

THAYANE LODETE BILÉSIMO

**ANÁLISE DO IMPACTO DE ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS
NO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE UMA PLANTA PILOTO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade da Universidade Federal de Santa Catarina, para obtenção do Grau de Mestre em Energia e Sustentabilidade.
Orientador: Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli

Araranguá
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Bilésimo, Thayane Lodete
Análise do impacto de estratégias bioclimáticas
no desempenho energético de uma planta piloto /
Thayane Lodete Bilésimo ; orientador, Giuliano
Arns Rampinelli, 2019.
186 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Campus Araranguá, Programa de Pós
Graduação em Energia e Sustentabilidade, Araranguá,
2019.

Inclui referências.

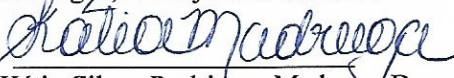
1. Energia e Sustentabilidade. 2. Arquitetura
bioclimática. 3. Desempenho energético. 4. Conforto
térmico e visual. 5. Medição e simulação. I.
Rampinelli, Giuliano Arns. II. Universidade Federal
de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Energia e Sustentabilidade. III. Título.

Thayane Lodete Bilésimo


**ANÁLISE DO IMPACTO DE ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS
NO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE UMA PLANTA PILOTO**


Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Energia e Sustentabilidade, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade.

Araranguá, 22 de janeiro de 2019.


Prof.^a Kátia Cilene Rodrigues Madruga, Dra.
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:


Prof. Giuliano Arns Rampinelli, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof. César Cataldo Scharlau, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof. Roderval Marcelino, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que, na sua infinita bondade, providenciou todas as coisas de que necessitei para a conclusão desta etapa. Dele, por Ele e para Ele são todas as coisas.

Aos meus pais, pelo exemplo de força, determinação, persistência, sabedoria e, sobretudo, perseverança na fé.

As minhas irmãs, por toda a ajuda e paciência, especialmente nos meses de conclusão deste trabalho.

A minha avó, pela preocupação e zelo que demonstra não só por mim, mas pela família toda.

Ao Luiz, pela paciência e apoio incondicional, por compartilhar comigo a alegria das conquistas e me dar suporte nos momentos difíceis.

Aos meus irmãos de comunidade do Caminho Neocatecumenal, por sua perseverança e seus testemunhos, que me recordam sempre o amor, a bondade, misericórdia e providência de Deus. Obrigada por me ensinarem a nunca deixar de lado o essencial e a amar verdadeiramente, sem impor condições.

As minhas amigas, em especial Andrielle, Leticia, Sthéfanie e Thamires, por dividirem comigo alegrias e tristezas, aceites e rejeições e por me ajudarem sempre, mesmo de longe.

Ao pessoal do NTEEL e LPA, por suportarem as minhas interrupções nos horários de medições.

Ao Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli, pela motivação e incentivo na busca do conhecimento.

Ao Prof. Dr. César Cataldo Scharlau e ao Prof. Dr. Roderval Marcelino, pela disposição em participar da banca examinadora, colaborando com o presente trabalho.

Aos funcionários da UFSC, pela disponibilidade e gentileza, inclusive nos fins de semana.

Ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade e à Coordenação de Apoio à Pesquisa e Ensino Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

A todas as pessoas que colaboraram, direta ou indiretamente, na elaboração deste trabalho.

“Confia em Deus com todo o teu coração, não te fies em tua própria inteligência; em todos os teus caminhos, reconhece-o, e ele endireitará as tuas veredas.”

Pr 3:5s

RESUMO

A otimização do consumo energético no setor de edificações é de fundamental importância, uma vez que este setor é um dos maiores consumidores finais de energia, não só em âmbito nacional, mas também no contexto mundial. A arquitetura bioclimática consiste em uma opção para melhorar o desempenho termoenergético das edificações, proporcionando conforto térmico aos usuários e redução do consumo de energia. O Brasil, de acordo com a NBR 15220, pode ser dividido em oito zonas bioclimáticas. O presente trabalho tem por objetivo avaliar o impacto de estratégias passivas e bioclimáticas no desempenho energético de uma planta piloto situada na zona bioclimática 2. A metodologia de avaliação do desempenho energético da edificação bioclimática foi desenvolvida a partir de medições termohigrométricas e de iluminância e simulações termoenergéticas e luminotécnicas. Os resultados demonstram a eficácia das estratégias bioclimáticas, que garantem à edificação estabilidade térmica e higrométrica, além de condições adequadas de conforto térmico na maior parte do tempo. O aproveitamento da iluminação natural pelas aberturas e pelo uso do tubo solar também apresenta resultados promissores no que diz respeito a redução do consumo de energia elétrica. A iluminação natural, em muitos momentos, é suficiente para prover o mínimo de iluminância exigido pela NBR ISO/CIE 8995. Mesmo quando é necessário fazer uso do sistema de iluminação artificial, este pode ser usado de forma parcial. Consequentemente, este conjunto de estratégias permite uma redução de aproximadamente 25% do consumo de energia elétrica frente a uma edificação comum.

Palavras-chave: Arquitetura bioclimática. Desempenho energético. Conforto térmico e visual. Medição e simulação.

ABSTRACT

The optimization of energy consumption in the building sector is very important since it is a large final energy consumer, not only in national level but also worldwide. Bioclimatic architecture is an option to improve thermoenergetic performance in buildings, improving thermal comfort of users and reducing energy consumption. Brazil, according to NBR 15220, can be divided in eight bioclimatic zones. This work aims to evaluate the impact of passive and bioclimatic strategies in the energetic performance of a pilot plant on bioclimatic zone 2. The methodology of evaluation of energetic performance of the bioclimatic building was developed from hygrothermal and illuminance measurements and thermoenergetic and lighting simulations. The results show the efficacy of bioclimatic strategies, which ensure to the building thermal and hygrometric stability besides thermal comfort conditions most time. The exploitation of natural lighting by apertures and the solar tube also presents promising results in terms of reducing electric energy consumption. Sometimes, natural lighting is enough to provide the minimum of illuminance required by NBR ISO/CIE 8995. Even when it is necessary to use the artificial lighting system, it can be used partially. Consequently, this set of strategies allow reducing about 25% of electric energy consumption comparing to a common building.

Keywords: Bioclimatic architecture. Energetic Performance. Thermal and visual comfort. Measurement and simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Zoneamento bioclimático brasileiro.....	34
Figura 2 – Relação entre PMV e PPD.	38
Figura 3 – Distribuição geral de dias com vários valores de K_T em função do K_T médio.....	40
Figura 4 – Composição da envoltória da Planta Piloto Bioclimática.	42
Figura 5 – Localização das coberturas na Planta Piloto Bioclimática. ...	42
Figura 6 – Vista aérea dos telhados vegetado e com isolamento termoacústico.	43
Figura 7 – Localização das áreas, aberturas e tubo solar na edificação.	44
Figura 8 – Posição do tubo solar na Área Técnica 2.	45
Figura 9 – Pontos de medição nas Áreas Técnicas 1 (a) e 2 (b).	49
Figura 10 – Variação da temperatura ambiente interna e externa.	56
Figura 11 – Variação da umidade relativa interna e externa.	58
Figura 12 – Variação da velocidade de vento.	59
Figura 13 – PPD, verão.	61
Figura 14 – PPD, outono.	62
Figura 15 – PPD, inverno.	63
Figura 16 – PPD, primavera.	64
Figura 17 – Comportamento da radiação solar no dia de K_T 0,68.....	69
Figura 18 – Comportamento da radiação solar no dia de K_T 0,17.....	69
Figura 19 – Comportamento da radiação solar no dia de K_T 0,62.....	70
Figura 20 – Comportamento da radiação solar no dia de K_T 0,25.....	70
Figura 21 – Comportamento da radiação solar no dia de K_T 0,69.....	71
Figura 22 – Comportamento da radiação solar no dia de K_T 0,24.....	71
Figura 23 – Comportamento da radiação solar nos dias de K_T 0,09.	72
Figura 24 – Comportamento da radiação solar nos dias de K_T 0,33.	72
Figura 25 – Distribuição da iluminância, em lx, na AT 1 em um dia de K_T 0,68.....	74
Figura 26 – Distribuição da iluminância, em lx, na AT 1 em um dia de K_T 0,62.....	75
Figura 27 – Distribuição da iluminância, em lx, na AT 1 em um dia de K_T 0,17.....	76
Figura 28 – Distribuição da iluminância, em lx, na AT 1 em um dia de K_T 0,25.....	77
Figura 29 – Distribuição da iluminância, em lx, na AT 2 em um dia de K_T 0,69.....	79
Figura 30 – Distribuição da iluminância, em lx, na AT 2 em um dia de K_T 0,62.....	80

Figura 31 – Distribuição da iluminância, em lx, na AT 2 em um dia de K_T 0,24.	82
Figura 32 – Distribuição da iluminância, em lx, na AT 2 em um dia de K_T 0,09.	83
Figura 33 – Iluminância, em lx, fornecida pelo tubo solar em um dia de K_T 0,69.	85
Figura 34 – Iluminância, em lx, fornecida pelo tubo solar em um dia de K_T 0,62.	86
Figura 35 – Iluminância, em lx, fornecida pelo tubo solar em um dia de K_T 0,33.	87
Figura 36 – Iluminância, em lx, fornecida pelo tubo solar em um dia de K_T 0,09.	88
Figura 37 – Ilustração dos ângulos γ_s e α	89
Figura 38 – Variação da iluminância no Ponto 2 da AT 1.	90
Figura 39 – Variação da iluminância no Ponto 3 da AT 1.	90
Figura 40 – Variação da iluminância no Ponto 5 da AT 1.	91
Figura 41 – Variação da iluminância no Ponto 6 da AT 1.	91
Figura 42 – Variação da iluminância no Ponto 7 da AT 1.	91
Figura 43 – Variação da iluminância no Ponto 8 da AT 1.	92
Figura 44 – Variação da iluminância no Ponto 9 da AT 1.	92
Figura 45 – Variação da iluminância no Ponto 10 da AT 1.	93
Figura 46 – Variação da iluminância no Ponto 11 da AT 1.	93
Figura 47 – Variação da iluminância no Ponto 12 da AT 1.	94
Figura 48 – Variação da iluminância no Ponto 14 da AT 1.	94
Figura 49 – Variação da iluminância no Ponto 15 da AT 1.	95
Figura 50 – Variação da iluminância no Ponto 1 da AT 2.	95
Figura 51 – Variação da iluminância no Ponto 2 da AT 2.	96
Figura 52 – Variação da iluminância no Ponto 3 da AT 2.	96
Figura 53 – Variação da iluminância no Ponto 4 da AT 2.	97
Figura 54 – Variação da iluminância no Ponto 5 da AT 2.	97
Figura 55 – Variação da iluminância no Ponto 6 da AT 2.	98
Figura 56 – Variação da iluminância no Ponto 7 da AT 2.	98
Figura 57 – Variação da iluminância no Ponto 8 da AT 2.	99
Figura 58 – Variação da iluminância no Ponto 9 da AT 2.	99
Figura 59 – Resultado da modelagem das AT 1 (a) e 2 (b) no DIALux.	101
Figura 60 – Vista superior das AT 1 (a) e 2 (b) simuladas no DIALux.	103
Figura 61 – Distribuição da iluminância complementar, em lx, necessária às 8h de um dia nublado de verão na AT 1.	104

Figura 62 – Distribuição da iluminância complementar, em lx, necessária às 8h de um dia nublado de inverno na AT 1.	105
Figura 63 – Distribuição de iluminância complementar, em lx, necessária às 12h de um dia nublado de verão na AT 1.	105
Figura 64 – Distribuição da iluminância complementar, em lx, necessária às 18h de um dia nublado de verão na AT 1.	106
Figura 65 – Distribuição da iluminância complementar, em lx, necessária às 17h de um dia nublado de inverno na AT 1.	106
Figura 66 – Distribuição da iluminância complementar, em lx, necessária às 8h de um dia nublado de inverno e verão na AT 2.	107
Figura 67 – Distribuição de iluminância complementar, em lx, necessária às 12h de um dia nublado de verão na AT 2.	108
Figura 68 – Distribuição de iluminância complementar, em lx, necessária em um dia nublado, às 18h no verão e às 17h no inverno, na AT 2....	108
Figura 69 – Edificação modelada no eQUEST.	109
Figura 70 – Consumo de energia da edificação bioclimática e da edificação comum (hachurado).	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diretrizes para as vedações externas na zona bioclimática 2.	35
Tabela 2 – Características construtivas da envoltória da edificação.	41
Tabela 3 – Áreas internas da edificação.	43
Tabela 4 – Dimensões das aberturas.	44
Tabela 5 – Lâmpadas e equipamentos incluídos neste estudo.	45
Tabela 6 – Características dos sensores utilizados na avaliação termohigrométrica.	47
Tabela 7 – Características da luminária utilizada na simulação da AT 1.	51
Tabela 9 – Características da luminária utilizada na simulação da AT 2.	51
Tabela 9 – Densidade de potência para áreas internas.	52
Tabela 10 – PPD em função da TMR em condições extremas de temperatura e umidade relativa na primavera.	65
Tabela 11 – PPD em função da TMR em condições extremas de temperatura e umidade relativa no verão.	65
Tabela 12 – PPD em função da TMR em condições extremas de temperatura e umidade relativa no outono.	65
Tabela 13 – PPD em função da TMR em condições extremas de temperatura e umidade relativa no inverno.	66
Tabela 14 – Valores de TMR e velocidade de vento necessários para atingir o conforto térmico nos casos extremos.	66
Tabela 15 – K_T dos dias analisados para cada caso.	68
Tabela 16 – K_T médio mensal, calculado através dos dados da estação meteorológica da edificação.	100
Tabela 17 – Número de dias típicos presentes em um ano, em %.	100
Tabela 18 – Fração de uso do sistema de iluminação da AT 1, necessária para complementar a iluminação natural, em %.	102
Tabela 19 – Fração de uso do sistema de iluminação da AT 2, necessária para complementar a iluminação natural, em %.	102
Tabela 20 – Fração de uso do sistema de iluminação da AT 2, necessária para complementar a iluminação natural em ausência do tubo solar, em %.	103
Tabela 21 – Consumo de energia com o sistema de iluminação artificial, em kWh.	110

Tabela 22 – Consumo mensal de energia, em kWh, referente a climatização para as edificações com estratégias bioclimáticas (CEB) e sem as estratégias (SEB). 111

Tabela 23 – Picos de consumo com condicionamento de ar na AT 1, para as edificações com e sem estratégias bioclimáticas. 113

Tabela 24 – Picos de consumo com condicionamento de ar na AT 2, para as edificações com e sem estratégias bioclimáticas. 113

Tabela 25 – Diferença média diária mensal, em °C, entre T_{INT} e T_{EXT} 114

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem
ENCE – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*
U – Coeficiente global de transferência de calor ou transmitância térmica
 ϕ – Atraso térmico
FS_o – Fator solar
A – Área
PMV – Voto Médio Predito
PPD – Percentual Predito de Insatisfação
TMR – Temperatura Média Radiante
UR – Umidade Relativa
T_{AMB} – Temperatura ambiente
V – Velocidade de vento
K_T – Índice de transmissividade atmosférica
 \bar{K}_T – Índice de transmissividade atmosférica médio
EPS – Poliestireno expandido (do inglês *Expanded PolyStyrene*)
AT – Área técnica
CRI – Índice de reprodução de cor
CCT – Temperatura de cor correlata
DPI – Densidade de potência de iluminação
DPE – Densidade de potência de equipamentos
T_{EXT} – Temperatura externa
T_{INT} – Temperatura interna
UR_{EXT} – Umidade relativa externa
UR_{INT} – Umidade relativa interna
T_{MÁX} – Temperatura máxima
T_{MÍN} – Temperatura mínima
UR_{MÁX} – Umidade relativa máxima
UR_{MÍN} – Umidade relativa mínima
 γ_s – Azimute solar
 α – Altura solar
TRY – *Typical Referential Year*
E – Ensolarado
I – Intermediário
N – Nublado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	HIPÓTESES.....	26
1.2	OBJETIVOS	26
1.2.1	Objetivo geral	26
1.2.2	Objetivos específicos	27
1.3	JUSTIFICATIVA.....	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1	CONSUMO DE ENERGIA EM EDIFICAÇÕES	31
2.2	ESTRATÉGIAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES.....	33
2.2.1	Estratégias bioclimáticas para a zona bioclimática 2	35
2.3	APROVEITAMENTO DA ILUMINAÇÃO NATURAL	36
2.4	CONFORTO TÉRMICO	37
2.5	ÍNDICE DE TRANSMISSIVIDADE ATMOSFÉRICA	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	PLANTA PILOTO BIOCLIMÁTICA	41
3.2	AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS	45
3.2.1	Análise termohigrométrica	46
3.2.2	Determinação dos índices de conforto térmico	46
3.2.3	Análise da iluminação natural	48
3.2.3.1	Seleção dos dias representativos	49
3.2.3.2	Dispositivos de medição	50
3.3	SIMULAÇÕES	50
3.3.1	Simulação luminotécnica no DIALux	50
3.3.2	Simulação termoenergética no eQUEST	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1	MEDIÇÕES DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS	55
4.1.1	Análise termohigrométrica	55
4.1.2	Índices de conforto térmico	60
4.1.3	Análise da iluminação natural	67
4.1.3.1	Características dos dias representativos	68
4.1.3.2	Área técnica 1.....	73
4.1.3.3	Área técnica 2.....	78
4.1.3.4	Tube solar	84
4.1.3.5	Distribuição temporal da iluminância	89
4.1.3.5.1	<i>Área Técnica 1</i>	90
4.1.3.5.2	<i>Área Técnica 2</i>	95

4.1.4	Índice de transmissividade atmosférica e dias representativos	99
4.2	SIMULAÇÕES	101
4.2.1	Simulação luminotécnica	101
4.2.2	Simulação termoenergética	109
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	117
5.1	PUBLICAÇÕES	119
5.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	118
	REFERÊNCIAS	121
	APÊNDICE A – PMV em função da TMR, temperatura ambiente e umidade relativa, para as quatro estações do ano	129
	APÊNDICE B – Comportamento da radiação solar nos dias intermediários selecionados para análise	133
	APÊNDICE C – Medições de iluminância em horários complementares e dias intermediários	135
	APÊNDICE D – Distribuição temporal da iluminância em dias nublados	147
	APÊNDICE E – Distribuição espacial da iluminância complementar necessária para atingir os 500 lx	159

1 INTRODUÇÃO

O atual modelo energético global é insustentável em termos sociais, econômicos e ambientais. Devido aos impactos envolvidos na produção e consumo de energia, é necessário que haja o gerenciamento da demanda e dos recursos, visando atingir a eficiência energética (MENA et al., 2014).

O setor de edificações é um grande consumidor de energia em âmbito mundial, devido ao crescente número de edificações. Assim, a otimização do consumo de energia também se faz necessária neste setor (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

A eficiência energética na arquitetura é definida como o potencial em proporcionar conforto térmico, visual e acústico aos usuários com baixo consumo de energia (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

O uso de técnicas de arquitetura bioclimática se apresenta como uma forma inteligente de construir edificações mais eficientes energeticamente. Tais técnicas contribuem para atingir o conforto térmico no interior da edificação por meio da interação energética entre esta e as condições climáticas do meio em que se encontra (MANZANO-AGUGLIARO et al., 2015; MISSOUM et al., 2016).

Edificações bioclimáticas possuem maior estabilidade térmica e higrométrica em seu interior. Devido a utilização adequada dos elementos construtivos e orientação de acordo com o local da edificação, é possível alcançar o equilíbrio entre consumo energético e conforto térmico (MISSOUM et al., 2016; SOUTULLO et al., 2016).

Manzano-Agugliaro et al. (2015) afirma que as técnicas de arquitetura bioclimática podem ser aplicadas a qualquer edificação, em qualquer lugar do mundo, uma vez que para cada zona bioclimática existem alternativas específicas.

No Brasil, existem oito zonas bioclimáticas e para cada uma delas, há um conjunto de estratégias sugeridas pela NBR 15220 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

Barbosa, Ip (2016) destacam que é necessário observar as condições climáticas do local em que a edificação se insere a fim de otimizar seu desempenho.

O aproveitamento da iluminação natural é uma estratégia passiva que, se utilizada de forma correta, permite reduzir o consumo de energia e melhorar o conforto visual no interior da edificação (ZHU; LI; LI, 2017).

A utilização da iluminação artificial contribui para o aumento da carga térmica em edificações, aumentando a necessidade do uso de sistemas artificiais de climatização. No entanto, o aproveitamento incorreto da iluminação natural pode causar o mesmo impacto (GAGO et al., 2015). Neste sentido, é imprescindível avaliar estratégias de controle que otimizem este aproveitamento, tendo como fator determinante o conforto visual (XU et al., 2017).

A avaliação do desempenho de uma edificação pode ser feita tanto na fase de projeto quanto após a edificação ter sido construída. Quando a edificação já está construída, a avaliação pode ser feita por meio de medições das variáveis representativas, como temperatura, umidade, etc. A avaliação na fase de projeto pode ser feita por verificação do cumprimento das diretrizes construtivas ou por simulação computacional (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

Observando a importância do uso eficiente de energia e a contribuição da arquitetura bioclimática na redução do consumo de energia de uma edificação, a presente dissertação tem como finalidade analisar os impactos causados pela aplicação de estratégias bioclimáticas em uma edificação na zona bioclimática 2 a partir do desenvolvimento de uma metodologia combinada entre medições experimentais e simulações computacionais.

1.1 HIPÓTESES

1. As estratégias bioclimáticas promovem a eficiência energética de edificações e o conforto ambiental (térmico e visual) dos ocupantes.

2. É possível desenvolver uma metodologia de análise de desempenho energético e generalizá-la para realizar a avaliação de outras edificações, inclusive em outras zonas bioclimáticas.

1.2 OBJETIVOS

Esta seção contém os objetivos geral e específicos desta pesquisa.

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho energético de uma planta piloto situada na zona bioclimática 2 a partir de uma abordagem integrada entre medições experimentais e simulações computacionais.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo principal desta pesquisa, foram elencados os seguintes objetivos específicos:

- Medir e analisar o comportamento termohigrométrico da edificação;
- Determinar e avaliar os indicadores de conforto térmico no interior da edificação em estudo;
- Mensurar e analisar o impacto da iluminação natural no conforto visual no interior da edificação, especialmente na área em que se encontra um tubo solar;
- Medir, simular e analisar o gradiente da iluminância da planta piloto bioclimática sob diferentes condições de iluminação natural e artificial;
- Simular e analisar o desempenho termoenergético da planta piloto bioclimática por meio de software e, posteriormente, comparar seu desempenho com o de uma edificação comum.

1.3 JUSTIFICATIVA

Muitos países desenvolveram, nos últimos anos, regulamentos de desempenho termoenergético (SORGATO, 2015). Na União Europeia, existe uma meta de que até 2020 todas as novas edificações utilizem conceitos de arquitetura bioclimática, visando melhorar o desempenho termoenergético e atingir o *status* de edificação autônoma com a instalação de sistemas de geração distribuída (PACHECO; LAMBERTS, 2013).

No Brasil, por outro lado, a adoção de medidas de eficiência energética é facultativa para a maioria das edificações. Até o momento, a etiquetagem de eficiência energética é obrigatória apenas para novos prédios públicos federais, e é feita pelo PBE (Programa Brasileiro de Etiquetagem) Edifica (LOPES et al., 2016).

Observa-se, assim, que a maioria das edificações brasileiras apresenta desempenho termoenergético insatisfatório (TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2015). Diante disso, alguns autores avaliam e/ou propõem alternativas de efficientização para edificações, visando promover o conforto térmico e reduzir o consumo de energia nas mesmas.

Sorgato, Melo e Lamberts (2016) avaliam diversos cenários de ventilação para uma edificação situada em Florianópolis/SC, pertencente a zona bioclimática 3.

Silva, Almeida e Ghisi (2016) simulam, no software EnergyPlus, variações nas características de uma residência em quatro capitais brasileiras: Florianópolis/SC, Curitiba/PR, Belém/PA e Campo Grande/MS (zonas bioclimáticas 3, 1, 8 e 6, respectivamente).

Invidiata, Ghisi (2016) mensuram os efeitos das variações climáticas futuras em residências populares do programa Minha Casa, Minha Vida. A análise é feita para as cidades de Florianópolis/SC, Curitiba/PR e Belém/PA.

Triana, Lamberts e Sassi (2015) também avaliam residências do programa Minha Casa, Minha Vida. O estudo também é voltado para as zonas 3 e 8, utilizando arquivos climáticos das cidades de Florianópolis/SC e Salvador/BA.

Alves, Schmid (2015) analisam o potencial de aquecimento e resfriamento do solo conforme sua superfície, estratégia que pode ajudar a reduzir o consumo de energia das edificações no entorno. Para este estudo, foi selecionada uma cidade por zona bioclimática.

Barbosa, Ip (2016) tem como objeto de estudo simulações de edificações executivas, verificando a influência da ventilação natural e fachada ventilada nas diferentes regiões brasileiras. Este trabalho contempla oito cidades, uma para cada zona bioclimática do país.

Hirashima, Assis e Nikolopoulou (2016) mensuram o conforto térmico em espaços urbanos na cidade de Belo Horizonte/MG, situada na zona bioclimática 3.

Oliveira et al. (2015) analisam o desempenho térmico de paredes de concreto, de acordo com os padrões normativos brasileiros, nas oito zonas bioclimáticas.

Moreno, Morais e Souza (2017) também utilizam os regulamentos brasileiros para realizar análises de desempenho térmico. Neste trabalho, o objeto de estudo são residências do programa Minha Casa, Minha Vida, simuladas computacionalmente nas cidades de Curitiba/PR, Santa Maria/RS, Florianópolis/SC, Brasília/DF, Santos/SP, Campo Grande/MS, Cuiabá/MT e Salvador/BA (zonas 1 a 8, respectivamente).

Freitas, Cunha (2018) avaliam a importância de mensurar pontes térmicas nas simulações computacionais para análises termoenergéticas. Esta avaliação é feita para a zona bioclimática 2, uma vez que esta é a que apresenta as condições mais extremas de frio e calor.

Diante do exposto, observa-se que a maioria dos trabalhos avaliam as zonas bioclimáticas 3 e 8, por vezes incluindo as zonas 1 e 6. Mesmo os trabalhos que avaliam todas as zonas, ou especificamente a zona bioclimática 2, não contemplam todas as análises realizadas neste trabalho.

Observa-se que os trabalhos não apresentam metodologia integrada de medições e simulações, como se propõe neste trabalho. Além disso, as análises estão centradas em avaliações térmicas, higrométricas e/ou energéticas. O aproveitamento da iluminação natural não é avaliado nos estudos que envolvem análises bioclimáticas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão abordados os temas relevantes acerca do presente trabalho.

2.1 CONSUMO DE ENERGIA EM EDIFICAÇÕES

O processo de urbanização em todo o mundo tem provocado um aumento significativo na quantidade de edificações, especialmente nos centros urbanos. Estima-se que, até 2050, cerca de 70% da população mundial estará localizada em centros urbanos e que o tempo de permanência destas pessoas dentro de edificações deverá aumentar, influenciando diretamente no consumo de energia deste setor (RUPP; VÁSQUEZ; LAMBERTS, 2015).

Segundo Cabeza et al. (2014), o aumento do consumo de energia em âmbito mundial está ligado ao avanço da tecnologia, que busca a automatização de processos e intensifica o consumo de aparelhos eletroeletrônicos. Por outro lado, estima-se que cerca de 70% do uso final de energia nas edificações seja destinado ao consumo com sistemas de condicionamento de ar e iluminação artificial (RUPP; VÁSQUEZ; LAMBERTS, 2015).

Os Estados Unidos são os maiores consumidores de energia do mundo, seguidos pela União Europeia. O Brasil ocupa a oitava posição neste *ranking* e a maior parte de seu consumo energético é na forma de eletricidade (BERARDI, 2017).

De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2018, as edificações dos setores residencial, comercial e público consomem 50,8% da eletricidade total produzida no país. Destes setores, somente o público apresentou uma queda (0,1%) no consumo de energia elétrica em relação ao ano anterior. Os setores comercial e residencial apresentaram aumentos de 1,5% e 0,8%, respectivamente (EPE, 2018).

No Brasil, dentro do setor residencial, verifica-se que a maior parte do consumo de energia se dá pelo uso de geladeiras, chuveiros e lâmpadas. O consumo com aparelhos de ar condicionado representa cerca de 20%. Nos setores comercial e público, o consumo com condicionamento de ar representa aproximadamente 50% do total (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Devido a busca de melhores condições de conforto térmico e a falta de adequação das edificações ao clima local, a tendência observada é que

haja um aumento do consumo de energia com sistemas artificiais de condicionamento de ar (YANG; YAN; LAM, 2014).

Neste sentido, foram elaborados programas de eficiência energética em edificações, visando otimizar o consumo de energia do setor (SORGATO, 2015). De acordo com Fossati et al. (2016), Brasil, Argentina e Arábia Saudita estão entre os países onde a adoção destes regulamentos de eficiência energética é voluntária. Em países como França, Alemanha, Espanha, Canadá, Índia, México, entre outros, é obrigatório que as edificações residenciais cumpram certos requisitos de eficiência energética, que variam de acordo com o país.

Nos países europeus, as novas políticas que introduziram medidas técnicas e regulamentos a serem executados fizeram das edificações de baixo consumo energético um objetivo a ser atingido. Estas constituem uma grande oportunidade de aumentar a economia de energia na Europa (D'AGOSTINO; MAZZARELLA, 2019).

No Brasil, o PBE Edifica realiza a etiquetagem de eficiência energética das edificações. Este programa é responsável por conceder às edificações uma etiqueta, definida como (PBE Edifica, 2017):

“(...) Selo de Conformidade que evidencia o atendimento a requisitos de desempenho (e, em alguns casos, adicionalmente, também de segurança) estabelecidos em normas e regulamentos técnicos. Dependendo do critério de desempenho avaliado, ela recebe nomes diferentes. Quando a principal informação é a eficiência energética do produto ou da edificação, por exemplo, ela se chama Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE).”

Com relação às edificações, a ENCE classifica de acordo com o nível de eficiência energética, geralmente de “A” (mais eficiente) a “E” (menos eficiente). Esta etiqueta pode ser aplicada a edificações públicas, comerciais, de serviços e residenciais, mas é obrigatória apenas para os novos prédios públicos federais (PBE Edifica, 2017).

A existência de programas e regulamentos de eficiência energética é fundamental para a otimização do consumo de energia no setor de edificações (ORTIZ; KURVERS; BLUYSSSEN, 2017). Por outro lado, o comportamento do usuário é um fator determinante na eficácia das medidas de redução do consumo energético (MARÉCHAL, 2010; RAFSANJANI; AHN; CHEN, 2018).

Alguns benefícios são concedidos a usuários que utilizam medidas de eficiência, ajudando a incentivar e divulgar tais práticas. O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) abriu uma linha de crédito para apoiar projetos que visem o aumento da eficiência do setor de serviços e comércio. Além disso, abriu um programa que financia a construção e reforma de hotéis que obtenham a certificação nível “A” (PBE Edifica, 2019).

Aliado a estes fatores, a evolução da tecnologia tem proporcionado equipamentos que consomem menos energia elétrica, bem como materiais que possibilitam a obtenção de edificações com ambientes internos mais estáveis e confortáveis (ORTIZ; KURVERS; BLUYSSSEN, 2017).

2.2 ESTRATÉGIAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

De acordo com o conceito de eficiência energética em edificações proposto por Lamberts, Dutra e Pereira (2014), uma edificação eficiente é aquela que proporciona a seus usuários condições ambientais adequadas com baixo consumo de energia.

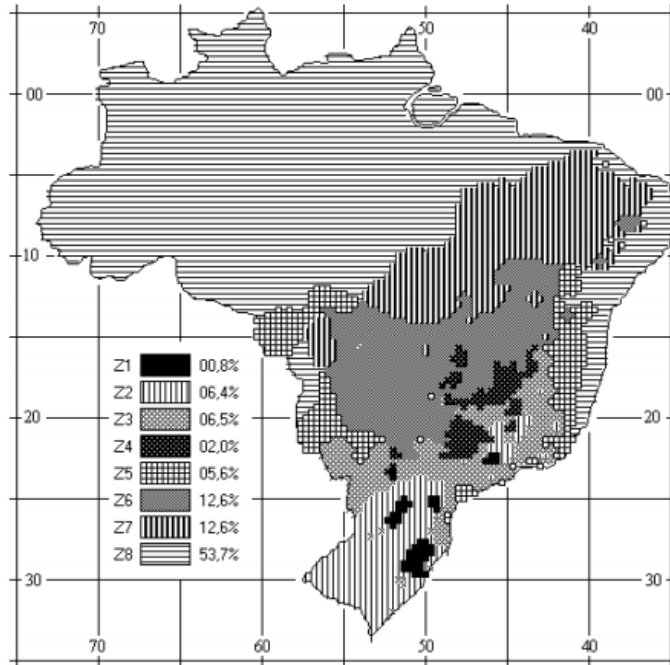
Dentre os diferentes elementos que compõe uma edificação, a envoltória é uma das mais importantes no que diz respeito aos estudos de consumo energético. Ela é a barreira física entre ambientes internos e externos, condicionados e não condicionados, além de atuar como resistência ao ar, chuva, calor, frio, luz e radiação solar (ASLANI; BAKHTIAR; AKBARZADEH, 2019).

As características da envoltória de uma edificação são um fator determinante no seu desempenho térmico e energético (ASLANI; BAKHTIAR; AKBARZADEH, 2019). Neste sentido, a utilização de estratégias passivas pode auxiliar na redução do consumo energético das edificações, além de promover melhoria no conforto térmico dos usuários (SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2016).

Existe uma série de estratégias que podem ser adotadas de acordo com cada local, interferindo diretamente no desempenho das edificações (BARBOSA; IP, 2016; MANZANO-AGUGLIARO et al., 2015). Devido a sua grande extensão territorial, o Brasil possui regiões com diferentes características climáticas. Assim, os projetos de edificações deveriam estar de acordo com as necessidades de cada zona bioclimática (TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2015).

A NBR 15220, publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2003), define zona bioclimática como uma região homogênea quanto aos elementos climáticos que interferem nas relações entre o conforto térmico e o ambiente construído. Nela, são estipuladas as oito zonas bioclimáticas brasileiras e as estratégias que podem ser aplicadas em cada uma delas, visando otimizar o desempenho da edificação. O zoneamento bioclimático brasileiro pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1 – Zoneamento bioclimático brasileiro.



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003).

Com a maior disponibilidade de dados climáticos horários, a base de dados utilizada para realizar este primeiro zoneamento bioclimático deve ser ampliada. Assim, destaca-se que o zoneamento bioclimático brasileiro está sob análise e pode sofrer alterações, devido a maior quantidade de dados disponíveis (FOSSATI et al., 2016).

As principais estratégias incluem: orientação da edificação, espessura das paredes, escolha de materiais e cores, dispositivos de

sombreamento, aspecto construtivo do telhado, aproveitamento da ventilação e iluminação natural, entre outros. Alguns autores ainda consideram o resfriamento evaporativo e sistemas de aquecimento solar como parte do projeto bioclimático, uma vez que o condicionamento passivo de ar não exige nenhum consumo de energia (BECCALI et al., 2017).

Em países de clima tropical, como o Brasil, o aproveitamento da ventilação natural contribui muito para a redução do uso de sistemas de climatização artificial (SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2016). Em alguns casos, por conta do clima onde a edificação se encontra, as estratégias passivas podem não ser suficientes para garantir o conforto térmico (CASTILLA et al., 2012; TALEB, 2015), entretanto, elas contribuem para a estabilidade térmica da edificação (BECCALI et al., 2017; DAMJANOVIC et al., 2014; SOUTULLO et al., 2016, 2017; THOMSEN et al., 2016).

Da mesma maneira, o aproveitamento da iluminação natural favorece a redução do consumo de energia com iluminação artificial, além de auxiliar no aquecimento passivo durante os meses mais frios (KWON; LIM, 2017; MICHAEL; HERACLEOUS, 2017; MISSOUM et al., 2016; OH et al., 2017). Em momentos em que a iluminação natural é insuficiente, uma combinação de iluminação natural e artificial pode ser obtida e otimizada por meio de sensores (DOULOS et al., 2017; SHISHEGAR; BOUBEKRI, 2017).

2.2.1 Estratégias bioclimáticas para a zona bioclimática 2

De acordo com a NBR 15220 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), as diretrizes que devem ser adotadas para as vedações externas na zona bioclimática 2 estão contidas a Tabela 1.

Tabela 1 - Diretrizes para as vedações externas na zona bioclimática 2.

Vedações externas		Transmitância térmica – U (W/m ² .°C)	Atraso térmico – φ (horas)	Fator solar – FS _o (%)
Paredes	Leve	U ≤ 3,00	φ ≤ 4,3	FS _o ≤ 5,0
Cobertura	Leve isolada	U ≤ 2,00	φ ≤ 3,3	FS _o ≤ 6,5

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003).

Para as aberturas, as orientações são:

- Aberturas para ventilação – médias (10% < A < 15%);

- Sombreamento das aberturas – permitir sol durante o inverno.

As estratégias de condicionamento passivo aplicáveis a esta zona bioclimática são:

- No verão – ventilação cruzada;
- No inverno – aquecimento solar da edificação e vedações internas pesadas (inércia térmica).

Ressalta-se que, de acordo com a norma, o condicionamento passivo é, para esta zona, insuficiente durante o período mais frio do ano.

2.3 APROVEITAMENTO DA ILUMINAÇÃO NATURAL

Segundo a NBR ISO/CIE 8995-1, uma iluminação adequada “propicia a visualização do ambiente, permitindo que as pessoas vejam, se movam com segurança e desempenhem tarefas visuais de maneira eficiente, precisa e segura, sem causar fadiga visual e desconforto” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

Carlucci et al. (2015) menciona que o conforto visual, de acordo com a norma europeia EN 12665, é uma condição subjetiva de bem estar visual induzida pelo ambiente. Essa condição depende da fisiologia do olho humano, da quantidade de luz e sua distribuição no espaço e no espectro de emissão da fonte luminosa.

A NBR ISO/CIE 8995 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) estabelece níveis de iluminância que devem ser respeitados, a fim de promover o conforto visual e garantir que as tarefas realizadas no interior de uma edificação sejam executadas de forma satisfatória.

A utilização da luz natural provoca melhorias na percepção e nos reflexos (MALET-DAMOUR et al., 2016), no entanto, é necessário que as condições sejam igualmente monitoradas para evitar desconfortos. Assim, a NBR 15215-4 estabelece os procedimentos para realizar a verificação experimental da condição de iluminação natural no interior das edificações (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004). Estas condições devem ser condizentes com o que é proposto pela NBR ISO/CIE 8995 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

2.4 CONFORTO TÉRMICO

Lamberts, Dutra e Pereira (2014) definem o conforto ambiental como “um conjunto de condições ambientais que permitem ao ser humano sentir bem estar térmico, visual, acústico e antropométrico, além de garantir a qualidade do ar e o conforto olfativo”. O conforto térmico, de acordo com a ASHRAE (2005), é um estado que reflete a satisfação de um indivíduo com o ambiente térmico que o envolve.

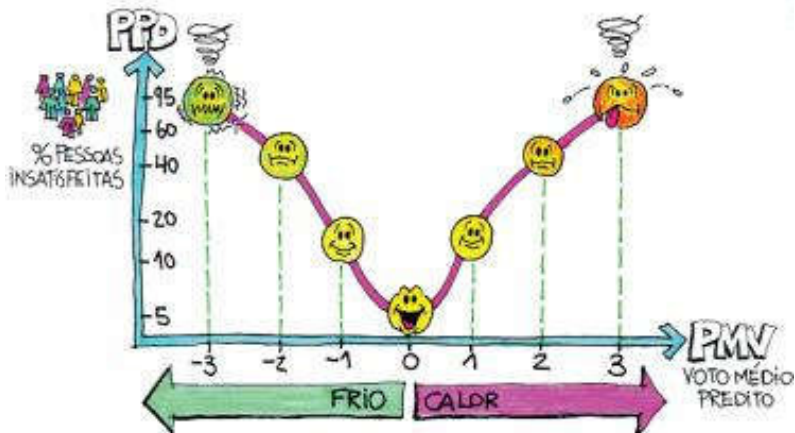
Quando o balanço entre o calor produzido pelo corpo e o calor perdido para o ambiente não é estável, é gerada uma sensação de desconforto por calor ou por frio. Esta sensação de desconforto, além de causar insatisfação com o ambiente térmico, pode prejudicar o rendimento das atividades manuais, perceptivas e intelectuais, e ainda gerar gastos de energia desnecessários para o condicionamento do ar (RUPP; VÁSQUEZ; LAMBERTS, 2015).

