

INSTITUTO FEDERAL DE GOIÁS
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE
PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DA
APLICAÇÃO DA BIOARQUITETURA EM PROJETOS
RESIDENCIAIS COM FOCO NA EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA

Luíza Vitor Rubbioli

[IFG] & [PPGTPS]
[Goiânia - Goiás - Brasil]
11 de fevereiro de 2022

INSTITUTO FEDERAL DE GOIÁS
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE
PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DA
APLICAÇÃO DA BIOARQUITETURA EM PROJETOS
RESIDENCIAIS COM FOCO NA EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA

Luíza Vitor Rubbioli

Dissertação apresentada à Banca Examinadora como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia de Processos Sustentáveis pelo Instituto Federal de Goiás (IFG), sob a orientação do Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto e coorientação do Prof. Dr. Márcio Rodrigues da Cunha Reis.

[IFG] & [PPGTPS]
[Goiânia - Goiás - Brasil]
11 de fevereiro de 2022

R895m Rubbioli, Luíza Vitor.

Modelagem, simulação e análise da aplicação da bioarquitetura em projetos residenciais com foco na eficiência energética / Luíza Vitor Rubbioli. – Goiânia : Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2022.
103f.

Orientador: Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto.

Coorientador: Prof. Dr. Márcio Rodrigues da Cunha Reis.

Dissertação (Mestrado) – Mestrado Profissional em Tecnologia de Processos Sustentáveis - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Inclui apêndice.

1. Eficiência energética. 2. Bioarquitetura. 3. Software de simulação. I. Calixto, Wesley Pacheco (orientador). II. Reis, Márcio Rodrigues da Cunha (coorientador). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

CDD
770.47

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Lana Cristina Dias Oliveira CRB1/ 2.631
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: LUIZA VITOR RUBBIOLI

Matrícula: 20182011140097

Título do Trabalho: Modelagem, simulação e análise da aplicação da bioarquitetura em projetos residenciais com foco na eficiência energética.

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ___/___/___ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2** ou **3**, marque a justificativa:

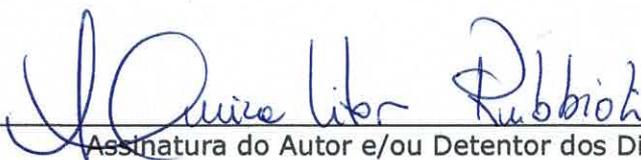
- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 14 de fevereiro de 2022


Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

PARECER 16/2021 - GYN-CMTPS/GYN-DPPGE/CP-GOIANIA/IFG

**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CÂMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS**

LUIZA RODRIGUES VITOR

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA BIOARQUITETURA EM PROJETOS RESIDENCIAIS COM
FOCO NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Sustentáveis do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Energias Renováveis e Engenharia Econômica Aplicada.

Aprovada em: 31/08/2021

Presidente e Orientador: Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto – PPGTPS IFG

Avaliador: Prof. Dr. Márcio Rodrigues da Cunha Reis – ENGP/IFG Câmpus Senador Canedo

Avaliadora: Prof.^a Dr.^a Alana da Silva Magalhães – IFG Câmpus Goiânia

Avaliador: Prof. Dr. Gelson da Cruz Junior – UFG

Avaliador: Prof. Dr. Sérgio Botelho de Oliveira – PPGTPS IFG

Documento assinado eletronicamente por:

- Wesley Pacheco Calixto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 20/09/2021 10:40:52.
- Sergio Botelho de Oliveira, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 20/09/2021 11:58:38.
- Marcio Rodrigues da Cunha Reis, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 21/09/2021 07:51:59.
- Alana da Silva Magalhaes, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 22/09/2021 10:56:22.
- Gélson da Cruz Júnior, GÉLSON DA CRUZ JÚNIOR - OUTROS - IFG - CÂMPUS GOIÂNIA (10870883000225), em 23/09/2021 10:33:23.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 24/08/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 193322

Código de Autenticação: 2b4d1bc85f



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Rua 75, nº 46, Centro, GOIÂNIA / GO, CEP 74055-110

(62) 3227-2811 (ramal: 2811)

"A finalidade da casa é de proporcionar uma vida conveniente e confortável, e seria um erro valorizar demais um resultado exclusivamente decorativo".

LINA BO BARDI

A todos os homens pela incansável busca pelo conhecimento.

AGRADECIMENTOS

O trabalho de mestrado é uma longa viagem, que inclui em sua trajetória inúmeros desafios. Trilhar este caminho só foi possível com o apoio, compreensão, energia e força de várias pessoas indispensáveis em cada momento da caminhada, à quem dedico e compartilho o meu aprendizado.

Agradeço todos os professores que passaram em minha vida estudantil e acadêmica, em especial ao professor e amigo Wesley Pacheco Calixto, o meu reconhecimento pela oportunidade de realizar este trabalho ao lado de uma pessoa que transpira sabedoria e confiança. Obrigado igualmente ao meu Coorientador professor Dr. Márcio Rodrigues da Cunha Reis por todo o empenho e ensinamento para o desenvolvimento desse trabalho. A Pontifícia Universidade Católica de Goiás, em nome do Prof. Antônio Fernandes Manuel Corado Pombo, que ministrou a disciplina de conforto térmico e que despertou meu interesse no conhecimento da ruptura da arquitetura meramente plástica, buscando integrar as condições climáticas nas edificações, proporcionando eficiência energética e conforto térmico. Obrigada por todo conhecimento transmitido durante o curso de arquitetura e urbanismo.

Agradeço em especial à Deus e ao meus pais, Sandra Vitor, Jorge Ruppenthal e Ezio Rubbioli, que me deram a oportunidade de seguir nos estudos, me fizeram acreditar em um mundo melhor e me encorajam a prosseguir, me apoiando nas decisões a serem tomadas. Ao meu noivo Adeilson Araújo pela compreensão das ausências e apoio incondicional nos desafios diários. Sem vocês, eu não chegaria até aqui.

Agradeço de forma especial e carinhosa aos meus avôs (Adelice Vitor, José Vitor, Silvia Ruppenthal e Yvette Rubbioli), aos meus irmãos (Júlia Jaciana e Vitor Peri), tia Myriam Vitor, Yara Vanessa, Erika Christina, Ana Rosa (*in memoriam*), tia Cláudia Rubbioli, tia Cláudia Celiene, Sirlene França e Padrinho Vilmar Vitor pelo apoio em todas as etapas da minha vida. O amor que sinto por vocês é incondicional. Muito obrigada por tudo!

