

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Arquitetura

Natália Carolina Sousa Nascentes Marra

**Avaliação do conforto térmico em conjunto habitacional de interesse social –
Simulação computacional com o programa *Solene Microclima***

Belo Horizonte, MG
2017

Natália Carolina Sousa Nascentes Marra

**Avaliação do conforto térmico em conjunto habitacional de interesse social –
Simulação computacional com o programa *Solene Microclima***

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável.

Área de Concentração: Bens Culturais, Tecnologia e Território.

Orientadora: Profa. Dra. Eleonora Sad Assis

Belo Horizonte, MG
2017

AGRADECIMENTOS

À Prof^a. Dr^a. Eleonora Sad de Assis pela dedicada orientação e pelo carinho e atenção dispensados durante todo o desenvolvimento desta dissertação;

Ao laboratório CRENAU, por ter me recebido e por toda ajuda e acolhimento, em especial ao professor Pascal Joanne;

Aos meus amigos e companheiros do laboratório Labcon, pelo apoio;

Ao meu amigo Benjamin Morille, pela atenção com que sempre se dispôs a atender-me;

Às meninas da HSA por estarem do meu lado sempre e acompanharem de perto todo o processo, em especial à Patrícia e à Tatiana que me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho;

Aos meus pais, Paulo e Iris, que sempre me apoiaram em todas as decisões, pela compreensão, dedicação e pelas oportunidades oferecidas;

Ao Luiz, por seu amor, companheirismo e sua presença sempre constante;

Ao meu filho Rafael, pelo amor incondicional.

RESUMO

Pesquisas demonstram que o desconforto térmico gera gasto de energia com resfriamento e/ou aquecimento, bem como queda no rendimento nas atividades humanas. O conforto térmico nas edificações está diretamente ligado ao desempenho térmico e relaciona-se com as propriedades térmicas dos materiais, com o sombreamento, entre outros fatores. As edificações usualmente utilizadas para as habitações de interesse social no Brasil têm demonstrado baixo desempenho térmico, na maioria dos casos devido a predominância de uma produção de baixo custo limitando o investimento em relação aos materiais. Em Belo Horizonte, conjuntos habitacionais de interesse social estão sendo implantados para substituir ocupações irregulares, em função de obras públicas e risco geológico. O objetivo deste trabalho é a avaliação do microclima gerado em um conjunto habitacional de interesse social, avaliando alternativas para a melhoria do conforto térmico interno nas unidades habitacionais e nas áreas comuns externas. A metodologia adotada foi estudo de caso por meio de simulação computacional, com foco na análise da situação atual e cenários que abordam questões como a influência da vegetação no piso, do sombreamento arbóreo e o albedo de superfície das fachadas. O programa utilizado para simulação foi o *Solene Microclima*, que foi validado através de medições em campo e testes estatísticos. Os resultados obtidos das simulações foram comparados com o modelo adaptativo de DeDear e Brager para o conforto interno, e o UTCI (Índice de conforto térmico Universal) para o exterior, calculados com base nas variáveis de resposta das simulações, tais como temperatura e umidade do ar, temperatura radiante e velocidade do vento. Verificou-se que os cenários de vegetação e alteração do albedo influenciaram os resultados de conforto térmico interno e externo no conjunto habitacional, principalmente por meio do sombreamento em áreas que recebem radiação solar direta. Contudo nota-se uma limitação na proposta do posicionamento das vegetações, bem como nas escolhas das espécies devido ao espaço restrito entre as edificações. Os resultados permitiram concluir, portanto, a importância da vegetação como estratégia de conforto e melhoria do desempenho térmico das edificações, a ser considerada ainda na fase de projeto.

Palavras chave: Conforto térmico. Índice de conforto térmico. Simulação do microclima

ABSTRACT

Research findings show that thermal discomfort results in energy expenditure for cooling and/or heating, in addition to a decrease in the output of human activities. The thermal performance of buildings is directly linked to thermal comfort and is related to the thermal properties of the materials, shading, and other factors. In order to demand and standardize parameters for construction, the performance standard NBR 15575 came into force in 2013. Among other directions, it lays down the guidelines for thermal performance of multiple-floor residential buildings. Due to public works and geological risks, housing complexes are being implemented in Belo Horizonte in order to replace occupations. They integrate the urban fabric on account of their number and the space they occupy. The aim of this work was to evaluate the microclimate generated in a social-interest housing complex and to investigate alternatives to improve the internal thermal comfort of residential units, as well as of their external common areas. The methodology adopted was based on a computer simulation, analysing the current situation and scenarios that take into consideration aspects such as the influence of vegetation, tree shading, and the albedo of surface of facades. The programme used to create the simulations was *Solene Microclima*, which was developed by the CRENAU laboratory (France) and validated through field measurements and statistical tests. The results obtained from the simulations were compared to internal and external thermal comfort indexes based on the variables in the simulated answers, such as air temperature and humidity, radiant temperature, and wind speed. It was observed that vegetation scenarios and albedo changes affected the results of internal and external thermal comfort in the housing complex, particularly when there were shading areas receiving direct solar radiation. However, there was a limitation regarding the proposed positioning of vegetation, as well as the choice of species, due to the restrict space between the buildings. Therefore, the importance of vegetation as a strategy for comfort and improvement of thermal performance of buildings should be considered still at the project phase.

Key words: Thermal comfort. Thermal comfort index. Building simulation

LISTA DE SÍMBOLOS

A_t	Amplitude térmica anual na superfície	[°C]
A_e	Área da abertura de entrada	[m ²]
A_s	Área da abertura de saída	[m ²]
A_0	Área equivalente das aberturas	[m ²]
BOC	Balanço de radiação de Ondas Curtas	[W.m ²]
BOL	Balanço de radiação de Ondas Longas	[W.m ²]
c	Calor específico	[J/(kg.K)]
C_e	Capacidade térmica da camada externa	[J/K]
C_i	Capacidade térmica da camada interna	[J/K]
A	Coeficiente adimensional em função da velocidade do ar	-
$\bar{\alpha}$	Coeficiente de absorção da radiação solar	-
f	Coeficiente de absorção da solução	[cm ⁻¹]
a_k	Coeficiente de absorção para radiação de ondas curtas	-
H_c	Coeficiente de convecção	[W/m ² °C]
h_{cg}	Coeficiente de convecção do globo negro	[Wm ² °K ⁻¹]
C_a	Coeficiente de perda de carga por ação dos ventos	-
C_e	Coeficiente de pressão da abertura de entrada de ar	-
C_s	Coeficiente de pressão da abertura de saída de ar	-
α	Coeficiente de reflexão da radiação solar (Albedo)	-
τ	Coeficiente de transparência quanto a radiação solar	-
co	Coeficiente de solubilidade	[g/100g, 100ml]
U	Coeficiente global de transferência de calor	[W/ (m ² .K)]
J	Coeficiente relacionado a temperatura da base das nuvens	-
λ	Condutividade térmica	[W/(m.K)]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann - 5,6697x10 ⁻⁸	[Wm ⁻² K ⁻⁴]
Q_{atm}	Contra radiação atmosférica	[W.m ⁻²]
ρ	Densidade de massa aparente	[kg/m ³]
S_{str}	Densidade do fluxo radiante médio	[W.m ⁻²]
t_0	Dia do ano relacionado às ondas térmicas na superfície	[0-365]
α_s	Difusividade térmica do solo	[m ² /j ⁻¹]
N	Duração astronômica do período diurno em horas.	[1/horas]

n	Duração do brilho solar observado em horas	[1/horas]
ϵ_a	Emissividade atmosférica	-
ϵ_p	Emissividade do corpo negro	-
ϵ_g	Emissividade do globo negro	-
e	Espessura	[m; cm]
F_i	Fator angular	[°]
F_{ij}	Fator de forma	-
WF	Fator de ponderação para cada variável x	-
ϕ_v	Fluxo ou vazão de ar pela ação dos ventos	[m ³ /s]
Φ_{s-e}	Fluxo solar absorvido pela superfície exterior das paredes	[W.m ⁻²]
Φ_{s-i}	Fluxo solar interno transmitido e absorvido pela superfície	[W.m ⁻²]
Φ_{IR}	Fluxo total trocado entre a atmosfera e as superfícies urbanas	[W.m ⁻²]
ne	Fração de nebulosidade	-
ω	Frequência de variação anual	[dia ⁻¹]
CDF_m	Função de distribuição acumulada do mês “m” de todos os anos	-
$CDF_{y,m}$	Função de distribuição acumulada do mês m do ano y	-
x	Índice utilizado para as variáveis meteorológicas	-
R_g	Irradiância solar Global	[W .m ²]
R_o	Irradiância solar global diária no topo da atmosfera	[MJ.m ⁻² dia ⁻¹]
e_l	Logaritmo Natural de Euler	-
$\bar{x}$	Média aritmética dos valores medidos	-
$\bar{y}$	Média aritmética dos valores estimados.	-
T_e	Média da temperatura do ar externo	[°C]
t	Número de horas do ano	-
N_n	Número de observações	-
R	Número de pontos da CDF utilizado.	-
M	Número de variáveis meteorológicas consideradas	-
e_a	Pressão de saturação do vapor d’água	[hPa]
E_s	Pressão de vapor d’água	[hPa]
z_d	Profundidade de amortização	[m]
Z	Profundidade do solo	[m]
P	Quantidade de respondentes por cada faixa	-
R_{c-e}	Resistência convectiva entre tse e ta-e	[m ² .°C.W ⁻¹]

Rc-i	Resistência convectiva entre tsi e ta-i	[m ² .°C.W ⁻¹]
Ki	Radiação de ondas curtas	[W.m ⁻²]
L↓	Radiação de ondas longas	[W.m ⁻²]
L↓(0)	Radiação de ondas longas para céu claro	[W.m ⁻²]
Qsup	Radiação emitida pela superfície	[W.m ⁻²]
Rr-i	Resistência radiativa entre tsi e tmr-i	[m ² .°C.W ⁻¹]
Rdifusa	Radiação solar difusa	[W.m ⁻²]
Rdireta	Radiação solar direta	[W.m ⁻²]
R	Resistência térmica total	[m ² .K/W]
Rj	Resistencia térmica da camada j da parede	[m ² .K/W]
Io	Radiação total incidente	[kw h/m ²]
I	Radiação total transmitida	[kw h/m ²]
Tx	Taxa de renovação do ar	[m ³ /h]
met.	Taxa metabólica	[1 met =58.2 W/m ²]
Tn	Temperatura de conforto	[°C]
Tg	Temperatura de globo	[°K]
tse	Temperatura de superfície externa	[°C]
tsi	Temperatura de superfície interna	[°C]
Ta	Temperatura do ar	[°K]
ta	Temperatura do ar	[°C]
ta-e	Temperatura do ar externo	[°C]
ta-i =	Temperatura do ar interno	[°C]
tm	Temperatura média anual	[°C]
Tmr	Temperatura média radiante	[°K]
tmr	Temperatura média radiante	[°C]
tmr-i	Temperatura média radiante interna	[°C]
To	Temperatura operativa	[°C]
T	Transmitância óptica	[%]
UR	Umidade relativa	[%]
yi	Valores estimados	-
xi	Valores medidos	-
Va	Velocidade do ar	[m/s]
Va1	Velocidade do ar a 10 de altura	[m/s]

Vg	Velocidade do ar na altura do globo	[m/s]
V	Velocidade do vento externo resultante na abertura	[m/s]
vol	Volume	[m ³]

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Déficit Habitacional no Brasil	20
Figura 2 - Unidades Habitacionais (UHs) realizadas em Belo Horizonte	21
Figura 3 – Edifícios estudados avaliados pelo RTQ-R	22
Figura 4 - Escalas climáticas.....	29
Figura 5 - Situação real, propostas 1 e 2 respectivamente.	32
Figura 6- Balanço em superfície vegetada.....	36
Figura 7- Trocas por meio da temperatura média radiante entre um ambiente real e o corpo humano e entre um ambiente imaginário e o mesmo corpo.....	39
Figura 8- Trocas térmicas nas árvores.....	45
Figura 9 - Trocas térmicas entre o corpo humano e o ambiente	49
Figura 10- Definição da velocidade máxima do ar	52
Figura 11 - Limites de temperatura operativa interna aceitáveis em ambientes naturalmente condicionados.....	54
Figura 12 – Exemplo de camadas contínuas em uma parede	60
Figura 13 - Refletâncias de telhas de concreto pintadas com tinta padrão e com tinta seletiva.	61
Figura 14 -Interreflexão provocada pela rugosidade do material	62
Figura 15 - Interreflexões devido a ondulação	62
Figura 16- Amostras de telhas de fibrocimento analisadas.....	64
Figura 17 - Situações a serem simuladas com o Solene Microclima	70
Figura 18- Caso atual e árvores maduras, temperatura no solo do edifício	70

Figura 19 - Caso atual e árvores maduras, avaliação da temperatura na rua estudada	71
Figura 20 - Caso atual e árvores maduras, porcentagem de zonas externas confortáveis	71
Figura 21 - Agregação dos fluxos das faces externas verso um nó de temperatura de parede único interno.....	73
Figura 22 - Abóboda Celeste - Solene Microclima	75
Figura 23- Reflexão dos diferentes elementos da superfície do ambiente	76
Figura 24 - Distribuição do fluxo entre superfícies no programa Solene Microclima .	76
Figura 25 - Relação entre o fator de forma, a distância e a geometria.....	77
Figura 26 - Relação entre o fator de forma, a distância e a geometria.....	77
Figura 27 - História do Solene Microclima.....	78
Figura 28 - Resumo das trocas realizadas no Solene Microclima.....	79
Figura 29- Modelização edifício comum (d), paredes e cobertura.....	80
Figura 30- Modelização edifício térmico (a), paredes e cobertura.....	81
Figura 31- Modelo dos pavimentos intermediários (b)	82
Figura 32- Modelização edifício térmico (c), piso do primeiro pavimento	84
Figura 33- Modelo paredes internas.....	84
Figura 34 - Modelo do solo.....	85
Figura 35 - Vista superior de uma modelização no sketchup	86
Figura 36 - Interface Gmsh.....	87
Figura 37 - Código interno Solene Microclima – Família	88

Figura 38 – Esquema dos dados de entrada no programa Solene Microclima	89
Figura 39 - Arquivos de saída no programa Solene Microclima	90
Figura 40 – Arquivos com os resultados de temperatura no Solene Microclima.	90
Figura 41- Interface do programa Paraview	90
Figura 42 - Etapas metodológicas do trabalho	91
Figura 43 - Projeto da ampliação da Avenida Pedro II e remoção da Vila São José	92
Figura 44 - Vila São José antes e depois do reassentamento - Imagem Satélite 2002 e 2015	93
Figura 45- Área de intervenção Vila São José (estudo de caso).....	93
Figura 46 - Planta do pavimento tipo.....	94
Figura 47- Tipologia de edifícios 2 e 3 quartos.....	95
Figura 48 - Exemplo de tipologia construída	96
Figura 49 - Composição paredes externas da tipologia de edifícios	96
Figura 50- Composição da cobertura da tipologia de edifícios SUDECAP	97
Figura 51- Cobertura de tipologia existente	97
Figura 52 - Dimensionamento das malhas.....	98
Figura 53 - Malha no edifício central	99
Figura 54 - Faces analisadas (coloridas)	99
Figura 55 – Etapas de validação do programa Solene Microclima.....	102
Figura 56- Abrigo do CR3000 Microllogger	103
Figura 57- Localização do HOBO U12-012 no ambiente interno	103

Figura 58 - Posição do medidor externo e interno.....	104
Figura 59 - Geometria UFMG Simulada.....	104
Figura 60 - Área simulada	108
Figura 61- Representação taludes	108
Figura 62 – Relação altura das espécies arbóreas x 3º pavimento.....	108
Figura 63 - Área onde foi analisada o índice UTCI, a temperatura do ar interno e a temperatura média radiante interna	109
Figura 64 - Cenários A e B	112
Figura 65 - Cenários C e D.....	112
Figura 66 - Cenários E e F	113
Figura 67 - Relação entre postes e árvores	115
Figura 68 - Parâmetros de implantação da vegetação urbana.....	115
Figura 69 – Solarímetro de Tubo, Delta-T TSL	116
Figura 70 - Registrador Delta DL2 Datalogger	116
Figura 71- Área UTCI estudada	119
Figura 72- Seleção da janela do período mais estável.....	120
Figura 73- Período de Temperatura e Umidade relativa estável 21/12 a 24/12	120
Figura 74 - Malha para simulação da temperatura de superfície externa, Situações: 1,2 e 3	123
Figura 75 - Situação 1 – A, 10 e 5 metros	124
Figura 76 - Situação 2, 3 e 4 - A, 10 e 2 metros, 10 e 1 metro, 10 e 0,5 metros.	124

Figura 77 - Situação 1,2,3 e 4 – B, 10/5/2 metros, 10/2/1 metros, 10/2/0,5 metros, 10/0,5/0,25 124

Figura 78 - Comparação entre os cenários A, C, E e F. Temperatura UTCI, por meio de isocurvas 127

Figura 79 -Sem árvores 22/12-15:00.....130

Figura 80- Com árvores 22/12-15:00 130

Figura 81 - Cenário C.....130

Figura 82 - Cenário A 130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Comparativo entre as propriedades térmicas das paredes do edifício e NBR 15575.	22
Tabela 2 - Comparativo entre as propriedades térmicas da cobertura do edifício e NBR 15575.	23
Tabela 3 - Resultados para taxa de renovação do ar, abertura efetiva.....	33
Tabela 4 – Resultados para taxa de renovação do ar, vão de abertura.....	34
Tabela 5- Valores de coeficientes para o cálculo da influência das nuvens.....	38
Tabela 6 - Equações utilizadas para estimar a radiação de onda longa atmosférica	38
Tabela 7- Critérios considerados para a realização das simulações.....	44
Tabela 8 - Coeficiente adimensional para o cálculo de temperatura operativa	51
Tabela 9 - Taxas metabólicas típicas	52
Tabela 10- Faixas de estresse térmico definidas pelo UTCI	55
Tabela 11 - Escalas de conforto UTCI	57
Tabela 12 - Adaptação do índice UTCI proposto por ROSSI et al.,2012	58
Tabela 13- Valores de absorvância para telhas de fibrocimento	64
Tabela 14 - Propriedades térmicas das paredes.....	96
Tabela 15- Propriedade térmica da cobertura.....	97
Tabela 16 - Malha definida para a análise da temperatura de superfície	100
Tabela 17- Malha definida para análise da temperatura interna do ar	101
Tabela 18- Malha definida para análise da temperatura interna do ar	101

Tabela 19- Refletâncias médias por faixa de espectro (%)	110
Tabela 20- Materiais e propriedades considerados nas Simulações	111
Tabela 21 - Materiais e propriedades considerados nas Simulações	111
Tabela 22- Cenários simulados.....	113
Tabela 23 - Resultados dos testes de precisão- Umidade Relativa	114
Tabela 24- Resultados dos testes de precisão - Temperatura do ar.....	114
Tabela 25- Espécies arbóreas utilizadas – Valores de transmitância	117
Tabela 26- Espécies arbóreas analisadas	117
Tabela 27 - Descrição dos cenários simulados - A e C.....	118
Tabela 28 -Descrição dos cenários simulados - E e F	118
Tabela 29 - Media dos dias simulados: 21/12 – 22/12 – 23/12 – 24/12 – Desvio Padrão das médias	121
Tabela 30 Análise dos resultados pelos testes estatísticos de precisão	122
Tabela 31 - Resultados dos testes de precisão.....	122
Tabela 32 -Resultados do refinamento da malha para temperatura da superfície ..	123
Tabela 33- Resultado do refinamento da malha para temperatura do ar interno	125

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Comprimento de ondas longas e curtas	35
Gráfico 2- Temperatura UTCI obtida pela média dos resultados das simulações ao longo do dia em relação à escala UTCI	128
Gráfico 3- Temperatura UTCI obtida pela média dos resultados das simulações ao longo do dia em relação à escala UTCI proposta por ROSSI et al. (2012)	129
Gráfico 4– Verão - Temperatura média do ar externo x Temperatura operativa....	131
Gráfico 5 - Verão - Tempo x Temperatura do ar	132
Gráfico 6 - Inverno - Temperatura média do ar externo x Temperatura operativa .	133
Gráfico 7- Inverno - Tempo x Temperatura do ar	134

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Objetivo geral	24
1.2 Objetivos específicos.....	24
1.3 Estrutura do trabalho	26
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS	26
2.1 Clima Urbano	26
2.2 Variáveis do clima urbano	29
2.2.1 Variáveis atmosféricas.....	29
2.2.2 Variáveis geográficas.....	41
2.3 Vegetação	42
2.3.1 Influência da Vegetação no microclima	42
2.3.2 Relação entre a vegetação e a radiação solar	44
2.3.3 Interação entre a radiação e as árvores - Lei de Lambert e Beer.....	46
2.4 Transferência de calor e trocas térmicas do corpo humano.....	47
2.5 Conforto térmico	49
2.5.1 Temperatura operativa.....	51
2.5.2 Modelo de DeDear e Brager.....	53
2.5.3 UTCI – Índice Universal de conforto térmico	54
2.6 Propriedades térmicas dos materiais.....	59
2.6.1 Transmitância térmica	59
2.6.2 Absortância.....	60
2.6.3 Condutividade térmica.....	64
2.6.4 Calor específico.....	65
2.6.5 Emissividade	65
2.7 Simulação computacional	65
2.7.1 Pesquisa utilizando o programa Solene Microclima	69
3 SOLENE MICROCLIMA	71
3.1 Apresentação do modelo Solene Microclima	71

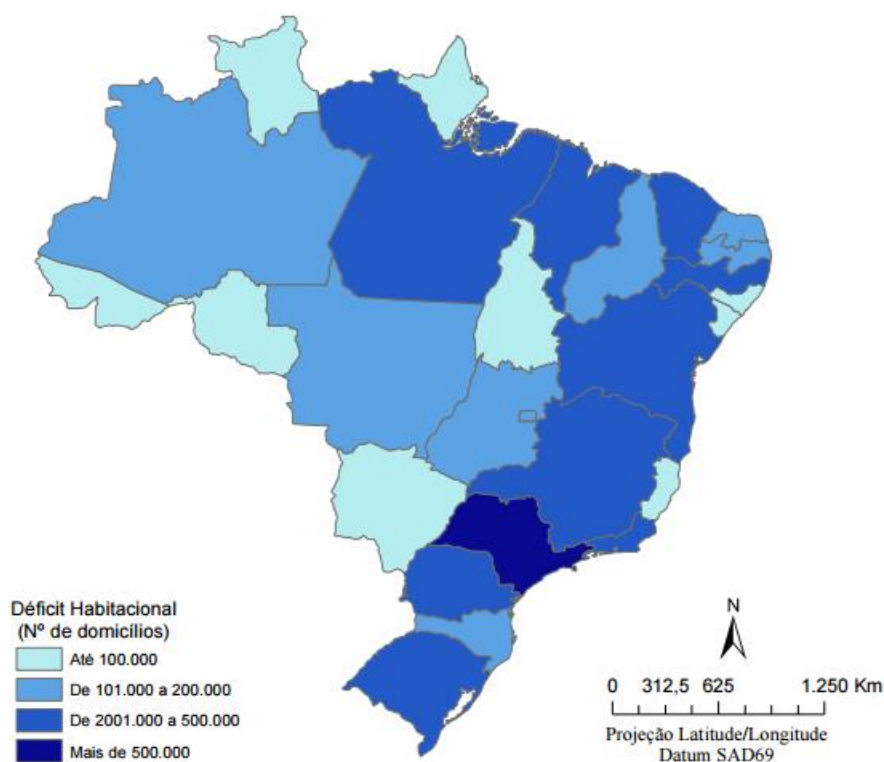
3.2 Modelo térmico do edifício	78
3.3 Geometria.....	86
3.4 Parâmetros de entrada.....	87
3.5 Parâmetros de saída	89
4 MÉTODOS E TÉCNICAS	91
4.1 Método de abordagem geral.....	91
4.2 Pesquisa documental.....	92
4.2.1 Estudo de caso	92
4.3 Modelo computacional.....	98
4.3.1 Refinamento da malha	98
4.3.2 Validação do Modelo – Solene Microclima	101
4.3.3 Simulação de cenários.....	108
4.4 Análise índices de conforto térmico.....	118
5 RESULTADOS.....	120
5.1 Resultados Validação do Programa Solene Microclima	120
5.2 Resultados do refinamento da malha.....	123
5.3 Resultados cenários simulados.....	126
5.3.1 Resultados UTCI.....	126
5.3.2 Resultados Índice adaptativo ASHRAE 55.....	130
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	135
REFERÊNCIAS.....	138

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho buscou avaliar o microclima de um conjunto habitacional de interesse social, verificando alternativas para o aumento do conforto térmico interno nas unidades habitacionais e nas áreas comuns externas.

Segundo pesquisa da Fundação João Pinheiro (2013), existe no Brasil um déficit de aproximadamente 5.846.000 domicílios, do qual 38,4% corresponde à região Sudeste. Em Minas Gerais, este déficit atinge a marca de 494.000 domicílios, dos quais cerca de 140.707 correspondem à região metropolitana de Belo Horizonte. A figura 1 apresenta o déficit habitacional no território brasileiro no ano de 2013, de acordo com pesquisa realizada pela Fundação João Pinheiro.

Figura 1- Déficit Habitacional no Brasil



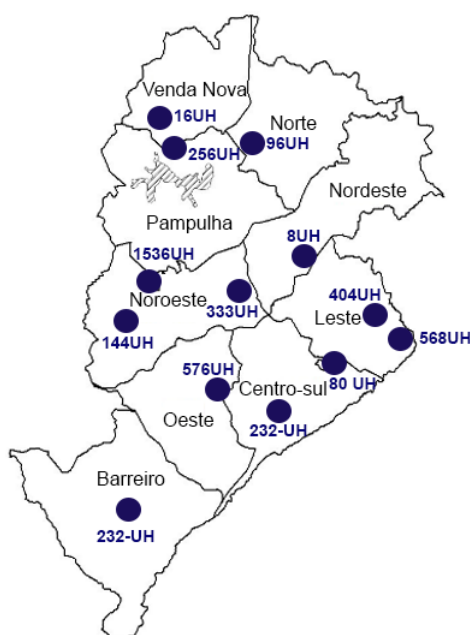
Fonte: FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2013

As edificações usualmente utilizadas para habitações de interesse social no Brasil, têm demonstrado baixo desempenho térmico. Isso ocorre devido a uma padronização nacional desses edifícios, associada à predominância de uma produção de baixo custo, que limita o investimento em relação aos materiais, e, conseqüentemente, gera problemas de desconforto térmico.

Xavier (2008) afirma que o foco em relação à essas edificações é o custo das mesmas, com isso, as características climáticas e ambientais dos locais são comumente ignoradas em fase de projeto.

Em Belo Horizonte, as unidades habitacionais (UHs) fornecidas pela política de habitação social são dirigidas às famílias retiradas de áreas de risco geológico e removidas em função de obras públicas. De interesse coletivo, as UHs constituem parte do Programa de Aceleração do Crescimento do governo federal (PAC), que tem como objetivo acelerar o crescimento econômico do Brasil, investindo na área de infraestrutura, saneamento, habitação, transporte, energia e recursos hídricos. Os edifícios seguem um projeto padronizado e as UHs estão sendo implantadas em diversas regiões da cidade. A figura 2 apresenta algumas das implantações já realizadas em Belo Horizonte.

Figura 2 - Unidades Habitacionais (UHs) realizadas em Belo Horizonte



Fonte: Adaptado PREFEITURA DE BELO HORIZONTE, 2017

Nascentes (2012) realizou um estudo de verificação do atendimento normativo dos edifícios da política de habitação de interesse social em Belo Horizonte, pelas prescrições do RTQ-R (Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética de edificações residenciais) e também pela norma de desempenho NBR 15575. Os resultados demonstraram que, de acordo com os pré-requisitos do RTQ-R, a tipologia com revestimento na cor escura (situação recorrente nestas implantações), seria classificada no último nível de eficiência (E) em todas as Unidades Habitacionais. Além disso, não atende aos requisitos mínimos da norma de desempenho NBR 15575 (2013), uma vez que as propriedades térmicas dos materiais possuem limites diferentes de acordo com o valor da absorvância, como mostram as tabelas 1 e 2.

Figura 3 – Edifícios estudados avaliados pelo RTQ-R



Fonte: AUTORA, 2012

Tabela 1- Comparativo entre as propriedades térmicas das paredes do edifício e NBR 15575.

Ambiente	α (Absortância)	U(Transmitância Térmica) W/m ² .K	Capacidade Térmica kJ/(m ² .K)
Paredes externas edificações de reassentamento	0,7 (absortância definida por NASCENTES, 2012, como cor escura)	U=2,84	166,53
Requisitos mínimos NBR 15575	$\alpha \leq 0,6$	U $\leq$ 3,7	$\geq$ 130
	$\alpha > 0,6$	U $\leq$ 2,5	$\geq$ 130

Fonte: NASCENTES, 2012

Tabela 2 - Comparativo entre as propriedades térmicas da cobertura do edifício e NBR 15575.

Ambiente	α (Absortância)	U(Transmitância Térmica) W/m ² .K	Capacidade Térmica kJ/(m ² .K)
Cobertura edificações de reassentamento	0,7 (absortância definida por NASCENTES, 2012, como cor escura)	U=2,00	299
Requisitos mínimos NBR 15575	$\alpha \leq 0,6$	$U \leq 2,3$	Sem exigência
	$\alpha > 0,6$	$U \leq 1,5$	Sem exigência

Fonte: NASCENTES, 2012

No que se refere ao custo das construções, as edificações de reassentamento em Belo Horizonte não fogem dos padrões usualmente utilizados para habitações de interesse social no Brasil, com isso, torna-se necessário a busca por alternativas visando melhorar o conforto térmico, sem inviabilizar as construções.

As possibilidades de melhoria nas condições de conforto térmico apontadas em estudos relacionados à habitação popular, são normalmente voltadas para estratégias como: Ventilação cruzada, dispositivos de sombreamento, especificação dos materiais a serem utilizados e a orientação solar das unidades habitacionais. Poucos estudos apontam para uma análise das áreas externas das edificações, como por exemplo, a utilização da vegetação como recurso para modificar o microclima em habitações de interesse social.

Na maioria dos conjuntos habitacionais de reassentamento em Belo Horizonte, o sombreamento das áreas externas é proporcionado pelos próprios edifícios e a quantidade de árvores é escassa ou nula. De acordo com Gomes e Amorim (2003), a vegetação é um condicionante fundamental no estudo da temperatura urbana e interfere no conforto térmico em áreas externas e em espaços públicos de lazer.

Outros fatores determinantes para o microclima urbano são os materiais de revestimento do solo, a relação entre as áreas verdes e as áreas pavimentadas, a arborização e a forma e dimensões dos espaços abertos. Segundo Assis (2005), a

área urbanizada, ao modificar certas características da paisagem natural, altera o balanço energético local, causando mudança de comportamento das variáveis climáticas. A importância do estudo das variáveis climáticas, de acordo com Brandão (2009), se manifesta pela relação entre as variações destas nas sensações de prazer, conforto, desconforto e estresse dos usuários.

Diante do exposto, verifica-se a necessidade de uma análise crítica das edificações integrantes dos conjuntos habitacionais de interesse social, com o objetivo de criar uma nova política de construção. A hipótese deste trabalho é que, por meio de um estudo do sistema construtivo, da arborização e do aumento das áreas vegetadas, é possível proporcionar maior conforto térmico para os usuários.

Dentre os recursos para avaliar o desempenho térmico, ainda em fase de projeto, considerando o impacto das condições ambientais e das propriedades térmicas dos materiais nas edificações, destacam-se os programas de simulações computacionais, que possibilita a previsão de cenários futuros. Os primeiros programas de simulação computacional surgiram nos anos 70, em meio à crise de energia, e dentre os programas envolvidos com a simulação computacional aplicada à edificação, pode-se ressaltar os de simulação de escoamento de fluidos (CFD - *Computational fluid dynamics*) e os de simulação energética.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o impacto da vegetação, da alteração do albedo nas superfícies e do sombreamento pela arborização, no conforto térmico dos usuários de um conjunto habitacional de interesse social, por meio de simulação computacional. Outro objetivo, é realizar um estudo aprofundado da ferramenta Solene Microclima, modelo utilizado para as simulações.

1.2 Objetivos específicos

- Validar o modelo Solene Microclima por meio de medições em campo e simulações;

- Realizar monitoramento de temperatura e umidade relativa do ar em área externa na Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), de modo a viabilizar a validação do modelo;
- Realizar monitoramento de temperatura do ar interno em sala específica na Escola de Arquitetura da UFMG, visando comparar os resultados medidos e simulados;
- Simular por meio da utilização do programa Solene Microclima, a temperatura do ar interno em geometria realizada para a validação do modelo;
- Levantar dados cartográficos e arquitetônicos sobre o conjunto habitacional da Vila São José (estudo de caso);
- Modelar diferentes cenários, com base no cenário atual do estudo de caso;
- Simular a temperatura do ar e a temperatura média radiante interna em um dos edifícios dos cenários analisados;
- Simular a temperatura UTCI externa do conjunto habitacional da Vila São José;
- Calcular valores de temperatura operativa de acordo com a norma ASHRAE 55 (2013);
- Calcular e comparar, com base nas simulações dos cenários, o índice de conforto térmico interno proposto por DeDear e Brager e o índice de conforto térmico externo UTCI;
- Verificar como o solo vegetal e a disposição arbórea ao longo do conjunto interferem no conforto térmico interno e externo;
- Analisar o impacto da modificação do albedo das superfícies, no conforto térmico interno e externo.

1.3 Estrutura do trabalho

A presente dissertação se divide em 6 capítulos, sendo este o primeiro, no qual é feita a contextualização do problema e os objetivos gerais e específicos.

No capítulo 2 são apresentadas a fundamentação teórica e a revisão bibliográfica, abrangendo conceitos sobre clima urbano, variáveis climáticas, índices de conforto térmico, pesquisas realizadas demonstrando a influência da vegetação e do albedo nas fachadas e pesquisas relevantes realizadas ao longo do trabalho.

O capítulo 3 apresenta o programa Solene Microclima, os parâmetros de entrada utilizados no modelo, e a validação do programa pelas medições em campo.

O capítulo 4 define os métodos e as técnicas utilizados nessa pesquisa, o objeto de estudo e os cenários de simulação.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos e uma análise comparativa entre os cenários simulados em relação aos índices de conforto.

O capítulo 6 trata das conclusões e recomendações, avaliando os resultados de acordo com os objetivos propostos, bem como as limitações e perspectivas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Clima Urbano

Segundo Bonan (2008, p. 2), Climatologia é o estudo do estado físico da atmosfera, seu estado instantâneo ou de tempo, a variabilidade sazonal e interanual, bem como análise de como o clima muda ao longo do tempo. Bonan faz uma ligação da climatologia com a Ecologia¹, por meio da relação entre a vegetação e o clima de um determinado local.

¹ Ciência que estuda interações entre os organismos entre si e com o meio ambiente

A climatologia urbana, é um subcampo da Climatologia que busca descrever o comportamento climático em regiões urbanas. Os problemas relacionados à atmosfera urbana tornam-se evidentes por meio da precariedade na qualidade do ar, das ilhas de calor, das chuvas ácidas, entre outros fatores.

O estudo do clima abrange seus fatores geomorfológicos e espaciais de formação como: Sol, latitude, altitude, ventos, massas de terra, topografia e vegetação, bem como seus elementos: Temperatura e umidade do ar, movimentos das massas de ar e precipitações. (ROMERO 2000, p. 1)

Dentre os atributos que interferem no clima urbano estão: A cobertura do solo, os materiais das fachadas, a geometria e a rugosidade. Fatores como, a ausência de áreas arborizadas e a alta impermeabilidade do solo, reduzem o processo de esfriamento e aumenta o aquecimento.

De acordo com Lombardo (1985), a atividade urbana tem um elevado grau de significância na alteração climática, provocando as ilhas de calor urbano, que “correspondem a uma área na qual a temperatura da superfície é mais elevada que as áreas circunvizinhas.” (LOMBARDO 1985). A camada de poluentes dificulta o escoamento e a dispersão do calor, a radiação que entra na cidade é menor, mas há um aumento da radiação emitida, causada por temperaturas de superfície mais elevadas.

O clima das cidades começou a despertar interesse científico a partir de meados do século XIX, com o surgimento das cidades industrializadas. Luke Howard é considerado precursor dos estudos referentes à climatologia urbana, seu livro *Climate of London*, contém contínuas² observações diárias de direção do vento, pressão atmosférica, temperatura elevada e precipitação.

² Observações contínuas de 1801 a 1841

Escala de estudo do clima

A classificação das escalas urbanas tem como base um grande número de considerações meteorológicas e geográficas. A diferenciação de cada uma delas passa pela observação dos fenômenos em função das escalas temporais e espaciais.

O termo “escala” é definido por Ribeiro (1993) como sendo uma referência de valor arbitrada segundo critérios que interessam à compreensão de um determinado fenômeno. Esta visão constitui-se em um aspecto fundamental para o entendimento referente ao espaço e ao tempo, envolvendo questões de ordem conceitual e metodológica.

Para facilitar o entendimento do comportamento do clima, as escalas espaciais por ordem de grandeza são as seguintes: Macroclima, Mesoclima e Microclima.