A neutralidade térmica, porém, não é o suficiente para que um indivíduo esteja em conforto térmico. Existem vários fatores que influenciam na sensação de conforto térmico, por isso, foram desenvolvidos alguns modelos para estimar a satisfação dos indivíduos com o ambiente térmico que os envolve. Em geral, o conforto térmico é classificado de acordo com o tipo de ambiente, isto é, exterior, semi-exterior e interior (RUPP; VÁSQUEZ; LAMBERTS, 2015).

Para tentar quantificar a sensibilidade humana ao frio e ao calor, Fanger (1970) desenvolveu um modelo baseado em um balanço de calor do corpo humano, em condições estacionárias. Este modelo prevê a sensação térmica média e o percentual de desconforto entre um grupo de pessoas por meio dos índices PMV (do inglês *Predicted Mean Vote*) e PPD (do inglês *Predicted Percentage Dissatisfied*), respectivamente. O PPD é uma função do PMV e a relação entre os dois índices é apresentada na Figura 2.

O cálculo do PMV envolve seis variáveis, sendo quatro ambientais e duas humanas. As ambientais são: temperatura do ar/ambiente ($T_{AMB} - ^\circ C$), temperatura média radiante ($TMR - ^\circ C$), umidade relativa ($UR - \%$) e velocidade do ar ($V - m/s$); e as humanas: atividade física ($met - W/m^2$) realizada pelos indivíduos, cujos valores podem ser encontrados na norma ISO 7730 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2005) e vestimenta ($clo - m^2 \cdot ^\circ C/W$), que representa a resistência térmica da roupa (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Figura 2 – Relação entre PMV e PPD.



Fonte: Lamberts, Dutra e Pereira (2014).

O PMV é negativo para o frio, zero para o conforto térmico e positivo para o calor. De acordo com a ISO 7730, um ambiente é considerado aceitável termicamente quando o PPD é menor que 10%, ou seja, quando o PMV está entre $-0,5$ e $0,5$. Observa-se que, de acordo com este método, mesmo que o PMV seja igual a zero, não há garantia de que todos os indivíduos estejam em conforto térmico.

Este método era aplicável apenas em análises de ambientes climatizados e recentemente passou a ser usado também para análises de conforto em edificações sem condicionamento de ar.

A norma ISO 7730 baseia-se neste método para a análise de conforto térmico (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2005), bem como a ASHRAE 55 (2005). Esta última foi alterada em 2004, quando foi incluído um modelo adaptativo como alternativa para a avaliação de conforto térmico em edificações naturalmente ventiladas.

O modelo adaptativo parte do princípio que os usuários não são meramente passivos diante de situações de desconforto, mas ativos. Isto é, se alguma mudança no ambiente causa algum tipo de desconforto, as pessoas tendem a reagir de maneira que possam retornar ao seu estado inicial de conforto. Neste método, regressões lineares relacionam as faixas aceitáveis de temperaturas de operação internas com as temperaturas externas, ou seja, a temperatura de conforto varia de acordo

com o clima no exterior da edificação (NICOL; HUMPHREYS; ROAF, 2012).

Apesar da existência dos modelos adaptativos e seus resultados promissores, o método de Fanger é largamente utilizado em diversos estudos voltados para a análise do conforto térmico em várias regiões do mundo, e demonstra alcançar bons resultados (CAO et al., 2016; ENESCU, 2017; HORIKIRI; YAO; YAO, 2015; OMRANI et al., 2017; RUPP; VÁSQUEZ; LAMBERTS, 2015).

2.5 ÍNDICE DE TRANSMISSIVIDADE ATMOSFÉRICA

O termo “radiação solar” consiste em um termo genérico, que pode ser referenciado em termos de fluxo de potência (irradiância solar) ou em termos de energia por unidade de área (irradiação solar). A radiação solar divide-se nas componentes direta e difusa. A intensidade destas componentes varia conforme as condições climáticas e do entorno.

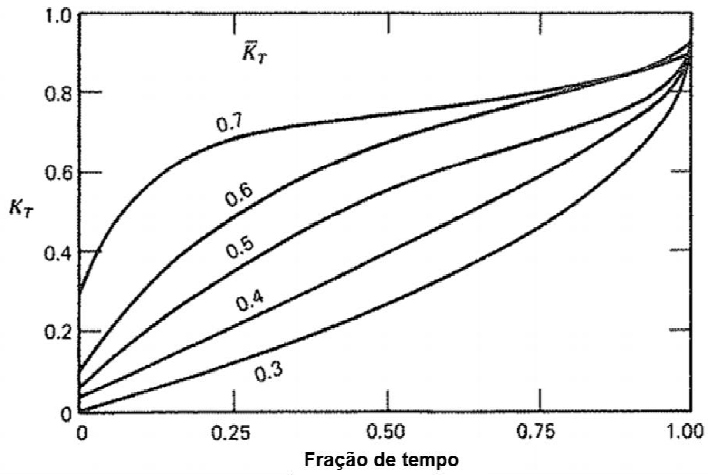
A irradiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre é denominada irradiação extraterrestre. Deste total, cerca de 46% é refletido ou absorvido pela atmosfera. O restante é absorvido (47%) e refletido (7%) pela superfície terrestre (PINHO; GALDINO, 2014).

O índice de transmissividade atmosférica (K_T) consiste na razão entre a irradiação solar medida na superfície terrestre e a irradiação solar extraterrestre (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

O K_T diário permite determinar se um dia é ensolarado, nublado ou parcialmente ensolarado (intermediário). Calculando o K_T médio diário mensal (\bar{K}_T) é possível estimar a frequência de ocorrência de dias típicos para o respectivo mês. Tal estimativa pode ser feita por meio da relação exposta na Figura 3.

Para encontrar a frequência com que ocorrem os dias de um certo K_T , busca-se o ponto de encontro entre a linha do K_T e a curva do \bar{K}_T . Por exemplo, para um determinado local de $\bar{K}_T = 0,5$, cerca de 18,5% dos dias apresentam K_T igual a 0,3.

Figura 3 – Distribuição geral de dias com vários valores de K_T em função do K_T médio.



Fonte: Adaptado de Duffie, Beckman (2013).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão descritos os materiais e métodos utilizados para alcançar os objetivos previamente descritos nesta dissertação. A primeira subseção descreve a edificação utilizada como objeto de estudo. As subseções seguintes abordam as medições das variáveis ambientais, índices de conforto térmico e simulações por meio de softwares.

3.1 PLANTA PILOTO BIOCLIMÁTICA

A edificação analisada neste trabalho é uma Planta Piloto Bioclimática, localizada no Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde (CTS) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Nesta edificação, foram aplicados conceitos de arquitetura bioclimática, visando atingir um alto grau (nível A) de eficiência energética.

A edificação possui a cor branca, interna e externamente, três tipos de parede e duas coberturas distintas. A Tabela 2 apresenta as características construtivas da envoltória da edificação, bem como seu coeficiente global de transferência de calor (U).

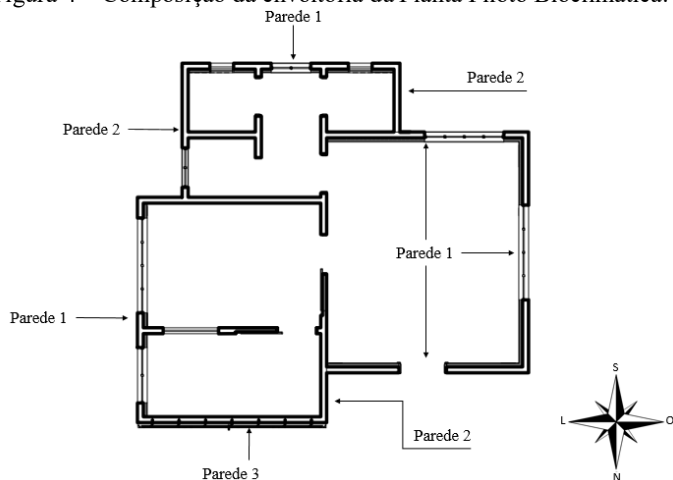
Tabela 2 – Características construtivas da envoltória da edificação.

Estrutura	Principal característica	Camadas (da externa para a interna)	U (W/m².°C)
Parede 1	Isolamento térmico	Reboco, tijolo, lâ de rocha e gesso cartonado	0,451
Parede 2	Parede comum	Reboco, tijolo e reboco	1,665
Parede 3	Fachada ventilada	Cerâmica, câmara de ar, reboco, tijolo e reboco	1,448
Cobertura 1	Telhado vegetado	Gramínea, terra, brita, concreto, EPS e reboco	0,281
Cobertura 2	Isolamento termoacústico	Telha metálica com poliuretano, câmara de ar não ventilada, laje pré-moldada de EPS e reboco	0,394

Fonte: Adaptado de Guerra (2016).

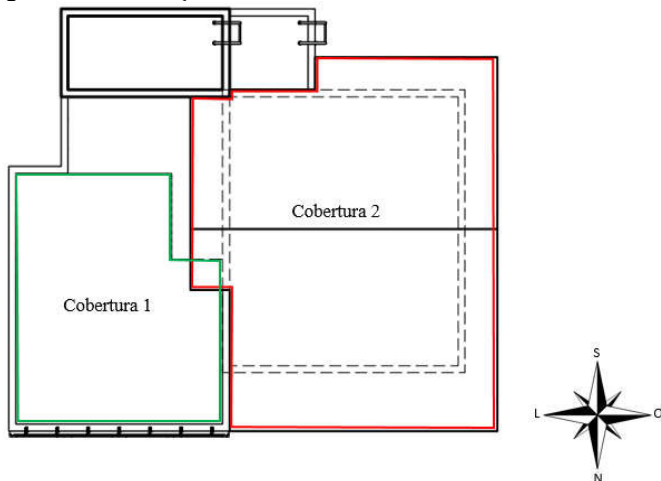
A Figura 4 ilustra a localização de cada tipo de parede na edificação, enquanto na Figura 5 é possível observar o posicionamento das coberturas na edificação.

Figura 4 – Composição da envoltória da Planta Piloto Bioclimática.



Fonte: do autor.

Figura 5 – Localização das coberturas na Planta Piloto Bioclimática.



Fonte: do autor.

A Figura 6 apresenta imagens reais, capturadas por um veículo aéreo não tripulado, dos dois tipos de cobertura encontrados na edificação. É possível observar que não existem, no entorno da edificação, construções próximas ou árvores de grande porte.

Figura 6 – Vista aérea dos telhados vegetado e com isolamento termoacústico.



Fonte: do autor.

Internamente, a edificação é dividida nas seis áreas listadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Áreas internas da edificação.

Área interna	Área (m²)
Área Técnica 1	27,10
Área Técnica 2	13,80
Área Técnica 3	9,20
Corredor	7,50
Sanitário 1	2,55
Sanitário 2	2,55

Fonte: Adaptado de Guerra (2016).

A Tabela 4 contém informações sobre as dimensões das aberturas da planta piloto. Tanto a porta quanto as janelas da edificação são de vidro, permitindo o máximo aproveitamento da iluminação natural. Além disso, seu posicionamento favorece a ventilação cruzada nos dias mais quentes. A localização das áreas e suas respectivas aberturas pode ser visualizada na Figura 7.

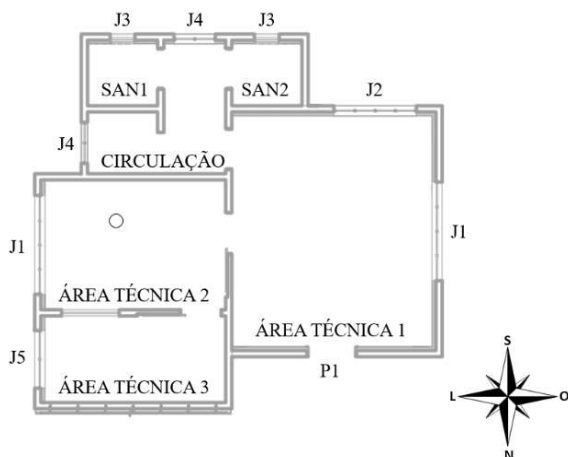
Tabela 4 – Dimensões das aberturas.

Abertura	Largura x Altura (m)	Altura da base (m)
P1	1,20 x 2,60	-
J1	2,40 x 1,40	1,20
J2	2,00 x 1,40	1,20
J3	0,60 x 0,60	1,50
J4	1,00 x 1,40	1,20
J5	1,40 x 1,40	1,20

Fonte: do autor.

Na Área Técnica (AT) 2, encontra-se um tubo solar, dispositivo que permite o aproveitamento da iluminação natural pela parte superior da edificação. Este elemento também pode ser visto na Figura 7.

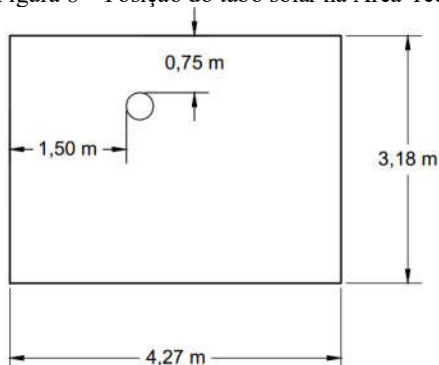
Figura 7 – Localização das áreas, aberturas e tubo solar na edificação.



Fonte: do autor.

O tubo solar possui 0,35 m de diâmetro e sua posição dentro da AT 2 pode ser vista na Figura 8. Sua localização favorece o aproveitamento da iluminação natural sobre uma bancada situada próxima à parede ao sul da sala.

Figura 8 – Posição do tubo solar na Área Técnica 2.



Fonte: do autor.

A Tabela 5 apresenta a quantidade de lâmpadas e equipamentos presentes em cada área interna da edificação. É importante ressaltar que neste trabalho foram considerados apenas os computadores dos ocupantes da edificação. Os equipamentos de monitoramento que permanecem ligados durante todo o dia não foram considerados, uma vez que seu funcionamento é independente das condições climáticas e estratégias bioclimáticas, conforme observado em Silva (2017).

Da mesma maneira, foram consideradas apenas as lâmpadas das áreas em que foi analisada a contribuição da iluminação natural. As lâmpadas do corredor, sanitários e AT 3, por serem pouco usadas quando comparadas às das duas outras áreas, foram desprezadas neste estudo.

Tabela 5 – Lâmpadas e equipamentos incluídos neste estudo.

Área	Lâmpadas		Equipamentos	
	Potência (W)	Quantidade	Potência (W)	Quantidade
AT 1	105,0	4	55,0	3
AT 2	57,0	4	55,0	7

Fonte: Adaptado de Espíndola (2016).

3.2 AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS

Esta seção apresenta a metodologia utilizada para a coleta e análise das variáveis ambientais, necessárias para a avaliação do desempenho da edificação em estudo.

3.2.1 Análise termohigrométrica

Na cobertura da edificação foi instalada uma Estação Meteorológica Automática de Superfície, que entrou em operação em outubro de 2016. Ela coleta dados de temperatura ambiente e umidade relativa interna (na AT 3) e externa, velocidade e direção do vento, radiação solar, entre outros. Na AT 1 foi posicionado um termohigrômetro, a fim de registrar dados de temperatura ambiente e umidade relativa internas. A Tabela 6 apresenta as principais características dos sensores utilizados nesta etapa.

As medições da estação meteorológica e do termohigrômetro foram realizadas a cada 5 e 15 minutos, respectivamente, e foram armazenadas em seus respectivos *dataloggers*. A seguir, os dados foram tratados estatisticamente e organizados graficamente, para melhor observação da dispersão dos dados. Por fim, os dados foram comparados, visando avaliar a diferença entre as temperaturas interna e externa, bem como diferenças de umidade relativa. Neste sentido, foi possível analisar a estabilidade térmica e higrométrica da edificação, frente à amplitude térmica e higrométrica do ambiente em seu entorno.

3.2.2 Determinação dos índices de conforto térmico

A partir das medições de temperatura e umidade relativa obtidas pelo termohigrômetro, foram determinados os índices de PMV e PPD. A ferramenta usada para obter os índices foi a *CBE Thermal Comfort Tool*, que consiste em uma ferramenta gratuita, e encontra-se disponível por meio de um site (CENTER FOR THE BUILT ENVIRONMENT, 2016). Além das informações já coletadas, foi necessário inserir outras variáveis ambientais, como temperatura média radiante e velocidade do vento. Dados relacionados à atividade física e a vestimenta também precisaram ser definidos.

Foram considerados três valores para a temperatura média radiante: 20°C, 25°C e 30°C. A velocidade do ar foi assumida como sendo nula no interior da edificação. No que diz respeito à atividade física, nessa edificação os ocupantes costumam ficar sentados, o que corresponde a 1 met (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2005).

Tabela 6 – Características dos sensores utilizados na avaliação termohigrométrica.

Equipamento	Modelo/Fabricante	Variável	Resolução	Variação	Precisão nominal (+/-)
Estação Meteorológica Automática	Vantage Pro2	Umidade interna e externa	1%	1 a 100%	3%
	Weather Station/	Temperatura interna	0,1°F	32° a 140°F	1°F
	Davis Instruments		0,1°C	0 a 60°C	0,5°C
Termohigrômetro	AK172/AKSO	Temperatura externa	0,1°F	-40° a 150°F	1°F
			0,1°C	-40° a 65°C	0,5°C
		Umidade	0,1 %	0 a 100%	3%
		Temperatura	0,1°C	-40° a 70°C	1°C

A vestimenta foi definida de acordo com a estação: no verão, foi considerado o uso de roupas típicas de verão para ambiente interno, correspondente a 0,5 clo; no inverno, o uso de roupas típicas da estação para ambiente interno equivale a 1 clo; nas temporadas de outono e primavera, foi considerado 0,75 clo, que é o valor intermediário entre as estações mais extremas.

Com as informações obtidas sobre PMV e PPD, foram construídos gráficos no MATLAB apresentando de forma visual os intervalos de temperatura e umidade relativa em que as pessoas que utilizam a edificação estariam em condições de conforto térmico.

Foram analisados ainda os casos mais extremos para as quatro estações, combinando os valores máximos e mínimos de temperatura e umidade relativa, a fim de verificar o comportamento dos índices nestas condições. Para estes casos, utilizando a *CBE Thermal Comfort Tool*, foram estimados os valores mínimos de TMR e velocidade de vento que seriam necessários para manter o nível de desconforto dentro dos limites, isto é, com um máximo de 10% de pessoas desconfortáveis.

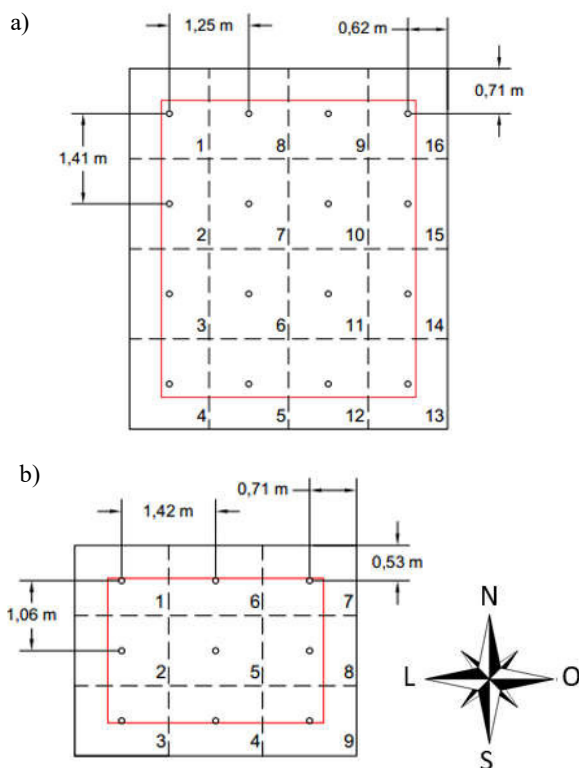
3.2.3 Análise da iluminação natural

A NBR15215-4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004) regulamenta o procedimento de medição da iluminação natural para verificação experimental das condições de iluminação de ambientes internos. A norma estabelece, entre outros parâmetros, os pontos em que os dados devem ser coletados, o intervalo entre as medições e os dias mais adequados para realizar a análise.

Desta forma, foram realizadas medições nas Áreas Técnicas 1 e 2 em intervalos de duas horas, entre as 8h e as 18h, nos pontos indicados na Figura 9. No inverno, devido ao fato de o sol se pôr antes das 18h, a última medição foi realizada as 17h.

As varreduras foram realizadas a uma altura de aproximadamente 0,8 m (altura do plano de trabalho), com as salas abertas, a fim de analisar a contribuição da iluminação natural total, isto é, proveniente de todas as aberturas da edificação. Para estimar a contribuição do tubo solar, foram fechadas as aberturas da AT 2, isto é, portas e cortinas. O procedimento de coleta de dados neste caso foi o mesmo citado para a AT 2.

Figura 9 – Pontos de medição nas Áreas Técnicas 1 (a) e 2 (b).



Fonte: do autor.

3.2.3.1 Seleção dos dias representativos

O procedimento foi repetido durante dias próximos ao solstício de verão (21 de dezembro) do ano de 2017, e posteriormente nos dias próximos ao solstício de inverno (21 de junho) do ano de 2018, a fim de obter um dia ensolarado (céu limpo), um dia intermediário e um dia nublado de cada estação, para cada área.

Para determinar os dias representativos foi utilizado o Índice de Transmissividade Atmosférica (K_T). A irradiância solar na superfície terrestre foi medida pela Estação Meteorológica da própria edificação.

3.2.3.2 Dispositivos de medição

A Estação Meteorológica citada na seção 3.2.1 foi responsável pela coleta de dados de irradiância. A faixa de medição desta variável vai de 0 a 1800 W/m², com precisão de $\pm 5\%$ da escala total ou fundo de escala. Os dados foram coletados a cada cinco minutos e armazenados em seu *datalogger*.

Para as medições de iluminância foi utilizado um luxímetro digital Minipa MLM-1020, com display LCD para 3 ½ dígitos, faixa de medição de 0 a 20000 Lux (lx) e precisão de 20 lx ($\pm 3\%$ Leit. + 20D). O *datalogger* do aparelho possui capacidade para até 2044 registros, e no modo automático é possível ajustar o intervalo de registro de 0,5 a 255 segundos.

Neste caso, o intervalo de medida entre os pontos foi de 15 segundos, completando a varredura da AT 1 em quatro minutos e da AT 2 em dois minutos e 15 segundos.

3.3 SIMULAÇÕES

Neste item serão descritos os softwares utilizados, bem como as premissas adotadas para cada simulação.

3.3.1 Simulação luminotécnica no DIALux

O DIALux é um software gratuito que permite projetar, calcular e visualizar, entre outras funções, a distribuição da iluminação natural e artificial em ambientes internos e externos. O programa tem um extenso banco de dados, por meio do qual são selecionadas as luminárias e lâmpadas (DIAL GMBH, 2017).

Comparado a softwares mais complexos como o DAYSIM, que realiza simulações dinâmicas, o DIALux é relativamente fácil de ser utilizado, porém este realiza apenas simulações estáticas. Em consequência disso, os resultados das simulações serão tratados conjuntamente às análises de iluminação natural.

A partir deste software foram feitas simulações da iluminação artificial no interior da planta piloto, nos momentos em que a iluminação natural não foi capaz de fornecer a iluminância mínima exigida pela norma. Assim, foi possível verificar qual fração do sistema de iluminação artificial seria necessária para atingir a iluminância adequada.

Para as simulações, buscou-se reproduzir com fidelidade as características internas da edificação, utilizando cores, móveis e luminárias semelhantes as que são usadas na edificação. Cores e móveis foram escolhidos do catálogo do software, enquanto as luminárias foram selecionadas do catálogo da Philips, também encontrado no programa. As principais características das luminárias podem ser encontradas nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 – Características da luminária utilizada na simulação da AT 1.

Luminária	TCS640
Número e tipo de lâmpadas	2 x TL5 – 25W
Potência	105W
Eficiência luminosa	38,3 lm/W
Índice de reprodução de cor (CRI)	100
Cor da fonte luminosa	840 (branco neutro)
Temperatura de cor correlata (CCT)	4000 K

Fonte: do software

Tabela 8 – Características da luminária utilizada na simulação da AT 2.

Luminária	TCS460
Número e tipo de lâmpadas	2 x TL5 – 13W
Potência	57W
Eficiência luminosa	31,1 lm/W
Índice de reprodução de cor (CRI)	100
Cor da fonte luminosa	840 (branco neutro)
Temperatura de cor correlata (CCT)	4000 K

Fonte: do software

Após a simulação dos cenários em que o sistema de iluminação artificial deveria funcionar, subtraiu-se a contribuição do tubo solar da iluminação natural total da AT 2. A partir disso, estimou-se a fração do sistema de iluminação artificial que seria utilizada caso não houvesse o tubo solar.

Considerando que as medições foram realizadas a cada duas horas, e que ocorreria variação na necessidade de iluminação artificial neste intervalo, estimou-se a necessidade de consumo horária. Para tanto, foram feitas médias entre dois horários subsequentes em que foram realizadas medições. Por exemplo, para estimar a necessidade de iluminação artificial as 9h, fez-se a média do que seria necessário as 8h e as 10h.

Este procedimento foi repetido para todos os horários em que não foram realizadas medições, para as duas salas analisadas, com e sem a presença do tubo solar.

3.3.2 Simulação termoenergética no eQUEST

O eQUEST é um software de simulação termoenergética, gratuito, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE, do inglês *Department of Energy*). Sua utilização é relativamente simples quando comparado ao EnergyPlus, fornecendo resultados com alto grau de precisão (HIRSCH, 2017). De forma geral, devem ser inseridos dados como potência instalada e perfis de ocupação, bem como o arquivo climático do local onde a edificação se encontra. Ao fim da simulação, o programa retorna dados do consumo de energia mensal com cada tipo de carga, ao longo de um ano, e dados referentes a temperatura interna.

Os primeiros dados a serem inseridos são os que se referem a localização da planta, informados por meio do arquivo climático. Foi utilizado o arquivo climático da cidade de Araranguá, em Santa Catarina, local onde a edificação se encontra.

Em seguida, foram declaradas as dimensões da edificação, as áreas internas (conforme a Tabela 3) e as aberturas. Dimensionada a edificação, foram inseridas as características construtivas das paredes e coberturas, de acordo com a Tabela 2.

Após a modelagem da envoltória da edificação, foram inseridos os dados de densidade de potência de iluminação (DPI) e de equipamentos (DPE) para cada área interna, de acordo com a Tabela 9. Estes valores foram calculados com base nos dados contidos na Tabela 5.

Tabela 9 – Densidade de potência para áreas internas.

Área	DPI (W/m ²)	DPE (W/m ²)
AT 1	15,49	6,09
AT 2	16,52	27,90
AT 3	-	-
Corredor	-	-
Sanitário 1	-	-
Sanitário 2	-	-

Fonte: do autor.

O perfil de ocupação da edificação foi definido como sendo de segunda a sexta, das 8:00 as 18:00. Em média, dez pessoas ocupam a edificação durante o dia.

O perfil de uso do sistema de iluminação artificial foi definido com base nas análises do aproveitamento da iluminação natural e simulações no DIALux. A partir do K_T anual e das médias mensais, foi possível determinar a quantidade de dias ensolarados, nublados e intermediários presentes em um ano. Isso permitiu estimar o uso do sistema de iluminação artificial ao longo do ano. Foi estimado um K_T médio para os meses mais quentes e outro K_T médio para os meses mais frios, resultando em dois perfis principais de iluminação.

Para o sistema de climatização, as temperaturas de acionamento do ar condicionado foram escolhidas com base na zona de conforto da carta bioclimática. Para a umidade relativa de aproximadamente 60%, valor médio adotado para este caso, a temperatura da zona de conforto térmico está entre 18°C e 24°C. Desta forma, foram utilizadas estas temperaturas para o acionamento do ar condicionado para aquecimento e resfriamento, respectivamente. É importante ressaltar que apenas as Áreas Técnicas 1 e 2 são climatizadas.

Para a simulação da edificação sem estratégias bioclimáticas, foram adotadas as seguintes premissas:

- Paredes: reboco, tijolo e reboco ($U = 1,665 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$);
- Cobertura: laje maciça ($U = 3,73 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$);
- Perfil de uso do sistema de iluminação artificial na AT 1: manteve-se o mesmo da edificação com estratégias;
- Perfil de uso do sistema de iluminação artificial na AT 2: descontou-se a contribuição do tubo solar.

Os demais valores de densidade de potência e temperaturas de funcionamento de ar condicionado foram mantidos iguais para os dois casos. O perfil de uso dos equipamentos também permaneceu o mesmo para as duas edificações.

A tabela com o percentual de consumo horário do sistema de iluminação artificial, para os dois casos simulados no eQUEST, pode ser encontrada na seção 4.2.1, referente aos resultados das simulações no DIALux.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos a partir do método apresentado, bem como discussões relevantes acerca dos mesmos.

4.1 MEDIÇÕES DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Nas subseções seguintes serão apresentados os resultados que envolvem a coleta de dados medidos por meio dos instrumentos já mencionados.

4.1.1 Análise termohigrométrica

Os dados da estação meteorológica automática e do termohigrômetro, referentes a temperatura ambiente, foram organizados conforme a Figura 10, onde é possível observar as variações interna e externamente à edificação ao longo dos anos de 2017 e 2018.

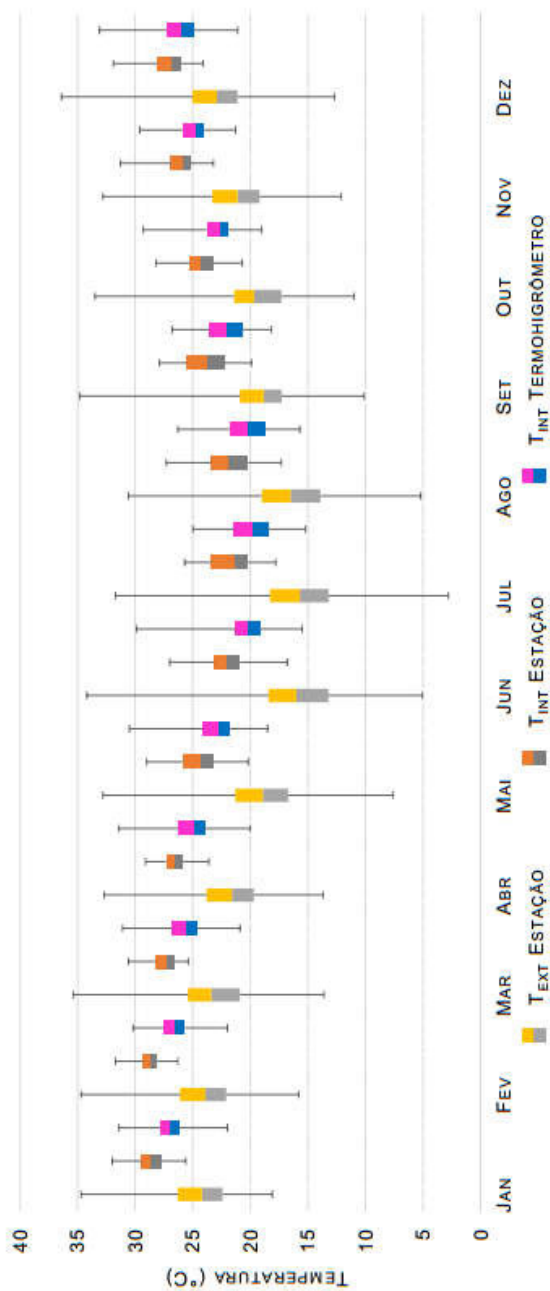
Avaliando a dispersão dos dados, observa-se que externamente as amplitudes térmicas mínimas e máximas foram de 16,6°C e 29,1°C, respectivamente. Entretanto, no interior da edificação, a amplitude térmica registrada pela estação apresentou valores menores, ficando entre 5,2°C e 10,2°C.

Além disso, os valores de temperatura registrados com maior frequência internamente estão mais próximos uns dos outros do que externamente, onde há maior dispersão dos dados, indicando maior variação de temperatura. Isso se justifica pela presença das estratégias bioclimáticas, principalmente por conta do isolamento das paredes e do telhado, que proporcionam maior estabilidade térmica para a edificação.

A estação meteorológica registrou os dados internos na sala que possui a fachada ventilada e uma parede com isolamento, sendo coberta pelo telhado vegetado. O termohigrômetro, por sua vez, ficou posicionado na sala que possui as paredes com isolamento térmico e é coberta pelo telhado com isolamento termoacústico. Neste sentido, os dados registrados pelos dois equipamentos apresentaram algumas diferenças.

A amplitude térmica da AT 1 apresentou um aumento em relação ao registrado pela estação meteorológica na outra sala, tendo o valor mínimo de 8,2°C e o máximo de 14,4°C.

Figura 10 – Variação da temperatura ambiente interna e externa.



Fonte: do autor

Apesar de esta sala possuir o isolamento térmico cujo desempenho é superior ao da fachada ventilada, este aumento da amplitude pode ser justificado pelo fato de que nesta sala se encontra a porta de acesso para o exterior.

Por outro lado, os valores registrados com maior frequência apresentam variação semelhante ao que se observa nos dados de temperatura interna da estação meteorológica. Neste sentido, a estabilidade térmica também é observada neste caso. Mesmo nos meses mais frios, a temperatura se manteve próxima dos 20°C. Já para os meses mais quentes, foram observadas temperaturas na faixa de 27°C, com poucas variações.

É importante ressaltar que mesmo que a temperatura média no interior da edificação seja maior do que no exterior, não significa que as estratégias não atenuem as altas temperaturas externas no verão. Esta diferença é causada pela menor amplitude térmica interna, de maneira que quando a temperatura externa cai, geralmente durante a madrugada, a temperatura no interior se mantém estável. O mesmo pode ser observado durante os meses mais frios.

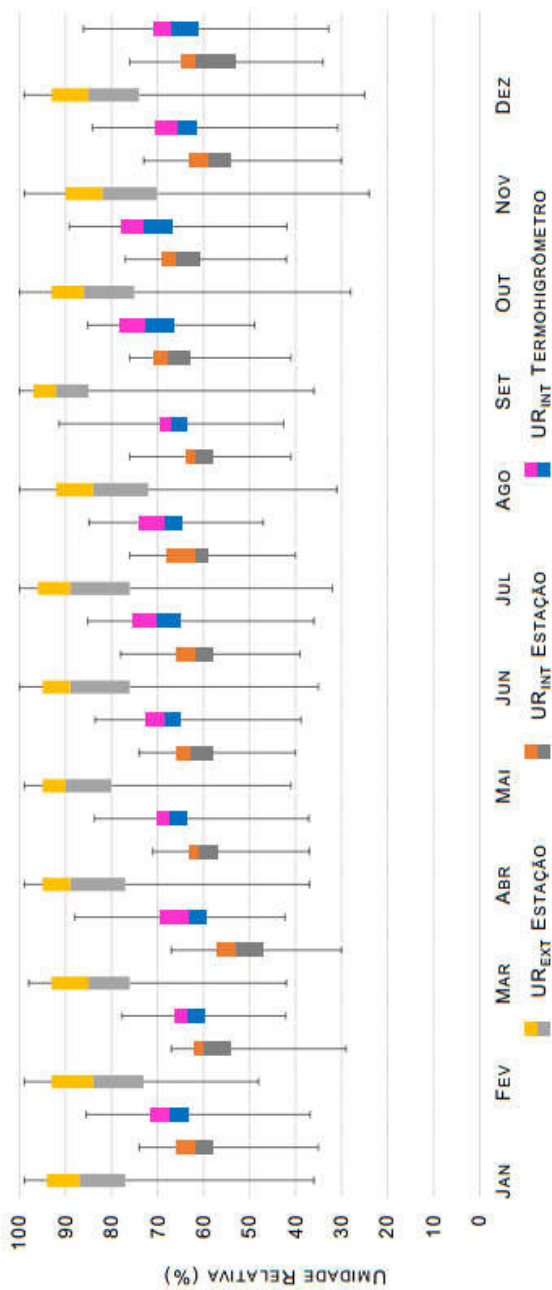
As variações de umidade relativa interna e externa podem ser vistas na Figura 11. Os dados também são referentes aos anos de 2017 e 2018.

Ao contrário do que acontece com a temperatura ambiente, a umidade relativa interna se mantém em níveis geralmente abaixo da externa. A diferença entre os máximos e mínimos também se mostra menor internamente, variando de 34% a 43% nos dados registrados pela estação, onde a umidade relativa máxima registrada ficou abaixo dos 80%. Externamente, foram registrados valores de umidade de até 100%, com amplitudes na faixa de 51% a 75%.

Para os dados registrados pelo termohigrômetro, observa-se que, assim como no caso da temperatura ambiente, há maior influência das condições externas na AT 1, por conta do contato com o exterior. Comparando com os dados registrados pela estação, verifica-se o aumento da umidade relativa interna, bem como uma amplitude máxima de 53,4%. Em relação a variação externa, por outro lado, observa-se maior estabilidade.

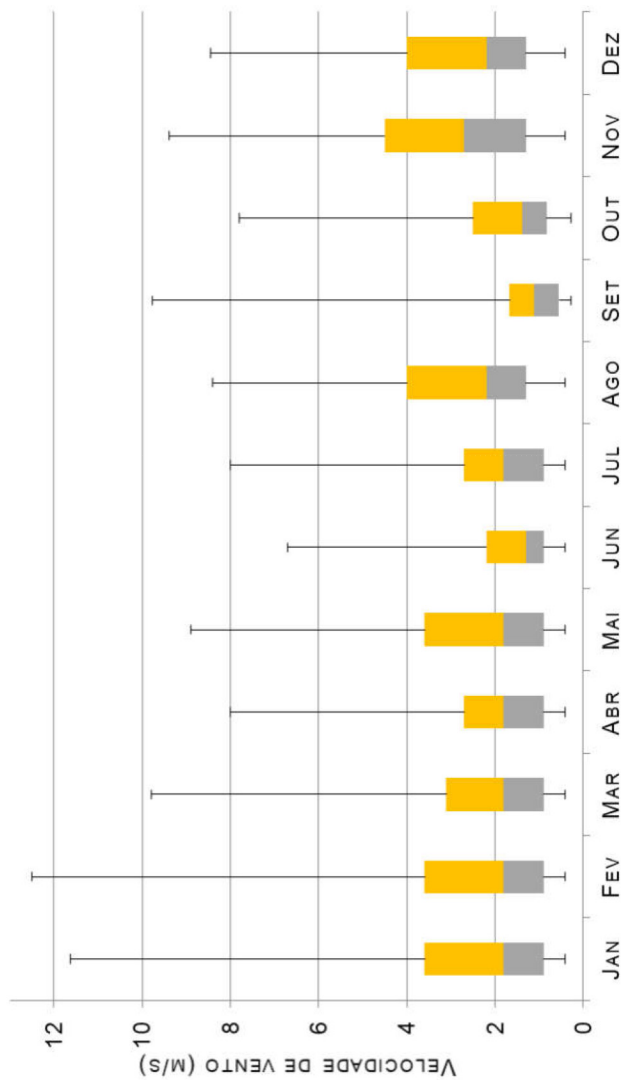
A Figura 12 ilustra a variação da velocidade de vento. Estes dados também foram coletados pela estação meteorológica, e observa-se que as velocidades mais frequentes registradas se mantiveram entre 1 e 4 m/s. Por outro lado, também observam-se, com menor frequência, rajadas de vento de até 12 m/s.

Figura 11 – Variação da umidade relativa interna e externa.



