

**FERNANDO BENEDETTE
REBECA CHAN
TAOUFIK LIMAMI
SANDRA MONSALVE**

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO TÉRMICO DE
ELEMENTOS CONSTRUTIVOS PASSIVOS EM PROTÓTIPO DE
EDIFÍCIOS**

Projeto de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo, no âmbito do curso de
Engenharia Civil

São Paulo
2012

**FERNANDO BENEDETTE
REBECA CHAN
TAOUFIK LIMAMI
SANDRA MONSALVE**

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO TÉRMICO DE
ELEMENTOS CONSTRUTIVOS PASSIVOS EM PROTÓTIPO DE
EDIFÍCIOS**

Projeto de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo, no âmbito do curso de
Engenharia Civil

São Paulo
2012

**FERNANDO BENEDETTE
REBECA CHAN
TAOUFIK LIMAMI
SANDRA MONSALVE**

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO TÉRMICO DE
ELEMENTOS CONSTRUTIVOS PASSIVOS EM PROTÓTIPO DE
EDIFÍCIOS**

Projeto de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo, no âmbito do curso de
Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Racine Prado

São Paulo
2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Benedette, Fernando César Marins de
Simulação computacional de desempenho térmico de ele -
mentos construtivos passivos em protótipo de edifício / F.C.M.
de Benedette, R.P.T.H. Chan, S. Monsalve, T. Limami. -- São
Paulo, 2012.
95 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1. Conforto térmico das construções 2. Simulação computa-
cional I. Chan, Rebeca Pay Tcha Hernandez II. Monsalve, Sandra
III. Limami, Taoufik IV. Universidade de São Paulo. Escola Poli-
técnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil V. t.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Racine Prado pela orientação e pelo constante estímulo transmitido durante todo o trabalho.

À Vanessa Bessa pelo auxílio e consideração no fornecimento de informações que ajudaram no enriquecimento deste trabalho.

À Professora Doutora Brenda Leite pelo suporte no aprendizado e desenvolvimento das ferramentas necessárias para a utilização dos softwares e realização da modelagem.

E a todos que colaboraram direta ou indiretamente, na execução deste trabalho.

RESUMO

A necessidade de projetos sustentáveis e racionais é tema constante não só na engenharia civil, mas também em qualquer área da tecnologia. O uso eficaz dos materiais e fontes de energia se prova cada vez mais favorável à evolução não só técnica, mas também social.

É de conhecimento geral que o mundo está vivenciando uma crise energética com grande potencial de crescimento, que as fontes energéticas não são inesgotáveis e é necessária uma preocupação com as gerações futuras. Dentro deste cenário encontramos o setor residencial, que, no Brasil, segundo o balanço energético de 2011, consome cerca de 10% da energia total consumida.

Dessa forma, este trabalho analisará a metodologia construtiva passiva que visa a diminuição dos gastos com energia através de um desenho de projeto mais adequado e escolha de materiais específicos, respeitando as condições de conforto indicadas.

Avaliamos os benefícios deste método através do software de simulação energética EnergyPlus e, com base nos resultados obtidos, estudamos a aplicação deste método originalmente europeu para as condições climáticas, tecnológicas e sociais brasileiras.

Foi proposto o estudo de um edifício protótipo, baseado nas casas sobrepostas do loteamento de interesse social Rubens Lara, da Companhia de Desenvolvimento Habitacional Urbano, localizado na cidade de Cubatão. Observou-se as influências das modificações estruturais sobre o conforto térmico dentro do edifício. Além disso, evidenciamos a dificuldade de se encontrar uma solução que atenda às exigências de conforto térmico tanto para o inverno quanto para o verão.

ABSTRACT

The need for rational and sustainable projects is a frequent theme not only in civil engineering, but also in any area of technology. Effective use of materials and energy sources are more favorable to the evolution not only technical but also social.

It is common knowledge that energy sources are not inexhaustible, and requires a concern for future generations and that the world is experiencing an energy crisis with growth potential. And, within this scenario we can find the residential sector, which, in Brazil, according to the energy balance of 2011, consumes about 10% of the total energy consumed.

Thus, this paper will examine the passive construction that aims the reduction of energy costs through a more appropriate project design and selection of specific materials.

The benefits of this method have been availed by using the energy simulation software EnergyPlus and, based on the results of these simulations, we have studied the application of this method, originally European, for climatic, technological and social conditions in Brazil.

A building prototype was chosen based on three-floored houses from social neighborhood Rubens Lara (CDHU) in Cubatão, in the state of São Paulo. Influences on thermal comfort of the structural modifications in the building were assessed. Moreover, we have been able to highlight the difficulty of reaching a compromise between comfort expectations both in summer and winter.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Trocas entre um ambiente real e o corpo e entre um ambiente imaginário e o mesmo corpo, através da temperatura radiante média	23
Figura 2 - Relação entre PMV e PPD.....	25
Figura 3 - Trajetória do sol em São Paulo.....	26
Figura 4 - Corte esquemático de um edifício em São Paulo, aproximadamente 24° sul.....	26
Figura 5 - Comparaçao da razão entre a iluminação e o aquecimento gerado, por fontes de luz naturais e artificiais	28
Figura 6 - Brise em uma casa em Cuiabá.....	30
Figura 7 -Mapa climático do mundo de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger	33
Figura 8 - Translação da terra e localização dos tropicos	35
Figura 9 - Variação das temperaturas (bulbo seco) em São Paulo e em Paris, em relação às temperaturas de conforto	36
Figura 10 - As Ilhas de calor.....	37
Figura 11 - A temperatura aparente da superficie por distrito (azul : -5°C, vermelho : +5°C , em comparação com a media	38
Figura 12 - Carta bioclimática adaptada.....	44
Figura 13 - Zoneamento Bioclimático Brasileiro.....	45
Figura 14 - Imagem gerada por computador da Freedom Tower.....	49
Figura 15 - San Francisco Federal Building	49
Figura 16 - Localização do loteamento Rubens Lara	52
Figura 17 - Tipologias das edificações Rubens Lara.....	54
Figura 18 - Planta tipo da casa sobreposta do 2º, 1º pavimento e térreo, respectivamente.....	55
Figura 19 - Casas sobrepostas, fachadas de frente.....	55

Figura 20 - Planta do térreo da casa sobreposta	56
Figura 21 - Planta do primeiro pavimento da casa sobreposta	57
Figura 22 - Planta do segundo pavimento da casa sobreposta	58
Figura 23 - Seção sul do Zoneamento Bioclimático Brasileiro. Fonte: Sustainable Social Housing Initiative (2010).....	59
Figura 24 Desenho em corte de dois blocos de casa sobrepostas	64
Figura 25 - Vista interna do segundo pavimento.....	65
Figura 26 - Modelagem do térreo, 1º e 2º pavimento pelo Design Builder	66
Figura 27 - Modelo geométrico da casa sobreposta	67
Figura 28 - Visualização do desenho geométrico final	67
Figura 29 - Parâmetros gerais da modelagem no Model Option do Design Builder..	68
Figura 30 - Parâmetros utilizados para a modelagem da sala do segundo pavimento da sala sobreposta	69
Figura 31 - Parâmetros de modelagem com relação à ventilação do modelo.....	71
Figura 32 - Atribuição das características dos materiais no Design Builder	72
Figura 33 - Ganho de energia interna da sala da casa padrão para Design Week de inverno	74
Figura 34 – Ganho de energia interna da sala da casa padrão para Design Week de verão	75
Figura 35 - Temperatura interna da sala da casa padrão para Design Week de inverno	75
Figura 36 - Temperatura interna da sala da casa padrão para Design Week de verão	76
Figura 37 – Ganho de energia interna da sala da casa padrão com aumento da massa térmica para Design Week de inverno.....	77
Figura 38 – Ganho de energia interna da sala da casa padrão com aumento da massa térmica para Design Week de verão.....	78

Figura 39 - Temperatura interna da sala da casa padrão com aumento da massa térmica para Design Week de inverno	78
Figura 40 - Temperatura interna da sala da casa padrão com aumento da massa térmica para Design Week de verão	79
Figura 41 - Fenestraion aplicado na casa padrão - Vistas externa e interna	80
Figura 42 - Brises aplicados na casa padrão - Vistas externas e internas	80
Figura 43 - Ganho de energia interna da sala da casa padrão com brise para Design Week de inverno	81
Figura 44 - Ganho de energia interna da sala da casa padrão com brise para Design Week de verão	81
Figura 45 - Temperatura interna da sala da casa padrão com brise para Design Week inverno	82
Figura 46 - Temperatura interna da sala da casa padrão com brise para Design Week de verão	82
Figura 47 - Ganho de energia interna da sala da casa padrão com beiral para Design Week de inverno	83
Figura 48 - Ganho de energia interna da sala da casa padrão com beiral para Design Week de verão	83
Figura 49 - Temperatura interna da sala da casa padrão com beiral para Design Week de inverno	84
Figura 50 - Temperatura interna da sala da casa padrão com beiral para Design Week de verão	84
Figura 51 - Ganho de energia interna da sala da casa padrão com isolamento para Design Week de inverno	86
Figura 52 - Ganho de energia interna da sala da casa padrão com isolamento para Design Week de verão	86
Figura 53 - Temperatura interna da sala da casa padrão com isolamento para Design Week de inverno	87

Figura 54 - Temperatura interna da sala da casa padrão com isolamento para Design Week de verão	87
Figura 55 - Ganho de energia interna da sala da casa padrão com isolamento e beiral para Design Week de inverno	88
Figura 56 - Ganho de energia interna da sala da casa padrão com isolamento e beiral para Design Week de verão	89
Figura 57 - Temperatura interna da sala da casa padrão com isolamento e beiral para Design Week de inverno	89
Figura 58 - Temperatura interna da sala da casa padrão com isolamento e beiral para Design Week de verão	90
Figura 59 - Variação da porcentagem de temperaturas dentro da zona de conforto	94
Figura 60 - Média da variação das temperaturas	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Taxa metabólica para diferentes atividades segundo ISO 7730 (1994).....	21
Tabela 2 - - Índice de resistência térmica para vestimentas segundo ISO 7730 (1994)	22
Tabela 3 - Escala térmica de Fanger.	24
Tabela 4 - Critérios para classificação bioclimática.....	45
Tabela 5 - Aberturas para a ventilação	46
Tabela 6 - Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de vedação externa.	46
Tabela 7 - Distâncias até Cubatão.	59
Tabela 8 - Mapeamento das cidades da zona bioclimática 5.....	60
Tabela 9 - Características das superfícies da casa padrão.....	72
Tabela 10 - Propriedades dos materiais componentes das superfícies da casa padrão	72
Tabela 11 - Tabela de espessuras e transmitância térmica para os sistemas de vedação com isolamento.....	85
Tabela 12 - Variação da porcentagem da temperatura dentro da zona de conforto para a situação de isolamento e beiral.....	90
Tabela 13 - Porcentagem e horas dentro da zona de conforto para a situação da casa padrão e para a solução combinada.....	91
Tabela 14 - Resultados obtidos para análise da variação de custo entre diferentes soluções	92

LISTA DE SIMBOLOS

e – Espessura [m]

λ – Condutividade térmica [W/m-K]

ρ – Densidade [kg/m³]

C_T – Capacidade térmica

c – Calor específico [J/kg-K]

α – Absortância à radiação solar [%]

R – Resistência térmica [m².K/W]

U – Transmitância térmica ou Coeficiente global de transferência de calor [W/(m².K)]

FS_0 – Fator de ganho de calor solar de elementos opacos ou Fator solar de elementos opacos [%]

FSt – Fator solar de elementos transparentes ou translúcidos [%]

Rse – Resistência térmica superficial externa [(m².K)/W]

τ – Transmitância à radiação solar

SUMÁRIO

1 Introdução	16
1.1 Introdução e contextualização da pesquisa.....	16
1.2 Justificativa da escolha do tema – Análise do mercado.....	17
1.2.1 Maior Investimento inicial.....	18
1.2.2 Uma demanda importante.....	18
1.2.3 Possível tecnicamente, viável economicamente	19
1.3 Objetivos	19
2 Revisão bibliográfica.....	20
2.1. Conforto Térmico	20
2.1.1. Índices do conforto – O voto médio predito	24
2.2 Influência da Arquitetura	25
2.2.1 Orientação Solar	25
2.2.2 A forma.....	27
2.2.3 Aberturas.....	27
2.2.4 Sombras.....	28
2.2.5 Brises.....	29
2.3. Norma Passivhaus.....	30
2.4. O caso do clima brasileiro.....	32
2.4.1. Radiação solar e correlação com a inclinação da Terra.....	34
2.4.2 O clima tropical de São Paulo	35
2.4.3. Estratégia Térmica única	36
2.4.4. A influência de fatores secundários sobre a temperatura: poluição e concentração de edifícios	37
2.5 A Norma NBR 15220.....	38
2.5.1 Propriedades termofísicas dos materiais	39
2.5.2 Zoneamento Bioclimático Brasileiro.....	43
3 Metodologia.....	47

<u>3.1. EnegyPlus.....</u>	<u>47</u>
3.1.1. Necessidade de simular	50
3.1.2. Interface do EnergyPlus	50
<u>3.2. Loteamento Rubens Lara</u>	<u>51</u>
3.2.1. Descrição do loteamento.....	53
3.2.2. Casa sobreposta	54
<u>3.3. Bioclima de Cubatão</u>	<u>59</u>
<u>3.4. Levantamento das alternativas de simulação</u>	<u>61</u>
4. Simulações.....	63
<u>4.1. Modelagem.....</u>	<u>64</u>
4.1.1. Modelagem Geométrica	64
4.1.2. Parâmetros da modelagem:	68
<u>4.2. Simulação da Casa Padrão.....</u>	<u>73</u>
4.2.1 Resultados	74
<u>4.3. Simulação com mudança da massa térmica.....</u>	<u>76</u>
4.3.1. Resultados	77
<u>4.4. Simulação com brises e beiral</u>	<u>79</u>
4.4.1 Resultados para os brises.....	80
4.4.2 Resultados para o beiral.....	83
4.4.3 Análise dos resultados.....	85
<u>4.5. Simulação com isolamento.....</u>	<u>85</u>
4.5.1 Resultados	86
<u>4.6. Simulação para a combinação de isolamento e beiral</u>	<u>88</u>
4.6.1 Resultados	88
<u>4.7. Análise econômica.....</u>	<u>91</u>
4.7.1 Análise dos resultados obtidos	93
<u>4.8. Conclusão do estudo.....</u>	<u>94</u>
Bibliografia	96

1 Introdução

1.1 Introdução e contextualização da pesquisa

A World Commission on Environment and Development definiu em 1987 o conceito de sustentabilidade como a capacidade de suprir as necessidades da geração presente sem comprometer a habilidade das futuras gerações em suprir suas próprias necessidades. Para alcançar esse objetivo, necessita-se o envolvimento de todos os atores da sociedade: governos, empresas e cidadãos.

Um projeto sustentável deve considerar juntamente as questões Ambientais, Energéticas e Sociais.

A preservação do meio ambiente já foi muito debatida e foi demonstrado quanto essa responsabilidade é importante, e como as iniciativas ambientais podem trazer benefícios econômicos. Assim, o conceito de "eco-eficiência" (introduzido primeiro pelo Concil for Sustainable Development em 1992) destaca a ligação entre melhorias ambientais e benefícios econômicos, enfatizando o aspecto econômico da sustentabilidade.

O uso dos recursos energéticos também deve ser levado em consideração. O consumo de energia é necessário para desenvolver a economia e permitir aos homens ter um modo de vida moderno. A urbanização e o aumento da população global estão acentuando as necessidades de energia. Porém, estes recursos não são ilimitados e se tornam cada vez mais escassos, enquanto a poluição devida ao uso de combustíveis fósseis para geração de energia aumenta.

Por fim, um projeto sustentável não pode esquecer a dimensão social, pois é para o homem e a sociedade que se procura preservar o meio ambiente e economizar a energia. Assim, impactos sobre a saúde, a segurança das pessoas e a justiça social têm que ser considerados.

Desde 1988, o IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) pesquisa sobre as evoluções no clima e a responsabilidade das atividades humanas nessas mudanças. Seu quarto relatório Climate Change 2007 mostra que ações políticas no sentido de controlar as atuais crises ambientais e energéticas são necessárias para limitar o aumento da poluição.

Na Europa, o real-estate é o primeiro setor consumidor de energia, com 35%¹ do consumo total de energia primaria (o setor dos transportes e da industria dividem o restante). Mais de 20%² das emissões de CO2 são causadas por esse mesmo setor. Assim, as economias de energia são questões econômicas e ecológicas principais na construção civil.

Já nos anos 1970, enquanto acontecia a crise do combustível fóssil e começava a preocupação sobre poluição ambiental, nasceu o conceito de "construção verde", ou construção sustentável: criar estruturas e modos de utilizações ambientalmente responsáveis e eficientes do ponto de vista do uso dos recursos (materiais, energia, água...). Esse conceito se desenvolveu e adquiriu mais tecnologias e conhecimento. Os objetivos devem ser mantidos no ciclo de vida inteiro do prédio: do planejamento à construção, operação, manutenção, renovação e demolição.

Entre os diferentes padrões de construções sustentáveis existem as construções ditas "passivas", regidas pela norma Passivhaus. Os edifícios passivos requerem pouca energia para aquecer e esfriar os ambientes. Essa norma pode ser aplicada para prédios residenciais, como para edifícios de escritórios, supermercados, etc. Mais informações sobre essa norma serão dadas no item 2.3. Norma Passivhaus.

1.2 Justificativa da escolha do tema – Análise do mercado

¹ Fonte: ADEME. **L'efficacité énergétique européenne: panorama des politiques et bonnes pratiques.** 2007

² Fonte: ADEME. <http://www2.ademe.fr>

1.2.1 Maior Investimento inicial

As empresas e os consumidores estão preocupados com a conservação do meio ambiente e com a necessidade de reduzir nosso consumo de energia. Mas o investimento inicial necessário para a construção de uma casa sustentável ainda é muito elevado restringindo-as apenas a casas de alto padrão. No entanto as economias de escala que seriam realizadas no longo prazo no caso de uma zona residencial social importante podem justificar o dispêndio maior para uma construção sustentável.

Para os consumidores haverá considerável redução nas despesas com energia refletindo positivamente para os órgãos administrativos públicos, uma vez que investir em uma produção de energia maior sairia mais caro.

1.2.2 Uma demanda importante

Apenas 1%³ do que é construído no país tem selo de sustentabilidade. Nos EUA e Europa, esse número sobe para 15%. O mercado brasileiro para casas verdes é potencialmente grande.

Esse mercado precisa de normas como as do “Passivhaus”, pois estas permitem racionalizar o processo de projeto das construções, e facilita o trabalho dos projetistas com ferramentas facilmente aplicadas. A criação de uma “norma” brasileira ajudaria muito o desenvolvimento do mercado nacional.

³ João Ricardo Gonçalves, O Dia, 07.04.2012

1.2.3 Possível tecnicamente, viável economicamente

Felipe Faria, executivo da Green Building Council (GBC) Brasil, quando indagado sobre as oportunidades no setor das casas verdes afirmou (fonte):

"São produtos que não existiam há cinco ou seis anos, como tintas e vernizes com baixos compostos orgânicos voláteis, ligas de alumínio com 80% de reciclagem, enfim, produtos que hoje são padrão. Hoje não falta tecnologia, o importante é ter bons projetos".

Deve ser adicionado que os projetos verdes têm o apoio dos governos, os incentivos fiscais e as leis municipais ajudam as iniciativas de casas sustentáveis.

1.3 Objetivos

Este trabalho de formatura tem como objetivo avaliar, com o auxílio do software de simulação EnergyPlus, os benefícios da construção passiva para a manutenção do conforto térmico em loteamento do CDHU existente.

Auxiliar na escolha dos detalhes arquitetônicos e dos diferentes materiais da construção civil a fim de que se atinja uma eficiência energética atendendo os padrões de conforto e desempenho das normas brasileiras NBR 15220 e NBR 15575.

2 Revisão bibliográfica

2.1. Conforto Térmico

Segundo a ASHRAE o conforto térmico pode ser definido como a condição psicológica de um indivíduo que expressa satisfação com relação às condições térmicas do ambiente em que este se encontra.

As variáveis do conforto térmico podem ser divididas em variáveis humanas e variáveis ambientais. As variáveis humanas são: metabolismo gerado pela atividade física e resistência térmica oferecida pela vestimenta

E os ambientais são: temperatura radiante média, temperatura do ar, velocidade do ar, umidade relativa do ar

Metabolismo

O metabolismo é o processo de geração de energia para o organismo. De toda energia produzida pelo corpo humano apenas 20% é transformada em potencialidade de trabalho, o restante é transformado em calor que deve ser dissipado para manter a temperatura interna em equilíbrio.

A temperatura interna do organismo interno deve ser mantida praticamente constante em 37°C. Quando o ambiente apresenta condições inadequadas o organismo necessita utilizar seu sistema termorregulador, aumentando ou diminuindo suas perdas.

A sensação de conforto térmico ocorre quando o organismo consegue dissipar para o ambiente a energia produzida pelo metabolismo sem utilizar seu mecanismo de termorregulação.

A taxa metabólica, que caracteriza a velocidade com qual o metabolismo se processa, depende da atividade física que está sendo realizada.

Quanto mais intensa uma atividade física, maior será o calor gerado pelo corpo humano. Portanto, para se analisar o conforto térmico de um ambiente, é necessário conhecer as atividades que serão realizadas no interior do mesmo.

A tabela 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta o calor dissipado por uma pessoa em função de sua atividade física.

Tabela 1-Taxa metabólica para diferentes atividades segundo ISO 7730 (1994).

Atividade	Metabolismo (W/m ²)
Reclinado	46
Sentado, relaxado	58
Atividade secundária (escritório, escola, etc.)	70
Fazer compras, atividades laboratoriais	93
Trabalhos domésticos	116
Caminhar em local plano a 2 km/h	110
Caminhar em local plano a 3 km/h	140
Caminhar em local plano a 4 km/h	165
Caminhar em local plano a 5 km/h	200

Vestimenta

A vestimenta pode ser considerada como uma camada isolante entre o corpo e meio ambiente, pois representa uma barreira para as trocas de calor.

Sua resistência térmica depende de diversos fatores, como por exemplo, o tipo de tecido, a parte do corpo que cobre e o ajuste ao corpo. Sua unidade é o clo, que vem da palavra roupa na língua inglesa (clothes). Em termos técnicos sua unidade é °C W/m², sendo que 1 clo equivale a 0,15°C W/m². A escala é projetada de forma que uma pessoa vestindo um terno tenha o valor de 1,0 clo e uma pessoa despida o valor de 0,0 clo.

A tabela 2 apresenta alguns valores para a resistência térmica das vestimentas.

Tabela 2 - Índice de resistência térmica para vestimentas segundo ISO 7730 (1994)

Vestimenta	Índice de resistência térmica (clo)
Meia calça	0,10
Meia fina	0,03
Meia grossa	0,05
Calcinha e sutiã	0,03
Cueca	0,03
Camiseta	0,09
Camiseta de mangas compridas	0,12
Camisa de manga curta	0,15
Camisa de manga comprida	0,20
Saia grossa	0,25
Vestido leve	0,15
Jaqueta	0,35
Calça fina	0,20
Calça média	0,25
Calça flanelada	0,28
Sapatos	0,04

Temperatura radiante média

A temperatura radiante média representa a temperatura uniforme de um ambiente imaginário no qual a troca de calor por radiação é igual ao ambiente real não uniforme. A Figura 1 a seguir ilustra o princípio de temperatura radiante média.

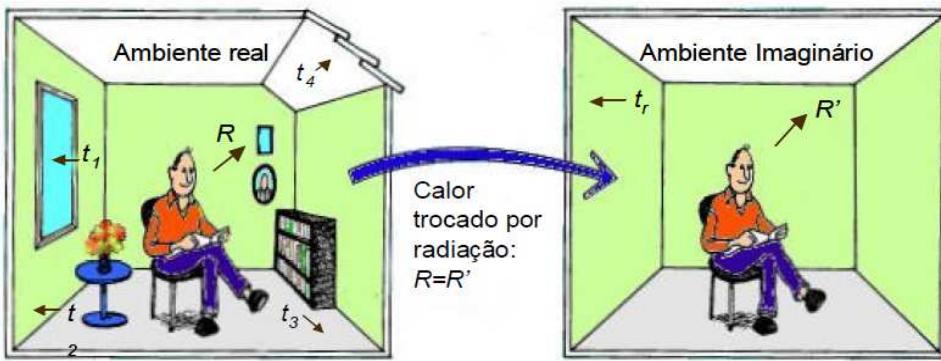


Figura 1 - Trocas entre um ambiente real e o corpo e entre um ambiente imaginário e o mesmo corpo, através da temperatura radiante média. Fonte: www.innova.dk

Temperatura do ar

A temperatura do ar é principal variável do conforto térmico. A sensação baseia-se na transferência de calor do corpo para o meio ambiente, o que depende da diferença de temperatura entre a pele e o ar.

Velocidade do ar

O ar se desloca pelo ambiente pela diferença de temperatura pela chamada convecção natural. O ar quente, menos denso, sobe e o ar frio desce.

A convecção forçada ocorre caso exista algum meio mecânico forçando o ar a se deslocar, como um ventilador. Neste caso o coeficiente de convecção aumenta, aumentando a sensação de perda de calor.

O deslocamento do ar também aumenta os efeitos da evaporação no corpo humano, retirando a água em contato com a pele com mais eficiência e assim, reduzindo a sensação de calor.

Umidade relativa do ar

A umidade relativa é caracterizada pela quantidade de vapor d'água existente no ar. O ar, a uma determinada temperatura, só pode conter certa quantidade de vapor d'água, que corresponde à saturação do ar.

O ser humano realiza troca enérgica por convecção, radiação e evaporação. Quanto maior a umidade relativa do ar, mais difícil é a evaporação. Sob um ar seco, a perda de calor pelo corpo ocorre mesmo em altas temperaturas.

Para esse trabalho de formatura, vamos nos concentrar no estudo da temperatura de bulbo seco, que representa a temperatura do ar.