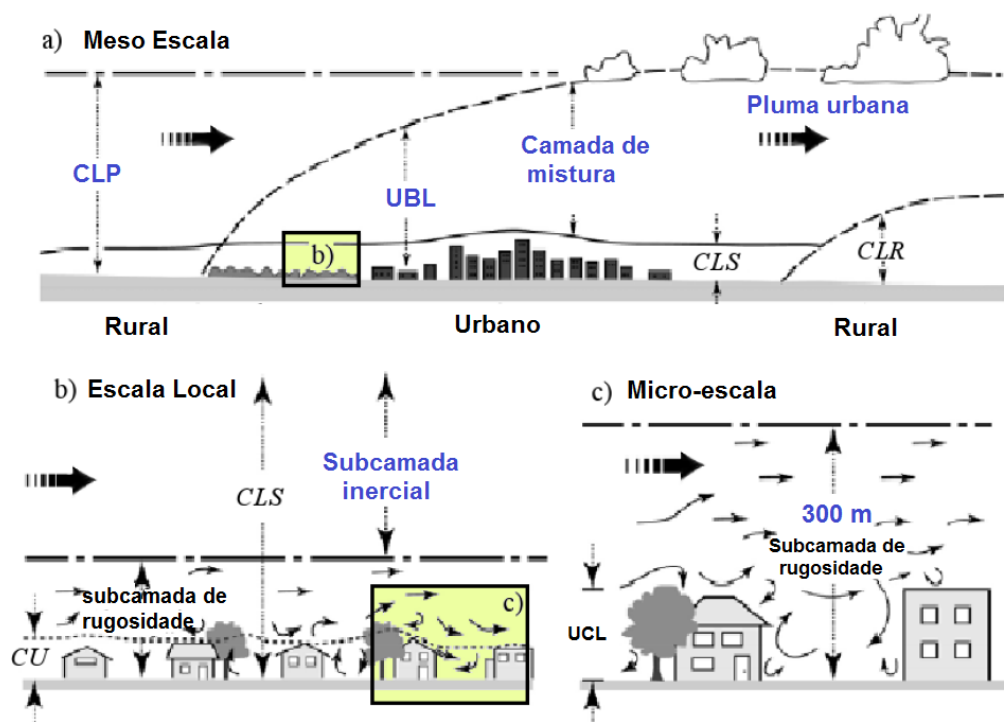
Macroclima: A macroclimatologia está “relacionada com os aspectos dos climas de amplas áreas da Terra e com os movimentos atmosféricos em larga escala” (AYOADE,1996 p.4).

Mesoclima: A mesoclimatologia está “preocupada com o estudo do clima em áreas relativamente pequenas, entre 10 a 100 quilômetros de largura, por exemplo, o estudo do clima urbano e dos sistemas climáticos locais severos tais como tornados e temporais”. (AYOADE,1996, p.4).

Microclima: A microclimatologia está “preocupada com o estudo do clima próximo à superfície ou de áreas muito pequenas” (AYOADE,1996, p. 4).

A escala utilizada neste estudo é a microclimática, que corresponde a uma escala horizontal espacial, no qual a dimensão transversal dos elementos urbanos estudados não ultrapassa 300 metros, e uma escala vertical correspondente a camada de rugosidade. Na figura 4 é possível verificar as diferentes escalas do clima, Oke (1978) propõe a divisão da camada limite atmosférica em dois níveis, UCL (*urban canopy layer*) e UBL (*urban boundary layer*). A primeira abrange a extensão do solo até a altura média das coberturas dos edifícios. A segunda é definida como a camada adjacente à superfície do solo que se estende até o nível onde a influência do atrito é nula.

Figura 4 - Escalas climáticas



Fonte: ADAPTADO OKE, 2006

2.2 Variáveis do clima urbano

2.2.1 Variáveis atmosféricas

Temperatura do ar

A temperatura é uma grandeza física utilizada para medir o grau de agitação das moléculas de uma determinada quantidade de matéria. Quanto mais agitadas essas moléculas estiverem, maior será sua temperatura.

A temperatura do ar é um processo indireto da radiação solar, que é absorvida pelo solo e parte transformada em calor. A temperatura do solo aumenta e, por convecção, aquece o ar.

A temperatura do ar será consequência de um balanço energético onde intervém: ·

- “A radiação solar incidente e o coeficiente de absorção da superfície receptora;

- A condutividade e a capacidade térmica do solo que determinam a transmissão de calor por condução;
- As perdas por evaporação, convecção e radiação”, (LAMBERTS, 2016, p. 31).

Umidade do ar

A umidade do ar pode ser definida como a quantidade de água existente no ar na forma de vapor. Segundo Silva (2006), o conhecimento dessa variável é essencial em vários ramos da atividade humana. A transferência de vapor d'água para a atmosfera é causada pela evaporação da água do solo e das superfícies líquidas (oceanos, lagos, cursos d'água, rios e reservatórios), bem como pela sublimação do gelo (existente nos campos de neve e nas geleiras). A atividade biológica dos seres vivos, principalmente a transpiração vegetal, também contribui para o aumento do vapor d'água no ar. (SILVA, 2006).

Dentre os parâmetros importantes para a caracterização do ar, destaca-se a umidade relativa do ar (UR), parâmetro que permite determinar as trocas por evaporação entre o homem e o ambiente.

A umidade relativa do ar é uma das variáveis do conforto térmico, segundo Lamberts (2016), à medida que a temperatura do meio se eleva, dificultando as perdas por convecção e radiação, o organismo aumenta sua eliminação por evaporação. Se o ar está saturado, a evaporação não é possível, o que faz com que o indivíduo comece a ganhar mais calor assim que a temperatura do ar seja superior a da pele. Quando o ar está seco, as perdas continuam ainda que as temperaturas sejam elevadas.

Movimento do ar

O movimento do ar é resultado das diferenças de pressão atmosférica verificadas pela influência direta da temperatura do ar. O ar se desloca da zona de alta para a de baixa pressão. A face de um obstáculo voltada para o vento chama-se barlavento cuja a pressão é positiva. A face oposta chama-se sotavento, cuja a pressão é negativa. Em regiões de clima quente e úmido como o Brasil, a ventilação natural é uma importante estratégia para promover conforto térmico e renovação do ar interno.

Segundo Andreasi; Versage (2012) existem duas maneiras de a ventilação proporcionar conforto: Por meio da velocidade do ar, garantindo uma sensação de resfriamento aos ocupantes, ou pela ventilação noturna, quando esta poderá reduzir a massa térmica do edifício durante a noite, resfriando o ambiente para os períodos de ocupação.

No Brasil, a norma de desempenho NBR 15575 (2013) exige uma taxa de renovação do ar de 1 renovação/ hora para edificações que cumprem com os requisitos térmicos da envoltória. As unidades habitacionais que não atenderem aos critérios térmicos estabelecidos para o verão, devem atender a uma configuração da taxa de ventilação de cinco renovações do volume de ar do ambiente por hora (5,0 ren/h).

MARRA et al. (2014) realizaram um estudo sobre como o posicionamento dos edifícios interferem na taxa de renovação do ar interno em unidades habitacionais (exigência normativa) pela dinâmica de fluidos computacional (CFD), e o modelo de Irminger. Os edifícios analisados foram o estudo de caso deste trabalho, o conjunto habitacional da Vila São José, em Belo Horizonte.

O CFD é uma técnica de modelagem numérica que abrange uma ampla gama de projetos industriais que vão desde os sistemas de refrigeração automotiva, hidrodinâmica de navios e aerodinâmica de veículos espaciais aos cálculos e projetos de edifícios e arranha-céus. Atualmente as técnicas de CFD têm sido cada vez mais aplicadas para prever a ventilação em espaços não-industriais, como em análises do fluxo de vento em edificações e áreas urbanas visando estudo da eficiência da ventilação natural. Os modelos de CFD podem ser usados em ambiência de edifícios para obter informação do escoamento de ar e da concentração de poluentes num espaço.

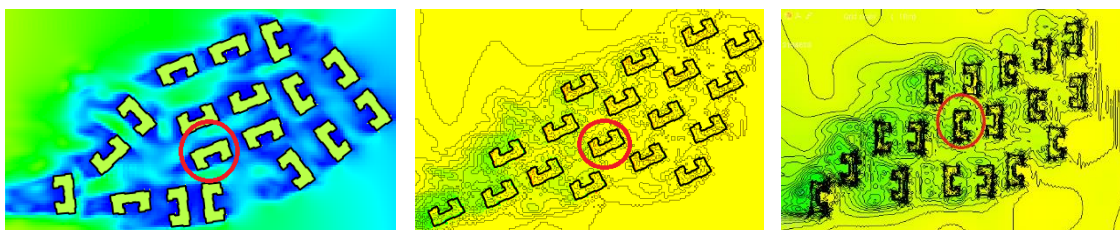
Segundo Gonçalves (2013), nos modelos de simulação fluidodinâmica considera-se que há conservação de massa, momento e energia do domínio de análise. Na fase de processamento são resolvidas simultaneamente diversas equações diferenciais parciais envolvendo velocidade, pressão, temperatura, energia e densidade.

Por meio da simulação com CFD, MARRA et al. (2014) simularam 3 diferentes cenários visando demonstrar como a mudança no arranjo dos edifícios no terreno

influencia o acesso à ventilação natural, pela análise da velocidade do vento e do coeficiente de pressão nas fachadas.

Para o estudo da taxa de renovação do ar, considerou-se um apartamento típico de 40m². Os cenários simulados foram: (a) situação real, (b) proposta 1, (c) proposta 2. Conforme pode ser observado na figura 5.

Figura 5 - Situação real, propostas 1 e 2 respectivamente.



Fonte: MARRA et al., 2014

Após os resultados das simulações CFD, foi possível extrair dados de velocidade do ar e do coeficiente de pressão nas fachadas, que foram utilizados no modelo de Irminger para o cálculo da taxa de renovação do ar, pelas equações 1,2 e 3:

$$\varphi v = c_a . A_0 . v \sqrt{(c_e - c_s)} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

φv — fluxo ou vazão de ar pela ação dos ventos (m³/s);

c_a — coeficiente de perda de carga por ação dos ventos (0,6);

A_0 — área equivalente das aberturas (m²);

v — velocidade do vento externo resultante na abertura (m/s);

c_e — coeficiente de pressão da abertura de entrada de ar;

c_s — coeficiente de pressão da abertura de saída de ar.

No que se refere a A_0 , será em função das áreas das aberturas de entrada e saída do ar conforme equação 2.

$$\frac{1}{A_0^2} = \frac{1}{A_e^2} + \frac{1}{A_s^2}$$

Equação 2

A_e = Area da abertura de entrada (m^2)

A_s = Area da abertura de saída (m^2)

Para o cálculo da taxa de renovação do ar (equação 3) foi considerado o volume de todo o apartamento típico, bem como todas as aberturas externas.

$$Tx = \frac{\varphi v}{vol}$$

Equação 3

Tx — taxa de renovação do ar (m^3/h);

φv — fluxo ou vazão de ar pela ação dos ventos (m^3/s);

vol — volume da área analisada (m^3).

Após os cálculos os autores separaram os resultados entre: taxa de renovação do ar para área efetiva de abertura, (considerando redução da área de ventilação pela metade com a utilização de janela de correr) como apresentado na tabela 3, e taxa de renovação do ar para o vão da abertura, como apresentado na tabela 4.

Tabela 3 - Resultados para taxa de renovação do ar, abertura efetiva

Modelo de Irminger			
	Original	Proposta 1	Proposta 2
C_a	0,60	0,60	0,60
A_0	0,8173	0,8173	0,8173
v	0,5492	0,1006	0,6097
C_e	0,1163	0,1469	0,0846
C_s	0,0352	0,0448	-0,0398
Área do pavimento	40m ²	40m ²	40m ²
Pé direito	2,60m	2,60m	2,60m
Volume	104m ³	104m ³	104m ³
Φv (m³/s)	0,0766	0,0166	0,1054
Φv (m³/h)	276,1081	59,79	379,63
Taxa de renovação do ar por hora	2,6548	0,5749	3,6503

Fonte: MARRA et al., 2014

Tabela 4 – Resultados para taxa de renovação do ar, vão de abertura

Modelo de Irminger			
	Original	Proposta 1	Proposta 2
C_a	0,60	0,60	0,60
A₀	1,5311	1,5311	1,5311
v	0,5492	0,1006	0,6097
C_e	0,1163	0,1469	0,0846
C_s	0,0352	0,0448	-0,0398
Área do pavimento	40m ²	40m ²	40m ²
Pé direito	2,60m	2,60m	2,60m
Volume	104m ³	104m ³	104m ³
Φv (m³/s)	0,14368	0,0311	0,1975
Φv (m³/h)	517,2482	112,0151	711,1880
Taxa de renovação do ar por hora	4,9735	1,0770	6,8383

Fonte: MARRA et al., 2014

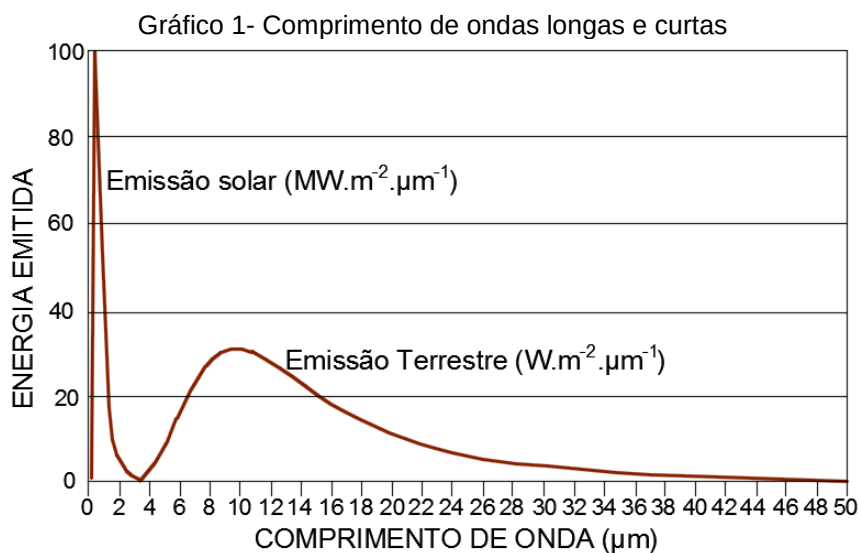
Os resultados obtidos demonstraram que em nenhuma das situações considerando a área efetiva de abertura, a taxa de renovação chegou a 5 renovações de ar por hora. E que somente a proposta 2, obteve essa taxa considerando todo o vão de abertura. Indicando assim, a importância da simulação computacional no estudo do movimento do ar e pressão nas fachadas, bem como uma análise no arranjo dos edifícios no terreno e o dimensionamento correto das aberturas das janelas.

Radiação Solar - Balanço de energia radiante

A radiação solar é a energia transmitida pelo sol sob ondas magnéticas e é essencial para os processos vitais na Terra (ROMERO 2000, p. 3). Uma parte da energia emitida pelo sol que chega à atmosfera é refletida de volta para o espaço, o restante é absorvido. Em um prazo longo a terra irradia novamente energia para a atmosfera, garantindo assim, o equilíbrio térmico no planeta. O fluxo de radiação luminosa do Sol recebido na terra, chama-se constante solar, possui dimensões de energia por unidade de área e tempo, J/m²/s ou W/m², seu valor medido fora da atmosfera seria de 1390 W/m².

Os processos de transferência de radiação na atmosfera são bastante complexos, pois os principais agentes de atenuação da radiação mostram grandes variações.

A radiação solar se encontra na faixa espectral de 0,2 a 4,0 μm (Ondas curtas) e a radiação terrestre concentra-se na faixa de 3,0 a 100 μm , com pico em torno de 10 μm (Ondas longas), conforme pode ser observado no gráfico1.



Fonte: UFV, 2016

Segundo Olgay (1998), ao atravessar a atmosfera a radiação é dispersa em parte devido à ação da poeira e de outras moléculas em suspensão, em parte porque é refletida difusamente a partir da fração inferior das nuvens. A energia radiante incidente diretamente à superfície do solo é denominada radiação direta. A outra parcela de energia radiante que sofre o processo de difusão é denominada radiação difusa. A Irradiância solar Global (R_g) é o total de energia proveniente do Sol, matematicamente, seria a densidade de fluxo de radiação solar incidente sobre tal superfície (Equação 4):

$$R_g = R_{\text{direta}} + R_{\text{difusa}}$$

Equação 4

A determinação empírica da irradiância solar global, se dá por meio de fórmulas que levam em consideração elementos como a nebulosidade, duração do número de horas de brilho solar, etc.

Em escala de tempo diária, uma das expressões mais difundidas para cálculo da Irradiância global é a proposta por Angstrom, e posteriormente modificada por Prescott (VIANELLO e ALVES, 1991) (Equação 5).

$$\frac{R_g}{R_o} = \left(a + b \cdot \frac{n}{N} \right) \quad \text{Equação 5}$$

Onde R_g é a irradiância solar global à superfície, R_o é a irradiância solar global diária no topo da atmosfera; a e b são coeficientes empíricos obtidos por análise de regressão linear para uma determinada localidade; n é a duração do brilho solar, observado em horas e N é a duração astronômica do período diurno em horas, ou fotoperíodo. A razão n/N é referida como razão de insolação. A razão R_g/R_o é referida como transmissividade global da atmosfera.

O balanço de radiação de ondas Curtas (BOC) é obtido pelos valores de irradiância solar global, podendo ser estimado pela equação 6:

$$BOC = R_g (1 - \alpha) \quad \text{Equação 6}$$

Sendo “ α ” o coeficiente de reflexão da radiação solar (albedo) da superfície em questão.

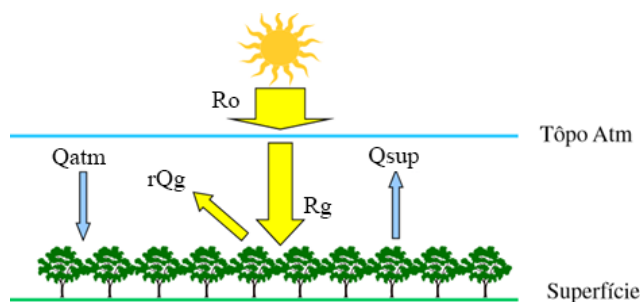
O balanço de ondas longas compreende duas componentes: a contra radiação atmosférica (Q_{atm}) que é em função da temperatura do ar, da quantidade de vapor d’água presente na atmosfera e da cobertura de nuvens, e a radiação emitida pela superfície (Q_{sup}) que depende da temperatura da superfície e de sua emissividade.

O balanço de ondas longas pode ser dado pela equação 7:

$$BOL = Q_{atm} - Q_{sup} \quad \text{Equação 7}$$

A figura 6, mostra o exemplo de balanço em superfície vegetada.

Figura 6- Balanço em superfície vegetada



Fonte: SENTELHAS; ANGELOCCI, 2009

Em que:

rQ_g = parcela da Radiação solar refletida pela superfície (α = albedo)

Q_{atm} = Contra radiação atmosférica

Q_{sup} = Radiação emitida pela superfície

Radiação emitida pela atmosfera

Como exposto anteriormente, o balanço de radiação de onda longa é a radiação emitida pela atmosfera menos a radiação emitida pela superfície.

Segundo Aguiar et al. (2010), a maioria dos resultados sobre balanço de radiação de ondas longas é obtido como resíduo a partir da equação do balanço de radiação.

Uma alternativa para obter os valores de radiação emitida pela atmosfera é por meio de equações empíricas e analíticas que estimam a radiação de onda longa atmosférica a partir de valores de temperatura do ar e da pressão de vapor d'água (PRATA 1996).

A maioria das equações estimam a radiação de onda longa para dias de céu claro. Todavia, Oke (1978 pg. 373) ressalta que as nuvens têm uma grande influência na troca de radiação de onda longa porque são radiadores quase completos.

A equação 8 representa o cálculo de radiação de ondas longas para céu claro ($L_{\downarrow(0)}$) (OKE 1998, pg.373):

$$L_{\downarrow(0)} = \sigma \cdot T_a^4 \cdot (\epsilon a_{(0)} - 1) \quad \text{Equação 8}$$

Onde ϵa é a emissividade atmosférica e o subscrito (o) significa céu claro; σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,6697 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$); T_a é a temperatura do ar em Kelvin.

De acordo com Oke (1998 pg. 373), a maneira mais comum de se estimar os efeitos das nuvens em relação a $L_{\downarrow}$ é modificar o valor do céu sem nuvens por um valor não linear relacionado ao tipo de céu, conforme equação 9.

$$L_{\downarrow} = L_{\downarrow(0)} \cdot (1 + j \cdot n e^2) \quad \text{Equação 9}$$

Em que:

j = coeficiente relacionado a temperatura da base das nuvens, apresentado na tabela 5, varia de acordo com o tipo de nuvem.

ne = fração de nebulosidade dada em décimos.

Tabela 5- Valores de coeficientes para o cálculo da influência das nuvens

Tipo de nuvem	Altura típica das nuvens	Coeficiente j
Cirrus (Ci)	12 – 20	0,04
Cirrostratus (Cs)	8-39	0,08
Altostratus (As)	2-14	0,20
Altostratus (As)	2-14	0,20
Cumulus (Cu)	-	0,20
Stratocumulus (Sc)	1-22	0,22
Stratus (St)	0-46	0,24
Fog	0	0,25

Fonte: OKE, 1998

Dentre as equações empíricas de radiação de onda longa, destacam-se as de Brunt (1932), Swinbank (1963), Idso e Jackson (1969), Brutsaert (1975), Satterlund (1979), Idso (1981) e Prata (1996). A tabela 6 apresenta essas equações.

Tabela 6 - Equações utilizadas para estimar a radiação de onda longa atmosférica

Equações	
Brunt (1932)	$L \downarrow_{(0)} = [0,065 \cdot (E_s^{0,5}) + 0,52] \cdot \sigma \cdot Ta^4$
Swinbank (1963)	$L \downarrow_{(0)} = [9,2 \cdot 10^{-6}] \cdot \sigma \cdot Ta^6$
Idso e Jackson (1969)	$L \downarrow_{(0)} = \{1 - 0,26 \cdot \exp[-7,77 \cdot 10^{-4} \cdot (273 - Ta)^2]\} \cdot \sigma \cdot Ta^4$
Brutsaert (1975)	$L \downarrow_{(0)} = \left[1,24 \cdot \left(\frac{E_s}{Ta} \right)^{\frac{1}{7}} \right] \cdot \sigma \cdot Ta^4$
Satterlund (1979)	$L \downarrow_{(0)} = \left\{ 1,08 \cdot \left[1 - \exp \left(-E_a^{\frac{Ta}{2016}} \right) \right] \right\} \cdot \sigma \cdot Ta^4$
Idso (1981)	$L \downarrow_{(0)} = \left[0,7 + 5,95 \cdot 10^{-5} \cdot \left(E_s \exp \left(\frac{1500}{Ta} \right) \right) \right] \cdot \sigma \cdot Ta^4$
Prata (1996)	$L \downarrow_{(0)} = \{1 - (1 + \xi) \cdot \exp[-(1,2 + 3\xi)^{0,5}]\} \cdot \sigma \cdot Ta^4$

Fonte: AGUIAR et al. (2010)

Em que:

E_s = é a pressão de vapor d'água em hPa;

$$\xi = 46,5 (E_s/T_a).$$

A pressão de saturação do vapor d'água (e_a em hPa) pode ser calculada a partir da equação de Tetens (1930), equação 10, para a temperatura maior ou igual a 0°C. (AGUIAR, 2010). A pressão de vapor d'água (E_s) pode ser calculada utilizando e_a e a umidade relativa (UR), conforme equação 11.

$$e_a = 6,1078 \cdot 10^{\left[\frac{(7,5 \cdot t_a)}{(237,5 + t_a)} \right]}$$
Equação 10

t_a = temperatura do ar em graus Celsius

$$E_s = \frac{UR \cdot e_a}{100}$$
Equação 11

Temperatura média radiante

A temperatura média radiante é uma das variáveis do conforto térmico e é definida como a temperatura uniforme de um ambiente imaginário no qual a troca de calor por radiação do corpo humano é igual a troca de radiação do ambiente real não uniforme. (ISO 7726,1998). Na figura 7 é possível observar o conceito de temperatura média radiante.

Figura 7- Trocas por meio da temperatura média radiante entre um ambiente real e o corpo humano e entre um ambiente imaginário e o mesmo corpo.



Fonte: LAMBERTS, 2016

A temperatura média radiante (T_{mr}) é considerada de acordo com vários estudos, uma variável importante na avaliação da sensação térmica no exterior e interior, independentemente do índice de conforto utilizado.

No entanto, é necessário fazer uma distinção no que diz respeito ao cálculo de T_{mr} em espaço externo e interno. O cálculo de T_{mr} interno representa a troca de calor radiante entre o corpo humano e o ambiente em questão por meio de radiações de ondas longas. E para o espaço exterior, o cálculo é mais complexo pois envolve também radiações de ondas curtas.

A temperatura média radiante de um ambiente em relação a uma pessoa é determinada valendo-se dos valores da temperatura de globo (T_g), da velocidade do ar na altura do globo (v_g) e da temperatura do ar (T_a). A T_g pode ser definida como a temperatura de equilíbrio medida no centro de uma esfera de cobre, pintada externamente de preto fosco (ISO 7726,1998).

O princípio do cálculo da T_{mr} é o de que estando o globo em equilíbrio térmico com o ambiente, então o calor trocado por radiação entre o globo e as superfícies circundantes é igual ao calor trocado por convecção entre o globo e o ar.

A temperatura do globo resulta do balanço térmico relativo ao globo negro, considerando que o fluxo de calor por convecção entre o globo e o ar envolvente e o fluxo de calor por radiação entre o globo e as superfícies envolventes se anulam mutuamente, em regime permanente. Este balanço térmico é traduzido pela equação 12.

$$\varepsilon_g \cdot \sigma \cdot (T_{mr}^4 - T_g^4) + h_{cg} \cdot (T_a - T_g) = 0 \quad \text{Equação 12}$$

Em que:

T_{mr} = Temperatura média radiante [$^{\circ}\text{K}$];

σ = é a constante de Stephan-Boltzman;

T_a = Temperatura do ar [$^{\circ}\text{K}$];

T_g = Temperatura de globo [$^{\circ}\text{K}$];

ε_g = emissividade do globo negro (adimensional);

h_{cg} = coeficiente de convecção do globo negro [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$].

Assim, o valor da temperatura média radiante é calculado segundo a equação 13:

$$T_{mr} = \sqrt[4]{T_g^4 + \frac{hcg}{\varepsilon_g \sigma} \cdot (T_g - T_a)} \quad [^\circ\text{K}] \quad \text{Equação 13}$$

A temperatura média radiante em um ambiente externo leva em consideração a troca radiativa de calor entre o corpo humano e seu ambiente considerando os fluxos de radiação de ondas curtas e ondas longas, sendo estes expressos pelas equações 14 e 15.

$$S_{str} = \alpha_k \cdot \sum_{i=1}^n K_i \cdot F_i + \varepsilon_p \cdot \sum_{i=1}^n L_{\downarrow} \cdot F_i \quad \text{Equação 14}$$

$$t_{mr} = \sqrt[4]{\left(\frac{S_{str}}{\varepsilon_{p,\sigma}}\right) - 273,15} \quad [^\circ\text{C}] \quad \text{Equação 15}$$

Em que:

t_{mr} = Temperatura média radiante [$^\circ\text{C}$];

K_i = Radiação de ondas curtas;

$L_{\downarrow}$ = Radiação de ondas longas;

F_i = Fator angular entre as pessoas e as superfícies consideradas;

α_k = Coeficiente de absorção para radiação de ondas curtas - Valor padrão (0,7);

ε_p = Emissividade do corpo negro;

S_{str} = Densidade do fluxo radiante médio (Wm^{-2}).

2.2.2 Variáveis geográficas

Latitude, Longitude e Altitude

A latitude, longitude e altitude determinam a posição de um ponto na terra. A latitude é a distância em graus em relação à linha do equador, varia de 0° a 90° para o norte e de 0° a -90° para o sul. A latitude interfere na proporção de radiação solar recebida, quanto mais distante do equador, menor a quantidade de radiação, com isso, a temperatura do ar externo tende a ser mais baixa.

A altitude é definida como a distância vertical medida entre um determinado ponto em relação ao nível médio do mar. Segundo Dury (1972), apud Fritzsons et al. (2015) a temperatura do ar decresce com a elevação da altitude numa proporção de aproximadamente $1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. Esta taxa de arrefecimento ocorre, pois, a massa de ar seco em ascensão está sujeita a pressão cada vez menor, expandindo seu volume e diminuindo a temperatura.

A longitude é medida em graus, de zero a 180°C para leste ou oeste a partir do meridiano de Greenwich, diferente da latitude, não interfere em relação a temperatura do ar, e sim em relação as horas do dia.

2.3 Vegetação

2.3.1 Influência da Vegetação no microclima

A arborização, além de proporcionar benefícios ao meio urbano, estabelece a relação entre homem e natureza, garantindo uma melhor qualidade de vida, ademais, valoriza áreas de convívio social e é um importante componente regulador da temperatura urbana, pois, as plantas absorvem o calor em função de seus processos vitais de transpiração e fotossíntese. De acordo com Gomes et al. (2003), as áreas mais arborizadas das cidades e aquelas localizadas próximo aos grandes corpos d'água, tendem a apresentar temperaturas mais amenas. A arborização proporciona também sombreamento, que segundo Olgyay (1998), se constitui em um dos elementos fundamentais para a obtenção de conforto em climas tropicais.

Existem diversas pesquisas utilizando metodologias que comprovaram que a vegetação atua sobre o microclima urbano, contribuindo significativamente para melhorar a sensação de bem-estar aos usuários.

A pesquisa de Bartholomei (2003) em Campinas (SP), verificou a função da vegetação na atenuação da radiação solar. Foram analisadas seis espécies arbóreas e sua influência em relação ao conforto térmico. Concluiu-se que o índice de conforto varia ao longo do dia, e que as espécies, por atenuarem a radiação de forma diferenciada, apresentam também índices diferentes de conforto. Aquelas que apresentaram o melhor índice, foram as que possuíam uma maior extensão de sombra sob sua copa.

Abreu (2008) avaliou a escala de influência da vegetação no microclima por diferentes espécies arbóreas, caracterizou o alcance da atenuação da radiação solar incidente por meio de medições em campo, obtendo valores de radiação total incidente ao sol e radiação total incidente à sombra, concluiu que diretamente, a radiação solar atenuada pelas árvores é capaz de reduzir a temperatura do ar e a de globo dos ambientes externos, e que indiretamente, a evapotranspiração da vegetação é responsável pela umidificação local, mostrando que as espécies com maior capacidade de atenuação e maiores taxas de evapotranspiração são aquelas que têm maior capacidade de redução da temperatura do microclima urbano.

Fontes e Delbin (2001) desenvolveram um estudo no qual eles compararam os microclimas em dois espaços públicos abertos na cidade de Bauru/ SP. Um dos espaços com expressivas áreas verdes e outro com pouca arborização. O resultado da pesquisa constatou diferenças climáticas significativas. A área arborizada apresentou 3° C a menos do que a não arborizada.

A possibilidade de simulação das espécies arbóreas e áreas vegetadas enriquece as análises do clima pois permite o estudo de espécies arbóreas em sua fase adulta, bem como permite analisar a interferência de grandes parques em áreas urbanas.

Sirqueira (2014) analisou recortes urbanos vegetados na cidade de Belo Horizonte, utilizando o modelo ENVI-Met com o objetivo de avaliar o microclima das áreas em estudo pela presença da vegetação, em relação a temperatura do ar, umidade relativa e específica do ar e temperatura radiante e de superfície.

Morille et al. (2014) realizaram uma pesquisa com o modelo de simulação Solene Microclima, onde quatro tipos de dispositivos de vegetação foram estudados:

- Análise do impacto direto em um edifício utilizando-se de telhado e fachadas verdes;
- Impacto indireto das fachadas verdes em um edifício, no qual foram aplicados vegetação nos edifícios do entorno;
- Área gramada na rua;
- Árvores no ambiente urbano;

O objetivo da pesquisa de Morille et al. (2014) foi uma comparação entre os dispositivos, visando identificar qual é o mais eficiente na redução do consumo de energia, para isso, situações extremas foram consideradas, como mostra a tabela 7.

Tabela 7- Critérios considerados para a realização das simulações

	Critério	Número de casos estudados	Modalidades
Critérios de Vegetação	Telhado e Parede (edifício estudado)	2	100% vegetado 100% mineral
	Parede (Edifícios ao redor)	2	100% vegetado 100% mineral
	Rua	2	100% vegetado 100% mineral
	Árvores	2	Com/ Sem
Edifício	Insolação	2	Baixa insolação/ Alta insolação
	Vidro	2	20% envidraçado/ 60% envidraçado
Geometria	Orientação	3	0º/ 45º/ 90º

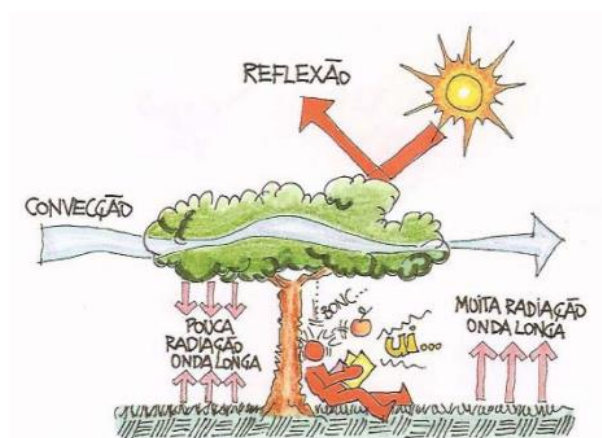
Fonte: MORILLE et al. 2014

O estudo de Morille et al. (2014) concluiu que a influência direta de paredes e telhado verdes e a arborização foram as mais eficientes para redução das necessidades de refrigeração, especialmente em prédios baixos isolados com alta taxa de janelas. A influência de áreas gramadas e o impacto indireto de paredes verdes foram na maioria das análises insignificantes.

2.3.2 Relação entre a vegetação e a radiação solar

A disponibilidade de radiação solar na superfície terrestre é em função das variáveis associadas às relações Terra-Sol, enquanto a interceptação dessa radiação por uma árvore, depende da arquitetura e da densidade de folhagem da copa, bem como das propriedades ópticas da vegetação e da relação entre a radiação direta e difusa. A figura 8 apresenta um exemplo de como as trocas térmicas ocorrem nas árvores.

Figura 8- Trocas térmicas nas árvores



Fonte: LAMBERTS, 2016.

Rivero (1986) afirma que a vegetação absorve aproximadamente 90% da radiação visível e 60% da radiação infravermelha, sendo o restante transmitido ou refletido pelas folhas.

Segundo Moura (2007), a radiação solar no interior de uma cobertura vegetal ou para uma planta isolada irá depender da posição solar e das interações entre a radiação incidente e os elementos vegetais, especialmente as folhas com suas características óticas: reflexão e transmissão que se encontram intimamente relacionadas com a disposição espacial, ângulo de inserção foliar e índice de área foliar.

O índice de área foliar, a disposição foliar e o ângulo de inserção irão regular a penetração da radiação ao longo do dossel. Alguns modelos de organização espacial de folhas mostram que plantas com folhas superiores verticais e inferiores planas são mais eficientes para a captação de energia luminosa pela variação do ângulo foliar. Em relação ao sombreamento, Mascaró (2005) afirma que a forma da copa das árvores e seu tamanho determinam a área sombreada que muda de acordo com a espécie, a estação do ano e ao longo dos anos.

As plantas são fortemente influenciadas pela energia solar tanto morfológica quanto fisiologicamente. A conversão da radiação absorvida em matéria seca, depende da capacidade de absorção e da capacidade fotossintética da espécie vegetal, da qualidade da radiação, da temperatura do ar e da fração de carbono fixado

não consumido na respiração. (GALLAGER; BISCOE, 1978 apud FAGAN et al. 2013). O índice de área foliar e o coeficiente de extinção luminosa são os principais fatores que afetam a interceptação e o nível de atenuação de radiação pelas culturas.

2.3.3 Interação entre a radiação e as árvores - Lei de Lambert e Beer

A Lei de Beer descreve a fisiologia das plantas determinando as frações e os níveis de radiação absorvida e convertidas, oriundas da exposição luminosa.

A observação de Lambert em 1870, foi de que quando um feixe de luz monocromático atravessava um meio transparente homogêneo, cada camada desde meio absorvia por igual a fração de luz que atravessava, independente da intensidade da luz que era incidida. Beer em 1852, observou a relação existente entre a transmissão e a concentração do meio onde passa um feixe de luz (COMPRI-NARDY, 2009).

As leis de Lambert-Beer são o fundamento da espectrofotometria, elas são tratadas simultaneamente e apresentam o processo no qual a quantidade de luz absorvida ou transmitida por uma determinada solução depende da concentração do soluto e da espessura da solução (FAGAN,2013). Pode ser expressa matematicamente pela relação:

$$T = e l^{-f \cdot e \cdot co}$$

Equação 16

Em que:

- T = Transmitância óptica
- e = Logaritmo Natural de Euler
- f = Coeficiente de absorção
- e = Espessura da solução
- co = Coeficiente de solubilidade

Monsi e Saeki com base nos pressupostos de Beer, descreveram um modelo matemático da fotossíntese do dossel, demonstrando como a radiação solar penetra no dossel de plantas (HIROSE,2005).

“Sabe-se que as plantas são fortemente influenciadas pela energia solar em seu ambiente tanto morfológica quanto fisiologicamente. A conversão de radiação absorvida em matéria, depende da capacidade de absorção, da capacidade fotossintética da espécie vegetal, da qualidade da radiação, da temperatura do ar e da razão de carbono não consumido na respiração.” (GALLAGER;BISCOE, 1978 apud FANGAN et al., 2013, p. 79).

Fagan et al. (2013) destacaram que ainda é necessário o entendimento e a divulgação da influência da Lei de Beer e da radiação solar em dosséis vegetativos e sua interação com a fisiologia das plantas.

Quando a luz atravessa ou é refletida por uma amostra, a quantidade absorvida é a diferença entre a radiação incidente (I_0) e a radiação transmitida (I). A quantidade de luz absorvida é expressa tanto como transmitância quanto como absorptância. (BUCHANAN,2000;TAIZ;ZEIGER,2004; NOBEL, 2005 apud FANGAN et al., 2013, p.80)

Segundo Salisbury; Ross,(1992) apud Fangan et al. (2013), a transmitância óptica (T) é a fração da radiação transmitida (I), podendo ser apresentada em valores percentuais, como pode ser verificado na equação 17:

$$T = \frac{I}{I_0} \text{ ou } \% T = \left(\frac{I}{I_0} \right) .100 \quad \text{Equação 17}$$

2.4 Transferência de calor e trocas térmicas do corpo humano

A ciência da transferência de calor descreve a análise da taxa de transferência de calor de um sistema, segundo Ozisik (1990) difere da ciência da termodinâmica que aborda a relação entre o calor e as outras formas de energia. A energia transferida pelo fluxo de calor não pode ser medida diretamente, mas o conceito tem significado físico porque é relacionado à grandeza mensurável chamada temperatura. Sempre que existir uma diferença de temperatura em um meio ou entre meios, haverá transferência de calor.

O ser humano possui a capacidade de manter a temperatura corporal dentro de uma faixa razoavelmente estreita, apesar das variações térmicas do ambiente. O equilíbrio

térmico é conseguido através do balanço entre a perda e a produção, ou aquisição de calor.

Os principais fatores que influenciam nas trocas térmicas entre o ambiente e o organismo são: Temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do ar, calor radiante e atividade realizada.