Fonte: do autor.

Figura 12 – Variação da velocidade de vento.



Fonte: do autor.

4.1.2 Índices de conforto térmico

Foram calculados os índices PMV e PPD para as quatro estações do ano, utilizando dados de três meses em cada estação.

As Figuras 13, 14, 15 e 16 ilustram o resultado do PPD para as quatro estações, em três temperaturas médias radiantés. Serão mostrados apenas os gráficos referentes ao PPD, uma vez que este está relacionado ao PMV e é de mais fácil interpretação. Os mapas de PMV podem ser encontrados no Apêndice A. Ressalta-se que é aceitável um PPD de até 10%, indicando que o PMV está entre -0,5 e 0,5.

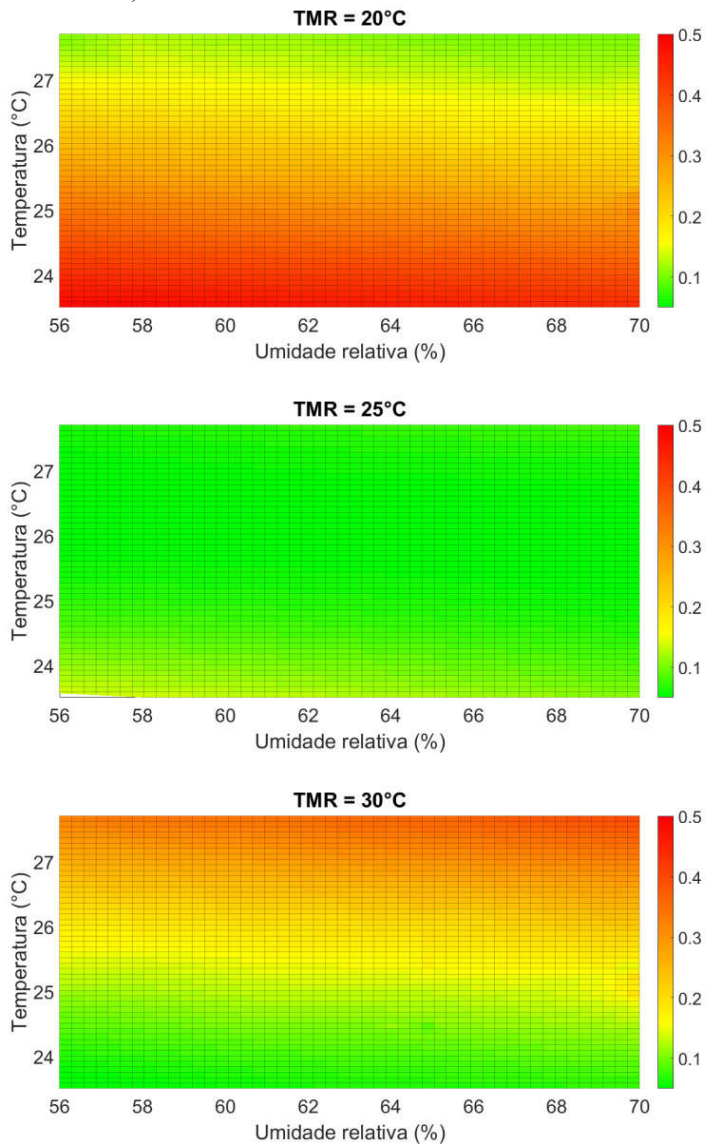
A partir dos gradientes de PPD, percebe-se que no verão o índice de desconforto térmico é aceitável para as condições de temperatura ambiente (T_{AMB}) e umidade relativa registradas, em TMR de 25°C. Para a TMR de 20°C, conforme a T_{AMB} cai, o índice de pessoas em desconforto térmico aumenta, podendo atingir os 50%. Por outro lado, T_{AMB} mais baixas são melhor aceitas na TMR de 30°C. Neste caso, o percentual de pessoas insatisfeitas termicamente pode atingir os 40% conforme a T_{AMB} sobe.

No outono, o maior índice de desconforto acontece na TMR de 30°C. Neste caso, conforme T_{AMB} se eleva, o PPD pode atingir os 30%. Para a TMR de 25°C, o comportamento do PPD se mantém, permanecendo dentro dos limites aceitáveis para as condições registradas. Na TMR de 20°C, T_{AMB} mais elevadas favorecem o conforto térmico, e temperaturas mais baixas podem causar desconforto em até 20% dos ocupantes.

Já no inverno, o nível máximo de desconforto gira em torno dos 20%, nas TMRs de 20°C e 30°C. Dentro dos valores registrados, a T_{AMB} elevada favorece o conforto térmico em TMR de 20°C e o prejudica em TMR de 30°C. O nível de desconforto registrado na TMR de 25°C, como nas duas outras estações mencionadas, encontra-se dentro dos limites estabelecidos pela norma.

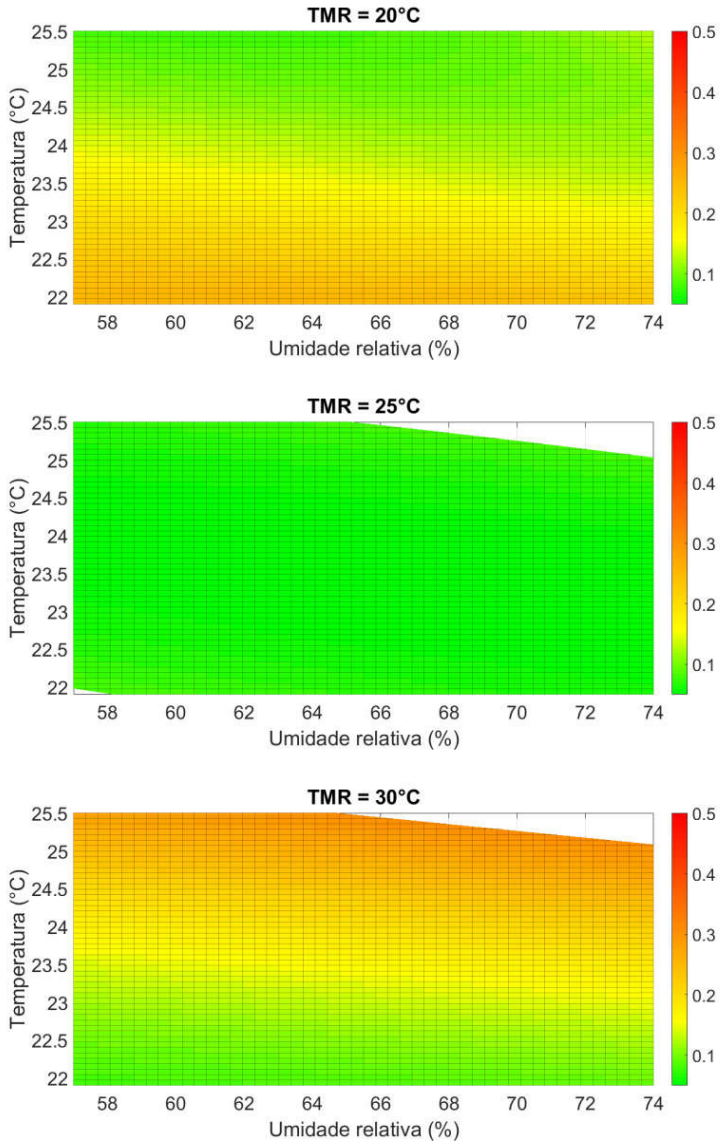
Na primavera, o índice de desconforto pode atingir os 50% quando a T_{AMB} é baixa e a TMR é 20°C. Para a TMR de 25°C, o nível de desconforto é aceitável em praticamente todas as T_{AMB} registradas, exceto em cerca de 20°C, quando o PPD atinge cerca de 20%. Em T_{AMB} mais elevadas e TMR de 30°C, o PPD chega a 30%.

Figura 13 – PPD, verão.



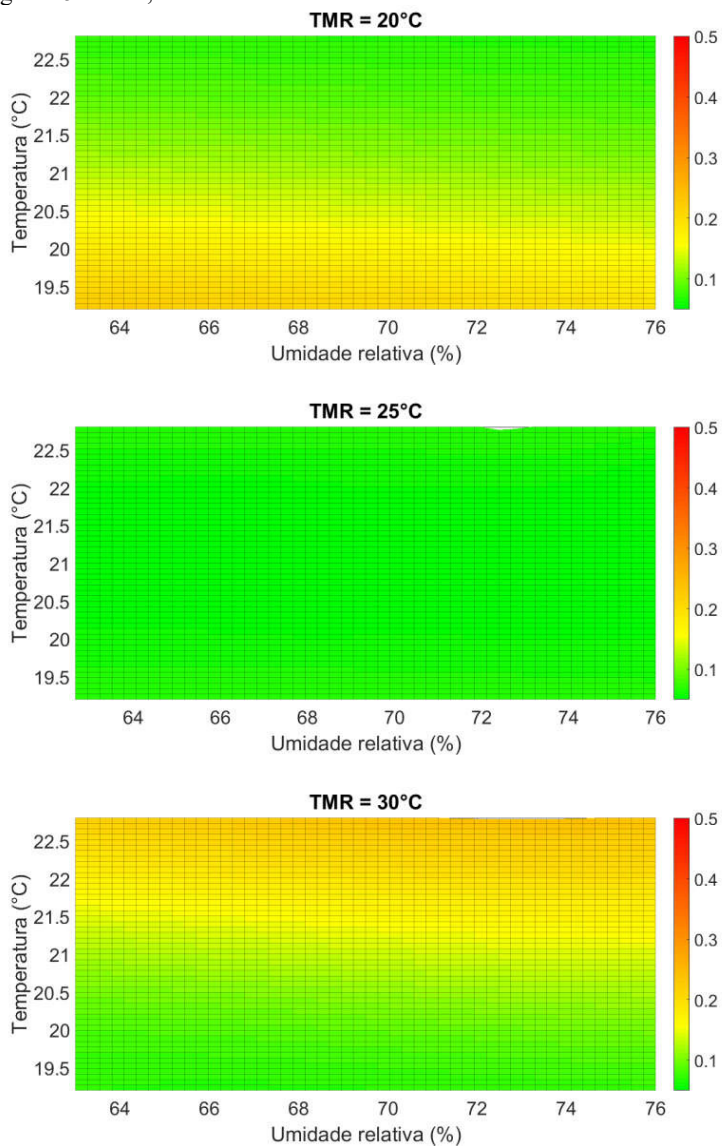
Fonte: do autor.

Figura 14 – PPD, outono.



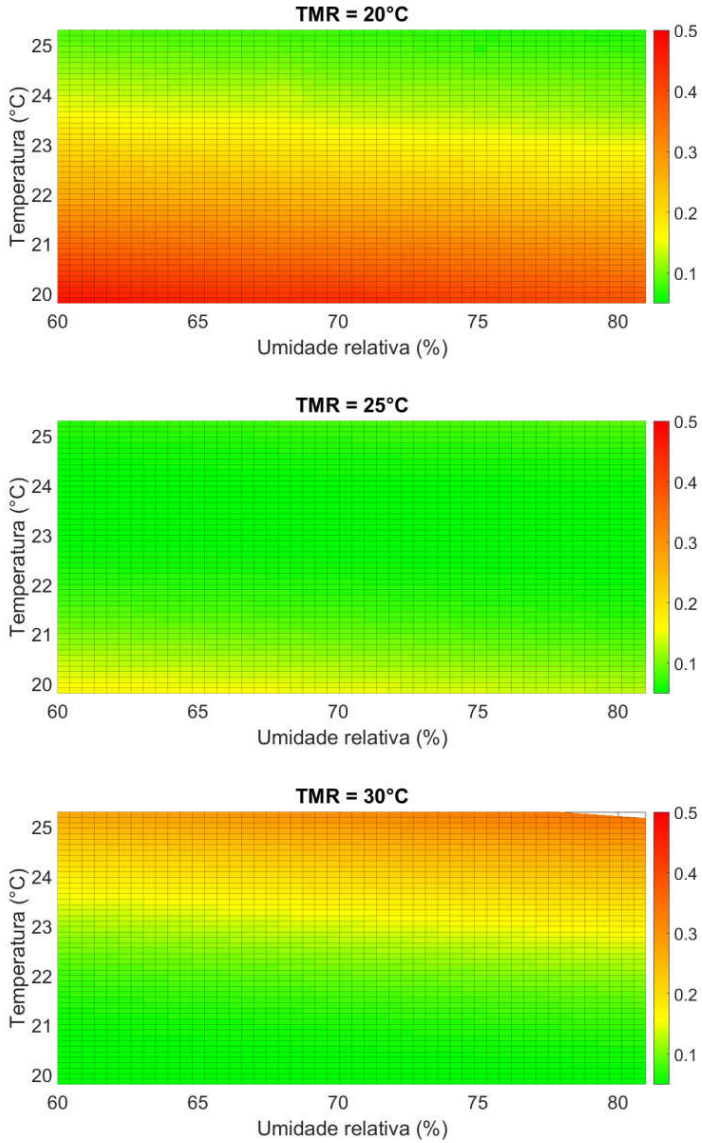
Fonte: do autor.

Figura 15 – PPD, inverno.



Fonte: do autor.

Figura 16 – PPD, primavera.



Fonte: do autor.

A análise dos casos mais extremos apresenta percentual de desconforto máximo de 80%. Por outro lado, alguns casos apresentam PPD abaixo dos 10%. As Tabelas 10, 11, 12 e 13 apresentam as combinações entre as condições extremas de temperatura ambiente e umidade relativa, registradas pelo termohigrômetro no interior da edificação, e os respectivos PPDs em função da TMR.

Tabela 10 – PPD em função da TMR em condições extremas de temperatura e umidade relativa na primavera.

Caso	Condições	T (°C)	UR (%)	PPD (%) em diferentes TMRs		
				20°C	25°C	30°C
1	T _{MÍN} -UR _{MÍN}	18,7	41,6	64	29	8
2	T _{MÍN} -UR _{MÁX}	18,7	88,7	49	18	5
3	T _{MÁX} -UR _{MÍN}	29,3	41,6	5	18	55
4	T _{MÁX} -UR _{MÁX}	29,3	88,7	10	40	80

Fonte: do autor.

Tabela 11 – PPD em função da TMR em condições extremas de temperatura e umidade relativa no verão.

Caso	Condições	T (°C)	UR (%)	PPD (%) em diferentes TMRs		
				20°C	25°C	30°C
5	T _{MÍN} -UR _{MÍN}	21,1	42,9	80	39	9
6	T _{MÍN} -UR _{MÁX}	21,1	75,5	70	28	6
7	T _{MÁX} -UR _{MÍN}	29,9	42,9	8	11	49
8	T _{MÁX} -UR _{MÁX}	29,9	75,5	5	23	69

Fonte: do autor.

Tabela 12 – PPD em função da TMR em condições extremas de temperatura e umidade relativa no outono.

Caso	Condições	T (°C)	UR (%)	PPD (%) em diferentes TMRs		
				20°C	25°C	30°C
9	T _{MÍN} -UR _{MÍN}	20,0	37,1	52	20	5
10	T _{MÍN} -UR _{MÁX}	20,0	83,6	37	12	5
11	T _{MÁX} -UR _{MÍN}	29,1	37,1	5	16	50
12	T _{MÁX} -UR _{MÁX}	29,1	83,6	9	36	76

Fonte: do autor.

Tabela 13 – PPD em função da TMR em condições extremas de temperatura e umidade relativa no inverno.

Caso	Condições	T (°C)	UR (%)	PPD (%) em diferentes TMRs		
				20°C	25°C	30°C
13	T _{MÍN} -UR _{MÍN}	15,2	47,0	59	30	10
14	T _{MÍN} -UR _{MÁX}	15,2	84,2	50	23	7
15	T _{MÁX} -UR _{MÍN}	26,3	47,0	5	15	42
16	T _{MÁX} -UR _{MÁX}	26,3	84,2	8	28	61

Fonte: do autor.

A Tabela 14 apresenta os valores de TMR e velocidade de vento (VV) necessários para levar o PPD para níveis aceitáveis, levando em conta os casos extremos apresentados anteriormente.

Tabela 14 – Valores de TMR e velocidade de vento necessários para atingir o conforto térmico nos casos extremos.

Caso	TMR (°C)	PPD (%)	TMR _{CONF} (°C)	VV _{CONF} (m/s)	PPD _{CONF} (%)
1	20	64	29,0	-	10
1	25	29	29,5	-	9
2	20	49	27,5	-	9
2	25	18	27,5	-	9
3	25	18	-	0,3	9
3	30	55	-	0,9	10
4	25	40	-	1,9	10
4	30	80	-	7,3	10
5	20	80	29,5	-	10
5	25	39	30,0	-	9
6	20	70	28,5	-	9
6	25	28	29,0	-	8
7	25	11	-	0,1	10
7	30	49	-	0,5	10
8	25	23	-	0,3	10
8	30	69	-	1,1	10
9	20	52	27,5	-	10
9	25	20	27,5	-	10
10	20	37	25,5	-	10
10	25	12	25,5	-	10
11	25	16	-	0,2	10

Tabela 14 (continuação) – Valores de TMR e velocidade de vento necessários para atingir o conforto térmico nos casos extremos.

Caso	TMR (°C)	PPD (%)	TMR _{CONF} (°C)	VV _{CONF} (m/s)	PPD _{CONF} (%)
11	30	50	-	0,7	10
12	25	36	-	1,1	10
12	30	76	-	4,0	10
13	20	59	30,0	-	10
13	25	30	30,0	-	10
14	20	50	28,5	-	10
14	25	23	28,5	-	10
15	25	15	-	0,2	10
15	30	42	-	0,6	9
16	25	28	-	0,5	10
16	30	61	-	1,4	10

Fonte: do autor.

Analisando os resultados, observa-se que se repete o padrão exibido nos mapas. Temperaturas médias radiantes mais baixas favorecem o conforto térmico em temperaturas ambiente mais altas, enquanto a situação oposta também é verdadeira.

Verifica-se que para os casos de desconforto por calor, as velocidades de vento necessárias encontram-se, salvo algumas exceções (Caso 4: 7,3 m/s), dentro dos valores frequentemente registrados pela estação meteorológica. Desta forma, mesmo nos casos mais extremos, seria possível atingir o conforto térmico fazendo o aproveitamento da ventilação natural.

4.1.3 Análise da iluminação natural

A presente subseção apresenta as características dos dias selecionados e descreve a análise da iluminação natural das áreas avaliadas. São apresentados os resultados referentes a dias ensolarados de verão e inverno, seguidos pela análise de dias nublados, também nas duas estações.

As curvas de radiação dos dias intermediários, bem como seus respectivos K_T , são apresentadas no Apêndice B. Resultados referentes a outros horários de medição e dias intermediários encontram-se no Apêndice C.

4.1.3.1 Características dos dias representativos

A partir do K_T é possível determinar a condição do céu. A determinação do K_T diário foi utilizada para classificar o dia de medição de iluminância. Tipicamente, dias ensolarados apresentam K_T superior a 0,7, enquanto dias nublados possuem K_T inferior a 0,3. Valores intermediários de K_T caracterizam dias intermediários. Entretanto, a partir de observações empíricas, considerou-se, para o caso apresentado:

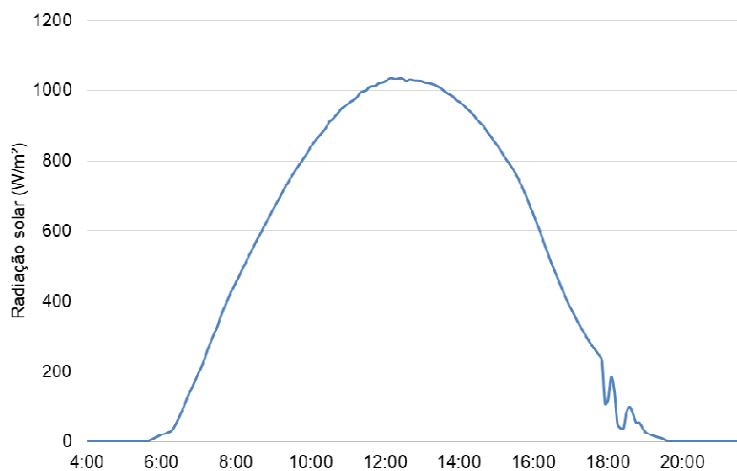
- $K_T < 0,35$ – nublado;
- $0,35 \leq K_T \leq 0,60$ – intermediário;
- $K_T > 0,60$ – ensolarado.

Para este caso, os dias selecionados para análise foram predominantemente ensolarados e nublados, cujos valores de K_T estão listados na Tabela 15 **Error! Reference source not found.**

Tabela 15 – K_T dos dias analisados para cada caso.

Área	Estação	Dia típico	K_T	Comportamento da radiação solar
AT 1	Verão	Ensolarado	0,68	Figura 17
		Nublado	0,17	Figura 18
	Inverno	Ensolarado	0,62	Figura 19
		Nublado	0,25	Figura 20
AT 2	Verão	Ensolarado	0,69	Figura 21
		Nublado	0,24	Figura 22
	Inverno	Ensolarado	0,62	Figura 19
		Nublado	0,09	Figura 23
Tubo solar	Verão	Ensolarado	0,69	Figura 21
		Nublado	0,33	Figura 24
	Inverno	Ensolarado	0,62	Figura 19
		Nublado	0,09	Figura 23

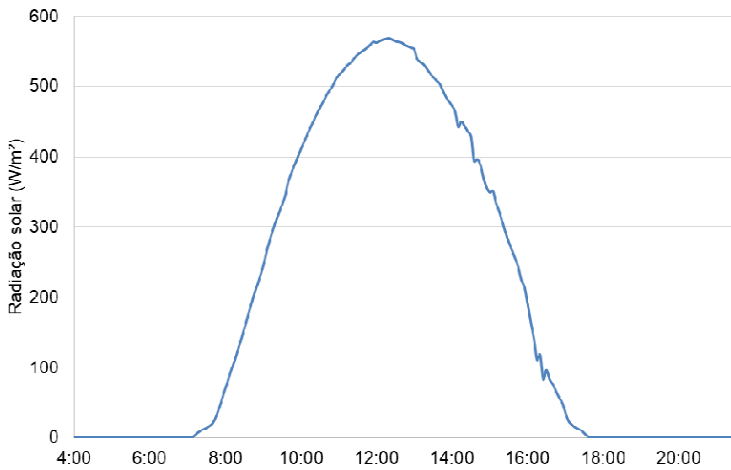
Fonte: do autor.

Figura 17 – Comportamento da radiação solar no dia de K_T 0,68.

Fonte: do autor

Figura 18 – Comportamento da radiação solar no dia de K_T 0,17.

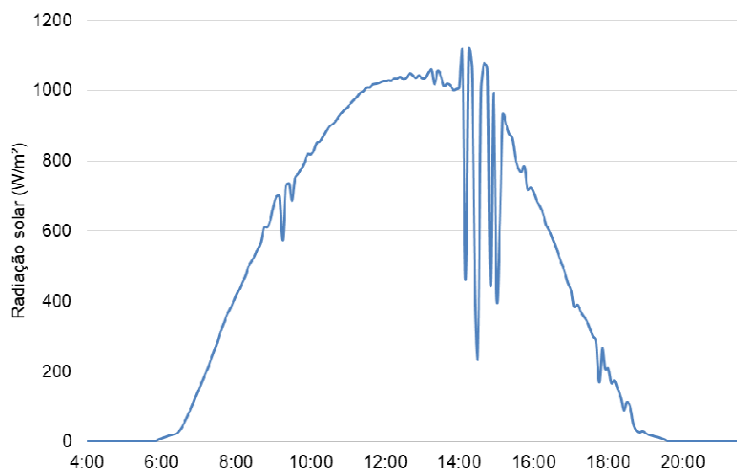
Fonte: do autor.

Figura 19 – Comportamento da radiação solar no dia de K_T 0,62.

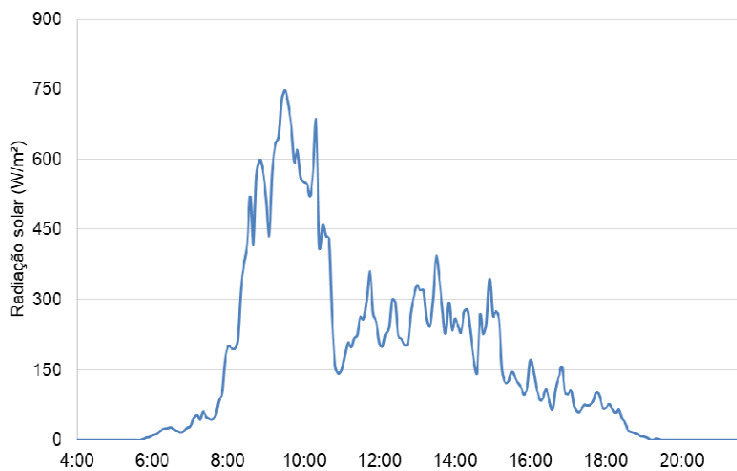
Fonte: do autor

Figura 20 – Comportamento da radiação solar no dia de K_T 0,25.

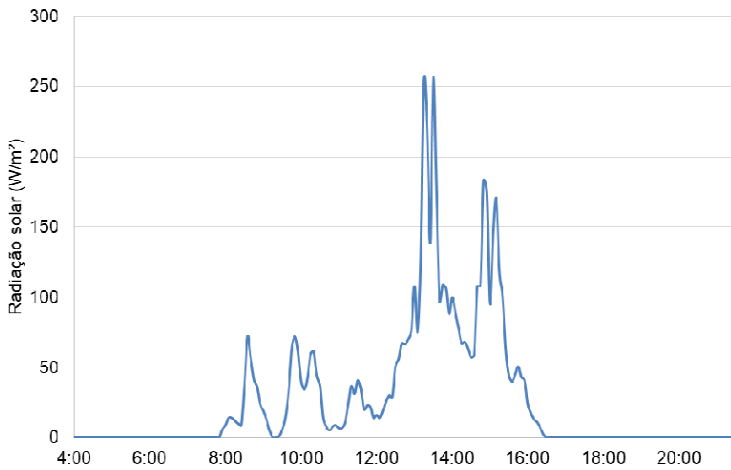
Fonte: do autor.

Figura 21 – Comportamento da radiação solar no dia de K_T 0,69.

Fonte: do autor.

Figura 22 – Comportamento da radiação solar no dia de K_T 0,24.

Fonte: do autor.

Figura 23 – Comportamento da radiação solar nos dias de K_T 0,09.

Fonte: do autor.

Figura 24 – Comportamento da radiação solar nos dias de K_T 0,33.

Fonte: do autor.

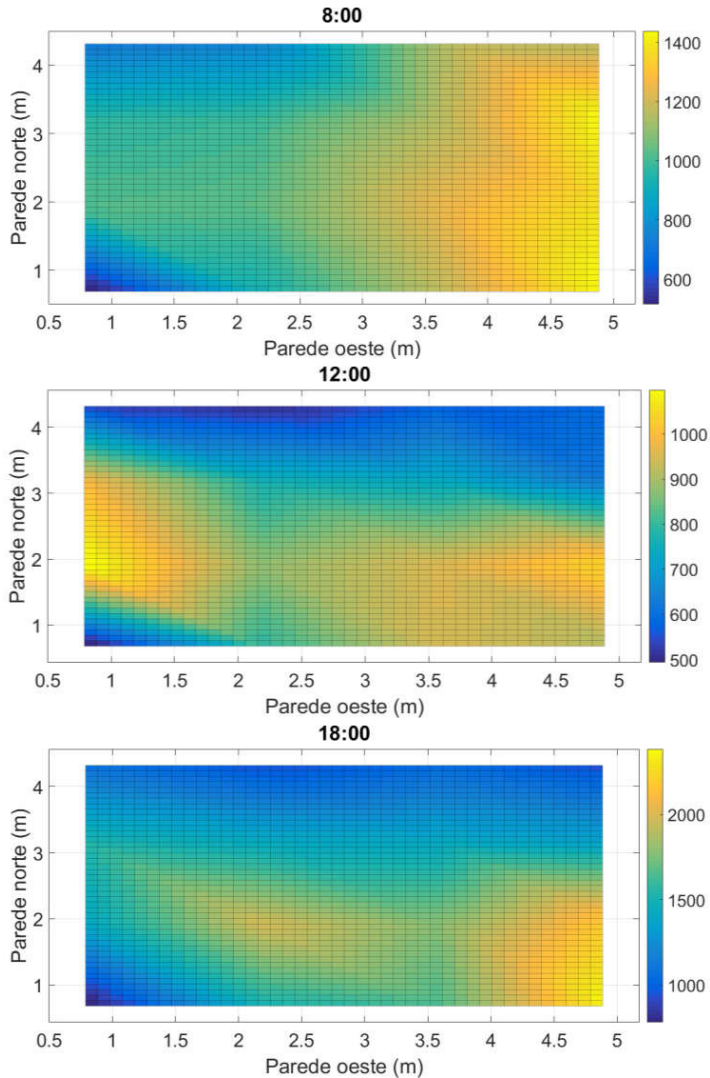
4.1.3.2 Área técnica 1

A distribuição da iluminância na AT 1 para os dias de céu predominantemente limpo de verão e inverno pode ser observada nas Figuras 25 e 26. De maneira geral, observa-se que, para ambas as estações, a iluminância em dias ensolarados permanece acima do mínimo exigido pela norma, isto é, 500 lx.

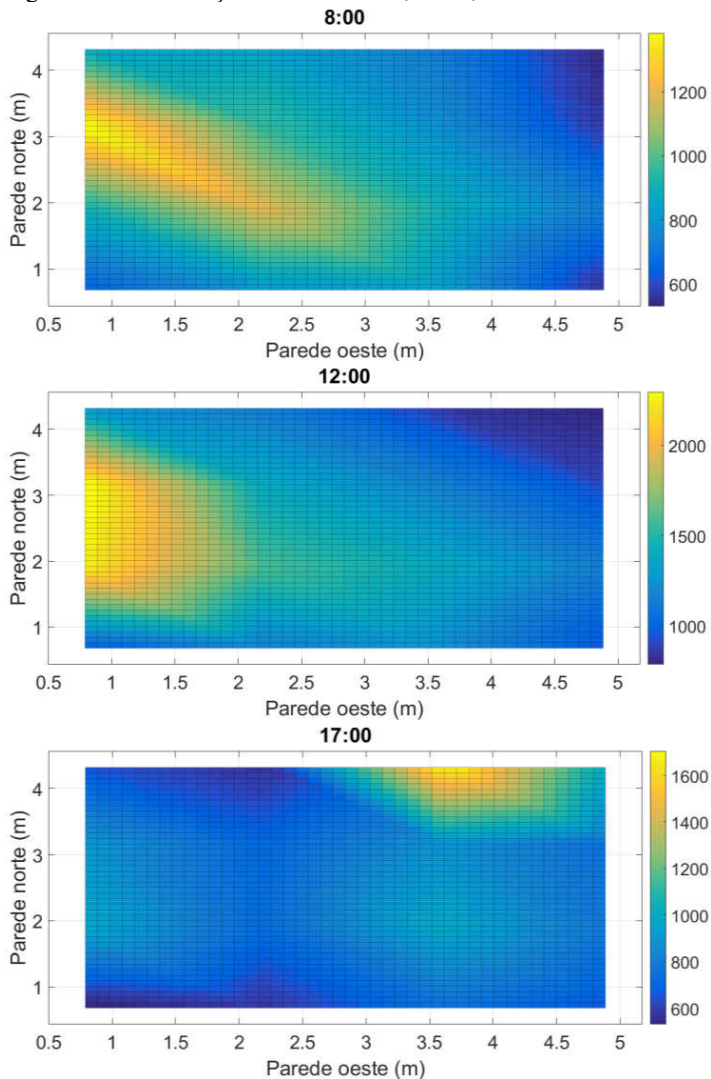
Nos equinócios o Sol nasce exatamente no leste, indo em direção ao sul a medida que se aproxima do solstício de verão, e ao norte quando se aproxima do solstício de inverno, o que justifica a distribuição da iluminância no período das 8h. Durante o verão, as aberturas voltadas para o sul contribuem de maneira significativa para a iluminação da sala, enquanto no inverno a contribuição maior se dá pela porta de vidro, situada na parede norte. Observa ainda a influência das aberturas situadas na área de Circulação, nas paredes leste e sul da edificação. Por conta do local em que o Sol nasce, como já mencionado, essa influência é mais significativa no verão do que no inverno. A área mais próxima ao centro da parede leste recebe a iluminação natural das aberturas situadas na AT 2, de maneira a manter a iluminação em níveis adequados.

Para o horário do meio dia, observa-se que o dia de inverno apresentou níveis de iluminância mais altos que os observados no dia de verão. Observando as Figuras 17 e 19, verifica-se que no dia de verão, a radiação solar atingiu valores próximos de 1000 W/m², enquanto no inverno este valor não ultrapassou os 600 W/m². Ainda assim, esta diferença se justifica pelo fato de que, no inverno, o ângulo solar é menor que no verão, para um mesmo horário, ocasionando índices maiores de iluminância, bem como uma distribuição mais uniforme ao longo da sala.

No último horário medido, observa-se que a abertura oeste passa a apresentar influência mais significativa por conta da posição solar. Os pontos de concentração de iluminância mais alta se alternam nas duas estações por conta da trajetória solar. No inverno, devido ao fato de o Sol se pôr próximo das 17h à medida que se aproxima do solstício, observam-se valores mais baixos de iluminância, justificados também pela curva da radiação solar (Figura 19).

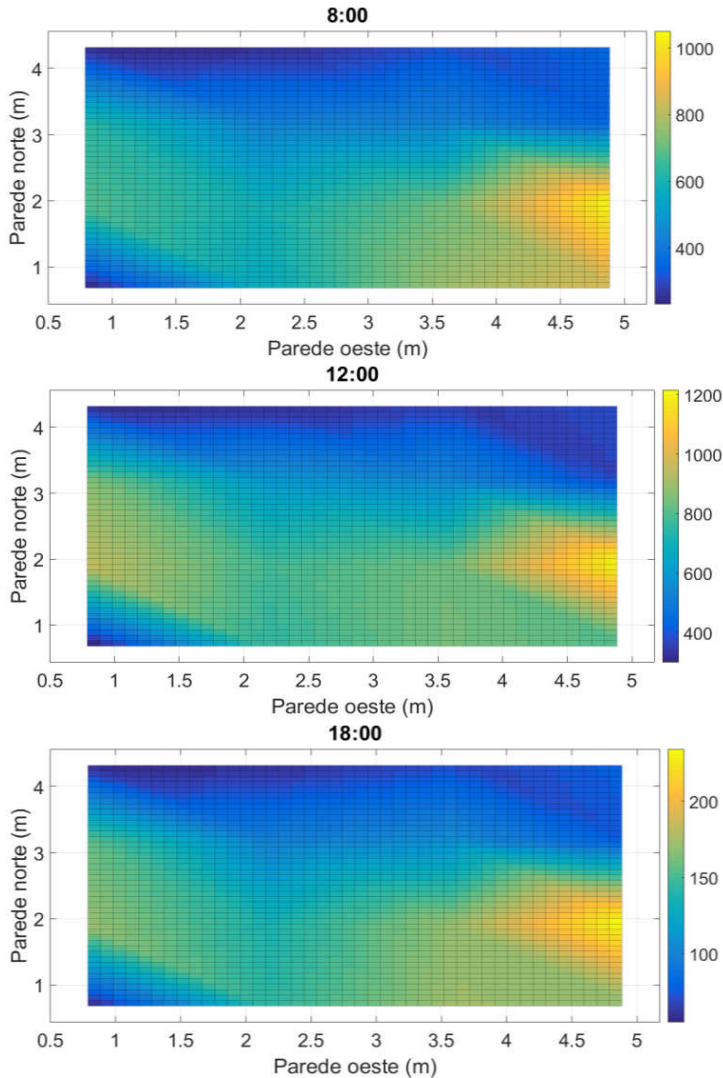
Figura 25 – Distribuição da iluminância, em lx, na AT 1 em um dia de K_T 0,68.

Fonte: do autor.

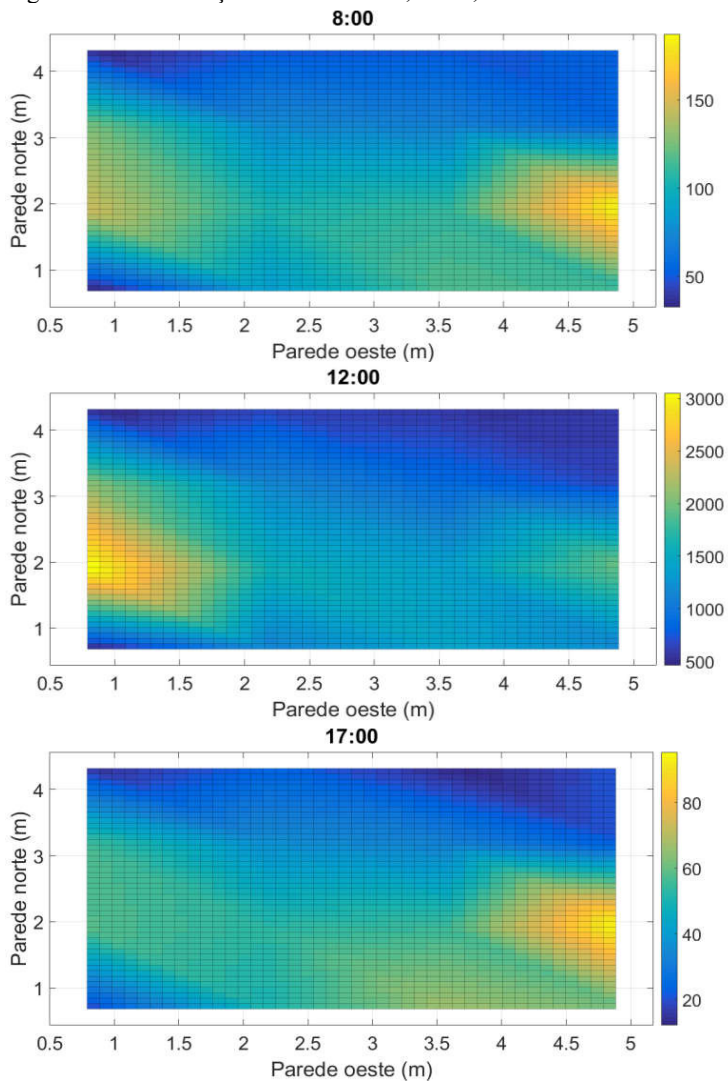
Figura 26 – Distribuição da iluminância, em lx, na AT 1 em um dia de K_T 0,62.

Fonte: do autor.

As Figuras 27 e 28 apresentam a distribuição da iluminância na AT 1 em dias nublados.

Figura 27 – Distribuição da iluminância, em lx, na AT 1 em um dia de $K_T 0,17$.

Fonte: do autor.

Figura 28 – Distribuição da iluminância, em lx, na AT 1 em um dia de K_T 0,25.

Fonte: do autor.

Observa-se, para o dia de verão (K_T 0,17), um comportamento semelhante ao que foi observado no dia ensolarado de verão (K_T 0,68). Houve, no entanto, uma variação significativa na iluminância, especialmente no horário das 18h. Observando a curva da radiação solar para o dia em questão (Figura 18), percebe-se que a radiação solar se manteve abaixo dos 100 W/m^2 , enquanto para o mesmo horário do dia ensolarado (Figura 17), a radiação era cerca de quatro vezes maior. Para o dia de inverno, o horário do pôr do Sol e a consequente baixa incidência de radiação solar justificam os índices de iluminância registrados.