Aos familiares e amigos, pela compreensão das ausências e por estarem sempre presentes em minha vida. Obrigada por acreditar no meu sonho e sempre me motivar a seguir em frente.

À Senadora Lúcia Vânia pelas orientações e empoderamento. Mulher de inteligência, força e dedicação inigualável. Obrigada por todo ensinamento e pelas oportunidades proporcionadas.

Aos colegas do IFG pela acolhida e apoio nessa jornada, aos amigos de trabalho da Agência Goiana de Habitação – AGEHAB/GO, da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Social – SEDS/GO e da Companhia de Desenvolvimento Econômico do Estado de Goiás – CODEGO pelo incentivo e o apoio durante o programa de mestrado.

À todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, o meu muito obrigada!

RESUMO

Este trabalho propõe investigar a interferência solar nas edificações com o objetivo de otimizar a eficiência energética das habitações. Busca-se promover o questionamento dos rumos adotados pelos projetistas no âmbito da bioarquitetura, partindo do princípio que na maioria das vezes a concepção arquitetônica plástica é priorizada, deixando as estratégias da bioarquitetura para ser solucionada após a ocupação do ambiente. A metodologia do trabalho utiliza simulações computacionais através de softwares que auxiliam na análise luminosa e térmica das residências. Os dados de simulação apresentam que as orientações oeste, leste e nordeste para o local na qual foi realizado o estudo, têm as maiores áreas médias de incidência solar com $\approx 30m^2$ de área iluminada/aquecida por ano. Foi observado que as aberturas direcionadas para as orientações de maior área de incidência solar são os ambientes mais quentes, requerendo equipamentos para a promoção do conforto térmico. Os resultados apontam as melhores orientações solares para proporcionar aumento da eficiência energética, economia, redução do consumo de recursos naturais, melhoria da qualidade de vida, promoção da preservação do meio ambiente e melhor aproveitamento luminoso e térmico.

MODELING, SIMULATION AND ANALYSIS OF THE APPLICATION OF BIARCHITECTURE IN RESIDENTIAL PROJECTS WITH A FOCUS ON ENERGY EFFICIENCY

ABSTRACT

This work proposes to investigate solar interference in buildings with the aim of optimizing the increased energy efficiency in homes. It seeks to promote the questioning of the paths adopted by designers in the field of bioarchitecture, assuming that, in most cases, the plastic architectural design is prioritized, leaving bioarchitecture strategies to be solved after the occupation of the environment. The methodology of the work uses computer simulations through software that assist in the luminous and thermal analysis of the residences. The data are obtained from the parameters established in standards and consist of monitoring the simulations, observing the impacts, interferences and savings provided. The simulation data show that the west, east and northeast orientations for the location where the study was carried out have the highest average areas of solar incidence with $\approx 30m^2$ of lit/heated area per year. It was observed that the openings directed towards the orientations of the largest area of sunlight are the hottest environments, requiring equipment to promote thermal comfort. The results point to the best solar guidelines to provide increased energy efficiency, savings, reduced consumption of natural resources, improvement in quality of life, promotion of environmental preservation and better use of light and heat.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	25
CAPÍTULO 2 BIOARQUITETURA	33
2.1 Conceitos e diretrizes da bioarquitetura	33
2.2 Evolução da arquitetura	35
2.3 Eficiência energética nas edificações	38
2.4 Certificações e normatizações	40
2.5 Considerações	44
CAPÍTULO 3 ESTRATÉGIAS DE PROTEÇÃO E APROVEITA- MENTO SOLAR	45
3.1 Fluxo luminoso	45
3.1.1 Energia, fluxo luminoso e efeitos da incidência de raios luminosos	48
3.2 Conforto visual para aplicação na bioarquitetura	50
3.3 Conforto térmico para aplicação na bioarquitetura	52
3.4 Elementos arquitetônicos de proteção solar como estratégias de controle	57
3.5 Considerações	61
CAPÍTULO 4 SISTEMA, MODELO E SIMULAÇÃO	62
4.1 Sistema e modelo	62
4.2 Simulação	63
4.3 Softwares de simulação com aplicação na bioarquitetura	63
4.4 Processo de otimização	65
4.4.1 Algoritmo genético e método de Quase-Newton	65
4.4.2 Processo de hibridização	66
4.4.3 Processo de regressão paramétrica	67

4.5	Considerações	68
CAPÍTULO 5 METODOLOGIA		69
5.1	Contextualização	69
5.2	Definição da geometria de simulação	70
5.2.1	Escolha do local da pesquisa	71
5.3	Ambiente hipotético para estudo de caso	71
5.4	Dispositivos de simulação do fluxo natural	71
5.4.1	Isocurva da área de iluminação e expressão para determinar a superfície de iluminação	73
5.4.2	Conforto térmico humano e estratégias de controle	74
5.5	Considerações	75
CAPÍTULO 6 RESULTADOS		76
6.1	Definição das variáveis de simulação	76
6.1.1	Local para realização do estudo de caso	76
6.2	Ambiente para estudo e simulação do fluxo luminoso natural	80
6.2.1	Orientações cardeais norte, sul, leste e oeste	81
6.2.2	Orientações colaterais nordeste, noroeste, sudeste e sudoeste	86
6.3	Análise da incidência solar nas orientações cardeais e colaterais	91
6.4	Análise da área de incidência solar × profundidade do ambiente	93
6.5	Isocurvas da área de iluminação e cálculo da superfície de iluminação direta	94
6.6	Estudo luminoso e térmico para aplicação da bioarquitetura	96
6.6.1	Conforto térmico humano e estratégias de controle	104
6.7	Discussão	109
CAPÍTULO 7 CONCLUSÃO		112
7.1	Contribuições do trabalho	113
7.2	Sugestões para trabalhos futuros	114
APÊNDICE A COEFICIENTES DA EXPRESSÃO		117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		118