O calor dissipado pelos mecanismos de trocas térmicas entre o corpo e o ambiente envolve trocas secas e úmida. A troca úmida refere-se a evaporação e as trocas secas à convecção, radiação e condução.

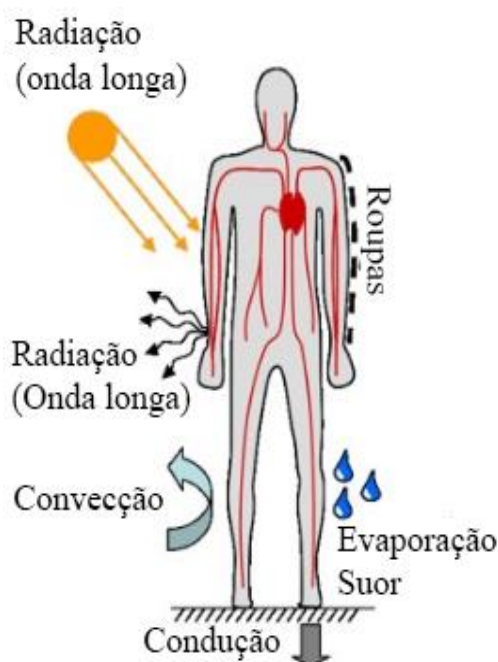
A convecção é a troca térmica entre dois corpos sendo um deles sólido e outro fluido, como os líquidos e gases. O processo de remoção de calor ocorre quando o ar apresenta temperatura inferior à do corpo e o corpo transfere calor pelo contato com o ar mais frio, ou se a temperatura do ar for mais elevada, ocorrendo o mecanismo inverso.

A radiação térmica é o processo pelo qual a energia radiante é transmitida de uma superfície quente para a fria por meios de ondas eletromagnéticas, podem ser chamadas de ondas de calor ou calor radiante. Toda superfície a uma temperatura maior que zero Kelvin emite energia na forma de ondas eletromagnéticas.

A condução de calor ocorre sempre que há diferença de temperatura, do ponto de maior para o ponto de menor temperatura, sendo esta a forma típica de propagação de calor nos sólidos. É a troca de calor entre dois corpos que se tocam, ou mesmo partes do corpo que estejam em temperaturas diferentes.

Dentre os mecanismos de trocas úmidas, o envolvido na termorregulação humana é a evaporação. A evaporação é a troca úmida proveniente da mudança do estado líquido para o estado gasoso e, no corpo humano, ocorre por meio da sudorese (suor). A figura 9 apresenta os mecanismos de trocas térmicas entre o corpo humano e o ambiente.

Figura 9 - Trocas térmicas entre o corpo humano e o ambiente



Fonte: BIOINFO, 2017

2.5 Conforto térmico

Conforto térmico é o estado da mente que expressa satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda (ASHRAE, 2001).

Segundo Lamberts (2016), o conforto térmico é importante, pois proporciona satisfação, aumento no rendimento em atividades intelectuais, manuais e perceptivas e evita desperdício de energia com aquecimento e refrigeração.

As variáveis do conforto térmico estão relacionadas ao ser humano e ao ambiente, dentre as variáveis podemos citar: O metabolismo e a vestimenta, a temperatura e velocidade do ar, a temperatura média radiante, idade, sexo e altura do usuário.

Vários estudos foram realizados em relação aos parâmetros de conforto térmico, as pesquisas na área atendem aos dispostos em normas como: ASHRAE Standart 55 (2013), ISO 7730 (2005), ISO 7726 (1998), ISO 7933 (2004), ISO 8996 (2004), ISO 9920 (2007), dentre outras.

A relação entre as alterações de temperatura e demais fatores climáticos, proporcionadas por estratégias de conforto, e a sensação térmica humana, tem sido verificada por meio de índices de conforto térmico. Estes englobam uma análise conjunta das variáveis relacionadas ao ser humano e ao ambiente.

De acordo com Stensjö (2015) diferentes índices são utilizados como instrumentos para orientação nas etapas iniciais de projeto, pois permitem uma prévia avaliação do clima do ponto de vista da possível resposta de conforto térmico do usuário, além de indicar diretamente estratégias de projetos para adequação ao clima.

Fanger (1972) desenvolveu um estudo analítico de avaliação para o conforto térmico que foi referência para normas nacionais e internacionais como a ISO 7730 (2005) e a ASHRAE 55 (2013). Ele desenvolveu o voto médio estimado (PMV – *Predicted Mean Vote*), que se relaciona à parâmetros da ASHRAE 55 (2013), no qual classifica a escala de sensação térmica em estágios de frio, fresco, levemente fresco, neutra, levemente morno, morno e quente.

O PMV é resultado de um experimento em câmeras climatizadas em que foram selecionadas pessoas para ficarem expostas por um determinado período a uma dada temperatura ambiente, utilizando roupas com mesmo isolamento térmico. As pessoas permaneceram na mesma atividade, sentadas, e opinaram sobre as sensações térmicas de acordo com a escala sétima da norma ASHRAE.

Segundo Assis e Pereira (2009), o PMV pode prever sensação de desconforto térmico mais severa do que os usuários realmente percebem, pois, a sensação de conforto em indivíduos que estão acostumados a climas tropicais, como é o caso de grande parte do Brasil é diferente. Os índices adaptativos, diferente do índice PMV, relaciona a temperatura interna do ambiente, ou os intervalos de temperaturas aceitáveis, aos parâmetros climáticos externos. Esses índices apresentam apenas uma temperatura de conforto térmico, que é em função da temperatura média mensal externa e com base nas normais climatológicas.

Os modelos adaptativos se originaram de estudos reais em edifícios visando a análise da adaptação humana, de acordo com o perfil do usuário e sua atividade cotidiana. Os resultados foram estatisticamente analisados e buscaram estimar a temperatura na qual os indivíduos se sentiram confortáveis. Essa temperatura de conforto pode ser expressa em termo de temperatura operativa (T_o),

2.5.1 Temperatura operativa

A temperatura operativa pode ser definida como a temperatura uniforme de um ambiente radiante negro hipotético, no qual o ocupante pode trocar a mesma quantidade de calor por radiação e convecção que em no ambiente real (LAMBERTS,2016).

Os valores de temperatura operativa combinam temperatura do ar (T_a) e a temperatura média radiante (t_{mr}) em um único valor para expressar seu efeito conjunto (FERREIRA, 2015).

Segundo a ISO 7726 (1998), na maioria dos casos em que a velocidade do ar é pequena, até 0,2 m/s, ou quando a diferença entre a temperatura média radiante e a temperatura do ar é de até 4°C, a temperatura operativa pode ser calculada de forma aproximada como o valor médio do ar e da temperatura média radiante.

Para uma precisão maior, pode ser usado também a equação 18:

$$T_o = A \cdot t_a + (1 - A) \cdot t_{mr} \quad \text{Equação 18}$$

Onde A é um coeficiente adimensional em função da velocidade do ar, conforme valores apresentados na tabela 8.

Tabela 8 - Coeficiente adimensional para o cálculo de temperatura operativa

Var (m/s)	< 0,2	0,2-0,6	0,6 -1,0
A	0,5	0,6	0,7

Fonte: ISO 7726, 1998

A temperatura operativa também pode ser calculada em função da velocidade do ar, como podemos observar na equação 19:

$$T_o = t_a \cdot \sqrt{(10 \cdot v_a)} + \frac{t_{mr}}{1 + \sqrt{10 \cdot v_a}} \quad \text{Equação 19}$$

Onde v_a é a velocidade do ar em m/s

A velocidade do ar utilizada na equação 19 deve seguir os parâmetros da norma ASHRAE em relação a velocidade máxima do ar permitida, que varia de acordo com a taxa metabólica relacionada às atividades realizadas. Conforme valores apresentados na tabela 9.

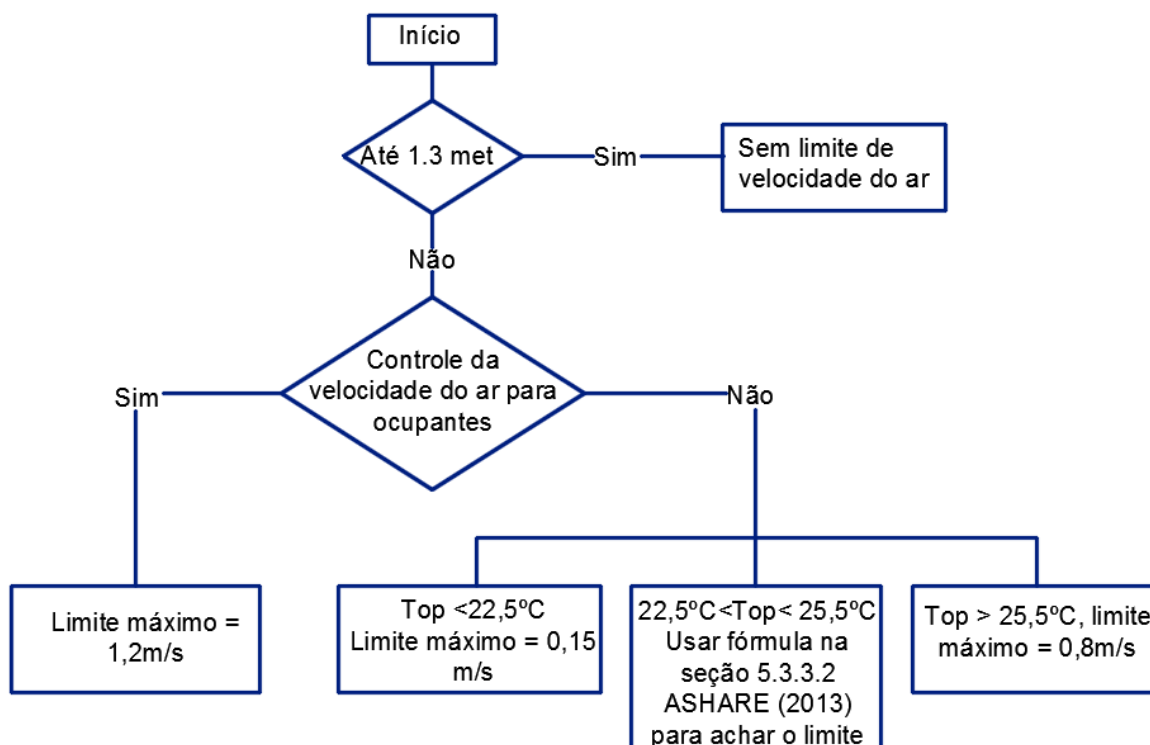
Tabela 9 - Taxas metabólicas típicas

Atividade	Met.
Parado sentado	1,2
Parado em pé	1,4
Andando	1,7

Fonte: Adaptado ASHRAE 55 (2013)

A partir da definição do nível de atividade metabólica, é verificado o limite máximo para velocidade do ar (figura 10), a ser incorporado na equação para o cálculo da temperatura operativa (equação 19).

Figura 10- Definição da velocidade máxima do ar



Fonte: ASHRAE 55 (2013)

2.5.2 Modelo de DeDear e Brager

O modelo adaptativo de DeDear e Brager foi incorporado na ASHRAE 55 (2013), que incluiu o conceito de modelo adaptativo em ambientes naturalmente ventilados.

Segundo um estudo realizado por Assis e Pereira (2009), por meio de comparação entre resultados obtidos por diferentes modelos adaptativos utilizando-se de parâmetros definidos em estudos brasileiros, o modelo apresentou resultados menos restritivos e mais satisfatórios.

Originado de uma pesquisa realizada entre os anos 1995 e 1997, por DeDear e Brager, em 160 edifícios de escritório com zonas climáticas diferentes, possui uma base de dados que incluiu informações sobre os edifícios, as condições climáticas e os usuários. Para a pesquisa, foram determinadas as vestimentas e as atividades e aplicados questionários, apontando pontos comportamentais, as características fisiológicas e as características psicológicas dos participantes. A faixa de conforto do modelo relaciona-se com o valor da média mensal de temperatura do ar e os limites de aceitabilidade que são definidos como: $T_c \pm 2,5^\circ\text{C}$, 90% dos usuários satisfeitos e $T_c \pm 3,5^\circ\text{C}$, 80% dos usuários satisfeitos. Para o cálculo da temperatura de conforto adota-se a equação 20.

$$T_n = 0,31.T_e + 17,8 \quad \text{Equação 20}$$

Em que:

T_n é a temperatura de conforto;

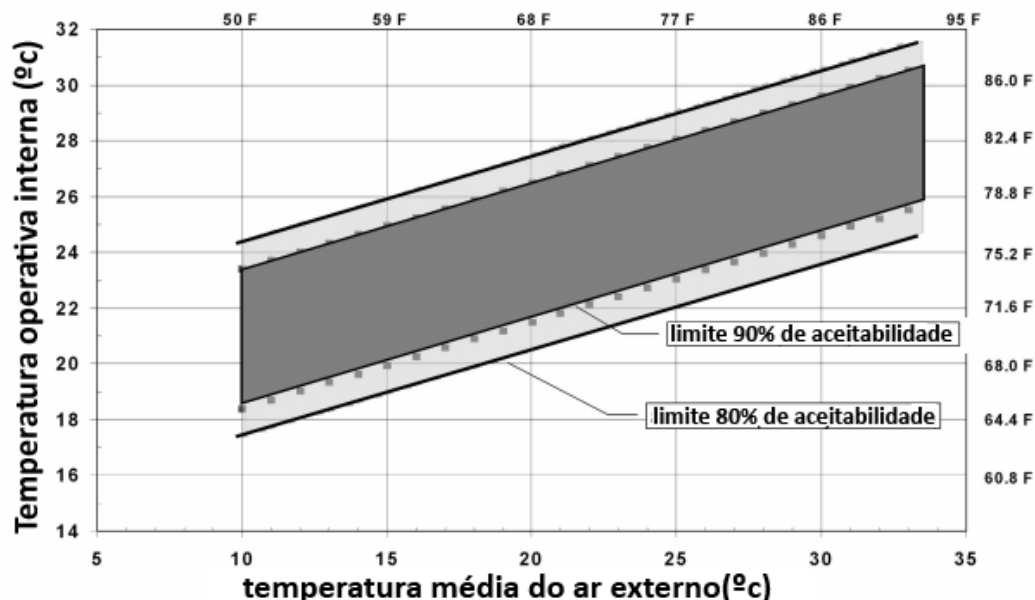
T_e é a temperatura externa média.

Equação com os limites aceitáveis

$$T_n \text{ aceitável} = 0,31.T_e + 17,8 \pm T_c \quad \text{Equação 21}$$

A ASHRAE (2013) determina limites de aceitabilidade de 80% para a temperatura operativa interna, desde que siga algumas condições como: os ambientes não serem artificialmente refrigerados, que a temperatura seja maior do que 10°C e menor do que $33,5^\circ\text{C}$, e que siga valores definidos para a taxa metabólica e a adaptação de vestimenta. Na figura 11 é possível observar o gráfico com os limites de temperatura operativa interna aceitáveis em relação à temperatura média do ar externo ($^\circ\text{C}$).

Figura 11 - Limites de temperatura operativa interna aceitáveis em ambientes naturalmente condicionados



Fonte: adaptado ASHRAE, 2013

2.5.3 UTCI – Índice Universal de conforto térmico

O UTCI (*Universal Thermal Climate Index*) foi desenvolvido pela Sociedade Internacional de Biometeorologia com o objetivo de avaliar as condições térmicas de ambientes externos por meio da resposta fisiológica do corpo humano, e ser aplicável a todos os tipos de clima. Foi elaborado com base no modelo termoregulatório multinodal desenvolvido por Fiala et al. (2001), que considera o comportamento adaptativo em relação ao isolamento térmico a partir de estudos de campo desenvolvidos na Europa, bem como a distribuição da roupa em diferentes partes do corpo e a redução da resistência térmica e evaporativa da roupa causada pelo vento e pelo movimento da pessoa andando a 4 km/h em superfície plana.

O UTCI abrange temperaturas do ar maiores do que -50°C e menores do que 50°C, velocidade do vento entre 0,5 e 30 m/s e umidade relativa de 5 a 100%.

As variáveis de entrada para o cálculo do UTCI são: Velocidade do ar a 10 de altura em m/s (V_{a1}), Temperatura do ar em °C (t_a), Pressão de vapor de água (E_s) e Temperatura média radiante (t_{mr}). O desvio do UTCI (*offset*) depende dos valores reais de t_{mr} , v_{a1} e E_s . A taxa metabólica é assumida como constante e igual a 150

W/m² ou 2,6 met. (pessoa caminhando a 4 km/h em terreno plano), e o grau de isolamento térmico da vestimenta é atribuído a partir da temperatura do ar com base em observações empíricas em estudos de campo europeus (ROSSI et al., 2012).

As faixas definidas pelo UTCI são representadas na tabela 10.

Tabela 10- Faixas de estresse térmico definidas pelo UTCI	
Maior que -46	Extremo estresse - calor
38 a 46	Alto estresse - calor
32 a 38	Forte estresse - calor
26 a 32	Estresse moderado - calor
18 a 26	Conforto térmico
9 a 18	Sem estresse térmico
0 a 9	Ligeiro estresse - Frio
-13 a 0	Moderado estresse - Frio
-27 a -13	Alto estresse - Frio
-40 a -27	Forte estresse - Frio
Menor que -40	Extremo estresse - Frio

Fonte: BLAZEJCZYK, 2013

Por considerar que o índice UTCI foi desenvolvido tendo como base estudos internacionais em clima temperado, Rossi et al. (2012) desenvolveram um estudo de faixas de conforto/desconforto para o índice UTCI a partir de dados de sensação térmica real em monitoramentos térmicos urbanos, sob condições subtropicais. Os autores dividiram a faixa de estresse térmico em duas categorias, considerando que a faixa original há uma definição de “conforto” e outra “sem estresse térmico”. Com isso, obtiveram as seguintes classificações:

Classificação A para a sensação térmica predita pelo UTCI:

(a) desconforto para o frio: $UTCI < 18\text{ }^{\circ}\text{C}$;

(b) conforto: $18\text{ }^{\circ}\text{C} \leq UTCI \leq 26\text{ }^{\circ}\text{C}$; e

(c) desconforto para o calor: $UTCI > 26\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Classificação B para a sensação térmica predita pelo UTCI:

(a) desconforto para o frio: $UTCI < 9\text{ }^{\circ}\text{C}$;

(b) conforto: $9\text{ }^{\circ}\text{C} \leq UTCI \leq 26\text{ }^{\circ}\text{C}$; e

(c) desconforto para o calor: $UTCI > 26\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Rossi et al. (2012) monitoraram as variáveis climáticas e coletaram dados de conforto por meio de questionários com a população local em ruas de pedestres em Curitiba, calcularam a sensação térmica predita pelo índice UTCI e propuseram novas faixas de desconforto térmico para o índice.

Os autores estimaram a porcentagem de insatisfeitos pelo conceito de PPD (*Predicted Percentage of dissatisfied*- percentual de pessoas insatisfeitas) proposto por Fanger (1982). Os votos de sensação térmica (de -3 a +3) foram agrupados para a variação de um grau de temperatura equivalente UTCI, segundo procedimento sugerido por DeDear e Fountain (1994), verificando-se o percentual de votos em conforto e desconforto para cada grau de variação de UTCI. Nas análises realizadas, foram considerados:

- Desconforto para o frio: votos -3 e -2;
- Conforto: votos -1, 0 e +1;
- Desconforto para o calor: votos +2 e +3

A tabela 11 apresenta a quantidade de pessoas em conforto e desconforto para cada grau de temperatura na escala UTCI, o voto equivalente de sensação térmica para cada grau de variação, a quantidade de respondentes por cada faixa (P) e a porcentagem estimada de insatisfeitos calculada segundo a equação 22:

$$PPD = 100 - 95\exp(-0,00353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2) \quad \text{Equação 22}$$

Tabela 11 - Escalas de conforto UTCI

UTCI	Conforto (%)	Desconforto (%)	Voto equivalente de sensação térmica	P	PPD %
3,0 a 3,9°C	0	100	-2,0	1	77
6,0 a 6,9°C	0	100	-2,0	1	77
7,0 a 7,9 °C	100	0	-1,0	1	26
8,0 a 8,9 °C	67	33	-0,8	6	20
9,0 a 9,9 °C	67	33	-1,2	18	
10,0 a 10,9 °C	67	33	-1,1	51	31
11,0 a 11,9 °C	63	37	-1,1	30	32
12,0 a 12,9 °C	84	16	-0,9	43	21
13,0 a 13,9 °C	83	18	-0,5	40	10
14 a 14,9 °C	84	16	-0,6	49	13
15,0 a 15,9 °C	81	19	-0,5	70	11
16,0 a 16,9 °C	83	17	-0,4	93	8
17,0 a 17,9 °C	92	8	-0,2	89	6
18,0 a 18,9 °C	93	7	0,0	73	5
19,0 a 19,9 °C	97	3	0,2	70	6
20,0 a 20,9 °C	95	5	-0,2	65	6
21,0 a 21,9 °C	91	9	0,0	104	5
22,0 a 22,9 °C	93	7	-0,2	69	6
23,0 a 23,9 °C	94	6	0,2	62	6
24,0 a 24,9 °C	92	8	0,2	100	6
25,0 a 25,9 °C	79	21	0,4	63	8
26,0 a 26,9 °C	78	22	0,5	112	11
27,0 a 27,9 °C	69	31	1,0	100	25
28,0 a 28,9 °C	70	30	1,0	46	27
29,0 a 29,9 °C	57	43	1,2	44	34
30,0 a 30,9 °C	71	29	1,0	69	27
31,0 a 31,9 °C	71	29	1,1	58	29
32,0 a 32,9 °C	53	47	1,5	59	50
33,0 a 33,9 °C	39	61	1,7	46	59
34,0 a 34,9 °C	57	43	1,5	23	52
35,0 a 35,9 °C	19	81	2,1	21	81
36,0 a 36,9 °C	22	78	1,8	9	66
3,0 a 3,9 °C	0	100	-2,0	1	77

Fonte: ROSSI et al.,2012

A partir dos dados foram contabilizadas as porcentagens de pessoas em conforto e desconforto e gerados gráficos comparativos que mostraram que para percentuais acima de 90% de pessoas se sentindo confortáveis, a faixa ideal seria de aproximadamente entre 17-25°C UTCI; Para percentuais acima de 80% a faixa corresponderia a 12-26°C UTCI. Para a temperatura do ar (Ta) acima de 90% de pessoas em conforto, a faixa seria 17-22°C; e para Ta acima de 80% de conforto, 12-24°C. (ROSSI et al. 2012). Com isso, os autores criaram novas classificações que se adaptaram ao clima da cidade de Curitiba, conforme mostra a tabela 12.

Tabela 12 - Adaptação do índice UTCI proposto por ROSSI et al.,2012

Faixas de UTCI	Categorias de estresse	Faixas de UTCI ajustado	Classificação por conforto/ desconforto	Faixas de UTCI
>46°C	Extremo estresse para o calor	>46°C		
38°C a 46°C	Muito forte estresse para o calor	38°C a 46°C		
32°C a 38°C	Forte estresse para o calor	32°C a 38°C		
26°C a 32°C	Moderado estresse para o calor	27°C a 32°C	>27°C	Desconforto por calor
18°C a 26°C	Conforto térmico	15°C a 27°C	15°C a 27°C	Conforto
9°C a 18°C	Sem estresse térmico	9°C a 15°C	<15°C	Desconforto por frio
0°C a 9°C	Pouco estresse para o frio	0°C a 9°C		
0°C a -13°C	Moderado estresse para o frio	0°C a -13°C		
-13°C a -27°C	Forte estresse para o frio	-13°C a -27°C		
-27°C a -40°C	Muito forte estresse para o frio	-27°C a -40°C		
<-40°C	Extremo estresse para o frio	<-40°C		

Fonte: ROSSI et al.,2012

2.6 Propriedades térmicas dos materiais

As propriedades térmicas dos materiais podem ser definidas como as respostas ou reações dos materiais à uma fonte de calor, conhecê-las é de extrema importância pois esta, se relaciona diretamente com o desempenho térmico de uma edificação, possibilitando a aplicação de parâmetros normativos e estudos sobre clima.

Normas de edificações como a Norma de Desempenho de Edificações Habitacionais, ABNT NBR 15575 (2013), estabelece padrões no que se refere ao desempenho das edificações, dentre eles, o desempenho térmico, por meio da determinação de limites aceitáveis de transmitância e capacidade térmica de paredes externas e coberturas, propriedades relacionadas aos tipos de materiais utilizados na edificação.

A norma de Desempenho térmico de edificações, NBR 15220, apresenta definições sobre as propriedades térmicas dos materiais, métodos de cálculos, e tabelas com as propriedades térmicas de alguns materiais, que podem ser utilizados por exemplo, como referência em programas de simulação para análise do desempenho térmico exigido em normas e regulamentos de eficiência energética. A norma também apresenta a divisão do Brasil em oito zonas bioclimáticas, para cada zona é determinado diferentes parâmetros construtivos, como por exemplo, o tipo de parede e cobertura ideal de acordo com o clima da região. Esta determinação do tipo de parede e cobertura relaciona-se às propriedades térmicas dos materiais, dentre elas, a transmitância térmica, o atraso térmico e o fator solar. Outras propriedades dos materiais que podem ser destacadas e são importantes para a determinação de uma envoltória adequada ao clima são: a absorvância térmica, a condutividade térmica, o calor específico e a emissividade.

2.6.1 Transmitância térmica

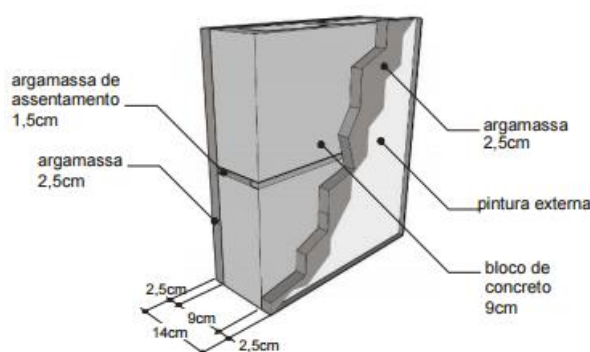
A transmitância térmica é um fator determinante no cálculo do desempenho térmico, utilizado como parâmetro na NBR 15575, pode ser definido como o coeficiente global de troca de calor, representado na literatura brasileira pela letra “U”.

A transmitância térmica é o inverso da resistência térmica da camada analisada, uma parede constituída por várias camadas contínuas, como por exemplo, a parede

apresentada na figura 12, calcula-se somando as resistências correspondentes a cada camada, incluindo as resistências térmicas superficiais (exterior e interior).

O cálculo da resistência térmica de cada camada é em função da espessura e da condutividade térmica do material.

Figura 12 – Exemplo de camadas contínuas em uma parede



Fonte: MORISHITA et al., 2011

2.6.2 Absortância

O coeficiente de absorção da radiação solar, ou absortância, é classificado pela NBR 15220 (2005), como o quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície. A taxa na qual a energia radiante é absorvida, pode ser calculada considerando $0 \leq \bar{\alpha} \leq 1$; Se $\bar{\alpha} < 1$ e a superfície é opaca, porções da irradiação são refletidas.

A absortância está diretamente relacionada com o albedo de superfície, o albedo (α) é a energia refletida por uma superfície em relação ao total de energia que nela incide. Segundo a ASHRAE (American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers- 2001), quando a energia radiante atinge uma superfície esta é absorvida ($\bar{\alpha}$), ou refletida (α) ou transmitida (τ) pelo material, e pode ser expressa pela equação 23.

$$\bar{\alpha} + \alpha + \tau = 1$$

Equação 23

No caso de materiais opacos, do total da energia radiante que incide sobre suas superfícies, uma parcela é refletida e outra absorvida. Sendo possível a determinação de absorptância e refletância a partir da equação 24 :

$$\bar{\alpha} + \alpha = 1$$

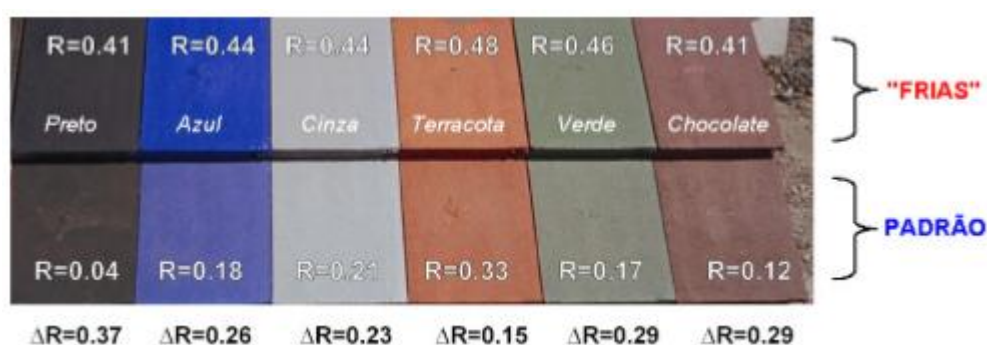
Equação 24

A determinação dos valores de absorptância e refletância são definidos pela NBR 15220 (2005) em relação as cores dos materiais. E estão relacionados aos limites aceitáveis de transmitância térmica, pela norma de desempenho NBR 15575, quando maior a absorptância térmica, menor deverá ser a transmitância térmica da parede.

Todavia, de acordo com Dornelles (2008), os valores de refletância apenas para a região visível não são confiáveis para caracterizar o quanto uma superfície reflete (ou absorve) de energia solar.

A pesquisa de Dornelles (2008) aprofundou a relação entre cores e as absorptâncias, discutindo questões como a comprovação de Newton de que a radiação não tem cor e aspectos da visão humana. Segundo a mesma autora, pesquisadores nos Estados Unidos, desenvolveram pigmentos “frios” para pintura de coberturas, objetivando reduzir a absorptância do material à radiação solar incidente, materiais que possuem a mesma “cor” possuem propriedades de refletância diferentes, conforme se observa na figura 13.

Figura 13 - Refletâncias de telhas de concreto pintadas com tinta padrão e com tinta seletiva.



Fonte: LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, 2004 apud DORNELLES 2008.

As diversas características físicas que as superfícies apresentam formam um conjunto de fatores que irão influenciar diretamente no albedo. Segundo Dornelles (2006) a absorptância de uma parede pintada estará ligada às características da composição

química da tinta no que diz respeito a absortividade, independe do material utilizado na construção da parede, pois o material observado é o que constitui as camadas moleculares mais próximas a superfície externa do corpo.

A rugosidade de um material é outro fator que interfere na absortividade. Segundo Roriz (2007), a energia refletida pelo material pode ser novamente absorvida devido a sua rugosidade, limitando-se a capacidade de absorção daquele material. Por exemplo, para uma absortividade de 20%, 80% são refletidos em todas as direções, uma parcela dessa energia refletida atinge pontos da mesma superfície e 20% dessa parcela também são absorvidos, aumentando o valor da absortância dessa parede. A figura 14, exemplifica essa relação entre absortância e rugosidade.

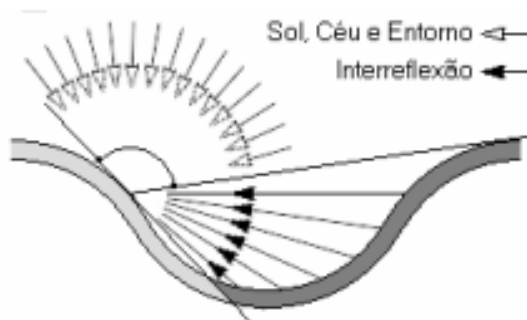
Figura 14 -Interreflexão provocada pela rugosidade do material



Fonte: RORIZ, 2007

No mesmo estudo, Roriz (2007) identifica a influência da ondulação da superfície, que diferente da rugosidade que possuem frações de milímetro, a ondulação envolve a escala dos centímetros. Um exemplo é a telha de fibrocimento, conforme se observa na figura 15.

Figura 15 - Interreflexões devido a ondulação



Fonte: RORIZ, 2007

A absorvância das telhas de fibrocimento

As telhas onduladas de fibrocimento são utilizadas com frequência em edificações populares, principalmente devido ao baixo custo, comparado a outros elementos construtivos. De acordo com a Eternit (2012), o fibrocimento no Brasil tem função social, pois com R\$ 800,00 é possível cobrir uma casa popular de 50 metros quadrados com telhas de fibrocimento, sendo este o primeiro produto de acesso a população de baixa renda depois da lona preta.

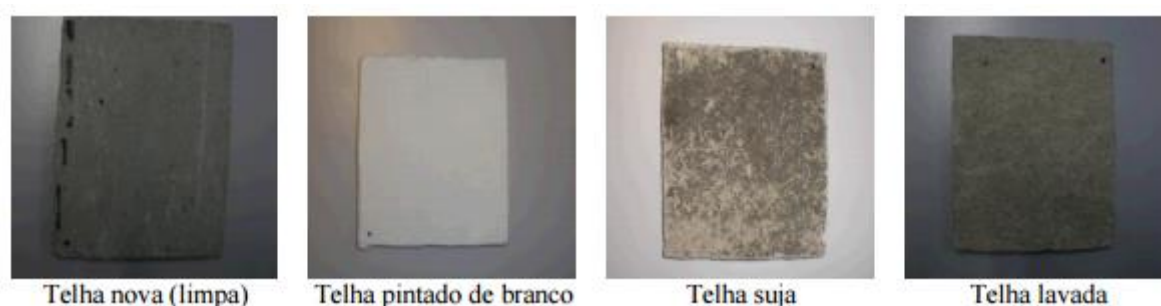
“O fibrocimento é um material compósito que utiliza como ligante o cimento Portland”. (Coelho et al., 2016). O amianto, um dos componentes da telha de fibrocimento, foi substituído por fibras sintéticas, devido a Lei 9055/1995 (BRASIL,1995) que proibiu o uso de amianto na fabricação de componentes construtivos.

De acordo com Coelho et al. (2016) com o tempo e exposição à chuvas, radiação solar e poluição, as telhas de fibrocimento sofrem deterioração como: a carbonatação, a eflorescência e o desenvolvimento de fungos.

A carbonatação é um processo físico e químico natural, que ocorre nos materiais de base cimentícia expostos a concentrações de dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera e pode alterar a absorvância solar das telhas de fibrocimento. A eflorescência é resultante da penetração de líquidos nos poros dos materiais à base de cimento, fazendo com que a coloração da telha seja alterada de acordo com a exposição solar das telhas. O desenvolvimento de fungos e outros agentes biológicos é outro fator que provoca o escurecimento das telhas (COELHO et al., 2016).

Silveira et al. (2012) apresentaram uma avaliação comparativa dos valores de absorvância e temperatura superficial entre telhas de fibrocimento com diferentes acabamentos superficiais, que foram utilizadas na cobertura de edificações construídas no campus da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). As telhas foram analisadas nas seguintes condições: Telha nova (limpa), Telha pintada de branco (acrílico fosco), Telha suja (condição normal da telha depois de vários anos), Telha lavada. Conforme se observa na figura 16.

Figura 16- Amostras de telhas de fibrocimento analisadas



Fonte: SILVEIRA et al., 2012

Após uma análise de absorvância e temperatura de superfície, Silveira et al. (2012) concluíram que as telhas com pintura branca têm menor temperatura superficial do que em relação as telhas sujas, com uma diferença de quase 12°C no valor da temperatura média. Ao comparar a telha branca com a telha nova e a lavada, a telha branca apresentou uma diferença de aproximadamente -7°C em relação a elas. A partir dos resultados, os autores definiram valores de absorvância para a telha de fibrocimento nas diferentes situações, conforme mostra a tabela 13.

Tabela 13- Valores de absorvância para telhas de fibrocimento

Amostra	Absorvância total (%)
Telha suja	84,4%
Telha nova	59,3%
Telha lavada	51,1%
Telha pintada de branco	10,7%

Fonte: SILVEIRA, 2012

2.6.3 Condutividade térmica

A Condutividade térmica é uma propriedade específica do material, para caracterizá-lo quanto ao transporte de calor constante. Ocorre a uma taxa mais elevada em materiais com alta condutividade térmica do que naqueles com baixa condutividade térmica. Materiais de alta condutividade térmica são amplamente usados em aplicações de dissipadores de calor e materiais de baixa condutividade térmica são usados como isolamento térmico.

O conhecimento da condutividade térmica dos materiais pode ser utilizado para o cálculo da resistência térmica e do atraso térmico da envoltória, propriedades utilizadas como parâmetros em normas de desempenho térmico.

2.6.4 Calor específico

Calor específico ou Capacidade térmica específica é definido pela NBR 15220-1 como o quociente da capacidade térmica pela massa. É uma grandeza física que está relacionada com a quantidade de calor recebida e a sua variação térmica. Determina a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de 1 °C de 1g do elemento.

O calor específico é utilizado para o cálculo de propriedades como a capacidade térmica e o atraso térmico.

2.6.5 Emissividade

A emissividade (ϵ) é definida pela NBR 15220-1 como o quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície pela taxa de radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura. Todos os corpos com temperatura superior a zero Kelvin possuem a capacidade de emitir energia eletromagnética. Qualquer objeto que não seja um verdadeiro corpo negro tem emissividade menor que 1 e superior a zero.

Quanto maior o valor de ϵ , mais próxima a emissividade do material é da do corpo negro, ou seja, maior a sua capacidade de emissão de energia.

A emissividade é um dos fatores de variação da resistência térmica superficial.

2.7 Simulação computacional

As ferramentas de projeto têm sido tradicionalmente desenvolvidas visando reduzir a complexidade para o utilizador, por meio de modelos matemáticos construídos para representar cada caminho de fluxo de energia e suas interações, buscando simular a realidade (CLARKE, 2001 pg. 3).

A simulações computacionais ganharam espaço na arquitetura a partir de análises de eficiência energética pois, permitem a previsão de cenários futuros, proporcionando

melhor dimensionamento e escolhas em fase de projeto, além de análises de pós-ocupação.

De acordo com Trindade (2006), no Brasil essas ferramentas são praticamente ignoradas por arquitetos em geral. Soebarto (2005) apud Trindade (2006) descreve as dificuldades em introduzir uma ferramenta de simulação térmica e energética a alunos de curso de graduação em arquitetura, como auxílio à concepção de projetos, devido à complexidade inerente às ferramentas. Entre outros aspectos, destaca que as ferramentas de simulação da ventilação estão entre os programas mais complexos de operação, uma vez que exigem conhecimentos de mecânica de fluidos e de solução numérica de equações diferenciais.