2.1.1. Índices do conforto – O voto médio predito

Visando avaliar o efeito conjunto das variáveis de conforto térmico, foram sugeridos índices de conforto térmico por alguns pesquisadores. De forma geral, estes índices fixam as variáveis humanas e relacionam as variáveis do ambiente, reunindo sob a forma de cartas as condições ambientais que proporcionam aos indivíduos sensações semelhantes.

Para este trabalho serão apresentados os conceitos de voto médio predito.

Este método foi desenvolvido por Fanger (FANGER, 1972) e é considerado o mais completo, sendo inclusive utilizado na ISO 7730.

O método prevê o voto de um grande número de pessoas utilizando a escala apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Escala térmica de Fanger.

Escala	Sensação
+3	muito quente
+2	quente
+1	levemente quente
0	neutro
-1	levemente frio
-2	frio
-3	muito frio

Faz-se uma relação entre o voto médio predito (PMV – Predicted Mean Vote) e a porcentagem de pessoas insatisfeitas (PPD – Predicted Percentage of Dissatisfied).

Este índice deve ser utilizado apenas para valores entre -2 e 2, pois fora desse intervalo teríamos aproximadamente 80% das pessoas insatisfeitas, como mostra a Figura 2.

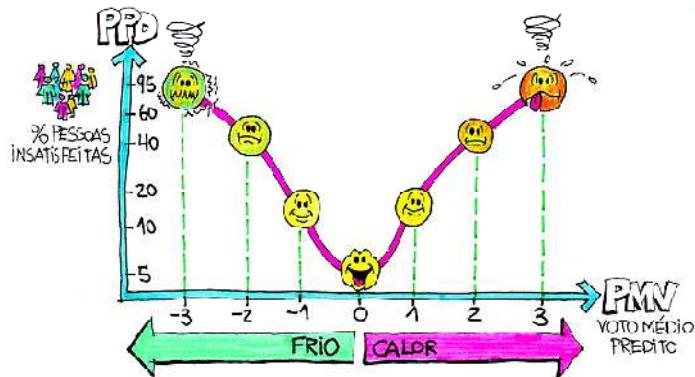


Figura 2 - Relação entre PMV e PPD.

É praticamente impossível especificar um ambiente que satisfaça a todos, sempre haverá uma porcentagem de insatisfeitos. Segundo a ISO 7730, um ambiente é considerado termicamente aceitável quando $PPD < 10\%$, ou seja, $-0,5 < PMV < 0,5$.

2.2 Influência da Arquitetura

Nesse item serão apresentados os parâmetros arquitetônicos que têm um impacto sobre o conforto térmico, assim como os meios de aproveitar dessa relação arquitetura-conforto térmico no contexto das construções passivas.

2.2.1 Orientação Solar

A orientação da casa é um dos primeiros aspectos que deve ser considerado. É evidente que uma casa não possuirá todas as fachadas orientadas em apenas uma direção, mas deve-se estudar seu posicionamento de forma que as aberturas e as superfícies envidraçadas estejam adequadas com a sua localização.

Conforme Figura 3, no hemisfério sul (e quanto mais ao sul, mais acentuadas serão as diferenças) a fachada voltada ao norte recebe geralmente mais incidência solar.

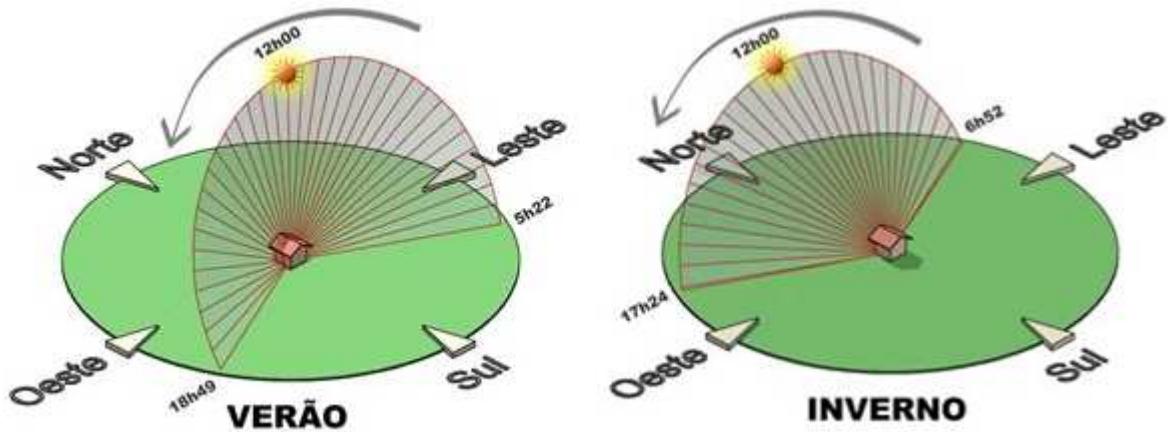


Figura 3 - Trajetória do sol em São Paulo (Fonte: DTabach <http://dtabach.com.br>)

Orientação norte permite maior penetração solar no inverno, quando se deseja aquecer o ambiente e recebe menos insolação no verão quando os raios solares não são mais desejados. Por essa razão, devem-se privilegiar grandes aberturas nessa orientação e procurar instalar próximo a essa fachada as funções principais, mais habitadas. A Figura 4 ilustra este fenômeno.

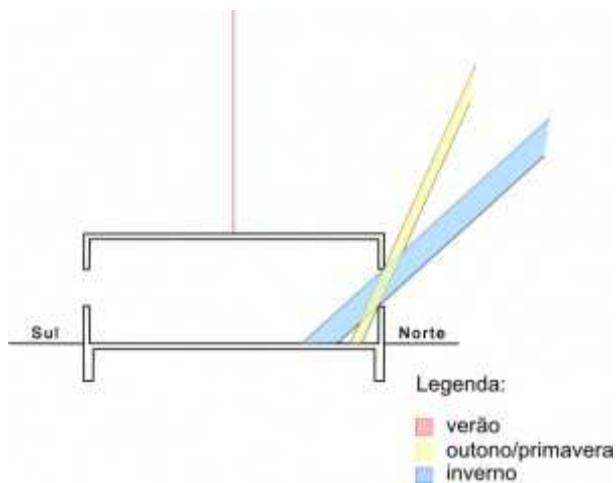


Figura 4 - Corte esquemático de um edifício em São Paulo, aproximadamente 24° sul (Fonte:Blog de arquitetura Folhaazero. <http://folhaazero.wordpress.com>)

2.2.2 A forma

A forma arquitetônica é outra característica que apresenta influencia sobre a eficiência energética. A forma interfere no fluxo de vento e também na exposição das superfícies à radiação.

Um mesmo volume pode possuir diferentes formas, alterando a quantidade de incidência da radiação solar, a quantidade de superfície em contato com o ar, realizando trocas de calor.

Outra maneira em que a forma pode influenciar no conforto térmico, é pelos diferentes desenhos de telhado. O telhado no estio de um chalé, permite maior incidência dos raios solares, evitando o acúmulo de neve, sendo portanto mais aconselhado para determinado clima.

2.2.3 Aberturas

A quantidade de radiação solar transmitida ao meio interno tem grande influencia nas condições de conforto térmico. Uma superfície opaca também realiza trocas com o meio externo, porém por uma superfície translúcida, devido a essa capacidade que a caracteriza, ocorrem as principais trocas térmicas de uma edificação.

Deve-se, portanto ser feito um estudo, no momento do projeto, para se decidir a orientação das aberturas, suas dimensões, seu material (tipo de vidro, por exemplo) e o uso de proteções solares.

Esse estudo deve, com certeza, considerar que as aberturas provêem luz natural, e portanto, um compromisso entre iluminação natural e aquecimento deve ser alcançado. Dependendo da atmosfera desejada em cada espaço da casa, deve-se

adaptar o tamanho e a posição das janelas e o uso de sombreamento para melhor aproveitar a luz natural sem ter aquecimento excessivo.

A Figura 5 apresenta uma análise dos dados do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, em Florianópolis, comparando a eficácia da luz natural direta com alternativas de luz artificiais.

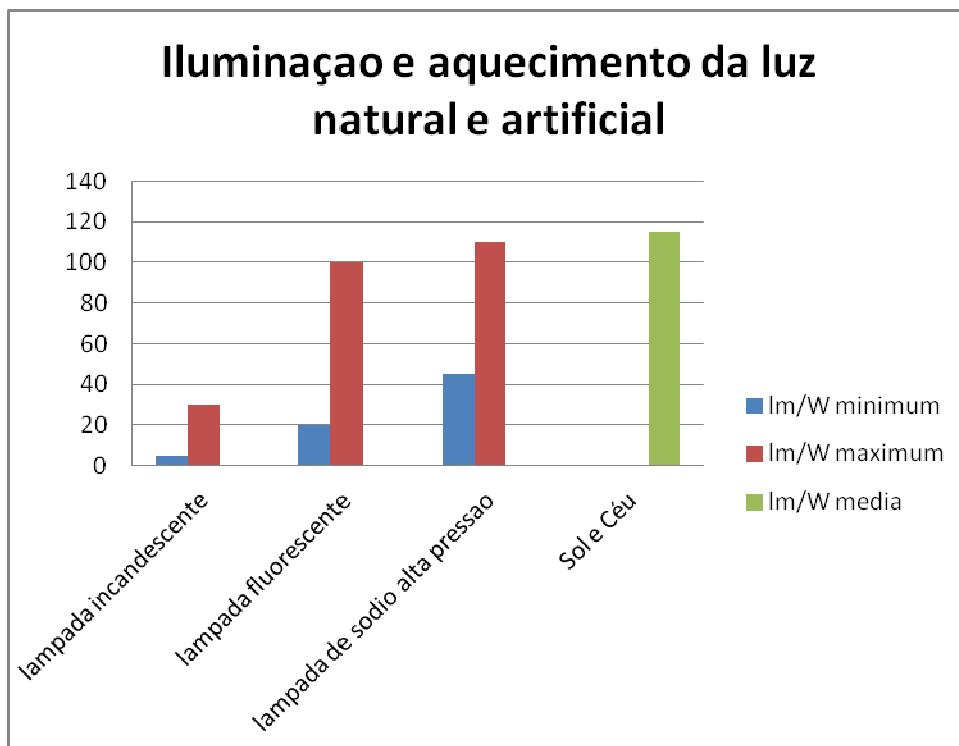


Figura 5 - Comparação da razão entre a iluminação e o aquecimento gerado, por fontes de luz naturais e artificiais

Pode-se concluir que a luz natural gera mais lumens por Watt gerado, o que significa que a luz natural é preferível á qualquer tipo de lâmpada.

2.2.4 Sombras

Ao contrário do inverno, quando a incidência solar é desejada, no verão torna-se desejável a existência de sombras.

Por isso a presença de vegetação com folhas caducas são muito indicadas, pois criarião sombras durante a estação em que elas são desejadas e com o cairimento das folhas não evita a insolação no inverno.

2.2.5 Brises

Outra forma de se obter sombras é com a utilização dos brises.

Os brises, de origem francesa (a tradução da expressão francesa brise-soleis é quebra-sol), são dispositivos arquitetônicos cuja função é impedir a incidência direta do sol no interior de um edifício, evitando o calor excessivo.

Os brises ficam localizados na fachada externa do edifício e são feitos de materiais geralmente de baixa massa térmica, impedem a incidência dos raios antes da entrada dos mesmos no edifício evitando seu aquecimento, como pode ocorrer com persianas. Podem ser dispostos horizontalmente ou verticalmente, e para o seu posicionamento é necessária a realização de cálculos com cartas solares.

A Figura 6 a seguir mostra um exemplo de brises utilizados no Brasil.

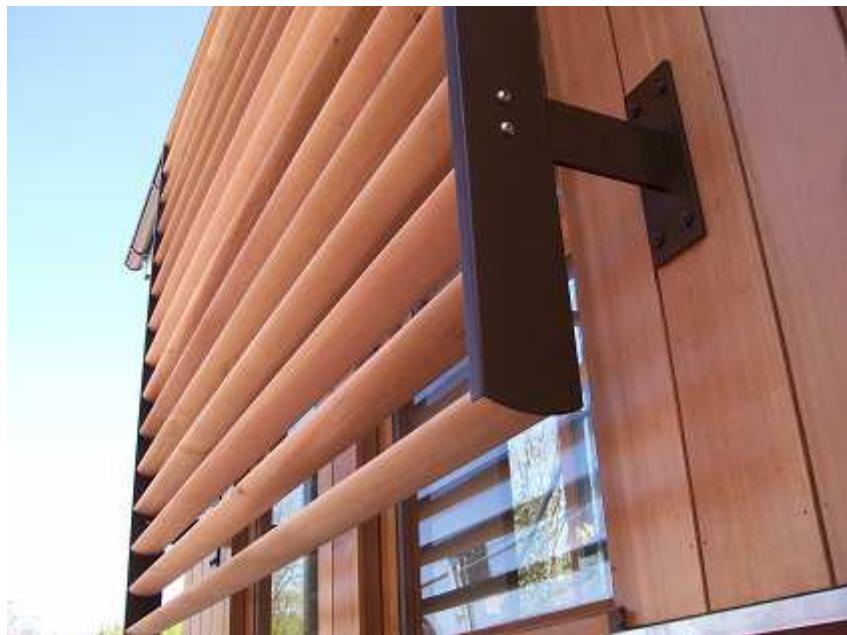


Figura 6 - Brise em uma casa em Cuiabá. (Fonte: <http://casa.abril.com.br/>)

2.3. Norma Passivhaus

Em 1991 os professores Bo Adamson da universidade sueca Lund e Wolfgang Feist do Institut für Wohnen und Umwelt (Instituto para Casas e Meio Ambiente), na Alemanha, aplicaram o método do desenho passivo a uma casa em Darmstadt (Alemanha), com o objetivo de proporcionar um caso de estudo de uma casa de baixo consumo.

O projeto se mostrou muito satisfatório em termos de consumo energético e condições de conforto que foi realizada uma segunda construção em 1995 em Groß-Umstadt.

Baseado na experiência obtida em seus estudos, Feist classificou os conceitos passivos adotados nas casas de Darmstadt e Groß-Umstadt na norma Passivhaus. A norma consiste fundamentalmente de três requisitos:

- Admitir um limite de energia para o aquecimento e/ou arrefecimento.
- Critérios de qualidade, a exemplo do conforto térmico, devem ser respeitados.

- Sistemas passivos que cumpram o limite energético e critérios de qualidade.

As casas passivhaus geralmente apresentam elevados níveis de isolamento, pontes térmicas reduzidas, janelas bem isoladas, espaços para infiltração de ar reduzidos e sistema de ventilação.

A atual norma apresenta cinco critérios:

- Critério de aquecimento: as necessidades úteis de aquecimento não podem exceder o limite de 15 kWh/m² por ano de área útil.
- Critério de energia primária: consumo de energia primária de todos os serviços energéticos, incluindo o aquecimento de ambientes e águas quentes e os equipamentos elétricos não deverá exceder o limite de 120 kWh/m² por ano de área útil.
- Estanqueidade do ar: A envolvente do edifício deve ter um teste de pressurização de acordo com a norma EN 13829, não superior a 0.6 rph⁻¹
- Critério de conforto da temperatura interior no inverno: A temperatura operativa do espaço pode ser mantida acima de 20 °C no inverno, utilizando a referenciada quantidade de energia.
- Todos os cálculos dos consumos energéticos são calculados com o software Pacote de Planejamento de Casa Passiva (PHPP) e são relativos à área útil, ex. a soma de todas as áreas úteis de todos os compartimentos habitáveis.

As estratégias passivas baseiam-se na utilização dos recursos naturais da região em que o edifício se encontra, como, por exemplo, sol, orientação da fachada e ventilação natural.

Uma breve análise crítica nos permite afirmar que tais critérios e normas não podem ser completamente aplicados para todos e quaisquer edifícios. Como a norma passiva faz uso direto das condições ambientais do local em que está inserido o edifício, é natural de se afirmar que estes critérios devem ser revistos e adaptados para os diferentes climas.

O consórcio Passive-On elaborou uma proposta de revisão para a aplicação da norma Passivhaus para climas quentes da Europa. Para o consórcio os cinco critérios devem ser adaptados, adicionando:

- Critério de arrefecimento: As necessidades de calor sensível úteis, para o arrefecimento não devem exceder o limite de 15 kWh/m² por ano de área útil.

- Critério de conforto da temperatura dos espaços durante a estação de verão: a temperatura operativa dos espaços deve ser mantida abaixo dos 26°C, sem exceder o limite de 15 kWh/m² por ano de área útil.

Um projeto passivo procura incentivar a fase de concepção do projeto com a intenção de maximizar os benefícios térmicos e ambientais considerando o desempenho dos componentes e sistemas existentes dentro do edifício com a finalidade de se minimizar as perdas de calor durante as estações frias e os ganhos nas estações mais quentes.

Podemos, portanto, perceber que a abordagem passiva tem um caráter estratégico.

Atualmente existem aproximadamente 25.000 casas passivas na Europa (a grande maioria se localizam na Alemanha e na Escandinávia) e algumas nos Estados Unidos (EUA).

Para atingir as exigências rigorosas na norma Passivhaus, precisa-se de mudanças importantes no jeito de pensar e construir edifícios. As tecnologias implementadas até agora abrangem a superisolação térmica, janelas de alta tecnologia, remoção das pontes térmicas, vedação do ar, ventilação, captação da energia solar e do calor do sol, limitação do consumo de energia dos aparelhos elétricos.

2.4. O caso do clima brasileiro

País continental, o Brasil apresenta uma grande diversidade de climas. Essa diversidade resulta de fatores tais como a extensão territorial, a fisionomia geográfica, o relevo e o movimento das massas de ar.

A Figura 7 mostra um mapa do mundo com os diferentes climas regionais.

World map of Köppen-Geiger climate classification

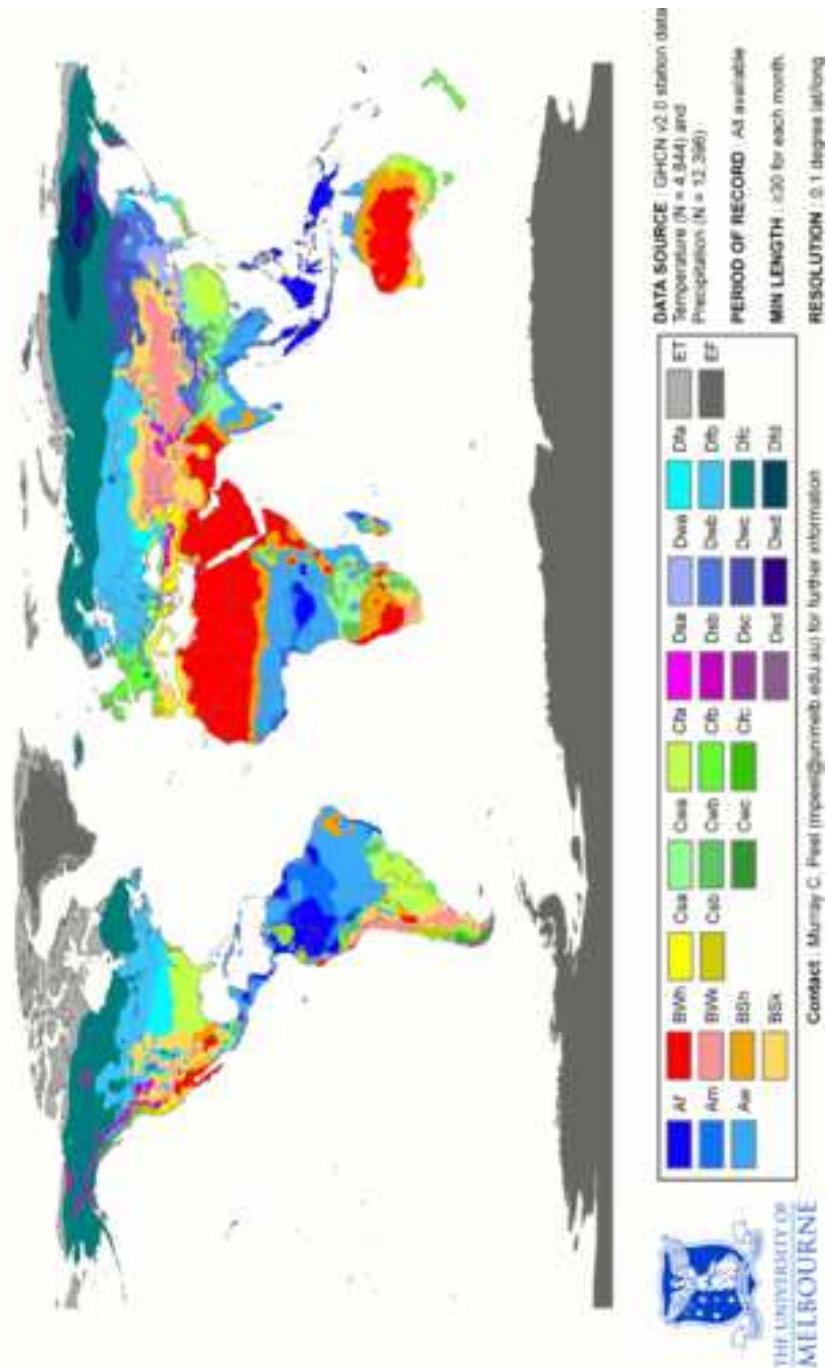


Figura 7 -Mapa climático do mundo de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger
(fonte: <http://people.eng.unimelb.edu.au/mpeel/koppen.html>)

Pode-se observar, alem das especificidades regionais, as grandes variações que existem entre Europa, onde foi criada a norma Passivhaus, e o Brasil. Essas diferenças, juntas à necessidade de adaptar as recomendações da norma de construção passiva ao clima local, mostram o quanto não se pode apenas utilizar a norma alemã para aplica-la no Brasil. Tem que voltar aos princípios da construção passiva e desenhar uma norma específica a cada clima.

Para melhor apreciação das divergências, comparamos os casos de Paris e São Paulo.

2.4.1. Radiação solar e correlação com a inclinação da Terra

Existem três maneiras diferentes de se transferir energia térmica:

sem mudança de partículas: Condução

com mudança de partículas: Convecção

com ondas eletromagnéticas: Radiação

A energia térmica do sol chega à Terra na forma de radiações. Sua intensidade depende da altitude solar (variação com o horário) e do ângulo de incidência dos raios solares em relação à superfície receptora (variação com o período do ano). A cidade de São Paulo se encontra próxima do Trópico do Capricórnio, zona mais próxima do sol na posição c (Figura 8), isso explica, por exemplo, porque os meses de verão são tão quentes.

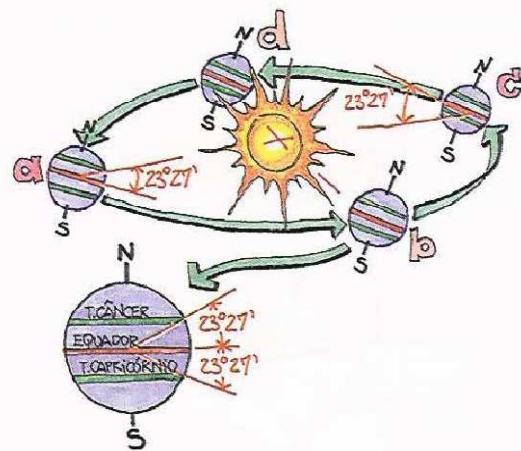


Figura 8 - Translação da terra e localização dos tropicos (Fonte : Roberto Lamberts, Luciano Dutra, Fernando O. R. Pereira, EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA ARQUITETURA, 1997, 192p)

2.4.2 O clima tropical de São Paulo

No Brasil, o clima é bem diferente dos climas oceânico, continental o mediterrâneo que podem ser encontrados na Europa. A região de São Paulo é caracterizada por um clima subtropical, ou seja com temperaturas moderadamente altas em verões, e uma diminuição de chuvas no inverno.

A Figura 9 a seguir mostra a evolução das temperaturas mínimas, máximas em São Paulo (médias mensais) ao longo do ano, assim como as temperaturas limites de conforto. A título de exemplo, estão sobrepostas as mesmas informações para Paris.

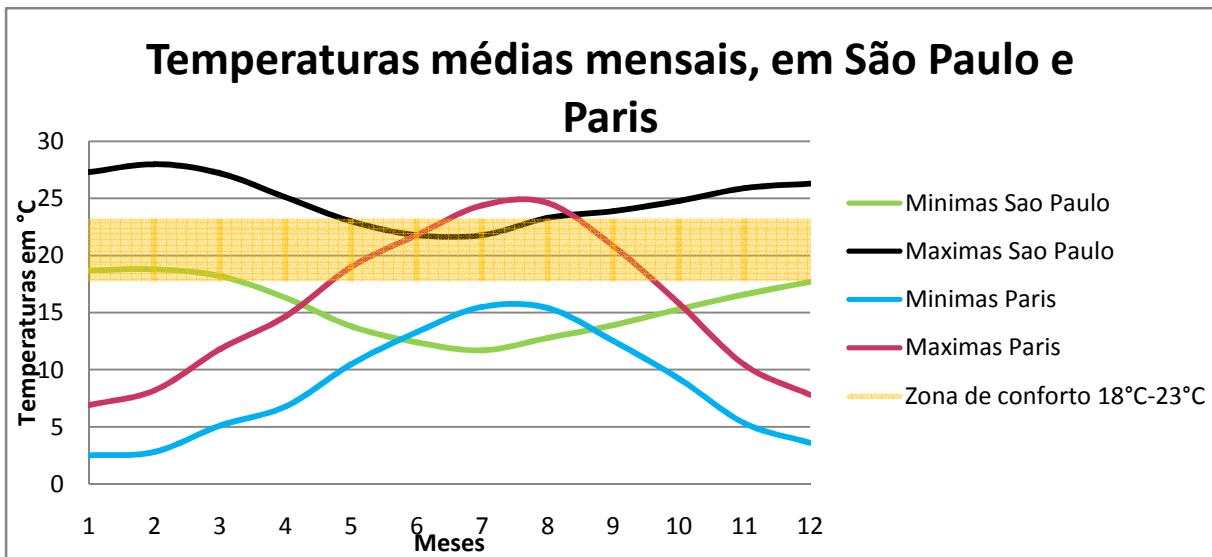


Figura 9 - Variação das temperaturas (bulbo seco) em São Paulo e em Paris, em relação às temperaturas de conforto (Fonte: World Meteorological Organization, <http://worldweather.wmo.int>⁴)

2.4.3. Estratégia Térmica única

As diferenças de temperatura entre Paris e São Paulo são de 8°C em média (considerando-se as mesmas estações), e a amplitude das temperaturas entre verão e inverno são bem menores no clima tropical de São Paulo. Dessa forma, enquanto na Europa se precisa de múltiplas estratégias térmicas ativas, em São Paulo uma única estratégia térmica parece ser suficiente para o ano inteiro.