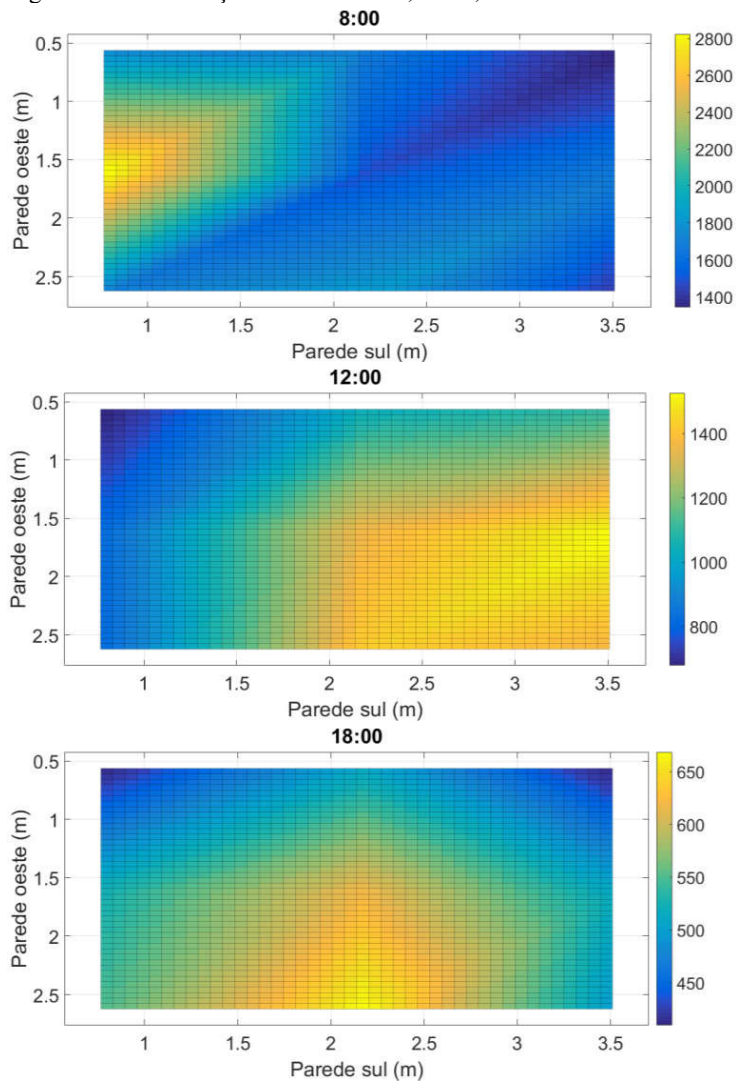
Em dias nublados, a radiação solar é 100% difusa, de maneira que os pontos de maior iluminância se concentram próximos às aberturas. Neste sentido, comparando os níveis de iluminância registrados no primeiro horário de medição, observa-se que, apesar da ausência da radiação direta, foi possível atingir o nível mínimo de iluminância exigido por norma em alguns pontos no dia de verão (K_T 0,17). Assim, seria necessário utilizar apenas uma parte do sistema de iluminação artificial para suprir os demais locais.

Já para o dia de inverno, ainda que o K_T seja maior que o do dia de verão, isto é, 0,25, foram registrados níveis mais baixos de iluminância. Isso pode ser justificado com base na curva da radiação (Figura 20), que indica que no horário em questão a irradiância era cerca de 50 W/m^2 , enquanto no dia de verão (Figura 18) este valor era próximo de 200 W/m^2 .

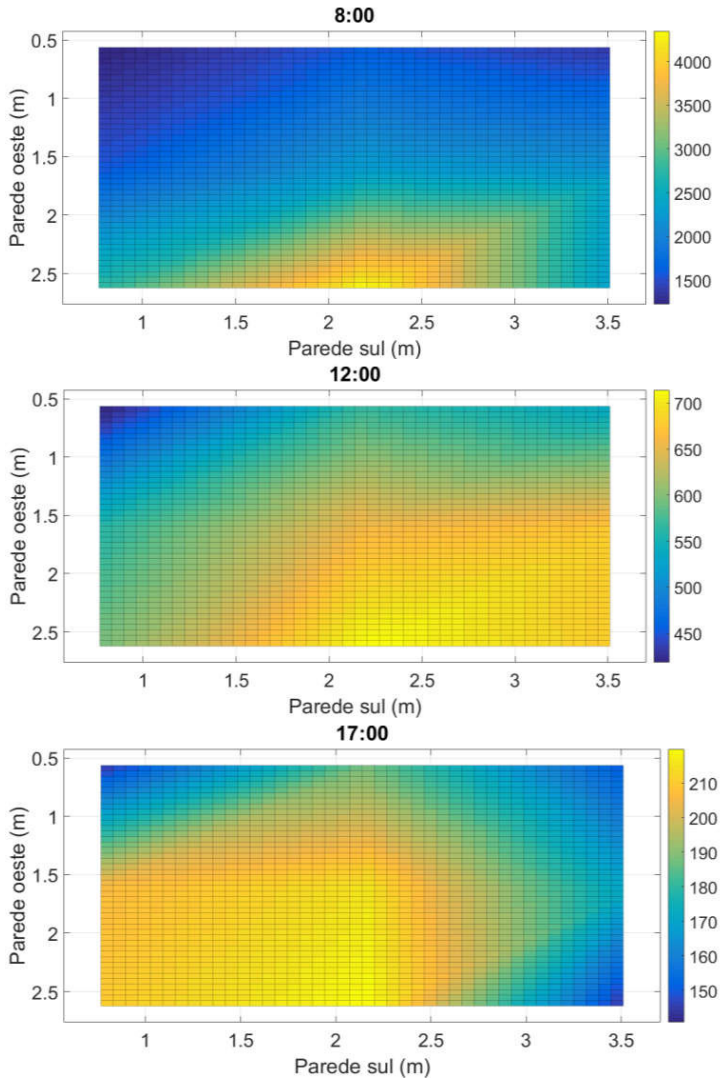
Além da intensidade da radiação solar, efeitos de concentração causados pela presença de nuvens podem aumentar os níveis de iluminância. É o caso do horário do meio dia, quando a radiação solar atinge os 700 W/m^2 no dia de K_T 0,25 (Figura 20), fazendo com que não haja pontos sem o mínimo de iluminância exigida por norma. No verão, mesmo com o valor reduzido da radiação solar (Figura 18), somente os pontos mais próximos das paredes permanecem abaixo dos 500 lx .

4.1.3.3 Área técnica 2

A distribuição da iluminância em dias ensolarados na AT 2 pode ser vista nas Figuras 29 e 30.

Figura 29 – Distribuição da iluminância, em lx, na AT 2 em um dia de K_T 0,69.

Fonte: do autor.

Figura 30 – Distribuição da iluminância, em lx, na AT 2 em um dia de K_T 0,62.

Fonte: do autor.

Por conta da orientação leste das aberturas, o período da manhã apresenta níveis de iluminância acima do que é exigido pela norma em todos os pontos em dias ensolarados. Entretanto, verifica-se que o dia de verão (K_T 0,69) apresenta níveis de iluminância mais baixos que o dia de inverno (K_T 0,62) apesar da maior incidência de radiação, conforme se observa nas Figuras 21 e 19. Esta diferença ocorre por conta da altura solar, que acaba fazendo com que haja mais luz natural entrando na sala neste horário durante o inverno do que no verão, quando o Sol já está mais alto neste horário.

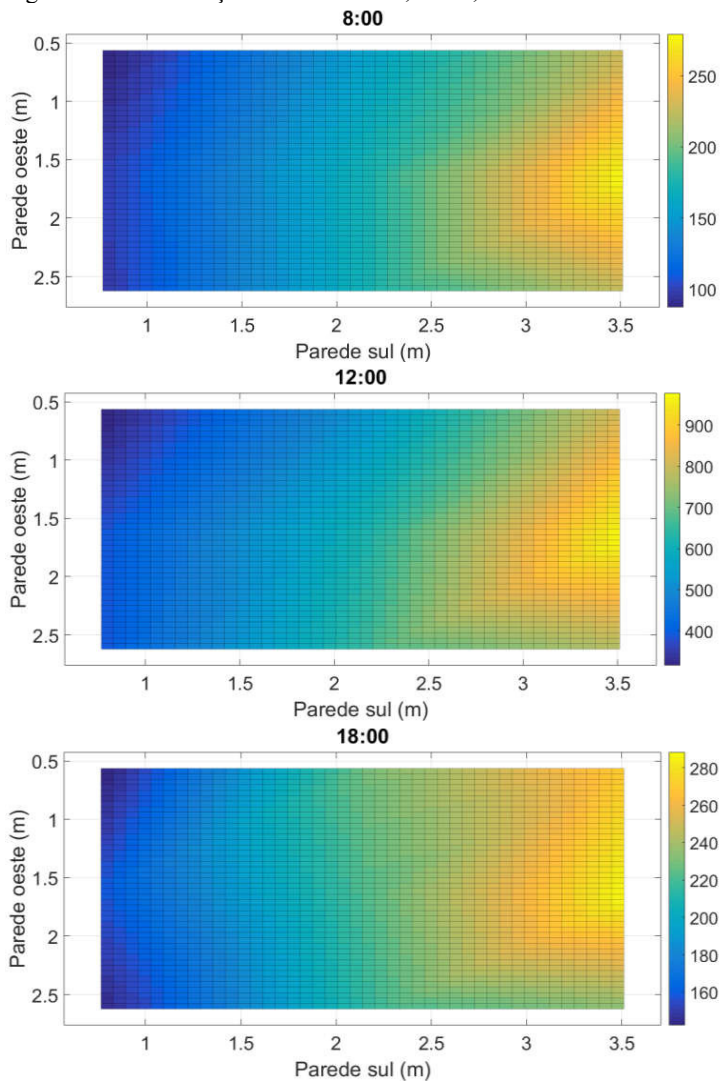
No horário do meio dia observa-se, além da diferença no nível de iluminância provocado pelos níveis de radiação solar (conforme Figuras 14 e 19), a contribuição do tubo solar. Sua localização, ilustrada na Figura 8, causa este efeito na distribuição da iluminância, especialmente neste horário em que o Sol está mais alto.

As 18h, no verão, além das aberturas, ainda há contribuição do tubo solar. Já no inverno, as 17h observa-se maior contribuição da abertura na parede oeste, que proporciona o aproveitamento da iluminação natural da AT 1. Por ser um horário próximo ao pôr do Sol, os níveis de radiação e, conseqüentemente, de iluminância, são reduzidos.

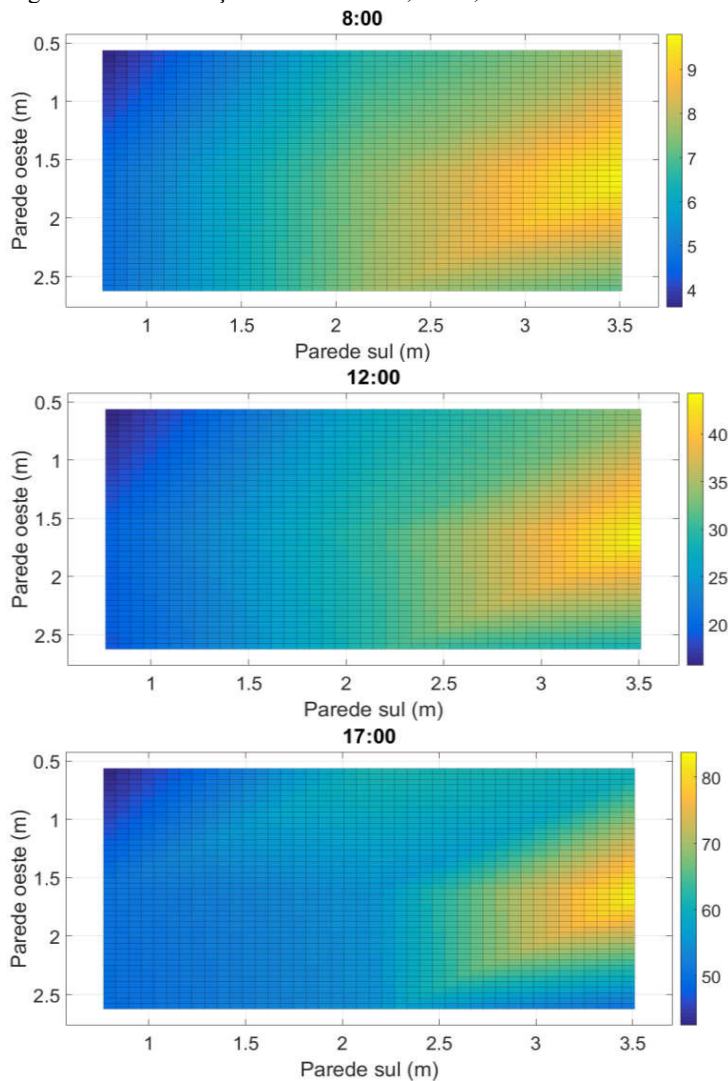
Para dias nublados, a distribuição da iluminância na AT 2 pode ser observada nas Figuras 31 e 32. Da mesma maneira que nos dias nublados da AT 1, os níveis mais altos de iluminância se concentram próximos às aberturas, uma vez que só existe a radiação difusa.

Os baixos níveis de iluminância registrados no dia nublado de inverno se justificam pela curva da radiação solar (Figura 23), onde é possível perceber que o valor máximo de radiação solar registrado foi de 250 W/m^2 .

Para o dia de K_t 0,24, observa-se na Figura 22 que a radiação solar nos horários das 8h e das 18h é semelhante, de maneira que a iluminância também apresentou níveis semelhantes. Ao meio dia observam-se valores mais altos, atingindo inclusive o que é exigido por norma.

Figura 31 – Distribuição da iluminância, em lx, na AT 2 em um dia de K_T 0,24.

Fonte: do autor.

Figura 32 – Distribuição da iluminância, em lx, na AT 2 em um dia de K_T 0,09.

Fonte: do autor.

4.1.3.4 Tubo solar

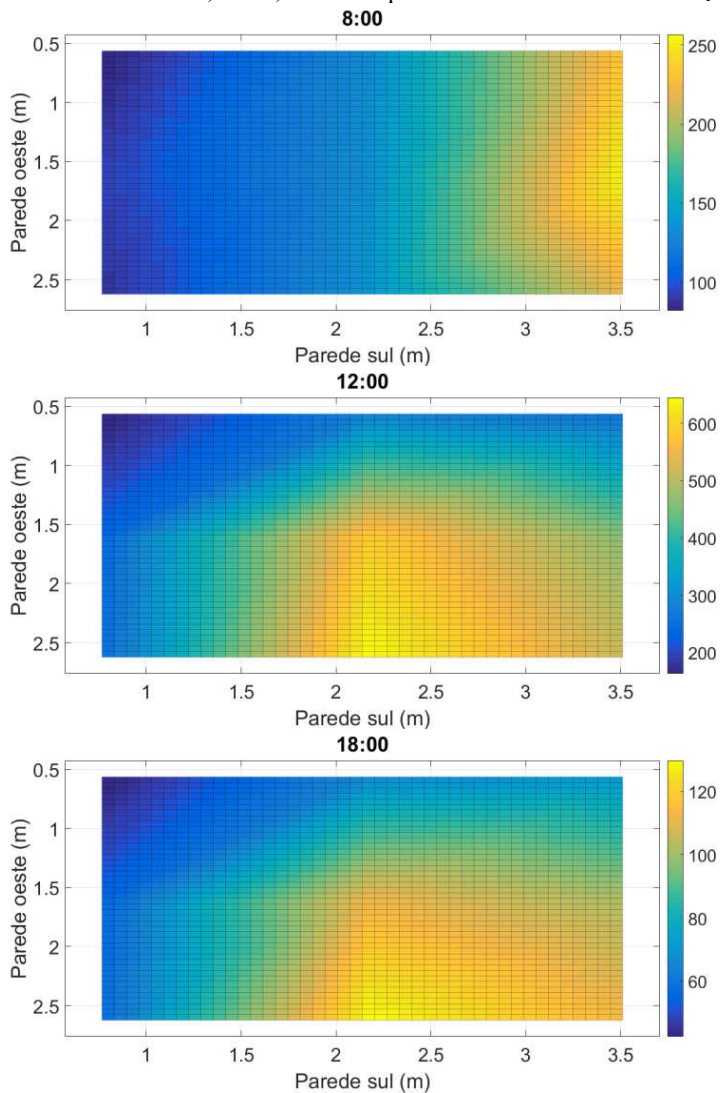
A distribuição da iluminância na sala considerando somente a contribuição do tubo solar pode ser vista na Figura 33, para o dia ensolarado de verão, e na Figura 34, para o dia ensolarado de inverno.

De maneira geral, observa-se que os níveis de iluminância fornecidos pelo tubo solar no verão são sempre maiores que no inverno, por conta da maior intensidade da radiação solar e da posição solar nas duas estações.

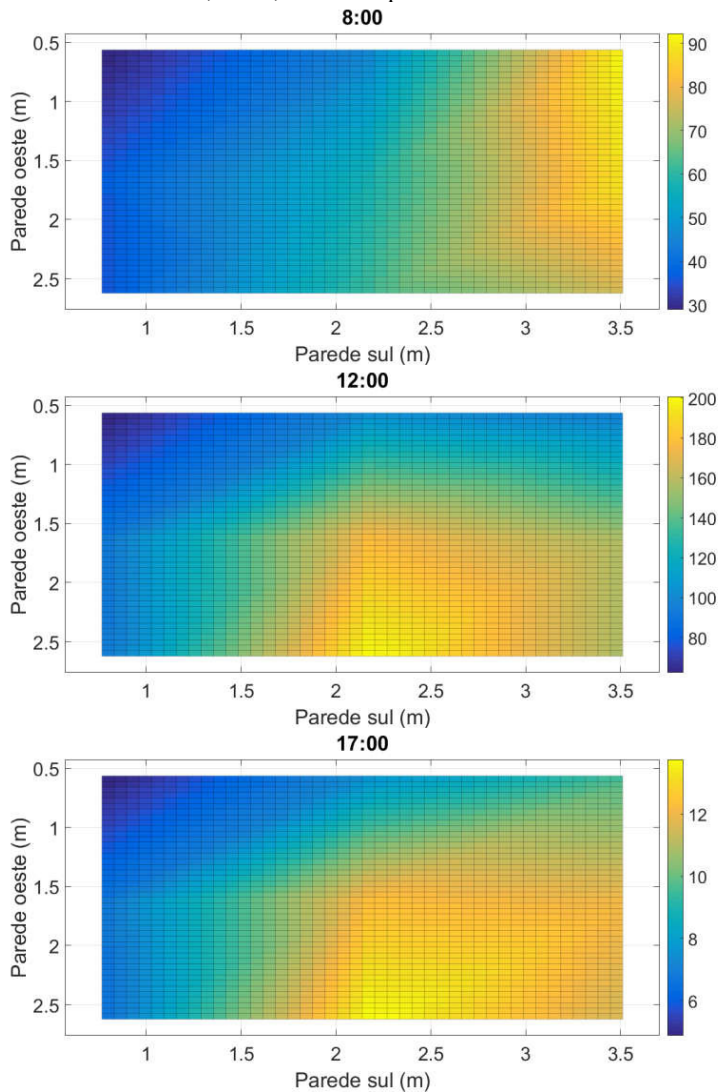
Observando os três horários de ambos os dias, verifica-se um comportamento diferente do esperado no período da manhã. Isto acontece porque as janelas da edificação são de vidro, e as cortinas não são totalmente opacas, favorecendo a entrada de luz pelas janelas, que estão orientadas para o leste. Por conta da intensidade da radiação solar neste horário e da altura solar, a contribuição do tubo solar não fica tão evidente. Ainda assim, para este horário, é possível verificar pontos com iluminância de até 250 lx para o dia de verão, e pouco mais de 90 lx para o dia de inverno.

A medida em que a altura solar aumenta, a contribuição do tubo solar na iluminação se torna mais evidente, especialmente no horário do meio dia. Para este horário, no verão, é possível observar que existem alguns pontos em que a iluminância fornecida pelo tubo é superior ao que é exigido pela norma (500 lx) e atinge valores da ordem de 600 lx. No dia de inverno, apesar de não ser suficiente para garantir o mínimo de iluminância exigido, o tubo solar contribui para a iluminação da sala, de maneira que seria necessário utilizar apenas parte do sistema de iluminação artificial.

Observando o comportamento da radiação solar no dia de verão (Figura 21), observa-se que por volta das 18h do dia ensolarado, a radiação solar apresenta níveis da ordem de 200 W/m². Isto justifica o valor de iluminância da ordem de 120 lx observado neste horário para um dia ensolarado de verão. Para o dia de inverno, a última medição foi realizada as 17h, quando o sol está quase se pondo, de maneira que os níveis de iluminância registrados ficaram próximos dos 12 lx. Por conta da posição solar e de as cortinas não serem totalmente opacas, a contribuição do tubo também fica pouco evidente neste horário.

Figura 33 – Iluminância, em lx, fornecida pelo tubo solar em um dia de K_T 0,69.

Fonte: do autor.

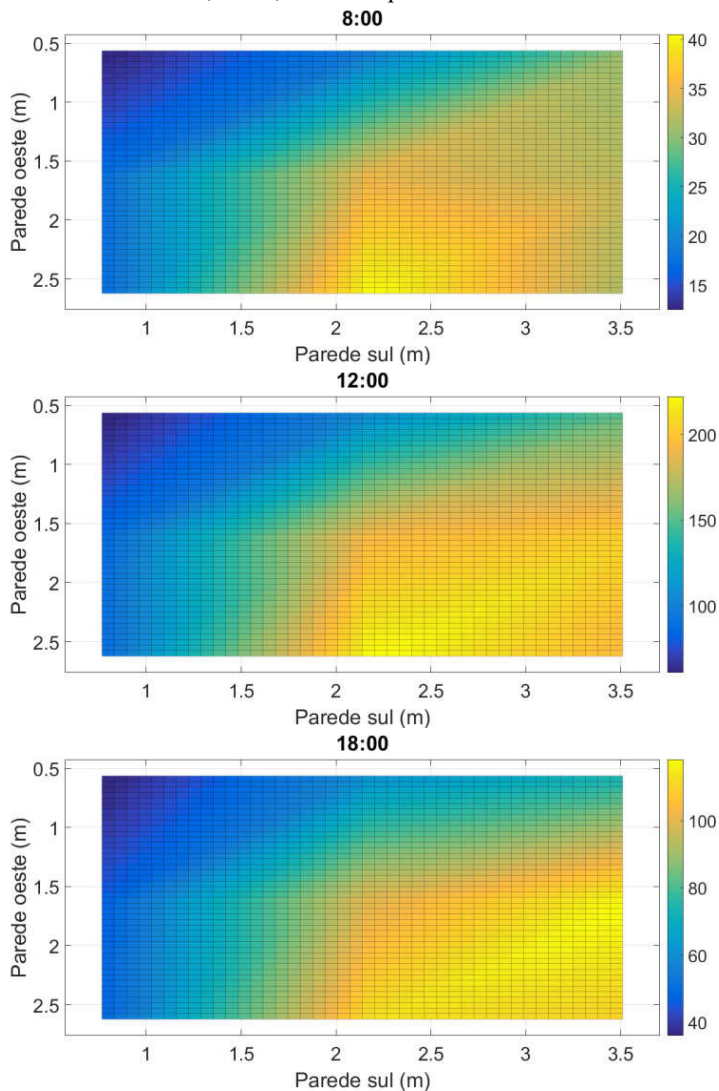
Figura 34 – Iluminância, em lx, fornecida pelo tubo solar em um dia de K_T 0,62.

Fonte: do autor.

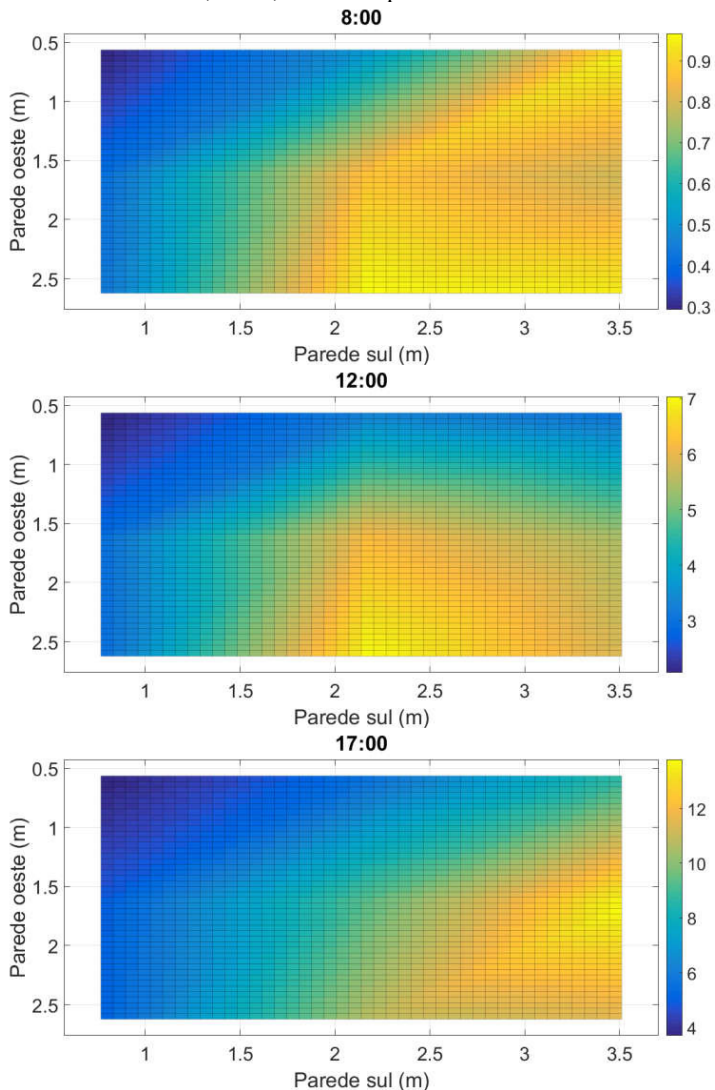
Para dias nublados, são observados níveis mais baixos de iluminância, como mostram as Figuras 35 e 36. Apesar disso, enfatiza-se que a presença do tubo solar pode contribuir para a redução do uso da

iluminação artificial. Observa-se que, para o horário do meio dia, a iluminância fornecida pelo tubo solar corresponde à quase metade do mínimo exigido pela norma.

Figura 35 – Iluminância, em lx, fornecida pelo tubo solar em um dia de K_T 0,33.



Fonte: do autor.

Figura 36 – Iluminância, em lx, fornecida pelo tubo solar em um dia de K_T 0,09.

Fonte: do autor.

Como já mencionado, a presença de cortinas que não são totalmente opacas permite que parte da radiação solar, neste caso, difusa, adentre na sala. Por esta razão, observa-se que próximo das janelas os

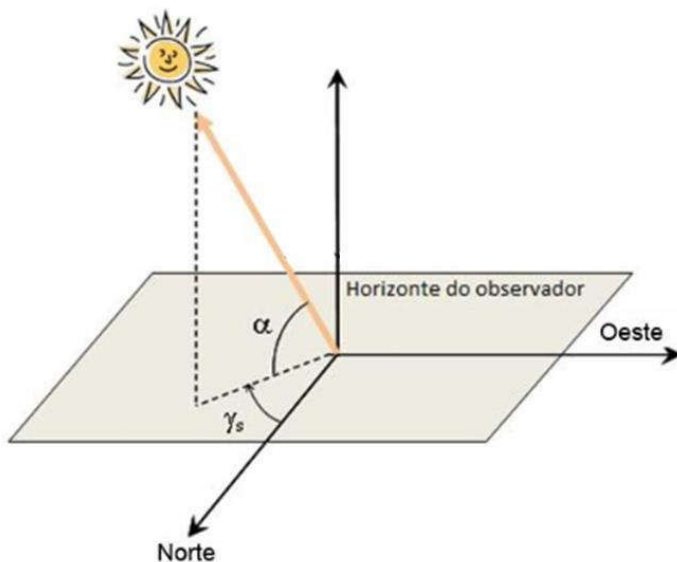
níveis de iluminância são semelhantes ao que é verificado logo abaixo do tubo solar.

4.1.3.5 Distribuição temporal da iluminância

As subseções a seguir contêm mapas que ilustram a variação da iluminância em função do azimute solar (γ_s) e da altura solar (α) para cada ponto das duas áreas técnicas em análise (conforme Figura 9).

Destaca-se que o azimute solar é o ângulo entre a projeção dos raios do Sol no plano horizontal e a direção Norte-Sul. A altura solar consiste no ângulo entre os raios solares e sua projeção sobre o plano horizontal. Isto pode ser observado na Figura 37.

Figura 37 – Ilustração dos ângulos γ_s e α .



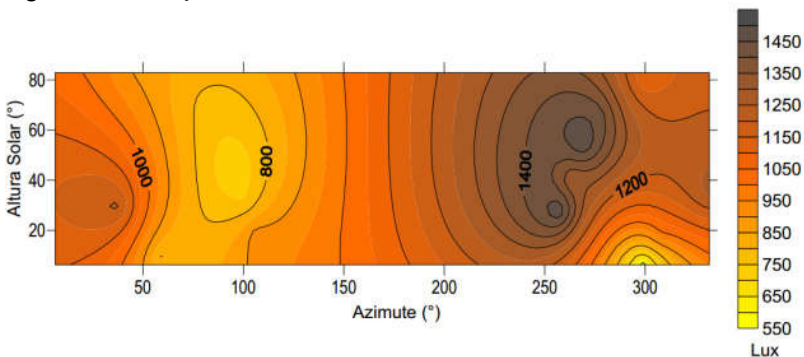
Fonte: adaptado de Pinho; Galdino (2014).

As figuras apresentadas referem-se ao melhor caso, isto é, dias ensolarados. Os mapas referentes aos dias nublados encontram-se no Apêndice D. Na análise da AT 1, foram suprimidos os quatro pontos dos extremos da sala, uma vez que estes pontos não pertencem ao plano de trabalho.

4.1.3.5.1 Área Técnica 1

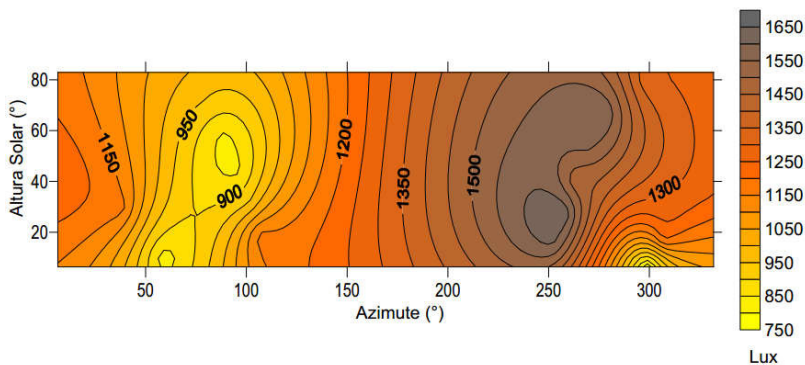
Observando as Figuras 38 e 39, verifica-se um padrão na variação temporal da iluminância nos pontos 2 e 3. Nestes pontos, localizados a oeste da sala, desvios azimutais entre 200° e 300° apresentam maiores níveis de iluminância, para alturas solares variando entre 10° e 80° . No entanto, para os demais ângulos de azimute e altura solar, não foram registrados valores de iluminância menores de 500 lx.

Figura 38 – Variação da iluminância no Ponto 2 da AT 1.



Fonte: do autor.

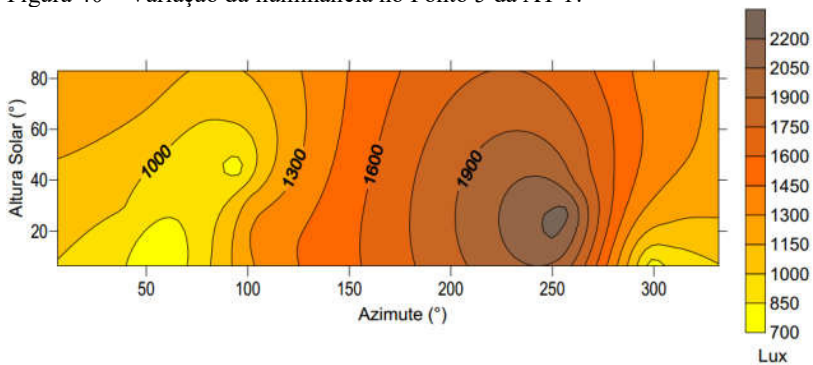
Figura 39 – Variação da iluminância no Ponto 3 da AT 1.



Fonte: do autor.

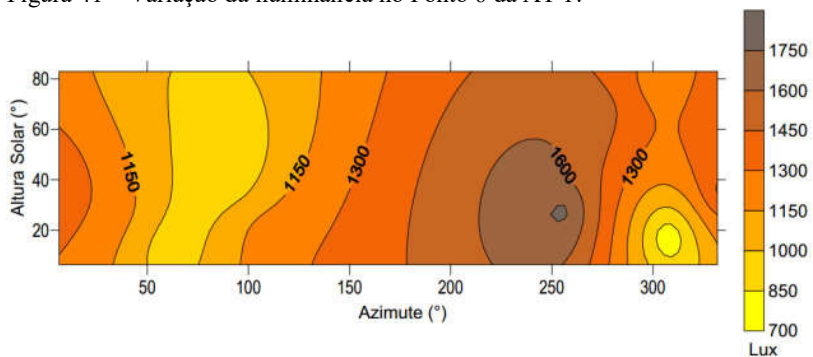
Um padrão semelhante é observado entre os pontos 5, 6 e 7, conforme ilustram as Figuras 40, 41 e 42.

Figura 40 – Variação da iluminância no Ponto 5 da AT 1.



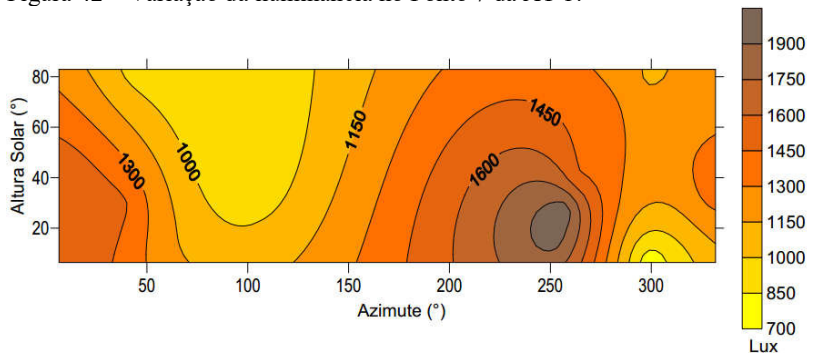
Fonte: do autor.

Figura 41 – Variação da iluminância no Ponto 6 da AT 1.



Fonte: do autor.

Figura 42 – Variação da iluminância no Ponto 7 da AT 1.



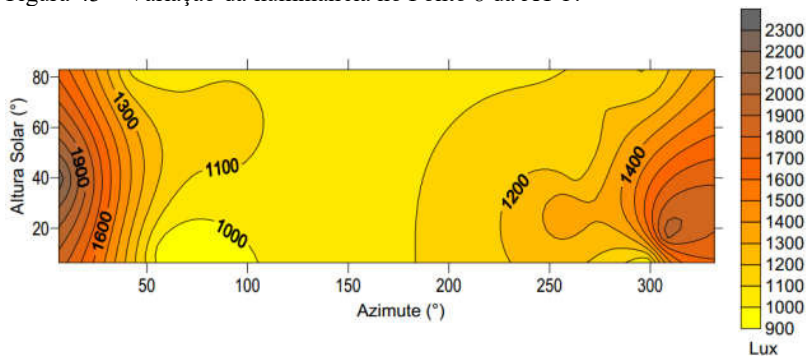
Fonte: do autor.

Desvios azimutais próximos de 250° e alturas solares entre 10° e 40° provocam níveis de iluminância variando entre 1600 e 2200 lx. Como observado nos pontos anteriores já mencionados, também não são observados níveis de iluminância inferiores a 500 lx.

O comportamento da iluminância nestes pontos se deve a posição dos mesmos, isto é, os mesmos estão localizados a oeste da sala, onde sofrem influência principalmente das aberturas sul e oeste, bem como da porta, situada ao norte da sala.

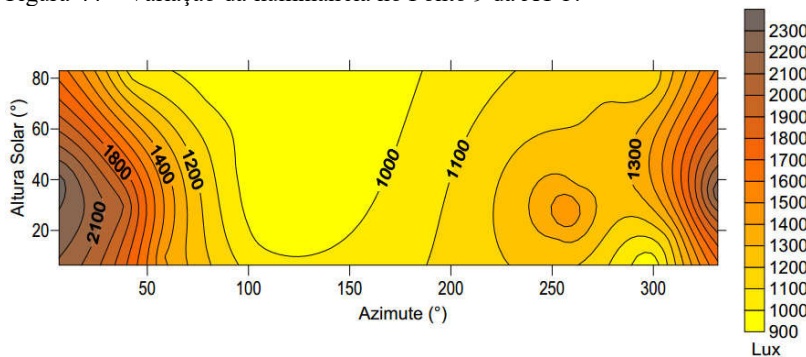
A partir do ponto 8, o comportamento passa a diferir do padrão apresentado até então. Nos pontos 8 e 9, posicionados em frente a porta, os níveis de iluminância mais elevados foram registrados nos azimutes menores de 50° e maiores 300° , conforme se observa nas Figuras 43 e 44.

Figura 43 – Variação da iluminância no Ponto 8 da AT 1.



Fonte: do autor.

Figura 44 – Variação da iluminância no Ponto 9 da AT 1.

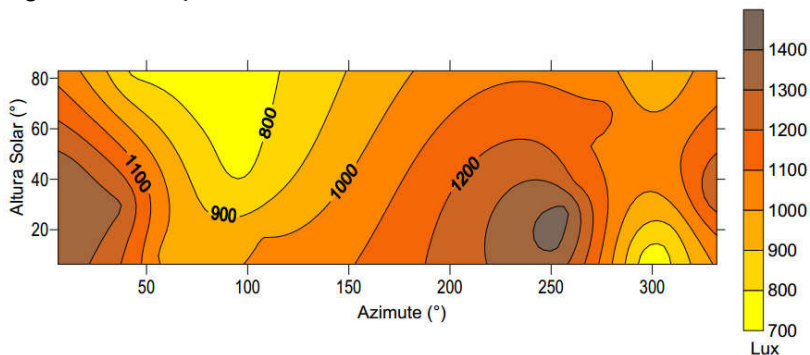


Fonte: do autor.

A variação da altura solar, por outro lado, não influencia significativamente na variação da iluminância neste caso.

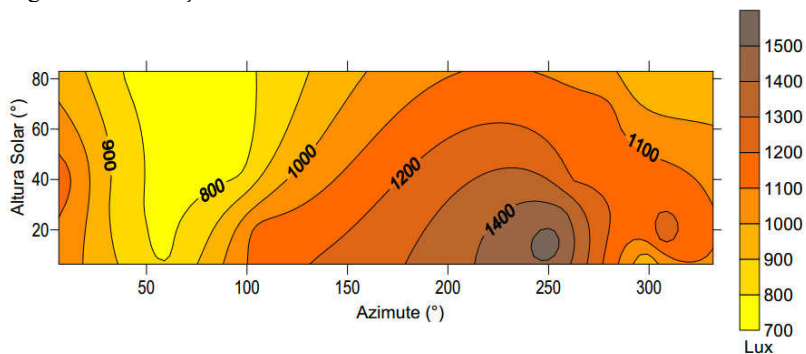
Nos pontos 10 e 11, cuja representação da distribuição da iluminância encontra-se nas Figuras 45 e 46, o comportamento é semelhante ao observado nos pontos 5, 6 e 7. Isto acontece por conta da localização destes pontos, que ficam no centro da sala.

Figura 45 – Variação da iluminância no Ponto 10 da AT 1.



Fonte: do autor.

Figura 46 – Variação da iluminância no Ponto 11 da AT 1.

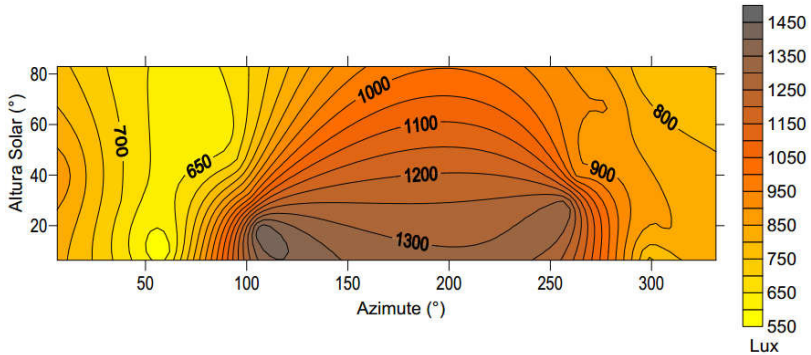


Fonte: do autor.