As primeiras ferramentas computacionais para simulação de edificações foram desenvolvidas ainda na década de 70, podendo-se citar como referência as estações de trabalho operando em ambiente Unix³, sob o qual foram desenvolvidas algumas ferramentas computacionais utilizadas até hoje, entre elas: DOE-2⁴ e BLAST⁵ (MENDES et al. 2005). O programa EnergyPlus é um programa computacional criado a partir dos programas BLAST e DOE-2 e distribuído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, desenvolvido para simulação de carga térmica e análise energética de edificações e seus sistemas (MELO et al. 2009).

Atualmente, existem mais de 290 programas de simulação listados no *Building Energy Tools Directory*, uma página da *internet* mantida pelo Departamento de Energia dos EUA que reúne informações sobre as principais ferramentas disponíveis.

³ Unix é um sistema operativo portátil, multitarefa e multi utilizador originalmente criado por Ken Thompson, Dennis Ritchie, Douglas McIlroy e Peter Weiner

⁴ O DOE-2 é um programa de análise de energia de construção amplamente utilizado e aceito que pode prever o uso de energia para todos os tipos de edifícios. Descreve o *layout*, horários de operação, sistemas de condicionamento (iluminação, HVAC, etc.) gerando dados de saída horários.

⁵ BLAST- *Building Loads Analysis and System Thermodynamics* é utilizado para prever o uso de energia do edifício.

Segundo Gonçalves (2007), o ponto de partida de qualquer método numérico é o modelo matemático, ou seja, um conjunto de equações diferenciais parciais e condições de fronteira que regem o processo. Existem vários métodos de aproximar as equações diferenciais para as variáveis do problema, os mais conhecidos são:

- Método das Diferenças Finitas;
- Método dos Volumes Finitos;
- Método de Elementos Finitos

Todos os tipos de métodos produzem o mesmo resultado se a malha utilizada for suficientemente boa, contudo, alguns métodos são mais apropriados para determinadas classes de problemas do que outros (GONÇALVES, 2007).

O Método das Diferenças Finitas é segundo Gonçalves (2007), o método mais rápido para usar em geometrias simples. O ponto de partida é a conservação da equação na forma diferencial. O domínio de solução é coberto por uma malha. Em cada ponto da malha a equação é aproximada, substituindo as derivadas parciais por aproximações em termos de valores das funções nos nós da malha. O resultado é uma equação algébrica por nó da malha, na qual o valor da variável num certo número de nós vizinhos aparece como incógnita.

O Método de Volumes finitos (MVF) evolui das diferenças finitas, cada volume discretizado obedece à lei física da conservação. Segundo Gonçalves (2007), o domínio de solução é dividido em um número finito de volumes de controle (VC) próximos, e a equação da conservação é aplicada a cada volume de controle. No centro de cada VC localiza-se um nó computacional, no qual são calculados os valores das variáveis, sendo os valores das variáveis nas superfícies dos VC obtidos por interpolação em função dos valores nodais (centro do VC).

O modelo de elementos finitos (MEF) é similar ao método de Volumes Finitos em vários aspectos. O domínio é dividido num conjunto discreto de elementos ou elementos finitos que usualmente são não estruturados. Em 2D, são usualmente triângulos ou quadriláteros, enquanto que em 3D são os tetraedros ou hexaedros O

aspecto que diferencia o MEF é o fato de as equações serem multiplicadas por uma função de peso antes de serem integradas sobre todo o domínio (GONÇALVES, 2007).

Os pontos em que as variáveis são calculadas, são definidos pelas malhas numéricas, estas são uma representação do domínio geométrico no qual o problema irá ser resolvido. A malha divide o domínio da solução num número finito de sub-domínios e podem se dividir em: malhas ortogonais e malhas não ortogonais, sendo esta última subdividida em malhas estruturadas e malhas não estruturadas.

Na simulação computacional, o tipo de abordagem de modelagem utilizado depende da complexidade dos fenômenos observados, dos resultados esperados e dos parâmetros investigados. Segundo Megri e Haghighat (2007), podem se destacar 3 tipos de redes de modelagem:

Rede Nodal (um único nó): Neste método, a zona é perfeitamente homogênea. As aplicações desta técnica são limitadas pois é muito simplificada. Em um cálculo de energia de um edifício de quatro pavimentos, por exemplo, todo o edifício seria considerado como um único nó.

Rede nodal multizonal: Os modelos multizonais tratam a transferência de calor e o fluxo de ar entre diferentes áreas de um edifício. Em uma abordagem de modelagem térmica, uma zona pode ser um ambiente, ou um conjunto de ambientes. Um pavimento pode ser representado como uma única zona.

Modelagem Computacional de Dinâmica de Fluidos (CFD): Uma abordagem para estudar o fluxo de ar e a temperatura em um ambiente é a análise de dinâmica de fluido computacional (CFD), que subdivide o volume de uma única sala em mil, se não em milhões de nós (HAGHIGHAT et al., 1992). Os modelos de CFD podem ser usados em ambiência de edifícios para obter informação do escoamento de ar (velocidade e temperatura do ar) e da concentração de poluentes num espaço.

De acordo com Gonçalves (2013), diversos autores têm estudado o acoplamento de modelos multizonais e CFD. Os estudos de Simulação Energética e de Computação de Fluidos Dinâmicos (CFD), permitem determinar o impacto de diferentes soluções

para o edifício, como: especificação de materiais, orientação solar, efeito da inércia térmica, entre outros.

Dentre os trabalhos realizados na área sobre simulação, pode-se destacar o apresentado por Doerfler; Krueger (2014), os autores analisaram edificações de interesse social do programa Minha casa Minha Vida e realizaram simulações termo-energéticas com o *software* EnergyPlus (programa de simulação computacional que auxilia o estudo e análise de edifícios do ponto de vista termo energético), visando avaliar o desempenho termo-energético de uma habitação popular aproveitando-se de estratégias passivas para a Zona Bioclimática 01 de acordo com a NBR 15220-3.

Outro trabalho relacionado a simulação e habitação popular é o de Oliveira (2010), que analisou o desempenho térmico de um protótipo de Habitação de Interesse Social condicionado passivamente na cidade de Natal, RN. O autor comparou valores de temperatura do ar medidos no interior da habitação com um cenário ideal modelado no programa *Design Builder 12*.

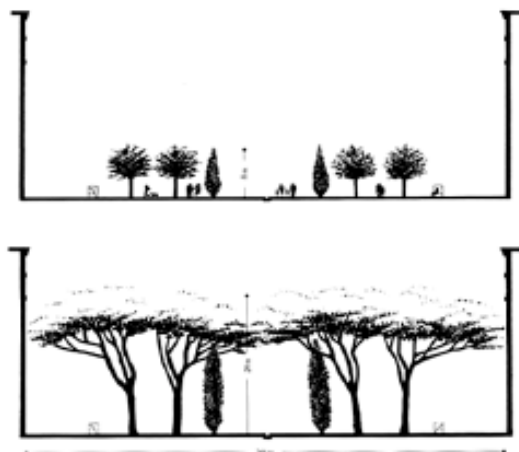
Krüger; Michaloski (2002) verificaram diferentes tipologias de programas habitacionais de acordo com limites fixados na Norma de Conforto para habitação de interesse social. O objeto de estudo foram moradias existentes na Vila Tecnológica de Curitiba. Os autores simularam as habitações no programa COMFIE, (*Calcul d'Ouvrages Multizones Fixe à une Interface Expert* – Cálculo de Multizonas Fixadas a uma Interface Inteligente) que é um programa simplificado de simulação, desenvolvido pelo *Centre d'Energétique da École des Mines de Paris* para análise térmica de prédios multizonais. O método de cálculo do COMFIE baseia-se na análise modal, aplicada ao estudo da transferência de calor, que possibilita simular inúmeros ambientes de uma edificação ao mesmo tempo.

2.7.1 Pesquisa utilizando o programa Solene Microclima

Vinet (2000), realizou uma pesquisa, utilizando-se da ferramenta Solene Microclima para avaliar o impacto de vegetação sobre o microclima urbano, na “Place du Millénaire”, uma grande rua central de Antigone, bairro no centro da cidade de Montpellier, França. Este lugar é ao mesmo tempo um acesso de pedestres e uma área de lazer com bares e lojas. Ele fez uma comparação entre a atual situação e uma

situação futura (Figura 17), buscando verificar como árvores mudariam o clima urbano após 30 anos (árvores que crescem de 8m a 20m de altura).

Figura 17 - Situações a serem simuladas com o Solene Microclima

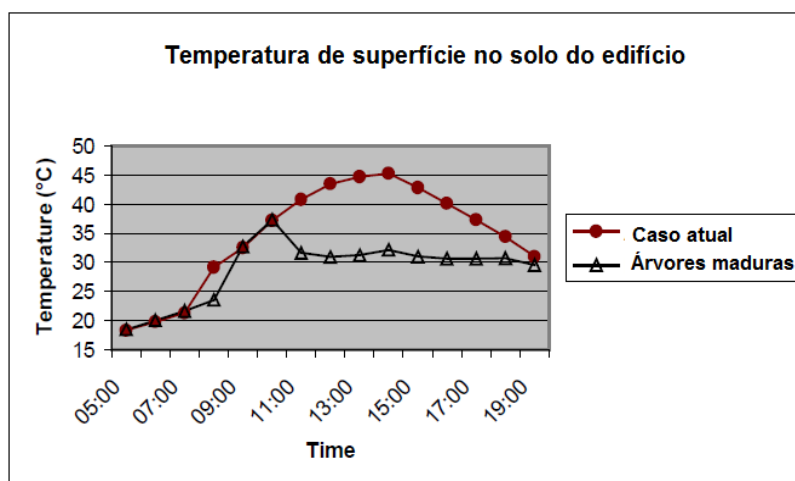


VINET, 2000.

As simulações foram realizadas em um dia claro, ensolarado e quente no verão, verificando o impacto das árvores na temperatura de superfície.

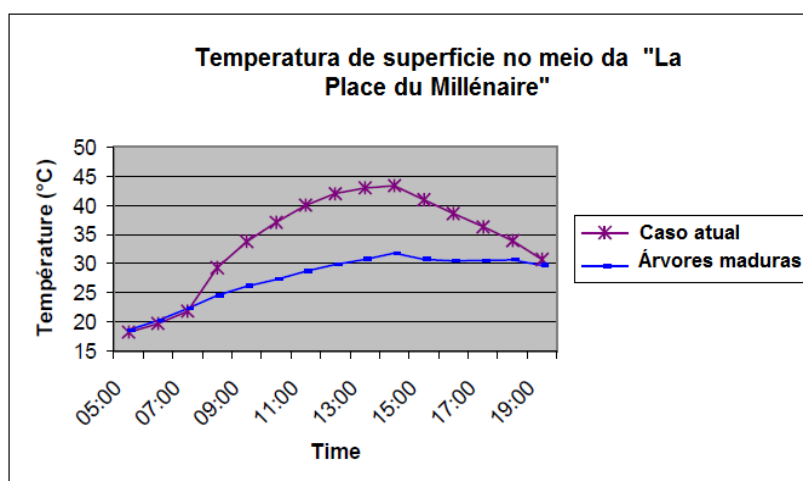
Nessa proposta de verificação do modo em que as árvores poderiam aumentar a qualidade do microclima urbano, foi possível observar que as árvores maduras proporcionaram redução de temperatura no solo do edifício (Figura 18) e na rua (Figura 19), bem como aumentaram a porcentagem de áreas externas confortáveis, como pode ser observado na figura 20.

Figura 18- Caso atual e árvores maduras, temperatura no solo do edifício



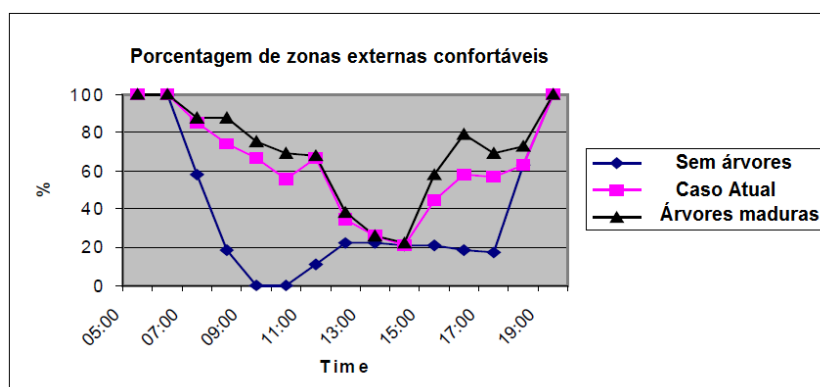
Fonte: Adaptado VINET, 2000

Figura 19 - Caso atual e árvores maduras, avaliação da temperatura na rua estudada



Fonte: Adaptado VINET, 2000

Figura 20 - Caso atual e árvores maduras, porcentagem de zonas externas confortáveis



Fonte: Adaptado VINET, 2000

3 SOLENE MICROCLIMA

3.1 Apresentação do modelo Solene Microclima

Solene é uma ferramenta de simulação desenvolvida pelo laboratório francês CRENAU (Centre de Recherche Architectures Urbanités Nantais), com o objetivo inicial de avaliar a radiação em cenas urbanas a partir de uma malha 3D. Segundo Morille et al. (2015), o modelo considera a radiação solar direta e difusa que é calculada pelo arquivo climático ou por meio do modelo solar de Perez⁶.

⁶ ASHDOWN, Perez All-weather model for sky luminance distribution—Preliminary configuration and validation. *SolarEnergy*, 1993, 50 (3), p.235-245.

O *software* possui código aberto, ou seja, seu direito autoral permite o estudo e a modificação de forma gratuita para qualquer finalidade. Dentre as vantagens de um *software* com código aberto, destacam-se:

- A liberdade de usar o programa, para qualquer propósito;
- A liberdade de estudar como o programa trabalha, podendo adaptá-lo às necessidades próprias;
- A liberdade de melhorar o programa, e lançar suas melhorias para o público em geral;

Normalmente esse tipo de código funciona de maneira colaborativa. O termo Código Aberto, ou *open source* em inglês, foi criado pela OSI (*Open Source Initiative*). O movimento pelo Código Aberto foi iniciado no final do século XX.

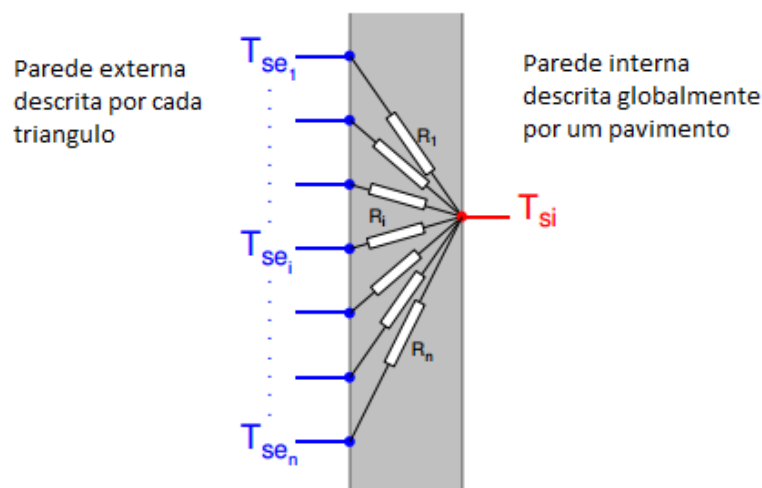
Segundo Morille (2016), o modelo numérico do Solene Microclima é o Método das Diferenças Finitas. O programa permite o acoplamento com o CFD Code_Saturne, que primeiramente gera valores de velocidade do ar em toda a cena urbana e posteriormente permite calcular o coeficiente de convecção (h_c) de maneira mais realista, considerando as trocas convectivas entre as superfícies e o ar, por meio de equações de conservação, (energia, momento, continuidade de massa, etc) a temperatura do ar e a umidade também podem ser calculadas. Quando o *software* é acoplado ao CFD code_saturne, o modelo numérico passa a ser o Método de Volumes Finitos.

O comportamento térmico do edifício é representado por um modelo nodal multizonal, no qual cada pavimento do edifício térmico é considerado como uma zona. Segundo Malys (2012), o objetivo do modelo Solene Microclima não é competir com programas comerciais, e sim permitir estimar a sensibilidade do comportamento térmico dos edifícios às condições externas heterogêneas. Por razões de economia de tempo de simulação, ele se restringe a um nó térmico interno para todas as orientações. As trocas de radiação infravermelha entre as superfícies se faz por intermédio de um nó de temperatura média radiante. Cada pavimento é representado por oito nós térmicos:

- Dois nós para a temperatura de superfície interna e externa das paredes e vidros;
- Três para as temperaturas de superfície do piso, do teto e das paredes internas;
- Um para a temperatura interna das paredes internas;
- Um para a temperatura do ar interior;
- Um para a temperatura média radiante interna.

A figura 21, apresenta a agregação dos fluxos das faces externas verso um nó de temperatura de parede único interno.

Figura 21 - Agregação dos fluxos das faces externas verso um nó de temperatura de parede único interno



Fonte: Adaptado BOYER, 2009

As simulações são em regime transiente, calculando simultaneamente os balanços de massa e de energia para as zonas simuladas. O programa considera uma temperatura inicial, e o processamento é feito a partir de um arquivo de entrada com os dados climáticos.

As características do modelo Solene Microclima são descritas pela matriz PLOR (Potencialidades, Limites, Oportunidades e Riscos) apresentada no quadro 1. A matriz PLOR é um modelo proposto por Pontes et al. (2015), descrita como uma variação da matriz SWOT, visa aumentar o escopo de conhecimento a respeito do modelo, permitindo conhecer mais profundamente os processos envolvidos na modelagem.

Quadro 1 – Matriz PLOR para o modelo Solene Microclima

Potencialidades -Modelo de livre acesso; -Possui código aberto, possibilita a implementação de melhorias; -Modelo trabalha em regime transiente; -Interface de modelagem com outros programas, dentre eles o Sketchup; -Permite o acoplamento com código CFD; -Resultados adequados para o nível de complexidade do modelo; -Aplicável e adaptável a diversas condições climáticas e de uso e ocupação do solo. - Modelagem considerando a inércia térmica das construções. -Permite a análise integrada da edificação e do seu entorno, pois estima a sensibilidade do comportamento térmico do edifício às condições externas heterogêneas. -Permite o cálculo da temperatura de superfície em cada triângulo da malha. - É possível obter o consumo energético; - Modelo de paredes e telhados verdes;	Limitações - Modelagem da topografia limitada, não é possível modelar taludes, somente platôs; - Não é possível modelar coberturas inclinadas; - Necessário acoplamento para o cálculo da velocidade do vento; - Cada pavimento do edifício térmico é considerado como uma zona, não é possível analisar ambientes separadamente em um mesmo pavimento; - Não é possível modelar paredes e divisórias internas; - Não é possível modelar fachadas espelhadas. - É possível determinar apenas um perfil arbóreo por simulação;
Oportunidades -Modelo em desenvolvimento, possível de implementar novas análises; -Permite a inclusão das propriedades térmicas dos materiais; -Considera paredes e coberturas verdes; -Possibilidade de incluir dados sobre o tipo de solo, revestimentos e tipos de vegetação nas faces da geometria; - Inclui módulo para o processamento de dados em gráficos; - Possibilidade de calcular a temperatura do ar externo com o acoplamento CFD; - Inclui módulo para estimativa de conforto térmico humano usando o índice UTCI. -Possibilidade de alterar o arquivo climático de acordo com a cidade analisada.	Riscos - Requer conhecimento básico de linguagem de programação (Python); - Modelo não documentado e em constante desenvolvimento; - Falta de perícia no levantamento e processamento dos dados de entrada e configurações podem levar a resultados errôneos; - Falta de perícia na elaboração do arquivo climático pode levar a resultados errôneos; - Falta de perícia na elaboração da geometria pode levar a erros na simulação;

Fonte: Autora, 2017

Cálculo da energia solar

A energia solar direta sobre uma superfície perpendicular é calculada com base na altura solar (h) pela fórmula de Perrin Brinchambault (MALYS 2012 apud MIGUET 2000).

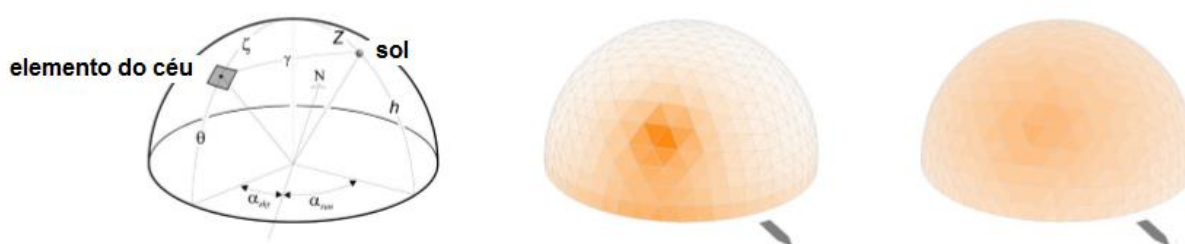
$$R_{direta} = 1230 \exp \frac{-1}{3,8 \cdot (h+1,6)}$$

Equação 25

Os triângulos expostos ao sol irão receber o fluxo de radiação solar direta correspondente ao valor de R_{direta} , ponderado pelo ângulo de incidência da radiação. Seu valor é dado em $W.m^{-2}$.

O fluxo solar difuso corresponde a radiação difundida por toda a abóbada celeste. Isto é, representado por um modelo geométrico do céu em forma de uma cúpula geodésica de raio infinito (figura 22). O fluxo é então distribuído por toda a abóbada celeste em função da nebulosidade do céu. Solene permite utilizar diferentes tipos de céu calculados a partir da formula de Perez et al. (1987).

Figura 22 - Abóboda Celeste - Solene Microclima



Fonte: MALYS, 2012 apud MIGUET, 2000

A radiação solar infravermelha é calculada pela equação empírica (Equação 26) baseada em uma medição realizada na Inglaterra com variações de temperatura entre $-6^{\circ}C$ a $+26^{\circ}C$.

$$L \downarrow = 213 + 5,5.Ta$$

Equação 26

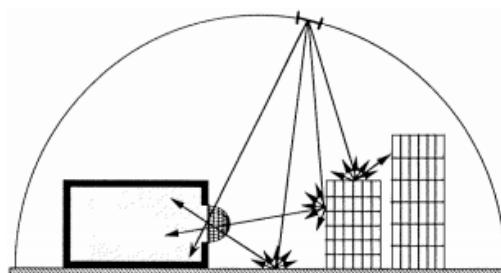
Onde Ta é a temperatura do ar externo em $^{\circ}C$

Como o modelo possui código aberto, é possível substituir os valores da radiação infravermelha de acordo com o tipo de céu, considerando por exemplo, o efeito das nuvens.

O programa também considera as propriedades radiativas dos materiais, as interreflexões e o balanço de ondas infravermelhas entre eles, estimando o fluxo solar que atinge a superfície urbana. A figura 23 apresenta as interreflexões entre os materiais. Segundo Miguet (2000), o cálculo referente às trocas térmicas baseia-se

em expressão física e reflete o fato de que cada elemento de superfície pode distribuir e receber com todos os outros elementos do meio. O princípio por trás deste conceito é conhecido como “radiosidade”, mas na verdade é o princípio de trocas radiativas entre superfícies, cuja origem encontra-se no campo da engenharia térmica.

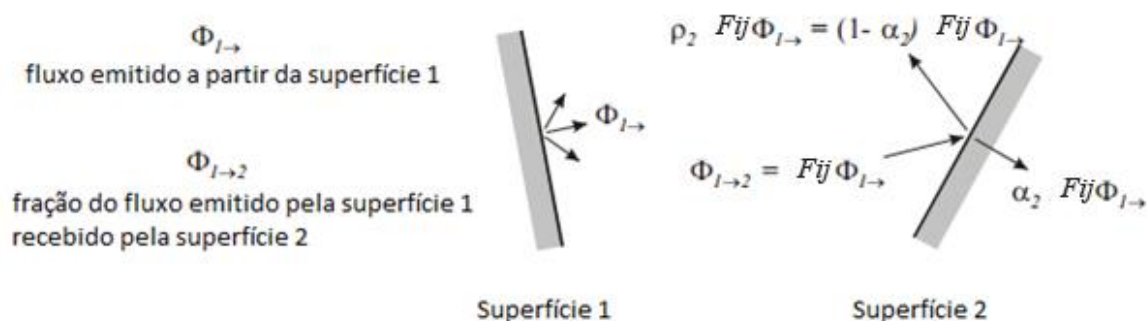
Figura 23- Reflexão dos diferentes elementos da superfície do ambiente



Fonte: MIGUET, 2000

Os princípios que regem a troca radiativa entre dois ou mais elementos de superfície são mostradas esquematicamente na Figura 24. O fluxo é emitido uniformemente a partir de uma superfície (1) e é recebido pelas superfícies do ambiente (2), incluindo a emissora, se esta for côncava, desde que não exista obstáculos entre as duas superfícies. O fluxo recebido é de acordo com o fator de forma (F_{ij}), que é proporcional ao afastamento e orientação entre as superfícies. A irradiância recebida é resultado dos fluxos emitidos por todas as outras superfícies do ambiente e depende das características dos materiais da envoltória.

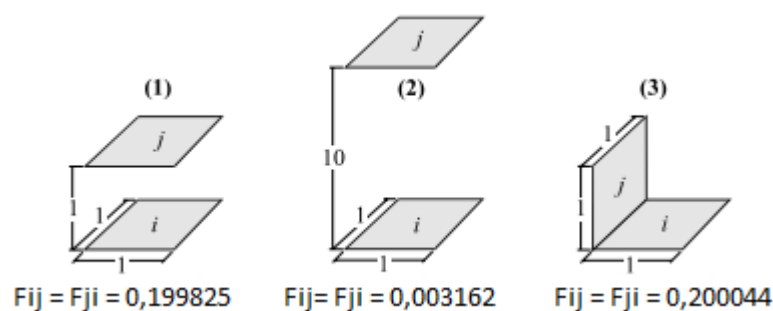
Figura 24 - Distribuição do fluxo entre superfícies no programa Solene Microclima



Fonte: MIGUET, 2000.

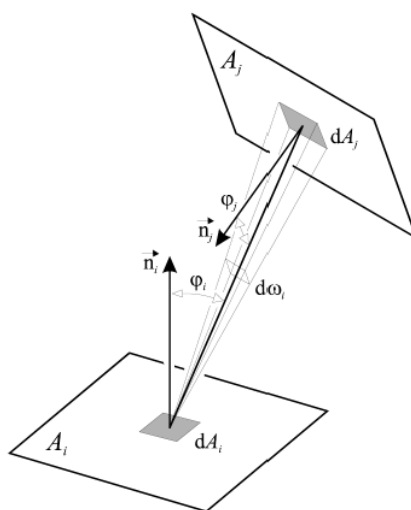
Como exposto acima, o fator de forma é função das relações geométricas entre os dois elementos, sendo sua distância e orientação determinantes para o cálculo referente às trocas térmicas, conforme se observa nas figuras 25 e 26.

Figura 25 - Relação entre o fator de forma, a distância e a geometria



Fonte: MIGUET, 2000

Figura 26 - Relação entre o fator de forma, a distância e a geometria.



Fonte: MIGUET, 2000

O cálculo do fator de forma F_{ij} , (adimensional, entre 0 e 1) é realizado de acordo com a equação 27:

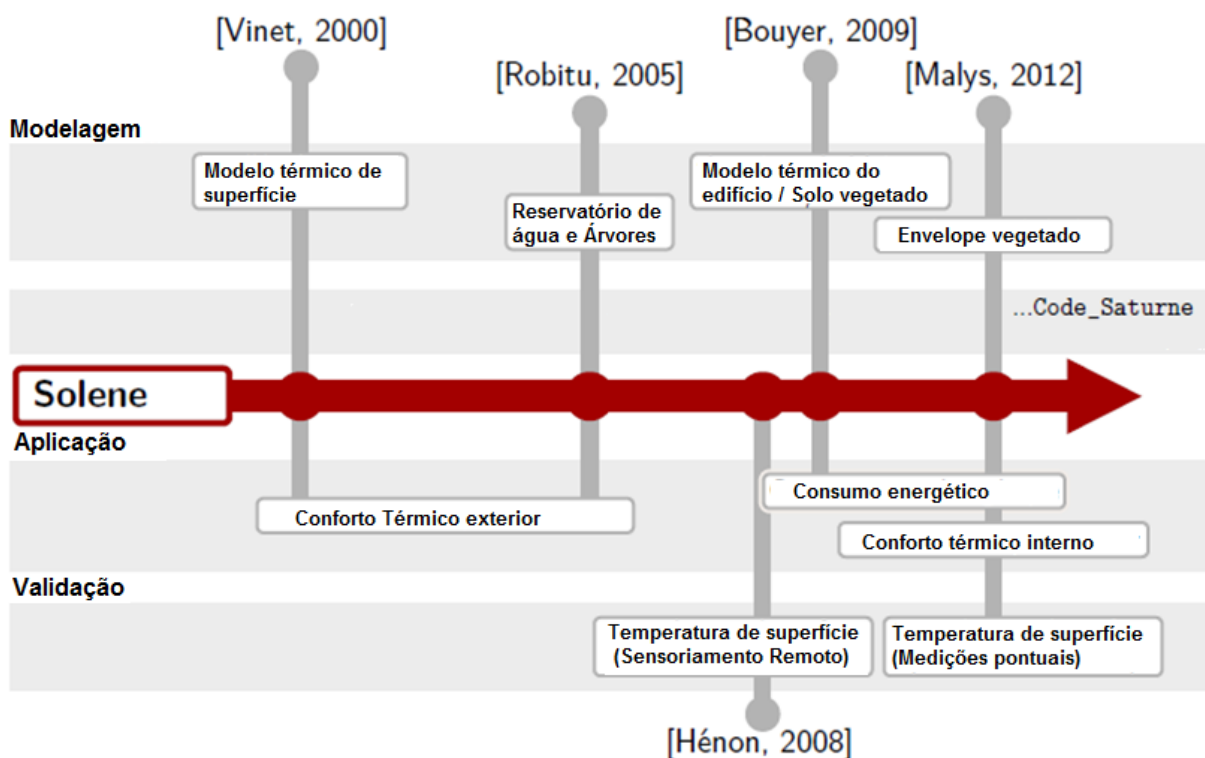
$$F_{ij} = v_{ij} \cdot \frac{1}{A_i} \cdot \int A_i \cdot \int A_j \cdot \frac{\cos \phi_i \cdot \cos \phi_j}{\pi \cdot r^2} \cdot dA_i \cdot dA_j \quad \text{Equação 27}$$

V_{ij} corresponde a função de visibilidade entre os dois elementos

O modelo Solene Microclima originou-se a partir de um modelo termo-radiativo inicial, no qual foi incorporado ao longo de outros estudos, um modelo térmico de superfície (VINET, 2000), um modelo de reservatório de água e árvores (ROBITU, 2005), um

modelo térmico do edifício considerando solo vegetado, (BOUYER,2009) e a possibilidade de estudar paredes e coberturas verdes (MALYS,2012), como pode ser observado na figura 27.

Figura 27 - História do Solene Microclima



Fonte: Adaptado MALYS, 2013

3.2 Modelo térmico do edifício

Para representar o edifício, utiliza-se uma abordagem de modelagem térmica simplificada. As paredes são homogêneas e podem ou não considerar a inércia térmica. A propagação do calor no interior é considerada monodimensional. O comportamento das paredes de um edifício é regido pela equação fundamental de calor de Fourier (equação 28).

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + D \quad \text{Equação 28}$$

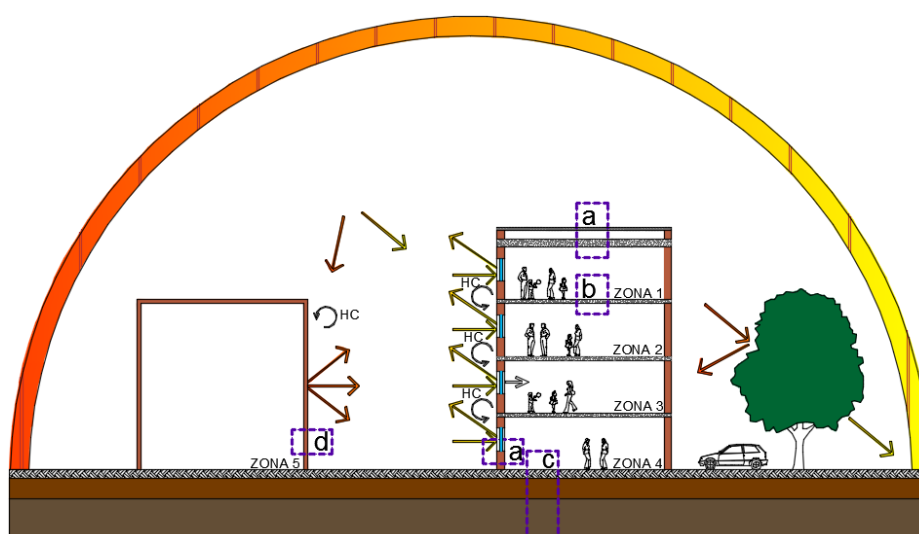
Segundo Bouyer (2009), para a equação de Fourier vários métodos são possíveis, como os métodos analíticos, numéricos e de representação externa. Estes métodos

permitem avaliar com boa precisão sobre a conduta dos fluxos pelas paredes. A desvantagem é que estes métodos são difíceis de implementar e geralmente requer um tempo maior para cálculo. Com isso, um método aproximado baseado na analogia térmica elétrica com menor tempo de cálculo é utilizado.

Para as simulações são consideradas dois tipos de configuração, o estudo da temperatura de superfície (edifício comum) e o estudo térmico dos edifícios (edifício térmico) que gera valores de temperatura média radiante e temperatura do ar interno. A simulação térmica dos edifícios exige uma geometria mais detalhada, como por exemplo, a divisão dos pavimentos e janelas em todos os andares. Em cada simulação é possível simular um único edifício térmico, ou seja, em um conjunto de edifícios, em somente um será possível extrair dados de temperatura interna do ar e temperatura média radiante. Nos demais edifícios é possível extrair a temperatura de superfície externa, que é calculada utilizando o modelo de parede simples.

A figura 28 apresenta uma síntese das trocas realizadas pelo Solene, no qual: (a) refere-se ao sistema de modelização das coberturas e paredes do edifício térmico, (b) aos pavimentos intermediários, (c) do primeiro pavimento e o solo, (d) do edifício comum (que considera somente a temperatura de superfície).

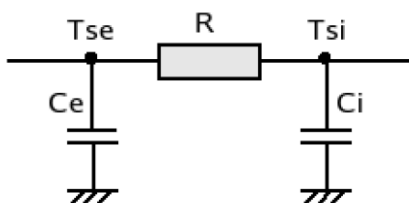
Figura 28 - Resumo das trocas realizadas no Solene Microclima



Fonte: Autora, 2016

O método de modelização das paredes dos edifícios comuns (d), para o cálculo da temperatura de superfície, consiste em representar o comportamento térmico em regime dinâmico por meio de uma rede de resistência e capacidade térmica (Figura 29).

Figura 29- Modelização edifício comum (d), paredes e cobertura



Fonte: MALYS, 2012

A resistência térmica total R é calculada através do regime permanente.

$$R = \sum_j R_j$$

Equação 29

Em que:

R_j = Resistência térmica da camada j da parede ($m^2.K.W$);

T_{se} = Temperatura de superfície externa;

T_{si} = Temperatura de superfície interna.

As equações para o cálculo da capacidade térmica podem ser descritas por:

$$C_i = \sum_{j=1}^n \rho \cdot c \cdot e \cdot \beta_j$$

Equação 30

$$C_e = \sum_{j=1}^n \rho \cdot c \cdot e \cdot (1 - \beta_j)$$

Equação 31

Em que :

ρ = densidade de massa aparente;

c = calor específico;

e = espessura.

β_j exprime para cada camada a relação:

$$\beta_j = \frac{\frac{R_j}{2} + \frac{R_{j-1}}{2}}{R}$$

Equação 32

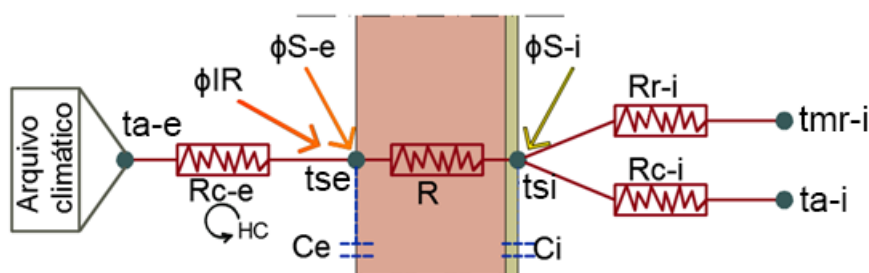
Para os edifícios analisados internamente (Edifício térmico), quatro tipos de paredes são representadas para cada pavimento:

- Paredes externas;
- Vidros;
- Paredes internas;
- Laje;
- Teto.

Paredes externas (a)

Na figura 30 é possível observar o modelo de paredes e cobertura do edifício térmico.

Figura 30- Modelização edifício térmico (a), paredes e cobertura



Fonte: Adaptado MALYS, 2012.

Em que :

t_{a-e} = Temperatura do ar externo ($^{\circ}\text{C}$)

t_{a-i} = temperatura do ar interno ($^{\circ}\text{C}$)

t_{mr-i} = temperatura média radiante interna ($^{\circ}\text{C}$)

t_{se} = temperatura de superfície externa ($^{\circ}\text{C}$)

t_{si} = temperatura de superfície interna ($^{\circ}\text{C}$)

R_{c-e} : Resistência convectiva entre t_{se} e t_{a-e} ($\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$)

R_{c-i} : Resistência convectiva entre t_{si} e t_{a-i} ($\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$)

R_{r-i} : Resistência radiativa entre t_{si} e t_{mr-i} ($\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$)

Φ_{s-i} : Parte do fluxo solar transmitido e absorvido pela superfície interior das paredes ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

Φ_{s-e} : Fluxo solar absorvido pela superfície exterior das paredes ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

Φ_{IR} : Fluxo total trocado com o ambiente (atmosfera e superfícies urbanas)

A temperatura do ar externo (t_{a-e}) é relacionada com a temperatura do arquivo climático, a resistência convectiva entre a temperatura de superfície externa e o ar externo, é de acordo com o coeficiente de convecção (H_c), calculado pela expressão 33.