⁴ A World Meteorological Organization utiliza os dados do Instituto Nacional de Meteorologia entre 1961 e 1990 para calcular as médias mensais em São Paulo, e os dados de Meteo France entre 1971 e 2000 no caso de Paris.

2.4.4. A influência de fatores secundários sobre a temperatura: poluição e concentração de edifícios

O efeito da poluição e da altíssima concentração de edifícios aumenta sensivelmente as temperaturas. A diferença entre as zonas suburbanas e o centro da cidade pode atingir 10°C. Por isso é importante consultar os dados de uma estação meteorológica próxima ao local da construção antes de escolher uma estratégia.

As Figura 10 e Figura 11 ilustram esse fenômeno, também chamado de ilhas de calor.

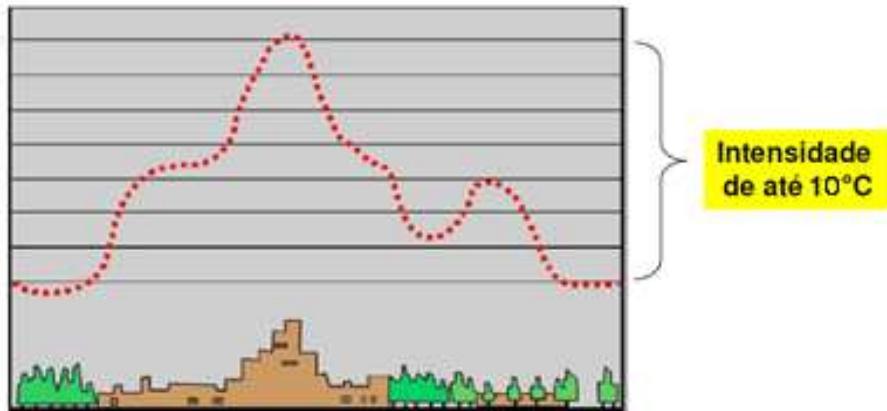


Figura 10 - As Ilhas de calor (Adaptado de : Santamouris M. et al, Energy and climate in the urban built environment, 2001)

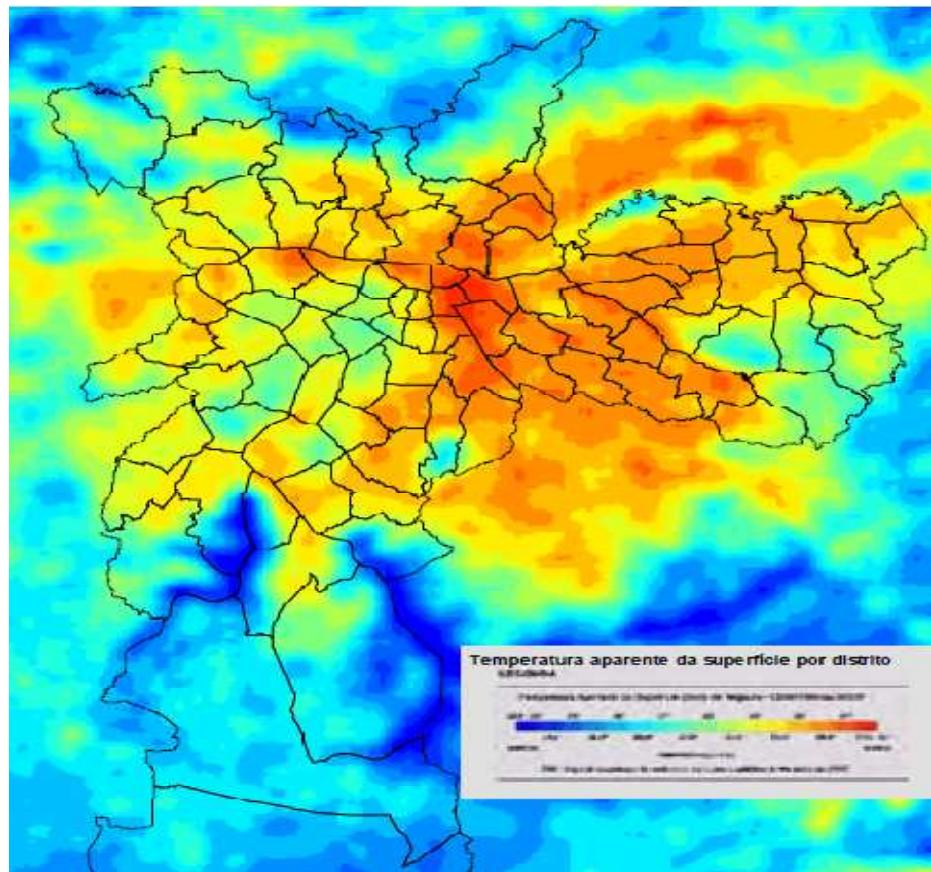


Figura 11 - A temperatura aparente da superfície por distrito (azul : -5°C, vermelho : +5°C , em comparação com a media) (Fonte : PMSP, CEM. Indicadores ambientais e gestão urbana. São Paulo, 2008.)

2.5 A Norma NBR 15220

A norma brasileira NBR 15220 de setembro de 2003 trata sobre o desempenho térmico de edificações está subdividida em 5 partes, sendo:

1. Definições, símbolos e unidades;
2. Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar elementos e componentes de edificações;
3. Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social;

4. Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida;
5. Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico.

2.5.1 Propriedades termofísicas dos materiais

Para avaliar o comportamento térmico-físico da construção, é necessário conhecer as devidas propriedades dos materiais que compõem a edificação. Conforme Taborianski (2010), estas propriedades são definidas na norma ABNT NBR 15220-1e 15220-2 (2005) pelas grandezas a seguir.

2.5.1.1 Resistência térmica

A resistência térmica de um elemento é igual a diferença de temperatura entre as superfícies desse elemento dividida pela densidade de fluxo de calor, em regime permanente:

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

Onde:

R = resistência térmica em $m^2.K/W$

e = espessura em m

λ = condutividade térmica do material, em $W/(m.K)$

No caso de um componente constituído de camadas homogêneas e não homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor, a resistência térmica deve ser calculada por:

$$R_{total} = \frac{Aa + Ab + \dots + An}{\frac{Aa}{Ra} + \frac{Ab}{Rb} + \dots + \frac{An}{Rn}}$$

Onde:

Ra, Rb,..., Rn são as resistências térmicas de superfície à superfície para cada material (a, b, ..., n) em $(m^2.K)/W$

Aa, Ab,..., An = áreas de cada material em m^2

2.5.1.2 Transmitância térmica

O inverso da resistência térmica total é chamado Transmitância térmica.

$$U = \frac{1}{R}$$

Onde:

U = transmitância térmica de um componente, em $W/(m^2.K)$

R = resistência térmica total, em $(m^2.K)/W$

2.5.1.3 Capacidade térmica

A capacidade térmica de um componente deve ser calculada por:

$$Ct = \sum \lambda i \cdot Ri \cdot ci \cdot di = \sum ei \cdot ci \cdot di$$

Onde:

C_t = capacidade térmica de um componente em $J/(m^2/K)$

λ_i = condutividade térmica do material da camada i em $W/(m.K)$

e_i = espessura da camada i em m

c_i = calor específico do material da camada i em $J/(kg.K)$

d_i = densidade de massa aparente do material da camada i em $kg.m^{-3}$

R_i = resistência térmica da camada i em $(m^2.K)/W$

Do mesmo modo que na determinação da resistência térmica, a capacidade térmica de um componente plano, constituído de camadas homogêneas e não homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor é determinada pela equação:

$$C_{total} = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{C_{ta}} + \frac{A_b}{C_{tb}} + \dots + \frac{A_n}{C_{tn}}}$$

Onde:

C_t = capacidade térmica de um componente em $J/(m^2.K)$

$C_{ta}, C_{tb}, \dots, C_{tn}$ = capacidades térmicas do componente para cada material a, b, ..., n em $J/(m^2.K)$

A_a, A_b, \dots, A_n = áreas de cada seção em m^2

2.5.1.4 Fator de ganho de calor solar de elementos opacos

O fator de ganho solar representa a porção de radiação solar transmitida através de um componente opaco dividida pela radiação solar total incidente sobre o mesmo. Ele é calculado por:

$$FS_o = 100 \cdot U \cdot \alpha \cdot R_{se}$$

Onde:

FSo = fator solar de elementos opacos em %

U = transmitância térmica do componente em W/(m².K)

α = absorção à radiação solar - função da cor

Rse = resistência superficial externa em (m².K)/W

A resistência superficial externa varia com a emissividade, velocidade do ar sobre a superfície e temperaturas da superfície e do ar (norma ABNT NBR 15220-2).

2.5.1.5 Fator de ganho de calor solar de elementos transparentes ou translúcidos

O fator de ganho de calor solar de elementos transparentes deve ser calculado por:

$$FSt = 100 \cdot U \cdot \alpha \cdot Rse + \tau$$

Onde:

FSt = fator solar de elementos transparentes ou translúcidos em %

U = transmitância térmica do componente em W/(m².K)

α = absorção à radiação solar

Rse = resistência superficial externa em (m².K)/W

τ = transmitância à radiação solar

2.5.1.6 Arranjo dos elementos constitutivos

O posicionamento das camadas constitutivas das paredes, pisos e coberturas das edificações têm que ser levados em conta também. Por exemplo, uma camada de ar entre duas camadas de concreto tem uma grande influência sobre o comportamento

térmico do conjunto. A norma NBR 15220 fornece as propriedades térmicas de vários arranjos construtivos clássicos, e as fórmulas para calcular estas grandezas nos casos não contemplados.

2.5.2 Zoneamento Bioclimático Brasileiro

Em sua parte 3, a norma estabelece um Zoneamento Bioclimático Brasileiro, dividindo o território brasileiro em oito zonas e para cada zona são feitas recomendações com diretrizes construtivas e detalhamento de estratégias de condicionamento térmico passivo, com base em parâmetros e condições de contorno fixados.

O zoneamento foi realizado dividindo-se o território brasileiro em 6500 células, sendo caracterizadas pela posição geográfica e por variáveis climáticas (médias mensais das temperaturas máximas, médias mensais das temperaturas mínimas e médias mensais das umidades relativas do ar).

No fim da década de 60 Givoni concebeu uma carta bioclimática, baseada nas temperaturas internas do edifício, mais adequada para países em desenvolvimento, expandindo os limites de conforto. Propondo estratégias construtivas para adequar a arquitetura ao clima, a carta é construída sobre o diagrama psicométrico, que relaciona a temperatura do ar e a umidade relativa.

Com o auxílio da carta apresentada por Givoni adaptou-se uma carta Bioclimática, que está apresenta na Figura 12.

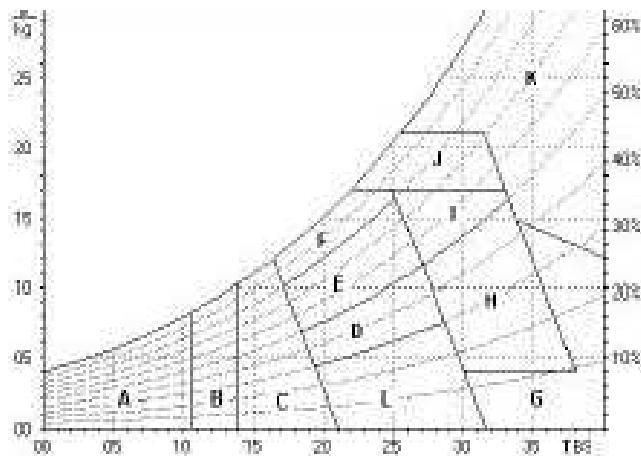


Figura 12 - Carta bioclímica adaptada. Fonte: NBR 15220

As zonas da carta correspondem as seguintes estratégias:

Zona de aquecimento artificial (calefação)

Zona de aquecimento solar da edificação

Zona de massa térmica para aquecimento

Zona de Conforto Térmico (baixa umidade)

Zona de Conforto Término (não precisa fazer nada!)

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

Zona de refrigeração artificial

Zona de umidificação do ar

Sobre esta carta foram registrados os climas de todos os pontos do território brasileiro. E a partir das estratégias necessárias cada cidade foi classificada em uma zona, conforme os critérios da tabela 4.

Tabela 4 - Critérios para classificação bioclimática. Fonte: NBR 15220

Classificação							Zona	Nº Cidades
A	B	C	D	H	I	J		
Sim					Não	Não	1	12
Sim							2	33
	Sim			Não	Não		3	62
	Sim						4	17
		Sim		Não	Não		5	30
		Sim					6	38
					Sim		7	39
				Não			8	99

Legenda: Sim = presença obrigatória
Não = presença proibida

NOTAS:

1 As estratégias não assinaladas com sim ou não podem estar no código do clima, mas sua presença não é obrigatória.

2 Percorrer a tabela de cima para baixo, adotando a primeira zona cujos critérios coincidam com o código.

A figura 13, abaixo, apresenta o zoneamento do território brasileiro segundo a norma NBR 15220.

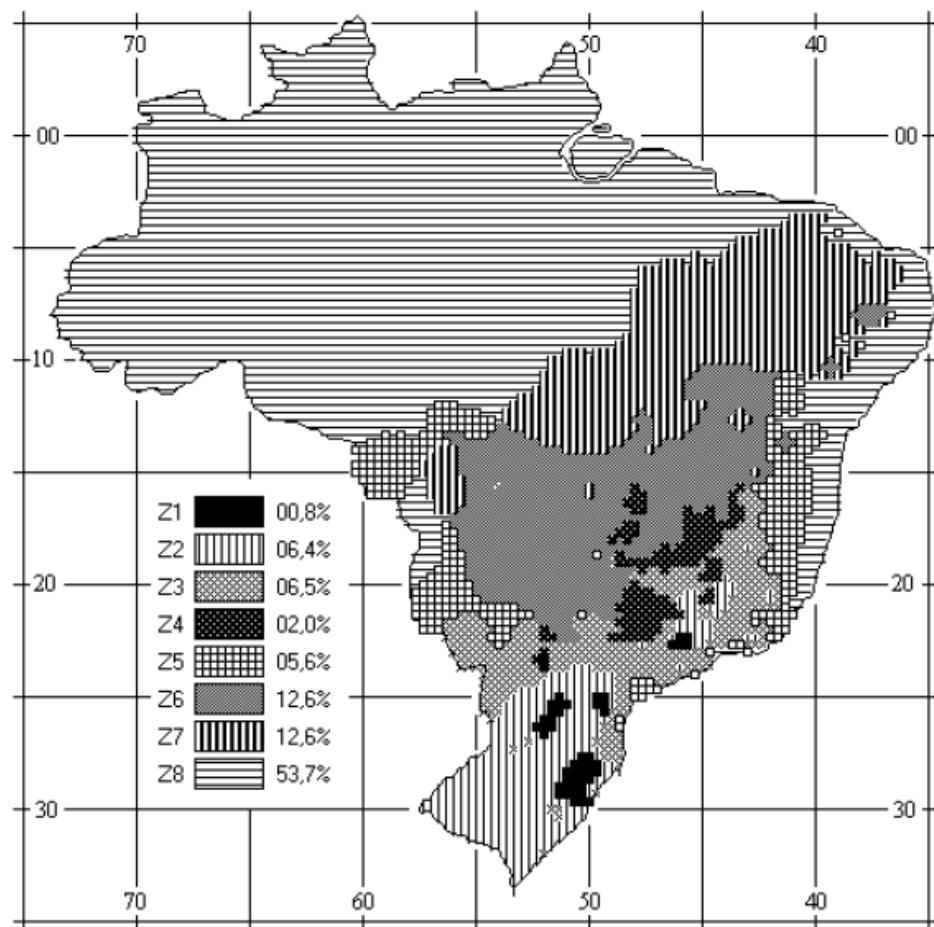


Figura 13 - Zoneamento Bioclimático Brasileiro. Fonte: NBR 15220.

A partir do zoneamento foram propostas recomendações e diretrizes construtivas para a adequação das edificações ao clima local, considerando-se os seguintes parâmetros:

- Tamanho das aberturas para ventilação;
- Proteção das aberturas
- Vedações externas (tipo de parede externa e tipo de cobertura); e
- Estratégias de condicionamento térmico passivo.

A tabela 5 apresenta as diretrizes construtivas relativas às aberturas para ventilação a tabela 6 as diretrizes construtivas relativas a transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar para paredes externas e coberturas.

Tabela 5 - Aberturas para a ventilação. Fonte: NBR 15220.

Aberturas para ventilação	A (em % da área de piso)
Pequenas	10% < A < 15%
Médias	15% < A < 25%
Grandes	A > 40%

Tabela 6 - Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de vedação externa. Fonte: NBR 15220.

Vedações externas		Transmitância térmica - U W/m ² .K	Atraso térmico - φ Horas	Fator solar - FS ₀ %
Paredes	Leve	U ≤ 3,00	φ ≤ 4,3	FS ₀ ≤ 5,0
	Leve refletora	U ≤ 3,60	φ ≤ 4,3	FS ₀ ≤ 4,0
	Pesada	U ≤ 2,20	φ ≥ 6,5	FS ₀ ≤ 3,5
Coberturas	Leve isolada	U ≤ 2,00	φ ≤ 3,3	FS ₀ ≤ 6,5
	Leve refletora	U ≤ 2,30.FT	φ ≤ 3,3	FS ₀ ≤ 6,5
	Pesada	U ≤ 2,00	φ ≥ 6,5	FS ₀ ≤ 6,5
NOTAS				
1 Transmitância térmica, atraso térmico e fator solar (ver 02:135.07-001/2)				
2 Aberturas efetivas para ventilação são dadas em percentagem da área de piso em ambientes de longa permanência (cozinha, dormitório, sala de estar).				
3 No caso de coberturas (este termo deve ser entendido como o conjunto telhado mais ático mais forro), a transmitância térmica deve ser verificada para fluxo descendente.				
4 O termo "ático" refere-se à câmara de ar existente entre o telhado e o forro.				

3 Metodologia

Com a finalidade de basear o estudo em projetos reais, escolhemos estudar o loteamento CDHU Rubens Lara, na cidade de Cubatão. Tal conjunto será melhor apresentado no item 3.2.

Para se avaliar o desempenho térmico do protótipo da edificação foram utilizados os softwares EnergyPlus e Design Builder, descritos no item 3.1.

Seguindo as diretrizes da norma NBR 15220 para a zona bioclimática correspondente (conforme apresentado no item 3.3), realizamos modificações e verificamos seus impactos no modelo por meio de simulações. Os detalhamentos e resultados dessas simulações pode ser encontrados no capítulo 4.

3.1. EnergyPlus

EnergyPlus é um programa de simulação desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América utilizado para a análise energética e simulação de carga térmica de edifícios.

Através da perspectiva dos usuários do ambiente, baseando-se nas características dos materiais de vedação associados a outros sistemas, o programa calcula as cargas de aquecimento e arrefecimento necessárias para manter-se o conforto térmico desejado, bem como as condições através de um sistema secundário Heating Ventilation and Air Conditioning (HVAC). O EnergyPlus também calcula o consumo energético de uma planta de equipamentos.

O EnergyPlus é um software que possui uma variedade de capacidades, entre elas podemos citar:

- Resposta do edifício para as soluções simultâneas e integradas.

- Passos de iteração definidos pelo usuário para a interação entre as zonas térmicas e o ambiente.
- Dados de entrada, saída e climáticos em forma de texto, incluindo condições horárias e sub-horárias para o ambiente.
- Balanceamento térmico com base nas cargas térmicas dos materiais.
- Condução do calor através dos elementos da construção.
- Trocas de calor com o solo através de modelos tridimensionais de diferenças finitas.
- Modelos de conforto térmico
- Modelo de céu anisotrópico
- Cálculo avançado para as interações e transferências através das janelas.
- Controle da iluminação natural e o seu efeito na redução da iluminação artificial.
- Cálculo da poluição atmosférica.

Este programa está sendo largamente utilizado em empreendimentos que buscam uma redução do consumo energético e uma interação eficaz do edifício com o ambiente no qual o mesmo se encontra.

Podemos citar alguns exemplos de edifícios projetados com o auxílio do EnergyPlus:

- Freedom Tower em Nova Iorque (EUA). Onde o programa foi utilizado para gerar simulações para alternativas e agressividades energéticas e também um estudo para os impactos ambientais.
- New York Times em Nova Iorque (EUA), ilustrado na Figura 14. O programa foi utilizado para gerar simulações para alternativas energéticas, controle, picos de demanda e impactos nos usuários do edifício.
- San Francisco Federal Building em São Francisco (EUA), ilustrado na Figura 15. Para esse empreendimento, o programa foi utilizado para gerar simulações para estudo e definição dos sistemas de ventilação e arrefecimento naturais.

- San Diego Supercomputer Center em São Diego (EUA). Neste caso o EnergyPlus foi utilizado para simulação térmica, análise da eliminação da ventilação natural e análise climática.

O programa trabalha com uma base de dados detalhada que contém as informações climáticas de um determinado local. Essas informações estão discriminadas em intervalos horários durante um ano climático típico.



Figura 14 - Imagem gerada por computador da Freedom Tower (foto disponibilizada na internet)



Figura 15 - San Francisco Federal Building (foto disponibilizada na internet)

3.1.1. Necessidade de simular

A simulação nos permite analisar um projeto mesmo antes da sua própria execução, sendo possível prever o comportamento diante de situações e condições diversas, podendo fornecer dados que auxiliam a tomada de decisões ainda nas fases iniciais de um projeto.

Dessa forma, a simulação energética fornece suporte na escolha dos sistemas energéticos empregados com a finalidade de se reduzir desperdícios e fazer com que tais sistemas sejam usados da maneira mais eficaz possível auxiliando assim na avaliação de alternativas.

Por fim, simular apresenta menor custo em comparação à construção de um edifício que não atenderia às condições de norma e projeto.

Dessa forma, podemos perceber a necessidade de gerar simulações para qualquer tipo de projeto, desde grandes edifícios como citado acima até casas de caráter popular, que será alvo de estudo deste trabalho.

Este trabalho se aterá basicamente à análise obtida a partir das simulações geradas no programa escolhido.

3.1.2. Interface do EnergyPlus

O EnergyPlus é um software distribuído gratuitamente através do site do Departamento de Energia dos EUA e, por este motivo, ele foi desenvolvido para ser extremamente leve e de fácil instalação. Assim sendo, trata-se de um programa com praticamente nenhuma interface com o usuário, trabalhando-se exclusivamente com dados de entrada e saída, todos em forma de texto.

Dessa forma, coube a empresas privadas o desenvolvimento de programas que garantisse uma interface com o usuário mais amigável, para poder visualizar o

edifício como um todo, com vistas em 3Ds, cortes, zonas climáticas definidas e as interações dos sistemas térmicos e energéticos.

Pode-se, portanto, encontrar diversas formas de se manusear as informações de entrada do EnergyPlus através da escolha do programa de interface escolhido. Dentre eles, se encontram o Design Builder, ECOTECT, EP-Quick, os softwares da AutoDesk e o OpenStudio.

Neste estudo, a princípio foi utilizado o software OpenStudio. Entretanto, algumas dificuldades foram encontradas durante as fases de modelagem geométrica e determinação dos elementos componentes da casa protótipo como, por exemplo, janelas e portas. Assim, sob a orientação da Professora Brenda Leite optamos pela mudança para o software Design Builder. Detalhes sobre os parâmetros de modelagem com o Design Builder assim como imagens ilustrativas estão apresentados no capítulo 4. Modelagem.

3.2. Loteamento Rubens Lara

O projeto de loteamento Rubens Lara, situado no bairro Jardim Casqueiro na cidade de Cubatão, faz parte do Programa de Recuperação Sócio-Ambiental da Serra do Mar, promovido pelo Governo do estado de São Paulo.

A localização do loteamento dentro da área destinada ao programa esta mostrada na Figura 16 abaixo.



Figura 16 - Localização do loteamento Rubens Lara (fonte: Cartilha do Programa de Recuperação Socio-Ambiental da Serra do Mar)

O projeto é constituído pela configuração de um novo bairro integrado ao tecido urbano residencial existente e já consolidado. Valendo-se de condomínios de até 200 unidades, estes fazem parte das novas tipologias desenvolvidas para a Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano do Estado de São Paulo (CDHU), focando na habitação de interesse social em um loteamento de uso misto, ou seja, integradas aos comércios e serviços, bem como áreas institucionais e parques públicos.

As tecnologias adotadas visam à redução do consumo de energia e água por meio de placas solares e medidores individualizados de água, maior permeabilidade do solo utilizando pavimentação drenante e paisagismo integrando espaços livres públicos e comuns dos condomínios.

Partindo-se de uma área de aproximadamente 197.475,50 m², o projeto propõe 26 lotes residenciais, institucionais, comerciais e áreas verdes. Com um sistema viário composto de vias locais e um eixo diagonal que concentra atividades, equipamentos

e lazer, o loteamento busca integrar a área de intervenção com os bairros existentes na envoltória urbana já existente.

O projeto do loteamento, de autoria dos escritórios dos arquitetos paulistas Adriana Levisky e Eduardo Ferreira, foi premiado pelo Instituto de Arquitetos Brasileiros (IAB) na categoria de habitação de interesse social e também foi considerado exemplo de práticas alternativas pelo programa Sustainable Social Housing Initiative (Sushi) integrante do Programa da ONU para o meio ambiente.

3.2.1. Descrição do loteamento

O loteamento propõe diversidade tipológica na composição dos condomínios dando diversidade ao tecido urbano.

Num total, são propostas 129 edificações com 1.840 unidades habitacionais em nove quadras para uso residencial. Destas, 912 unidades de dois dormitórios e 928 de três dormitórios.