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Índices de classificação do Programa Brasileiro de Etiquetagem.	41
2.2 Método de simulação do Programa Brasileiro de Etiquetagem.	42
2.3 Etapas de solicitação da etiqueta do Programa Brasileiro de Etiquetagem.	42
3.1 Trajetória do sol nos solstícios e equinócios.	46
3.2 Movimento solar: a) altura e azimute e b) projeção esferográfica da tra- jetória aparente solar.	47
3.3 Leitura da Carta Solar.	48
3.4 Ilustração da incidência de raio luminoso em determinada interface. . . .	50
3.5 Tripé do conforto visual e interação do usuário no ambiente.	51
3.6 Mapeamento do zoneamento bioclimático brasileiro.	55
3.7 Carta bioclimática: a) modelo de Olgay (1953) e b) modelo Givoni (1998).	57
4.1 Diferentes organizações para o conjunto de cinco elementos.	62
4.2 Fluxo do processo de otimização.	66
4.3 Fluxograma do processo de hibridização do algoritmo genético com mé- todo de Quase-Newton no processo de otimização.	67
4.4 Ilustração do processo de regressão paramétrica.	68
5.1 Recorte da área de estudo.	69
5.2 Ilustração da redução do consumo energético.	70
5.3 Ilustração hipotética da proporção do ambiente residencial para simula- ção: (a) volume do ambiente e (b) planta baixa.	70
5.4 Fluxograma da metodologia proposta para mensurar a incidência luminosa.	72
6.1 Dimensões do ambiente de simulação: a) volume do ambiente e b) planta baixa.	76
6.2 Temperatura e zona de conforto para a Cidade de Goiânia: (a) tempe- ratura média mensal do bulbo seco e úmido e (b) temperatura média mensal das máximas e das mínimas.	77
6.3 Média mensal da amplitude térmica diária.	78
6.4 Radiação solar: (a) médias mensais e (b) médias diária das máximas e mínimas durante o mês.	79
6.5 Período chuvoso: (a) comportamento pluviométrico e (b) umidade relativa.	79
6.6 Ventos dominantes: (a) dia, (b) noite e (c) média geral (dia/noite). . . .	80
6.7 Ambiente para estudo de caso.	81

6.8	Comportamento do fluxo luminoso nas superfícies considerando a orientação norte .	82
6.9	Comportamento do fluxo luminoso nas superfícies considerando a orientação sul .	84
6.10	Comportamento do fluxo luminoso nas superfícies considerando a orientação leste .	85
6.11	Comportamento do fluxo luminoso nas superfícies considerando a orientação oeste .	86
6.12	Comportamento do fluxo luminoso nas superfícies considerando a orientação nordeste .	88
6.13	Comportamento do fluxo luminoso nas superfícies considerando a orientação noroeste .	89
6.14	Comportamento do fluxo luminoso nas superfícies considerando a orientação sudeste .	90
6.15	Comportamento do fluxo luminoso nas superfícies considerando a orientação sudoeste .	91
6.16	Comportamento da incidência solar natural no ambiente em estudo.	92
6.17	Análise geral da média da área da incidência solar anual em cada superfície e total.	93
6.18	Comportamento do fluxo luminoso na orientação oeste : a) área da incidência solar \times profundidade e b) média anual da incidência solar \times profundidade.	94
6.19	Isocurva da área de iluminação na orientação oeste : a) apresentação da área de iluminação na parede do fundo e b) representação 3D do somatório das áreas de iluminação.	95
6.20	Superfície $P \times P_a \times I_d$: a) superfície obtida em simulação e b) superfícies de simulação \times expressão otimizada.	95
6.21	Carta solar com projeção estereográfica para a latitude $16,40^\circ S$, plano horizontal: a) carta solar completa e b) carta solar simplificada.	97
6.22	Análise da incidência solar predominante em cada orientação a partir da carta solar: a) carta solar completa, b) orientação norte, c) orientação sul, d) orientação leste e e) orientação oeste.	98
6.23	Interface do software Analysis Sol-Ar e indicação dos ângulos α , β e γ .	99
6.24	Simulação da incidência solar nos azimutes: a) $Az = 45^\circ$, b) $Az = 135^\circ$, c) $Az = 225^\circ$ e d) $Az = 315^\circ$.	99
6.25	Planta baixa residencial utilizada na simulação.	100

6.26	Incidência solar para $Az = 70^\circ$, correspondente à orientação nordeste: a) registros dos horários de incidência solar nas aberturas e b) registros das temperaturas de bulbo seco.	101
6.27	Incidência solar para $Az = 150^\circ$, correspondente à orientação sudeste: a) registros dos horários de incidência solar nas aberturas e b) registros das temperaturas de bulbo seco.	102
6.28	Incidência solar para $Az = 240^\circ$, correspondente à orientação sudoeste: a) registros dos horários de incidência solar, b) registros das temperaturas de bulbo seco.	103
6.29	Registros das temperaturas de bulbo seco da incidência solar no $Az = 330^\circ$ correspondente à orientação noroeste.	103
6.30	Análise da incidência solar no ambiente Dormitório 1.	104
6.31	Análise da incidência solar no ambiente Dormitório 2.	105
6.32	Análise da incidência solar no ambiente Sala.	105
6.33	Análise da incidência solar no ambiente Cozinha.	106
6.34	Estudo da proteção solar vertical na orientação leste, ambiente Dormitório 1.	107
6.35	Estudo da proteção solar vertical na orientação norte, ambiente Dormitório 1.	107
6.36	Estudo da proteção solar vertical na orientação oeste, ambiente Dormitório 1.	108
6.37	Estudo da proteção solar vertical na orientação sul, ambiente Dormitório 1.	108

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Sombreamento e insolação em algumas cidades brasileiras.	49
3.2 Nível de iluminação natural para edificações residenciais.	50
3.3 Taxa de metabolismo energético \times atividade.	53
3.4 Resistência térmica \times vestuário.	53
6.1 Dimensões das áreas externas do ambiente de simulação.	77
6.2 Incidência solar para a localização 16,40°S nos azimutes: a) $Az = 45^\circ$, b) $Az = 135^\circ$, c) $Az = 225^\circ$ e d) $Az = 315^\circ$	99
A.1 Coeficientes a_i , b_i e c_i da expressão.	117

LISTA DE SÍMBOLOS

lm	–	Lúmen
kWh	–	Quilowatt-hora
N_{som}	–	Necessidade de sombreamento
N_{ins}	–	Necessidade de insolação
Φ_R	–	Fluxo radiante ou potência radiante
Φ_F	–	Fluxo luminoso
Q_{sk}	–	Taxa total de calor perdido pela pele
Q_{res}	–	Taxa total de calor perdido pela respiração
M_E	–	Metabolismo
R_T	–	Resistência térmica
I_d	–	Área de Incidência direta
P_a	–	Período anual
met	–	Unidade de metabolismo humano em decorrência da atividade
clo	–	Índices de resistências térmicas das vestimentas
m^2	–	Unidade de área
kg	–	Unidade de massa corporal
T_m	–	Temperaturas médias
T_{max}	–	Temperaturas máximas
T_{min}	–	Temperaturas mínima
UR_m	–	Umidade Relativa média
A_{DU}	–	Área da superfície do corpo
lux	–	Intensidade luminosa
m	–	Unidade de metro