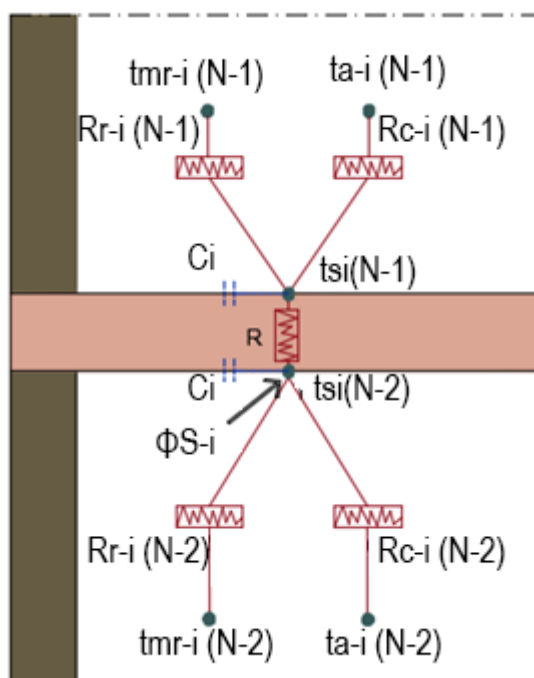
$$H_c = 5,8 + 3,8v_a \quad \text{Equação 33}$$

As paredes de vidro e o sistema de cobertura utilizam o mesmo modelo das paredes externas.

Pavimentos intermediários (b)

Para a representação dos pavimentos intermediários (b), o modelo relaciona-se com a resistência do ar interno e com a temperatura média radiante do pavimento anterior, como pode ser observado na figura 31.

Figura 31- Modelo dos pavimentos intermediários (b)



Fonte: Adaptado BOUYER, 2009.

Em que:

R : Resistência térmica da laje de acordo com a capacidade térmica dos materiais;

t_{a-i} (N-1): Temperatura do ar no pavimento intermediário 1

t_{a-i} (N-2): Temperatura do ar no pavimento intermediário 2

t_{mr-i} (N-1): Temperatura média radiante no pavimento intermediário 1

t_{mr-i} (N-2): Temperatura média radiante no pavimento intermediário 2

t_{si} (N-1): Temperatura de superfície interna do pavimento 1

t_{si} (N-2): Temperatura de superfície interna do pavimento 2

R_{c-i} (N-1): Resistência convectiva entre T_{a-i} (N-1) e T_{si} (N-1) ($m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$)

R_{r-i} (N-1): Resistência radiativa entre T_{mr} (N-1) e T_{si} (N-1) ($m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$)

R_{c-i} (N-2): Resistência convectiva entre T_{a-i} (N-2) e T_{si} (N-2) ($m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$)

R_{r-i} (N-2): Resistência radiativa entre T_{mr} (N-2) e T_{si} (N-2) ($m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$)

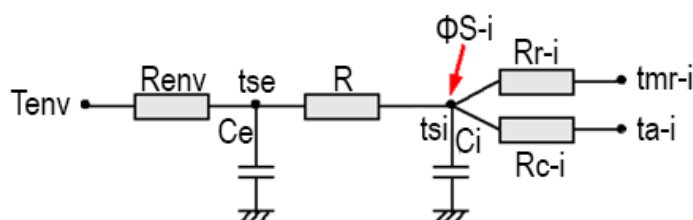
Φ_{s-i} : Parte do fluxo solar transmitido e absorvido pela superfície interior das paredes ($W \cdot m^{-2}$)

Modelo do pavimento em contato com o solo – Edifício térmico (c)

O modelo se diferencia do modelo das paredes externas pela ausência de troca de calor por radiação com o ambiente externo (BOUYER, 2009).

A figura 32 configura a analogia do pavimento que tem contato com o solo. Onde R_{env} é a resistência térmica na face inferior da laje e T_{env} é a temperatura do solo a uma profundidade determinada pela equação 34 (BOUYER, 2009).

Figura 32- Modelização edifício térmico (c), piso do primeiro pavimento



Fonte: BOUYER, 2009.

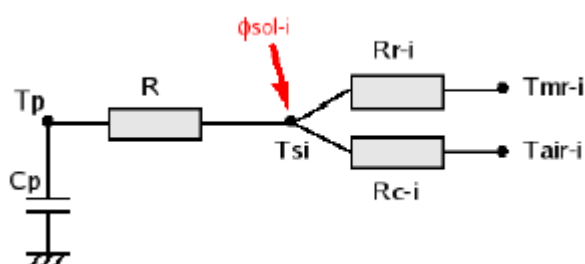
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_{sol} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

Equação 34

Paredes internas

As paredes internas não são modeladas, mas são consideradas no modelo pelo seu efeito sobre a inércia térmica. O modelo é descrito na figura 33. Nenhum fluxo passa por essa parede e elas estão em contato somente com o ambiente interno (temperatura do ar e temperatura radiante). São consideradas simétricas, portanto, sua capacidade térmica (C_p) é a soma de C_i e C_e (BOUYER, 2009).

Figura 33- Modelo paredes internas



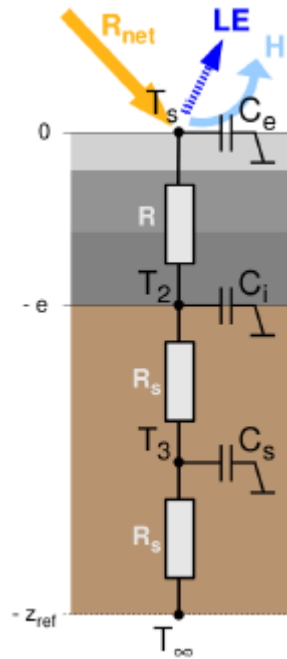
Fonte: BOUYER, 2009

Solo

A temperatura do solo tem um papel importante no balanço de radiação. O cálculo do solo no programa Solene considerava anteriormente o mesmo modelo de construção das paredes, sendo assim, segundo Malys (2009), ocorria uma limitação significativa.

O novo modelo do solo é unidimensional e possui quatro nós, representado na figura 34.

Figura 34 - Modelo do solo



Fonte: MALYS, 2009

Segundo Malys (2009), nesta parametrização as características térmicas superficiais (C_e e C_i , resistência térmica das camadas, etc) são constantes ao longo de toda a cena. A temperatura na profundidade da camada t é considerada constante ao longo de todo o dia e calculada em função do dia do ano conforme a equação 35.

$$T_{\infty}(z, t) = t_m - A_T \exp \left[-\frac{z}{z_d} \right] \cdot \cos \left[\omega(t - t_0) - \frac{z}{z_d} \right] \quad \text{Equação 35}$$

No qual:

“ z ” é a profundidade em metros;

“ z_d ” é a profundidade de amortização expressa pela equação 36:

$$z_d = \sqrt{\frac{2\alpha s}{\omega}} \quad \text{Equação 36}$$

“ t ” é o número de horas do ano (0-365);

“ t_0 ” é o dia do ano correspondente ao mínimo de ondas térmicas na superfície;

“ ω ” frequência de variação anual, expressa pela equação 37:

$$\omega = \frac{2\pi}{365} \quad \text{Equação 37}$$

“ t_m ” temperatura média anual (°C),

“ A_t ” Amplitude térmica anual na superfície,

“ α_s ” é a difusividade térmica do solo, expressa pela equação 38:

$$\alpha_s = \left(\frac{\lambda_{sol}}{\rho_{sol} \cdot c_{sol}} \right) \cdot 86400 [m^2/j^{-1}] \quad \text{Equação 38}$$

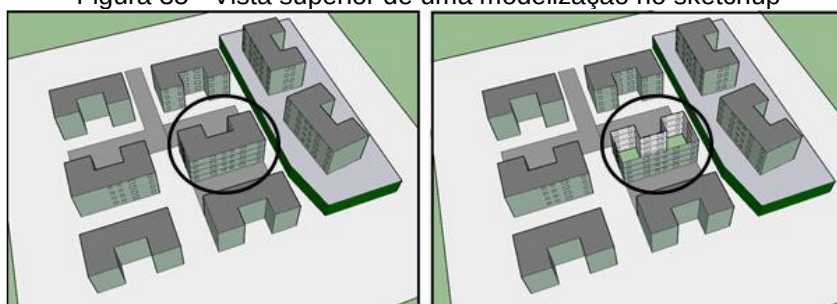
3.3 Geometria

A geometria do modelo é composta por um conjunto de superfícies planas disjuntas armazenadas em sucessão. Cada face é composta por contornos ou polígonos, formando uma lista ordenada e fechada de coordenada de pontos (BOUYER, 2009).

Segundo Bouyer (2009), a escala de espaço pode ser adotada para um edifício, uma rua, um conjunto de ruas e edifícios (fragmento urbano), ou, possivelmente, um bairro.

Atualmente existem duas possibilidades de criação das faces da geometria, no programa Sketchup e no programa Salome. Para a modelagem, deve ser considerado somente as superfícies externas das edificações. Os pavimentos internos, paredes e espessuras, não devem ser representados. Sugere-se a separação dos pavimentos do edifício térmico por meio de uma linha, para maior precisão dos resultados. A figura 35 apresenta como deve ser realizada a geometria no programa Sketchup.

Figura 35 - Vista superior de uma modelização no sketchup



Fonte: Autora, 2016

Após a modelagem no Sketchup, a geometria deve ser exportada por meio de um *plugin* que permite a conversão do formato .skp para o formato do programa Salome, este é um *software* de código aberto que fornece uma plataforma genérica para pré e pós-processamento para a simulação numérica. No programa Salome deve ser modelado o domínio que será agrupado a geometria importada do Sketchup.

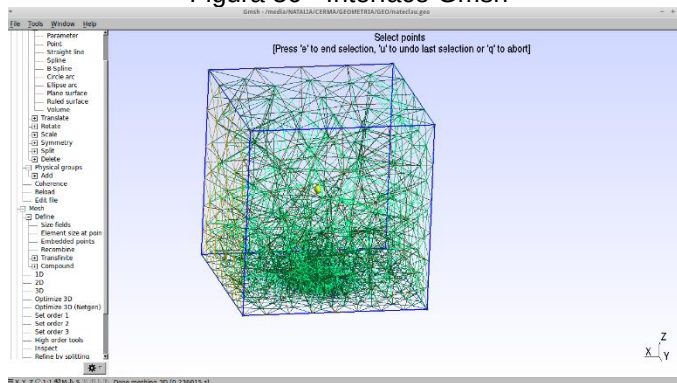
Gmsh

Após a modelagem no programa Salome, a geometria é exportada para o programa Gmsh (figura 36), este é um *software* livre gerador de malha de elementos finitos. Ele contém 4 módulos: para descrição geométrica, entrosamento, resolução e pós-processamento.

O Gmsh gera um arquivo de extensão “geo” no qual é possível verificar toda a geometria por meio de códigos, números e linhas. As faces de cada componente da geometria são discretizadas permitindo a sua caracterização individual, como por exemplo, a definição de nomes para cada face da geometria. Estes nomes serão a base inicial para a caracterização das propriedades térmicas dos materiais.

A definição da malha 2D e 3D é realizada no programa e pode ser subdivida visando um detalhamento maior em pontos específicos de interesse, por exemplo, é possível determinar um tamanho de malha para o domínio e outro para as edificações, ou ainda especificar uma malha diferente para os edifícios comuns e para o edifício térmico.

Figura 36 - Interface Gmsh



Fonte: Autora, 2016

3.4 Parâmetros de entrada

A configuração dos parâmetros de entrada é o primeiro passo para a simulação, chamados também de pré-processamento, é a fase onde são definidas as estratégias de simulação e as características do objeto simulado.

Família: O arquivo denominado família, “*famille*” originalmente, possui formato XML, que significa uma linguagem de marcação recomendada para a criação de documentos com dados organizados hierarquicamente, tais como textos, banco de dados ou desenhos vetoriais. É um agregado de códigos para serem lidos por computadores. É neste arquivo que são atribuídas as propriedades aos nomes definidos para as faces das geometrias. Bem como a distinção de qual modelo será utilizado para o cálculo das paredes/solo/cobertura/piso. A figura 37 exemplifica o modelo de código utilizado e as propriedades definidas. Onde “fachadasgeral” é um nome definido anteriormente pelo usuário no programa Gmsh na descrição da geometria, e “batiments” é a definição do modelo de parede utilizado, sendo este último pré-definido pelos códigos do programa, não sendo possível alteração de maneira simplificada. A classe *batiments*, refere-se aos edifícios comuns.

Figura 37 - Código interno Solene Microclima – Família

```

    "<?xml version="1.0"?>
      <familles>
        <famille>
          <name>fachadasgeral</name>
          <classe>batiments</classe>
          <albedo>0.25</albedo>
          <transmittance>0</transmittance>
          <emissivite>0.9</emissivite>
          <layers>
            <layer>
              <position>1</position>
              <materiau>concreto</materiau>
              <epaisseur>0.14</epaisseur>
            </layer>
          </layers>
          <soleneID>0</soleneID>
          <saturneID>0</saturneID>
        </famille>"

```

Fonte: Autora, 2016

Materiais: Também em formato XML, define as características dos materiais listados no arquivo Família, como: condutividade, capacidade térmica e massa.

Parâmetros: Em formato XML, identifica a localização dos demais arquivos gerados como: família, materiais, geometria e o arquivo climático, referenciando as pastas de origem, é nesse arquivo que será definido o período de simulação e o tipo de céu pelos valores de delta perez e épsilon perez.

Arquivo climático:

Arquivo de texto, com dados horários de todos os dias do ano, contendo informações climáticas como: umidade relativa, pressão atmosférica, umidade absoluta, velocidade e direção do vento, radiação global, radiação infravermelha e temperatura do ar. Todos os dados do arquivo climático são passíveis de alterações.

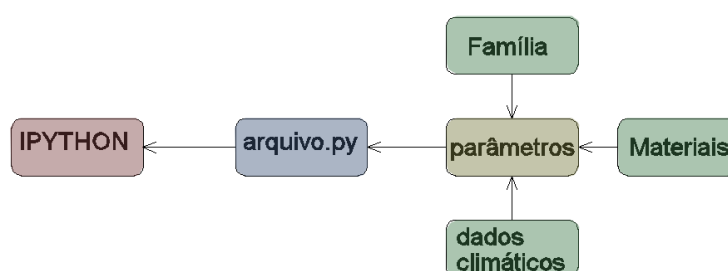
Arquivo de configuração para simulação

O arquivo de extensão .py é o arquivo principal, ele faz referência ao arquivo de parâmetros, e é nele que são definidos: a latitude e a longitude, a taxa de ocupantes por pavimento, a estação (verão ou inverno) e a temperatura inicial da simulação. Bem como a definição do modelo de simulação a ser utilizado, modelo simples, ou modelo térmico.

Ipython, é um interpretador interativo para várias linguagens de programação, mas especialmente focado em Python. É através do terminal de Ipython que o programa roda o *script* de extensão “.py” e realiza a simulação.

A figura 38 representa um esquema dos arquivos de entrada.

Figura 38 – Esquema dos dados de entrada no programa Solene Microclima



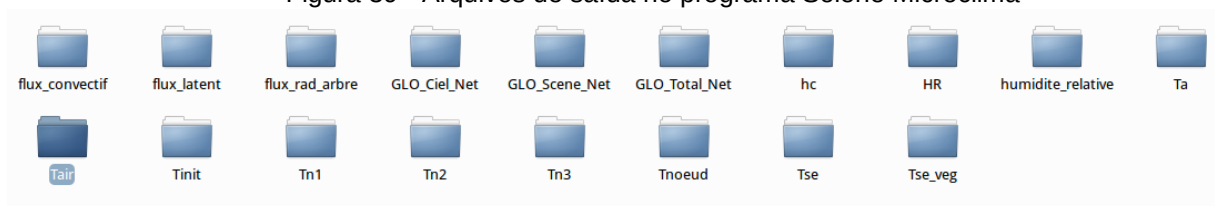
Fonte: Autora, 2016

3.5 Parâmetros de saída

A etapa onde são gerados os dados de saída é conhecida também como pós processamento, é quando se procede a análise dos resultados obtidos na simulação, apresentando diversas variáveis de resposta ao longo do processo.

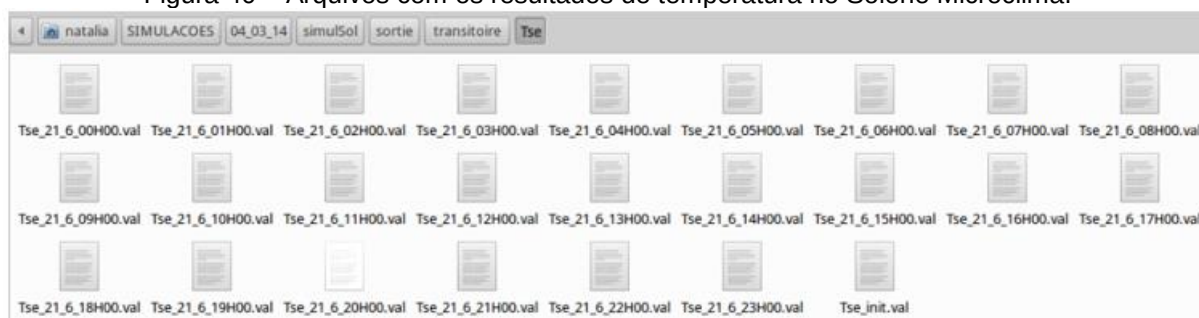
Os arquivos gerados pelas simulações com o Solene Microclima, são apresentados em pastas de arquivo localizadas no mesmo local onde se originaram os arquivos de entrada (figura 39). Os resultados são divididos por processos e são gerados dados para toda a malha da geometria para cada tempo de simulação (figura 40). É possível exportar os resultados para programas de visualização gráfica, como por exemplo o programa Paraview (figura 41).

Figura 39 - Arquivos de saída no programa Solene Microclima



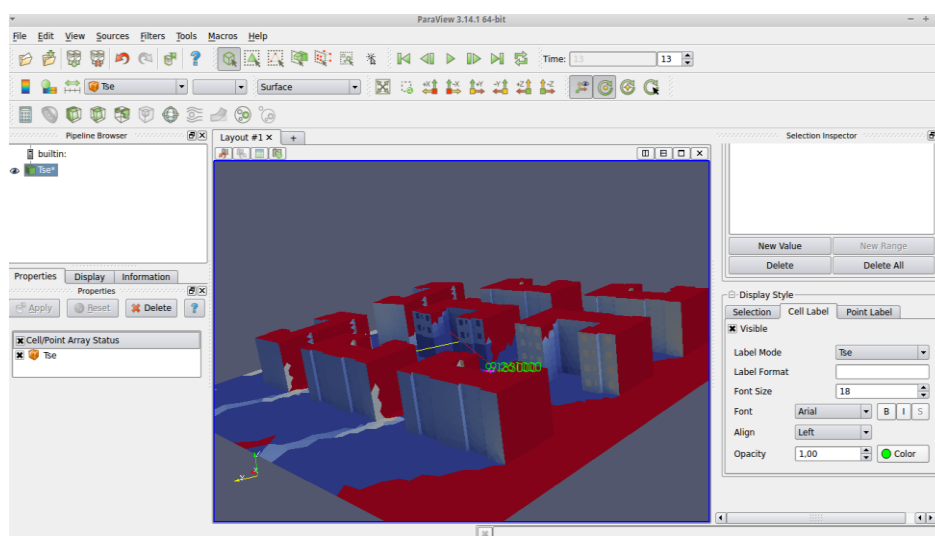
Fonte: Autora, 2016

Figura 40 – Arquivos com os resultados de temperatura no Solene Microclima.



Fonte: Autora, 2016

Figura 41- Interface do programa Paraview



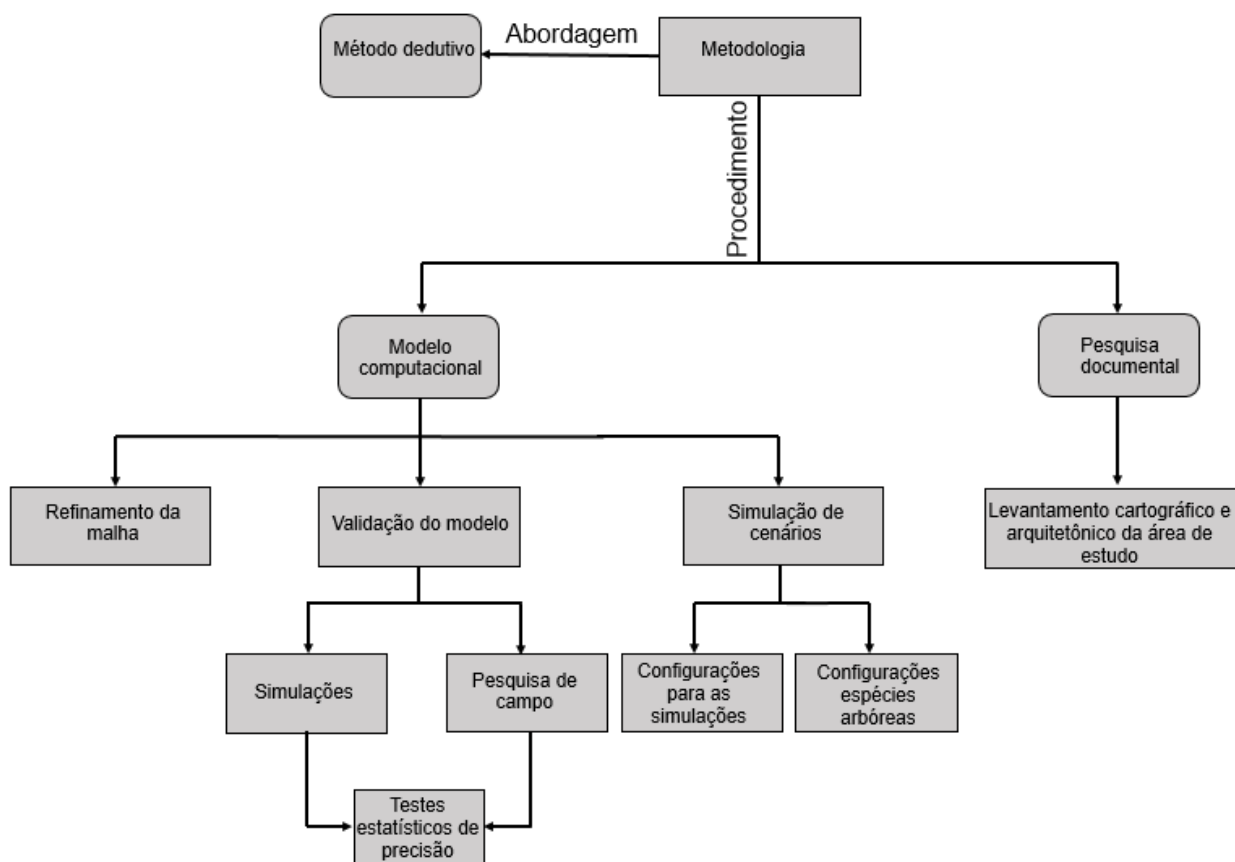
Fonte: Autora, 2015

4 MÉTODOS E TÉCNICAS

4.1 Método de abordagem geral

O Método de abordagem utilizado nessa pesquisa é o dedutivo, segundo Lakatos e Marconi (2011), pois parte de um modelo parcialmente analítico das variáveis em questão para prever a ocorrência de fenômenos particulares, nesse caso, o comportamento microclimático de uma edificação e seu entorno. Os métodos de procedimento utilizados são a pesquisa documental, para o levantamento cartográfico e arquitetônico da área de estudo, o de simulação de cenários, usando modelos computacionais e o método estatístico para a validação do modelo utilizado nas simulações, a partir da comparação entre os valores medidos e simulados. Na figura 42 é possível observar o fluxograma das etapas metodológicas.

Figura 42 - Etapas metodológicas do trabalho



Fonte: Autora, 2017

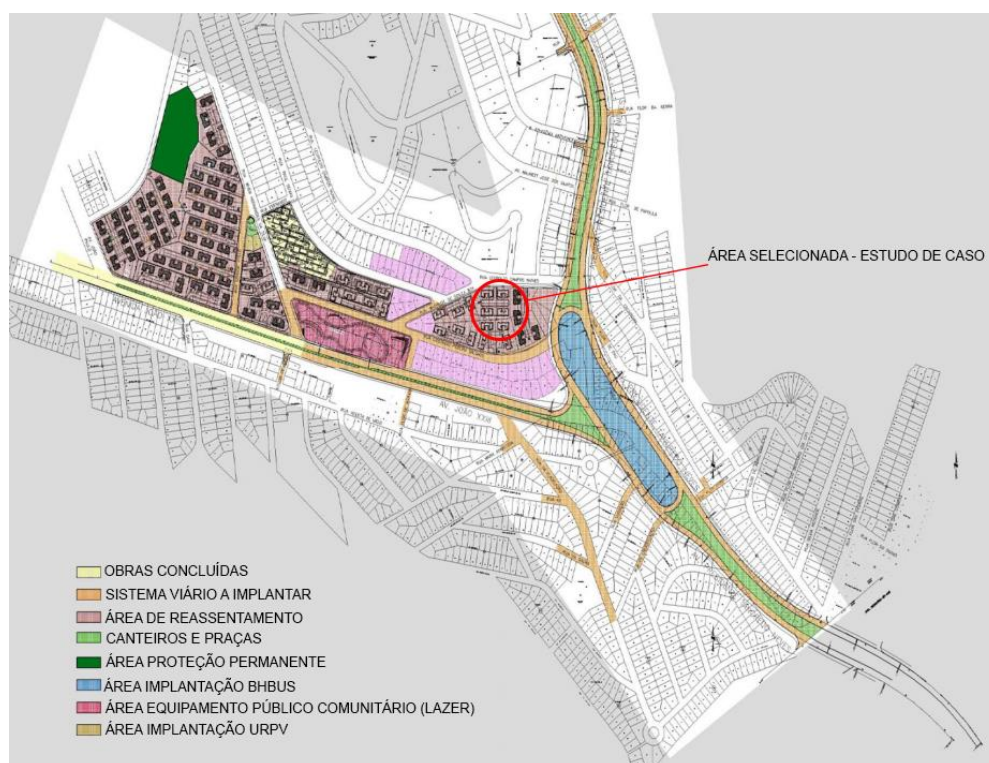
A remoção incluiu ações fundamentais de recuperação ambiental e de renovação urbana, o que exigiu a retirada, e o reassentamento de 2500 famílias em unidades habitacionais que foram construídas pela Prefeitura nas proximidades da vila, as figuras 44 e 45, apresentam a intervenção realizada na área.

Figura 44 - Vila São José antes e depois do reassentamento - Imagem Satélite 2002 e 2015



Fonte: GOOGLE EARTH, 2015

Figura 45- Área de intervenção Vila São José (estudo de caso)



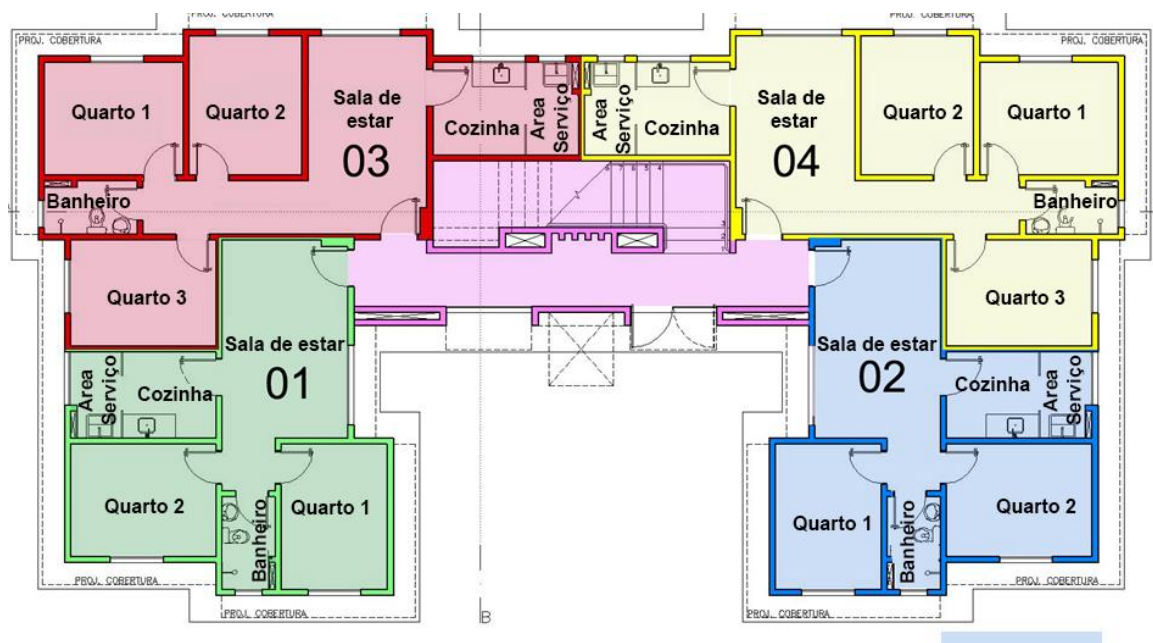
Fonte: Adaptado PBH – 2016

As edificações são compostas por quatro pavimentos, quatro unidades habitacionais por pavimento, sendo no total 16 apartamentos por edifício. O programa é constituído por:

- 2 ou 3 quartos,
- 1 sanitário com chuveiro,
- 1 sala,
- 1 cozinha conjugada com a área de serviço.

Os apartamentos com final 01 e 02 possuem dois quartos e uma área construída de 45,5 m². Os demais, final 03 e 04, possuem três quartos e 57 m² de área construída, como pode ser observado na figura 46.

Figura 46 - Planta do pavimento tipo



Fonte: HSA ARQUITETAS ASSOCIADAS, 2010

Os empreendimentos são executados com bloco de concreto estrutural, as paredes são pintadas externamente e rebocadas com gesso internamente. Os apartamentos não possuem pilotis, ou seja, o contato do primeiro pavimento é direto com o solo, como mostra a figura 47.

Figura 47- Tipologia de edifícios 2 e 3 quartos



Fonte: Autora, 2012

Nenhum dos apartamentos possui forro, a cobertura é composta por laje plana de 12 cm e telhado de fibrocimento. O pé direito de cada unidade habitacional (UH) é de 2,60 m. Todos os cômodos, incluindo banheiro, cozinha e área de serviço possuem iluminação e ventilação natural.

Materiais

Os materiais utilizados nos ambientes de permanência prolongada, sala e quartos, são:

Paredes:

- Sala e Quartos: Revestimento em gesso sobre bloco de concreto devidamente impermeabilizado. Pintura com tinta acrílica acetinada cor branco neve.

Coberturas:

- Cobertura em telha de fibrocimento ondulada, 6mm
- Revestimento em gesso sob laje e pintura com tinta látex PVA cor branco neve

Cada tipologia é pintada de uma cor diferente, a maioria delas possuem cores escuras com absorvência alta, como pode ser observado em tipologias já construídas na figura 48.

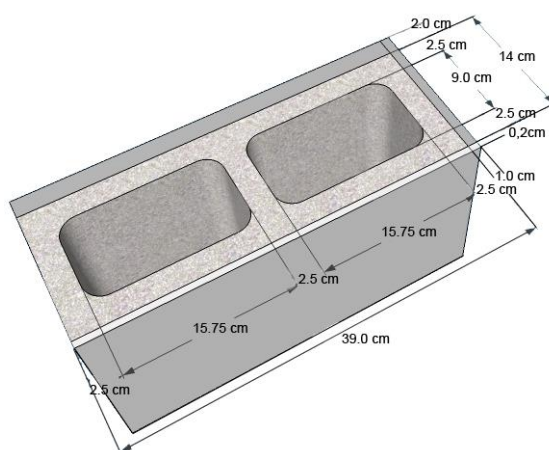
Figura 48 - Exemplo de tipologia construída



Fonte: Autora, 2012

As paredes externas da tipologia de edifício são constituídas de alvenaria de bloco de concreto estrutural 14x19x39 cm, argamassa externa 2 cm, camada de gesso interna de 0,2 cm e pintura, figura 49.

Figura 49 - Composição paredes externas da tipologia de edifícios



Fonte: Autora, 2012

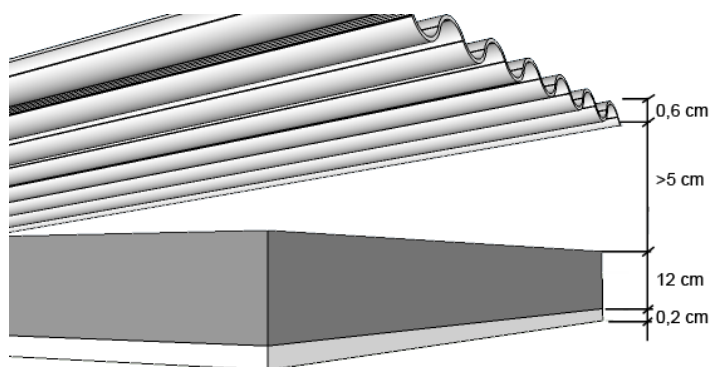
Os valores de transmitância e capacidade térmica das paredes, são apresentados na tabela 14.

Tabela 14 - Propriedades térmicas das paredes	
Transmitância Térmica	Capacidade térmica
$W/(m^2.K)$	$kJ/(m^2.K)$
$U = 2,84$	166,53

Fonte: Autora, 2012

As coberturas são compostas por telha de fibrocimento ondulada $e=6\text{mm}$, laje com espessura de 12 cm, revestida com camada de gesso de 0,2cm, conforme pode ser observado nas figuras 50 e 51.

Figura 50- Composição da cobertura da tipologia de edifícios SUDECAP



Fonte: Autora, 2012

Figura 51- Cobertura de tipologia existente



Fonte: Autora, 2012

Os valores de transmitância e capacidade térmica da cobertura, são apresentados na tabela 15.

Tabela 15- Propriedade térmica da cobertura	
Transmitância Térmica	Capacidade térmica
$W/(m^2.K)$	$kJ/(m^2.K)$
$U= 2,00$	299,09

Fonte: Autora, 2012

4.3 Modelo computacional

Para as simulações foi utilizado o programa Solene Microclima, sem o acoplamento com o CFD code_Saturne, portanto, o domínio na geometria não é considerado para a realização dos cálculos, mas deve ser representado devido às exigências em relação aos parâmetros de entrada do programa, sendo seu dimensionamento, de acordo com Morille (2016), não relevante para as simulações.

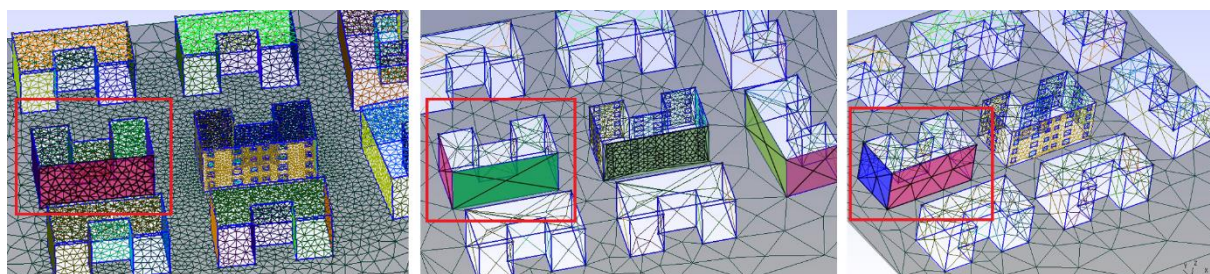
4.3.1 Refinamento da malha

A malha utilizada no programa Solene Microclima é uma malha não ortogonal, não estruturada. Este tipo de malha é a mais flexível, pois consegue adaptar-se sem quaisquer limitações à fronteira do domínio de solução (GONÇALVES, 2007).

Visando um refinamento da malha no modelo Solene Microclima, foram realizados testes de simulações com diferentes dimensionamentos. Segundo MORILLE (2013), é recomendado malhas com até 40.000 triângulos devido ao tempo de simulação e ao tamanho do arquivo gerado em relação ao cálculo do fator de forma.

A malha se adapta a geometria, o valor definido se modifica ao encontrar superfícies menores, na figura 52 é possível observar 3 diferentes configurações de malhas, a primeira com a configuração de 1 metro, a segunda de 10 metros e a terceira de 5 metros.

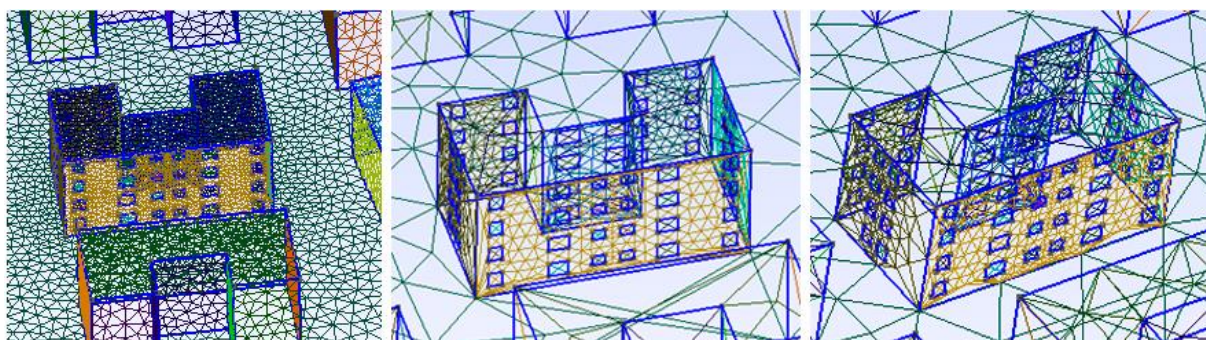
Figura 52 - Dimensionamento das malhas



Fonte: Autora, 2016

A figura 53 apresenta o edifício central nas 3 configurações, nos três casos a malha se mantém reduzida devido ao tamanho das janelas, bem como devido à aproximação entre os edifícios.