Foram propostas três tipologias distintas para composição dos condomínios:

- 53 edificações verticais com térreo e quatro pavimentos com apartamentos de dois e/ou três dormitórios.
- 11 edificações verticais com térreo e oito pavimentos com apartamentos de dois e/ou três dormitórios.
- 65 casas sobreposta, sendo sobrado com casa térrea sobreposta.

As mesmas podem ser encontradas na Figura 17 abaixo.



Figura 17 - Tipologias das edificações Rubens Lara (fonte: Cartilha do Programa de Recuperação Socio-Ambiental da Serra do Mar)

Foram propostas algumas tecnologias sustentáveis buscando a otimização do consumo de energia, racionalidade e agilidade na construção. Podendo ser citado como exemplo o aquecimento solar, o uso de medidores individualizados de água e dry-walls para as divisórias internas.

3.2.2. Casa sobreposta

Como foco deste estudo, foram escolhidas as casas sobrepostas para modelagem e simulação energética com o EnergyPlus.

Trata-se de um conjunto de sobrados geminados com uma casa térrea superior. Na Figura 18, são apresentados os projetos arquitetônicos utilizados como base para a definição geométrica do modelo deste trabalho de formatura.

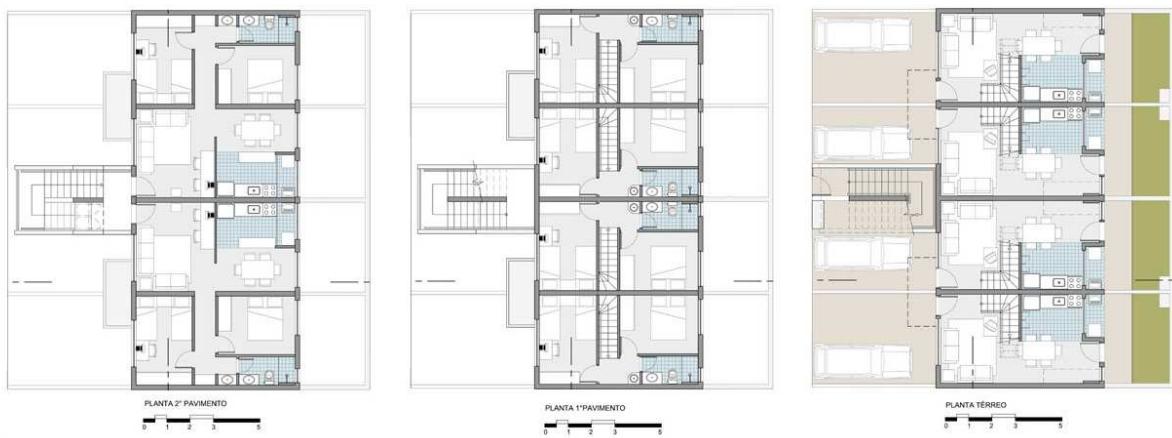


Figura 18 - Planta tipo da casa sobreposta do 2º, 1º pavimento e térreo, respectivamente. (fonte: <http://www.leviskyarquitetos.com.br>)

A partir das plantas acima e suas respectivas escadas, foi possível elaborar os desenhos geométricos de todos os pavimentos permitindo, assim, a modelagem da casa sobreposta.

A Figura 19 mostra casas sobrepostas, vistas da rua.



Figura 19 - Casas sobrepostas, fachadas de frente (foto: Julia Chequer, noticias.r7.com)

Nas figuras 20, 21 e 22 a seguir , podem ser vistos os desenhos elaborados de cada pavimento para a modelagem da casa padrão.

A Figura 20 apresenta a planta baixa do pavimento térreo onde as linhas verdes representam paredes virtuais que serão abordadas mais profundamente no item 4.1.1 deste relatório. A Figura 21 e a Figura 22 representam a planta baixa do primeiro e segundo pavimento respectivamente.

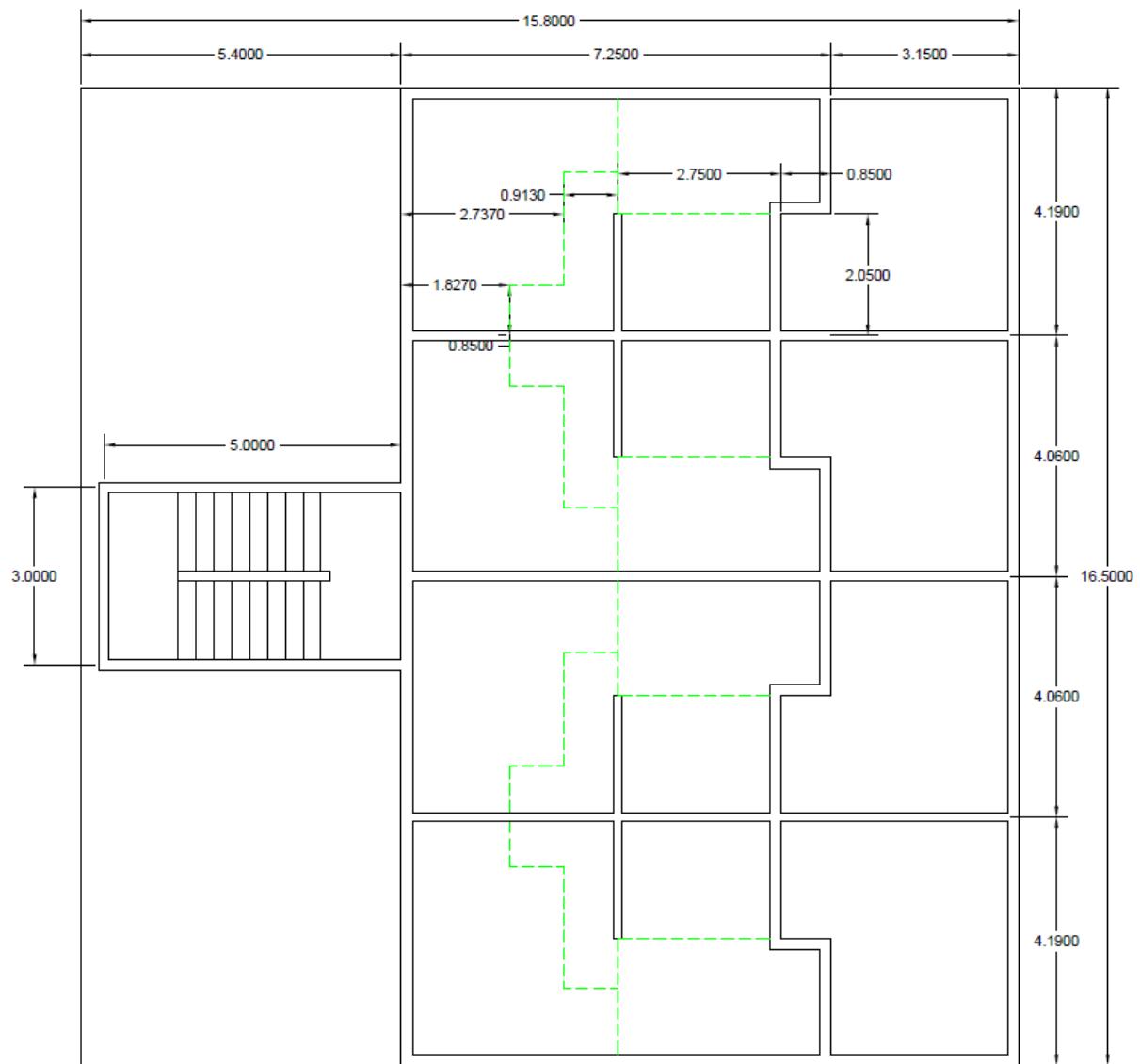


Figura 20 - Planta do térreo da casa sobreposta (fonte: autoria própria)

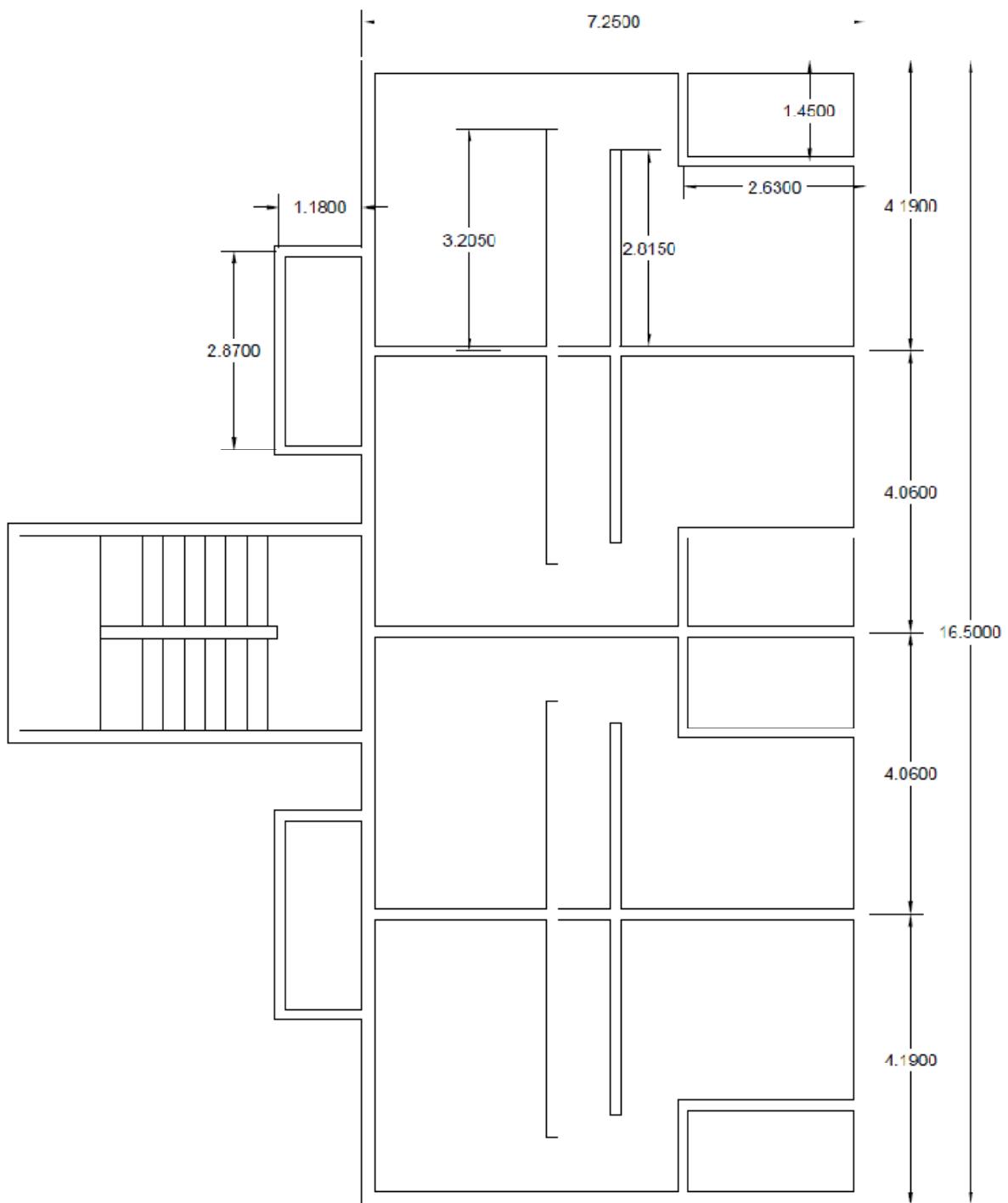


Figura 21 - Planta do primeiro pavimento da casa sobreposta (fonte: autoria própria)

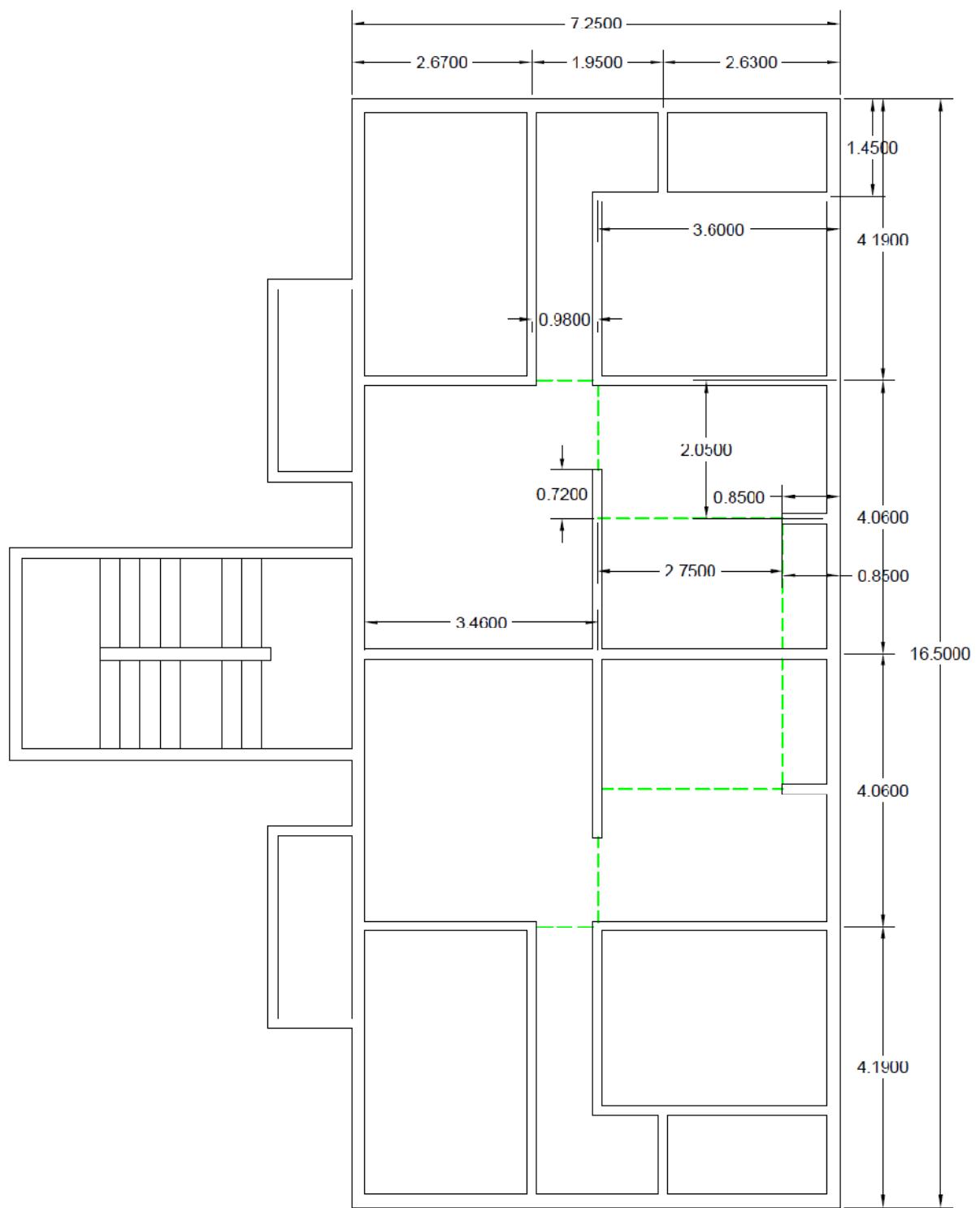


Figura 22 - Planta do segundo pavimento da casa sobreposta (fonte: autoria própria)

3.3. Bioclima de Cubatão

Segundo mapeamento realizado pela Sustainable Social Housing Initiative (2010), dados confiáveis para Cubatão são escassos, devido a inexistência de uma estação meteorológica ou de monitoramento climático em longo prazo, de modo que a falta de dados deve ser indicada como o principal problema para a análise bioclimática.

Cubatão está localizada na região de transição de duas zonas bioclimáticas, as zonas 3 (São Paulo) e 5 (Santos), como pode ser visualizado na Figura 23.

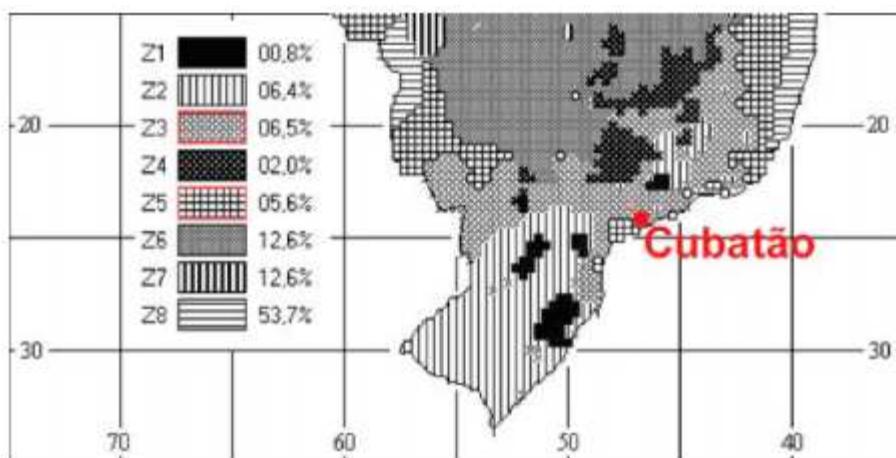


Figura 23 - Seção sul do Zoneamento Bioclimático Brasileiro. Fonte: Sustainable Social Housing Initiative (2010)

Se considerarmos a influência da proximidade do mar, da altitude e as distâncias entre Cubatão e as duas cidades, apresentadas na Tabela 7, acreditamos ser mais adequado realizar o nosso estudo adotando com base a zona climática 5.

Tabela 7 - Distâncias até Cubatão.

Cidade	Distância (km)
São Paulo	44
Santos	13

Contudo, para se realizar simulações no EnergyPlus existe a necessidade de um banco de dados climáticos horários para um ano tipo, que não pôde ser encontrado para a cidade de Santos.

Mapeamos todas as cidades inseridas na zona bioclimática 5, analisamos quais possuíam dados no formato EnergyPlus Weather Data (EPW) e a distância destas até Cubatão. Conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Mapeamento das cidades da zona bioclimática 5.

Cidade	Estado	Estratégia	Dados EPW	Distância Cubatão (km)
Água Branca	AL	CFI	não	-
Guaramiranga	CE	CFI	OK	2.313,20
Itiruçu	BA	CFI	OK	1.334,41
Aimorés	MG	CFIJK	OK	764,09
Araçuaí	MG	CFIJ	não	-
Morro do Chapéu	BA	CFI	não	-
Capinópolis	MG	CFIJ	não	-
Cataguases	MG	CFIJ	não	-
Vitória da Conquista	BA	CFI	OK	1.169,26
Governador Valadares	MG	CFIJ	OK	742,07
Leopoldina	MG	CFIJ	não	-
Pedra Azul	MG	CFI	não	-
Garanhuns	PE	CFI	OK	1.980,70
Teófilo Otoni	MG	CFIJ	OK	857,68
Aquiduana	MS	CFIJK	não	-
Ivinhema	MS	CFIJK	OK	832,36
Cidade Vera	MT	CFIJK	não	-
São Francisco do Sul	SC	CFIJ	não	-
Barra do Itabapoana	RJ	CFIJ	não	-
Campos	RJ	CFIJ	não	-
Escola Agrícola	RJ	CFIJ	não	-
Itaperuana	RJ	CFIJ	não	-
Macaé	RJ	CFIJ	ok	537,29
Araçatuba	SP	CFIJK	não	-
Niterói	RJ	CFIJ	OK	382,05
Rio Douro	RJ	CFIJ	não	-
Xerém (Duque de Caixias)	RJ	CFIJ	OK	372,14
Iguape	SP	CFIJ	OK	153,04
Juquiá	SP	CFIJ	não	-
Santos	SP	CFIJ	não	-

Escolhemos então utilizar os dados climáticos da cidade de Iguape, devido a sua proximidade com Cubatão e pelo fato da mesma também ser localizada próxima ao mar.

3.4. Levantamento das alternativas de simulação

Cubatão está localizado na zona bioclimática 5 da norma NBR15220. As diretrizes construtivas relativas às aberturas, paredes e coberturas e as estratégias do condicionamento térmico passivo indicadas pela norma para esta zona são:

1. aberturas médias para ventilação;
2. sombrear as aberturas
3. utilizar paredes leves refletoras e cobertura leve isolada;
4. permitir uma ventilação cruzada no verão;
5. prever vedações internas pesadas afim de ganhar inércia térmica (útil no inverno).

Calcula-se que, no segundo pavimento do edifício padrão, a área das aberturas equivale a 19% da área do piso (desprezando as áreas das portas). Este valor encontra-se dentro do padrão indicado pela norma (área das aberturas entre 15% a 25% da área de piso).

Com relação ao sombreamento das aberturas, o projeto não prevê nenhuma tecnologia aplicada para essa função. São observadas marquises sobre as portas de entrada dos apartamentos, porém com a função de proteção do morador contra intempéries durante a abertura e fechamento da porta.

Sem informação sobre os materiais efetivamente utilizados, consideramos que os mesmos já atendem ao terceiro ponto acima citado. As características físicas associadas pela norma NBR 15220 estão apresentadas na Tabela 6.

Foram escolhidas paredes externas de tijolos maciços rebocados em ambas as faces, cujas características térmicas⁵ são: $U=3,26 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, $\varphi=3,3$ horas, $F_{So}=2,67\%$.

Verifica-se que a ventilação cruzada já é garantida pelo projeto arquitetônico no edifício protótipo evidenciado pela existência, em cada ambiente, de duas aberturas

⁵ Cálculos detalhados na norma NBR 15220, parte 2, Anexo C, exemplo 1

(porta e/ou janela) que permitem a circulação do ar. Porém, cabe destacar que as portas do segundo pavimento têm sua capacidade de ventilação reduzida por causa do parapeito de concreto que envolve as escadas.

Além disso, a ventilação pode ser prejudicada em função da proximidade da face de trás do prédio com o edifício vizinho.

Assim, entre as diversas diretrizes da norma NBR 15220, as variações dos detalhes arquitetônicos deste estudo para a simulação consistem nos quesitos de sombreamento das aberturas e ganho de inércia térmica das vedações internas e cobertura. Simulamos as alterações seguintes:

- Sombreamento das aberturas
 - instalação de brises (diferentes tamanhos) verticais e horizontais;
 - instalação de barreiras horizontais e verticais na envoltória das janelas;
 - Variação da espessura das paredes e da laje de cobertura com inserção de camada de isopor para isolamento
 - Aumento da massa térmica substituindo Drywall por paredes de alvenaria

4. Simulações

Conforme apontado anteriormente, para o desenvolvimento do estudo será utilizado o software Design Builder como interface para a simulação energética do EnergyPlus. Para isso, algumas atitudes devem ser tomadas com a finalidade de padronizar e organizar as informações e resultados obtidos.

Para permitir uma análise mais adequada, optamos por obter os resultados e o comportamento térmico de um cômodo específico da casa sobreposta. Dentre as opções, acreditamos que a melhor escolha é a sala de estar do segundo pavimento.

Por se tratar de um ambiente de convívio familiar a sala é, consequentemente, o cômodo da casa que apresenta maior ocupação em número de pessoas e período de permanência, além de apresentar a maior área útil.

A escolha do segundo pavimento é justificada por apresentar uma superfície de contato com a laje da cobertura que é a mais exposta à incidência de radiação solar.

Outro critério considerado no tratamento dos resultados é a escolha do período de coleta dos dados, ou seja, para qual intervalo de tempo o resultado será apresentado.

Neste trabalho foram consideradas como expressivas as características das Design Weeks, que são identificadas como as semanas mais quentes e mais frias para o verão e inverno, respectivamente. Para o caso da cidade deste estudo, são indicados os intervalos entre os dias 22 de Janeiro a 28 de Janeiro para o verão e 15 de julho a 21 de julho para o inverno.

Vale ressaltar que, todos os parâmetros de modelagem que serão tratados no item 4.1 deste relatório são fornecidos para toda a edificação e todos os ambientes. Desta forma, podem ser retirados os resultados de qualquer ambiente da casa protótipo.

4.1. Modelagem

4.1.1. Modelagem Geométrica

Através dos desenhos geométricos do Térreo, 1º e 2º Pavimento apresentados nas figuras 20, 21 e 22, respectivamente, pôde-se elaborar a geometria da casa sobreposta no Design Builder. A Figura 24 ilustra a organização das casas sobrepostas. Uma fotografia tirada na casa real pode ser vista na Figura 25.

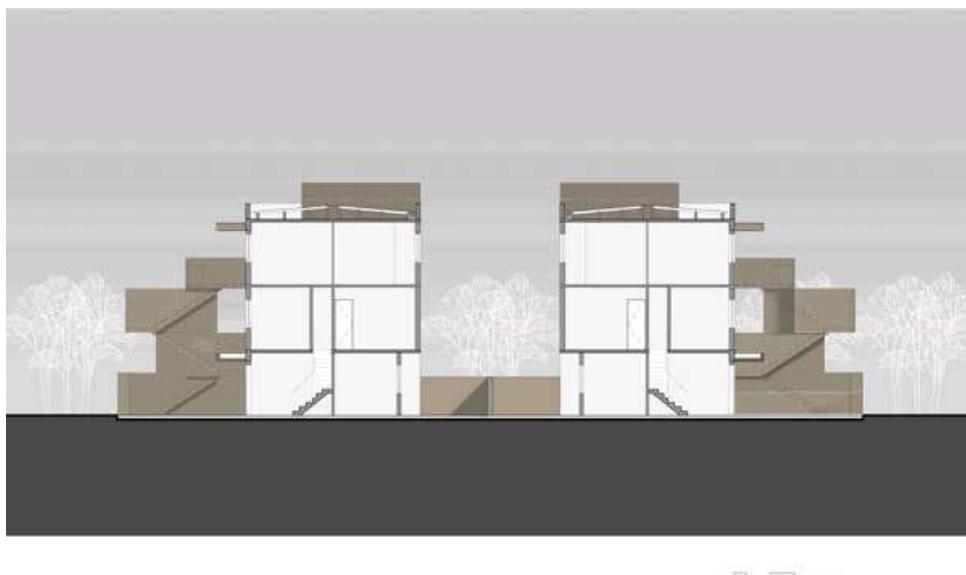


Figura 24 Desenho em corte de dois blocos de casa sobrepostas



Figura 25 - Vista interna do segundo pavimento (foto: Julia Chequer, noticias.r7.com)

Fazendo-se uso da importação do arquivo das plantas no formato.DXF, uma extensão do arquivo do AutoCAD, ficou simples de se determinar a geometria da casa, uma vez que tais plantas serviram de linhas guias para o desenho arquitetônico.