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	– Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTAC	– Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
AQUA	– Alta Qualidade Ambiental
ASHARAE	– American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BRE	– Building Research Establishment
BREEAM	– Building Research Establishment Environmental Assessment Method
CASBEE	– Sistema de Avaliação de Eficiência Ambiental para Construção
ENCE	– Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EPBD	– Desempenho Energético dos Edifícios
GBC	– Desafio da Construção Sustentável
HQE	– Haute Qualité Environnementale
INMETRO	– Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	– Organização Internacional de Normalização
LEED	– Leadership in Energy and Environmental Design
NBR	– Norma brasileira
OIA	– Organismo de Inspeção Acreditado
ONU	– Organização Mundial das Nações Unidas
PALN	– Potencial de Aproveitamento da Luz Natural
PBE	– Programa Brasileiro de Etiquetagem
PBE EDIFICA	– Programa Brasileiro de Etiquetagem Etiqueta de Eficiência Energética em Energética
PROCEL	– Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PPD	– Predicted percent dissatisfied
PMV	– Predicted Mean Vote
QAE	– Qualidade Ambiental do Edifício
RTQ-C	– Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos
RTQ-R	– Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais
SBS	– Sick Building Syndrome
SGE	– Sistema de Gestão do Empreendimento
TRY	– Test Reference Year
USGBC	– United States Green Building Council
ZEB	– Zero Energy Building (Edifício Zero Energia)

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A questão energética constitui um dos maiores desafios da atualidade, tendo em conta a finitude dos recursos naturais, o crescimento populacional e a dependência energética que estimulam a busca por alternativas com menores impactos ao meio ambiente e com promoção do desenvolvimento social e econômico (LAMBERTS et al., 2014).

A Organização Mundial das Nações Unidas (ONU), através do *Sustainable Energy for All*, incentiva o aumento das taxas de eficiência energética e estabelece a redução das emissões de gases de efeito estufa até 2030 (MARCOVITCH, 2006). Em consonância com a ONU, a Organização Internacional de Normalização (ISO) disponibiliza métodos classificatórios para o desempenho energético nas edificações, tendo como principal objetivo a padronização das certificações dos edifícios e permite em alguns itens, adequação das características particulares de cada nação. Neste contexto, destaca as normas **ISO 16343**: Desempenho energético dos edifícios e métodos de desempenho energético e de certificação energética de edifícios (*Energy performance of buildings Methods for energy performance and for energy certification of buildings*) (ISO16343, 2011) e a **ISO 16346**: Desempenho energético dos edifícios e avaliação do desempenho energético global (*Energy performance of buildings Assessment of overall energy performance*) (ISO16346, 2013).

No Brasil, através do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) aliado com o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), é disponibilizada a Etiqueta de Eficiência Energética em Edificações (PBE Edifica), que estabelece normas e regulamentos para as edificações residenciais (RTQ-R) e edificações públicas, comerciais e de serviços (RTQ-C), classificadas em cinco níveis de eficiência que variam de **A** a **E**. No cálculo do desempenho energético das edificações são considerados três sistemas: i) envoltória, ii) iluminação e iii) condicionamento (INMETRO, 2010).

A **Norma de Desempenho N°15.575/2013** estabelece parâmetros para avaliar tecnologias e sistemas construtivos das edificações habitacionais, considerando a durabilidade e tempo de vida útil, propondo simulações como ferramenta para estimar o desempenho e conforto (ABNT, 2013). A maior parte da energia consumida é para a promoção do conforto térmico aos usuários, além disto, as edificações desperdiçam energia e aumentam seus custos operacionais por não utilizarem materiais construti-

vos adequados as condições climáticas externas, principalmente em países tropicais (LAMBERTS et al., 2014).

Diversos países buscam estimular a implantação de edificação com alto desempenho e balanço energético nulo, denominado de Edifício Zero Energia (*Zero Energy Building* – ZEB), como futura meta para reduzir os problemas relacionados ao esgotamento dos recursos energéticos e a deterioração do meio ambiente (BRAJAL, 2012). Em 2002, o parlamento europeu e o conselho da união europeia estabelecem como principal instrumento legislativo, através da **Diretiva 2010/31/EU**, critérios para a implantação de melhorias relacionadas ao Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD) com a determinação de que os novos edifícios sejam energeticamente nulos até 2020 (EUROPEU; CONSELHO, 2002).

Com objetivo de demonstrar a aplicação das soluções para alcançar o ZEB, pesquisadores de dezenove cidades-membro realizam pesquisas entre os anos de 2008 à 2013, cujo escopo abrange edifícios residenciais construídos dentro das zonas climáticas dos países participantes (PACHECO; LAMBERTS, 2008). Além disto, os pesquisadores assinam a Declaração de Edifícios de Carbono Líquido Zero comprometendo a promulgar regulamentos e/ou políticas de planejamento para garantir que os novos edifícios operem com zero de carbono até 2030 e todos até 2050 (PACHECO; LAMBERTS, 2008).

Krüger e Dumke (2001) avaliam o desempenho dos sistemas construtivos da Vila Tecnológica de Curitiba/Paraná. Analisam dezoito unidades de habitações sociais com áreas construídas entre $31m^2$ e $51,5m^2$ com sistemas construtivos variados e avaliam: i) desempenho térmico da construção durante o inverno e o verão e ii) conforto térmico dos moradores. Os autores comprovam que os sistemas tradicionais de paredes de tijolos cerâmicos furados e coberturas de telhas de fibrocimento com forros de madeira ou painéis de concreto apresentaram os piores desempenho para o clima daquela região, principalmente no inverno.

Mascarenhas (2003) realiza análise para a redução do consumo de energia elétrica com substituição das instalações elétrica precárias dos consumidores de comunidades populares na cidade de Salvador/Bahia. As amostras correspondem a 2,3% do universo dos beneficiados com a substituição da fiação dos circuitos elétricos em quatro bairros da comunidades pertencentes ao Projeto do Agente Comunitário realizado pela concessionária do Estado da Bahia. Após a aplicação do questionário e a coleta dos dados nos medidores, os resultados demonstram que cerca de 67% das habitações apresentam deficiência na iluminação natural. Além disto, as instalações

precárias ocorrem em 70% dos domicílios. O autor informa que, com a troca da fiação elétrica e o uso de lâmpadas eficientes é possível reduzir até 25% no consumo total de energia.