Figura 53 - Malha no edifício central

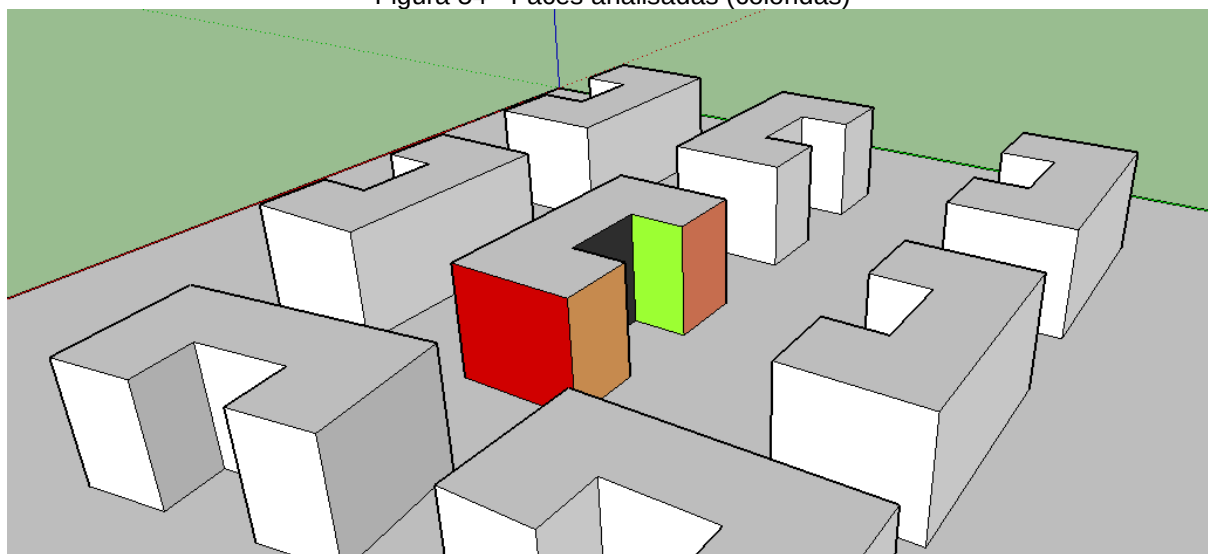


Fonte: Autora, 2016

Para o estudo do refinamento da malha foram comparados resultados de temperatura de superfície e temperatura do ar interno para uma edificação.

A análise da temperatura de superfície foi realizada em uma geometria no qual as janelas não foram consideradas, facilitando a obtenção dos resultados para cada face da geometria. Foram selecionados separadamente todos os triângulos de cada face da edificação central. Devido a diferença no tamanho da malha, cada resultado gerou uma quantidade de triângulos diferente. A partir dos resultados em cada triângulo realizou-se uma média objetivando um valor único para comparação. A figura 54 apresenta a geometria utilizada para a simulação simplificada, as faces coloridas representam as áreas que foram comparadas em relação as diferentes malhas.

Figura 54 - Faces analisadas (coloridas)



Fonte: Autora, 2016

Podemos observar na tabela 16 o tamanho da malha utilizada para cada simulação, bem como o número de triângulos gerados e o tempo de simulação para cada intervalo de tempo, visando a análise da temperatura de superfície das fachadas.

Tabela 16 - Malha definida para a análise da temperatura de superfície

Temperatura de superfície	Situação 1	Situação 2	Situação 3
Domínio	10 metros	10 metros	10 metros
Edificações	5 metros	2 metros	1 metros
Número de triângulos	4074	11990	37694
Tempo de simulação para cada dado horário	15 segundos	2 minutos	5 minutos

Fonte: Autora, 2016

Para a maioria das simulações o domínio foi considerado como 10 metros. Segundo MORILLE (2016), este sem o acoplamento do Código Saturne⁷ (CFD) não é considerado para a simulação, sendo utilizado no Solene apenas para o fechamento da malha, e usualmente especificado entre 10 metros e 50 metros, sendo que a malha de 10 metros permite resultados mais precisos devido ao refinamento que ocorre nos edifícios com a aproximação da malha do domínio.

A tabela 17 e 18 apresentam as configurações utilizadas na definição da malha, bem como o número de triângulos gerados e o tempo de simulação para cada intervalo de tempo, visando a análise da temperatura interna do ar.

⁷ O código Saturne (Code_Saturne (<http://code-saturne.org/cms/>)). É uma ferramenta de acoplamento ao modelo Solene que permite avaliar o Coeficiente de transferência de calor por convecção com mais precisão

Tabela 17- Malha definida para análise da temperatura interna do ar

Temperatura do ar interno-análise 1	Situação 1 - A	Situação 2 - A	Situação 3 - A	Situação 4 - A	Situação 5	Situação 6
Domínio	10	10	10	10	50/25	25/10
Edificações	5	2	1	0.5	2	2
Número de triângulos	4506	12336	39486	138170	11732	12368
Tempo de simulação para cada dado horário	1 minuto	1 minuto	5 minutos	Não funcionou	2 minutos	2 minutos

Fonte: Autora, 2016

Tabela 18- Malha definida para análise da temperatura interna do ar

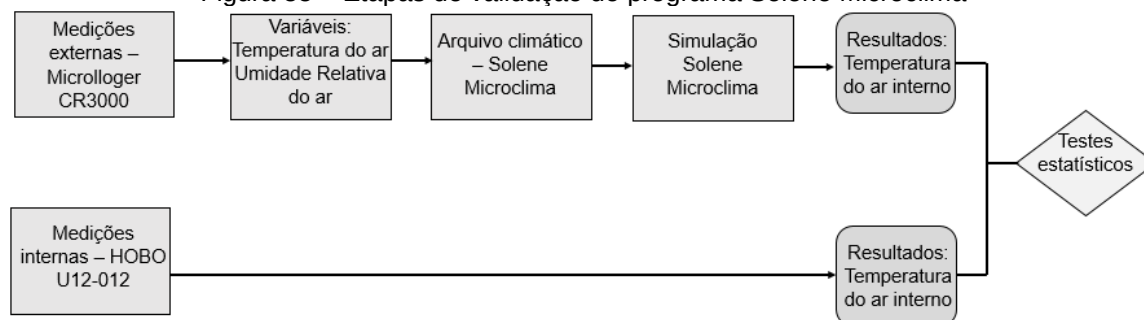
Temperatura do ar interno – Análise 2	Situação 1 - B	Situação 2- B	Situação 3- B	Situação 4- B
Domínio	10	10	10	10
Edificações gerais	5	2	1	0,5
Edificação analisada	2	1	0,5	0,25
Número de triângulos	6222	17836	53148	190392
Tempo de simulação para cada dado horário	40 segundos	1 minuto	12 minutos	Não funcionou

Fonte: Autora, 2016

4.3.2 Validação do Modelo – Solene Microclima

A validação do programa Solene Microclima se deu pela comparação dos valores de temperatura do ar interno gerados pelo modelo com os resultados medidos em campo. Sendo ambos submetidos às mesmas condições de entrada. Os valores medidos e simulados foram comparados de acordo com os testes estatísticos de precisão, os testes utilizados foram: Raiz quadrada do erro médio (RMSE); Erro médio de estimativa (MBE); Coeficiente de correlação de Pearson (r) Índice de concordância de Willmott (d). A figura 55 apresenta as etapas de validação do programa.

Figura 55 – Etapas de validação do programa Solene Microclima



Fonte: Autora, 2016

Medições em campo

A ISO 7726 (1998) (Ergonomics of the Thermal Environments – Instruments for Measuring Physical Quantities) determina cuidados com a instrumentação e procedimentos para medições, sugere alturas e localizações para a instalação dos medidores e recomenda que o sensor deva ser protegido de qualquer efeito da radiação térmica provinda de paredes aquecidas ou resfriadas, porém deixa livre a escolha da localização de instalação e do tipo de barreira de radiação.

Foram dois tipos de data loggers utilizados para este trabalho, o modelo HOBO U12-012 da marca ONSET para coletar a temperatura interna. E o CR300 Microllogger, para coletar as variáveis de temperatura do ar e umidade relativa externos. Para o primeiro, foi realizada uma barreira de radiação de acordo com o trabalho desenvolvido por Barbosa et al (2008), que demonstrou a eficiência de uma proteção feita de garrafa PET de 2 litros encapada com papel aluminizado. O data logger externo foi instalado em uma estação montada na UFMG, conforme mostra a figura 56, visando proteger os efeitos da radiação solar direta e da radiação proveniente de objetos aquecidos em seu entorno imediato.

Figura 56- Abrigo do CR3000 Microllogger



Fonte: Autora, 2015

Os equipamentos foram instalados no dia 04/12/2015, e os resultados foram extraídos do dia 04/12/2015 ao dia 27/12/2015. O data logger interno foi posicionado no centro do ambiente a uma altura de 2,20m do piso (Figura 57). O equipamento externo foi instalado na área próxima a este ambiente como mostra a figura 58. Ambos os aparelhos foram programados para medições horárias.

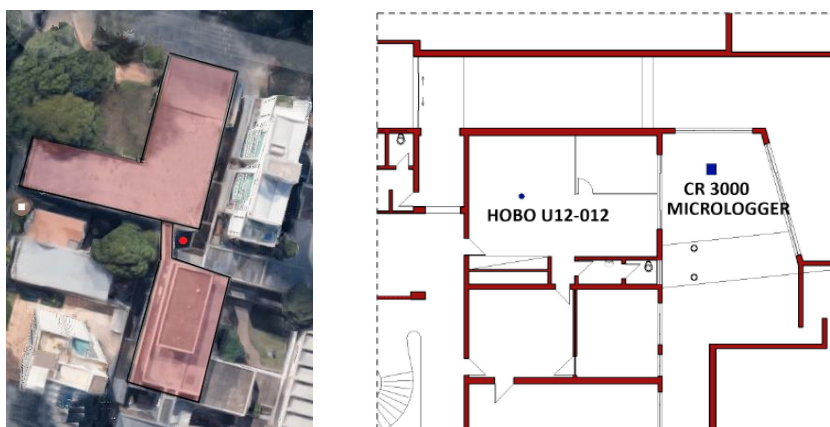
Figura 57- Localização do HOBO U12-012 no ambiente interno



Fonte: Autora, 2015

Com isso, foi possível padronizar as variáveis de entrada, pois os valores externos medidos foram utilizados no Solene Microclima. A área de estudo é uma sala da Escola de Arquitetura da UFMG que é voltada para um pátio, como mostra a figura 58.

Figura 58 - Posição do medidor externo e interno

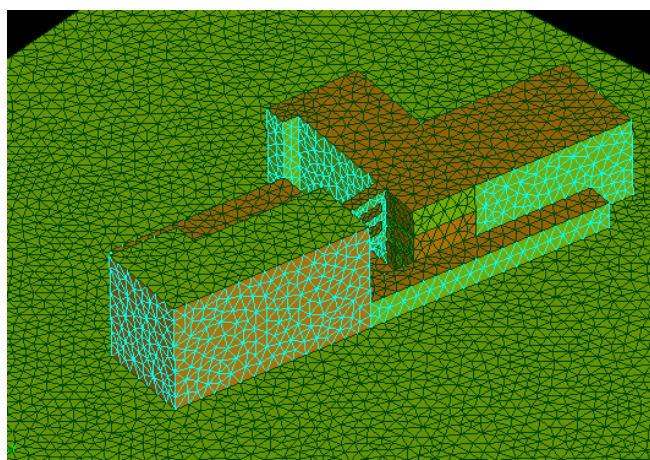


Fonte: Adaptado pela autora, 2015

Simulação

A área selecionada para instalação dos medidores foi simulada no programa Solene Microclima, para isso foi feita uma geometria da área onde foi instalado os medidores e seu entorno próximo. A figura 59 apresenta a geometria utilizada para a simulação.

Figura 59 - Geometria UFMG Simulada



Fonte: Autora, 2016

Foi analisado a temperatura interna do primeiro pavimento no cômodo em que o data logger estava instalado. Devido a limitações do programa, que não permite a divisão interna dos pavimentos em mais de uma zona, o ambiente analisado foi classificado como o ambiente principal (edifício térmico), e as demais áreas foram consideradas como entorno (edifício comum).

Para as simulações, o arquivo meteorológico foi alterado de acordo com as medições externas realizadas no local, em relação a temperatura do ar externo e umidade relativa do ar externo.

Testes estatísticos de precisão

Segundo Lakatos e Marconi (2011), o método estatístico permite obter de conjuntos complexos, representações simples e constatar se essas verificações simplificadas têm relações entre si. Assim, o método estatístico significa redução de fenômenos sociológicos, políticos, econômicos, entre outros, a termos quantitativos e à manipulação estatística, que permite comprovar as relações dos fenômenos entre si, e obter generalizações sobre sua natureza, ocorrência ou significado.

A avaliação da qualidade dos resultados é importante para a validação das conclusões obtidas. Visando analisar estatisticamente dados medidos e dados estimados, utilizou-se neste trabalho os seguintes testes de precisão:

A Raiz quadrada do erro médio (RMSE- *root mean square error*): é comumente usada para expressar a proximidade entre o valor obtido experimentalmente e o valor verdadeiro na medição. Apresenta valores do erro na mesma dimensão da variável em análise. Tem valor sempre positivo e quanto mais próximo de zero, maior a qualidade dos valores medidos ou estimados, é calculada pela Equação 39.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{N_n}} \quad \text{Equação 39}$$

Em que:

y_i são os valores estimados;

x_i são os valores medidos;

N_n é o número de observações, no caso 24 horas.

Segundo Stone (1993), a desvantagem é que bastam alguns poucos valores discrepantes para que ocorra aumento significativo em sua magnitude.

O Erro médio de estimativa (MBE): indica se o modelo está subestimando (valor negativo) ou superestimando (valor positivo) os dados observados. Os valores são apresentados na mesma dimensão da variável em análise, no caso, em graus Celsius, e é definido pela equação 40:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{N_n} \quad \text{Equação 40}$$

Em que:

y_i são os valores estimados

x_i são os valores medidos

N_n é o número de observações, no caso 24 horas.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) mede o grau da correlação e a direção dessa correlação. Este coeficiente assume valores entre -1 e 1. Quando 1 significa correlação perfeita positiva entre as duas variáveis, quando -1 significa correlação negativa perfeita entre as duas variáveis, isto é, se uma aumenta, a outra sempre diminui e quando 0 significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra. Pode ser representado pela equação 41.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}) \cdot (x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad \text{Equação 41}$$

Em que:

$\bar{x}$ é a média aritmética dos valores medidos e $\bar{y}$ é a média aritmética dos valores estimados.

Segundo Oliveira (2016), o coeficiente de correlação de Pearson é utilizado em diferentes estudos de concordância entre métodos ou modelos nas mais diversas áreas (CUNHA et al.,2005; MENGUE e FONTANA,2015; SOUZA et al.,2014; XIMENES et al.,2014; RAMOS et al.,2013; PEREIRA et al.,2009).

A correlação, r , qualifica o grau em que duas variáveis estão relacionadas, mas uma alta correlação não implica automaticamente que exista boa concordância entre os resultados de dois métodos estudados. Esta medida pode auxiliar na tomada da decisão, mas não deve ser a base da conclusão do acordo entre os métodos (OLIVEIRA,2016).

O coeficiente de correlação pode enganar quando se avalia concordância porque evidencia apenas o grau da associação linear entre dois conjuntos de observações, não a concordância entre eles.

O índice de concordância de Willmott (d) pode assumir valores entre 0 e 1, sendo que $d = 1$ indica uma perfeita concordância e $d = 0$ uma total discordância entre os valores medidos e estimados. Segundo WILLMOTT (1981), o índice é uma medida descritiva que reflete a precisão dos valores estimados (variável Y) em relação aos valores medidos (variável X), podendo ser facilmente interpretado e aplicado em comparações de concordância para diferentes modelos/métodos. Pode ser representado pela equação 42 e segundo Oliveira (2016), é utilizado em diferentes áreas do conhecimento para estudar a concordância entre os modelos e métodos.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{y}| + |x_i - \bar{x}|)^2} \right] \quad \text{Equação 42}$$

Segundo Souza et al. (2011), a utilização conjunta dos indicadores estatísticos MBE, RMSE e o índice de concordância “ d ”, permite uma alternativa adequada para avaliação do desempenho estatístico de modelos de estimativa, com análises simultâneas dos desvios da média, identificando a ocorrência de sub ou superestimativa, espalhamento e ajustamento do modelo em relação aos valores medidos. Oliveira (2016) afirma que verificar a concordância dos dados simulados com apenas um índice não é suficiente. A mesma autora construiu um esquema para análise de concordância entre dois métodos a serem comparados, o estimado (y) e o medido (X), dentro do esquema construído ela afirma que caso o índice de Pearson “ r ” seja superior a 0,8, este indica uma alta correlação entre os resultados dos dois métodos, e quando um índice não é satisfatório, outro deve ser analisado como complemento. De acordo com Willmott et al. (1985) o erro médio de estimativa deve complementar a informação dada pelo índice de concordância “ d ”.

4.3.3 Simulação de cenários

Configurações para as simulações

A área selecionada para a simulação foi um edifício central do conjunto habitacional da Vila São José, conforme podemos observar na figura 60. O posicionamento do edifício escolhido possibilita a análise da influência do entorno, pois está cercado pelos demais.

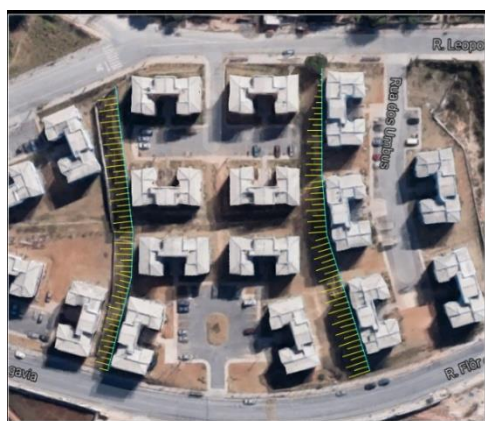
Figura 60 - Área simulada



Fonte: Adaptado GOOGLE MAPS, 2016

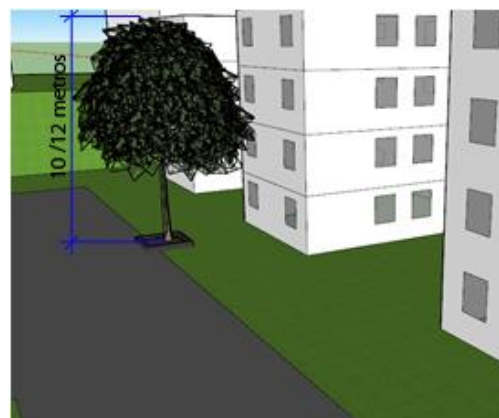
Alguns edifícios estão próximos a taludes, como mostra a figura 61, o que tornaria a simulação menos precisa devido a ação dos ventos que não foi simulada neste trabalho. O pavimento escolhido para as análises de temperatura do ar e temperatura média radiante interna foi o 3º pavimento, entre os motivos que motivaram a escolha deste pavimento, destacam-se: a influência da vegetação em relação ao sombreamento, pois considerou-se uma altura entre 10 a 12 metros para as espécies arbóreas (figura 62), bem como a não influência direta da cobertura e do solo.

Figura 61- Representação taludes



Fonte: Adaptado GOOGLE MAPS, 2016

Figura 62 – Relação altura das espécies arbóreas x 3º pavimento

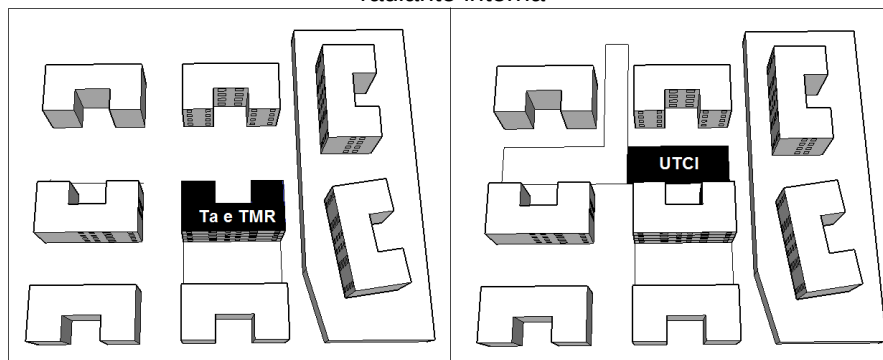


Fonte: Autora, 2016

Configurações utilizadas:

- Temperatura inicial de simulação: 21°C para o verão. 16,3°C para o inverno – Com base nas normais climatológicas.
- Período simulado: 20/12 a 22/12 e 19/06 a 21/06
- Período analisado: Solstício de verão: 22/12 e Solstício de inverno: 21/06. A simulação realizada em dias anteriores aos analisados tem como objetivo uma maior precisão dos resultados. O programa Solene Microclima requer tempo para reproduzir uma boa distribuição da temperatura nas paredes e no solo, sendo que a temperatura do primeiro intervalo de tempo (*time-step*) considerada é a temperatura definida como inicial.
- Céu: parcialmente coberto
- Coeficiente de convecção (H_c) = 10,36
- Taxa de ocupação – 0,095 – A taxa de ocupação é a quantidade de pessoas por metro quadrado. Foi considerado para essa análise, 5 pessoas para as unidades habitacionais de 2 quartos e 6 pessoas para UHs de 3 quartos, totalizando 22 pessoas para uma área de 230m² (total do pavimento incluindo área comum).
- Zona simulada = Conforto interno: Edifício central, todos os pavimentos. Conforto externo: Área próxima ao edifício central, figura 63

Figura 63 - Área onde foi analisada o índice UTCI, a temperatura do ar interno e a temperatura média radiante interna



Fonte: Autora, 2016

- Zona analisada = Conforto interno: Edifício central terceiro pavimento – A escolha desse pavimento se deu por este ser considerado um pavimento onde

não há influência direta da cobertura e do piso, estar situado entre 5,5m a 8,25 m de altura, sendo possível verificar a influência das espécies arbóreas propostas neste trabalho (10 e 11 metros de altura)

- Latitude = -19°55' / Longitude = -43°93'
- Configuração da malha = Domínio: 10 m; Edifícios comuns: 2m; Edifício térmico: 1 m

Materiais utilizados:

A definição do albedo seguiu o estudo de Dornelles (2008), foi considerado para as paredes das edificações analisadas neste trabalho a tinta Sivinil acrílica fosca cor Branco Neve e cor Alecrim, a tabela 19, apresenta os valores de refletância para as respectivas cores.

Tabela 19- Refletâncias médias por faixa de espectro (%)

Tipo	Nº	Nome comercial	UV	VIS	IV	TOTAL
Sivinil acrílica fosca	48	Alecrim	4,5	35,8	31,9	31,6
	49	Azul bali	4,3	39,9	54,8	50,3
	50	Branco Neve	7,8	90,0	81,8	80,6
	51	Branco Gelo	8,1	71,5	62,9	62,5
	52	Camurça	5,1	42,7	40,1	39,3
	53	Concreto	5,7	28,4	25,0	24,9
	54	Marfim	8,0	70,7	69,6	67,6
	55	Marrocos	4,4	38,4	47,8	44,5
	56	Mel	4,1	52,2	56,9	54,1
	57	Palha	7,0	71,6	67,2	65,8
	58	Pérola	8,2	75,6	73,1	71,2
	59	Pêssego	6,3	61,5	60,8	58,9
	60	Telha	4,1	23,2	32,1	29,4
	61	Vanila	7,5	70,9	75,1	71,9

Fonte: DORNELLES, 2008

Nas tabelas 20 e 21 é possível observar os materiais utilizados nas edificações e suas respectivas propriedades térmicas. Os valores indicados foram os considerados como dados de entrada no programa de simulação computacional. Para a cobertura, foi considerado valores de albedo baixo referente às telhas sujas: 0,15, e albedo alto referente às telhas novas: 0,40, de acordo com pesquisa realizada por Silveira et al. (2012).

Tabela 20- Materiais e propriedades considerados nas Simulações

	Camadas/ materiais	Transmitância (%)	Emissividade	Albedo
Paredes externas	-Argamassa = 2cm - Concreto = 14 cm - Gesso = 0,2cm	0 (superfície opaca)	0,9	Cor branco neve = 0,80 Cor Alecrim = 0,31
Cobertura	- Fibrocimento=0,6cm - Ar= 6cm - Concreto = 12cm	0(superfície opaca)	0,9	Albedo alto: Telhas novas = 0,40 Albedo baixo: Telhas sujas = 0,15
Janelas	- Vidro 4 mm	70%	0,9	0,3
Piso do edifício em contato com o solo	- Concreto =12cm - Cerâmica = 1,5cm	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica
Pisos entre os pavimentos	- Concreto =12cm - Cerâmica = 1,5cm	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica

Fonte: Autora, 2016

Tabela 21 - Materiais e propriedades considerados nas Simulações

	Espessura (cm)	Condutividade térmica (λ) (W/(m.K))	Calor específico (c) (J/(kg.K))	Densidade (ρ) (kg/m³)
Argamassa	2	1,15	1000	1800
Bloco de concreto	14	1,75	1000	2200
Gesso	0,2	0,35	840	750
Vidro	0,4	1,0	840	2500
Cerâmica	1,5	1,0	920	1800
Fibrocimento	0,6	0,95	840	1800
Concreto	12	1,75	1000	2200
Asfalto	100	1,15	920	2300

Fonte: NBR 15220 -1, 2005

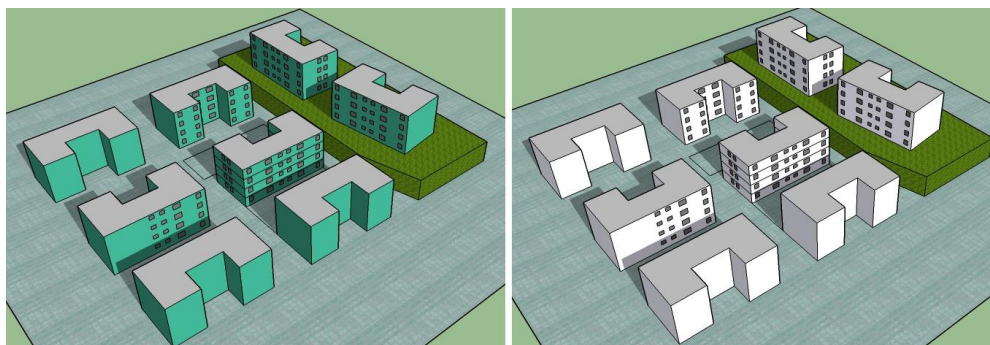
Cenários simulados:

Foram 10 simulações, 6 cenários (A-F), duas diferentes geometrias, uma com e outra sem árvore. Os cenários A e B, são representados pela figura 64, no qual:

A – Estudo de caso com albedo de superfície baixo, sem arborização e piso asfalto na maior parte;

B – Estudo de caso com albedo de superfície alto, sem arborização e piso asfalto na maior parte;

Figura 64 - Cenários A e B



Fonte: Autora, 2016

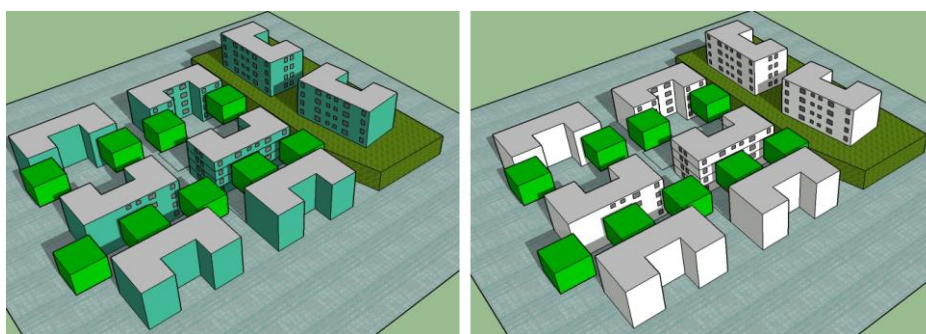
Os cenários C e D são representados pela figura 65, no qual:

C – Estudo de caso com albedo baixo, com arborização e piso asfalto na maior parte;

D – Estudo de caso com albedo alto, com arborização e piso asfalto na maior parte;

Os blocos verdes no qual podemos observar na figura 65, representam a arborização, a escolha da geometria cúbica em vez da geometria cilíndrica visou a simplificação da malha, porém essa simplificação implica em uma menor precisão em relação à realidade.

Figura 65 - Cenários C e D



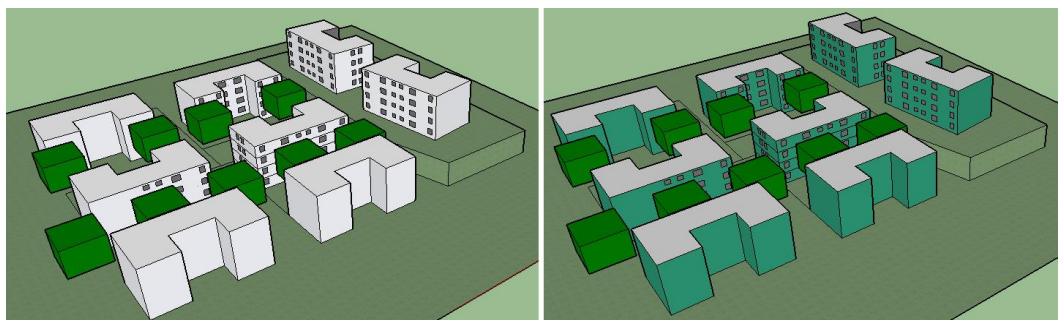
Fonte: Autora, 2016

A figura 66 apresenta os cenários E e F, no qual:

E – É o estudo de caso com albedo alto, com arborização e piso vegetado.

F – É o estudo de caso com albedo baixo, com arborização e piso vegetado.

Figura 66 - Cenários E e F



Fonte: Autora, 2016

A tabela 22 apresenta os cenários simulados, as respectivas configurações consideradas em cada um e o que foi simulado em relação a estes cenários.

Tabela 22- Cenários simulados

Simulação	Cenário	Albedo Paredes	Albedo Cobertura	Árvore	Piso vegetado	Data	Caso simulado
01	A	0,30	0,15	Não	Não	22/12	Conforto interno e UTCI
02	B	0,80	0,40	Não	Não	22/12	Conforto interno
03	C	0,30	0,15	Sim	Não	22/12	Conforto interno e UTCI
04	D	0,80	0,40	Sim	Não	22/12	Conforto interno
01	A	0,30	0,15	Não	Não	21/06	Conforto interno
02	B	0,80	0,40	Não	Não	21/06	Conforto interno
03	C	0,30	0,15	Sim	Não	21/06	Conforto interno
04	D	0,80	0,40	Sim	Não	21/06	Conforto interno
09	E	0,80	0,40	Sim	Sim	22/12	Conforto interno e UTCI
10	F	0,30	0,15	Sim	Sim	22/12	UTCI

Fonte: Autora, 2016

Arquivo climático:

Os valores de temperatura externa do ar e de umidade do ar gerados através de medições em campo, visando a validação do modelo Solene Microclima, foram comparados com a base de dados da SWERA.

Para tal, os dias escolhidos para validação do Solene por apresentarem melhor estabilidade foram: 21/12 – 22/12 – 23/12 – 24/12, foi realizado uma média horária para os 4 dias medidos e para os 4 dias estimados (base SWERA), resultando em duas séries de dados com valores horários.

Os dados médios horários medidos foram comparados com os dados médios horários da base SWERA através de testes estatísticos de precisão, os resultados para umidade relativa são apresentados na tabela 23.

Tabela 23 - Resultados dos testes de precisão- Umidade Relativa			
RMSE	MBE	PEARSON	WILLMOTT
6,70	-3,51	0,99	0,9917

Fonte: Autora, 2016

Os dados para temperatura do ar externo são apresentados na tabela 24:

Tabela 24- Resultados dos testes de precisão - Temperatura do ar			
RMSE	MBE	PEARSON	WILLMOTT
1,67	1,15	0,86	0,91

Fonte: Autora, 2016

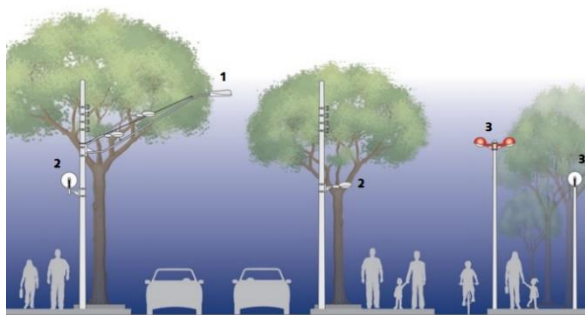
Os resultados mostraram uma boa relação entre os valores medidos e estimados, os valores de RMSE para umidade relativa apresentou alta variação, o que era previsível por se tratar de uma variável que se relaciona com a precipitação, e segundo STONE (1993), para o RMSE poucos valores discrepantes são suficientes para que ocorra aumento significativo em sua magnitude.

Após a seleção dos dados de TMY, estes foram ajustados para os valores de radiação de ondas longas e radiação global. A radiação global foi calculada através do programa Radasol2, que permite a utilização da base SWERA como parâmetro de entrada.

Determinação e características das espécies arbóreas utilizadas para a simulação:

As dimensões das árvores são parâmetros importantes a serem controlados, bem como o impacto sobre a ocupação do espaço e as sombras que estas proporcionam. De acordo com o manual técnico de arborização da CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais), o plantio de árvores requer uma avaliação sobre as espécies e sua localização, pois existe a necessidade de adaptação ao meio urbano como: A relação das espécies com as redes de distribuição de energia elétrica, iluminação pública, telecomunicações, placas sinalizadoras, redes de água e esgoto, entre outros, visando reduzir prejuízos à população e garantir o desenvolvimento arbóreo. A figura 67 apresenta a relação entre a iluminação pública e o tamanho das árvores, e a figura 68, a relação entre as espécies, a entrada e saída de veículos e a rede de distribuição de energia elétrica.

Figura 67 - Relação entre postes e árvores



Fonte: COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG), 2011

Figura 68 - Parâmetros de implantação da vegetação urbana



Fonte: COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG), 2011

Segundo a prefeitura de Belo Horizonte, a cidade possui cerca de 465 mil árvores que ultrapassam 510 espécies, contabilizadas no projeto de inventário das árvores da

cidade. As espécies de árvores mais numerosas são: Ipê, Murta, Sibipiruna, Quaresmeira, Castanheiras, Ficus-benjamin, Bauhinia, Areca, Redesá, Mangueira, Goiabeira, Leucena, Alfeneiro, Oiti e Magnólia. Sendo os ipês em maior quantidade, cerca de 8 mil. A Organização Mundial de Saúde recomenda que as cidades possuam 12m² de área verde por habitante, o atual índice divulgado sobre a capital mineira extrapola a recomendação, alcançando 18m².

Para a avaliação da influência da vegetação no desempenho térmico do conjunto habitacional por meio de simulação, foi considerado uma média das características das espécies arbóreas, como: Transmitância óptica, altura das árvores, tamanho e volume das copas. Os valores de Energia Total incidente ao sol e Energia total incidente à sombra utilizados para o cálculo de transmitância, foram retirados de medições realizadas em Campinas, pelos estudos desenvolvidos pelas autoras Bueno (1998) e Abreu (2008).

As autoras registraram a radiação solar por meio de solarímetros de tubo, modelo TSL-DELTA-T Devices, conectados a um integrador de coleta automática dos dados, modelo DL2- DELTA-T Devices (Figura 69 e 70). Estes equipamentos registraram a radiação incidente na faixa de 350nm a 2500nm e sua resposta espectral abrange a região do visível ao infra-vermelho de onda-curta.

Figura 69 – Solarímetro de Tubo, Delta-T TSL



Fonte: ABREU, 2008

Figura 70 - Registrador Delta DL2 Datalogger



Fonte: ABREU, 2008

Os cálculos de transmitância óptica foram realizados de acordo com o proposto por Salisbury; Ross,(1992) apud Fangan et al. (2013), equação 17 apresentada anteriormente neste trabalho. A tabela 25 apresenta os valores medidos pelas autoras Bueno (1998) e Abreu (2008) e os resultados obtidos para a transmitância óptica.

Tabela 25- Espécies arbóreas utilizadas – Valores de transmitância

Espécies arbóreas	Média da Energia Total Incidente (Kw h/m²) – sol (I _o)	Média da Energia Total Incidente (Kw h/m²) – sombra (I)	Data das medições	Transmitância óptica
Jatobá	0,214238	0,026424	17/02/1998 18/02/1998 11/03/1998 12/03/1998 13/03/1998 30/03/1998 31/03/1998	0,1233
Ipé roxo	0,183022	0,04467	02/04/1998 08/04/1998 14/04/1998 19/04/1998 20/04/1998	0,2440
Sibipiruna	0,2249	0,025562	21/04/1998 23/04/1998 30/04/1998	0,1136
Chuva de ouro	0,240412	0,03064	21/02/1998 23/02/1998 04/04/1998 01/05/1998 02/05/1998 26/03/2007 27/03/2007	0,1274
Ipê amarelo – com folhas	0,506	0,0923	28/03/2007	0,1824
Jambolão/jamelão	0,3795	0,0414	20/04/2007 21/04/2007 27/04/2007	0,1090
Média transmitância				0,15

Fonte: Adaptado ABREU, 2008 e BUENO, 1998

A tabela 26 apresenta as características das espécies arbóreas, como: Altura, diâmetro da copa e cor da folha.

Tabela 26- Espécies arbóreas analisadas

Espécies arbóreas	Diâmetro da copa	Altura da árvore	Altura do fuste	Cor da folha
Jatobá	23m	15-20m	3,1m	Verde médio
Ipé roxo	11m	12m	4m	Verde claro
Sibipiruna	15m	18m	-	Verde médio
Chuva de ouro	7m	7m	1,7	Verde médio
Ipê amarelo – com folhas	8m	10m	3,11m	Verde claro
Jambolão/Jamelão	10m	10m	1,75m	Verde escuro

Fonte: Adaptado ABREU, 2008 e BUENO, 1998

4.4 Análise índices de conforto térmico

Índice UTCI

O índice de conforto térmico UTCI foi simulado somente para o verão. Os cenários simulados foram: Cenário A, C, E e F. Os cenários B e D não foram simulados para a análise do índice UTCI, pois optou-se por apenas uma situação visando comparação em relação à arborização, como pode ser observado na tabela 27. Bem como uma única situação visando comparação em relação ao albedo, como apresentado na tabela 28.

Tabela 27 - Descrição dos cenários simulados - A e C

Características comuns entre os cenários	Cenário A	Cenário C
Albedo 0,3 e piso asfalto	Sem árvore	Com árvore

Fonte: Autora, 2016

Tabela 28 - Descrição dos cenários simulados - E e F

Características comuns entre os cenários	Cenário E	Cenário F
Arborização e piso vegetado	Albedo baixo (0,3)	Albedo alto (0,8)

Fonte: Autora, 2016

A área simulada para o índice UTCI pode ser observada na figura 71. Os resultados foram analisados em duas etapas, a primeira pela comparação dos valores de temperatura UTCI representados por meio de isocurvas para às: 9:00, 12:00 e 15:00. E a segunda por meio de uma média aritmética de todos os triângulos da faixa considerada, visando uma comparação dos resultados ao longo do dia, representados graficamente.