Para o entendimento do modelo geométrico do Design Builder, deve-se entender a forma e a hierarquia que os blocos são adicionados ao desenho.

Para a elaboração das paredes externas, aplica-se a opção “Add new block” onde devemos escolher o tipo do bloco que, no nosso caso, é o “Building block”, o modo de extrusão, a altura e a espessura da parede. A partir dessas informações o programa cria, automaticamente, as paredes externas, piso e teto, bem como janelas, que, posteriormente, serão alteradas.

Criado o bloco do pavimento, com o auxílio das plantas desenham-se os cômodos da casa através de paredes internas ou “partitions” o bloco é subdividido em zonas que terão características diferentes, segundo a sua atividade e utilização.

Podem ser criadas também paredes virtuais, ou seja, paredes que não existem fisicamente no local, porém, naquela posição, ocorre uma mudança de ocupação e, consequentemente, uma mudança de zona sem que exista propriamente uma separação física dos ambientes. Como exemplo deste caso, podemos citar as divisões entre cozinha e sala de jantar, ou entre a cozinha e lavanderia no segundo pavimento. Dessa forma, o refinamento da solução é garantido, pois são respeitadas

as características de cada zona, sem que haja extração das propriedades de uma região para a outra.

Cabe citar que tais paredes são de grande importância não só pelo fato de diferenciar corretamente as zonas da moradia, mas também, essas paredes são consideradas no cálculo da ventilação cruzada, uma vez que não existe uma barreira física naquele local impedindo a ventilação do local.

Essas paredes virtuais são representadas na cor amarela pelo programa e podem ser observadas na Figura 26 abaixo.

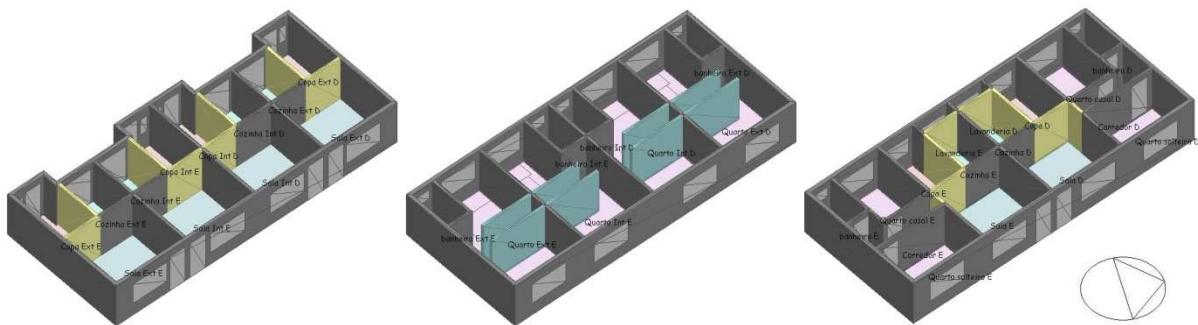


Figura 26 - Modelagem do térreo, 1º e 2º pavimento pelo Design Builder (fonte: autoria própria)
 São também adicionados no modelo os “Component blocks” que são elementos da modelagem que não entram no cálculo das cargas térmicas e transferência de calor. Tais elementos são criados como estruturas visuais que geram sombras como as marquises sobre as portas de entrada dos apartamentos. Fizemos uso dessa ferramenta para modelar as marquises, estrutura da caixa d’água e os painéis solares sobre a laje da casa, a estrutura da escada e, por fim, todo o prédio vizinho ao fundo da casa modelada, pois percebemos que a sombra produzida por um edifício sobre o outro era muito grande.

Este tipo de bloco é destacado pelo Design Builder pela cor roxa e pode ser observada na Figura 27 abaixo.

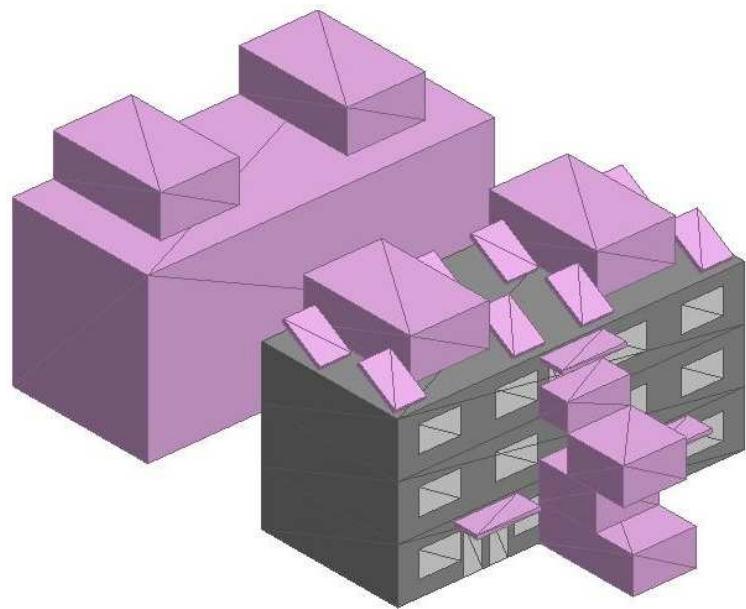


Figura 27 - Modelo geométrico da casa sobreposta (fonte: autoria própria)

A Figura 28 abaixo apresenta a visualização do desenho geométrico final que será modelado para o estudo da casa sobreposta do loteamento Rubens Lara.



Figura 28 - Visualização do desenho geométrico final (fonte: autoria própria)

4.1.2. Parâmetros da modelagem:

As regras gerais da modelagem com o Design Builder são dadas no início do processo, sendo possível a alteração a qualquer momento, através do “Model option” Na Figura 29 abaixo, podem ser encontradas as características gerais para este estudo de caso.

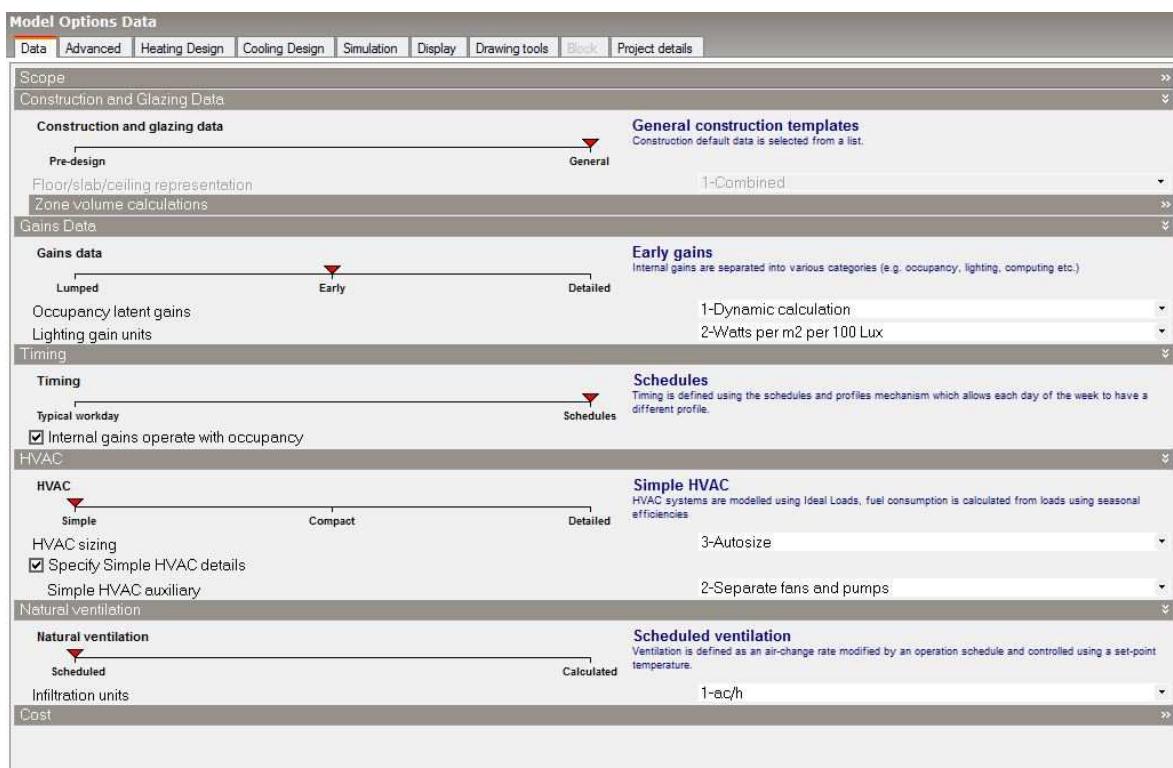


Figura 29 - Parâmetros gerais da modelagem no Model Option do Design Builder (fonte: autoria própria)

Para cada ambiente da casa sobreposta, são escolhidos templates em função do tipo de atividade para a qual cada ambiente foi direcionado. Para o estudo da sala do segundo pavimento da casa sobreposta, as características são retiradas do template Domestic Lounge, na qual estão relacionados as taxas de ocupação do ambiente bem como todos os ganhos de carga e controle de temperatura em função da ventilação natural, equipamentos, iluminação, controle de aquecimento e arrefecimento e demanda por água quente.

4.1.2.1. Atividades

Na Figura 30, são apresentados os parâmetros utilizados na modelagem da sala do segundo pavimento da casa padrão em relação aos dados de ocupação do ambiente.

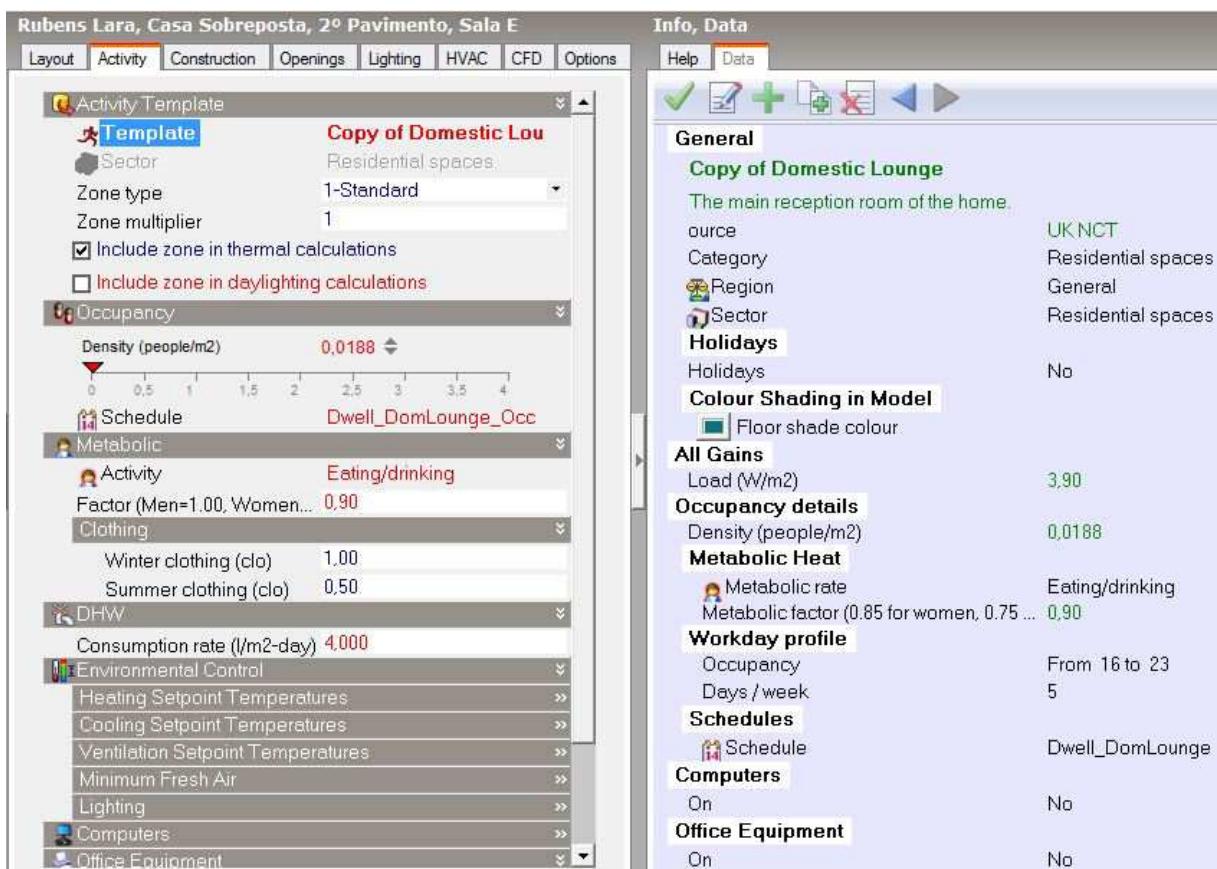


Figura 30 - Parâmetros utilizados para a modelagem da sala do segundo pavimento da sala sobreposta (fonte: autoria própria)

Na aba “Activity” são utilizados como dados de entradas os parâmetros de ocupação do ambiente, sendo considerado o número de pessoas por metro quadrado bem como os horários de utilização do espaço. As taxas de metabolismo também estão relacionadas com a atividade que é realizada no ambiente sendo, para o caso da sala, 110 W por pessoa. Tal valor é multiplicado por um fator que considera a variação da tipologia das pessoas que habitam o lugar, sendo 1,00 para homens, 0,85 mulheres e 0,75 crianças.

Outra característica relacionada com a ocupação que deve ser considerada é o fator de roupa utilizada no inverno (1,00 clo) e verão (0,50 clo).

4.1.2.2. Ventilação

Em relação à ventilação, no modelo da casa padrão, temos somente a situação de ventilação natural com o objetivo de alcançar apenas três trocas de ar por hora, característica esta pré-determinada no “Model Option”.

Dessa forma, a ventilação é alcançada através de duas maneiras:a primeira consiste na otimização da ventilação cruzada através de janelas em lados opostos do ambiente, definição de paredes virtuais e aberturas para escadas, por exemplo.

Já a segunda consiste em abrir as janelas respeitando duas condições, uma em relação aos horários, ou seja, as janelas não podem ser abertas fora do horário pré-estabelecido, a outra condição é a de temperatura que estipula a abertura da janela quando a temperatura da zona em questão for igual ou superior a 25°C.

Outra característica a ser considerada é a ventilação indesejada, que pode ocorrer através das portas e janelas mesmo quando estas se encontram fechadas. Isto está diretamente relacionado com a qualidade de construção do empreendimento e também com a qualidade de utilização das aberturas como, por exemplo, o mau fechamento de janelas.

Na Figura 31 podem ser encontradas as características de ventilação adotadas para a modelagem do estudo.

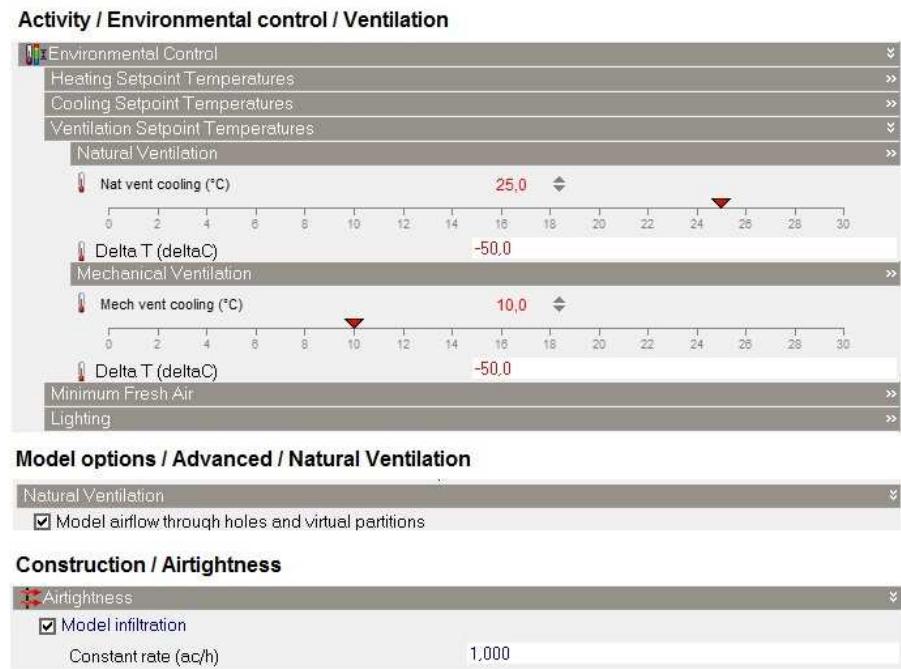


Figura 31 - Parâmetros de modelagem com relação à ventilação do modelo (fonte: autoria própria)

4.1.2.3. Materiais e Aberturas

Com relação aos materiais e suas características, para cada tipo de parede (interna, externa) deve-se escolher o número de camadas que consistirá a parede, bem como os materiais envolvidos e as espessuras das camadas.

Os dados de entrada para o programa podem ser feitos de duas maneiras. Uma consiste em adicionar os valores de R-Value para cada material, não sendo considerada a massa térmica do material, ou seja, a energia perdida para o material.

A segunda maneira consiste em atribuir, para cada material os valores de condutividade, densidade e calor específico. Desta maneira, a modelagem é capaz de calcular a transmissão de energia considerando-se a massa térmica do material.

Na Figura 32 é apresentada a interface do programa Design Builder para a atribuição das propriedades dos materiais envolvidos na modelagem.

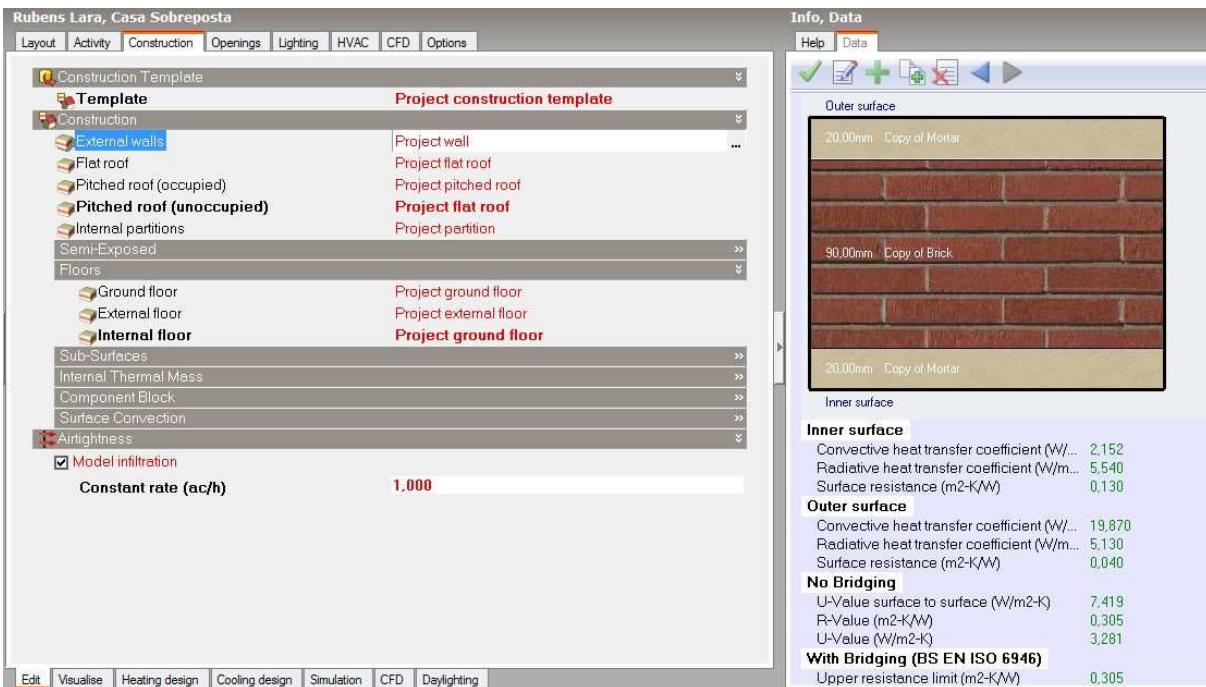


Figura 32 - Atribuição das características dos materiais no Design Builder (fonte: autoria própria)

Para o estudo em questão, foram admitidas propriedades de acordo com a NBR 15220 para os materiais encontrados nas paredes. Nas tabelas abaixo, encontram-se as características das paredes, piso, teto e janelas, seguidas das propriedades atribuídas aos materiais do modelo.

Tabela 9 - Características das superfícies da casa padrão (fonte: Exemplo de cálculo da NBR 15220)

	Parede externa	Parede interna	Piso	Teto
Camada 1 - m	Argamassa 0,02	Gesso acartonado 0,025	Gesso 0,02	Gesso 0,02
Camada 2 - m	Bloco 0,09	Ar 0,01	Laje 0,2	Laje 0,2
Camada 3 - m	Argamassa 0,02	Gesso acartonado 0,025	Argamassa 0,01	Argamassa 0,01
Camada 4 - m	Pintura externa 0,001		Cerâmica 0,05	Rev. Asfáltico 0,01
U-Value - W/(m².K)	3,26	1,92	2,07	2,60
R-Value - m².K/W	0,31	0,52	0,48	0,38

Tabela 10 - Propriedades dos materiais componentes das superfícies da casa padrão (fonte: Exemplo de cálculo da NBR 15220)

	Condutividade - W/(m.K)	Calor Específico - J/(kg.K)	Densidade - kg/m ³
Argamassa	1,15	1000,00	2000,00
Bloco	0,90	920,00	1600,00
Gesso acartonado	0,25	1000,00	900,00
Gesso	0,80	1000,00	1600,00
Laje	1,13	1000,00	2000,00
Rev. Asfáltico	0,30	1000,00	1000,00
Cerâmica	0,80	850,00	1700,00

Com posse das informações acima, levando em consideração todas as camadas e materiais que compõem um fechamento, o programa calcula os valores de R-Value

e U-Valeu que serão fundamentais na transmissão de calor através das paredes e teto.

Com relação às aberturas do protótipo, são utilizados vidros de 3 mm com apenas uma camada. As esquadrias são de alumínio e apresentam três divisores verticais, resultando em quatro painéis de vidro.

4.2. Simulação da Casa Padrão

Os parâmetros utilizados para a simulação da casa padrão tanto para as atividades quanto para os materiais e características das aberturas estão comentados no capítulo 4.1 Parâmetros da modelagem.

Vale ressaltar que, em busca de uma maior aproximação entre o modelo e a realidade, os painéis solares instalados na laje de cobertura receberam no modelo uma superfície de vidro para garantir as características que esse equipamento possui.

A instalação por si só destes painéis já garantem uma diminuição da incidência de radiação solar sobre a laje amenizando os seus efeitos sobre as temperaturas internas e, consequentemente, o conforto térmico.

Outro detalhe de grande impacto que busca o estreitamento entre a realidade e o modelo aplicado é a orientação da fachada.

Com o auxílio da planta de locação do empreendimento disponível na cartilha de apresentação do Programa de Recuperação SocioAmbiental da Serra do Mar, foi possível obter a orientação da fachada.

A orientação aplicada no modelo é de 152º em relação ao norte.

4.2.1 Resultados

As figuras 33 e 34 apresentam o ganho de energia proveniente das atividades e ocupação, iluminação e também provenientes da radiação solar, para a Design Week de inverno e para a Design Week de verão, respectivamente.

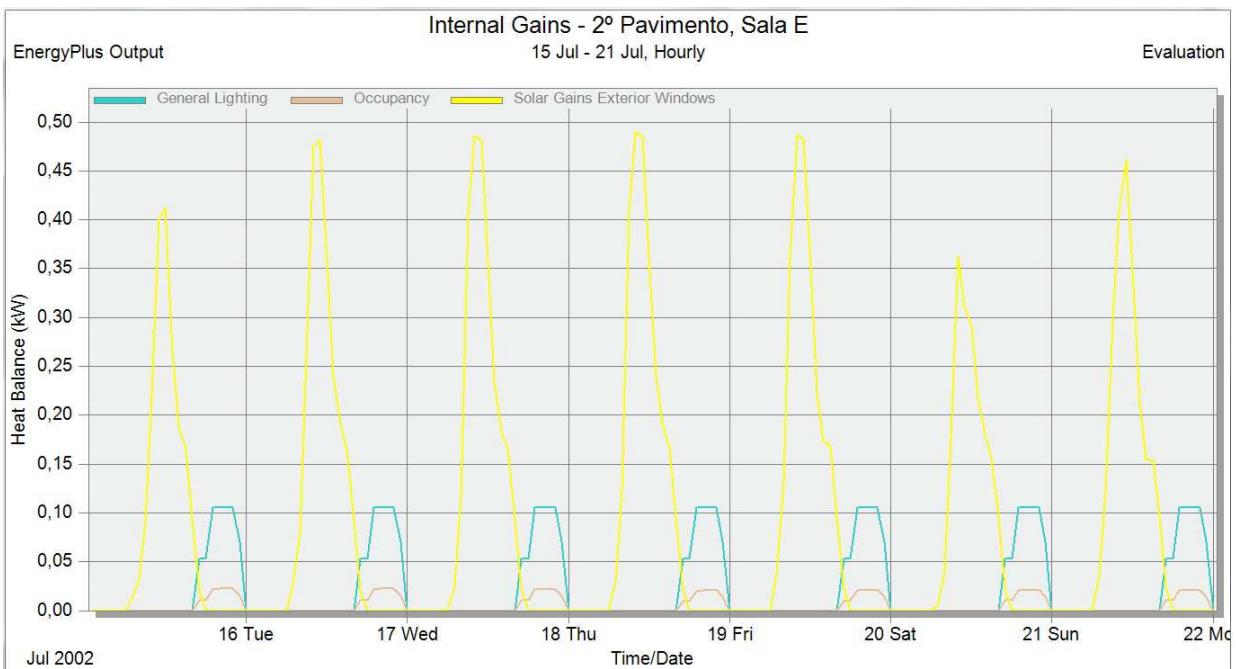


Figura 33 - Ganho de energia interna da sala da casa padrão para Design Week de inverno

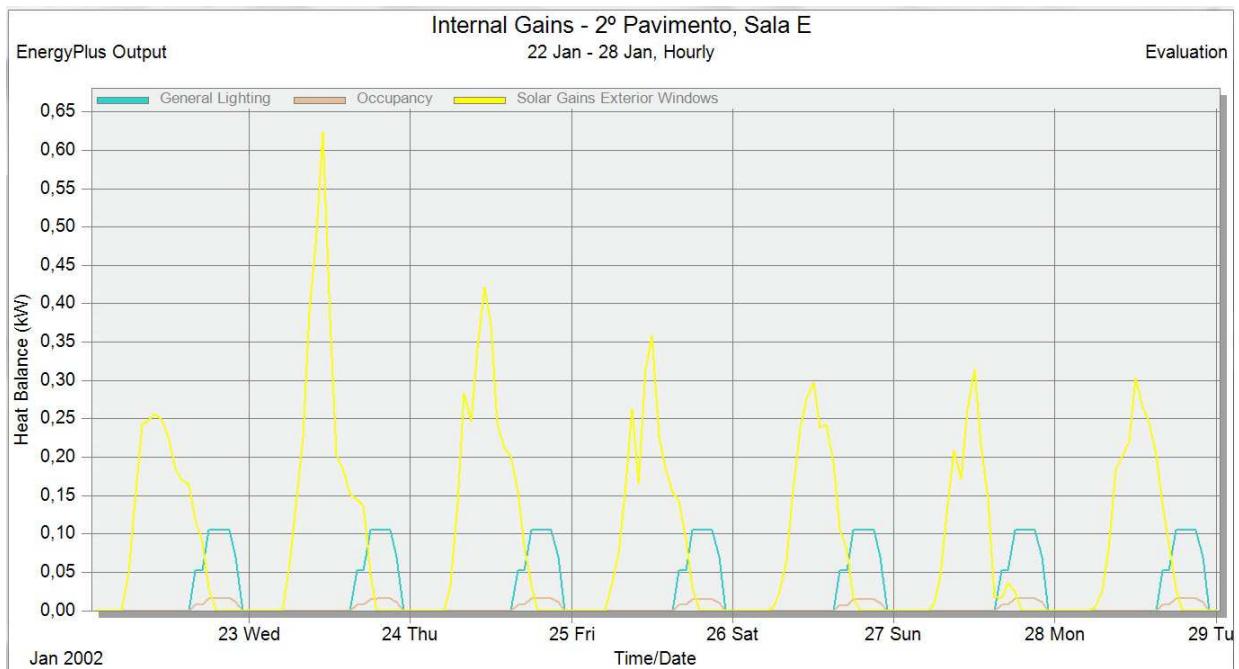


Figura 34 – Ganho de energia interna da sala da casa padrão para Design Week de verão

Nas figuras 35 e 36 encontram-se as temperaturas da sala de estar para a condição padrão da casa sobreposta para a Design Week de inverno e para a Design Week de verão, respectivamente.