Para realizar estudo do desempenho energético das edificações, [Cheikh e Bouchair \(2004\)](#) desenvolvem modelo matemático para análise do teto evaporativo refletivo com o objetivo de reduzir a temperatura interna das construções em clima quente árido. As simulações são realizadas com protótipo construído na Argélia, considerando as variações temporais e térmicas interna do ar em dias de verão. O teto é construído com laje convencional, no entanto, inclui camada de pedras imersas em água, seguida por espaço preenchido por ar e folhas de alumínio que compõe a última camada do teto. Os resultados comprovam que com a utilização do teto térmico é possível reduzir a temperatura interna em média 8°C durante o dia e no período noturno em torno de 2°C a 3°C, caso haja ventilação natural no ambiente interno.

[Alves \(2011\)](#) avalia o desempenho energético de quatro edifícios em Portugal para identificar as principais fontes de consumo de energia e indicar possíveis soluções de eficiência energética. Realiza-se simulações dinâmicas adotando parâmetros indicador de eficiência energética: i) real sem correção climática, ii) real com correção climática, iii) nominal e iv) referencial. O autor demonstra que o desempenho energético dos edifícios é influenciado por vários fatores, sendo os principais: i) eficiência energética dos equipamentos interiores, ii) geometria do edifício e iii) material utilizado na composição das envoltórias externas. Neste trabalho, a solução que apresenta melhor desempenho energético está associada as soluções adotadas nas envoltória externas das edificações como: i) paredes, ii) coberturas e iii) aberturas, que são responsáveis pelas maiores perdas energéticas dos edifícios.

[Sacht \(2013\)](#) apresenta estudo dos módulos ajustáveis implantados nas fachadas¹ para reabilitação eficiente dos edifícios na União Europeia. Realiza análise nas soluções: i) grelha estrutural para montagem dos módulos, ii) módulo padrão envidraçado fixo e móvel, iii) módulo de proteção solar, iv) módulo de ventilação, v) módulo parede de trombe, vi) módulo estufa e vii) módulo fotovoltaico com microcontrolador automático de rastreamento solar. A metodologia consiste no uso de simulações computacionais para determinar as condições: i) conforto térmico, ii) iluminação natural e iii) geração energética do módulo fotovoltaico. Os resultados apresentam que com o uso deste sistema modular ocorre a redução do consumo energético, principalmente

¹O conceito empregado na arquitetura é aplicado para qualquer dos lados de um edifício.

com a utilização das tecnologias passivas².

Moldovan et al. (2014) estudam as possibilidades para a redução do consumo de energia nos edifícios após o estabelecimento da **Diretiva 2010/31/EU** aos Estados-Membros europeus. Realizam estudo de caso em edifício novo com validação experimental, simulações e dados meteorológicos para análise das possibilidades de aquecimento e arrefecimento. O objetivo é de obter edificação ideal com baixo desempenho energético. A melhor solução apresentada contém: i) ventilação natural, ii) sistema geotérmico ativo, iii) bomba de calor terra e/ou água utilizada no sentido inverso do fluxo de calor para resfriamento e iv) energia gerada por sistema solar fotovoltaico.

Souza et al. (2003) estuda o Potencial de Aproveitamento da Luz Natural (PALN) através da implantação de sistemas automáticos de controle. São realizadas simulações através do **software LuzSolar** e os protótipos analisados apresentam: i) largura de seis metros, ii) profundidade de quatro a dez metros, iii) três tipos de iluminação e iv) três tipos de janelas, totalizando 63 modelos. São determinadas as zonas de PALN que estão relacionadas aos tipos: i) iluminação, ii) janela e iii) profundidade. São adotadas estratégias de controle: i) liga/desliga, ii) três passos³ e iii) dimerizável. Os resultados apresentam que o controle automático PALN aproveitado atinge o máximo de 87%. A solução três passos apresenta acréscimo do PALN de 9% e o sistemas dimerizável tem acréscimo do PALN de 15% se comparada aos resultados da solução liga/desliga, respectivamente.

Carvalho (2008) realiza estudo do uso das fachadas ventiladas como solução construtiva para redução do consumo de energia nos edifícios. As fachadas ventiladas são definidas como sistema de proteção exterior dos edifícios. São realizadas as simulações através dos softwares *Energy Plus* e *DesignBuilder* para análise do comportamento térmico dos edifícios que utilizam fachadas ventiladas nas regiões climáticas de Bragança, Ovar e Évora localizadas em Portugal. Os resultados apresentam redução do consumo energético coincide com as estações do ano em que os edifícios necessitam de arrefecimento. Desta forma, em determinadas estações a redução do consumo pode chegar a 60%.

Os estudos desenvolvidos por Wang et al. (2009) buscam soluções para a elaboração

²São tecnologia que aproveitam e potencializam a radiação solar para aquecimento, auxiliando no arrefecimento e iluminação natural dos espaços habitáveis.

³A estratégia de controle de iluminação de três passos é interruptor utilizado em luminárias que possuem duas lâmpadas, acionadas nas seguintes configurações: i) duas lâmpadas desligadas, ii) apenas uma lâmpada da luminária é acesa passando a fornecer 50% do fluxo luminoso total e iii) duas lâmpadas são ligadas e a luminária passa a funcionar com fluxo máximo.

de projetos de ZEB no Reino Unido. São realizadas as simulações através do software *Energy Plus* para análise das fachadas considerando os materiais construtivos, dimensões e orientações de janelas. Além disto, utiliza o software *Trnsys* para investigar a viabilidade da energia renovável, sistema solar de aquecimento de água e sistemas eficientes sob condições climáticas. O estudo compara diversos métodos de projetos e materiais adotando estratégias ideais para ZEB. Destaca-se as etapas do projeto: i) dados climáticos com finalidade de aproveitamento das condições naturais favoráveis, ii) aplicação dos métodos passivos⁴, iii) soluções avançadas de fachadas para minimizar cargas de aquecimento e arrefecimento e iv) adoção de sistemas automatizados e de energia renovável.