Figura 71- Área UTCI estudada



Fonte: Autora, 2016

Índice adaptativo DeDear e Brager

Foram realizadas simulações para nove diferentes cenários com o objetivo de analisar o conforto térmico dentro das edificações. As variações entre os cenários incluíram diferentes cores nas fachadas, diferentes tipos de pisos externos (grama e asfalto) e disposição de espécies arbóreas.

Após as simulações foram feitas dois tipos de análises, a comparação da temperatura operativa com a média mensal de temperatura do ar externo em formato de 24 horas, conforme gráfico da norma ASHRAE 55 (2013), e a comparação da temperatura do ar interno e a temperatura do ar externo para o período simulado, em relação à temperatura de conforto proposta pela ASHRAE 55 (2013) e seus limites aceitáveis. Para a primeira análise, foram selecionados os dados de temperatura do ar e temperatura média radiante interna visando obter valores de temperatura operativa, o nível de atividade metabólica considerado para a definição da velocidade do ar no cálculo da temperatura operativa foi entre 1,2 – 1,7 met. A Temperatura externa média considerada para o cálculo da temperatura de conforto, foi retirada das normais climatológicas.

5 RESULTADOS

5.1 Resultados Validação do Programa Solene Microclima

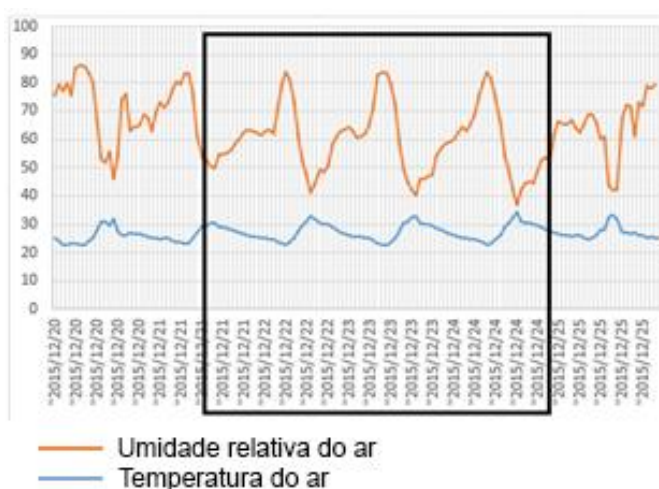
A partir das medições realizadas foi possível extrair valores de temperatura do ar e umidade relativa do ar externo. Estes foram analisados visando selecionar entre todo o período de medição, os valores mais estáveis, como mostram as figuras 72 e 73.

Figura 72- Seleção da janela do período mais estável



Fonte: Autora, 2015

Figura 73- Período de Temperatura e Umidade relativa estável 21/12 a 24/12



Fonte: Autora, 2015

Os dados de temperatura e umidade relativa do ar externo medidos foram utilizados como parâmetro de entrada no programa Solene Microclima. A edificação foi simulada para os dias de maior estabilidade das medições: de 21/12 a 24/12.

Foi realizado uma média horária com os resultados dos 4 dias, formando um valor horário único em formato de 24 horas, tanto para os dados medidos, como para os simulados. Conforme pode ser visto na tabela 29.

Tabela 29 - Media dos dias simulados: 21/12 – 22/12 – 23/12 – 24/12 – Desvio Padrão das médias

Hora	Dados Medidos						Dados simulados					
	21/12	22/12	23/12	24/12	Media	D. Pad.	21/12	22/12	23/12	24/12	Media	D. Pad.
0	25,82	26,16	26,35	26,62	26,24	0,34	26,49	26,07	25,83	25,77	26,04	0,33
1	25,82	26,21	26,30	26,62	26,24	0,33	26,40	25,91	25,58	25,63	25,88	0,38
2	25,82	26,21	26,43	26,60	26,26	0,34	26,44	25,76	25,53	25,48	25,80	0,44
3	25,84	26,16	26,43	26,60	26,26	0,33	25,90	25,61	25,49	25,35	25,59	0,23
4	25,87	26,13	26,38	26,57	26,24	0,31	25,93	25,47	25,26	25,22	25,47	0,33
5	25,82	26,11	26,35	26,52	26,20	0,31	25,90	25,33	25,22	25,09	25,21	0,12
6	25,79	26,01	26,26	26,48	26,13	0,30	25,88	25,31	25,10	25,09	25,35	0,37
7	25,74	25,96	26,21	26,40	26,08	0,29	25,85	25,46	25,08	25,25	25,41	0,33
8	25,70	25,96	26,21	26,30	26,04	0,27	25,83	25,66	25,07	25,46	25,50	0,33
9	25,67	25,74	26,28	26,38	26,02	0,36	25,78	25,90	25,52	25,71	25,73	0,16
10	25,62	25,70	26,33	26,45	26,02	0,43	26,48	26,16	25,98	25,98	26,15	0,24
11	25,77	25,99	26,43	26,50	26,17	0,35	26,75	26,43	26,26	26,25	26,42	0,23
12	25,96	26,28	26,52	26,55	26,33	0,27	27,14	26,81	26,66	26,65	26,81	0,23
13	26,28	26,60	26,60	26,62	26,52	0,16	27,25	26,94	26,89	26,79	26,97	0,20
14	26,45	27,19	26,62	26,67	26,73	0,32	27,18	26,89	26,84	26,74	26,91	0,19
15	26,87	27,01	26,65	26,67	26,80	0,17	27,23	26,94	26,91	26,83	26,89	0,06
16	26,89	27,01	26,62	26,67	26,80	0,18	27,42	27,13	27,01	27,04	27,15	0,19
17	26,87	27,06	26,84	26,65	26,85	0,17	27,57	27,29	27,27	27,21	27,34	0,16
18	26,52	27,06	26,94	26,65	26,79	0,25	27,25	26,98	27,55	26,91	27,17	0,29
19	26,35	26,89	26,94	26,65	26,71	0,27	26,92	26,66	27,16	26,61	26,84	0,26
20	26,30	26,72	26,77	26,67	26,62	0,21	26,73	26,47	27,06	26,44	26,67	0,29
21	26,26	26,60	26,67	26,65	26,54	0,19	26,56	26,30	26,22	26,29	26,34	0,15
22	26,23	26,52	26,65	26,65	26,51	0,20	26,39	26,14	26,07	26,14	26,18	0,14
23	26,18	26,48	26,60	26,62	26,47	0,20	26,23	25,98	25,92	26,00	26,03	0,14
					26,40	0,27					26,24	0,24

Fonte: Autora, 2016

Os valores simulados e medidos foram submetidos à testes estatísticos de precisão, sendo xi referente aos valores medidos e yi referente aos valores simulados, conforme podemos observar na tabela

Tabela 30 Análise dos resultados pelos testes estatísticos de precisão

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
N	xi	yi	(2-1)	(3) ²	[(1)-xm]	[(2)-ym]	[(5)x(6)]	(5) ²	(6) ²	(2) - xm	(1)-xm	[(10)+(11)]	(12) ²
0	26,24	26,04	-0,20	0,04	-0,16	-0,21	0,03	0,03	0,04	0,360	0,161	0,522	0,27
1	26,24	25,88	-0,36	0,13	-0,16	-0,36	0,06	0,03	0,13	0,518	0,161	0,680	0,46
2	26,26	25,80	-0,46	0,21	-0,14	-0,44	0,06	0,02	0,19	0,594	0,137	0,731	0,53
3	26,26	25,59	-0,67	0,44	-0,14	-0,66	0,09	0,02	0,43	0,810	0,143	0,953	0,90
4	26,24	25,47	-0,77	0,59	-0,16	-0,78	0,13	0,03	0,60	0,931	0,161	1,092	1,19
5	26,20	25,21	-0,99	0,98	-0,20	-1,03	0,21	0,04	1,07	1,188	0,198	1,387	1,92
6	26,13	25,35	-0,79	0,62	-0,27	-0,90	0,24	0,07	0,81	1,052	0,265	1,317	1,73
7	26,08	25,41	-0,67	0,45	-0,32	-0,84	0,27	0,10	0,70	0,990	0,320	1,310	1,71
8	26,04	25,50	-0,54	0,29	-0,36	-0,74	0,26	0,13	0,55	0,894	0,356	1,251	1,56
9	26,02	25,73	-0,29	0,09	-0,38	-0,52	0,20	0,15	0,27	0,672	0,380	1,053	1,11
10	26,02	26,15	0,12	0,02	-0,37	-0,10	0,04	0,14	0,01	0,250	0,374	0,624	0,39
11	26,17	26,42	0,25	0,06	-0,23	0,18	-0,04	0,05	0,03	0,020	0,228	0,249	0,06
12	26,33	26,81	0,48	0,23	-0,07	0,57	-0,04	0,00	0,32	0,414	0,070	0,484	0,23
13	26,52	26,97	0,44	0,20	0,13	0,72	0,09	0,02	0,52	0,568	0,125	0,693	0,48
14	26,73	26,91	0,18	0,03	0,33	0,67	0,22	0,11	0,45	0,513	0,333	0,847	0,71
15	26,80	26,89	0,09	0,01	0,40	0,65	0,26	0,16	0,42	0,495	0,400	0,895	0,80
16	26,80	27,15	0,35	0,12	0,40	0,91	0,36	0,16	0,82	0,753	0,400	1,153	1,33
17	26,85	27,34	0,48	0,23	0,46	1,09	0,50	0,21	1,19	0,937	0,455	1,392	1,93
18	26,79	27,17	0,38	0,15	0,39	0,93	0,37	0,16	0,86	0,775	0,394	1,169	1,36
19	26,71	26,84	0,13	0,02	0,31	0,59	0,18	0,10	0,35	0,438	0,308	0,746	0,55
20	26,62	26,67	0,06	0,00	0,22	0,43	0,09	0,05	0,19	0,275	0,216	0,492	0,24
21	26,54	26,34	-0,20	0,04	0,14	0,10	0,01	0,02	0,01	0,056	0,143	0,1995	0,03
22	26,51	26,18	-0,33	0,11	0,11	-0,06	-0,01	0,01	0,00	0,215	0,112	0,328	0,10
23	26,47	26,03	-0,44	0,19	0,07	-0,21	-0,02	0,00	0,05	0,369	0,070	0,439	0,19

Fonte: Autora, 2016

A submissão dos resultados aos testes estatísticos de precisão mostrou que o programa Solene Microclima apresenta um desempenho satisfatório, apesar das incertezas em relação às simulações. Dentre os fatores que interferem na qualidade dos resultados das simulações, destacam-se: A definição precisa de todas as camadas dos materiais e suas respectivas propriedades térmicas; A ventilação natural, que foi considerada constante nas simulações e a geometria do programa Solene Microclima, que não permite a modelização das paredes internas, bem como não permite modelar a cobertura de fibrocimento considerando inclinação das telhas. A tabela 31, apresenta os resultados dos testes estatísticos de precisão.

Tabela 31 - Resultados dos testes de precisão

RMSE	MBE	PEARSON	WILLMOTT
0,47	0,15	0,84	0,73606

Fonte: Autora, 2016

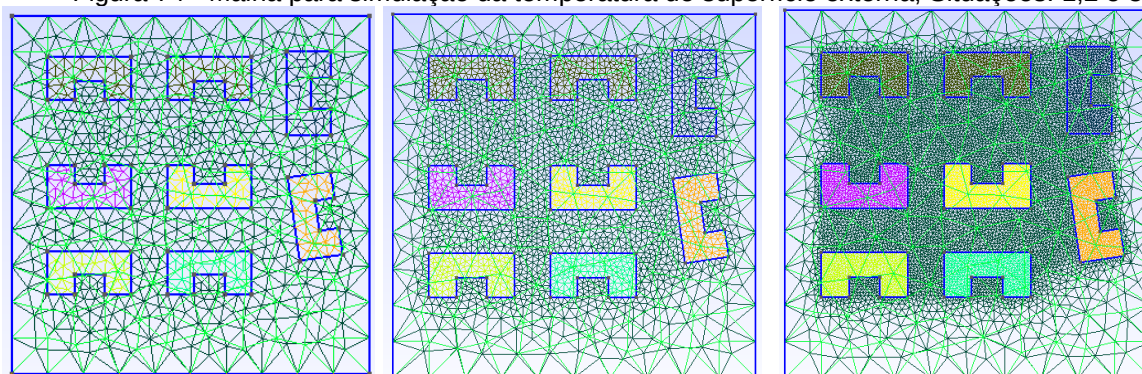
5.2 Resultados do refinamento da malha

O refinamento da malha foi realizado em duas etapas, a primeira objetivando a análise da temperatura de superfície das fachadas e a segunda a análise da temperatura do ar interno em uma edificação.

Simulação das temperaturas de superfície das fachadas

As malhas utilizadas para a análise da temperatura de superfície das fachadas podem ser observadas na figura 74, foram estas: 10 e 5 metros, 10 e 2 metros e 10 e 1 metro.

Figura 74 - Malha para simulação da temperatura de superfície externa, Situações: 1,2 e 3



Fonte: Autora, 2016

Os resultados mostraram que as diferenças entre as malhas foram mínimas em relação a modificação das temperaturas de superfície, conforme se observa na tabela 32.

Tabela 32 -Resultados do refinamento da malha para temperatura da superfície

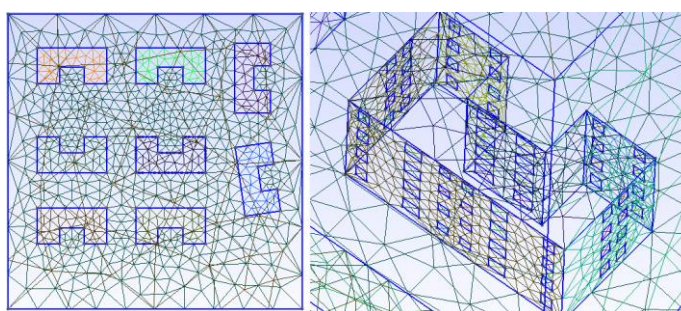
	Situação 1 - 10 e 5 metros	Situação 2 – 10 e 2 metros	Situação 3 – 10 e 1 metros	Desvio padrão
Face 1	33,08	32,9	32,98	0,064084
Face 2	29,9	29,91	30	0,055076
Face 3	29	29,23	29,28	0,149332
Face 4	28,9	29,22	29,24	0,190788
Face 5	32,09	32,22	32,05	0,088882
Face 6	30,06	30,0634	30,06113	0,001732
Face 7	29,79	29,95	29,95	0,092376

Fonte: Autora, 2016

Simulação das temperaturas internas

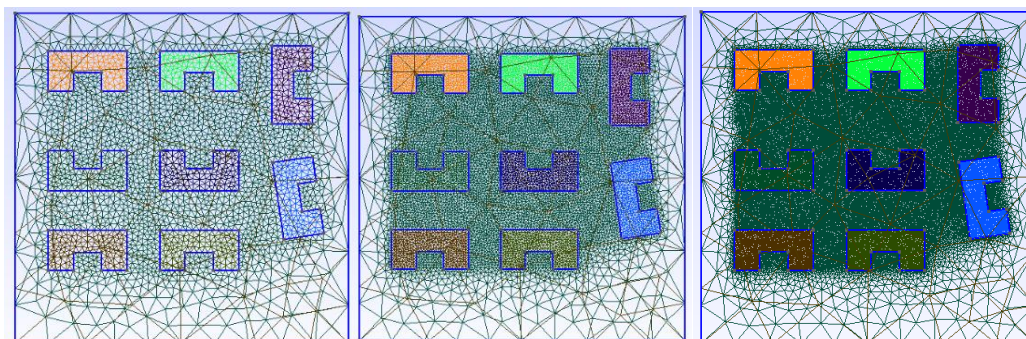
A temperatura interna foi comparada para 10 diferentes malhas. Sendo A, considerando tamanhos diferentes para domínio e edifícios. Sendo B, tamanhos diferentes para domínio, edifícios gerais e edifício térmico. E C, dois diferentes tamanhos para o domínio e um para os edifícios, conforme podemos observar nas figuras 75, 76 e 77.

Figura 75 - Situação 1 – A, 10 e 5 metros



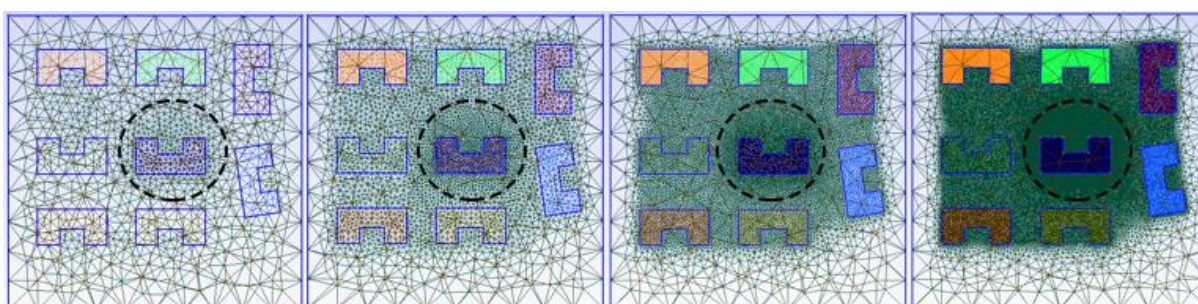
Fonte: Autora, 2016

Figura 76 - Situação 2, 3 e 4 - A, 10 e 2 metros, 10 e 1 metro, 10 e 0,5 metros.



Fonte: Autora, 2016

Figura 77 - Situação 1,2,3 e 4 – B, 10/5/2 metros, 10/2/1 metros, 10/2/0,5 metros, 10/0,5/0,25



Fonte: Autora, 2016

Os resultados em relação a temperatura do ar interno também indicaram uma diferença mínima, sendo a diferença maior na situação 3- B (malha de 10, 1 e 0,5 metros), porém o tempo de simulação desta malha foi superior ao tempo de simulação das demais configurações de malha. As configurações que consideraram 0,5 metros para todos os edifícios ou 0,5 para os gerais e 0,25 metros para o edifício térmico, não foram possíveis de serem simuladas, ocorrendo erros nas simulações. A tabela 33, apresenta os resultados para cada malha.

Tabela 33- Resultado do refinamento da malha para temperatura do ar interno

		1º	2º	3º	4º
		Pavimento	Pavimento	Pavimento	Pavimento
Situação 1	A- 10 e 5 (metros)	22,33	22,56	22,81	23,42
	B- 10, 5 e 2 (metros)	22,2	22,5	22,79	23,39
Situação 2	A- 10 e 2 (metros)	22,29	22,61	22,82	23,41
	B- 10, 2 e 1 (metros)	22,38	22,65	22,82	23,40
Situação 3	A- 10 e 1 (metros)	22,35	22,64	22,84	23,42
	B- 10, 1 e 0,5 (metros)	23,09	23,28	23,36	23,75
Situação 4	A- 10 e 0,5 (metros)	-	-	-	-
	B- 10, 0,5 e 0,25 (metros)				
Situação 5	C- 50/25 e 2 (metros)	22,29	22,61	22,82	23,41
Situação 6	C- 25/10 e 2 (metros)	22,29	22,62	22,83	23,41
Desvio					
Padrão		0,28	0,12	0,19	0,12

Fonte: Autora, 2016

Os resultados demonstraram que os valores de temperatura não variaram significativamente, permitindo assim uma maior liberdade em relação à escolha da malha. Possivelmente essa pouca variação se deu devido à adaptação da malha à geometria, que reduz o seu tamanho de acordo com o tamanho das superfícies e distância entre elas. Todavia, apesar da maior liberdade de escolha, a utilização de uma malha menor permite uma maior precisão dos resultados, pois há uma temperatura de superfície para cada triângulo, que é influenciada de acordo com

fatores como: Sombreamento, radiação solar direta, entre outros. Em malhas maiores um mesmo triangulo pode estar sendo sombreado ou recebendo radiação solar direta e o seu resultado será um valor único, com a malha reduzida essa situação ocorre com menor frequência.

5.3 Resultados cenários simulados

5.3.1 Resultados UTCI

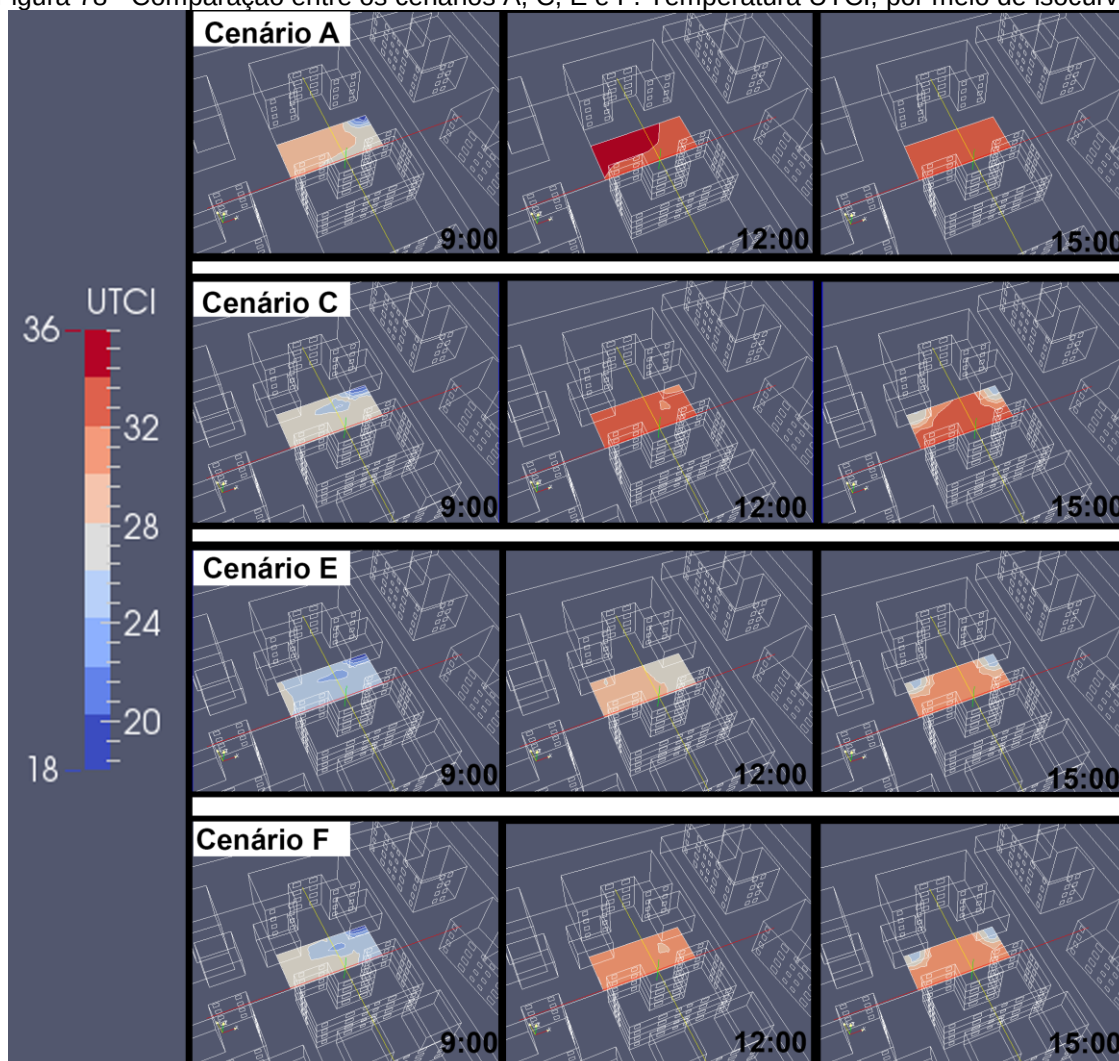
A partir da comparação dos resultados obtidos pelas simulações, é possível observar por meio de isocurvas (figura 78), que entre os cenários “A” e “C”, a vegetação contribuiu para a redução da temperatura nos três horários.

Em relação aos cenários “E” e “F” observa-se que o cenário com o albedo alto obteve temperaturas menores do que o cenário com o albedo baixo (0,3).

Observando os cenários de maneira conjunta, em cada horário, é possível observar que o cenário “E” obteve valores mais baixos de temperatura UTCI para as 9, 12 e 15 horas.

A maior percepção sobre a influência arbórea pelas isocurvas ocorreu às 15 horas, no qual é possível observar a redução de temperatura propiciada pelo sombreamento das arvores.

Figura 78 - Comparação entre os cenários A, C, E e F. Temperatura UTCI, por meio de isocurvas



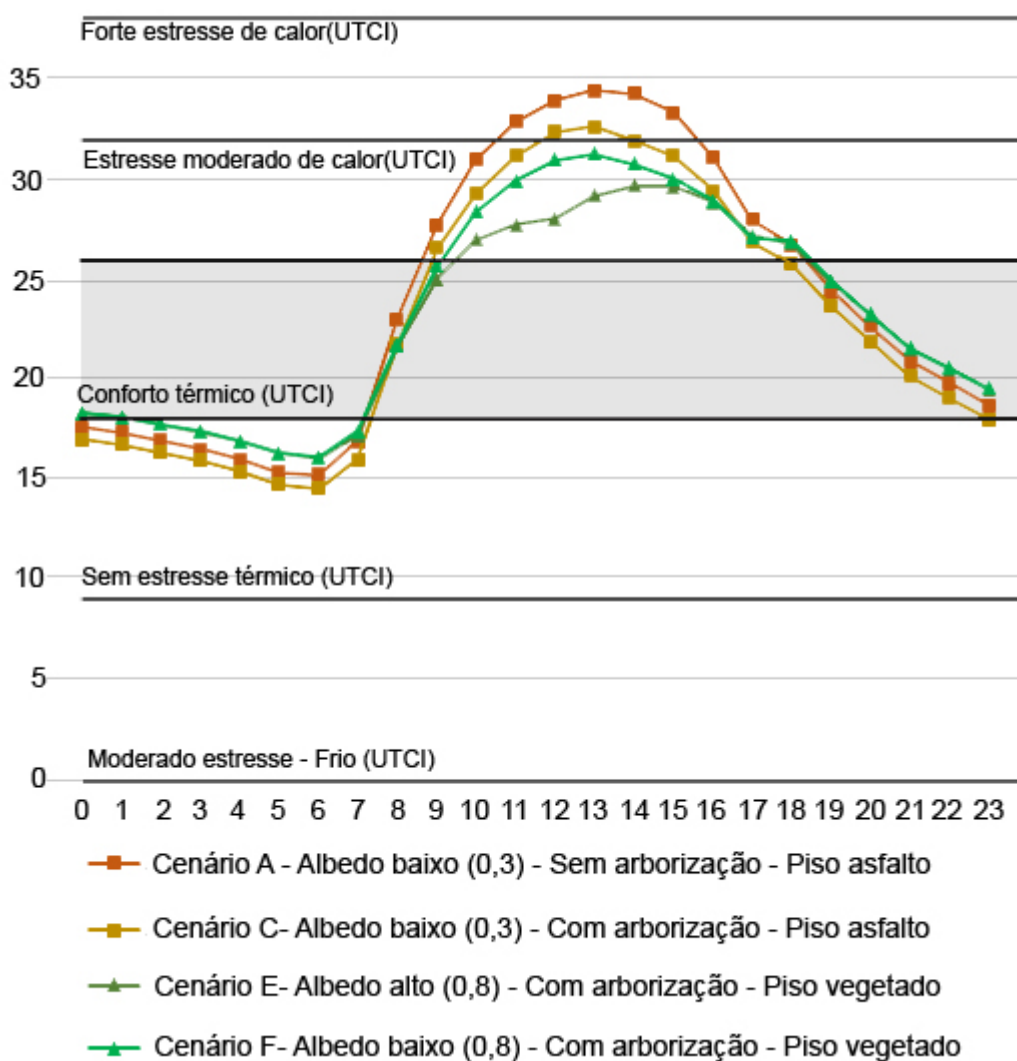
Fonte: Autora, 2017

O gráfico 02, apresenta a temperatura UTCI obtida pela média dos resultados das simulações ao longo do dia em relação à escala UTCI. Conforme podemos observar, o cenário A, obteve o pior desempenho em relação ao índice de conforto térmico, se mantendo por 5 horas na faixa de forte estresse de calor, e durante 40% do dia fora da zona de conforto térmico, o cenário B, no qual foi proposto somente arborização, reduziu esse tempo em 12,5% em relação a faixa de forte estresse de calor, e em 3% em relação ao número de horas fora da faixa de conforto.

Os cenários E e F foram o que obtiveram melhores resultados, através do uso integrado de arborização e piso vegetado. A temperatura não se manteve ao longo do dia na faixa de forte estresse de calor, porém não foi suficiente para manter a

temperatura dentro da faixa de conforto durante todo o período do dia, permanecendo 9 horas fora da zona de conforto no cenário F e 8 horas no cenário E.

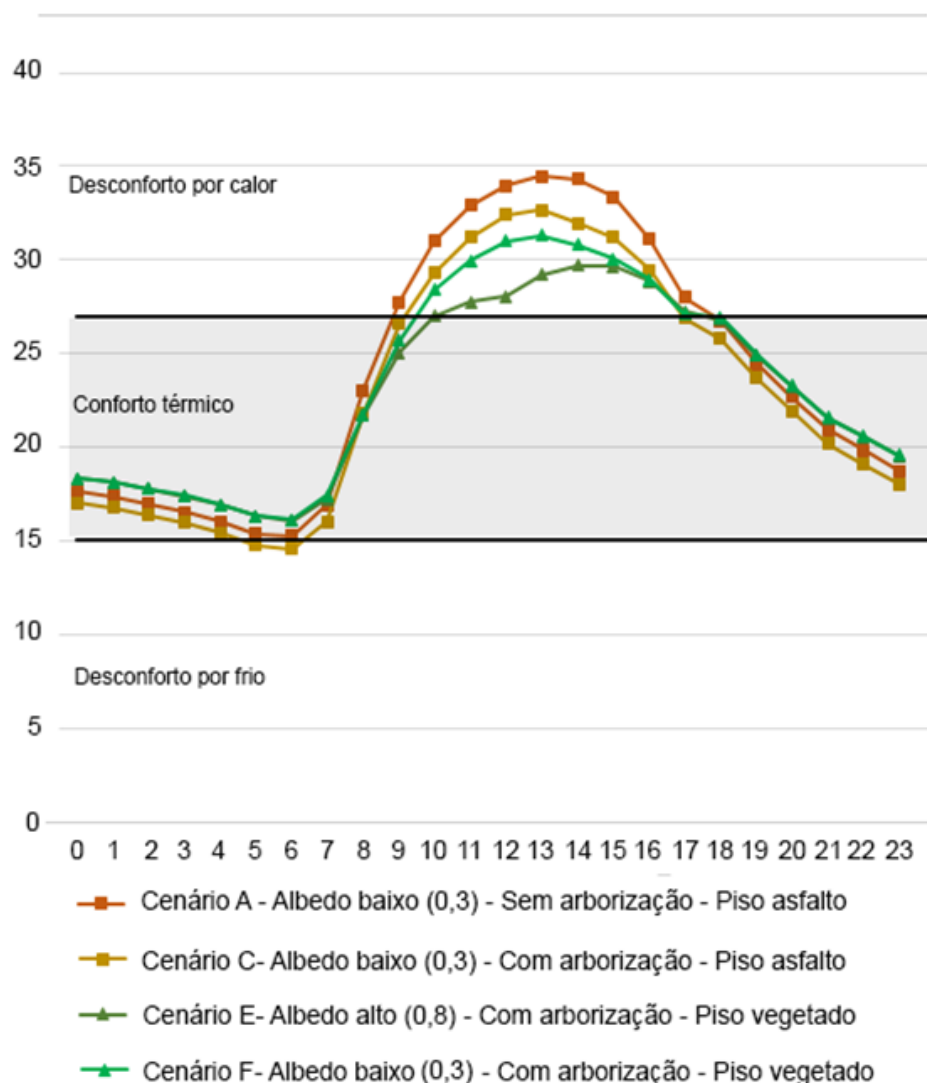
Gráfico 2- Temperatura UTCI obtida pela média dos resultados das simulações ao longo do dia em relação à escala UTCI



Fonte: Autora, 2017

Comparando os resultados obtidos pela escala térmica proposta por ROSSI et al. (2012), o cenário A se manteve fora da faixa de conforto durante 9 horas do dia, a arborização reduziu este tempo em 1 hora, e no cenário E, albedo alto e piso vegetado, a temperatura UTCI se manteve 7 horas fora da faixa de conforto. Como podemos observar no gráfico 3.

Gráfico 3- Temperatura UTCI obtida pela média dos resultados das simulações ao longo do dia em relação à escala UTCI proposta por ROSSI et al. (2012)



Fonte: Autora, 2017

A disposição da vegetação se deu de forma restrita, pois o estacionamento existente e a posição dos edifícios e taludes limitaram a disposição das árvores. Com isso, parte da área vegetada já estava sombreada pelos próprios edifícios. Como mostram as figuras 79 e 80, que representa o sombreamento na parte da tarde, não foi possível propor espécies arbóreas de maneira a evitar a radiação solar direta em grande parte das edificações, devido ao posicionamento das edificações no terreno, taludes e estacionamento.

Figura 79 -Sem árvores 22/12-15:00



Fonte: Autora, 2016

Figura 80- Com árvores 22/12-15:00



Fonte: Autora, 2016

Contudo, é possível observar nas figuras 81 e 82, a diferença de temperatura no solo proporcionada pela presença da arborização.

Figura 81 - Cenário C



Fonte: AUTORA, 2017

Figura 82 - Cenário A

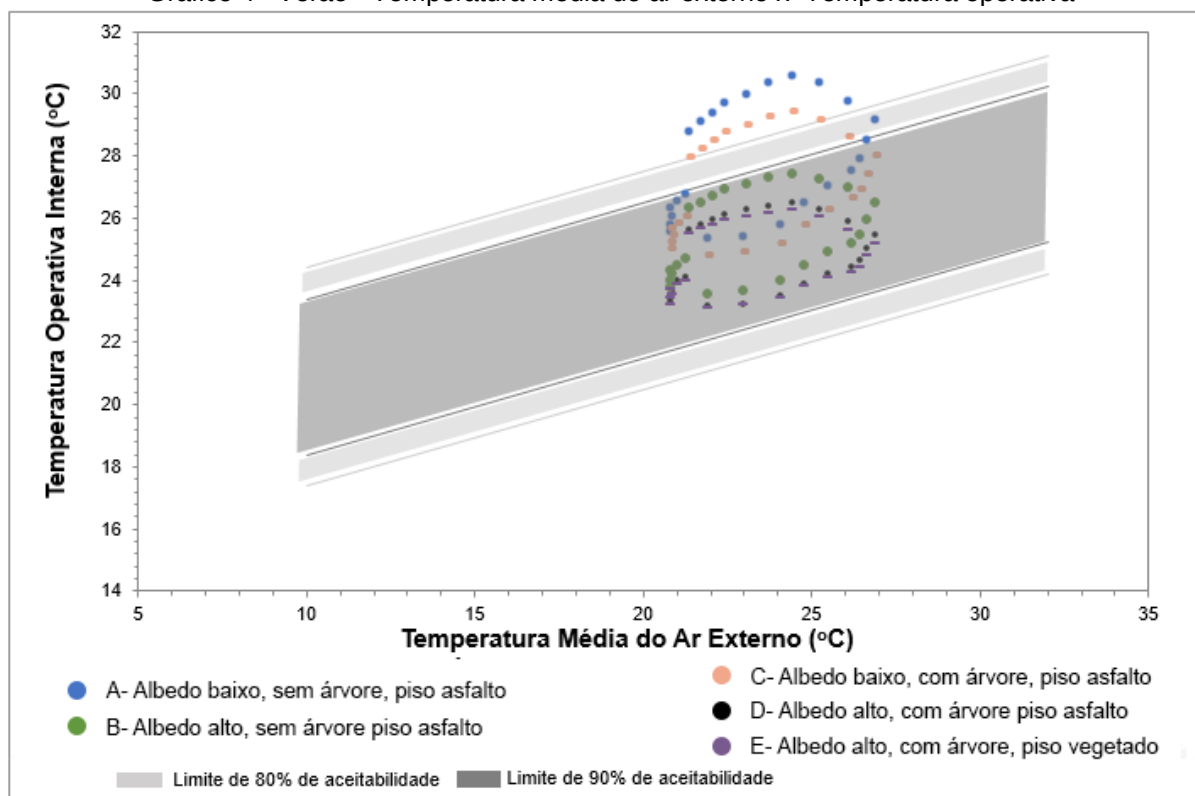


Fonte: AUTORA, 2017

5.3.2 Resultados Índice adaptativo ASHRAE 55

Os resultados da comparação da temperatura operativa com a média mensal de temperatura do ar de acordo com o gráfico da norma ASHRAE 55 (2013), pode ser observado no gráfico 4.

