiu-se uma redução de 33,64% no índice de desconforto térmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Evans, J. M. *The Comfort Triangles: A New Tool for Bioclimatic Design*. Published PhD. thesis. 2009. Acesso em 12 março, 2020 from: <http://www.darenet.nl>.
- [2] Maciel, A. A. *Bioclimatic Integration into the Architectural Design*. Published Phd. Thesis. University of Nottingham, United Kingdom, 2007.
- [3] Vasquez, O. M. *Bioclimatic Architecture. Institutomonsa de ediciones*, Barcelona, Espana, 2009.
- [4] Olgyay, V. *Design with Climate*, Princeton University Press, Princeton, 1963.
- [5] Camous; Watson, *El Habitat Bioclimatico. De La Concepcion A La Construccion*, 1986.
- [6] Lamberts, R., *Bioclimatic Buildings: A paper presented to the Federal University of Santa Catarina*, 2006. Acesso em 12 março, 2020 em www.labeee.com.ufsc.br.
- [7] Davies, E., *Understanding bioclimatic Skyscrapers*, 1999. Acesso em 12 março, 2020 em www.idbe.org.
- [8] Palhina, M. *Sistemas de sombreamento em arquitetura: Proposta de um novo método de concepção e dimensionamento*, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Abril 2009.
- [9] PROJETEER – *Projetando Edificações Energeticamente Eficientes*. Disponível em: <<http://projeteer.mma.gov.br>> Acesso em 05 de abril, 2020.
- [10] Givoni, B., *Basic study of ventilation problems in housing in hot countries*. Israel: Building Research Station Technion. Report of the Israel Institute of Technology, 1962.
- [11] Gobbi, M.; Santos, M.; Rola, S., *Qualidade do ar e ventilação natural no ambiente hospitalar – O exemplo do edifício Sarah Kubitschek no Rio de Janeiro*, III Encuentro Latinoamericano y Europeo sobre Edificaciones y Comunidades Sostenibles, 2019.
- [12] Merten H. O.; Silva, M. B.; Caldas, L. R.; Spoto, R. M. *Compostos Orgânicos Voláteis de Tintas imobiliárias e certificações ambientais: estudo de caso para subsolos*. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil. Goiânia, GO, vol. 13, n. 1, p. 128-139, 2017.
- [13] Guío, L. M. P. *Compostos Orgânicos Voláteis em tintas imobiliárias: caracterização e efeitos sobre a qualidade do ar em ambientes internos construídos*. Dissertação de Mestrado em Arquitetura. Universidade Federal de São Paulo, 2013.
- [14] Mello, M.; Santos, E.; Dorneles, R.; Costa, G.; Rosa, L.; Dias, E. *The Strategies Bioclimatic Importance of Applied in Architectural Design*. Ver. Adm. UFSM, Santa Maria, v. 10, Edição Especial, P. 09-25. Agosto 2017.
- [15] Palhinha, M. *Sistemas de Sombreamento em Arquitectura: Proposta de um novo método de concepção e dimensionamento*. IST – Instituto Superior Técnico de Lisboa, abril 2009.
- [16] Estes, N. *Fachadas Vivas – Desenvolvimento de Protótipo de Sombreamento Passivo*. Universidade de Lisboa, Ciências, Dissertação de mestrado, 2018.

- [17] Design *Passives Solar Homes*, from: energy.gov.
- [18] Elsadig, K. *Energy Efficiency in Commercial Buildings*. Dissertação apresentada em Curso de Mestrado Science Sustainable Engineering, University of Strathclyde, 2004.
- [19] Cavalcanti, F. *Paredes de Trombe no Brasil – Análise do Potencial de Utilização para Aquecimento e Refrigeração*. USP – Universidade de São Paulo, Brasil. Novembro 2013.
- [20] Ribeiro, G.; Santos, L.; Miolla, P.; Batista, R.; Telles, V. *Técnicas de Aquecimento Solar Passivo para a Cidade de Passo Fundo*. 5º SICS Seminário Internacional de Construções Sustentáveis. Outubro 2016.
- [21] Seker, D. Z.; Tavit, A. U. Evaluation of exterior building surface roughness degrees by photogrammetric methods. *Building and Environment*. v.31, 1996, p. 393- 398.
- [22] Castro, Adriana Petito A. Silva. Análise da Refletância de Cores de Tintas através da Técnica Espectrofotométrica. Campinas: UNICAMP/Faculdade de Engenharia Civil. Dissertação de Mestrado, 2002.
- [23] Ikematsu, P., *Estudo da refletância e sua influência no comportamento térmico de tintas refletivas e convencionais de cores correspondentes*, Dissertação Apresentada ao Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.
- [24] Ferreira, R. *Análise de Sensibilidade dos Parâmetros de Cálculos das Coberturas Jardim*, dissertação para obtenção de grau de mestre em Engenharia, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, 2013.
- [25] ASHRAE; ANSI/ASHRAE Standard 55-2013: *Thermal environmental conditions for human occupancy*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, EUA - 2013.
- [26] Humphreys, M. A., *The variation of comfortable temperatures*. *Int. J. Energy Res.*, 3: 13-18. doi:10.1002/er.4440030103 – 1979.
- [27] Givoni, B.; *Comfort, climate analysis and building design guidelines*. in: *Energy in Buildings*, vol. 18, July/92, pp. 11-23 – 1992.
- [28] Lamberts, R. *Eficiência Energética na Arquitetura*, 3º edição. Rio de Janeiro, Brasil.
- [29] Maragno, G. V. *Adequação bioclimática da arquitetura de Mato Grosso do Sul*. *Ensaio e Ciências*, Campo Grande, v. 6, n. 003, p. 13-37. 2002.
- [30] ISO, *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 ISO 7730: 2005*. 2005, EN ISO: Geneve.
- [31] EN 15251: 2006, CEN, *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings-addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*, 2006.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [32] Neves, L. *Arquitetura Bioclimática e a Obra de Severiano Porto: Estratégias de Ventilação Natural*. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, SP. 2006.
- [33] *ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Copyright © 2003. From: www.abnt.org.br.
- [34] Junior, J. *O uso de estratégias bioclimáticas para benefício do conforto térmico e economia energética das edificações*. Santa Maria, Brasil. 2015.
- [35] EnergyPlus™. *Getting Started with EnergyPlus*. In EnergyPlus Documentation, 2009.
- [36] Designer Builder, from: <https://designbuilder.co.uk/>.
- [37] Pereira, P. S. *Reabilitação da Cantina da FEUP para Melhoria do Conforto Higrotérmico*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, 2015.
- [38] Weather Spark, from: <https://pt.weatherspark.com/>.