Pinto (2014) constrói protótipo de edificação com balanço energético nulo na Universidade de Brasília, com o intuito de balancear o consumo de energia. São realizadas simulações termoenergéticas utilizando o software *Energy Plus*. Os sistemas de climatização analisados são: i) ciclo de compressão a vapor com expansão indireta, ii) combinação do resfriamento evaporativo, iii) resfriamento geotérmico e iv) otimização da ventilação por meio de chaminé térmica. O processo de otimização é realizado na envoltória para melhor desempenho térmico. O consumo de energia simulado é de 159,18MWh/ano, correspondendo a 23,5% inferior à produção simulada, que é de 196,55MWh/ano.

Cintra (2011) realiza estudo da influência das variáveis arquitetônicas para adoção de índices mínimos que garantam aproveitamento da luz natural em edificações residenciais, relacionado a profundidade dos ambientes, a instalação de protetores solares e as especificidades do território brasileiro. São realizadas simulações dinâmicas por meio do software *Daysim* com quatro modelos e 336 simulações desenvolvida em duas etapas: i) 160 simulações para onze cidades e ii) três modelos de proteção solar. Os resultados apontam que os ambientes com área de abertura de 1/6 da área do piso, sem proteção solar, devem ter 2,57 vezes a altura da janela para garantir iluminância de 60lux, garantindo 70% das horas do ano com luz natural. Nas simulações realizadas com proteção solar, a profundidade do ambiente é de 2,11 vezes a altura da janela.

Ferreira e Pereira (2012) avaliam o desempenho térmico de edificação de interesse social para verificar se as envoltórias atendem aos requisitos estabelecidos na **Norma N°15.575/2013** submetidas a diferentes condições climáticas divididas em oito zo-

⁴Métodos passivos é a aplicação de elementos construtivos selecionados e localizados em função das características do clima e da geometria, para atenuar os gastos com energia não natural nas edificações.

nas bioclimáticas definidas pela NBR 15.220-3/2005. As simulações são realizadas através do software *Energy Plus* com o intuito de analisar se o valor da temperatura do ar nos ambientes de permanência prolongada cumpri aos exigidos. Os resultados demonstram que as envoltórias frequentemente utilizadas nas construções de habitações de interesse social atendem aos índices mínimo de desempenho térmico.

Vários são os trabalhos desenvolvidos com o intuito de analisar e indicar os condicionantes dos fluxos natural luminoso e térmico empregado na bioarquitetura. A maioria dos trabalhos utilizam técnicas de simulação com métodos empíricos de otimização, obtendo números elevados de soluções com critérios multiobjetivos. A proposta de utilização de métodos de otimização com o objetivo da adoção da bioarquitetura nas habitações proporcionando o aumento da eficiência energética, redução do consumo de recursos naturais, aumento do conforto e promoção da preservação do meio ambiente, justifica o desenvolvimento deste trabalho.

Desta forma, é possível construir a hipótese primária: se é possível avaliar através de simulação o fluxo luminoso e térmico das edificações, os impactos da radiação solar no ambiente, adotando técnicas da bioarquitetura, dimensões adequadas das aberturas e corretas direções das construções, então é possível minimizar, nos projetos de edificações, o gasto com energia para a promoção da iluminação e do conforto térmico.

O objetivo principal deste trabalho é apresentar estratégia da bioarquitetura para adoção nos projetos e adequações nas construções, utilizando simulações computacionais para a escolha da orientação solar, localização da implantação da edificação e elementos de proteção que busquem soluções sustentáveis, viabilizando a redução dos impactos ambientais. Têm-se como objetivos específicos: i) avaliar as estratégias da bioarquitetura nas habitações residenciais, ii) análise das interferências do fluxo naturais de iluminação, iii) análise dos condicionantes térmico, destacando estudo da implantação, estratégia de proteção das fachadas e aberturas e v) avaliar a viabilidade técnica e econômica das edificações com baixo consumo de energia.

Este trabalho está dividido em sete capítulos: no Capítulo 2 é apresentado a bioarquitetura como alternativa para o desenvolvimento sustentável, destacando a eficiência energética, certificações e normas. O Capítulo 3 aborda a estratégias da bioarquitetura para proteção solar por meio da análise da eficiência energética, fluxo luminoso, conforto térmico e da proteção solar nas habitações. O Capítulo 4 descreve as características do sistema, modelo e simulação. No Capítulo 5 é descrita a metodologia adotada no trabalho, o Capítulo 6 apresenta os resultados obtidos a partir

da aplicação da metodologia proposta e o Capítulo 7 apresenta as conclusões deste trabalho.

CAPÍTULO 2

BIOARQUITETURA

Neste capítulo serão apresentados conceitos e diretrizes da bioarquitetura, eficiência energética, certificações e normatizações para o alcance da autossuficiência nas habitações residenciais. Apresenta-se ainda, as características na evolução da arquitetura destacando os principais períodos, manifestos, características construtivas e estudos desenvolvidos na área da bioarquitetura.

2.1 Conceitos e diretrizes da bioarquitetura

A Bioarquitetura extrapola as condições plásticas, funcionais, de invólucro da edificação e abrange os conceitos: i) eficiência energética, ii) substituição dos materiais construtivos, iii) preservação ao meio ambiente, iv) saúde habitacional e v) conforto térmico. Assim, o conceito de bioarquitetura é amplo, dinâmico e progressivo que interagem harmonicamente com: i) indivíduo, ii) edifício e iii) meio ambiente (CAVALARO, 2013).

Cavalaro (2013) define que o conceito de bioarquitetura é amplo e agrega diversos seguimentos da arquitetura: i) dados bioclimáticos, ii) estudo da implantação, iii) análise das fachadas, iv) estudo da iluminação natural, v) materiais sustentáveis, vi) qualidade ambiental, vii) conforto térmico, viii) estudo dos ventos dominantes e ix) aproveitamento das características climáticas de cada região para gerar conforto térmico, acústico e lumínico. Desta forma, reduzindo o consumo energético com luzes e ar-condicionado, gerando eficiência energética, economia, saúde habitacional e conforto térmico aos usuários.

Carrington (2015) alerta que o ambiente construído é o maior contribuinte para as emissões de carbono. Além disto, define a bioarquitetura como sendo edificação construída com material biológico e impactos ambientais reduzidos. Carrington (2015), analisa os impactos do ciclo de vida da edificação de forma a se obter resultados ambientalmente neutros ou positivos, através da compensação do carbono gerado na sua construção pela geração de energia positiva, de forma a reduzir os impactos ambientais da indústria da arquitetura, através do conceito visionário de bioarquitetura.