Gráfico 4– Verão - Temperatura média do ar externo x Temperatura operativa

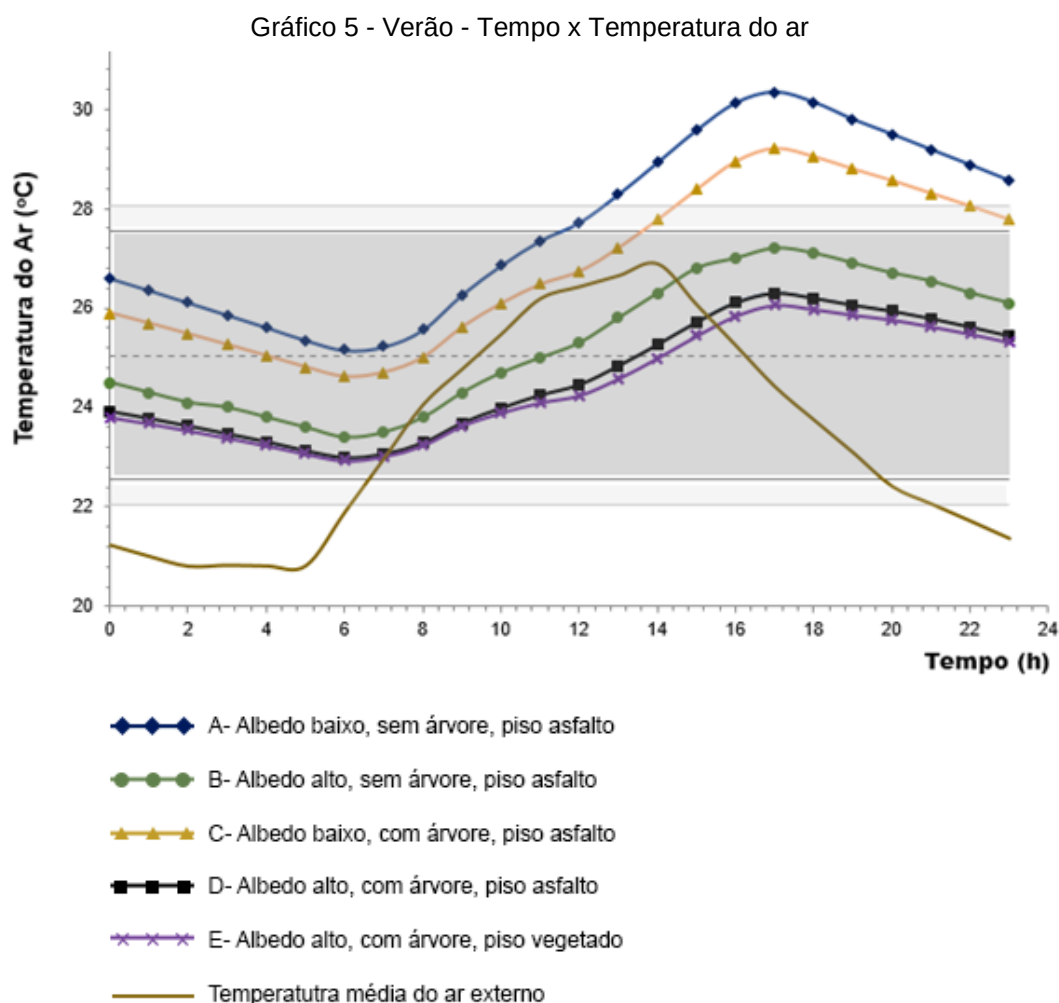


Fonte: Autora, 2017

É possível observar a partir do gráfico 4, que a situação recorrente nas edificações, albedo de superfície baixo e a falta de arborização, proporciona desconforto térmico de acordo com os parâmetros da ASHRAE 55. No estudo de caso simulado (cenário A), durante 9 horas do dia, a temperatura se manteve fora da faixa de conforto. Com a implantação de espécies arbóreas há uma redução na temperatura, porém não é suficiente para proporcionar conforto em todo o período do dia, a redução proporcionada pela presença da arborização foi de 4,16% em relação ao número de horas na faixa de conforto. Vale ressaltar que a arborização no terreno foi distribuída de maneira restrita de acordo com a implantação existente, a grande maioria das árvores propostas não protegem as fachadas que recebem insolação solar direta, portanto, fica em aberto a possibilidade de uma alteração maior nos resultados de acordo com novas premissas de projeto considerando as árvores como um bloqueador solar. Os cenários que obtiveram melhores resultados para o verão, foram os que consideraram o albedo de superfície alto (cenários B, D e E), comprovando os estudos já realizados sobre o assunto, de que a absorvância interfere na temperatura interna dos ambientes. O albedo de superfície alto, mesmo sem vegetação e

arborização, manteve a temperatura na zona de conforto durante todo o período do dia.

O gráfico 5 apresenta a variação diária de cada cenário para a temperatura do ar interno e para a temperatura do ar externo do período simulado. Em relação à temperatura de conforto proposta pela norma ASHRAE 55 (2013) e seus limites aceitáveis.



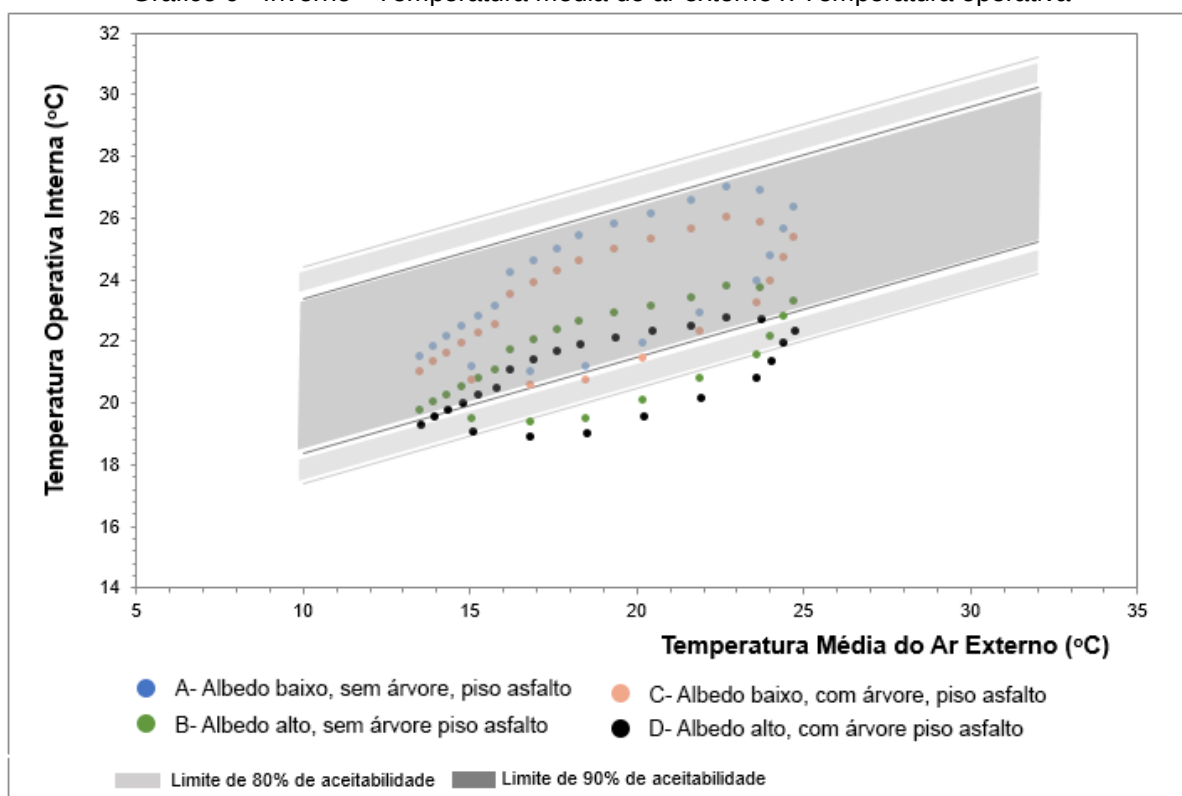
Fonte: Autora, 2017

Como podemos observar no gráfico 5, nos cenários que consideraram piso vegetado e/ou arborização e albedo alto, a temperatura do ar interno se manteve dentro da faixa de conforto durante todo o período do dia. No cenário A, albedo baixo, sem arborização e piso asfalto, a temperatura do ar interno manteve-se durante 11 horas e 30 minutos fora da faixa de conforto. Somente com a proposta de arborização (cenário C) este tempo reduziu para 8 horas e 30 minutos. A influência do albedo foi

mais significativa do que a influência da vegetação para a redução da temperatura do ar interno.

O gráfico 6, apresenta os limites de conforto para o inverno e a temperatura operativa em relação à temperatura média do ar externo. Os cenários simulados para o inverno, foram os cenários: A, B, C e D. Os cenários onde tiveram melhor desempenho no verão devido ao albedo alto na superfície, foram os que tiveram pior desempenho no inverno. Sendo que no cenário B a temperatura operativa permaneceu por 4 horas fora da faixa de conforto, e no cenário D por 6 horas.

Gráfico 6 - Inverno - Temperatura média do ar externo x Temperatura operativa

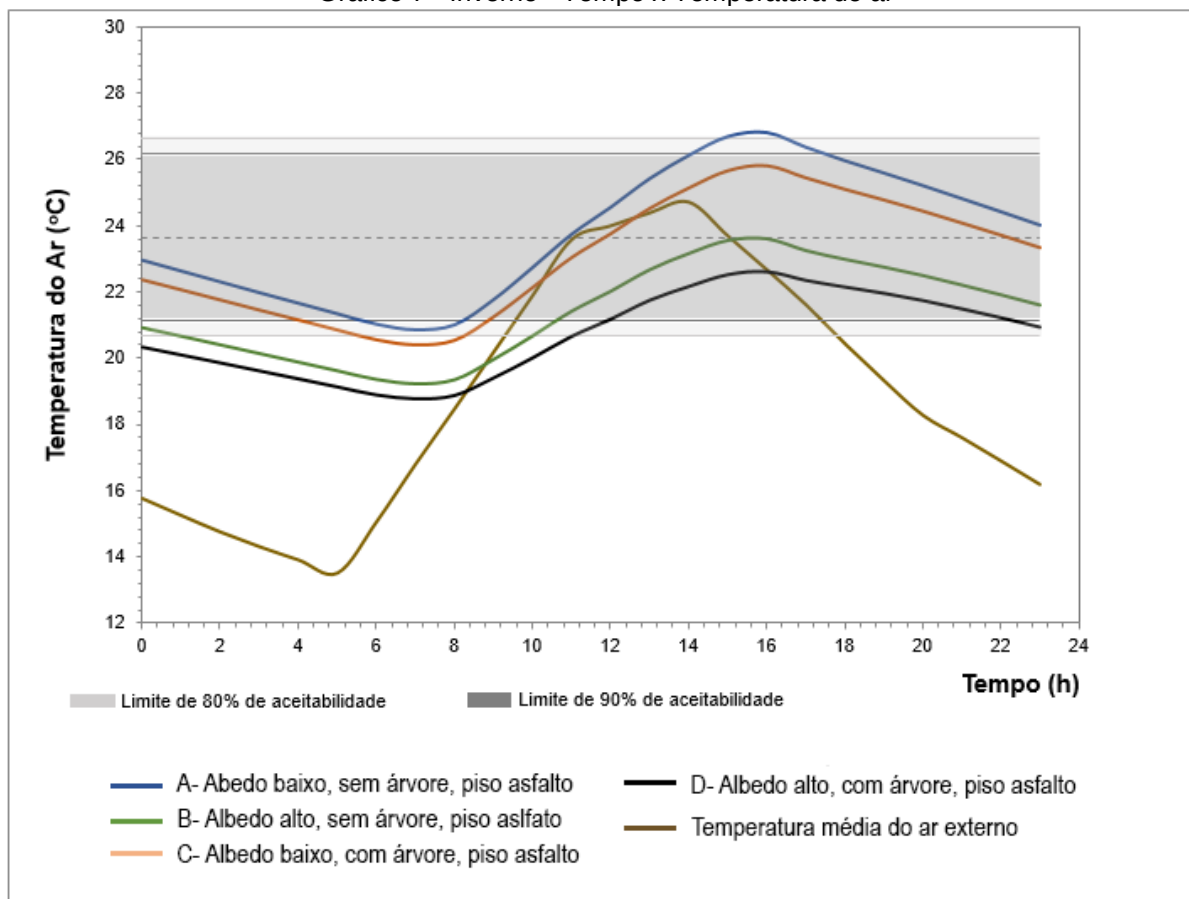


Fonte: Autora, 2017

O gráfico 7, apresenta a temperatura do ar interno e a temperatura do ar externo para o período simulado em relação à temperatura de conforto e os limites aceitáveis proposto pela ASHRAE 55 (2013). No cenário A, a temperatura do ar interno, permaneceu 4 horas fora da faixa de conforto, sendo por 2 horas e 30 minutos, desconforto por frio, e por 1 hora e 30 minutos, desconforto por calor. Somente com a implantação da arborização (cenário C), a temperatura se manteve dentro da faixa de

conforto 50% a mais em relação ao cenário A. O cenário B se manteve por 9 horas como desconforto por frio, e o cenário D por 11 horas.

Gráfico 7- Inverno - Tempo x Temperatura do ar



Fonte: Autora, 2017

Por meio das análises realizadas é possível observar que as alterações dos cenários impactaram no conforto térmico interno e externo principalmente no verão. As simulações mostraram que as temperaturas internas das unidades habitacionais se modificaram com as alterações do albedo nas fachadas, bem como com a implantação da arborização e a substituição do solo mineral por solo vegetal.

Os cenários no qual o albedo de superfície foi considerado baixo (0,3), obtiveram piores resultados no limite de conforto interno e externo. A arborização se mostrou importante principalmente no conforto externo, mesmo com as limitações de implantação da mesma. O piso vegetado reduziu a temperatura interna e externa no índice da norma ASHRAE, no verão, as temperaturas operativas se mantiveram

dentro da faixa de conforto durante todo o dia, e no índice UTCI, os valores se mantiveram dentro da faixa de conforto para a maior parte do dia.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou avaliar o impacto da alteração do albedo nas fachadas, da arborização e da vegetação no piso, no conforto térmico dos usuários de um conjunto habitacional de interesse social, bem como o conhecimento da ferramenta Solene Microclima para realização das simulações dos cenários.

O objetivo do trabalho foi atingido, uma vez que o modelo Solene Microclima foi validado pelas medições em campo e estudado, permitindo uma entrada mais precisa dos dados e o conhecimento de suas limitações.

A partir da análise dos dados obtidos, conclui-se que a hipótese pôde ser parcialmente confirmada. Os cenários apresentaram diferentes resultados em relação às faixas de conforto analisadas com as alterações nos albedos das fachadas, bem como com a implantação da arborização e a substituição do solo mineral por solo vegetal. Em relação ao verão, comparando a situação recorrente nas implantações, pouca ou nenhuma arborização e albedo de superfície nas fachadas baixo, com a alteração para o albedo alto, arborização e vegetação no piso, a temperatura passou de 62% dentro da faixa de conforto para 100% em relação ao índice adaptativo da ASHRAE 55 (2013), e de 75% para 100% fora da faixa de forte estresse por calor do índice UTCI. Pode-se observar também por meio das isocurvas a influência do sombreamento na temperatura UTCI. Todavia, no inverno os cenários que apresentaram melhores resultados para o verão, apresentou desconforto térmico para o frio em até 7 horas em relação ao índice de conforto da ASHRAE 55, o índice UTCI não foi simulado para o inverno.

Dificuldades e limitações:

Dentre as dificuldades encontradas, destacam-se a limitação em relação a utilização das espécies arbóreas, tanto pela limitação física do terreno, devido a existência das edificações que limitaram no tamanho das espécies, quanto na variedade das espécies utilizadas. Em Belo Horizonte há uma grande variedade de espécies que

poderiam ser mais eficientes em relação ao conforto térmico, porém há poucos estudos sobre as mesmas. Com isso o trabalho limitou-se a especificação de árvores citadas em trabalhos anteriores, por conterem dados necessários como por exemplo, a transmitância das espécies. Além de uma limitação em relação à distância das árvores e edificações, do posicionamento, altura e tamanho da copa.

Outra dificuldade encontrada foi em relação ao modelo Solene Microclima, a ferramenta está em constante desenvolvimento e atualmente a geometria não permite uma simulação precisa em coberturas inclinadas, uma vez que não é possível modelar dessa forma, bem como não é possível entrar com os dados da transmitância térmica do material pois o programa funciona no regime transiente, com isso os valores das propriedades térmicas dos materiais da cobertura tiveram que ser calibrados e optou-se por não analisar este pavimento.

Indicação de trabalhos futuros:

Avaliar o conforto térmico em conjuntos habitacionais a partir da aplicação de outros tipos de materiais de revestimento.

Utilizar um modelo de acoplamento CFD para resultados mais precisos em relação a influência da ventilação natural no conforto térmico.

Simular o conjunto habitacional nos limites de albedo determinados pela norma de desempenho NBR 15575.

Verificar dados de transmitância óptica, albedo e características físicas de novas espécies arbóreas para que estas possam ser utilizadas em estudos do microclima urbano.

Verificar a espécie arbórea que melhor proporciona conforto térmico em edificações de quatro pavimentos, de acordo com o sombreamento.

Verificar o impacto no microclima urbano de uma massa arbórea nos conjuntos habitacionais existentes.

Conclusões

Este trabalho buscou uma análise crítica em relação a construção atual em conjuntos habitacionais de interesse social, e a utilização de recursos simples que possibilitam a melhoria no conforto térmico sem impactar no custo das edificações, levando em consideração que a modificação do albedo e a implantação de espécies arbóreas e da vegetação rasteira não acarreta em maiores custos construtivos, sendo a arborização muitas vezes proposta em projetos de conjuntos habitacionais, porém de forma isolada. Com os dados obtidos foi possível verificar a importância de um estudo mais detalhado visando o conforto térmico em fase de projeto, principalmente em climas quentes e úmidos e em situações onde a possibilidade de se usar um sistema de refrigeração do ar é mínima. É necessário uma análise específica para cada situação, pois fatores como inclinação do terreno e número de famílias removidas, influenciam na quantidade e no posicionamento dos edifícios. Contudo, o uso da vegetação de forma adequada visando o sombreamento de áreas onde a radiação solar é direta e o cuidado em relação as cores e a rugosidade das superfícies, são estratégias simples que podem proporcionar maior conforto térmico para os usuários.

REFERÊNCIAS

ABREU L. V.; **Avaliação da escala de influência da vegetação no microclima por diferentes espécies arbóreas**, 2008. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008

AGUIAR, L.J. G. et al. Estimativa de onda longa atmosférica em áreas de floresta e de pastagem no sudoeste da Amazônia. In: **Rev. bras. meteorol.**, v.26, n.2, pp.215-224, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862011000200006>>. Acesso em 10 de mar. de 2016.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE fundamentals handbook**. Atlanta, 2001.

_____. **ASHRAE 55 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**, Atlanta, 2013

ANDREASI, W. A.; VERSAGE, R. de S.. **A ventilação natural como estratégia visando proporcionar conforto térmico e eficiência energética no ambiente interno**. Laboratório de Análise e Desenvolvimento de Edificações, 2012. Disponível em: <<http://pgquimica.sites.ufms.br>> Acesso em: 05 de jan. 2016

ASHDOWN, P.; All-weather model for sky luminance distribution–Preliminary configuration and validation. **SolarEnergy**, v. 50, nº 3, p.235-245, 1993.

ASSIS, E. S.; A abordagem do clima urbano e aplicações no planejamento da cidade: Reflexões sobre uma trajetória. In: 8º ENCONTRO NACIONAL, 4º ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2005, Maceió-Al. **Anais...** Maceió-Al: Editora ANTAC, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**. Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005

_____. **NBR 15575: Edifícios habitacionais – Desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.

AYOADE, J.O. **Introdução a climatologia para os trópicos**. 4. ed. - Rio de Janeiro, Brasil, 1996

BARBOSA, M. J.; LAMBERTS, R.; GUTHS, S. Uso de barreiras de radiação para minimizar o erro no registro das temperaturas do ar em edificações. In: **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 8, n. 4, p. 117-136, out./dez, 2008.

BARTHOLOMEI, C. L. B.; **Influência da vegetação no conforto térmico urbano e no ambiente construído**, 2003. 205 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Campinas 2003.

BLAZEJCZYK, K.; et al. An introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI). **Geographia Polonica**, v. 86, nº 1, pp.5-10. 2013.

BONAN, G. B., **Ecological Climatology: Concepts and Applications**. Cambridge University Press, Cambridge. 678 p., 2002.

BOUYER, Julien. **Modélisation et simulation des microclimats urbains Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments** 324f. Tese (Doutorado em Ambiances Architecturales et Urbaines), École polytechnique de l'Université de Nantes, Nantes, 2009.

BRANDÃO, R. S.; **As interações espaciais urbanas e o clima**, 2009. 350 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

BRASIL. Lei nº 9055, de 1 de junho de 1995, que disciplina a extração, industrialização, utilização, comercialização e transporte do asbesto/amianto e dos produtos que o contenham, bem como das fibras naturais e artificiais, de qualquer origem, utilizadas para o mesmo fim e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 02 de junho de 1995.

BUCHANAN, B.B.; GRUISSEM, W.; JONES, R.L. **Biochemistry and molecular biology of plants**. Rockville: **American Society of Plant Physiologists**, 2000. 1367p *apud* FAGAN, E. B. et al.; Lei de Beer e sua relação com ecofisiologia de plantas, In: **Revista do Centro Universitário de Patos de Minas**, Patos de Minas, UNIPAM, n. 4, p. 78-97, nov. 2013.

BUENO, C. L.; **Estudo da atenuação da radiação solar incidente por diferentes espécies arbóreas**, 1998. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, Campinas 1998.

CARDEMIL, J. M., COLLE, S. **A base de dados SWERA como suporte para análises tecno-econômicas de plantas termo-solares**. PA: III Congresso Brasileiro de Energia Solar. Belém, 2010.

CARLO, J C; LAMBERTS, R. **Processamento de arquivo climático para simulação do desempenho térmico de edificações**. ELETROBRÁS/PROCEL, Relatório Técnico: LabEEE-200504. Florianópolis, SC, 2005.

CARVALHO, M. M. DE, **Clima urbano e vegetação: Estudo analítico e prospectivo do parque das dunas em Natal**, 283f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2001.

Companhia Energética de Minas Gerais. **Manual de arborização**. Belo Horizonte: Cemig / Fundação Biodiversitas, 112 p., 2011

CLARKE, J. A., **Energy Simulation in Building Design**, 2. ed. Londres: Butterworth-Heinneman, 2001.

COELHO T.C.C.; GOMES C. E. M.; DORNELLES K. A.; Desempenho térmico e absorção solar de telhas de fibrocimento sem amianto submetidas a diferentes processos de envelhecimento natural. In: **Revista Ambiente Construído**. v.17, n.1, pp.147-161, 2017.

COMPRI-NARDY, M.; STELLA, M.B.; OLIVEIRA, C. **Práticas de Laboratório de Bioquímica e Biofísica: uma visão integrada**. Editoras Guanabara/Koogan. Rio de Janeiro, 2009. <http://www.ufrgs.br/leo/site_espec/index.html>. Acesso em 26 de junho de 2016.

DEDEAR, R. J.; BRAGER, G. S. Thermal Comfort in Naturally Ventilated Buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. Energy and Buildings, **Energy and Buildings**, v.34, n.6, p.549-561, jul. 2002.

DEDEAR, R. J.; FOUNTAIN, M. E.; Field Experiments on Occupant Comfort and Office Thermal Environments in a Hot-Humid Climate. **ASHRAE Transactions**, v. 100, n. 2, p. 457-474, 1994.

DOERFLER, M. A.; KRUEGER, E. L.; Avaliação dos impactos termo-energéticos da orientação solar em habitação de interesse social na zona bioclimática 01.15º ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, **Anais... ENTAC**, Maceió, 2014

DORNELLES K. A.; **Absorção solar de superfícies opacas: Métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**, 2008. 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2008.

DORNELLES, K. A.; RORIZ, M.; Absorção solar de superfícies opacas: as cores enganam. In: CONFERENCIA REGIONAL LATINOAMERICANA DE LA INTERNATIONAL SOLAR ENERGY SOCIETY, 2., REUNIÓN DE TRABAJO DE LA ASOCIACIÓN ARGENTINA DE ENERGÍAS RENOVABLES Y AMBIENTE (ASADES), 29., 2006, Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires, 2006.

DURY, G. H, High temperature extremes in Austrália. In: Association of American Geographers. **Anais...** Estados Unidos, v.62, 1972, *apud* FRITZSONS, E.; WREGE, M. S.; MANTOVANI, L. E.; Altitude e temperatura: Estudo do gradiente térmico no Rio Grande do Sul, In: **Revista Brasileira de Climatologia**, v.16, nº11, jan.-jul. 2015.

ETERNIT. **Esclarecimentos Sobre as Recentes Reportagens Sobre o Amianto**. São Paulo, mai. 2012. Disponível em: <<http://www.etsnit.com.br/destaques>> Acesso em: 05 de maio. 2016.

FAGAN, E. B. et al.; Lei de Beer e sua relação com ecofisiologia de plantas, In: **Revista do Centro Universitário de Patos de Minas**, Patos de Minas, UNIPAM, n. 4, p. 78-97, nov. 2013.

FANGER, P. O. **Thermal Comfort**. Florida: Robert E. Krieger Publishing Co., 256 p., 1982.

FERREIRA, C. C., **Avaliação de conformidade da adequabilidade climática de edificações residenciais**, 2015. 435 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Civil) – Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2015.

FIALA, D.; LOMAS, K. J.; STOHRER, M. A Computer Model of Human Thermoregulation for a Wide Range of Environmental Conditions: the passive system. *Journal of Applied Physiology*, In: **International journal of biometeorology**. v. 87, p. 1957-1972, set. 2001.

_____. Computer Prediction of Human Thermoregulatory and Temperature Responses to a Wide Range of Environmental Conditions. In: **International Journal of Biometeorology**, v. 45, n. 3, p. 143-159, 2001.

_____. First Principles Modeling of Thermal Sensation Responses in Steady-State and Transient Conditions. **ASHRAE Transactions**, v. 109, p. 179-186, 2003.

_____. **Dynamic Simulation of Human Heat Transfer and Thermal Comfort**. In: MEKJAVIC, I. B.; KOUNALAKIS, S. N.; TAYLOR, N. A. S. (Eds.). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL ERGONOMICS, 12., Portoroz, Slovenia, 2007. Proceedings... Portoroz, Slovenia, 2007. p. 513-515.

FIALA, D. et al.; UTCI-Fiala Multi-Node Model of Human Heat Transfer and Temperature Regulation. In: **International Journal of Biometeorology**, v. 56, nº 3, p. 429 – 441, abril 2011.

FONTES, M. S. G. C. DELBIN, S. A qualidade climática de espaços urbanos. In.: 6º Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, III, 2001. São Pedro. **Anais...** São Pedro: ANTAC, p. 155-158, 2001.

FRITZSONS, E.; WREGE, M. S.; MANTOVANI, L. E.; Altitude e temperatura: Estudo do gradiente térmico no Rio Grande do Sul, In: **Revista Brasileira de Climatologia**, v.16, nº11, jan.-jul. 2015.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, Déficit Habitacional no Brasil/ 2013 – 2014, Belo Horizonte, 2016.

GALLAGHER, J. N.; BISCOE, P. V. Radiation absorption, growth and yield of cereals. In: **Journal of Agricultural Science**. New York, v. 91, n. 1, p. 47-60, 1978. *Apud* FAGAN, E. B. et al.; Lei de Beer e sua relação com ecofisiologia de plantas, In: **Revista do Centro Universitário de Patos de Minas**, Patos de Minas, UNIPAM, n. 4, p. 78-97, nov. 2013.

GOMES, M. A S; AMORIM, M. C.C.T. Arborização e conforto térmico no espaço urbano: estudo de casos nas praças públicas de Presidente Prudente (SP). In: **Caminhos de Geografia 7**, Instituto de Geografia da UFU, v.10, p. 94-106, set. 2003.

GONÇALVES, N. D. F., **Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas**. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Matemática) - Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2007.

GONÇALVES, W. B.; **Métricas de preservação e simulações computacionais como ferramentas diagnosticas para a conservação preventiva de coleções. Estudo de caso no Sítio Patrimônio Mundial de Congonhas – MG**, 2013 492 f. Tese (Doutorado em Artes) – Escola de Belas Artes da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

HAGHIGHAT, F., JIANG, Z, WANG, J.C.Y., ALLARD F.; Air movement in buildings using computational fluid dynamics. In: **ASME Journal of Solar Energy Engineering**, v. 2, nº 114, p. 84–92, mai.1992.

HIROSE, T.; Development of the Monsi-Saeki theory on canopy structure and function. In: **Annals of Botany**, v. 95, p. 483-494, Dez. 2005

INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética Edificações Residenciais**. Brasil. 2012.

ISO 7726 - **Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities**, 1998.

ISO 7730 - **Ergonomics of the thermal environment -- Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria**, 2005.

KRÜGER, E.L.; MICHALOSKI, A.O.; Avaliação térmica de habitação popular através de simulação computacional como parâmetro de projeto arquitetônico: Estudo de caso na vila tecnológica de Curitiba, In: IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ENTAC 2002

LAKATOS, E.M.; MARCONI, M.A.; **Metodologia Científica**. 6ª ed., São Paulo: Atlas, 2011.

LAMBERTS, R.; DUARTE, C.P.V.; **Desempenho Térmico de Edificações**. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Eficiência energética em edificações, 7ª edição, Florianópolis, mar. 2016.

LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. **The cool colors project**. Disponível em: <<http://coolcolors.lbl.gov>> Acesso em: 10 nov. 2016. *Apud* DORNELLES K. A.; **Absortância solar de superfícies opacas: Métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**, 2008. 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2008.

LOMBARDO, M.A. **Ilhas de Calor nas Metrôpoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo: HUCITEC, 1985. 244 p.

MALYS, L.; **Évaluation des impacts directs et indirects des façades et des toitures végétales sur le comportement thermique des bâtiments.** 238 f. Tese (Doutorado em Ciências da engenharia, geociências e arquitetura), l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes, Nantes 2012. *Apud* MIGUET, F., **Paramètres physiques des ambiances architecturales : Un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain.** 365 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia e Arquitetura), l'École d'Architecture de Nantes, Nantes, 2000.

MARION, W., URBAN, K., **User's Manual for TMY2s Typical Meteorological Years.** **US Department of Energy Technical Report**, 1995.

MARRA, N.C.S.N., PADOVANI D.B., ASSIS, E.S. The influence of the orientation of buildings on natural ventilation: Case study in a housing complex of social interest. In: Roomvent - 13th SCANVAC International Conference on Air Distribution in Rooms, **Anais...**; São Paulo. Out. 2014.

MARTINS, F.R., PEREIRA, E.B., SILVA, S.A.B., ABREU, S.L., COLLE, S., 2008. Solar energy scenarios in Brazil, Part one: Resource assesment, In: **Energy Policy**, v. 36, n. 8, p. 2853-2864, fev. 2008.

MASCARÓ, L; MASCARÓ, J. **Vegetação urbana.** 2.ed. Porto Alegre: Mais Quatro Editora, 2005. 204 p.

MEGRI, A. C.; HAGHIGHAT, F.; Zonal Modeling for Simulating Indoor Environment of Buildings: Review, Recent Developments, and Applications, 2007, In: **HVAC&R Research**, v.13, jun. 2007

MELO, A. P.; WESTPHAL, F. S.; MATOS, M.; **Apostila do curso básico do programa EnergyPlus**, Florianópolis, Set. 2009.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; NETO, J. B. C., Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil, In: **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 47-68, out./dez. 2005.

MIGUET, F., **Paramètres physiques des ambiances architecturales : Un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain.** 365 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia e Arquitetura), l'École d'Architecture de Nantes, Nantes, 2000.

MORILLE, B.; LAUZET, N.; MUSY, M. SOLENE-microclimate: a tool to evaluate envelopes efficiency on energy consumption at district scale, In: **Energy Procedia**, v.78, p. 1165-1170, nov. 2015.

MORILLE B., MUSSY M., MALYS L. Preliminary study of the impact of urban vegetated devices on energy consumption of building at a district scale. In: **Energy and Buildings**, v.114, p. 275-282, Fev. 2016.

MORISHITA C.; SORGATO M. J.; VERSAGE R.; TRIANA M. A.; MARINOSKI D. L., LAMBERTS R. **Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas**, v. 5, Florianópolis, 2011.

MOURA, R. G. **Estudos das radiações solar e terrestre acima e dentro de uma floresta tropical úmida**. Dissertação (mestrado em Meteorologia), INPE. São José dos Campos, 2007.

NASCENTES, N. C. S., **Análise da envoltória pela norma de desempenho – ABNT NBR 15575-4 e RTQ-R da tipologia de edifícios de habitação de interesse social em Belo Horizonte – MG**, 2014, 90 f. Monografia (Especialização em Sistemas tecnológicos e Sustentabilidade Aplicados ao Ambiente Construído) – Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014

NOBEL, P. S. **Physicochemical and Environmental Plant Physiology**, 3 ed. San Diego: Elsevier/Academic Press, 2005. 567 p. *apud* FAGAN, E. B. et al.; Lei de Beer e sua relação com ecofisiologia de plantas, In: **Revista do Centro Universitário de Patos de Minas**, Patos de Minas, UNIPAM, n. 4, p. 78-97, nov. 2013

OLGYAY, V. **Architecture y clima - manual de diseño bioclimático para arquitectos** 1998, Barcelona: G. Gili, 1998. 203p.

OLIVEIRA, E. A.; **Métodos para análise de concordância: estudo de simulação e aplicação a dados de evapotranspiração**. 177 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2016.

OLIVEIRA, R. P.; **Utilização de um aplicativo de simulação computacional na avaliação de desempenho térmico de protótipo de habitação de interesse social**. 124 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.

OKE, T.R. **Initial Guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites**. Canadá, 2006.

OKE, T.R. **Boundary layer climates**, Ed. Routledge, 2ª edição, 460 p., 1978.

OZISIK, M. N. **Transferência de calor: um texto básico**. 661 p., Rio de Janeiro: Ed. Guanabara, 1990.

PEREIRA, I. M.; ASSIS, E. S. de. Avaliação de modelos de índices adaptativos para uso no projeto arquitetônico bioclimático. In: **Ambiente construído**, v.10, nº1, p.31-51, mar. 2010, Porto Alegre. Disponível em <www.scielo.br/scielo.php>. Acesso em 24 abr. 2016

PEREIRA, E.B.; MARTINS, F.R.; ABREU, S.L.; RÜTHER, R., **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 1ª Edição, São José dos Campos: INPE, 60p., 2006

PRATA, A. J.; A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. In: **Quarterly Journal Resource Meteorological Society**, v.122, p. 1127-1151, 1996.

RIBEIRO, A. G.; **As escalas do Clima**, In: **Boletim De Geografia Teorética**, v.23, p. 288-294, 1993.

RIVERO, R., **Arquitetura e Clima**. 2ª. Ed, Porto Alegre: DC Luzzato Editores, 1986.
ROMERO, M. A. B. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano**. 2. ed. São Paulo: Pro Editores, 2000.

ROMERO, M. A. B. **A arquitetura bioclimática do espaço público**. Brasília Editora Universidade de Brasília, 2001.

RORIZ, V. F.; DORNELLES, K. A.; RORIZ, M. Fatores determinantes da absorptância solar de superfícies opacas. In: 9º ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2007. **Anais...** Ouro Preto, 2007.

ROSSI F. A.; KRÜGER; E. L., BRÖDE P.; Definição de faixas de conforto e desconforto térmico para espaços abertos em Curitiba, PR, com o índice UTCI, In: **Ambiente Construído**, v.12, nº1, pp.41-59, 2012.

ROSSI, F. A.; KRUGER, E. L.; BRODE, P.; Definição de faixas de conforto e desconforto térmico para espaços abertos em Curitiba, PR, com o índice UTCI. In: **Ambiente construído**, v. 12, nº 1, p. 41-59, Mar. 2012.

SALISBURY, F. B.; ROSS, C. W. **Plant Physiology**. 4 ed. Belmont: Wadsworth Publishing Company, 1992, p. 607-615. *Apud* FAGAN, E. B. et al.; Lei de Beer e sua relação com ecofisiologia de plantas, In: **Revista do Centro Universitário de Patos de Minas**, Patos de Minas, UNIPAM, n. 4, p. 78-97, nov. 2013.

SENTELHAS P. C.; ANGELOCCI L. R.; LC3 **Radiação Solar, balanço de Energia, Aula 05.**, 2009. Disponível em: <www.professormendoncauenf.com.br>. Acesso em: 20 de mai. 2015.

SILVA, M.A.V. **Meteorologia e Climatologia**. Versão digital 2, Recife, mar. 2006. Disponível em: <http://www.icat.ufal.br>. Acesso em: 14 de mai. 2016

SILVEIRA, R.; MARISOSKI, S.L.; LAMBERTS, R.; Avaliação da absorptância à radiação solar e temperatura superficial de telhas de fibrocimento utilizadas nas coberturas de edificações do campus da UFSC. In: XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2012, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora, MG: Editora: ENTAC, 2012

SIRQUEIRA C. A., **Estudo microclimático de recortes urbanos vegetados em belo horizonte – MG, através de modelagem micrometeorológica**. 274f. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014

SKORUPA, F. A.; DIAS A. P. M.; RACHOR, A. C.; VIEIRA, J. C.; **Trocas térmicas**. Disponível em: <<https://independent.academia.edu/JulioVieira1>> Acesso em 05 de mai. 2016.

SOEBARTO, V. I. Teaching an energy simulation program in an architecture school: lessons learned. In: Building Simulation 9, 2005, Montreal. **Anais...** Montreal: 2005. *Apud* TRINDADE, S. C. **Simulação computacional como ferramenta de auxílio ao projeto: Aplicação em edifícios naturalmente ventilados no clima de Natal/RN**. 136 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Natal, 2006.

SOUZA, A.P. de; CARVALHO, D.F. de; SILVA, L.B.D. da; ALMEIDA, F.T. de; ROCHA, H.S. Estimativas da evapotranspiração de referência em diferentes condições de nebulosidade. In: **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.219-228, 2011.

STONE, R. J.; Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. In: **Solar Energy**, v. 51, n. 4, p. 289-291, 1993.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Trad. E. R. Santarem et al. 3 ed. Porto Alegre: Artemed, 2004. 719p. *apud* FAGAN, E. B. et al.; Lei de Beer e sua relação com ecofisiologia de plantas, In: **Revista do Centro Universitário de Patos de Minas**, Patos de Minas, UNIPAM, n. 4, p. 78-97, nov. 2013.

TETENS, O. **Über cinige meterorogische Begrigge**. Z. Geophys., n. 6, p; 297-309, 1930.

TRINDADE, S. C. **Simulação computacional como ferramenta de auxílio ao projeto: Aplicação em edifícios naturalmente ventilados no clima de Natal/RN**. 136 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Natal, 2006.

UFV - UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA, Departamento de Engenharia Agrícola, **Caderno 41**. Disponível em: < <http://www.ebah.com.br> > Acesso em: 01/03/2016

VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R. **Meteorologia Básica e Aplicações**. UFV, 1991. 449 p.

VINET J., RAYMOND F., INARD C. A simulation tool to assess the impact of vegetation on the urban microclimate. In : International building Physics conference : tools for design and engineering of buildings proceedings, 2000, Montpellier. **Anais...** Editora: IBPC 2000, Montpellier, França, 2000.

WILLMOTT, C. J.; On the validation of models. In: **Physical Geography**, v. 2, p.184 - 194, Boston, 1981.

ZAVATINI, J. A.; A Climatologia Geográfica Brasileira, o Enfoque e a Noção de Ritmo Climático. In: **Revista Geografia**, v. 23, n. 3, p. 5-24, Rio Claro, 1999.