O ponto 12 localiza-se próximo a parede sul, onde sofre influência da iluminância proveniente principalmente de uma janela a leste da edificação. Portanto, os maiores níveis de iluminância foram registrados em alturas solares menores. Quanto aos ângulos azimutais, a faixa em que se encontram os maiores níveis de iluminância está entre 100° e 250°.

Para este ponto, mesmo as posições solares mais desfavoráveis apresentaram níveis de iluminância acima dos 500 lx, conforme a Figura 47.

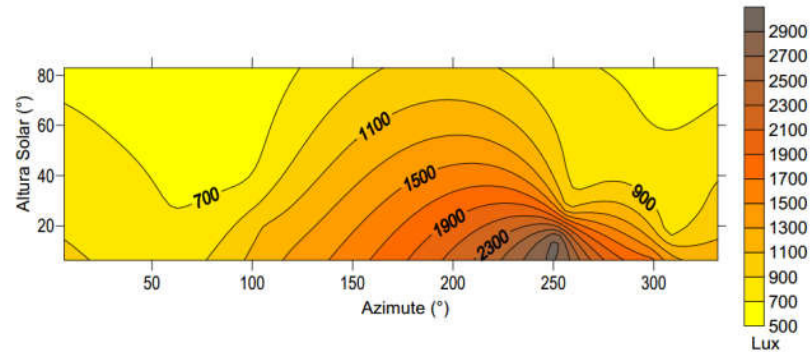
Figura 47 – Variação da iluminância no Ponto 12 da AT 1.



Fonte: do autor.

Para o ponto 14, o nível de iluminância aumenta conforme a altura solar diminui, e os ângulos azimutais que ocasionam iluminâncias mais elevadas giram em torno de 250°. A medida que o ângulo se afasta de 250°, para mais ou para menos, a tendência da iluminância é diminuir, conforme a Figura 48.

Figura 48 – Variação da iluminância no Ponto 14 da AT 1.

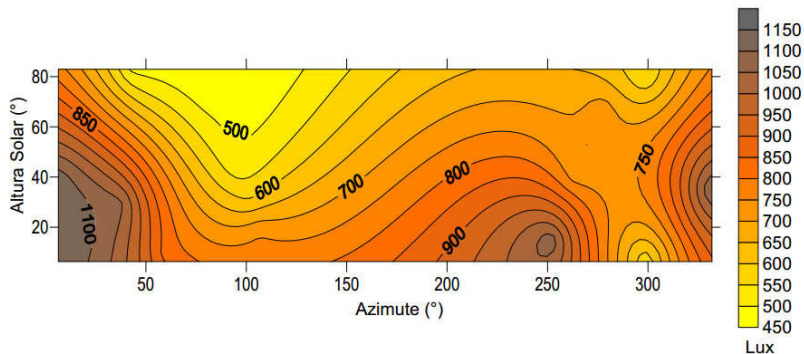


Fonte: do autor.

Da mesma maneira, alturas solares menores favorecem o aumento da iluminância no ponto 15, conforme a Figura 49, entre ângulos

azimutais de 50° a 300° . Para azimutes com menos de 50° e mais de 300° , a altura solar apresenta menor influência.

Figura 49 – Variação da iluminância no Ponto 15 da AT 1.

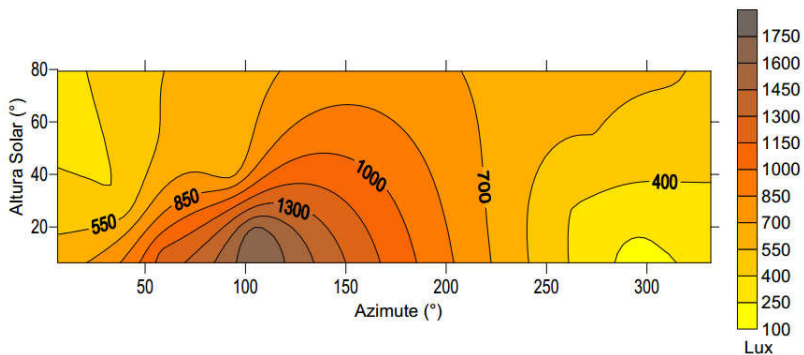


Fonte: do autor.

4.1.3.5.2 Área Técnica 2

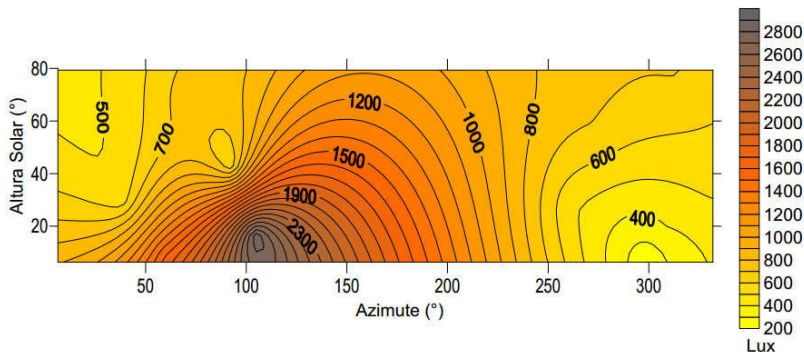
Nos pontos 1 e 2 da AT 2, a variação da iluminância se dá de forma semelhante, conforme observa-se nas Figuras 50 e 51. Nestes pontos, a iluminância é mais intensa em alturas solares inferiores a 20° e ângulos azimutais próximos de 100° .

Figura 50 – Variação da iluminância no Ponto 1 da AT 2.



Fonte: do autor.

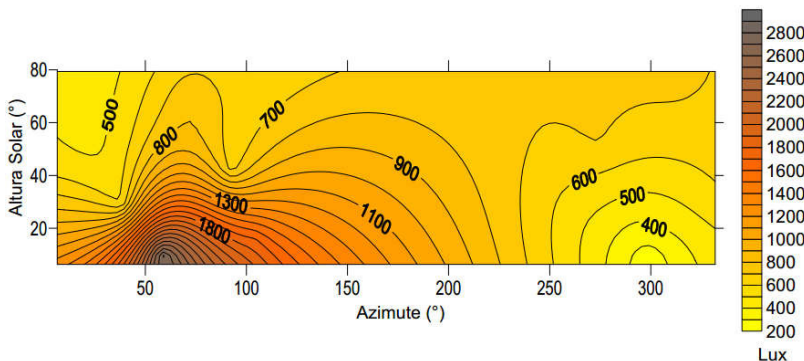
Figura 51 – Variação da iluminância no Ponto 2 da AT 2.



Fonte: do autor.

No ponto 3, a altura solar influencia na iluminância da mesma forma que nos pontos 1 e 2. O ângulo azimutal que favorece o aumento da iluminância neste ponto, por outro lado, está próximo dos 50°. Isto pode ser observado na Figura 52. Neste caso, assim como nos dois pontos já mencionados, ângulos azimutais mais altos, provocam diminuições no nível de iluminância, especialmente nos ângulos próximos de 300°.

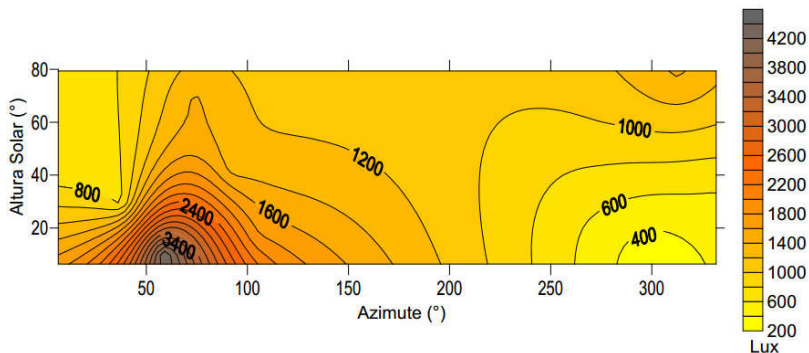
Figura 52 – Variação da iluminância no Ponto 3 da AT 2.



Fonte: do autor.

Devido a posição dos pontos 3 e 4, situados ao sul da AT 2, o mesmo comportamento da iluminância no ponto 3 pode ser observado no ponto 4, conforme a Figura 53. Entretanto, observa-se menor influência da altura solar em relação ao ponto 3, por conta da proximidade do ponto 4 com o tubo solar.

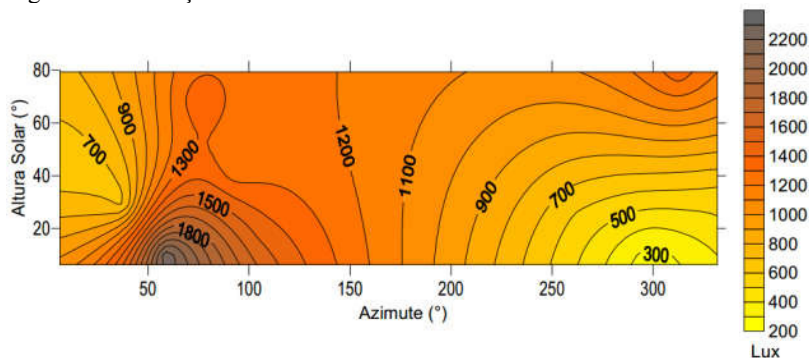
Figura 53 – Variação da iluminância no Ponto 4 da AT 2.



Fonte: do autor.

O ponto 5 também está localizado próximo do tubo solar. Este dispositivo permite o aproveitamento da iluminação natural mesmo em alturas solares maiores, de maneira que esta passa a ter menos influência sobre a iluminância entre ângulos azimutais variando de 100° a 200° . O ângulo azimutal, por outro lado, continua influenciando significativamente na variação da iluminância neste ponto, conforme a Figura 54.

Figura 54 – Variação da iluminância no Ponto 5 da AT 2.

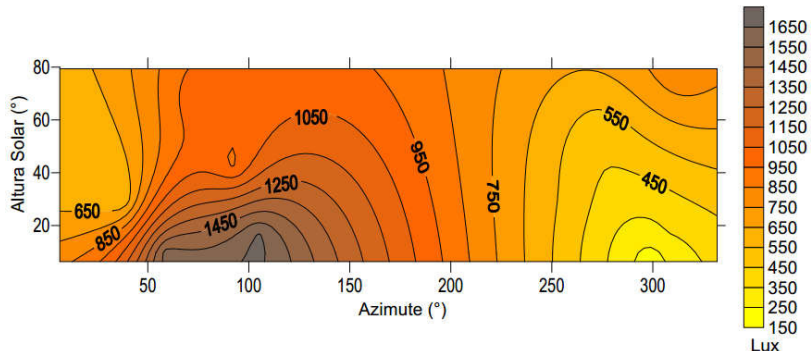


Fonte: do autor.

No ponto 6, alturas solares menores provocam aumentos na iluminância entre os ângulos azimutais de 0° e 200° . Para azimutes entre 200° e 250° , a altura solar não apresenta influência significativa. Alturas solares maiores favorecem o aumento da iluminância nos demais ângulos

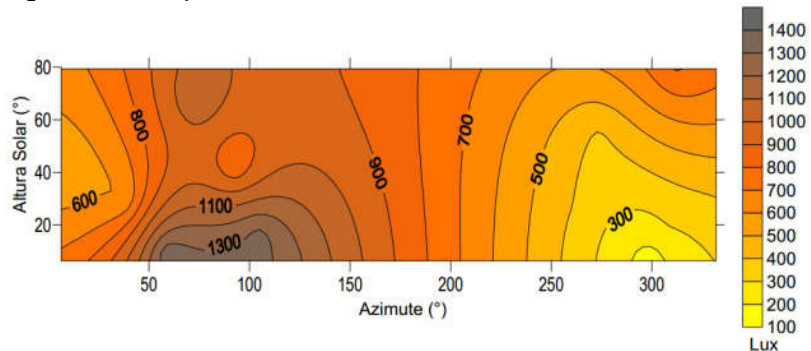
azimutais. Este comportamento pode ser observado na Figura 55 e se repete na Figura 56, referente ao ponto 7.

Figura 55 – Variação da iluminância no Ponto 6 da AT 2.



Fonte: do autor.

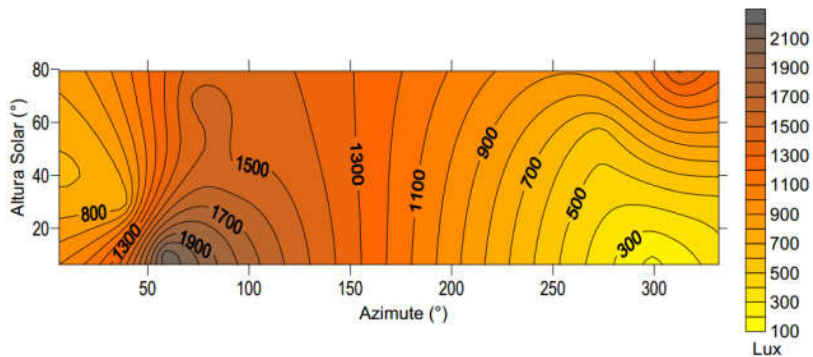
Figura 56 – Variação da iluminância no Ponto 7 da AT 2.



Fonte: do autor.

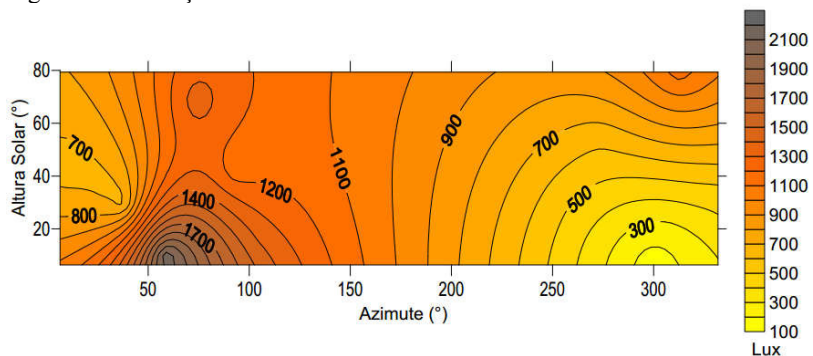
A variação da iluminância nos pontos 8 e 9, representada nas Figuras 57 e 58, sofre maior influência da altura solar em ângulos azimutais menores que 125° e maiores que 225° . Até 125° de desvio azimutal, a diminuição da altura solar provoca aumento no nível de iluminância, enquanto a partir de 225° de desvio azimutal, o nível de iluminância aumenta com o aumento da altura solar. Para desvios azimutais entre 125° e 225° , a altura solar apresenta pouca influência.

Figura 57 – Variação da iluminância no Ponto 8 da AT 2.



Fonte: do autor.

Figura 58 – Variação da iluminância no Ponto 9 da AT 2.



Fonte: do autor.

Ressalta-se que os mapas apresentados anteriormente são referentes a dias ensolarados, e que os mapas para dias nublados encontram-se no Apêndice D.

4.1.4 Índice de transmissividade atmosférica e dias representativos

A partir dos dados coletados pela estação meteorológica, foi calculado o K_T médio mensal para os dois anos de funcionamento da estação meteorológica. Estes valores podem ser encontrados na Tabela 16. Ressalta-se que, devido a um problema, os dados do mês de março de 2018 foram perdidos e, portanto, não foi calculado o índice para este mês.

Para fins comparativos, calculou-se o K_T mensal para um ano típico de referência (TRY, do inglês *Typical Referential Year*) na cidade de Araranguá. Os dados do arquivo climático são referentes ao período entre 2001 e 2010.

Tabela 16 – K_T médio mensal, calculado através dos dados da estação meteorológica da edificação.

Mês	2017	2018	Média	TRY
Janeiro	0,45	0,43	0,44	0,44
Fevereiro	0,45	0,52	0,49	0,41
Março	0,44	-	0,44	0,48
Abril	0,38	0,55	0,47	0,52
Maiο	0,25	0,47	0,36	0,52
Junho	0,43	0,43	0,43	0,47
Julho	0,53	0,40	0,47	0,44
Agosto	0,47	0,47	0,47	0,51
Setembro	0,29	0,36	0,33	0,36
Outubro	0,44	0,40	0,42	0,40
Novembro	0,47	0,50	0,49	0,36
Dezembro	0,44	0,55	0,49	0,47

Fonte: do autor.

Os dados utilizados para criar o perfil de consumo foram os dados medidos pela estação meteorológica da planta, isto é, a média dos anos de 2017 e 2018.

O K_T médio para os meses mais quentes, calculado conforme os dados apresentados, foi de 0,46. Para os meses mais frios, o K_T médio foi de 0,42. Tendo como base a Figura 3, construiu-se a Tabela 17, que apresenta a porcentagem de dias ensolarados, nublados e intermediários durante um ano, para este caso.

Tabela 17 – Número de dias típicos presentes em um ano, em %.

Dia típico	% de dias		
	Ensolarado (E)	Intermediário (I)	Nublado (N)
Meses mais quentes	31,0	38,5	30,5
Meses mais frios	24,2	37,8	38,0

Fonte: do autor.

Os dados apresentados foram utilizados na construção dos perfis de iluminação utilizados na simulação no software eQUEST.

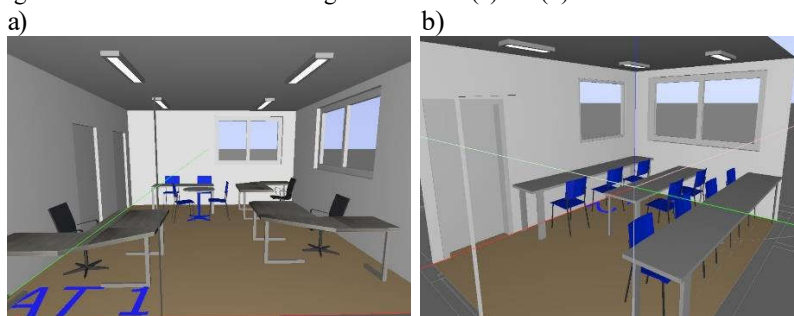
4.2 SIMULAÇÕES

Esta seção contém os resultados das simulações realizadas nos softwares DIALux e eQUEST.

4.2.1 Simulação luminotécnica

O resultado da modelagem das áreas analisadas da edificação, no software DIALux, pode ser visto na Figura 59.

Figura 59 – Resultado da modelagem das AT 1 (a) e 2 (b) no DIALux.



Fonte: do autor.

Após realizar a modelagem da edificação, foram simulados cenários em que o sistema de iluminação artificial complementasse a iluminação natural, nos momentos em que essa não fosse suficiente para suprir os 500 lx exigidos pela norma.

A Tabela 18 apresenta, para todos os horários, a fração de uso do sistema de iluminação artificial da AT 1, necessária em cada dia típico das duas estações analisadas.

Vale salientar que a edificação encerra suas atividades as 18h. Assim, a estimativa do uso do sistema de iluminação artificial para este horário (até as 19h) não será considerada para fins de simulação termoenergética.

Tabela 18 – Fração de uso do sistema de iluminação da AT 1, necessária para complementar a iluminação natural, em %.

Horário	Verão			Inverno		
	E	I	N	E	I	N
08h	0,0	23,8	21,3	0,0	55,5	75,0
09h	0,0	11,9	21,9	0,0	27,5	49,4
10h	0,0	0,0	22,5	0,0	0,0	23,8
11h	0,0	0,0	20,6	0,0	0,0	11,9
12h	0,0	0,0	18,8	0,0	0,0	0,0
13h	0,0	0,0	18,1	0,0	0,0	28,8
14h	0,0	0,0	17,5	0,0	0,0	57,5
15h	0,0	0,0	14,4	0,0	35,0	53,8
16h	0,0	0,0	11,3	0,0	70,0	50,0
17h	0,0	35,0	45,6	0,0	40,0	82,5
18h	0,0	70,0	80,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: do autor.

Para a AT 2, estes valores são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Fração de uso do sistema de iluminação da AT 2, necessária para complementar a iluminação natural, em %.

Horário	Verão			Inverno		
	E	I	N	E	I	N
08h	0,0	0,0	100,0	0,0	50,0	100,0
09h	0,0	0,0	93,8	0,0	25,0	100,0
10h	0,0	0,0	87,5	0,0	0,0	100,0
11h	0,0	0,0	63,8	0,0	0,0	100,0
12h	0,0	0,0	40,0	0,0	0,0	100,0
13h	0,0	0,0	38,8	5,0	0,0	80,0
14h	0,0	0,0	37,5	10,0	0,0	60,0
15h	6,3	7,5	28,8	27,5	25,0	65,0
16h	12,5	15,0	20,0	45,0	50,0	70,0
17h	16,3	20,0	57,5	67,5	97,5	95,0
18h	20,0	25,0	95,0	100,00	100,0	100,0

Fonte: do autor.

Desconsiderando a presença do tubo solar, foi estimada a fração do sistema de iluminação necessária para complementar a iluminação natural na AT 2. A Tabela 20 apresenta tais estimativas.

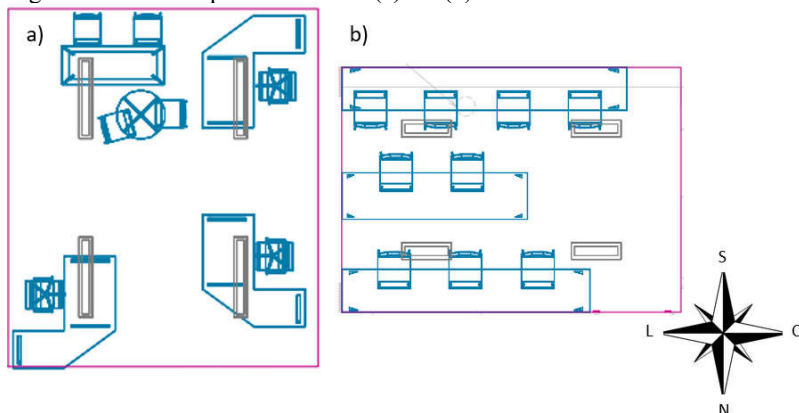
Tabela 20 – Fração de uso do sistema de iluminação da AT 2, necessária para complementar a iluminação natural em ausência do tubo solar, em %.

Horário	Verão			Inverno		
	E	I	N	E	I	N
08h	0,0	0,0	100,00	0,0	53,4	100,0
09h	7,1	0,0	95,2	5,0	33,1	100,0
10h	14,1	0,0	90,3	10,0	12,8	100,0
11h	7,1	0,0	75,8	14,6	12,1	100,0
12h	0,0	0,0	61,3	19,1	11,3	100,0
13h	17,8	0,0	63,6	23,4	10,3	82,3
14h	35,6	0,0	65,9	27,7	9,2	64,5
15h	44,4	14,3	56,4	38,4	32,5	69,6
16h	53,1	28,5	46,8	49,1	55,7	74,6
17h	42,6	33,9	72,2	69,2	97,9	95,7
18h	32,0	39,3	97,5	100,00	100,0	100,0

Fonte: do autor.

A partir das simulações, o programa gera mapas de distribuição de iluminância, neste caso, proveniente da iluminação artificial. A seguir serão apresentados mapas que apresentam a distribuição da iluminância complementar necessária em dias nublados de verão e inverno, para as duas áreas técnicas, em três horários do dia. Para melhor observação dos mapas, a Figura 60 ilustra a posição dos móveis e luminárias nas salas.

Figura 60 – Vista superior das AT 1 (a) e 2 (b) simuladas no DIALux.



Fonte: do autor.

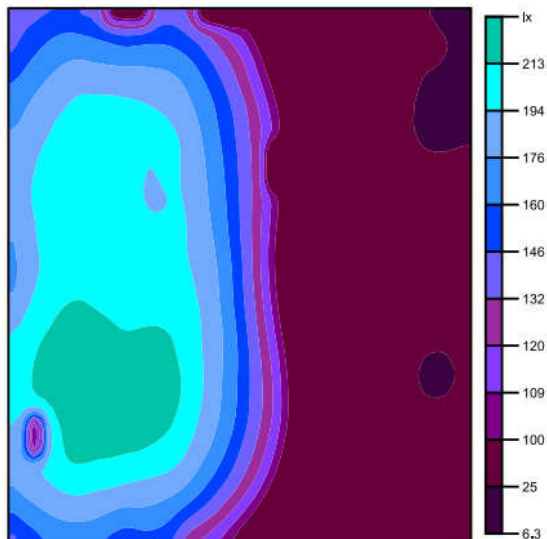
Conforme observado na Figura 61, o nível de iluminância necessário na parte leste da sala é maior que o necessário no lado oeste, por conta das aberturas da sala. Entretanto, a iluminância máxima necessária corresponde a menos da metade do exigido pela norma.

Comparando a um dia de inverno no mesmo horário, verifica-se que no dia de inverno a necessidade de iluminação artificial é maior, também por conta do horário de nascimento do Sol. A simulação da distribuição da iluminância neste caso pode ser observado na Figura 62.

A Figura 63 apresenta o uso do sistema de iluminação artificial ao meio dia de um dia nublado de verão. Mais uma vez, a maior necessidade de iluminação artificial se dá no lado leste da sala. Para o dia de inverno, nesse horário não foi necessário o uso do sistema de iluminação artificial nos pontos que fazem parte das áreas de trabalho. Desta forma, para este horário não foi simulado o uso do sistema de iluminação artificial.

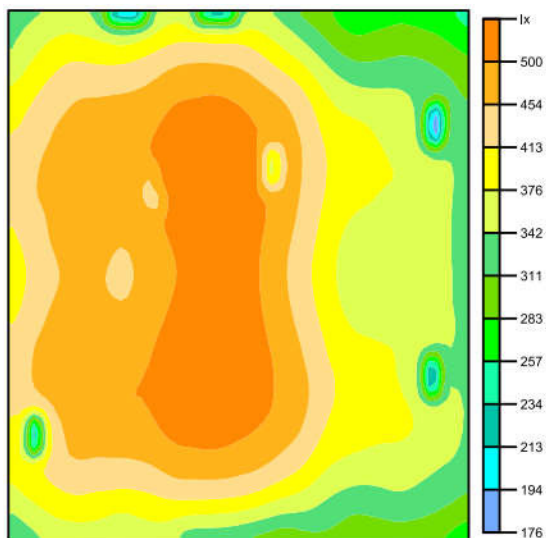
No fim do dia, o perfil de uso do sistema de iluminação artificial foi semelhante na AT 1, para o dia nublado das duas estações. A diferença entre os dois casos é o fato de, no inverno, o Sol se por mais cedo. Portanto, enquanto no dia nublado de verão as luminárias precisam ser acesas as 18h, no inverno isto ocorre por volta das 17h (Figuras 64 e 65).

Figura 61 – Distribuição da iluminância complementar, em lx, necessária às 8h de um dia nublado de verão na AT 1.



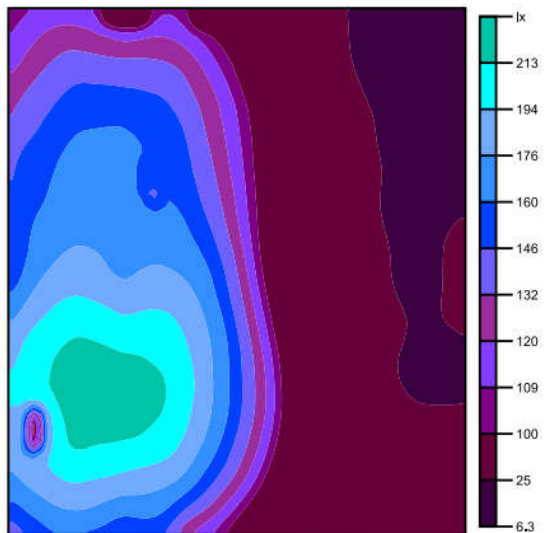
Fonte: do autor.

Figura 62 – Distribuição da iluminância complementar, em lx, necessária às 8h de um dia nublado de inverno na AT 1.



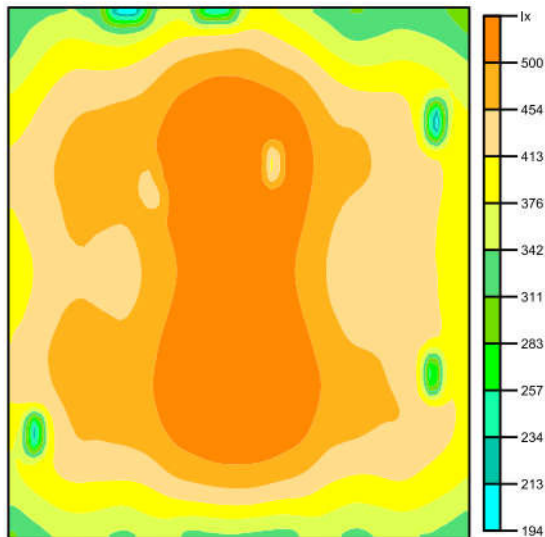
Fonte: do autor.

Figura 63 – Distribuição de iluminância complementar, em lx, necessária às 12h de um dia nublado de verão na AT 1.



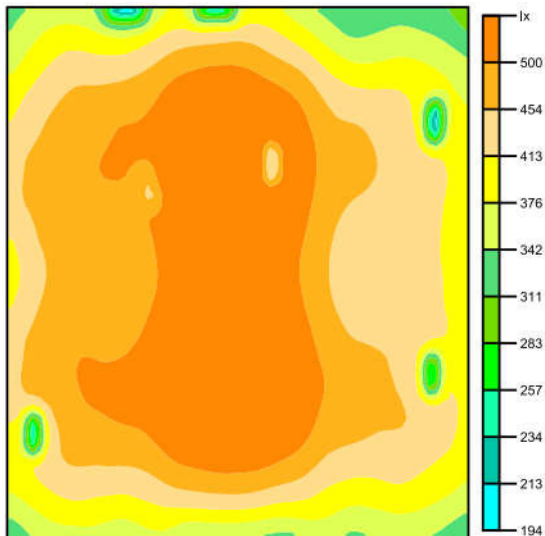
Fonte: do autor.

Figura 64 – Distribuição da iluminância complementar, em lx, necessária às 18h de um dia nublado de verão na AT 1.



Fonte: do autor.

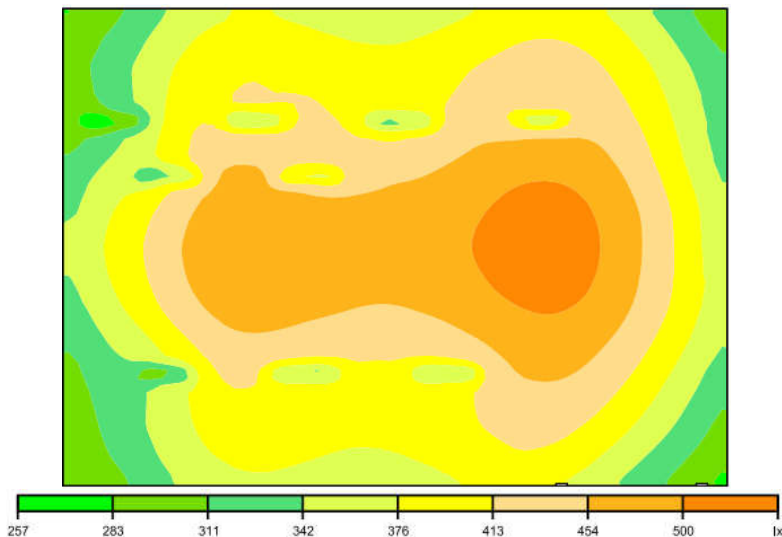
Figura 65 – Distribuição da iluminância complementar, em lx, necessária às 17h de um dia nublado de inverno na AT 1.



Fonte: do autor.

Na AT 2, foram necessárias 100% das luminárias em funcionamento no horário das 8h, conforme observa-se na Tabela 19. A Figura 66 ilustra a distribuição da iluminância neste horário para os dois dias nublados.

Figura 66 – Distribuição da iluminância complementar, em lx, necessária às 8h de um dia nublado de inverno e verão na AT 2.



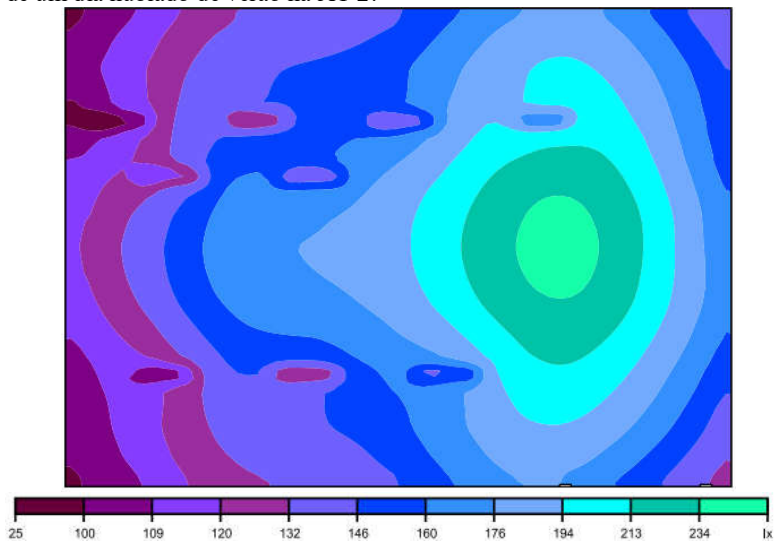
Fonte: do autor.

Ao meio dia do dia nublado de inverno, também foi necessário o uso de 100% do sistema de iluminação artificial na AT 2. Assim, a distribuição da iluminância permanece a mesma observada no horário das 8h.

Já no dia de verão, a necessidade maior de iluminação artificial ocorreu na face oeste da sala, uma vez que as aberturas se localizam na parede leste. A distribuição da iluminância neste caso pode ser observada na Figura 67.

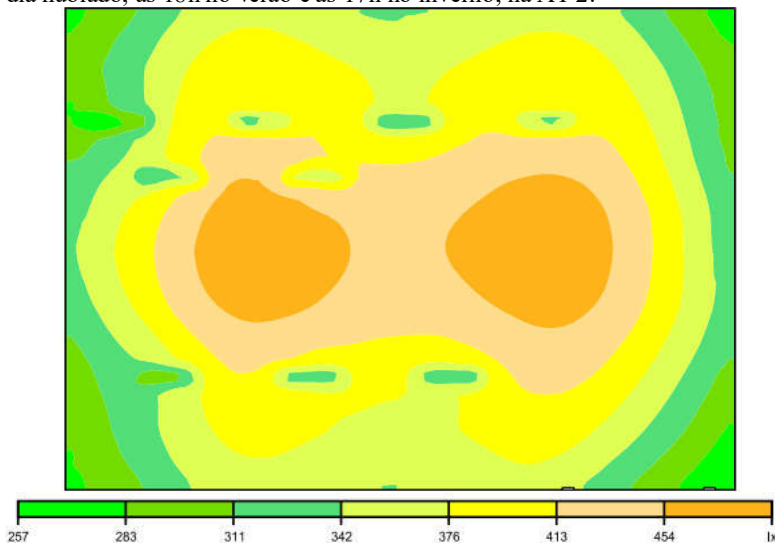
No fim do dia, observa-se que a necessidade do uso do sistema artificial aumenta. A simulação deste horário pode ser observada na Figura 68. Destaca-se que este comportamento se repete para as 17h do dia de inverno.

Figura 67 – Distribuição de iluminância complementar, em lx, necessária às 12h de um dia nublado de verão na AT 2.



Fonte: do autor.

Figura 68 – Distribuição de iluminância complementar, em lx, necessária em um dia nublado, às 18h no verão e às 17h no inverno, na AT 2.



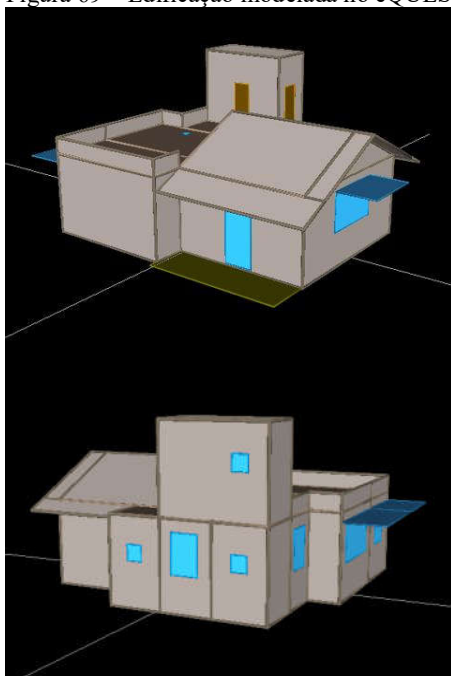
Fonte: do autor.

Os demais mapas, referentes a outros horários e dias típicos, podem ser encontrados no Apêndice E.

4.2.2 Simulação termoenergética

A planta piloto bioclimática, localizada no CTS da Universidade Federal de Santa Catarina, foi modelada no software de análise termoenergética. O resultado da modelagem da edificação no software pode ser visto na Figura 69.

Figura 69 – Edificação modelada no eQUEST.



Fonte: do autor.

O consumo de energia elétrica com os equipamentos se manteve o mesmo para as duas edificações, uma vez que sua utilização não sofre influência das estratégias bioclimáticas. A média mensal deste consumo de energia elétrica foi de 130,90 kWh, que corresponde a um consumo anual de 1570,90 kWh.

A energia elétrica destinada para a iluminação dos ambientes encontra-se na Tabela 21.

Tabela 21 – Consumo de energia com o sistema de iluminação artificial, em kWh.

Mês	Com estratégias	Sem estratégias
Janeiro	21,8	30,4
Fevereiro	20,7	28,9
Março	25,1	35,0
Abril	51,4	56,1
Maiο	56,6	61,7
Junho	56,6	61,7
Julho	51,4	56,1
Agosto	59,1	64,5
Setembro	51,4	56,1
Outubro	22,9	32,0
Novembro	21,8	30,4
Dezembro	21,8	30,4
Total	460,6	543,3

Fonte: do autor.

Observa-se que o consumo de energia elétrica com iluminação artificial é cerca de 18% maior na edificação sem estratégias do que na edificação com estratégias bioclimáticas. Esta diferença se deve ao tubo solar, cuja contribuição não foi considerada na edificação sem estratégias.

A Tabela 22 apresenta os valores de consumo de energia com resfriamento e aquecimento dos ambientes. O sistema de ventilação mencionado é o responsável por realizar a troca de ar enquanto os equipamentos de climatização estão em funcionamento.

Observa-se que, durante quase todos os meses, o consumo de energia elétrica com resfriamento é menor na edificação com estratégias, indicando que a temperatura interna se mantém abaixo dos 24°C com mais frequência do que na outra edificação.

Durante os meses de junho e julho, entretanto, o consumo com resfriamento é maior na edificação com estratégias. Aliando este dado ao fato de que o consumo com aquecimento é maior na edificação sem estratégias, conclui-se que as temperaturas no interior desta edificação,

durante o período mais frio, são mais baixas do que na que faz uso de estratégias bioclimáticas.

Tabela 22 – Consumo mensal de energia, em kWh, referente a climatização para as edificações com estratégias bioclimáticas (CEB) e sem as estratégias (SEB).

Mês	Resfriamento		Aquecimento		Ventilação	
	CEB	SEB	CEB	SEB	CEB	SEB
Jan	123,5	197,9	0,00	0,2	15,5	28,0
Fev	132,4	219,8	0,00	0,00	16,3	30,6
Mar	151,0	241,5	0,00	0,00	18,7	33,4
Abr	99,6	141,9	0,00	1,7	12,5	19,9
Mai	67,0	75,7	1,0	17,8	8,5	12,4
Jun	23,9	16,5	2,8	53,2	3,3	8,8
Jul	16,6	6,0	3,5	54,4	2,4	7,7
Ago	62,3	69,3	0,3	28,2	8,0	12,5
Set	58,7	55,7	0,2	7,9	7,7	8,9
Out	80,8	100,0	0,10	2,6	10,3	14,2
Nov	137,0	204,9	0,00	0,00	17,2	28,6
Dez	150,7	256,8	0,00	0,00	19,0	36,3
Tot	1103,40	1586,1	7,8	166,0	139,40	241,3

Fonte: do autor.