Ripley e Bhushan (2016) definem a bioarquitetura como escolha cuidadosa dos materiais para construção, criação, extração, adaptação e na coesa utilização da natureza viva para orientar a função e a materialidade da arquitetura. Além disto, alertam que

a bioarquitetura não deve ser confundida como arquitetura orgânica. Os conceitos empregados pela arquitetura orgânica buscam incorporar a arquitetura à natureza, já a bioarquitetura busca incorporar a natureza na arquitetura. Afirmam que para alcançar as ações da bioarquitetura é necessário a incorporação das ações desde o início do projeto e em todas as escalas do processo.

Holmgren (2013) conceitualiza que as técnicas da bioarquitetura englobam: i) uso de técnicas como característica a adoção de materiais e adequação as características locais, ii) emprego de técnicas e tecnologias para a promoção de eficiência energética, iii) processos não lineares, através de fechamento de ciclos, reciclagem e reuso de resíduos e iv) uso de sistemas integrados entre diversos sistemas.

Alguns estudos desenvolvem sistemas biológicos incorporando as propriedades dinâmicas dos sistemas vivos para desempenhar funções arquitetônicas: i) utilizam bactérias como biossensores de índices de desequilíbrio no ambiente interno, ii) bactérias cultivadas de forma decorativa em paredes ou telhados para sinalizar níveis de poluentes nocivos, iii) bactéria que altera a tonalidade na presença de elementos nocivos, iv) modificação genética a partir de células animais que incorporam nas construções a natureza biodegradável, v) protocélulas para capturar dióxido de carbono da solução e convertê-lo em forma sólida de carbonato, vi) bactérias bioluminescentes para proporcionar iluminação e vii) revestimentos externos capazes de interagir com o ambiente para produzir resultados, como ar mais limpo, geração de energia ou regulação interna de temperatura (CARRINGTON, 2015).

Armstrong e Spiller (2010) apresentam a biologia sintética na tentativa de fornecer novas maneiras de associar vantagens dos sistemas vivos com a robustez dos materiais tradicionais para produzir arquitetura sustentável e ambientalmente responsável. Wijk e Wijk (2015) sugerem o uso de biomateriais, especificamente bioplásticos para promoção de ambiente sustentável. Garcia (2014) analisa e incorpora a experimentação: i) biomateriais ou ii) materiais existentes ou iii) reciclados, como matéria-prima utilizadas em impressoras que utilizam energia renovável gerada em substituição as técnicas de construção tradicionais.

Carrington (2015) indica as limitações referente a promoção da bioarquitetura como: i) desafios tecnológicos, ii) materiais propostos em fase de pesquisa, iii) restrição da aplicação em grande escala, iv) verificação técnica, econômica e da vida útil dos materiais pesquisados e v) requer mudanças na forma de projetar, habitar e ruptura nos paradigmas socioculturais.

2.2 Evolução da arquitetura

Sem dominar os conceitos de energia térmica ou as leis da termodinâmica, o homem, de forma empírica por via sensorial, busca a relação existente entre o clima, segurança, forma, material e o bem-estar para escolher o abrigo e proteger-se (FERNANDES, 2012). A evolução humana é contínuo esforço do indivíduo de adaptar-se à natureza para evoluir (INGENIEROS,).

Os romanos preocupados em poupar madeira, utilizam a energia solar e regras de construção para proporcionar o aquecimento interno. Além disto, os romanos desenvolvem a técnica caminho do sol (*heliocaminus*), que dispunha da utilização de materiais com maior capacidade térmica para as paredes que recebem o sol diretamente, na busca da promoção do conforto (LAMBERTS et al., 1997).

Os condicionantes de cada região (geográficas, geológicas, econômicas e culturais) torna-se elementos caracterizadores dos lugares assimilando o contexto dos homens e dos sítios, materializada em forma particular através da arquitetura vernacular (RIBEIRO, 2008). Conceito este que adota estratégias pragmáticas de adaptação ao meio ambiente envolvente e de profunda racionalização dos recursos disponíveis (FERNANDES, 2012). As construções ganham caráter regional e apresentam elementos do local devido a utilização dos materiais e das técnicas construtivas. A arquitetura vernacular ressalta técnicas, conceitos e princípios climáticos e sustentáveis que podem ser empregados em edificações que persigam a alta eficiência energética (LAMBERTS et al., 1997).

No século XVIII, a Revolução Industrial marca o início de uma nova era com profundas alterações. A arquitetura desenvolvida neste período, nega as referências históricas, rejeita os ornamentos arquitetônicos, cria ruptura das tradições, dissemina arquitetura universal adaptada a qualquer geografia e homogeniza o modo de construir e habitar (FERNANDES, 2012). Sistemas de iluminação e climatização artificial passam a ser frequentemente utilizados, dando aos projetistas condições cômodas em relação as soluções de adequação do edifício ao clima (LAMBERTS et al., 1997). As necessidades humanas são descritas através de programa das funções: i) habitar, ii) trabalhar, iii) circular e iv) descansar, definidas por quantidade mínima de metros quadrados, dispostos em configurações mais econômicas de habitar (LIMONAD, 2006).

O *International Style*, conhecido como movimento funcional-racionalista, teve como principais características: i) simplificação das formas, ii) rejeição aos ornamentos,

iii) setorização das atividades urbanas, iv) adoção dos materiais aço, vidro, concreto, plástico e alumínio, v) utilização de técnicas de produção em massa e vi) inspiração da estética da máquina (LIMONAD, 2006). Surgem as edificações universais com fachadas envidraçadas, monitoradas por equipamentos e incompatíveis com as condições climáticas locais (CÂNDIDO et al., 2004). Na tríade dos elementos essenciais da arquitetura estabelecidos por Vitruvius (1999): i) solidez (*firmitas*), ii) beleza (*venustas*) e iii) funcionalidade (*utilitas*), complementadas com os conceitos de Alberti (1991): i) prazer estético (*voluptas*) e ii) conforto (*comoditas*), são substituídos por padrões universais (LIMONAD, 2006).