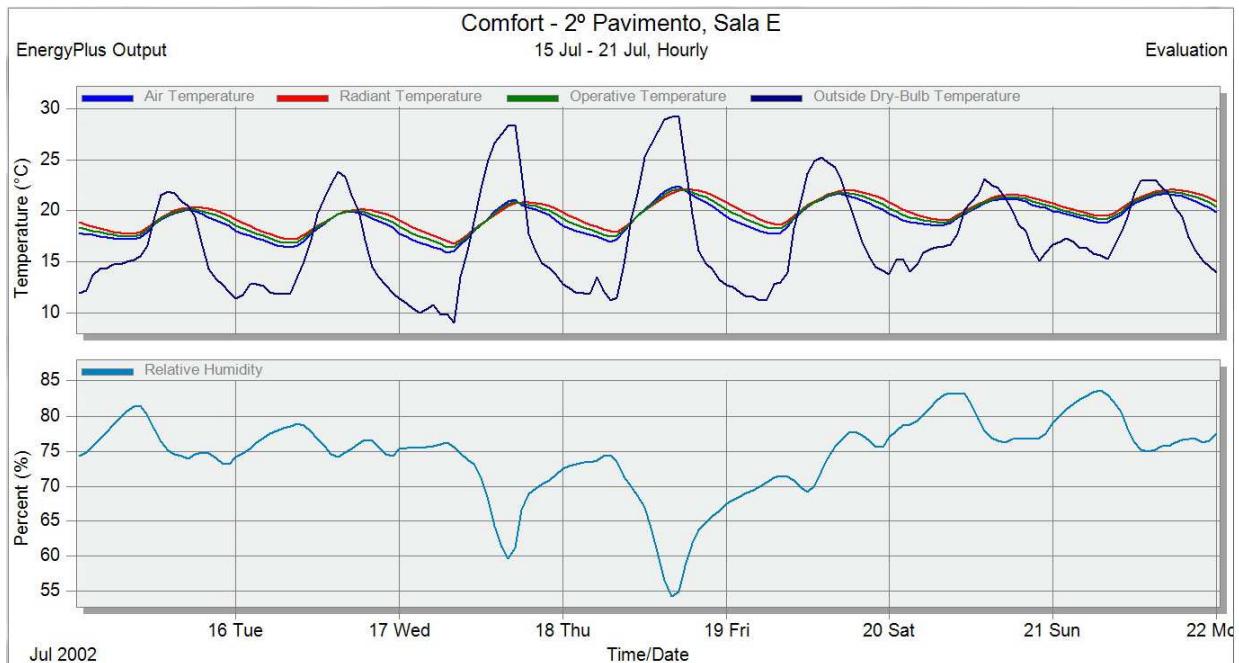


Figura 35 - Temperatura interna da sala da casa padrão para Design Week de inverno

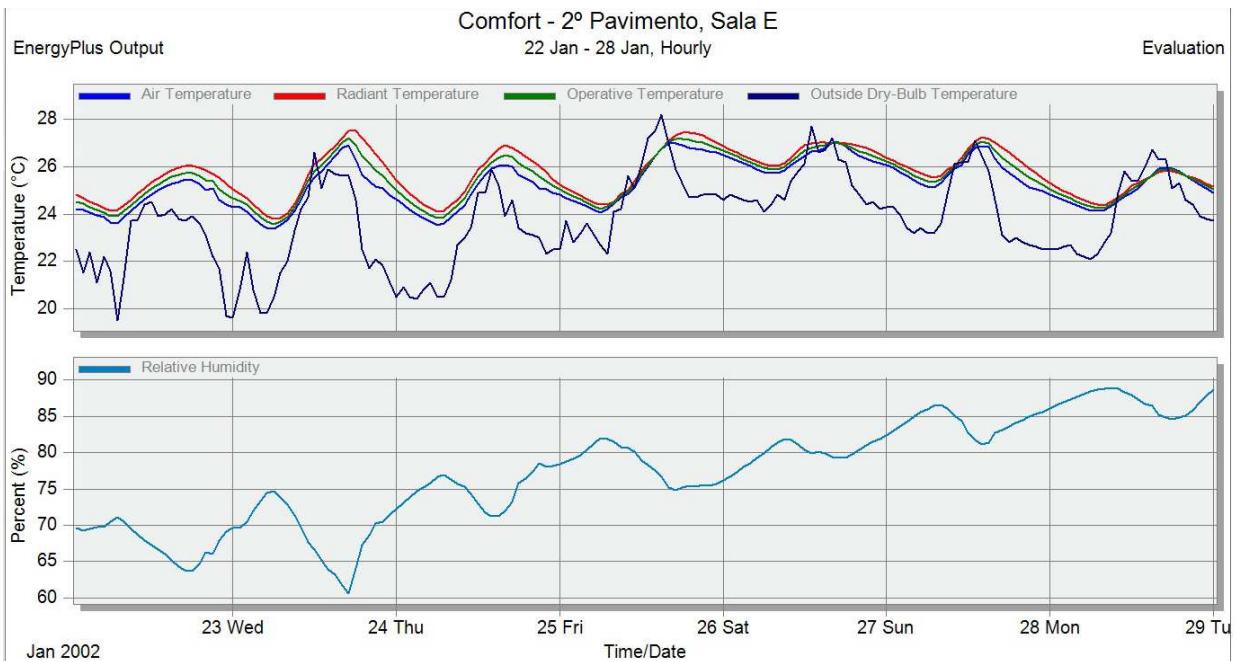


Figura 36 - Temperatura interna da sala da casa padrão para Design Week de verão
Os dados acima servirão de referência para comparação entre a casa padrão e os resultados obtidos das variações passivas propostas.

4.3. Simulação com mudança da massa térmica

Conforme citado no item 3.2.1 deste trabalho, as paredes internas do empreendimento são constituídas de drywalls, ou seja, paredes com duas camadas de gesso acartonado separadas por uma camada de ar. Tais paredes são largamente utilizadas por causa da boa isolamento acústica e térmica que a camada de ar fornece ao sistema. Outro fator que justifica a sua utilização é a facilidade e velocidade de instalação das mesmas.

Com a finalidade de aumentar a massa térmica das paredes internas da casa, decidimos trocar o sistema de gesso acartonado por alvenaria tradicional o que deveria resultar em temperaturas homogêneas e picos reduzidos.

O perfil da parede de alvenaria utilizada é a mesma citada no item 4.1.2.3 deste relatório e é constituída de uma camada de argamassa, seguida por um bloco cerâmico e outra camada de argamassa.

4.3.1. Resultados

As figuras 37 e 38 apresentam o ganho de energia proveniente das atividades e ocupação, iluminação e também provenientes da radiação solar, para a Design Week de inverno e para a Design Week de verão, respectivamente.

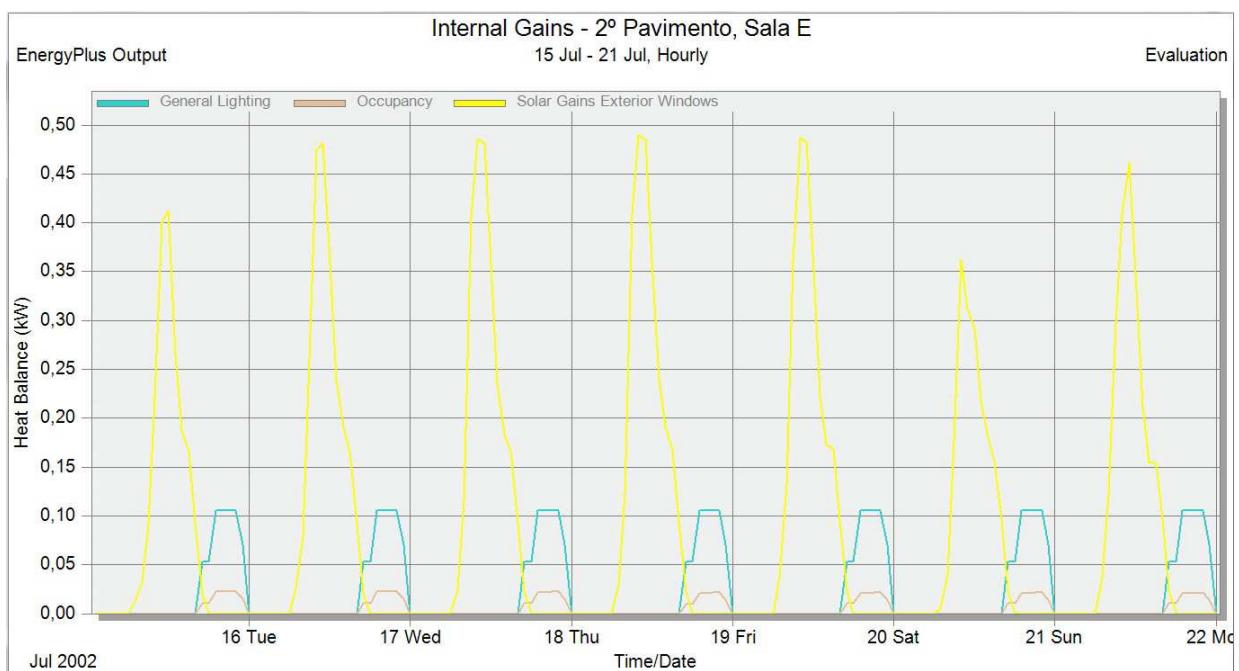


Figura 37 – Gанho de energia interna da sala da casa padrão com aumento da massa térmica para Design Week de inverno

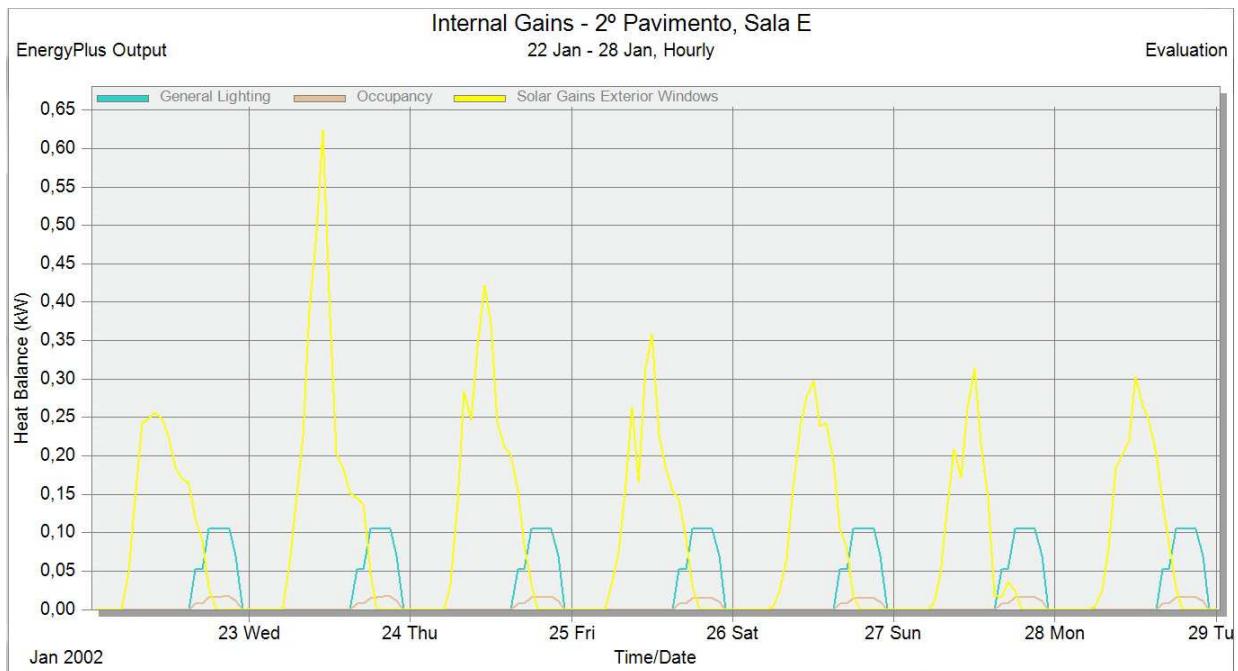


Figura 38 – Ganho de energia interna da sala da casa padrão com aumento da massa térmica para Design Week de verão

Nas figuras 39 e 40 encontram-se as temperaturas da sala de estar para a condição padrão da casa sobreposta para a Design Week de inverno e para a Design Week de verão, respectivamente.

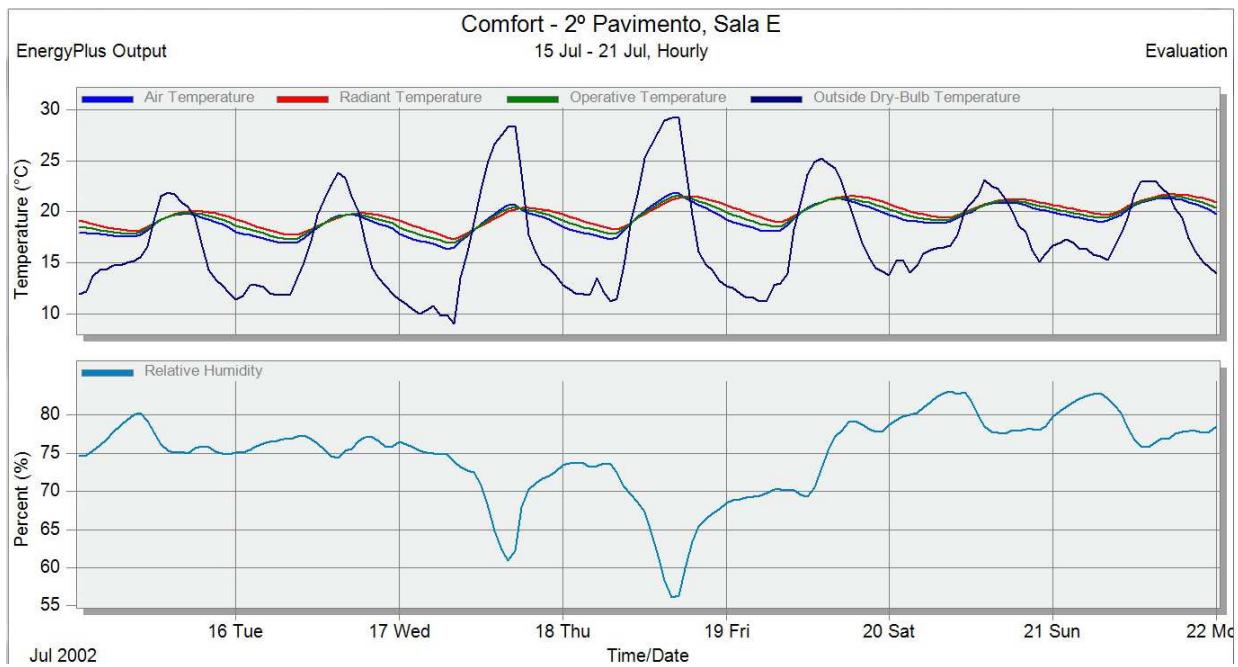


Figura 39 - Temperatura interna da sala da casa padrão com aumento da massa térmica para Design Week de inverno

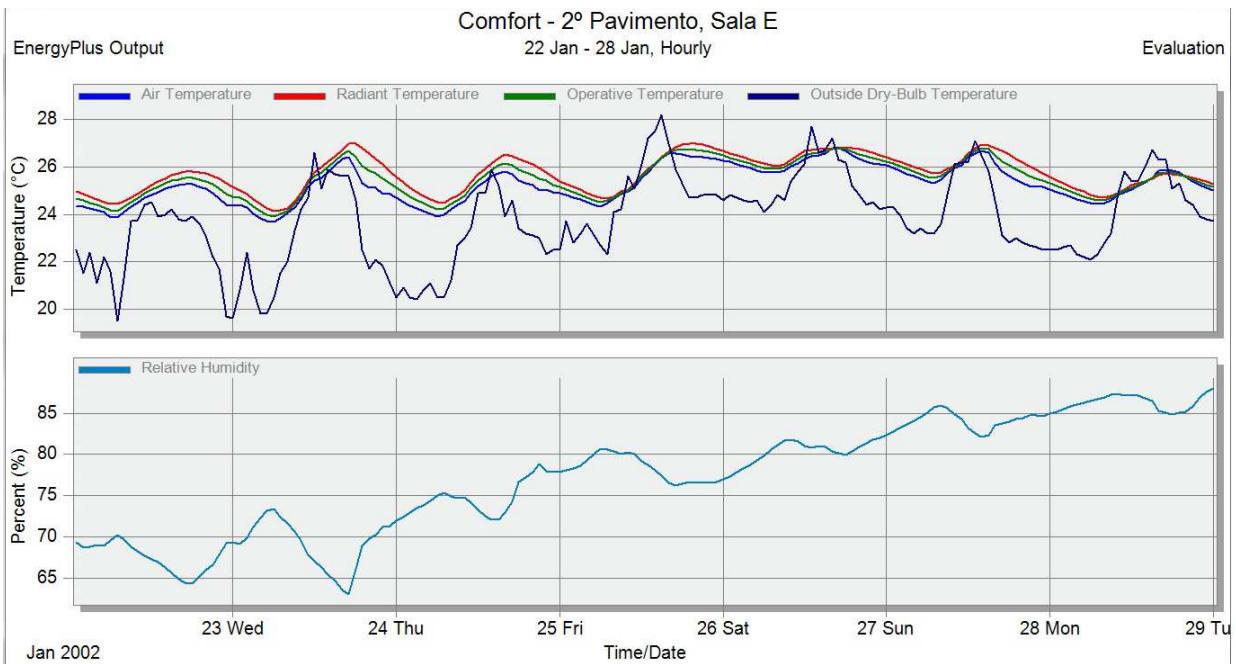


Figura 40 - Temperatura interna da sala da casa padrão com aumento da massa térmica para Design Week de verão

É possível notar que a média das temperaturas permanece inalterada uma vez que a energia que a massa térmica capta é posteriormente emitida para o ambiente com a diminuição da temperatura.

Vale ressaltar que a massa térmica é uma intervenção passiva que demonstrou resultados positivos tanto no inverno quanto no verão a sua utilização é dificultada em função dos custos não serem compatíveis com uma habitação de caráter social.

4.4. Simulação com brises e beiral

Com a intenção de se reduzir o ganho de calor em função da energia solar incidente nas aberturas, em especial nas janelas, deve-se reduzir a área destas aberturas expostas às radiações solares.

Dessa forma, justifica-se o uso de sombreamentos das janelas por meio de brises, conforme descritos no item 2.2.5 deste trabalho e também o uso do beiral, que consiste na construção de anteparos verticais e horizontais na envoltória da janela.

Para o estudo de comportamento destas medidas, foram admitidos brises constituídos de quatro painéis horizontais e beiral com projeção de 0,50 m.

Nas figuras 41 e 42 encontram-se a representação do Design Builder para o beiral e para os brises, respectivamente.



Figura 41 - Fenestraion aplicado na casa padrão - Vistas externa e interna



Figura 42 - Brises aplicados na casa padrão - Vistas externas e internas

4.4.1 Resultados para os brises

As figuras 43 e 44 apresentam o ganho de energia proveniente das atividades e ocupação, iluminação e também provenientes da radiação solar, para a Design Week de inverno e para a Design Week de verão, respectivamente

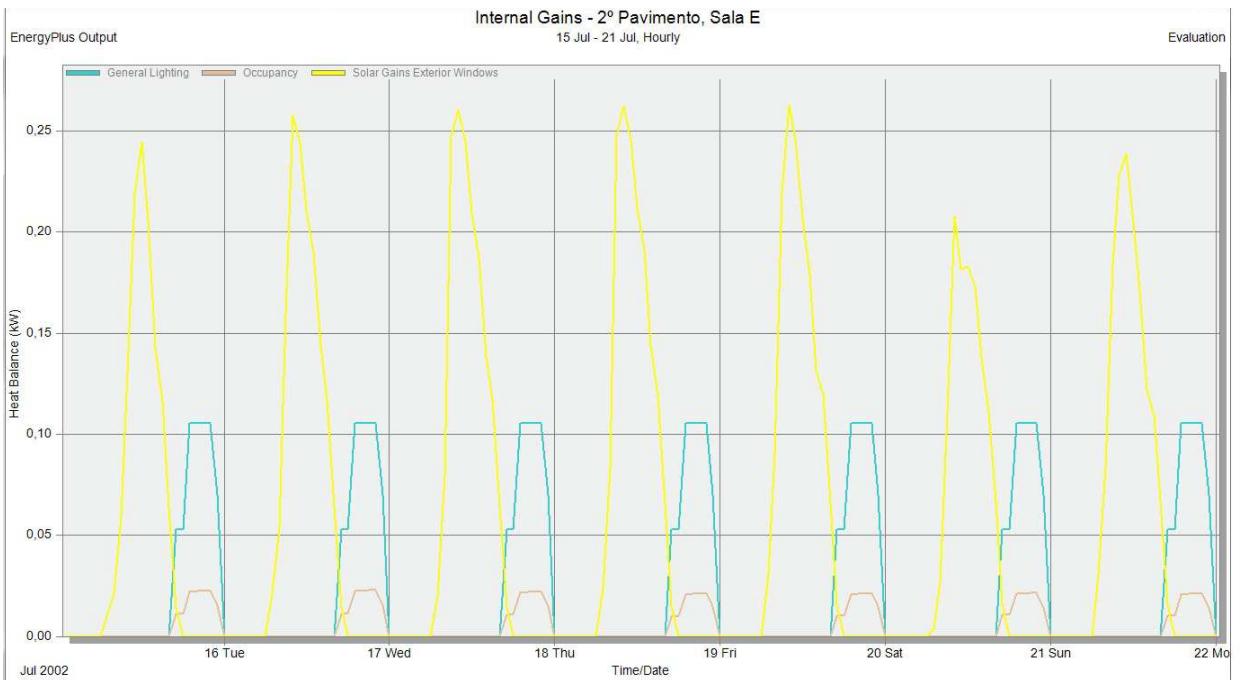


Figura 43 - Ganho de energia interna da sala da casa padrão com brise para Design Week de inverno

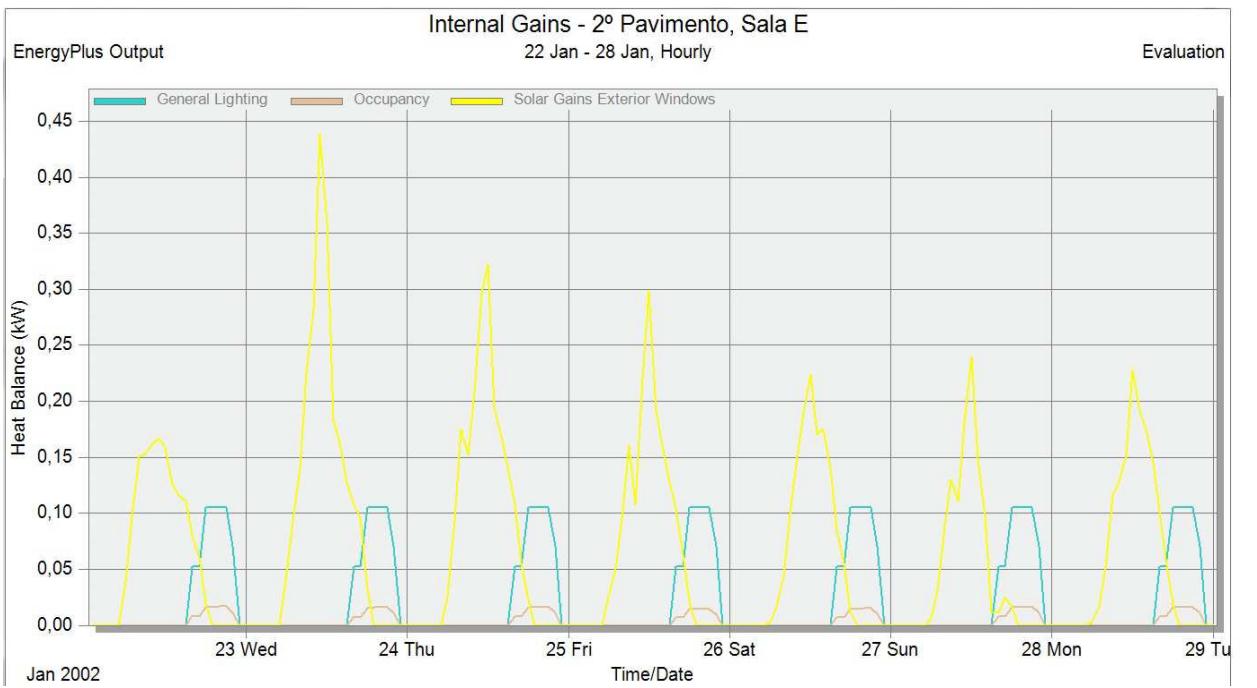


Figura 44 - Ganho de energia interna da sala da casa padrão com brise para Design Week de verão

Nas figuras 45 e 46 encontram-se as temperaturas da sala de estar para a condição padrão da casa sobreposta para a Design Week de inverno e para a Design Week de verão, respectivamente.