Comparando-se os valores totais para as edificações com e sem estratégias bioclimáticas, observa-se que a planta sem estratégias apresentou consumo de energia destinado ao resfriamento cerca de 43% maior do que a edificação bioclimática. Para o aquecimento, o aumento do consumo foi de aproximadamente 2000% e cerca de 72% para a ventilação.

Em termos de consumo anual, a edificação sem estratégias apresentou consumo de 4107,4 kWh, enquanto que a edificação bioclimática consumiu 3282,1 kWh, um consumo cerca de 25% menor.

A Figura 70 ilustra o comparativo do consumo mensal total de energia elétrica das duas edificações. Nela, as barras hachuradas correspondem a edificação sem estratégias bioclimáticas.

A partir dos relatórios gerados pelo programa, verifica-se que os picos de consumo com a climatização de ambientes também diferem de uma edificação para outra. Na Tabela 23, estão listados os dias em que ocorrem os picos de consumo (horário e diário) na AT 1, para as duas edificações. Para a AT 2, estes valores encontram-se na Tabela 24.

Tabela 23 – Picos de consumo com condicionamento de ar na AT 1, para as edificações com e sem estratégias bioclimáticas.

Estratégias bioclimáticas	Com		Sem	
	Dia	kWh	Dia	kWh
Máximo consumo				
Resfriamento (horário)	21-dez	2,08	01-nov	5,32
Aquecimento (horário)	05-jun	0,84	31-jul	3,30
Resfriamento (diário)	29-dez	19,57	29-dez	43,44

Fonte: do autor.

Tabela 24 – Picos de consumo com condicionamento de ar na AT 2, para as edificações com e sem estratégias bioclimáticas.

Estratégias bioclimáticas	Com		Sem	
	Dia	kWh	Dia	kWh
Máximo consumo				
Resfriamento (horário)	30-mar	2,69	21-dez	4,51
Aquecimento (horário)	05-jun	0,44	05-jun	1,79
Resfriamento (diário)	29-dez	24,51	29-dez	40,29

Fonte: do autor.

Na AT 1, os picos de consumo com resfriamento ocorrem as 13h e 14h para as edificações comum e bioclimática, respectivamente. No caso do aquecimento, os horários coincidem para os dois casos, acontecendo as 8h. A diferença entre os dias de maior consumo está em torno de 121%.

Para a AT 2, os picos de consumo com resfriamento acontecem as 12h e 14h, respectivamente, para as edificações bioclimática e comum, e

os de resfriamento acontecem as 8h. A diferença entre os dias de maior consumo é de cerca de 64%.

Além da diferença no consumo de energia das duas edificações, observa-se ainda a diferença que existe entre as temperaturas no interior das mesmas. Levando em consideração que as duas edificações são climatizadas e isso interfere na temperatura interna, optou-se por apresentar a diferença média diária mensal entre a temperatura no interior das áreas climatizadas e a temperatura externa.

A partir dos dados expostos na Tabela 25, percebe-se que a edificação sem estratégias bioclimáticas sofre maior influência das condições climáticas externas, uma vez que a diferença média diária mensal entre as temperaturas é menor que na edificação bioclimática.

Tabela 25 – Diferença média diária mensal, em °C, entre T_{INT} e T_{EXT} .

Estratégias	AT 1		AT 2	
	Com	Sem	Com	Sem
Janeiro	1,60	1,51	2,32	2,05
Fevereiro	0,49	0,44	1,22	0,93
Março	0,99	0,69	1,71	1,22
Abril	2,77	1,37	3,27	1,97
Maiο	4,23	2,02	4,69	2,76
Junho	5,84	2,86	6,63	3,83
Julho	6,31	2,95	6,88	3,98
Agosto	5,67	2,93	6,17	3,79
Setembro	4,81	2,29	5,04	3,05
Outubro	4,00	2,11	4,39	2,83
Novembro	1,22	0,82	1,96	1,33
Dezembro	1,13	0,93	2,05	1,48
Anual	3,27	1,75	3,87	2,44

Fonte: do autor.

A diferença maior pode ser observada nos meses mais frios, em que a temperatura interna na edificação bioclimática chega a ser da ordem de 6°C, em média, mais alta que a temperatura externa.

Para os meses mais quentes, as diferenças mais altas da planta bioclimática se justificam pelo fato de que as estratégias garantem à edificação maior estabilidade térmica. A edificação comum, por outro

lado, possui amplitude térmica maior, especialmente pela ausência de isolamento térmico, e isto implica em uma redução da diferença média diária mensal de temperaturas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho analisou os impactos da utilização de estratégias passivas sobre o desempenho energético de uma edificação bioclimática, situada na zona bioclimática 2. Para tanto, foram monitoradas e registradas em base temporal as variáveis ambientais e realizadas simulações nos softwares DIALux e eQUEST.

A metodologia de avaliação aplicada neste trabalho mostrou-se eficaz, permitindo a análise das variáveis de forma integrada, verificando relações de causa e efeito. A mesma pode facilmente ser reproduzida em outras edificações, desde que hajam informações suficientes sobre a mesma, e/ou que seja possível obtê-las.

A temperatura média anual no ambiente externo foi de 20,4°C, com desvio padrão médio anual de 3,6°C. Internamente, a temperatura média registrada pela estação meteorológica foi cerca de 25% maior, com desvio padrão médio anual de 1,5°C. Os dados registrados pelo termohigrômetro apresentam aumento de 15% na temperatura média anual, em relação ao ambiente externo. O desvio padrão médio anual para estes dados foi de 1,7°C.

A partir da análise termohigrométrica, observou-se que existe maior estabilidade térmica dos ambientes internos frente às amplitudes externas registradas. Mesmo a AT 1, que apresentou maior influência das variações climáticas externas, manteve-se estável durante o período observado. Em ambos os ambientes, a temperatura ambiente média se manteve acima da temperatura ambiente média externa, por consequência do isolamento térmico.

Durante os meses mais frios, fica evidente a vantagem do uso das estratégias bioclimáticas para manter a temperatura ambiente em níveis de conforto térmico. Ressalta-se, contudo, que o fato de possuir a temperatura ambiente média interna mais elevada que a externa, não implica na ineficácia das estratégias para os meses mais quentes. Isto apenas indica a estabilidade térmica da edificação, que não apresenta quedas bruscas de temperatura durante o período da noite.

Em termos de umidade relativa, observou-se que a AT 1 apresentou maior amplitude e influência das condições higrométricas externas por conta de sua localização, semelhante ao ocorrido com a temperatura ambiente. Entretanto, frente às amplitudes registradas no exterior pela estação meteorológica, pode-se considerar que os resultados obtidos se mantiveram estáveis. A AT 2, sofrendo menor interferência das condições exteriores, apresentou amplitudes ainda menores.

A umidade relativa média anual do ambiente exterior foi de 83,5%, com desvio padrão médio anual de 12,6%. A umidade relativa média anual registrada no interior da edificação pela estação meteorológica foi cerca de 27% menor que a exterior, com desvio padrão de 6,7%. A partir dos dados do termohigrômetro, observou-se que a umidade relativa média interna é cerca de 20% menor que a externa, com desvio padrão médio anual 7,0%.

A análise da iluminância demonstrou, a partir dos resultados obtidos, que o aproveitamento da iluminação natural é uma estratégia simples, mas com resultados promissores. De acordo com a avaliação, a iluminação natural poderia substituir parcial ou totalmente a iluminação artificial, conforme as condições do céu, reduzindo significativamente o consumo de energia elétrica.

Aliando esta estratégia à correta divisão de circuitos do sistema de iluminação artificial, ou ainda automatizando este sistema para que seja possível fornecer apenas a iluminância necessária para atingir o que é requisitado pela norma, seria possível otimizar o uso da energia elétrica sem desprezar o conforto visual. As simulações realizadas no DIALux permitiram estimar o consumo de energia elétrica destinado a esse complemento de iluminância.

Por fim, as simulações termoenergéticas demonstraram a redução significativa no consumo de energia elétrica, resultante da aplicação das estratégias bioclimáticas, corroborando com o que consta na literatura.

De maneira geral, levando em consideração a menor necessidade de utilização dos sistemas de iluminação artificial e condicionamento de ar, o consumo energético da edificação bioclimática foi cerca de 25% menor que o consumo de uma edificação comum.

Diante do exposto, ressalta-se a importância do uso de estratégias passivas para atingir o conforto ambiental. Com isso, é possível obter melhor qualidade de vida, poupar recursos naturais e otimizar o uso da energia elétrica.

Por conta dos benefícios aos ocupantes da edificação previamente apresentados, é fundamental que esta seja uma alternativa, desde a fase de projeto, para melhorar o desempenho termoenergético deste setor de forma global.

5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de trabalhos futuros, destaca-se:

- Realizar a análise do conforto térmico por meio dos métodos adaptativos, comparando os resultados com o que foi obtido pelo método analítico de Fanger.
- Aplicar a metodologia desenvolvida neste trabalho para a análise de desempenho energético de edificações em distintas zonas bioclimáticas.
- Automatizar o sistema de iluminação artificial e de sombreamento, a fim de otimizar sua utilização e atender aos padrões da norma, evitando o ofuscamento e o desperdício de energia elétrica.

5.2 PUBLICAÇÕES

Artigos publicados:

SILVA, N. R. et al. Determinação e análise de indicadores de conforto térmico em uma planta piloto bioclimática. **Anais do 6º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense**. Criciúma, 2017.

BILÉSIMO, T. L.; RAMPINELLI, G. A.; MARCELINO, R. Modelagem e simulação do desempenho termoenergético de uma edificação com arquitetura bioclimática. **Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Gramado, 2018.

BILÉSIMO, T. L.; RAMPINELLI, G. A.; MARCELINO, R. Medição e análise do desempenho termohigrométrico de uma edificação com estratégias bioclimáticas. **Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Gramado, 2018.

BILÉSIMO, T. L.; RAMPINELLI, G. A.; BREMERMAN, L. E. Análise de estratégias de iluminação natural em uma planta piloto bioclimática para promoção da eficiência energética. **Anais do XXII Congresso Brasileiro de Automática**. João Pessoa, 2018.

BILÉSIMO, T. L., RAMPINELLI, G. A. Análise do desempenho de um dispositivo de aproveitamento de iluminação natural em uma planta piloto bioclimática. **Anais do 7º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense**. Araranguá, 2018.

BILÉSIMO, T. L.; RAMPINELLI, G. A. Análise de estratégias de iluminação natural em uma planta piloto bioclimática para promoção da eficiência energética. **Actas de la XLI Reunión de Trabajo de la ASADES**. Córdoba, 2018.

REFERÊNCIAS

ALVES, A. B. M.; SCHMID, A. L. Cooling and heating potential of underground soil according to depth and soil surface treatment in the Brazilian climatic regions. **Energy and Buildings**, v. 90, p. 41–50, 1 mar. 2015.

ASHRAE. **Handbook of Fundamentals**. New York: 2005.

ASLANI, A.; BAKHTIAR, A.; AKBARZADEH, M. H. Energy-efficiency technologies in the building envelope: Life cycle and adaptation assessment. **Journal of Building Engineering**, v. 21, p. 55–63, 1 jan. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220 - Desempenho térmico de edificações**. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15215-4 - Iluminação natural - Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações – Método de medição**. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/CIE 8995 - Iluminação de ambientes de trabalho**. 2013.

BARBOSA, S.; IP, K. Predicted thermal acceptance in naturally ventilated office buildings with double skin façades under Brazilian climates. **Journal of Building Engineering**, v. 7, p. 92–102, set. 2016.

BECCALI, M. et al. Vernacular and bioclimatic architecture and indoor thermal comfort implications in hot-humid climates: An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. 2, p. 1726–1736, 2017.

BERARDI, U. A cross-country comparison of the building energy consumptions and their trends. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 123, p. 230–241, 1 ago. 2017.

CABEZA, L. F. et al. Investigating greenhouse challenge from growing trends of electricity consumption through home appliances in buildings.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 36, p. 188–193, ago. 2014.

CAO, B. et al. Too cold or too warm? A winter thermal comfort study in different climate zones in China. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 469–477, 2016.

CARLUCCI, S. et al. A review of indices for assessing visual comfort with a view to their use in optimization processes to support building integrated design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 1016–1033, 1 jul. 2015.

CASTILLA, M. et al. **A nonlinear model based predictive control strategy to maintain thermal comfort inside a bioclimatic building**. 20th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED). **Anais...IEEE**, jul. 2012

CENTER FOR THE BUILT ENVIRONMENT. **CBE Thermal Comfort Tool**. Disponível em: <<https://www.cbe.berkeley.edu/research/thermal-tool.htm>>. Acesso em: 16 nov. 2017.

D'AGOSTINO, D.; MAZZARELLA, L. What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions. **Journal of Building Engineering**, v. 21, p. 200–212, 1 jan. 2019.

DAMJANOVIC, V. M. C. et al. **Architectural design influences and HVAC systems' measures on energy savings of a high energy demand residential building**. 3rd International Symposium on Environmental Friendly Energies and Applications (EFEA). **Anais...IEEE**, nov. 2014

DIAL GMBH. **DIALux**. Disponível em: <<https://www.dial.de/en/dialux/>>. Acesso em: 16 nov. 2017.

DOULOS, L. T. et al. Harvesting daylight with LED or T5 fluorescent lamps? The role of dimming. **Energy and Buildings**, v. 140, p. 336–347, 1 abr. 2017.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. John Wiley & Sons, 910p., 2013.

ENESCU, D. A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 1353–1379, nov. 2017.

EPE. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. Relatório Final 2018: ano base 2017**. Rio de Janeiro: 2018.

ESPÍNDOLA, G. DA S. **Simulação energética de uma planta piloto com elementos de arquitetura bioclimática e geração distribuída com sistemas fotovoltaicos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2016.

FANGER, O. P. **Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering**. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.

FOSSATI, M. et al. Building energy efficiency: An overview of the Brazilian residential labeling scheme. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, p. 1216–1231, nov. 2016.

GAGO, E. J. et al. Natural light controls and guides in buildings. Energy saving for electrical lighting, reduction of cooling load. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 1–13, 1 jan. 2015.

GUERRA, M. DE R. **Projeto e desenvolvimento de uma planta piloto com conceitos de arquitetura bioclimática**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2016.

HIRASHIMA, S. Q. DA S.; ASSIS, E. S. DE; NIKOLOPOULOU, M. Daytime thermal comfort in urban spaces: A field study in Brazil. **Building and Environment**, v. 107, p. 245–253, 1 out. 2016.

HIRSCH, J. J. **DOE2.com**. Disponível em: <<http://www.doe2.com/>>. Acesso em: 2 out. 2017.

HORIKIRI, K.; YAO, Y.; YAO, J. Numerical optimisation of thermal comfort improvement for indoor environment with occupants and furniture. **Energy and Buildings**, v. 88, p. 303–315, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7730 - Moderate thermal environments - determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort.** 2005.

INVIDIATA, A.; GHISI, E. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 130, p. 20–32, out. 2016.

KWON, S.-Y.; LIM, J.-H. Multi-objective context-adaptive natural lighting system. **Energy and Buildings**, v. 144, p. 61–73, 2017.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura.** 3ª ed. São Paulo: 2014.

LOPES, A. DO C. P. et al. Energy efficiency labeling program for buildings in Brazil compared to the United States' and Portugal's. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 66, p. 207–219, 2016.

MALET-DAMOUR, B. et al. Study of tubular daylight guide systems in buildings: Experimentation, modelling and validation. **Energy and Buildings**, v. 129, p. 308–321, 1 out. 2016.

MANZANO-AGUGLIARO, F. et al. Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 736–755, 2015.

MARÉCHAL, K. Not irrational but habitual: The importance of “behavioural lock-in” in energy consumption. **Ecological Economics**, v. 69, n. 5, p. 1104–1114, 15 mar. 2010.

MENA, R. et al. A prediction model based on neural networks for the energy consumption of a bioclimatic building. **Energy and Buildings**, v. 82, p. 142–155, out. 2014.

MICHAEL, A.; HERACLEOUS, C. Assessment of natural lighting performance and visual comfort of educational architecture in Southern Europe: The case of typical educational school premises in Cyprus. **Energy and Buildings**, v. 140, p. 443–457, 2017.

MISSOUM, M. et al. Impact of a grid-connected PV system application in a bioclimatic house toward the zero energy status in the north of Algeria. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 370–383, 2016.

MORENO, A. C. R.; MORAIS, I. S. DE; SOUZA, R. G. DE. Thermal Performance of Social Housing— A Study Based on Brazilian Regulations. **Energy Procedia**, v. 111, p. 111–120, 1 mar. 2017.

NICOL, F.; HUMPHREYS, M. A. (MICHAEL A.; ROAF, S. **Adaptive thermal comfort : principles and practice**. London: Routledge, 2012.

OH, S. J. et al. Application of a coelostat daylighting system for energy savings and enhancement of indoor illumination: A case study under clear-sky conditions. **Energy and Buildings**, v. 156, p. 173–186, 2017.

OLIVEIRA, R. D. et al. Concrete Walls Thermal Performance Analysis by Brazilian Standards. **Energy Procedia**, v. 78, p. 213–218, nov. 2015.

OMRANI, S. et al. Effect of natural ventilation mode on thermal comfort and ventilation performance: Full-scale measurement. **Energy and Buildings**, v. 156, p. 1–16, 2017.

ORTIZ, M. A.; KURVERS, S. R.; BLUYSSSEN, P. M. A review of comfort, health, and energy use: Understanding daily energy use and wellbeing for the development of a new approach to study comfort. **Energy and Buildings**, v. 152, p. 323–335, 1 out. 2017.

PACHECO, M.; LAMBERTS, R. Assessment of technical and economical viability for large-scale conversion of single family residential buildings into zero energy buildings in Brazil: Climatic and cultural considerations. **Energy Policy**, v. 63, p. 716–725, dez. 2013.

PBE EDIFICA. **Incentivos**. Disponível em: <<http://www.pbeedifica.com.br/incentivos>>. Acesso em: 3 jan. 2019.

PBEEDIFICA. **O que é a etiqueta PBE Edifica?** Disponível em: <<http://www.pbeedifica.com.br/conhecendo-pbe-edifica>>. Acesso em: 14 nov. 2017.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas**

fotovoltaicos. 2. ed. Rio de Janeiro: 2014.

RAFSANJANI, H. N.; AHN, C. R.; CHEN, J. Linking building energy consumption with occupants' energy-consuming behaviors in commercial buildings: Non-intrusive occupant load monitoring (NIOLM). **Energy and Buildings**, v. 172, p. 317–327, 1 ago. 2018.

RAMALHO DE FREITAS, J.; GRALA DA CUNHA, E. Thermal bridges modeling in South Brazil climate: Three different approaches. **Energy and Buildings**, v. 169, p. 271–282, 15 jun. 2018.

RUPP, R. F.; VÁSQUEZ, N. G.; LAMBERTS, R. A review of human thermal comfort in the built environment. **Energy and Buildings**, v. 105, p. 178–205, out. 2015.

SHISHEGAR, N.; BOUBEKRI, M. Quantifying electrical energy savings in offices through installing daylight responsive control systems in hot climates. **Energy and Buildings**, v. 153, p. 87–98, 2017.

SILVA, A. S.; ALMEIDA, L. S. S.; GHISI, E. Decision-making process for improving thermal and energy performance of residential buildings: A case study of constructive systems in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 270–286, set. 2016.

SILVA, M. P. **Simulação e análise termoenergética de uma planta piloto bioclimática**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2017.

SORGATO, M. J. **A influência do comportamento do usuário no desempenho térmico e energético de edificações residenciais**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 1–13, dez. 2016.

SOUTULLO, S. et al. Comparative thermal study between conventional and bioclimatic office buildings. **Building and Environment**, v. 105, p. 95–103, ago. 2016.

SOUTULLO, S. et al. Bioclimatic vs conventional building: experimental quantification of the thermal improvements. **Energy Procedia**, v. 122, p. 823–828, 2017.

TALEB, H. M. Natural ventilation as energy efficient solution for achieving low-energy houses in Dubai. **Energy and Buildings**, v. 99, p. 284–291, 2015.

THOMSEN, K. E. et al. Energy consumption and indoor climate in a residential building before and after comprehensive energy retrofitting. **Energy and Buildings**, v. 123, p. 8–16, jul. 2016.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. **Energy Policy**, v. 87, p. 524–541, dez. 2015.

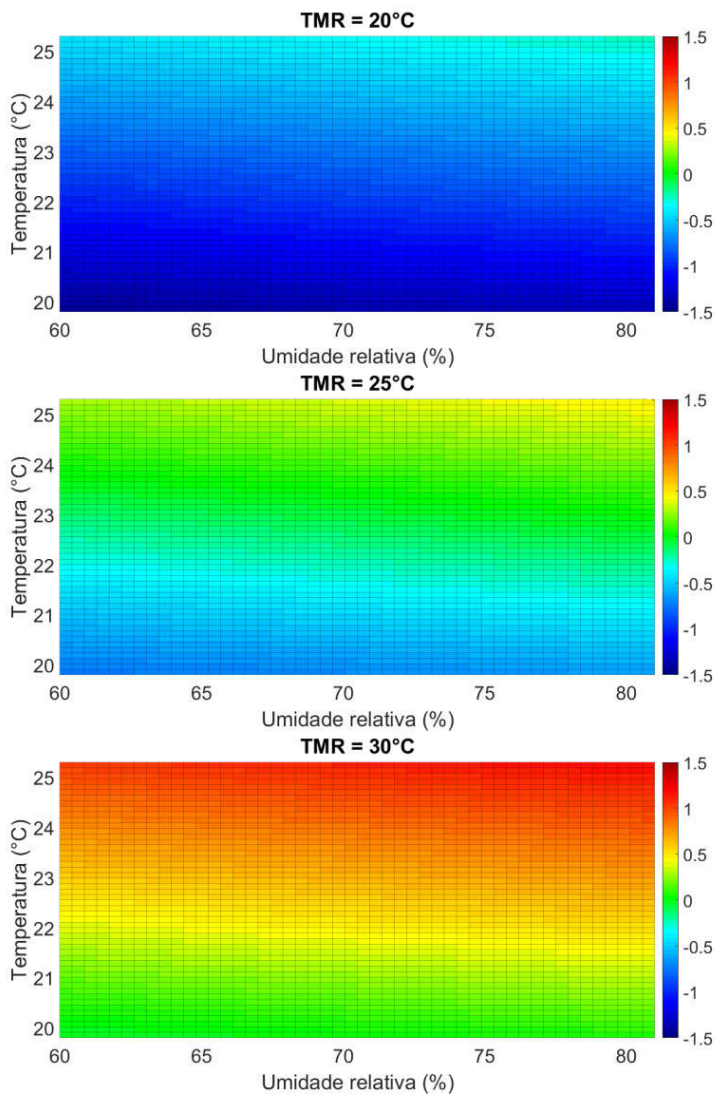
XU, L. et al. Lighting energy efficiency in offices under different control strategies. **Energy and Buildings**, v. 138, p. 127–139, 1 mar. 2017.

YANG, L.; YAN, H.; LAM, J. C. Thermal comfort and building energy consumption implications – A review. **Applied Energy**, v. 115, p. 164–173, 15 fev. 2014.

ZHU, T.; LI, R.; LI, C. The Analysis of Natural Lighting Simulation and Study on Energy Saving in Cigarette Factory. **Procedia Engineering**, v. 205, p. 895–901, 1 jan. 2017.

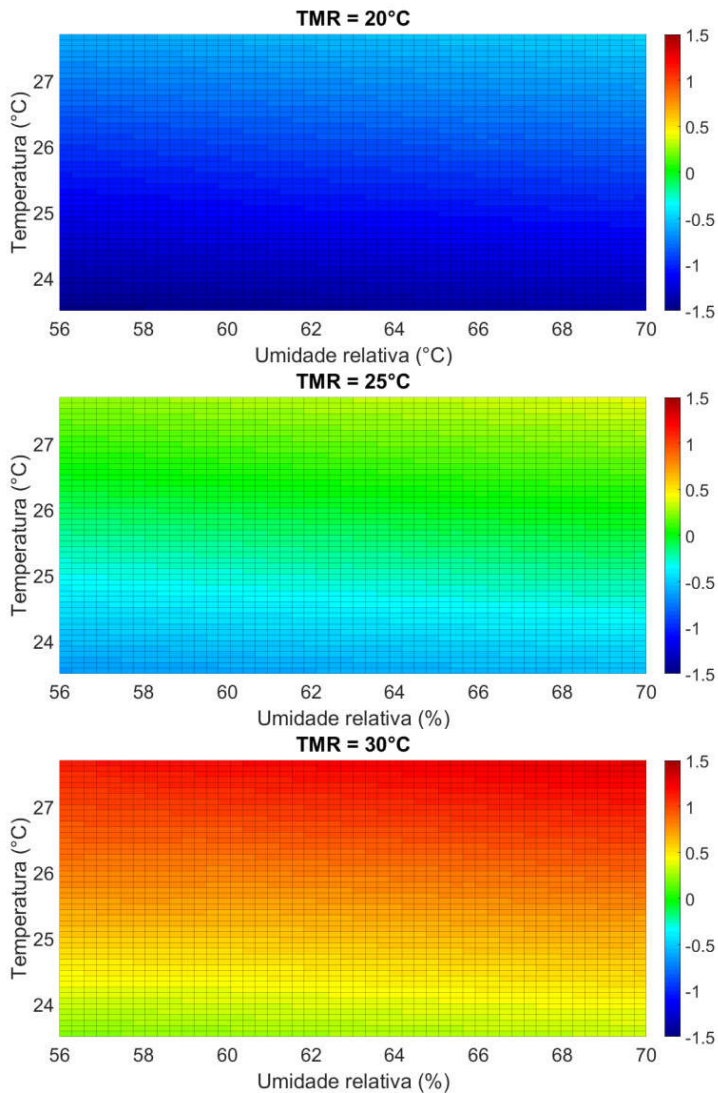
APÊNDICE A – PMV em função da TMR, temperatura ambiente e umidade relativa, para as quatro estações do ano

Figura 1 – Primavera.



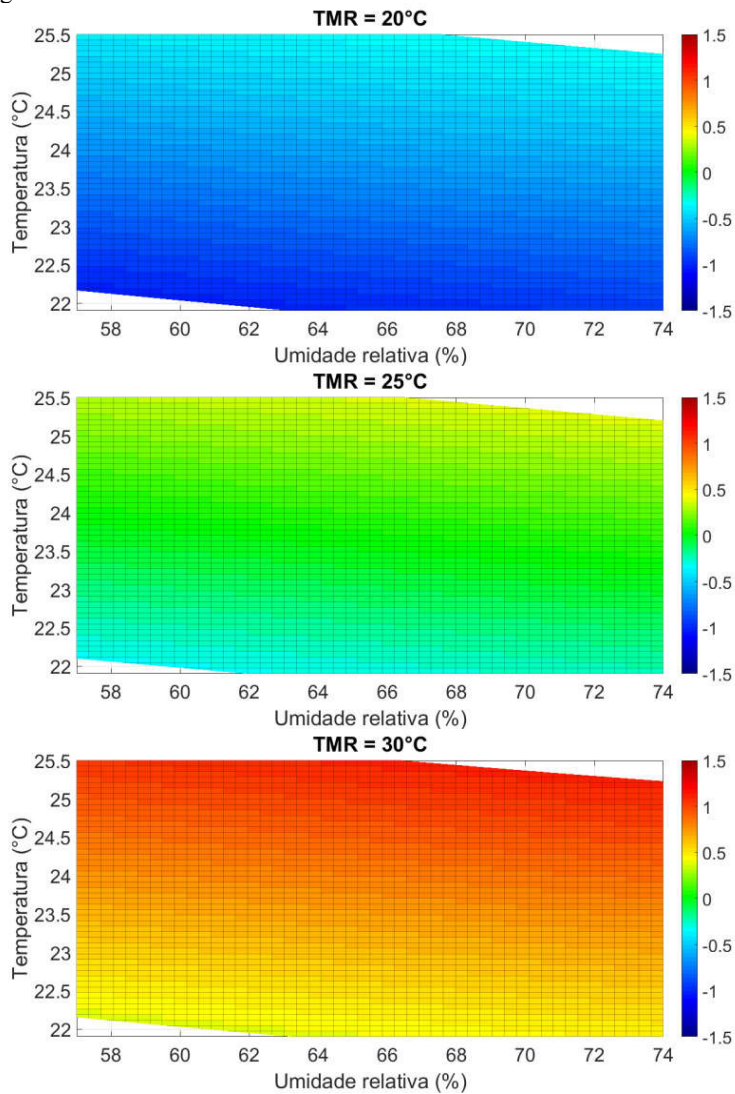
Fonte: do autor.

Figura 2 – Verão.



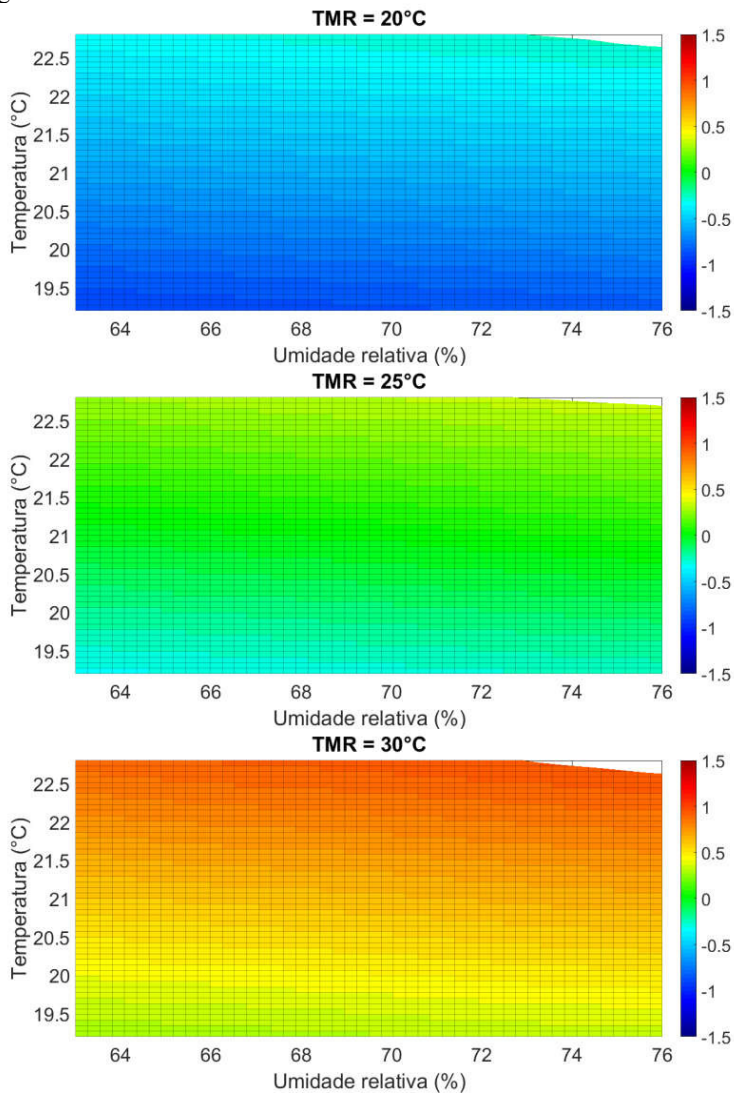
Fonte: do autor.

Figura 3 – Outono.



Fonte: do autor.

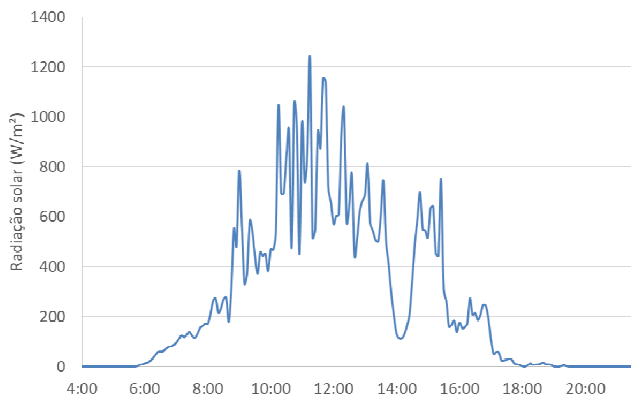
Figura 4 – Inverno.



Fonte: do autor.

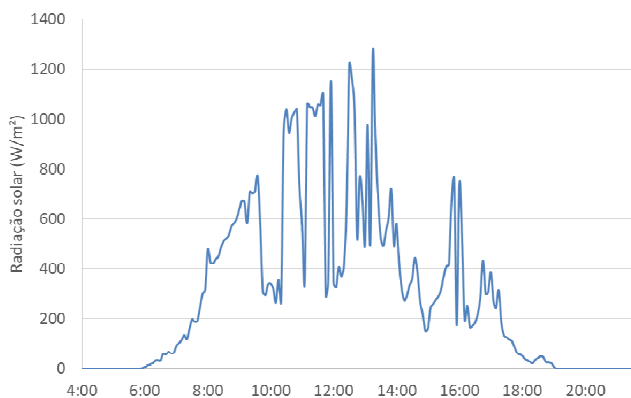
APÊNDICE B – Comportamento da radiação solar nos dias intermediários selecionados para análise

Figura 1 – Dia de verão, de K_T 0,39, utilizado como dia representativo para análise de iluminância da AT 1.



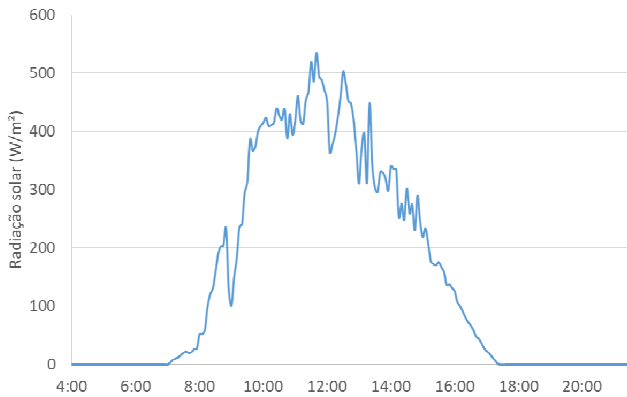
Fonte: do autor.

Figura 2 – Dia de verão, de K_T 0,45, utilizado como dia representativo para análise de iluminância da AT 2 e do tubo solar.



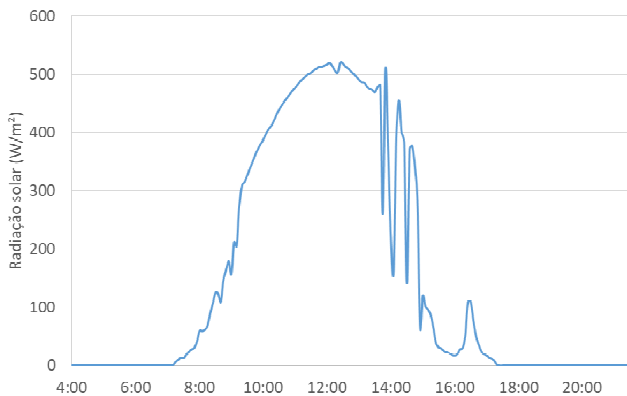
Fonte: do autor.

Figura 3 – Dia de inverno, de K_T 0,49, utilizado como dia representativo para análise de iluminância da AT 2 e tubo solar.



Fonte: do autor.

Figura 4 – Dia de inverno, de K_T 0,52, utilizado como dia representativo para análise de iluminância da AT 1.



Fonte: do autor.

APÊNDICE C – Medições de iluminância em horários complementares e dias intermediários

Tabela 1 – Medições de iluminância na AT 1, em lx, em dias ensolarados.

Ponto	X	Y	Verão			Inverno		
			10:00	14:00	16:00	10:00	14:00	16:00
1	0,625	0,709	428,0	517,5	609,0	848,0	846,5	634,0
2	0,625	2,127	715,0	1117,0	1492,5	1213,5	1266,5	975,0
3	0,625	3,545	838,5	1311,0	1564,0	1168,5	1251,0	1216,0
4	0,625	4,963	892,0	1250,0	1834,5	900,0	1121,5	958,0
5	1,875	4,963	785,5	1370,5	1728,5	1012,0	1237,0	1078,5
6	1,875	3,545	890,5	1239,0	1522,0	1224,0	1472,0	711,0
7	1,875	2,127	849,5	1127,0	1390,5	1483,5	1402,5	992,5
8	1,875	0,709	1102,0	1098,0	1149,0	1449,5	1819,0	1965,0
9	3,125	0,709	988,0	1115,5	1221,5	2020,0	2295,0	1206,0
10	3,125	2,127	773,5	901,5	1099,0	1309,0	1300,5	834,0
11	3,125	3,545	764,0	905,5	1126,0	840,0	1086,0	1253,5
12	3,125	4,963	706,5	762,0	869,0	700,5	823,5	854,5
13	4,375	4,963	909,0	613,0	697,0	657,0	760,5	673,0
14	4,375	3,545	610,0	632,0	790,5	796,0	929,0	832,5
15	4,375	2,127	517,5	555,0	698,5	1060,0	1105,0	730,0
16	4,375	0,709	578,0	541,0	662,5	1174,0	1027,0	561,0

Fonte: do autor.

Tabela 2 – Medições de iluminância na AT 1, em lx, em dias nublados.

Ponto	X	Y	Verão			Inverno		
			10:00	14:00	16:00	10:00	14:00	16:00
1	0,625	0,709	189,8	268,0	335,0	301,5	65,1	80,6
2	0,625	2,127	576,0	757,0	990,0	794,0	209,0	242,5
3	0,625	3,545	613,0	904,0	1170,5	1071,5	260,0	313,0
4	0,625	4,963	683,0	887,5	1270,0	803,5	258,5	298,5
5	1,875	4,963	1036,5	1170,5	1862,0	1297,5	462,0	473,5
6	1,875	3,545	579,5	959,5	1209,0	934,5	257,0	283,5
7	1,875	2,127	454,0	780,5	944,0	945,5	239,0	276,0
8	1,875	0,709	596,0	826,5	1115,5	2365,0	262,5	322,0
9	3,125	0,709	513,0	825,5	1005,5	1271,5	256,0	315,0
10	3,125	2,127	338,5	563,0	690,0	728,5	172,1	212,0
11	3,125	3,545	332,0	575,0	713,0	567,0	171,9	179,3
12	3,125	4,963	257,0	408,5	474,5	339,5	112,7	130,9
13	4,375	4,963	301,5	391,5	496,5	389,0	102,1	127,7
14	4,375	3,545	239,0	353,0	426,0	424,0	103,4	133,1
15	4,375	2,127	183,4	323,0	384,5	468,5	110,7	144,3
16	4,375	0,709	184,7	287,0	333,5	313,0	65,3	77,6

Fonte: do autor.

Tabela 3 – Medições de iluminância na AT 1, em lx, no dia intermediário de verão.

Ponto	X	Y	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00
1	0,625	0,709	183,7	628,5	906,0	784,0	711,0	62,9
2	0,625	2,127	491,8	1449,0	2190,0	2090,0	2340,0	207,0
3	0,625	3,545	653,6	1991,0	2250,0	1934,5	2640,0	221,0
4	0,625	4,963	618,5	2080,0	2350,0	2200,0	1971,0	177,9
5	1,875	4,963	940,7	2125,0	3275,0	3435,0	3490,0	278,0
6	1,875	3,545	629,6	1959,0	2250,0	2545,0	2315,0	167,3
7	1,875	2,127	606,0	1844,5	2070,0	2015,0	1741,5	159,3
8	1,875	0,709	855,0	2665,0	2830,0	2285,0	2030,5	253,5
9	3,125	0,709	754,5	2146,1	2250,0	2380,0	2335,0	201,5
10	3,125	2,127	442,0	1466,3	1539,0	1607,0	1433,5	106,0
11	3,125	3,545	416,9	1429,9	1374,5	1626,0	1465,5	83,8
12	3,125	4,963	309,7	1057,5	889,0	958,5	786,0	51,6
13	4,375	4,963	324,7	1122,4	657,5	739,5	631,0	38,5
14	4,375	3,545	291,0	919,9	828,5	876,0	810,5	46,1
15	4,375	2,127	240,2	756,2	814,5	874,0	858,0	46,7
16	4,375	0,709	229,0	710,5	738,5	798,5	708,5	41,2

Fonte: do autor.

Tabela 4 – Medições de iluminância na AT 1, em lx, no dia intermediário de inverno.

Ponto	X	Y	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	17:00
1	0,625	0,709	69,4	828,5	878,5	1136,5	37,9	177,5
2	0,625	2,127	224,0	1167,5	1264,0	1477,0	95,8	325,0
3	0,625	3,545	297,5	1148,0	1327,5	1500,5	122,6	371,0
4	0,625	4,963	231,5	943,5	968,5	952,0	106,6	254,0
5	1,875	4,963	370,5	1084,0	1292,0	1492,5	148,0	313,5
6	1,875	3,545	276,5	1238,0	1497,5	1533,5	107,1	396,0
7	1,875	2,127	282,0	1575,0	1617,5	1394,0	110,9	334,5
8	1,875	0,709	432,5	1703,5	2525,0	3155,0	168,5	303,0
9	3,125	0,709	316,5	2205,0	2745,0	2300,0	128,0	369,0
10	3,125	2,127	217,0	1395,5	1558,0	897,5	99,0	290,0
11	3,125	3,545	184,4	957,5	1360,0	1328,5	84,7	352,5
12	3,125	4,963	136,9	743,0	993,0	983,0	69,1	275,5
13	4,375	4,963	134,8	692,5	899,5	897,0	77,9	361,0
14	4,375	3,545	133,0	799,5	1055,0	1111,5	93,1	612,5
15	4,375	2,127	135,8	1004,0	1166,5	643,5	94,8	237,5
16	4,375	0,709	99,0	932,5	1068,5	524,0	76,2	232,0

Fonte: do autor.

Tabela 5 – Medições de iluminância na AT 2, em lx, em dias ensolarados.

Ponto	X	Y	Verão			Inverno		
			10:00	14:00	16:00	10:00	14:00	16:00
1	0,713	0,531	557,5	568,0	550,0	411,5	393,0	309,0
2	0,713	1,594	632,0	708,5	682,5	539,5	521,5	383,0
3	0,713	2,657	662,5	736,5	710,5	597,5	592,5	383,5
4	2,138	2,657	1311,5	1442,5	939,0	767,0	612,5	387,5
5	2,138	1,594	1225,5	1364,5	880,5	674,0	585,0	373,0
6	2,138	0,531	935,0	847,0	468,0	568,5	510,5	354,0
7	3,563	0,531	806,0	812,5	386,5	609,5	422,0	288,0
8	3,563	1,594	1499,0	1422,0	535,0	724,0	524,0	308,0
9	3,563	2,657	1137,0	1149,0	631,5	676,5	477,0	245,0

Fonte: do autor.

Tabela 6 – Medições de iluminância na AT 2, em lx, em dias nublados.

Ponto	X	Y	Verão			Inverno		
			10:00	14:00	16:00	10:00	14:00	16:00
1	0,713	0,531	106,7	199,2	328,0	34,6	168,6	89,9
2	0,713	1,594	135,5	252,5	415,0	41,9	213,0	138,1
3	0,713	2,657	129,8	244,5	382,5	41,5	211,0	196,1
4	2,138	2,657	212,0	389,0	631,5	66,7	358,0	208,0
5	2,138	1,594	208,5	382,5	635,0	59,2	311,0	138,4
6	2,138	0,531	182,7	334,0	559,0	47,0	310,0	124,6
7	3,563	0,531	210,5	397,0	660,5	56,2	297,5	150,4
8	3,563	1,594	261,0	552,0	769,0	71,9	400,5	196,6
9	3,563	2,657	212,5	459,5	577,5	55,2	247,0	156,1

Fonte: do autor.

Tabela 7 – Medições de iluminância na AT 2, em lx, no dia intermediário de verão.

Ponto	X	Y	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00
1	0,713	0,531	914,5	577,0	744,0	641,0	367,0	290,5
2	0,713	1,594	1680,5	697,0	893,5	799,0	437,0	362,5
3	0,713	2,657	941,5	689,5	899,5	788,5	411,5	333,0
4	2,138	2,657	1605,5	918,5	1679,0	1276,0	633,0	515,0
5	2,138	1,594	3830,0	1094,5	1611,0	1290,0	715,0	492,5
6	2,138	0,531	1731,0	1014,5	1183,5	1100,0	531,0	436,5
7	3,563	0,531	1168,0	1029,0	1330,5	1256,5	624,5	508,0
8	3,563	1,594	1587,0	1494,0	2045,0	1766,5	901,5	460,0
9	3,563	2,657	1190,5	1119,5	1735,0	1293,5	606,5	418,0

Fonte: do autor.

Tabela 8 – Medições de iluminância na AT 2, em lx, no dia intermediário de inverno.

Ponto	X	Y	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	17:00
1	0,713	0,531	211,5	450,5	483,5	413,0	177,9	24,9
2	0,713	1,594	354,0	579,0	656,5	533,5	243,5	33,4
3	0,713	2,657	1120,5	720,5	671,0	598,0	219,5	31,9
4	2,138	2,657	650,5	965,0	933,5	796,0	273,5	48,2
5	2,138	1,594	358,5	767,0	722,5	713,5	302,0	45,1
6	2,138	0,531	292,0	699,0	695,0	641,5	282,5	37,8
7	3,563	0,531	254,5	541,0	625,0	653,0	316,5	41,8
8	3,563	1,594	384,0	944,5	860,0	775,0	300,5	57,1
9	3,563	2,657	406,5	883,0	826,0	636,0	227,0	37,0

Fonte: do autor.

Tabela 9 – Medições de iluminância do tubo solar, em lx, em dias ensolarados.

Ponto	X	Y	Verão			Inverno		
			10:00	14:00	16:00	10:00	14:00	16:00
1	0,713	0,531	78,4	171,9	141,2	38,70	45,85	11,26
2	0,713	1,594	111,4	269,5	195,9	56,75	67,60	15,80
3	0,713	2,657	117,4	276,0	206,0	58,20	68,85	15,73
4	2,138	2,657	263,0	836,0	479,5	124,90	153,45	34,50
5	2,138	1,594	235,0	759,5	417,5	110,85	136,45	31,30
6	2,138	0,531	135,1	303,5	223,0	66,10	78,10	19,17
7	3,563	0,531	128,6	245,0	198,2	64,95	75,20	26,70
8	3,563	1,594	260,0	443,0	328,5	100,15	120,55	36,95
9	3,563	2,657	257,0	492,5	370,0	103,15	119,20	32,75

Fonte: do autor.

Tabela 10 – Medições de iluminância do tubo solar, em lx, em dias nublados.

Ponto	X	Y	Verão			Inverno		
			10:00	14:00	16:00	10:00	14:00	16:00
1	0,713	0,531	16,5	108,9	90,0	4,0	11,7	10,9
2	0,713	1,594	24,2	119,9	118,5	5,6	16,4	15,6
3	0,713	2,657	24,7	112,5	121,1	5,7	17,1	16,1
4	2,138	2,657	59,3	266,5	290,5	13,2	43,7	37,4
5	2,138	1,594	52,3	207,5	241,5	11,0	44,4	31,5
6	2,138	0,531	28,6	110,7	124,2	5,7	22,2	17,8
7	3,563	0,531	41,0	138,4	121,6	6,5	38,0	21,8
8	3,563	1,594	63,5	177,6	205,0	8,3	46,7	31,6
9	3,563	2,657	67,2	215,5	197,7	8,5	43,4	30,9

Fonte: do autor.

Tabela 11 – Medições de iluminância do tubo solar, em lx, no dia intermediário de verão.

Ponto	X	Y	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00
1	0,713	0,531	23,9	83,2	171,8	85,3	38,6	36,9
2	0,713	1,594	31,0	109,8	258,0	311,5	55,5	54,4
3	0,713	2,657	32,2	112,7	269,0	136,3	56,4	55,9
4	2,138	2,657	74,1	277,5	692,0	336,0	138,9	125,1
5	2,138	1,594	72,8	248,5	553,5	558,5	123,0	105,3
6	2,138	0,531	46,6	142,2	304,5	371,5	66,4	61,5
7	3,563	0,531	76,8	130,7	276,5	269,0	98,1	93,9
8	3,563	1,594	117,4	259,5	523,0	264,0	123,5	93,6
9	3,563	2,657	101,0	238,0	543,0	271,0	118,5	102,9

Fonte: do autor.

Tabela 12 – Medições de iluminância do tubo solar, em lx, no dia intermediário de inverno.

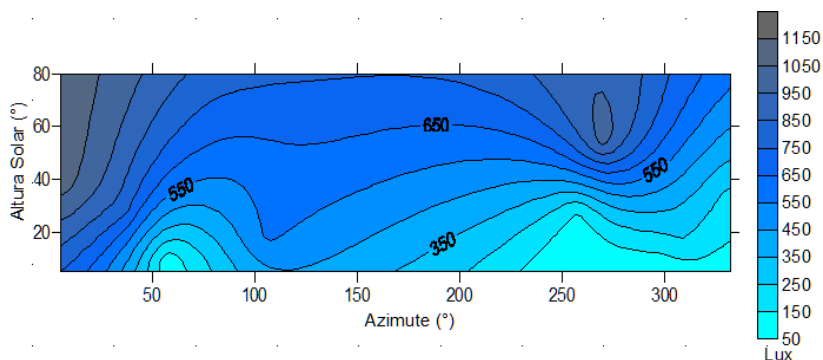
Ponto	X	Y	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	17:00
1	0,713	0,531	7,12	44,70	54,45	37,95	13,02	2,96
2	0,713	1,594	9,99	62,80	77,25	53,55	18,49	4,16
3	0,713	2,657	11,19	63,25	78,85	53,00	18,68	4,22
4	2,138	2,657	24,95	141,90	177,35	121,35	44,90	9,91
5	2,138	1,594	21,85	127,85	159,15	107,00	39,95	8,66
6	2,138	0,531	13,55	73,25	88,15	59,90	22,20	4,79
7	3,563	0,531	19,05	82,00	98,40	54,05	30,10	6,40
8	3,563	1,594	35,45	128,75	139,85	93,90	38,95	7,90
9	3,563	2,657	44,65	129,60	150,70	114,00	39,45	8,29

Fonte: do autor.

APÊNDICE D – Distribuição temporal da iluminância em dias nublados

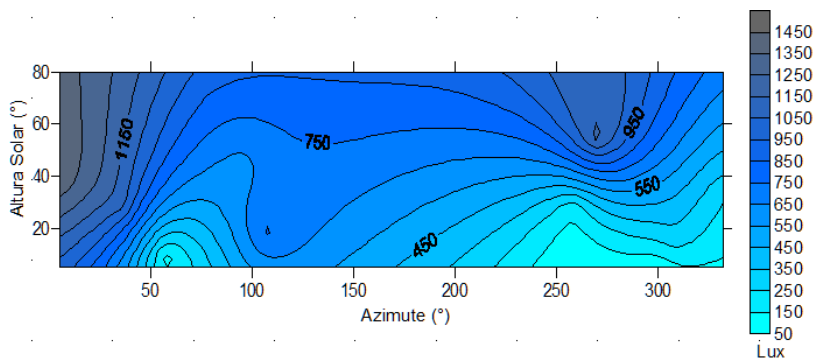
Conforme já mencionado, os pontos 1, 4, 13 e 16 foram desconsiderados na análise da AT 1, uma vez que estes se localizam nos extremos da sala e não fazem parte da área de trabalho.

Figura 1 – AT 1, ponto 2.



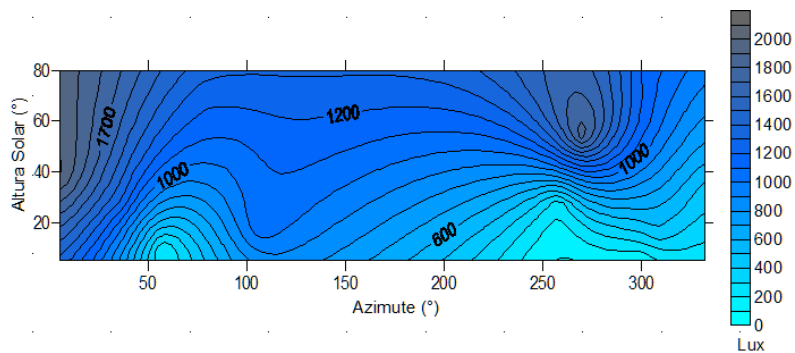
Fonte: do autor.

Figura 2 – AT 1, ponto 3.



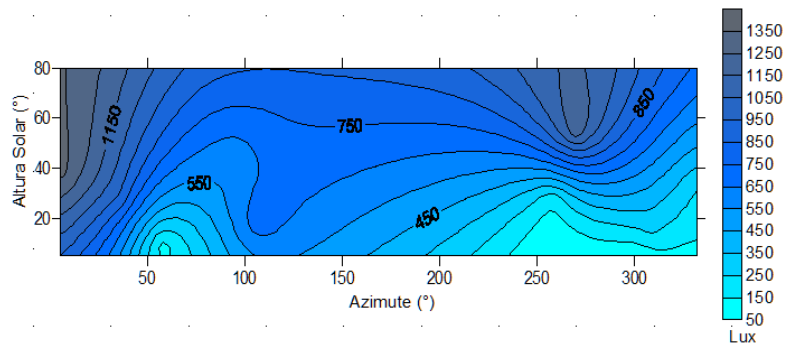
Fonte: do autor.

Figura 3 – AT 1, ponto 5.



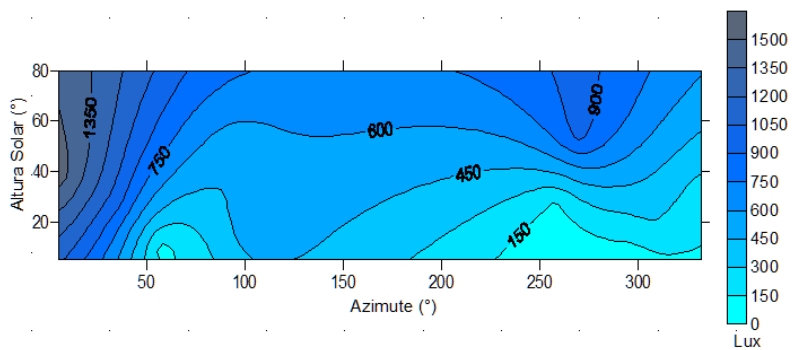
Fonte: do autor.

Figura 4 – AT 1, ponto 6.



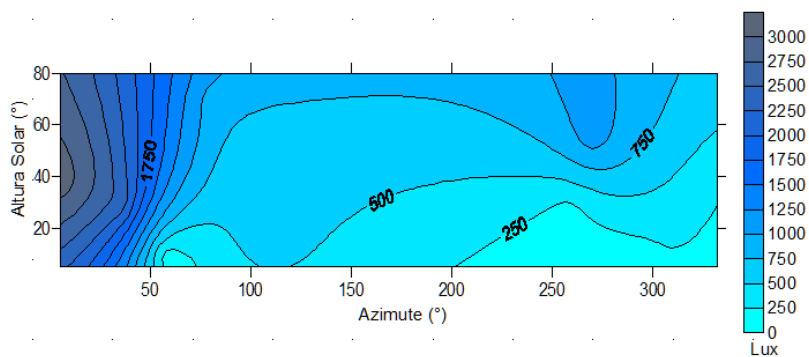
Fonte: do autor.

Figura 5 – AT 1, ponto 7.



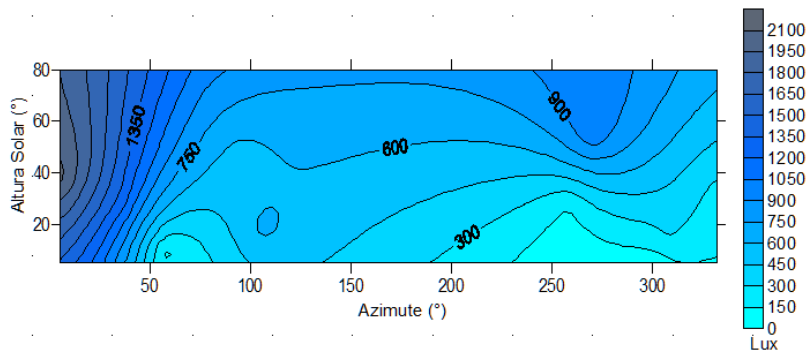
Fonte: do autor.

Figura 6 – AT 1, ponto 8.



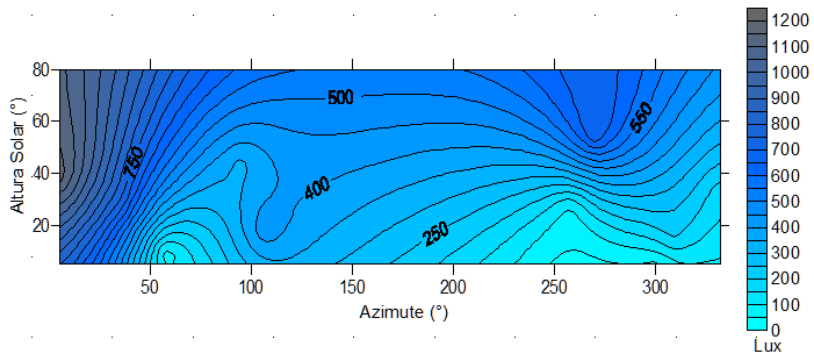
Fonte: do autor.

Figura 7 – AT 1, ponto 9.



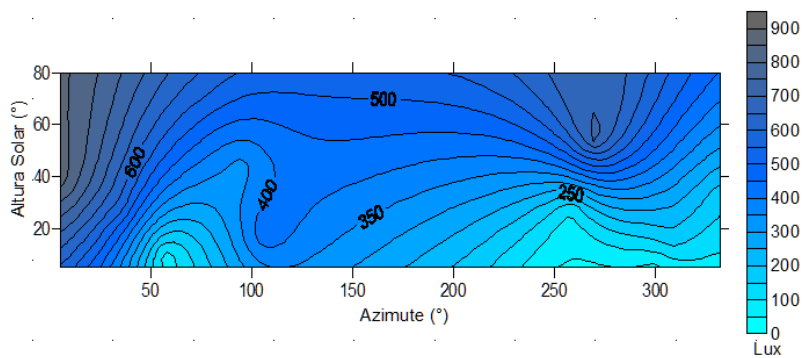
Fonte: do autor.

Figura 8 – AT 1, ponto 10.



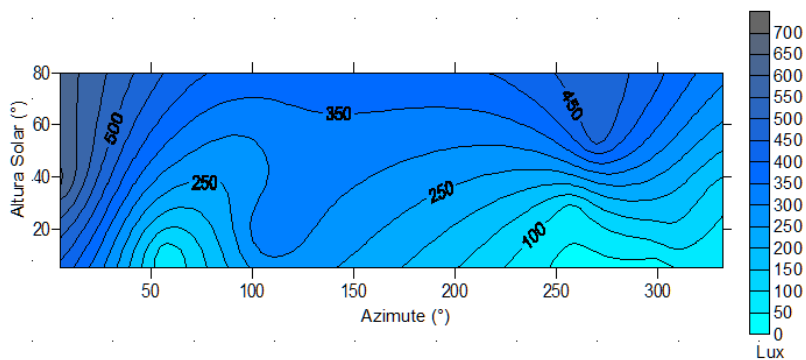
Fonte: do autor.

Figura 9 – AT 1, ponto 11.



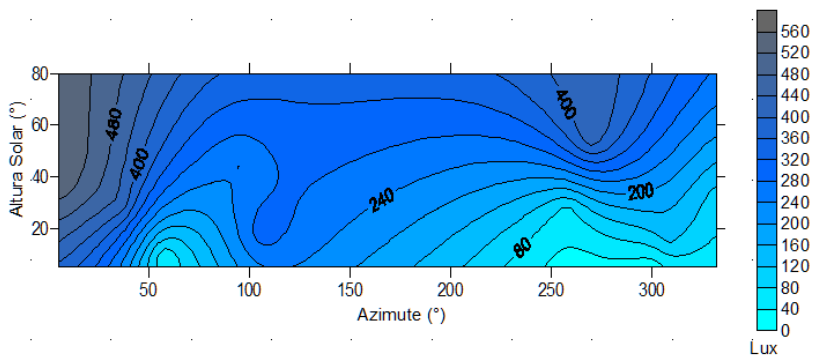
Fonte: do autor.

Figura 10 – AT 1, ponto 12.



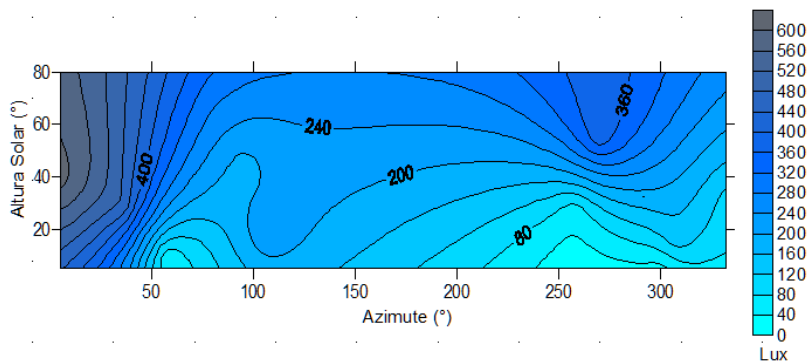
Fonte: do autor.

Figura 11 – AT 1, ponto 14.



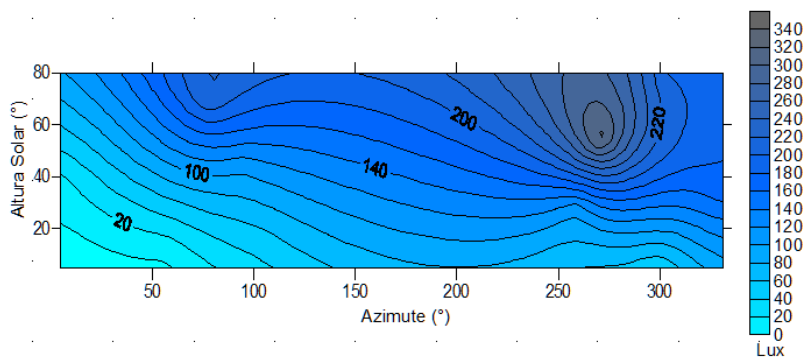
Fonte: do autor.

Figura 12 – AT 1, ponto 15.



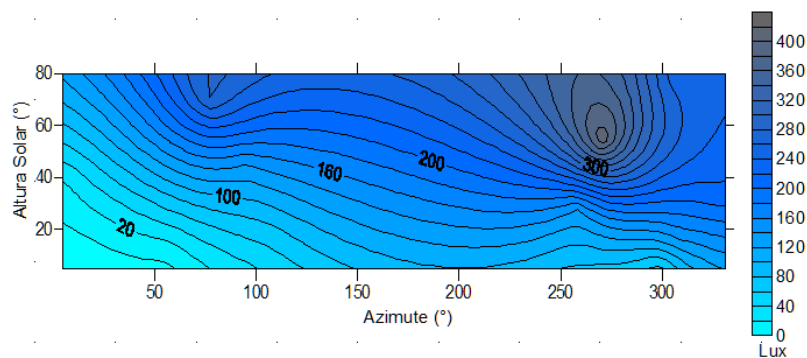
Fonte: do autor.

Figura 13 – AT 2, ponto 1.



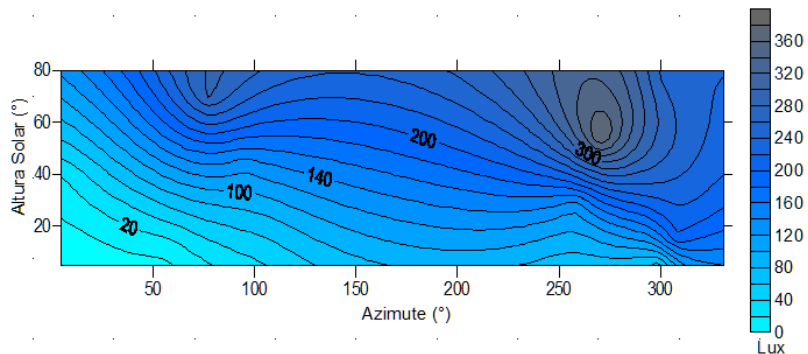
Fonte: do autor.

Figura 14 – AT 2, ponto 2.



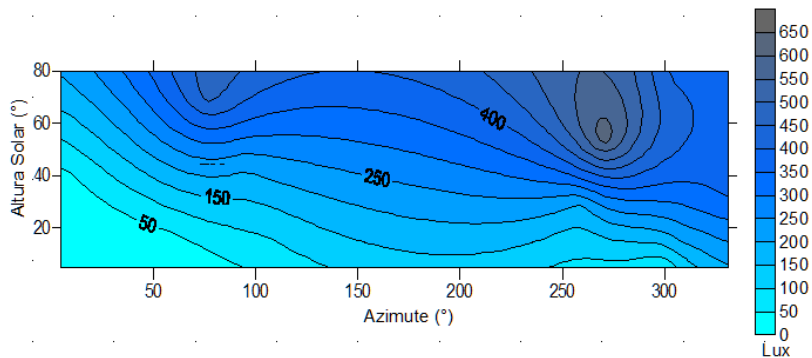
Fonte: do autor.

Figura 15 – AT 2, ponto 3.



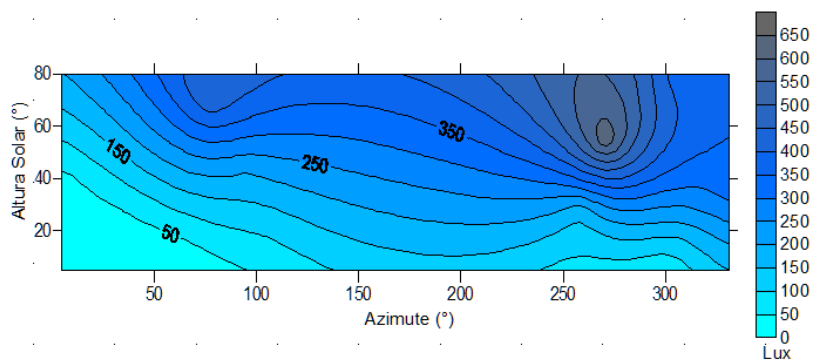
Fonte: do autor.

Figura 16 – AT 2, ponto 4.



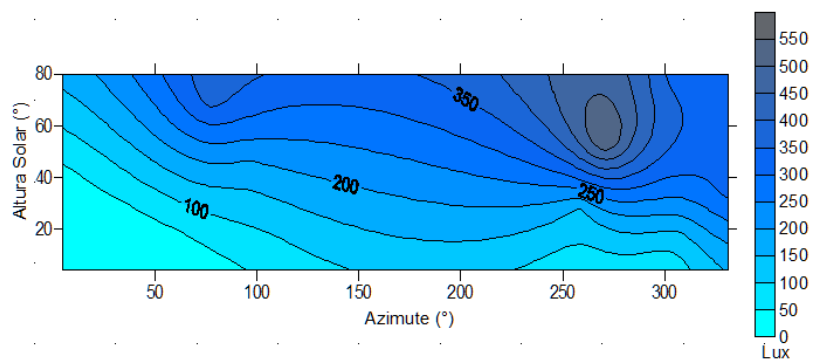
Fonte: do autor.

Figura 17 – AT 2, ponto 5.



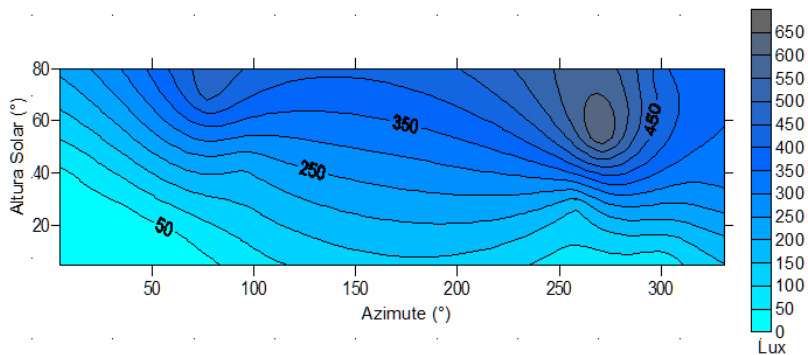
Fonte: do autor.

Figura 18 – AT 2, ponto 6.



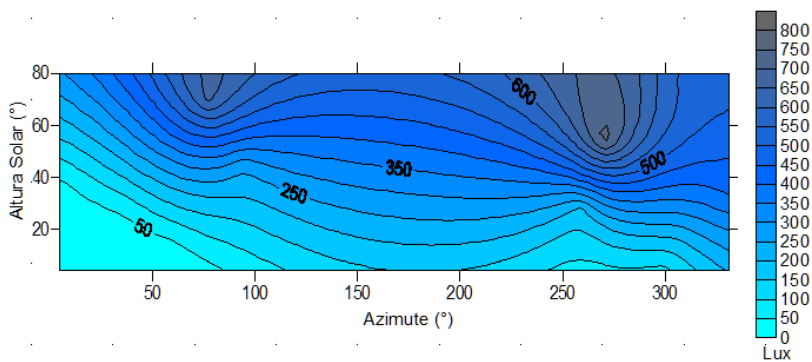
Fonte: do autor.

Figura 19 – AT 2, ponto 7.



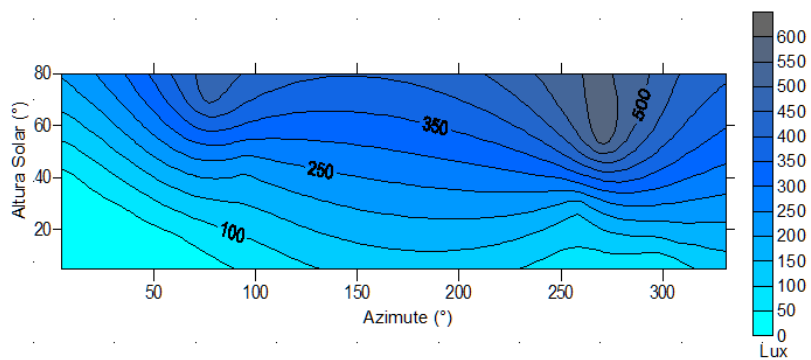
Fonte: do autor.

Figura 20 – AT 2, ponto 8.



Fonte: do autor.

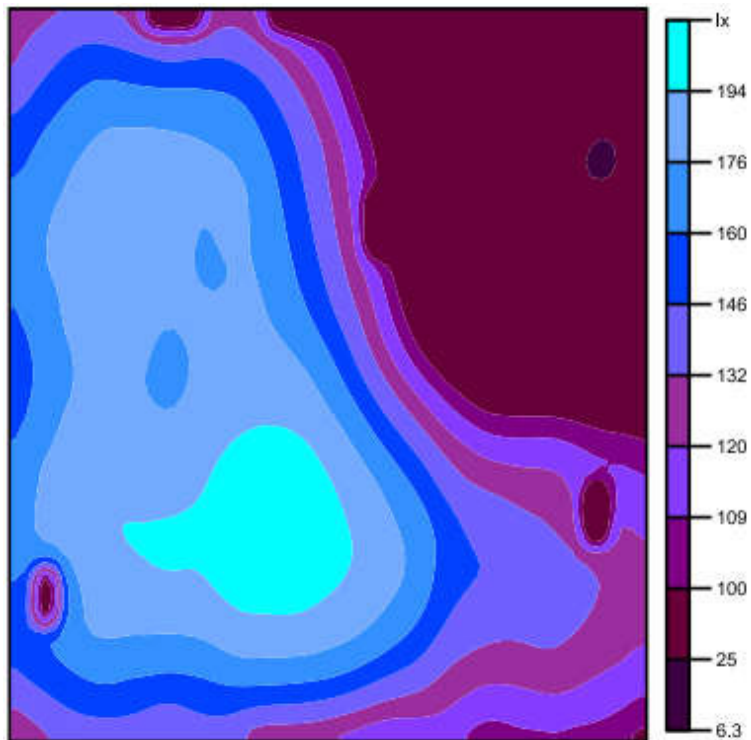
Figura 21 – AT 2, ponto 9.



Fonte: do autor.

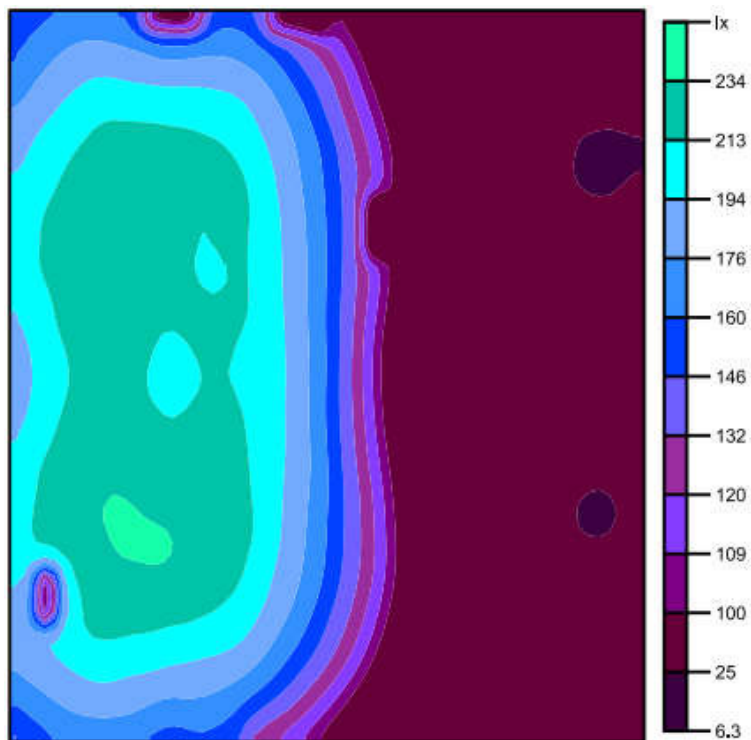
APÊNDICE E – Distribuição espacial da iluminância complementar necessária para atingir os 500 lx

Figura 1 – AT 1, 10h de um dia nublado de inverno.



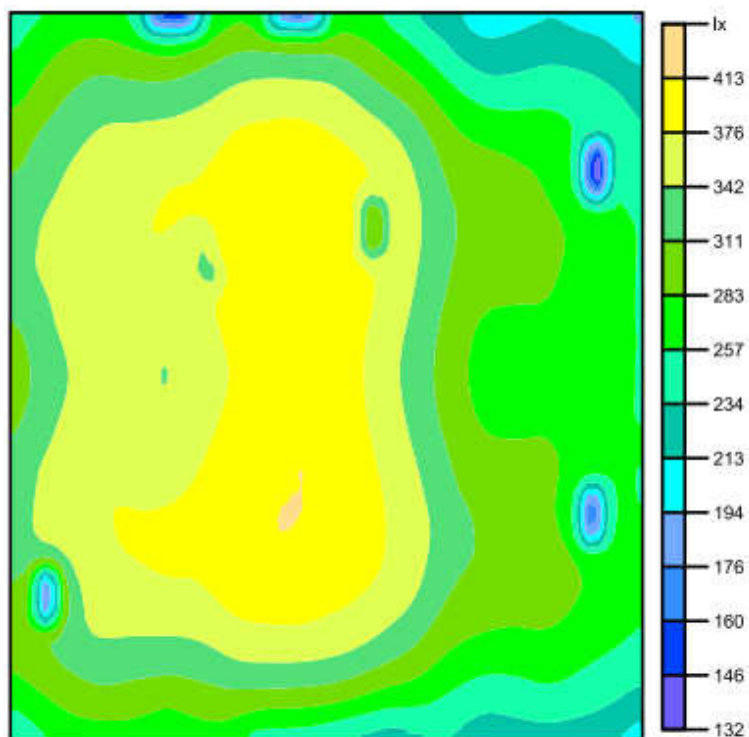
Fonte: do autor.

Figura 2 – AT 1, 10h de um dia nublado de verão.



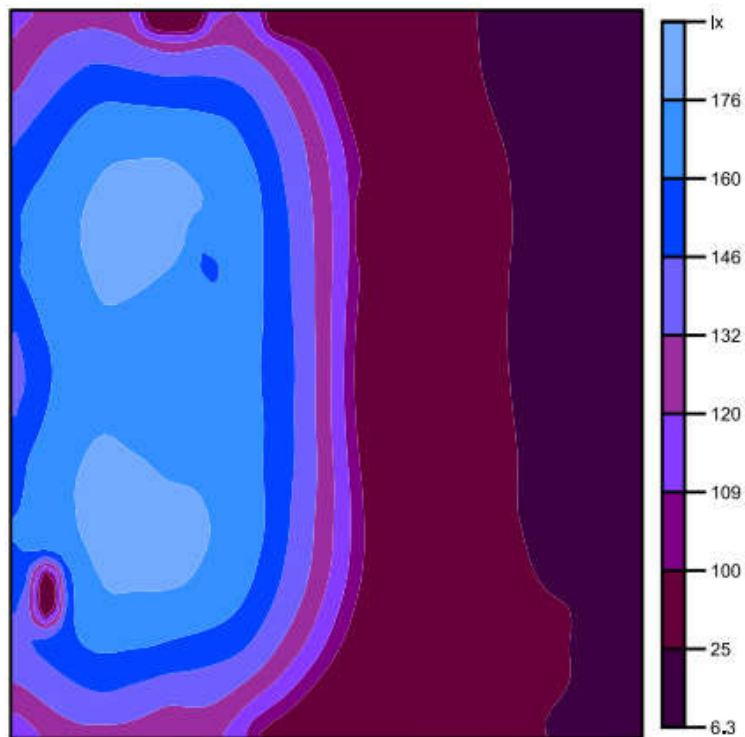
Fonte: do autor.

Figura 3 – AT 1, 14h de um dia nublado de inverno.



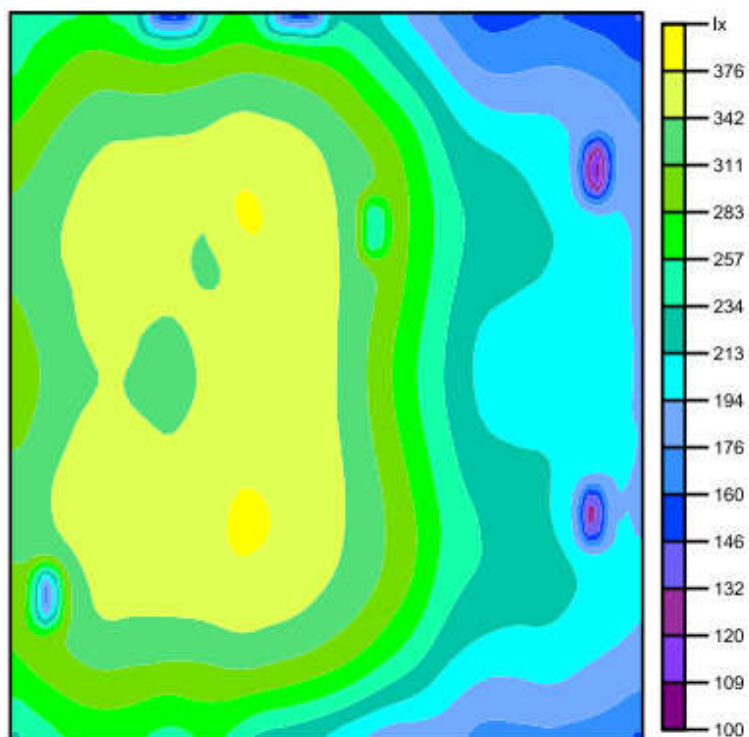
Fonte: do autor.

Figura 4 –AT 1, 14h de um dia nublado de verão.