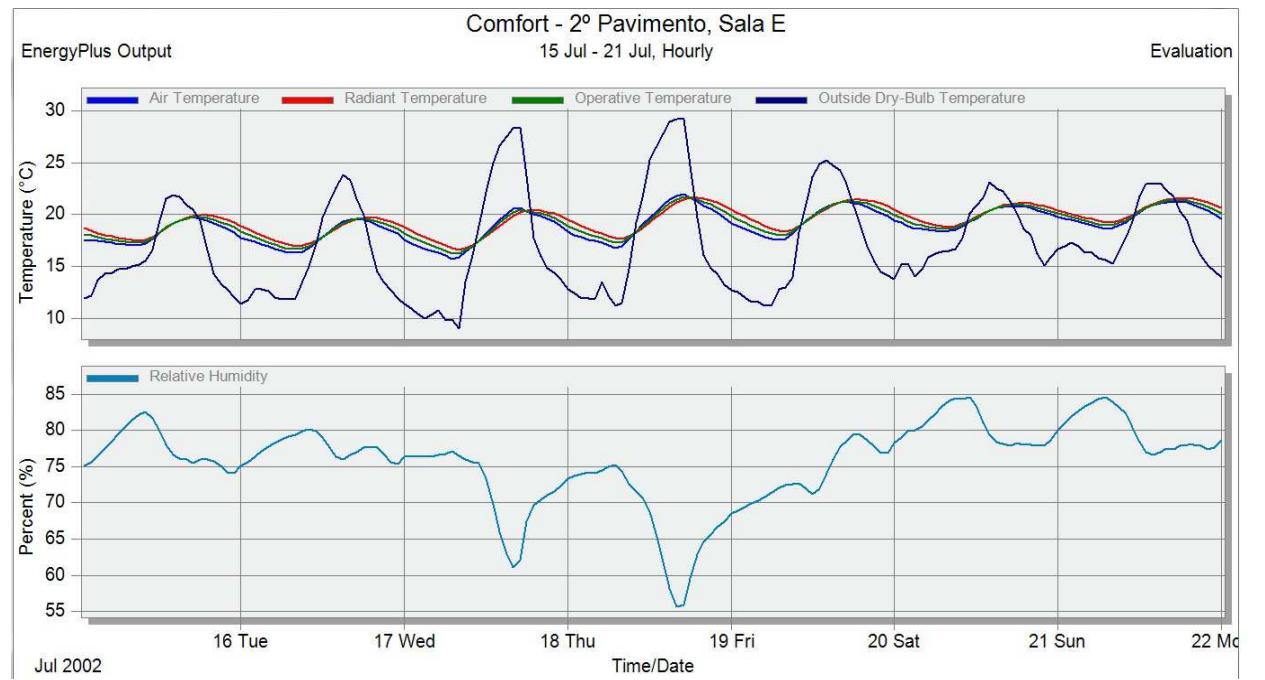


Figura 45 - Temperatura interna da sala da casa padrão com brise para Design Week inverno

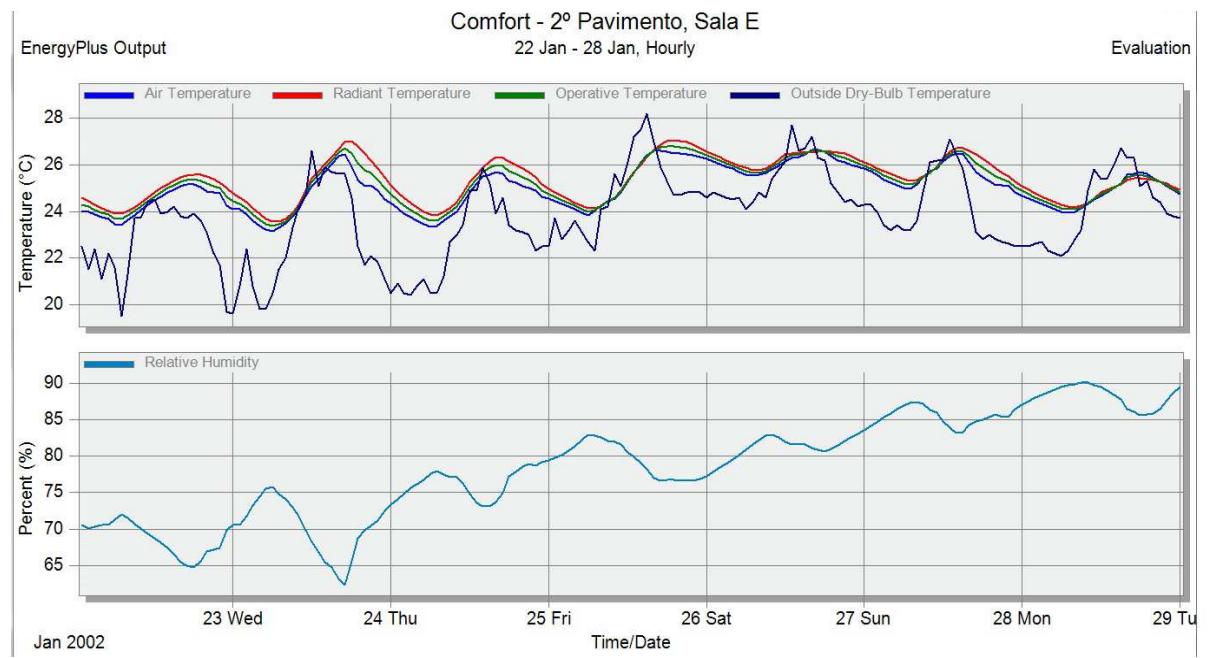


Figura 46 - Temperatura interna da sala da casa padrão com brise para Design Week de verão

4.4.2 Resultados para o beiral

As figuras 47 e 48 apresentam o ganho de energia proveniente das atividades e ocupação, iluminação e também provenientes da radiação solar, para a Design Week de inverno e para a Design Week de verão, respectivamente

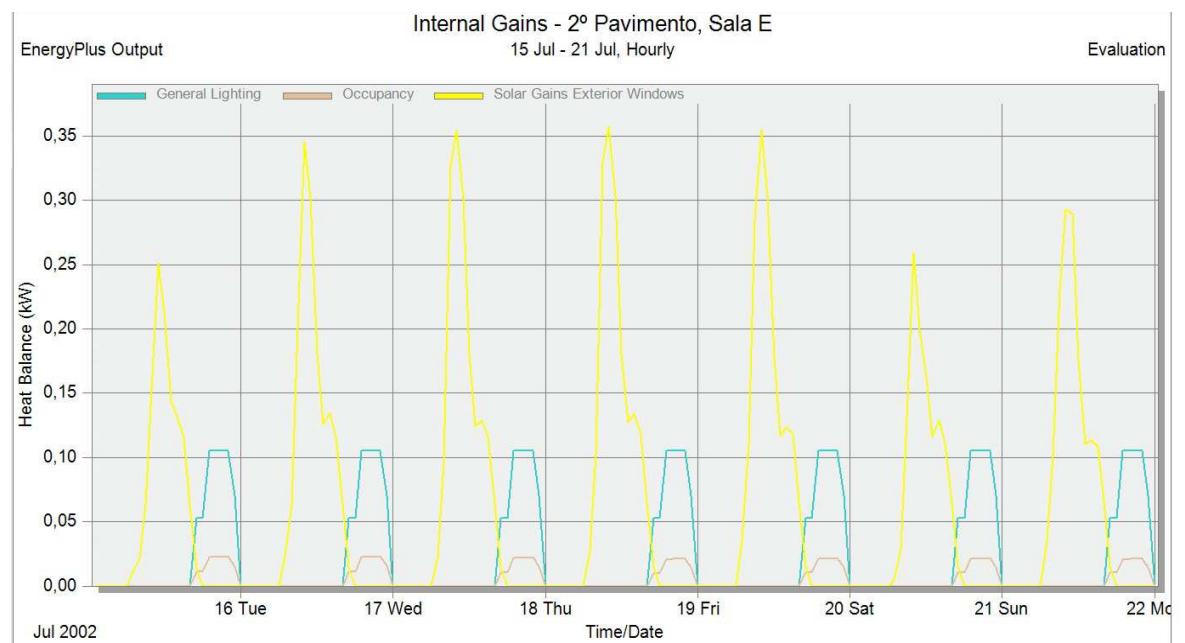


Figura 47 - Ganho de energia interna da sala da casa padrão com beiral para Design Week de inverno

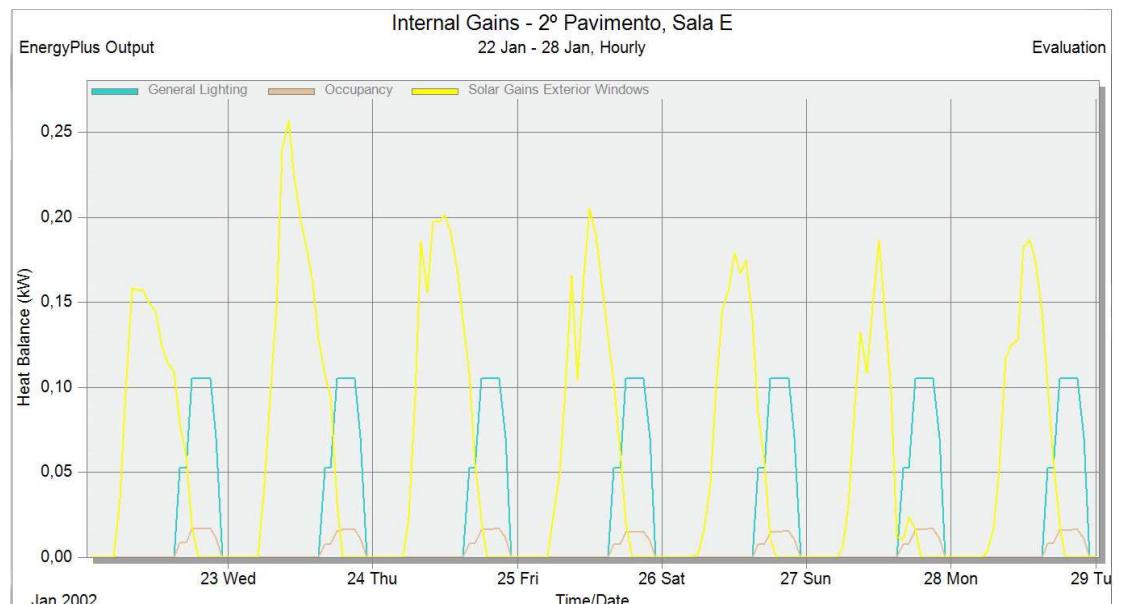


Figura 48 - Ganho de energia interna da sala da casa padrão com beiral para Design Week de verão

Nas figuras 49 e 50 encontram-se as temperaturas da sala de estar para a condição padrão da casa sobreposta para a Design Week de inverno e para a Design Week de verão, respectivamente.

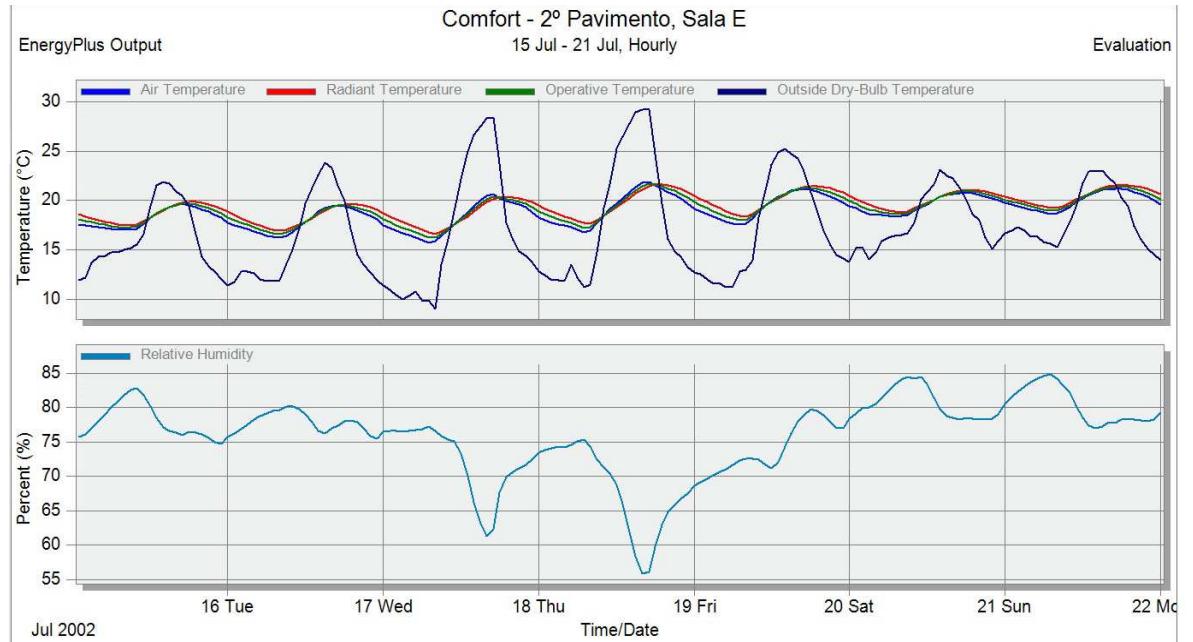


Figura 49 - Temperatura interna da sala da casa padrão com beiral para Design Week de inverno

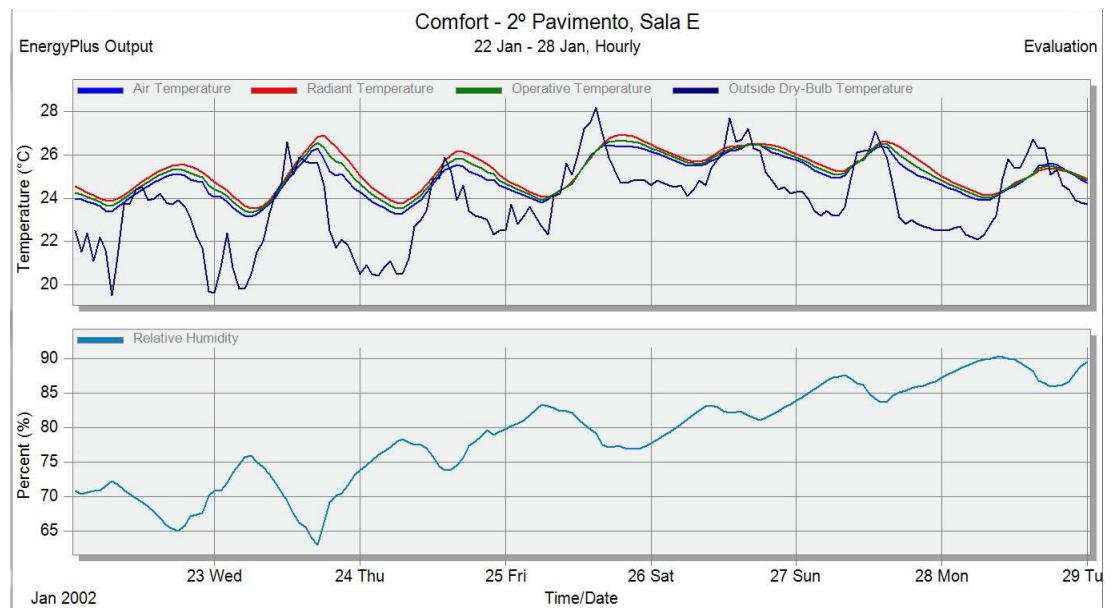


Figura 50 - Temperatura interna da sala da casa padrão com beiral para Design Week de verão

4.4.3 Análise dos resultados

A partir dos gráficos acima, é possível notar que o uso do beiral de 0,50 m permite reduzir de 30% a 50% os valores de energia solar recebida pela casa.

Os resultados apresentados pelo brise se assemelham aos do beiral e, portanto, possuem a mesma análise.

Em função dos altos custos envolvendo a solução com brises, o grupo deu preferência para a aplicação de beiral como forma de redução da área das aberturas atingida por radiação solar.

4.5. Simulação com isolamento

Para a modelagem da condição de isolamento, é adicionada uma camada de Expanded Polystyrene (EPS), usualmente conhecido como isopor, dentro dos sistemas de vedação externa vertical e horizontal.

Para as paredes externas foi adotada uma espessura de 0,02 m de EPS enquanto que para a laje de cobertura e a laje do térreo foi adotada uma espessura de 0,05 m.

As de espessura dos sistemas de vedação, bem como os seus valores de U-Value e R-Value são apresentados na Tabela 11 - Tabela de espessuras e transmitância térmica para os sistemas de vedação com isolamento abaixo.

Tabela 11 - Tabela de espessuras e transmitância térmica para os sistemas de vedação com isolamento

	Parede externa	Parede interna	Piso	Laje da cobertura	Laje do térreo
Camada 1 - m	Argamassa 0,02	Gesso acartonado 0,025	Gesso 0,02	Gesso 0,02	Argamassa 0,02
Camada 2 - m	EPS 0,02	Ar 0,01	Laje 0,2	Laje 0,2	Laje 0,2
Camada 3 - m	Bloco 0,09	Gesso acartonado 0,025	Argamassa 0,01	EPS 0,05	EPS 0,05
Camada 4 - m	Argamassa 0,02		Cerâmica 0,05	Argamassa 0,01	Argamassa 0,01
Camada 5 - m	Pintura externa 0,001			Rev. Asfáltico 0,01	Cerâmica 0,05
U-Value - W/(m ² .K)	1,24	1,92	2,07	0,61	0,53
R-Value - m ² .K/W	0,81	0,52	0,48	1,63	1,90

4.5.1 Resultados

As figuras 51 e 52 apresentam o ganho de energia proveniente das atividades e ocupação, iluminação e também provenientes da radiação solar, para a Design Week de inverno e para a Design Week de verão, respectivamente.

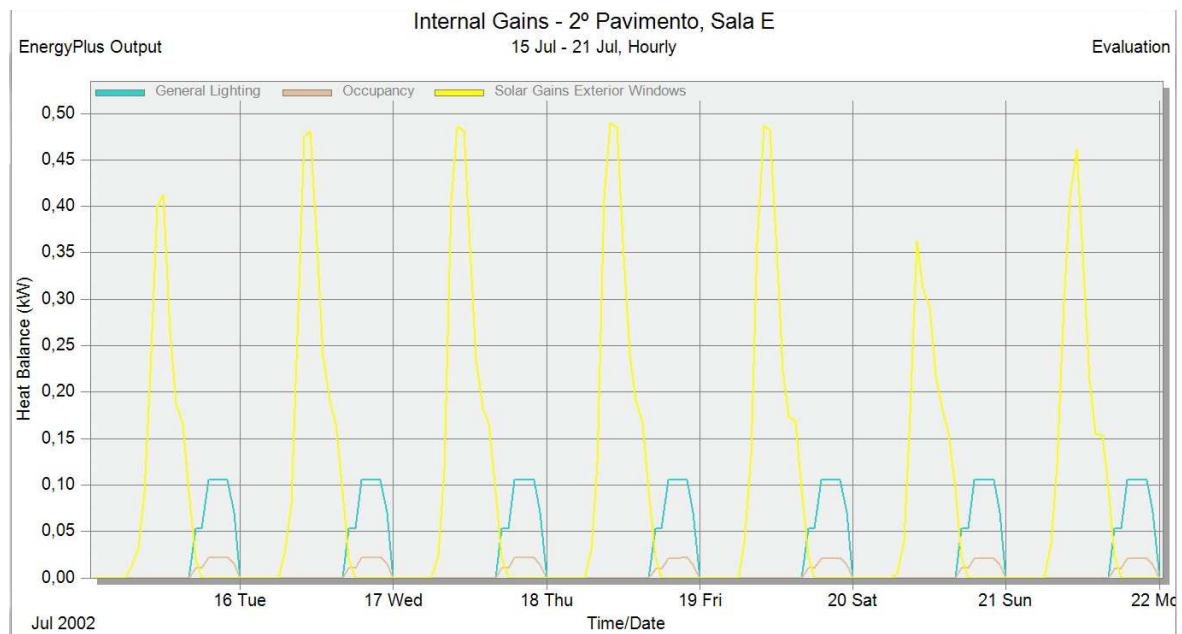


Figura 51 - Ganho de energia interna da sala da casa padrão com isolamento para Design Week de inverno

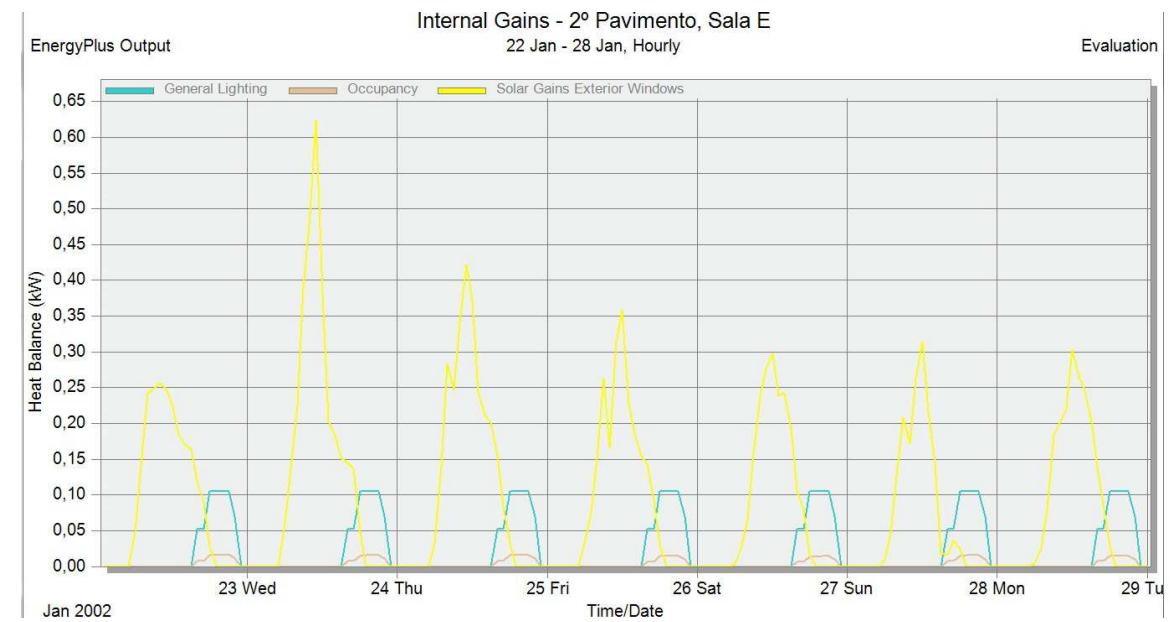


Figura 52 - Ganho de energia interna da sala da casa padrão com isolamento para Design Week de verão

Nas figuras 53 e 54 encontram-se as temperaturas da sala de estar para a condição padrão da casa sobreposta para a Design Week de inverno e para a Design Week de verão, respectivamente.