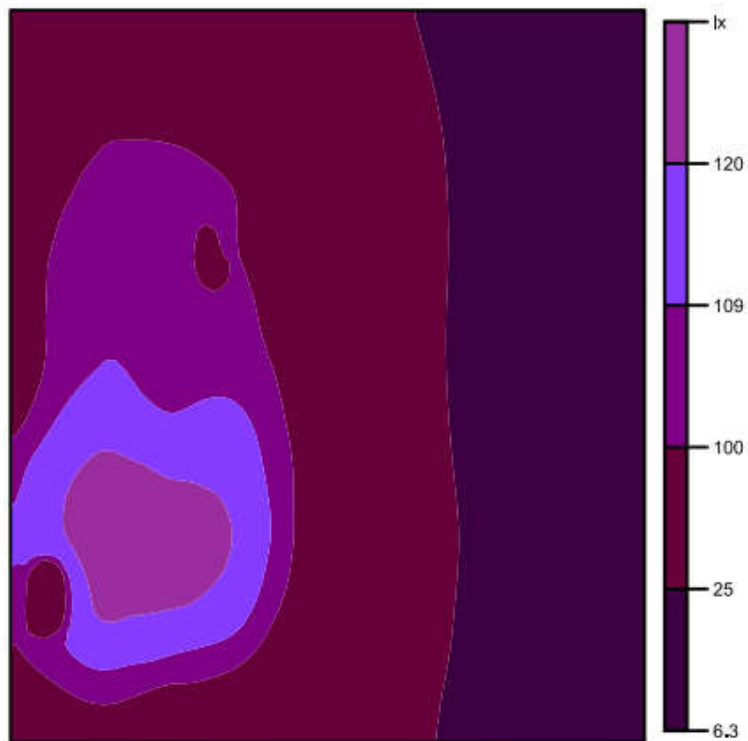
Fonte: do autor.

Figura 5 – AT 1, 16h de um dia nublado de inverno.



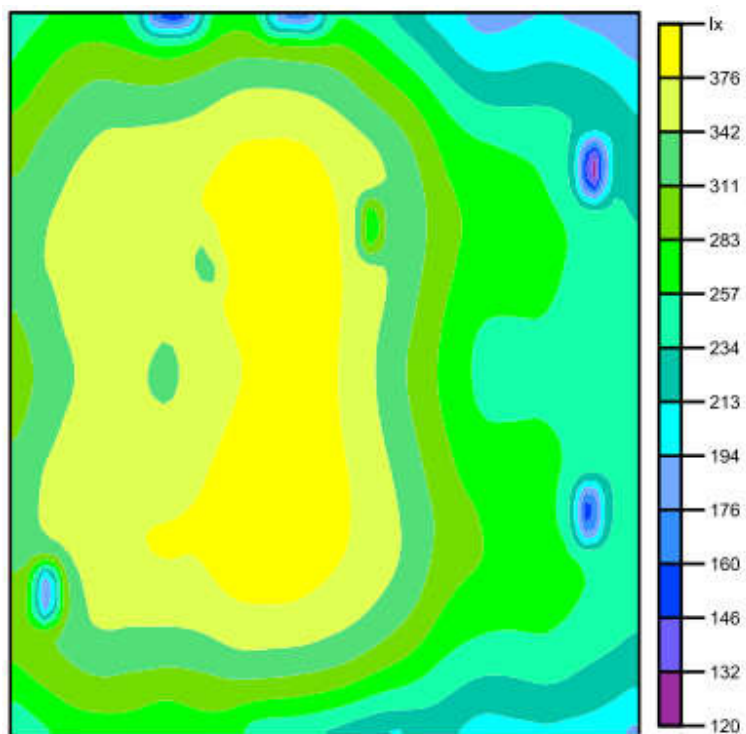
Fonte: do autor.

Figura 6 – AT 1, 16h de um dia nublado de verão.



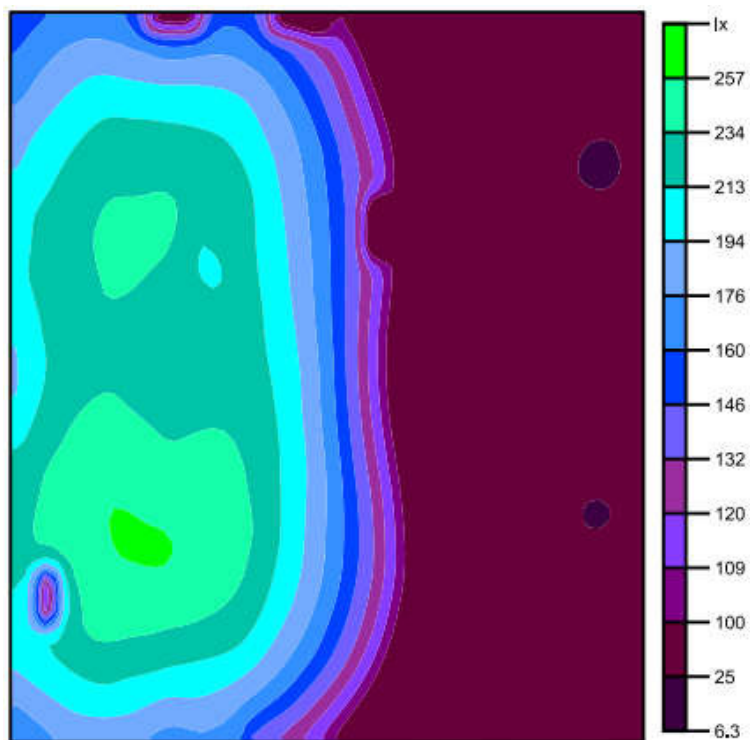
Fonte: do autor.

Figura 7 – AT 1 , 8h de um dia intermediário de inverno.



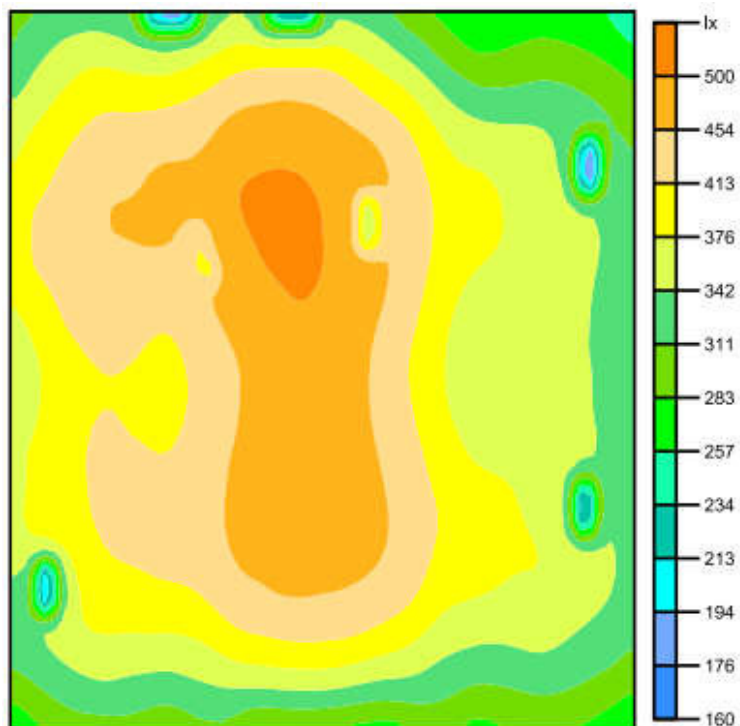
Fonte: do autor.

Figura 8 – AT 1, 8h de um dia intermediário de verão.



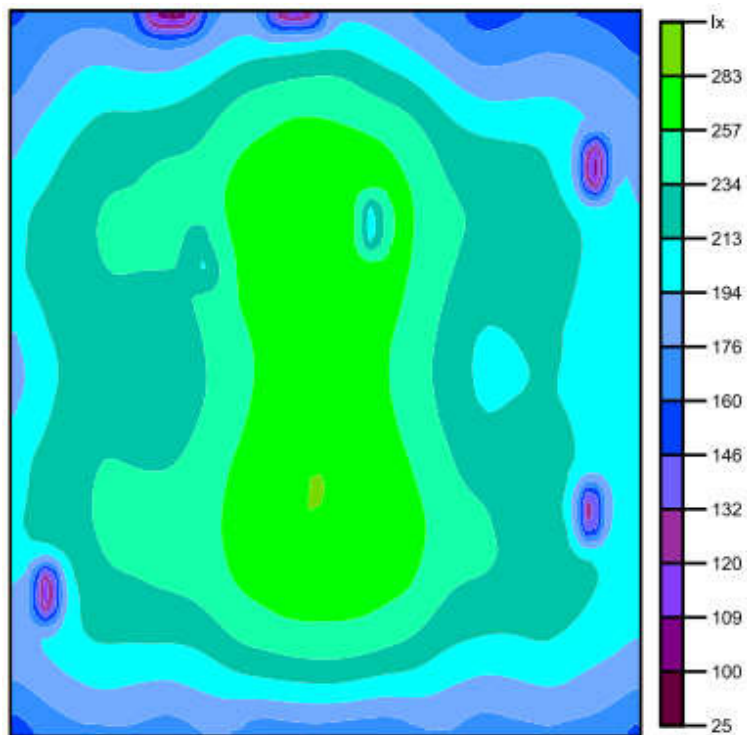
Fonte: do autor.

Figura 9 – AT 1, 16h de um dia intermediário de inverno.



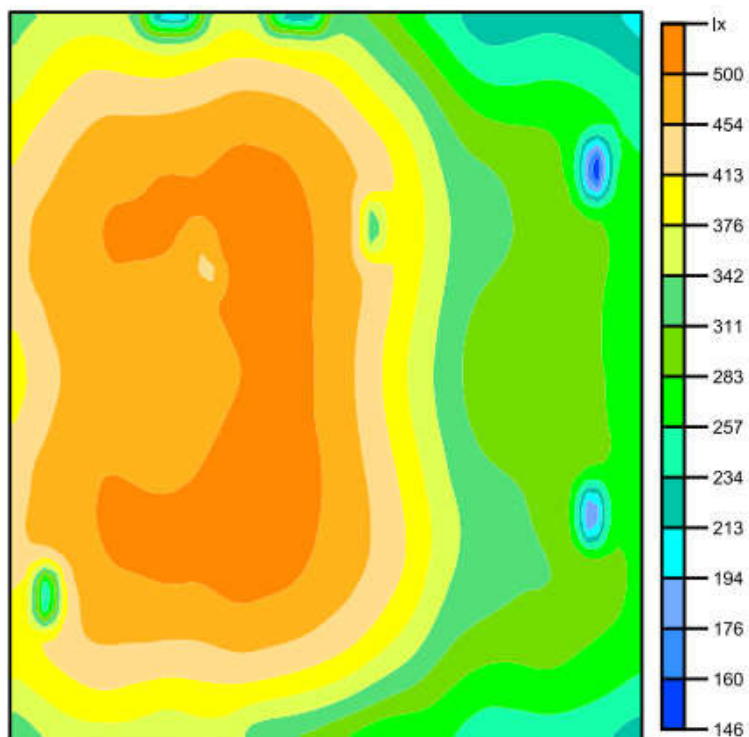
Fonte: do autor.

Figura 10 – AT 1, 17h de um dia intermediário de inverno.



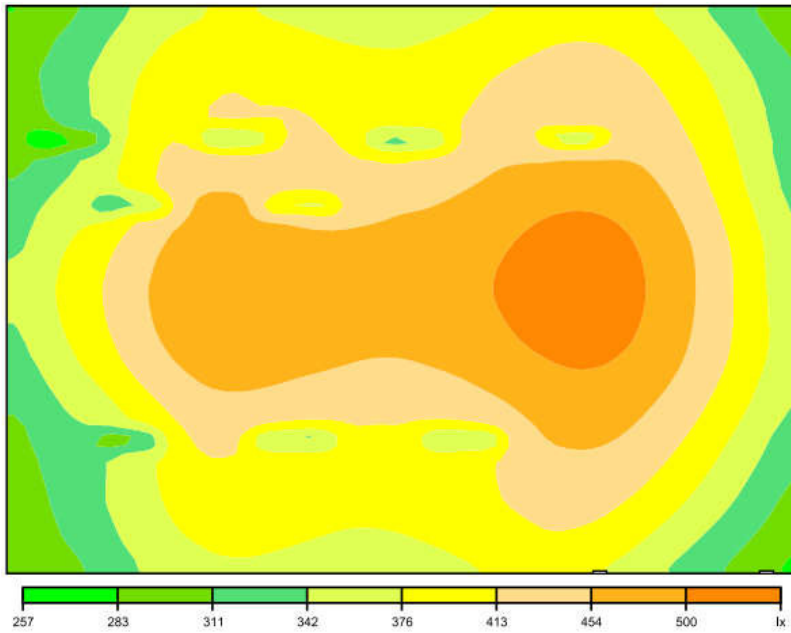
Fonte: do autor.

Figura 11 – AT 1, 18h de um dia intermediário de verão.



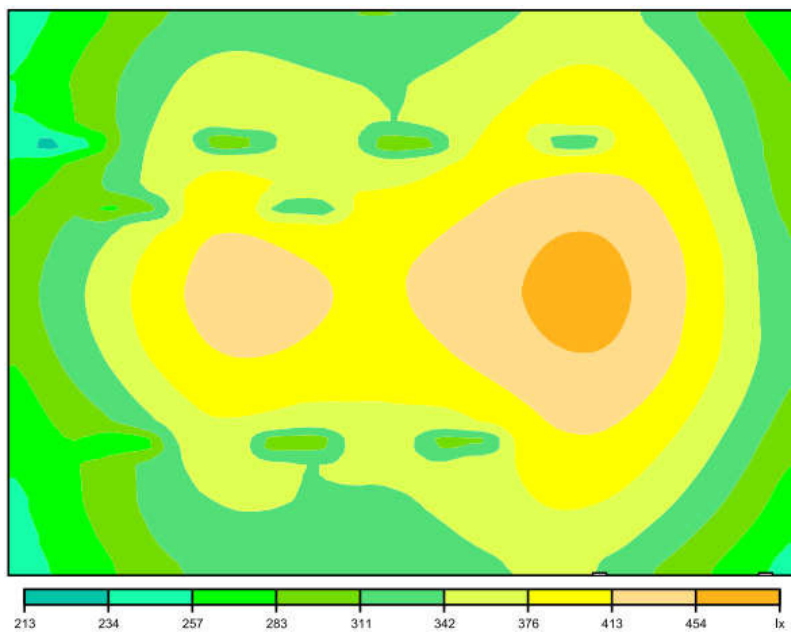
Fonte: do autor.

Figura 12 – AT 2, 10h de um dia nublado de inverno.



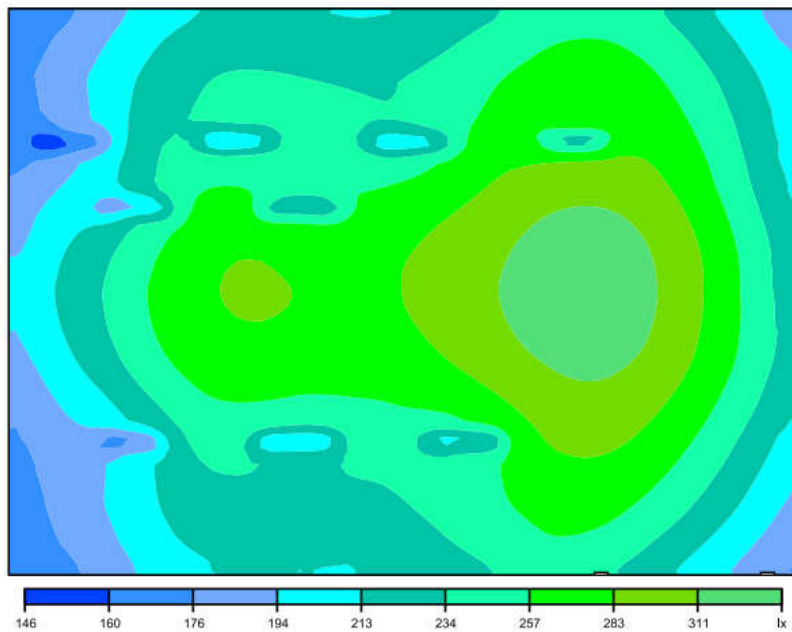
Fonte: do autor.

Figura 13 – AT 2, 10h de um dia nublado de verão.



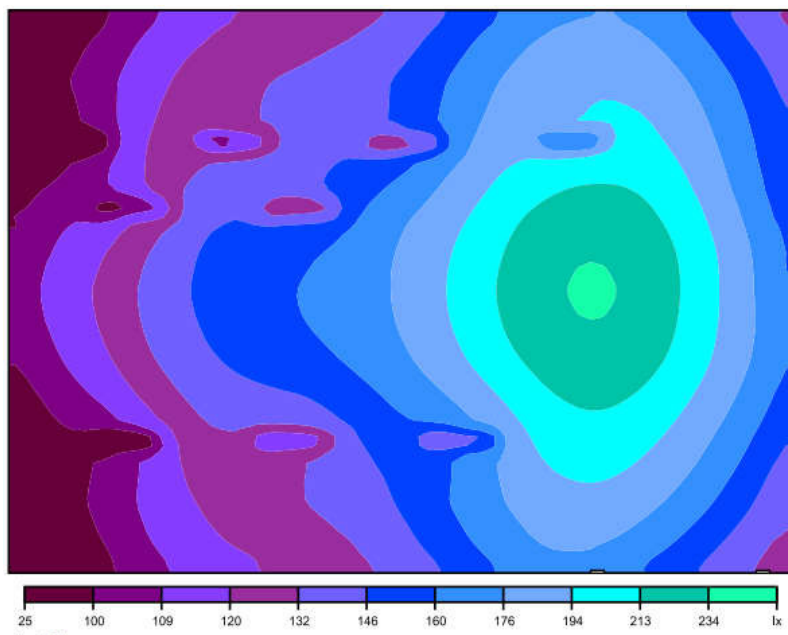
Fonte: do autor.

Figura 14 – AT 2, 14h de um dia nublado de inverno.



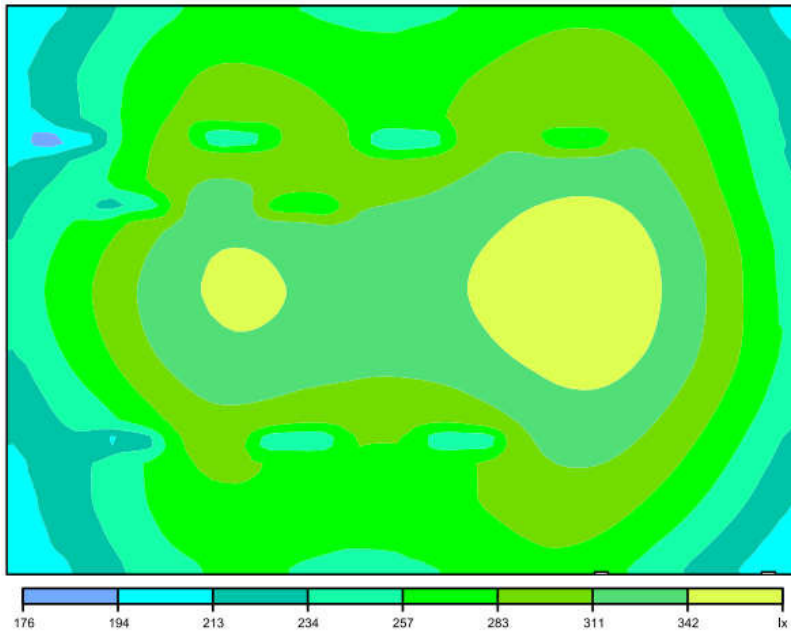
Fonte: do autor.

Figura 15 – AT 2, 14h de um dia nublado de verão.



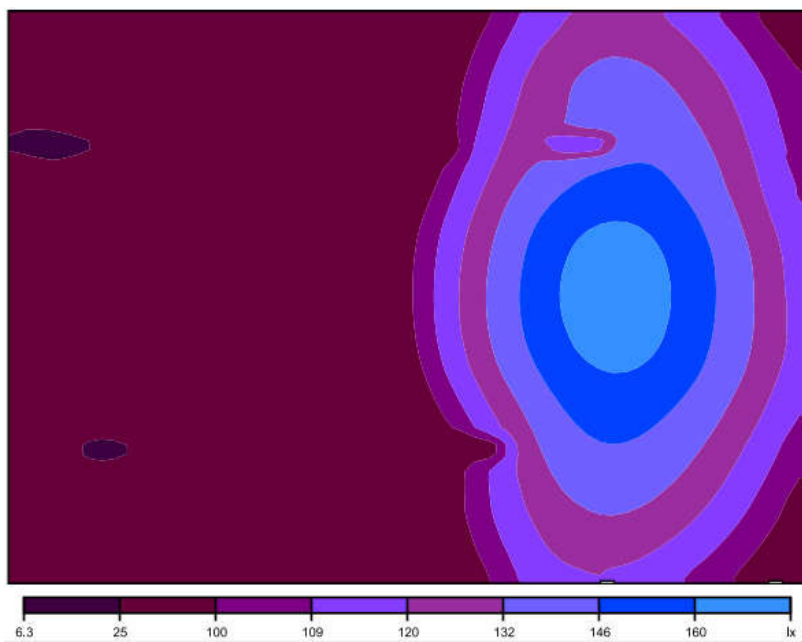
Fonte: do autor.

Figura 16 – AT 2, 16h de um dia nublado de inverno.



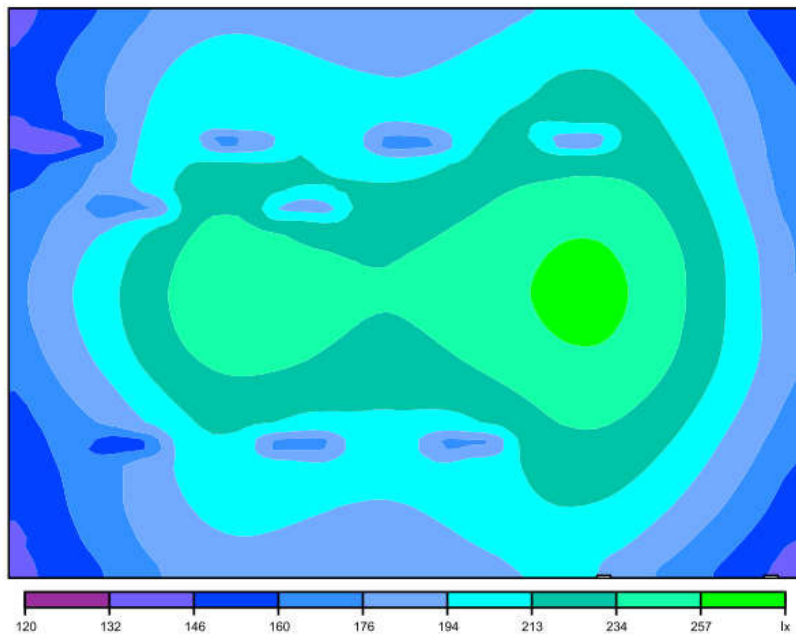
Fonte: do autor.

Figura 17 – AT 2, 16h de um dia nublado de verão.



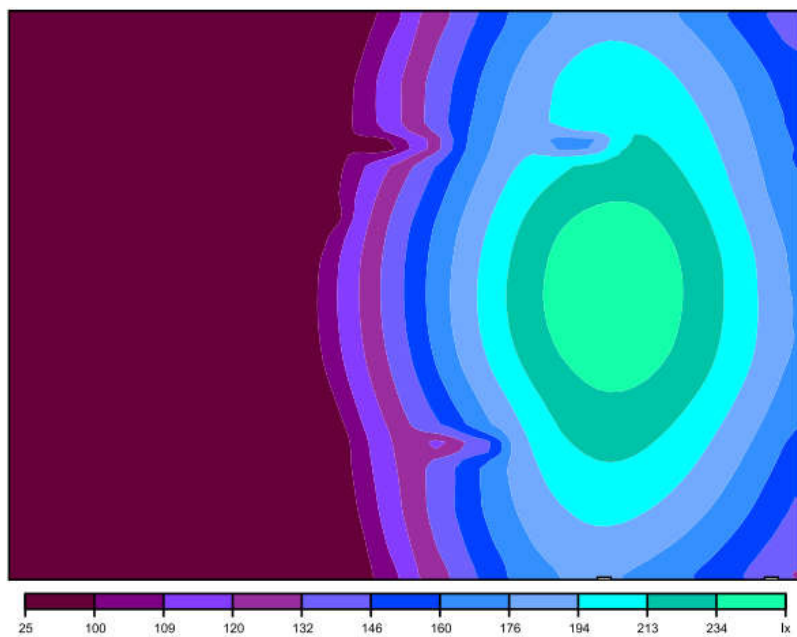
Fonte: do autor.

Figura 18 – AT 2, 8h de um dia intermediário de inverno.



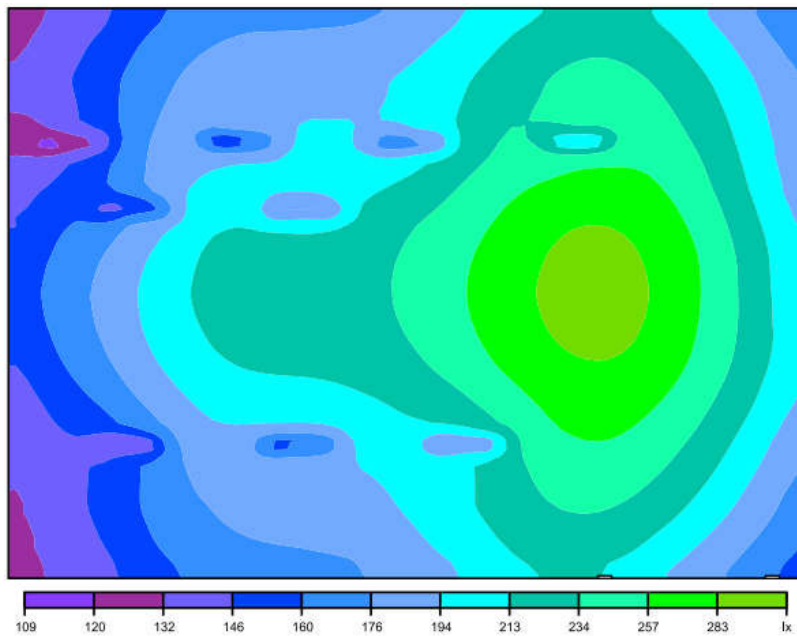
Fonte: do autor.

Figura 19 – AT 2, 8h de um dia intermediário de verão.



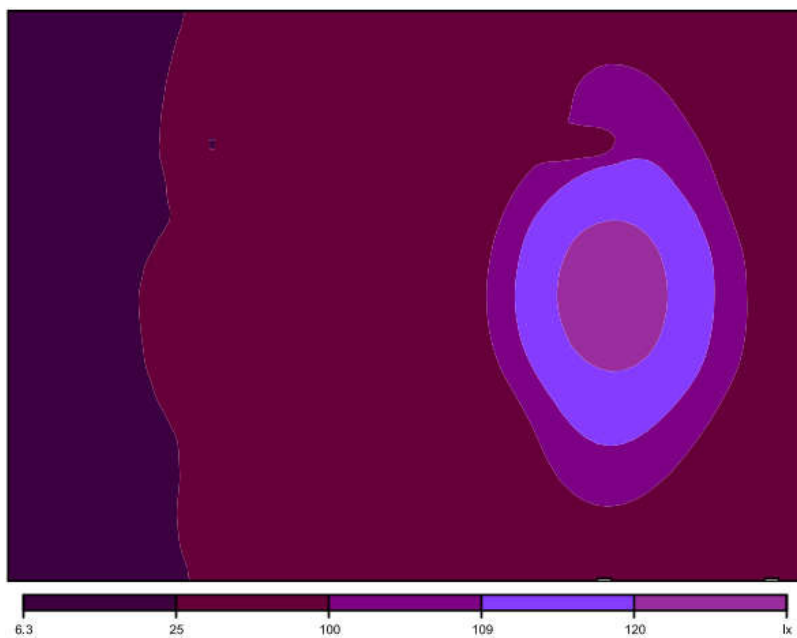
Fonte: do autor.

Figura 20 – AT 2, 16h de um dia intermediário de inverno.



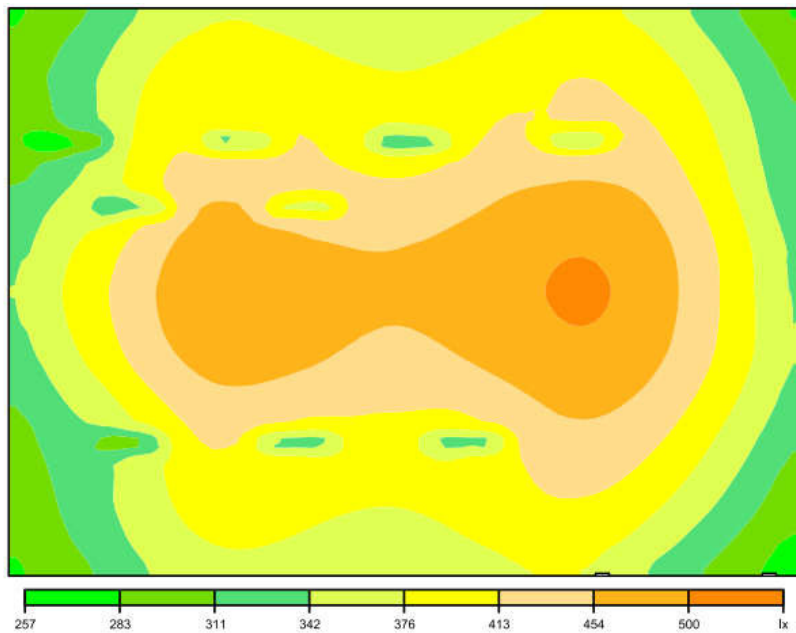
Fonte: do autor.

Figura 21 – AT 2, 16h de um dia intermediário de verão.



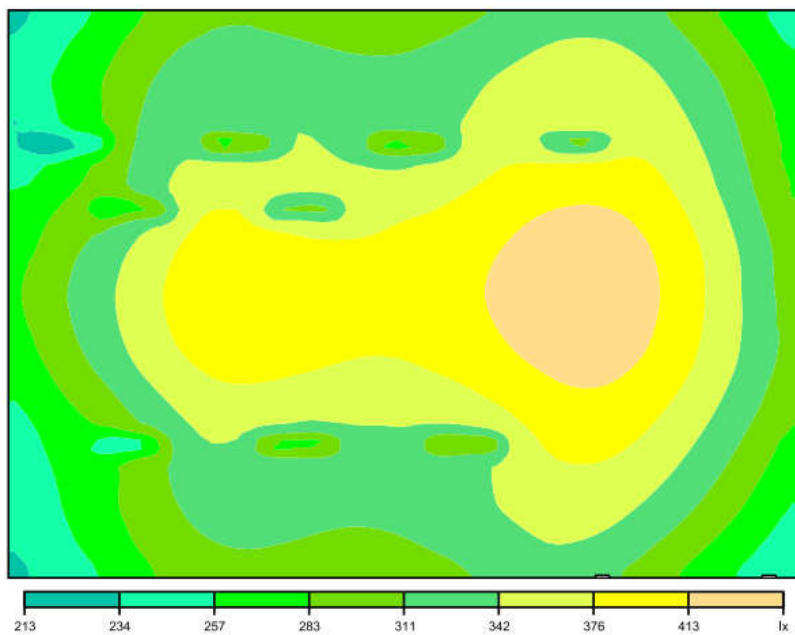
Fonte: do autor.

Figura 22 – AT 2, 17h de um dia intermediário de inverno.



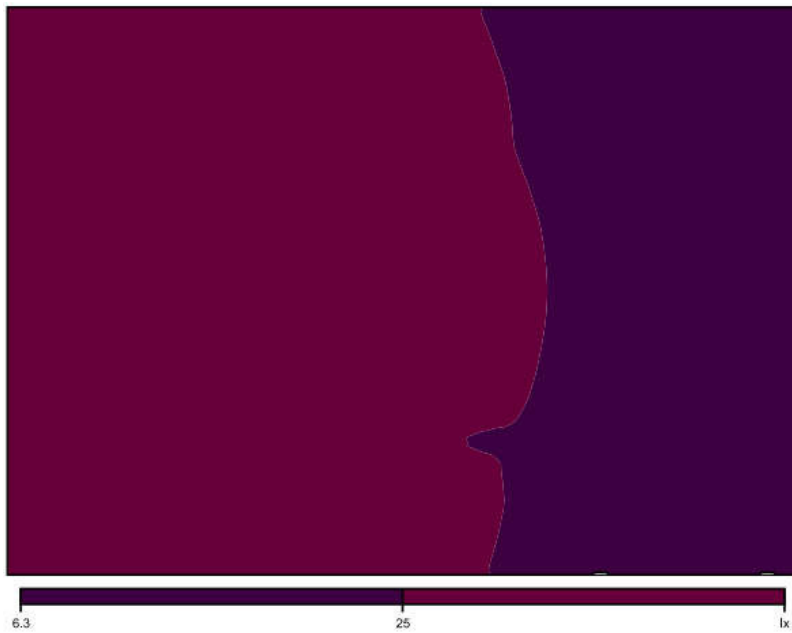
Fonte: do autor.

Figura 23 – AT 2, 18h de um dia intermediário de verão.



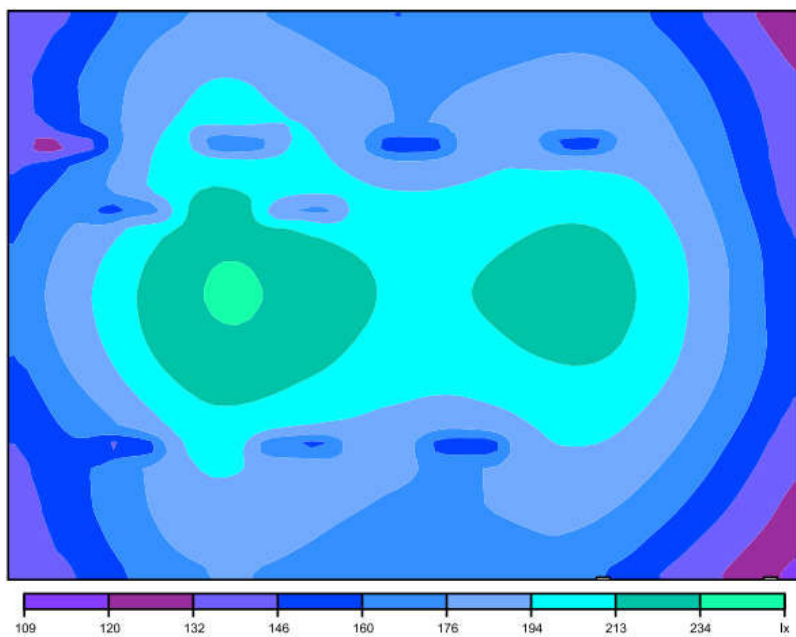
Fonte: do autor.

Figura 24 – AT 2, 14h de um dia ensolarado de inverno.



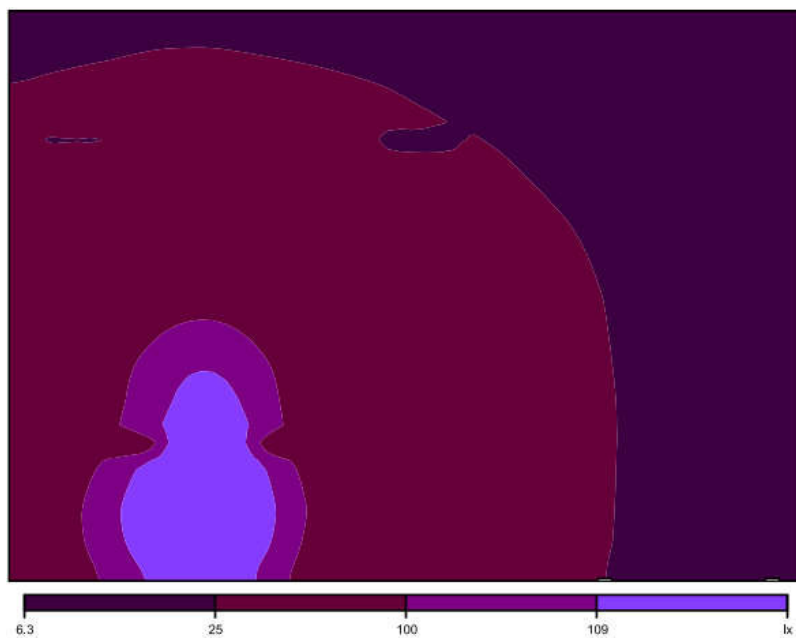
Fonte: do autor.

Figura 25 – AT 2, 16h de um dia ensolarado de inverno.



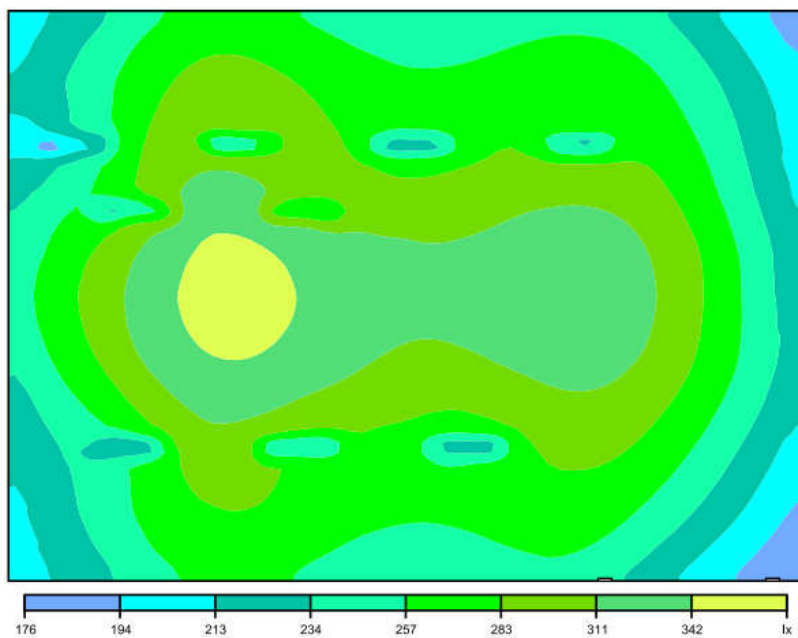
Fonte: do autor.

Figura 26 – AT 2, 16h de um dia ensolarado de verão.



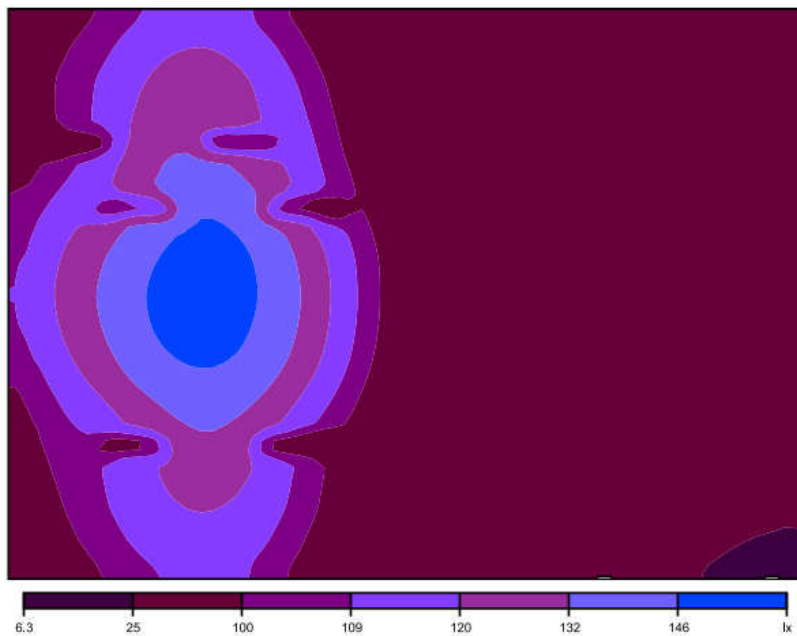
Fonte: do autor.

Figura 27 – AT 2, 17h de um dia ensolarado de inverno.



Fonte: do autor.

Figura 28 – AT 2, 18h de um dia ensolarado de verão.



Fonte: do autor.