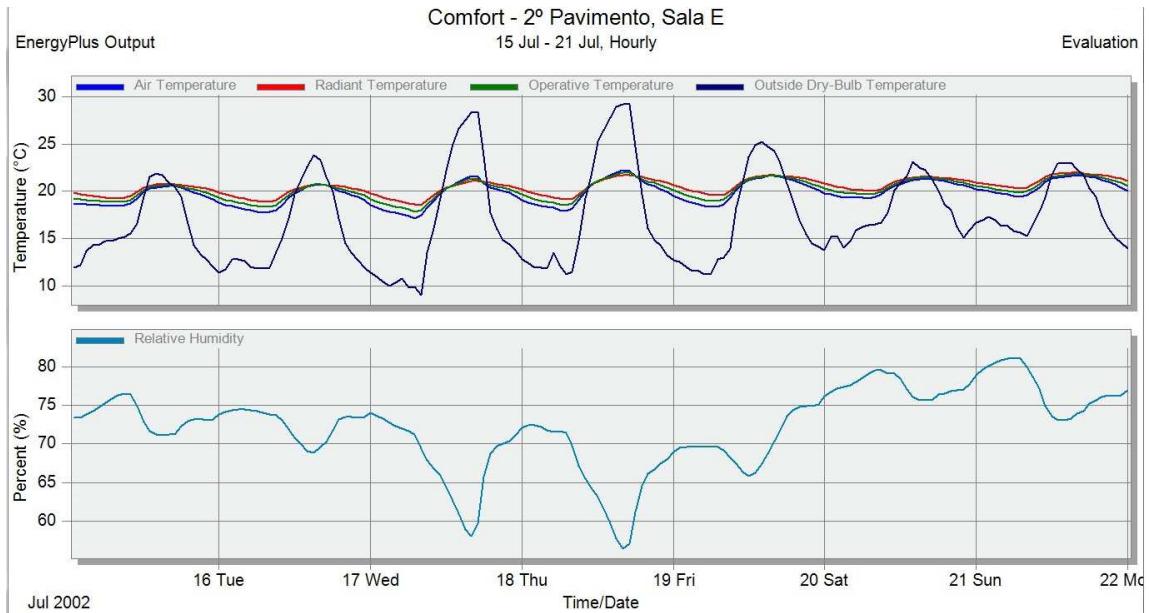


Figura 53 - Temperatura interna da sala da casa padrão com isolamento para Design Week de inverno

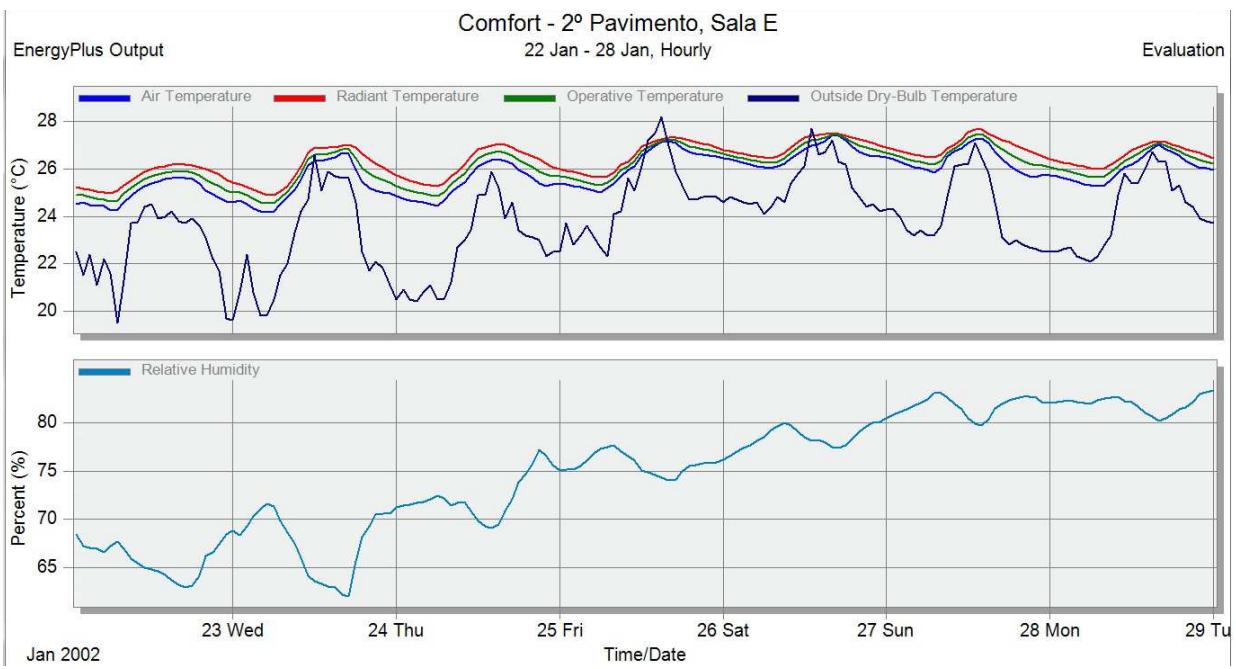


Figura 54 - Temperatura interna da sala da casa padrão com isolamento para Design Week de verão
Como resultado da simulação do isolamento, nota-se que ocorre um aumento de temperatura, tanto no inverno quanto no verão o que pode ser agradável no inverno, porém indesejável no verão.

4.6. Simulação para a combinação de isolamento e beiral

Esta alternativa tem como proposta demonstrar o efeito da combinação entre duas estratégias distintas, uma visando à diminuição da área de incidência de radiação solar sobre as aberturas e a outra adicionando isolamento de EPS.

Dessa forma, espera-se adaptar a solução tanto para o inverno quanto para o verão.

4.6.1 Resultados

As figuras 55 e 56 apresentam o ganho de energia proveniente das atividades e ocupação, iluminação e também provenientes da radiação solar, para a Design Week de inverno e para a Design Week de verão, respectivamente

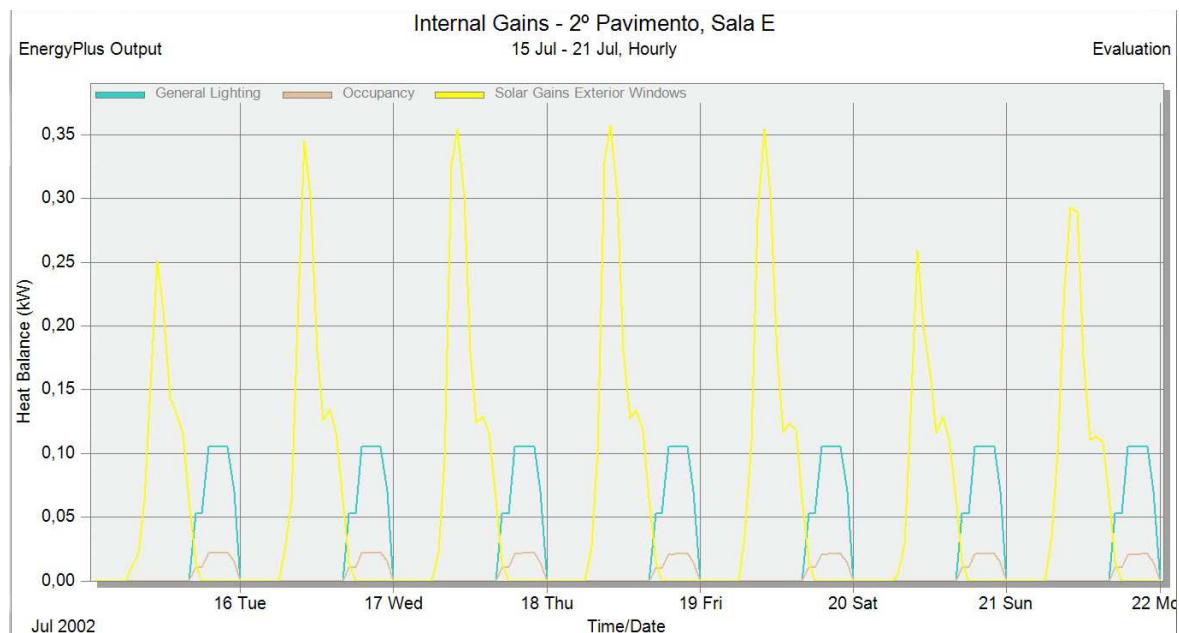


Figura 55 - Ganho de energia interna da sala da casa padrão com isolamento e beiral para Design Week de inverno

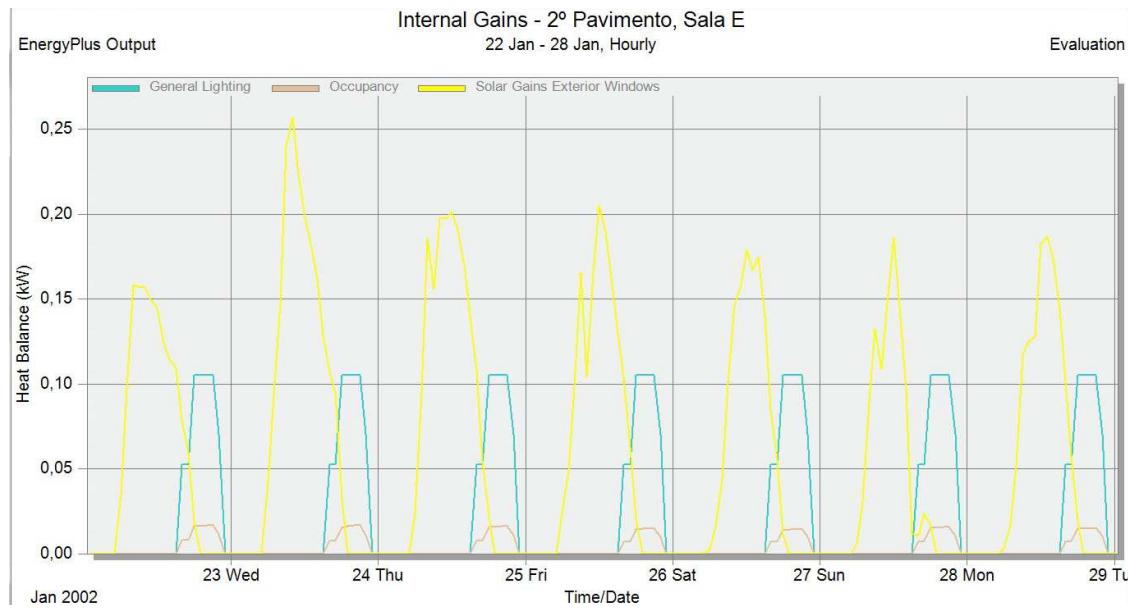


Figura 56 - Ganho de energia interna da sala da casa padrão com isolamento e beiral para Design Week de verão

Nas figuras 57 e 58 encontram-se as temperaturas da sala de estar para a condição padrão da casa sobreposta para a Design Week de inverno e para a Design Week de verão, respectivamente.

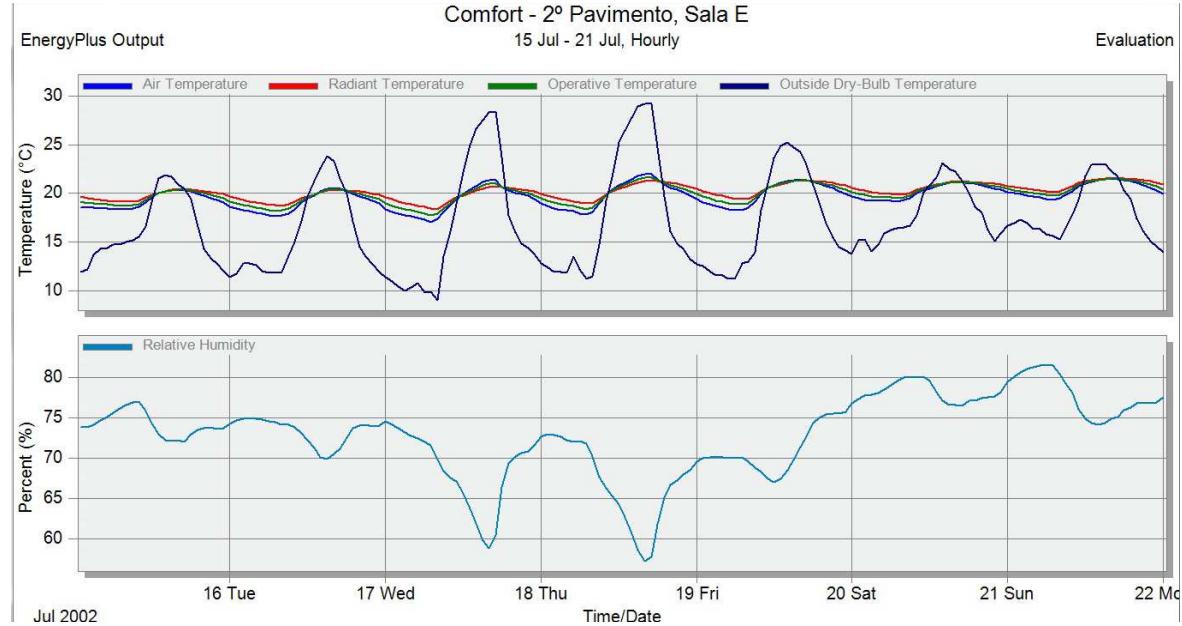


Figura 57 - Temperatura interna da sala da casa padrão com isolamento e beiral para Design Week de inverno

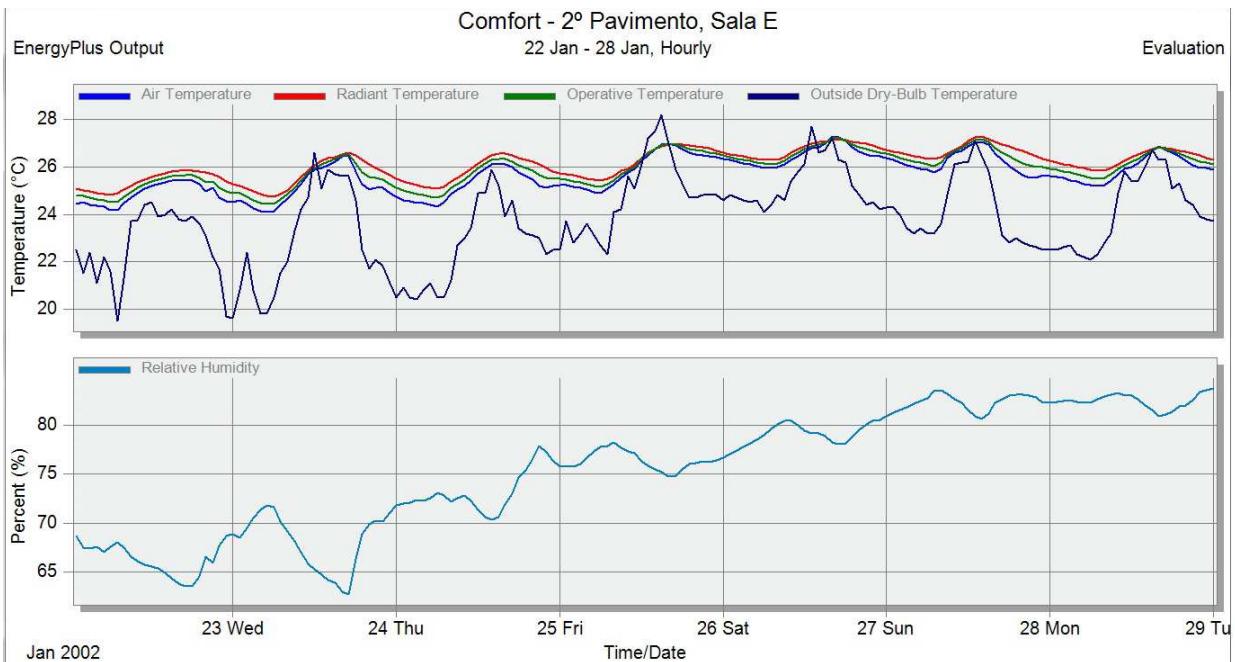


Figura 58 - Temperatura interna da sala da casa padrão com isolamento e beiral para Design Week de verão

Com base nos dados de saída da simulação, foi possível elaborar a Tabela 12 que representa a variação da porcentagem da temperatura dentro da zona de conforto, considerando uma zona entre 19°C e 22°C para o inverno e 23°C e 26°C para o verão.

Tabela 12 - Variação da porcentagem da temperatura dentro da zona de conforto para a situação de isolamento e beiral

	Fenestration	Isolamento	Combinação Simulada	Combinação Somada
Verão	5,90%	-14,90%	-8,50%	-9%
Inverno	-7,10%	14,90%	13,10%	8%
Média no ano	-0,70%	0,00%	2,30%	-0,70%

Entendo-se por combinação simulada os resultados obtidos pela simulação das duas alternativas combinadas através do EnergyPlus e combinação somada a simples soma dos resultados obtidos da simulação separada das alternativas propostas

Para a condição de verão, nota-se que os valores percentuais para a combinação simulada e para a combinação somada são muito próximos, ou seja, o efeito positivo do beiral impedindo o sol de entrar no edifício, e o efeito negativo do isolamento que impede o calor de sair do edifício são realmente somados.

Para a condição de inverno, a variação percentual da combinação simulada é muito superior à combinação somada, o que demonstra que o efeito de isolamento se sobrepõe ao efeito do beiral.

Conclui-se, nota-se que o uso combinado das duas alternativas torna-se favorável, especialmente para o inverno. Isto porque a variação da porcentagem média no ano das temperaturas dentro da zona de conforto é a única que se mostrou positiva (+2,3%).

É importante ressaltar que, através das temperaturas obtidas pela simulação é possível notar que a porcentagem de temperatura fora da zona de conforto estabelecida é consideravelmente maior no inverno do que no verão (aproximadamente 20% maior), o que justifica uma estratégia passiva que privilegia o inverno.

Tabela 13 - Porcentagem e horas por dia dentro da zona de conforto para a situação da casa padrão e para a solução combinada

	Padrão	Solução Combinada
Porcentagem dentro da zona de conforto		
Inverno	57%	70%
Verão	78%	70%
Horas dentro da zona de conforto		
Inverno	13,6	16,7
Verão	18,8	16,8

A Tabela 13 indica que a combinação das estratégias equilibra o conforto térmico durante o verão para a Design Week atingindo 70% de permanência dentro da zona de conforto, o que representa um ganho de três horas diárias de conforto durante o inverno.

4.7 Análise econômica

Uma das vantagens de se fazer uso de estratégias passivas é a futura redução do gasto com o fornecimento de energia elétrica. Para se quantificar essa economia para o consumidor realizamos duas novas simulações da casa padrão, onde em

cada caso um mecanismo artificial diferente foi utilizado para procurar se atingir o conforto térmico.

Comparando os dados de energia consumida no ano por cada mecanismo com o ganho percentual de conforto pudemos estabelecer uma relação com a estratégia passiva que combina isolamento e beiral.

Primeiramente foi realizada a simulação da casa padrão com dispositivo de aquecimento e utilização de ventilação natural. Para a segunda simulação foi admitido o caso de ventilação mecânica MVHR (mechanical ventilation with heat recovery). A unidade MVHR é um equipamento de tratamento de ar compacto, que proporciona ventilação eficiente, com recuperação de calor e resfriamento altamente eficientes para os dias quentes de verão.

A partir da simulação no EnergyPlus obtemos a porcentagem de tempo em que o conforto térmico é atingido para cada caso. Estabelecemos, então, o ganho de conforto que cada mecanismo apresenta em relação à casa padrão e a quantidade de horas por dia que esse ganho representa.

O EnergyPlus fornece também a energia total consumida no ano. Adotando-se que o valor pago pelo fornecimento de energia seja R\$0,35/KWh, podemos calcular o custo anual de cada mecanismo, somente sob o aspecto de fornecimento de energia, desconsiderando quaisquer gastos, como por exemplo a manutenção.

A tabela 14 apresenta os resultados encontrados para as economias e ganhos de conforto para ambos os casos estudos em comparação à casa padrão para as estações de inverno e verão. Assim como suas médias anuais.

Tabela 14 - Resultados obtidos para análise da variação de custo entre diferentes soluções

	Inverno			Verão			Média anual		
	Padrão	Aquecedor e ventilação natural	MVHR	Padrão	Aquecedor e ventilação natural	MVHR	Padrão	Aquecedor e ventilação natural	MVHR
Conforto (% de tempo)	55%	61%	63%	74%	78%	98%	65%	70%	81%
Ganho de conforto (em relação à casa padrão)	-	5%	8%	-	3,6%	23%	-	4%	16%
Ganho de conforto (horas/dia)	0	1,29	1,86	0	0,86	5,57			
Energia consumida no ano (kWh)	0	3366	5647,45	0	3366	5647,45			
Preço por ano (R\$ 0,35/kWh)	R\$ 0,00	R\$ 1 178,10	1976,6075	R\$ 0,00	R\$ 1 178,10	1976,6075			

4.7.1 Análise dos resultados obtidos

Como pode ser observado na tabela 14 o uso de MVHR seria o mais aconselhado, desconsiderando os custos, uma vez que este mecanismo atinge os maiores percentuais de conforto, com o mesmo consumo de energia que a combinação aquecedor e ventilação natural. Observamos que no verão o conforto é atingido em 98% do tempo, enquanto no inverno apenas em 63%, porém isso poderia ser solucionado com o uso de uma boa isolamento térmica das paredes, atingindo um elevado desempenho térmico da casa no ano inteiro.

Podemos estabelecer uma relação entre a estratégia que combina isolamento e beiral, analisada no item 4.6 e a utilização da combinação de aquecedor com ventilação natural, uma vez que ambas apresentam uma média de 70% de conforto no ano todo. Verificamos, então, que a utilização do método passivo nos permitiria a economia do valor gasto para se manter a solução artificial, uma vez que as duas apresentam resultados muito próximos, podendo uma ser considerada substituta para a outra. Dividindo o valor de R\$1.178 pelos 6 apartamentos da casa sobreposta, obtemos uma economia de aproximadamente R\$ 196 por ano, por apartamento para a utilização da solução passiva no local de aquecimento com ventilação natural.

Por outro lado comparando a estratégia de isolamento e beiral com o mecanismo de ventilação mecânica MVHR, verificamos que enquanto a ventilação mecânica proporciona um ganho de conforto médio de 16%, o aquecimento com ventilação natural proporciona um ganho médio de 4%, assim como a solução passiva analisada.

Podemos concluir que a solução passiva corresponderia a apenas um quarto do resultado apresentado pela ventilação mecânica MVHR. Considerando uma redução proporcional a essa razão, a economia seria de aproximadamente R\$1.411 por ano para a casa sobreposta (um quarto de R\$5.647), o que corresponde a uma economia de R\$235 por ano, por apartamento.

4.8 Conclusão do estudo

Ficou clara a importância da localização e do desenho inicial do projeto em relação ao seu comportamento térmico, pois através da orientação correta da fachada, uma concepção que privilegie a ventilação cruzada e o tamanho das aberturas resultam em condições de conforto térmico desejáveis.

A compreensão do clima local também demonstrou ter um grande impacto sobre a escolha estratégica da intervenção passiva uma vez que não existe uma solução que seja eficiente durante o ano inteiro.

Conforme notado na Figura 59 cada solução individualmente pode ser mais indicada para uma determinada temporada em detrimento da outra o que nos leva a acreditar que a escolha pela casa padrão é uma boa opção se comparada com a utilização de apenas uma metodologia passiva.

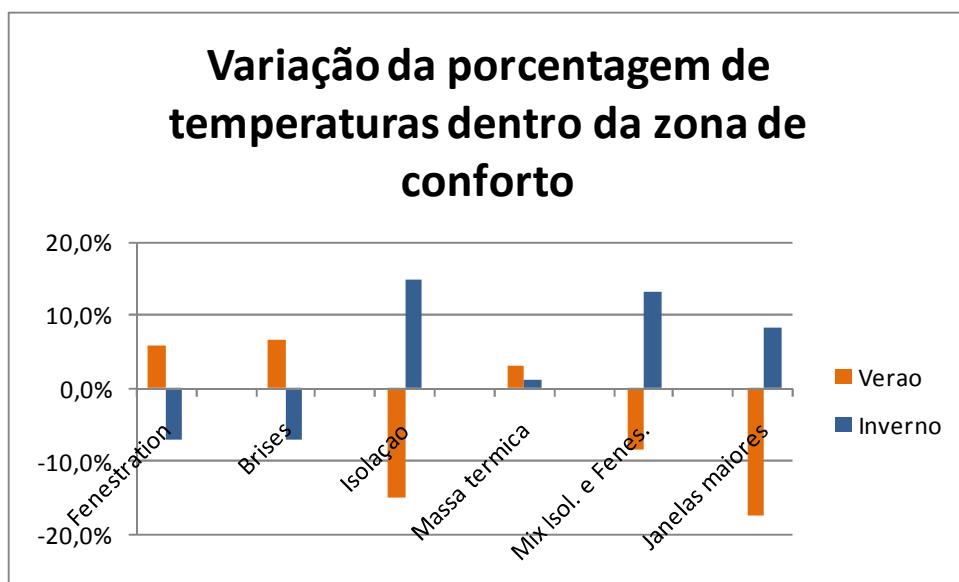


Figura 59 - Variação da porcentagem de temperaturas dentro da zona de conforto

Isso demonstra que o Loteamento Rubens Lara foi concebido com um projeto que prioriza as organizações internas aproveitando a ventilação cruzada, um estudo da orientação da fachada e escolha dos materiais e tamanho das aberturas mais indicados para a situação. Isto ajuda a sustentar a posição de referência que o projeto adquiriu em relação à inovação em sustentabilidade

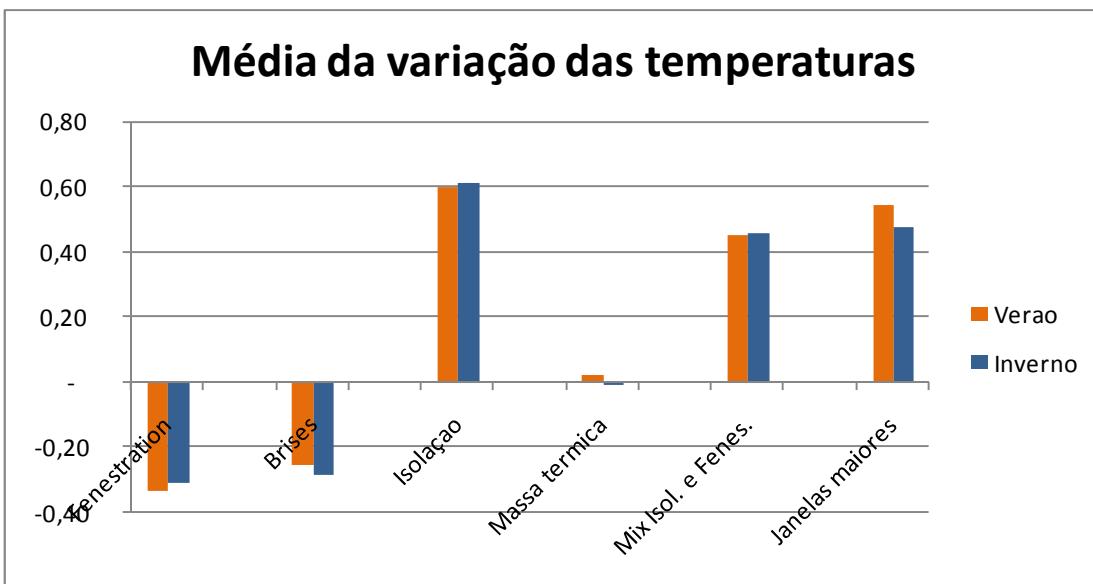


Figura 60 - Média da variação das temperaturas

A média da variação das temperaturas confirma os efeitos mostrados no gráfico anterior. A temperatura do ar na região do estudo, Iguape, fica abaixo da temperatura de conforto durante o inverno e acima da temperatura de conforto durante o verão. Por isso as estratégias que baixam a temperatura interna como os brieses e os beirais são mais adequados para o verão e as estratégias que aumentam a temperatura interna são adequadas para o inverno.