Para Corbusier (1981), a casa, considerada como *la machine à habiter* (máquina de morar), faz parte de conceito tipológico que abrange inovações tecnológicas, sociais e demais transformações ocasionadas pela vida moderna, evidenciando que todos os homens tem os mesmos organismos e mesmas funções. O espaço interno e, conseqüentemente, a forma, é delimitado em áreas regulares para aproveitar ao máximo, sem desperdícios ou excessos, assim, destaca-se os conceitos: i) modular, que relaciona proporções entre o homem e o espaço arquitetônico projetado (CORBUSIER; DÍAZ, 1980), ii) a forma passa a seguir a função (*form follows function*), apresentando que a estética e seus ornamentos não são mais importantes (SULLIVAN, 1922) e iii) menos é mais (*less is more*), aspirando espaço ideal ao homem, negando sujeitar-se as condições exposta pela natureza (BLASER, 1986).

A arquitetura moderna é baseada em materiais industrializados com baixa resistência térmica, dentre estes, destaca-se as superfícies envidraçadas. O desenvolvimento das tecnologias mecânicas de arrefecimento para condicionamento do ar favorecem ao conforto térmico no interior da edificação, tornando o ambiente interno independente das características geológicas, condições externas e aspectos socioculturais (GALLO et al., 1994). A arquitetura marcada neste período é fundamentada no processo industrial, criando arquitetura descartável como qualquer objeto de consumo, que pode ser inserido em qualquer parte do mundo, independente das características locais particulares (MONTANER, 2014).

No final da década de 1960, os meios de comunicação transmitem à escala global e a presença do homem à Lua, desencadeando o entusiasmo e desejo da busca por nova dimensão arquitetônica que se manifesta na utopia dos núcleos urbanos metropolitanos e nas habitações futuristas e tecnológicas (FERREIRA; BRAGA, 2009). Butera (2009) caracteriza os processos arquitetônico como de involução, pois a edificação volta a ser e ter única função, de invólucro e proteção, perdendo as conexões com o

ambiente físico.

A partir da metade do século XX, a grave crise socioambiental evidenciada pelo pós-guerra, estimula os questionamentos referentes as tecnologias. Além disto, a crise do petróleo na década de 1970, estimula mundialmente a tentativa de reduzir o consumo de combustíveis fósseis e minimizar a produção de gases causadores do efeito estufa, resultando na criação de tratados globais com intuito de preservar o meio ambiente, dentre estes, destaca-se: i) Conferência de Estocolmo (1972), ii) Protocolo de Kyoto (1977), iii) Conferência Rio 92 (1992), iv) Cúpula mundial sobre o desenvolvimento sustentável (Rio+10 em 2002) e v) entre outras discussões acerca das relações e impactos entre o ser humano e o meio ambiente (NERY, 2005).

A Agenda 21 *for Sustainable Construction in Developing Countries*, apresenta aspectos a serem considerados no setor da construção civil, como: i) estabelece metas para o desempenho ambiental das edificações, ii) mudanças nas práticas de elaboração do projeto e do processo de execução, iii) valorização dos recursos naturais e iv) possibilidade de reciclagem e reuso dos materiais (INTERNATIONAL, 2002). Durante estes períodos surgem correntes, entre as principais têm-se as defendidas na busca de **Um outro estilo** de desenvolvimento na década de 1970 em Sunkel (2001) e o **Ecodesenvolvimento** na década de 1980 em Sachs (1986).

A preocupação apontada por Armstrong e Spiller (2010) indica que a arquitetura é responsável por 40% da **Pegada Ecológica**¹ (*Ecological Footprint*), principalmente devido às emissões de combustíveis fósseis durante as várias etapas de fabricação de materiais e dos costumes empregados na construção tradicional. No contexto das mudanças climáticas e pela previsão de aumento da urbanização, é essencial a substituição de métodos de construção que são prejudiciais ao *habitat* humano, por métodos sustentáveis. Desta forma, a partir da década de 1990, as terminologia designadas: i) arquitetura bioclimática, ii) bioconstrução, iii) arquitetura sustentável, iv) ecoedifício e v) bioarquitetura começam a ser frequentemente utilizadas como forma de idealizar construções com menores impactos ambientais, autossuficiente e com eficiência energética (LAMBERTS et al., 1997).

O Relatório Nosso Futuro Comum, em 1987, introduz o conceito de Desenvolvimento sustentável que considera satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras (BRUNDTLAND, 1987). Em 2015, instituída a Agenda Universal 2030 com a finalidade de implementar os 17 objetivos e as 169

¹Instrumento de avaliação dos impactos antrópicos ao meio natural, estimando quanto de *habitat* é necessário para manter determinada população (REES et al., 1996).

metas para a promoção do desenvolvimento global sustentável (MDS, 2016).

Corbella (2003) classifica a arquitetura bioclimática como o resultado de ambiente construído capaz de promover: i) conforto (físico, saudável, agradável), ii) adaptado ao clima local, iii) minimiza o consumo de energia convencional e iv) mínima produção de poluição. Para Adam (2001), a bioconstrução se diferencia da arquitetura bioclimática por não relacionar as condições climáticas e as peculiaridades de cada local. Sendo caracterizada como edificações construídas destacando as características: i) adoção de materiais naturais, ii) baixo impacto, iii) promove integração com o ambiente externo e iv) frequentemente estão relacionadas a arquitetura vernacular, espontânea e tradicional.

Corbella (2003) descreve que a arquitetura sustentável objetiva: i) aumento da qualidade de vida do ser humano no ambiente construído, ii) melhoria da qualidade de vida do entorno, iii) integração com características da vida e do clima local, iv) consome menores quantidades de energia, v) ambiente compatível e com promoção do conforto ambiental e vi) menores impactos ao meio ambiente. Projeto sustentável é a criação de edificações: i) eficientes (energético, saudáveis, confortáveis) ii) uso flexível e iii) projetadas para terem vida útil longa (EDWARDS, 2008). Os ecoedifícios são classificados como produto da arquitetura sustentável, conciliando os edifícios aos ecossistemas naturais (ADAM, 2001).

Krzemińska et al. (2017) afirmam que a degradação do ambiente natural pressionam a humanidade a procurar soluções para redução dos impactos da construção e do espaço urbano, buscado a transformação através da adoção de sistemas sustentáveis, tendo como finalidade proteger a natureza e impedir degradação e exploração de recursos naturais. É neste contexto que surge os estudos da bioarquitetura com o intuito de construir edificações com baixo impacto ambiental, aproveitamento da luz natural, redução da carga térmica, autossuficiência e com custos operacionais reduzidos (CAVALARO, 2013). A bioarquitetura representa nova direção das prioridades, estabelecendo como manutenção do equilíbrio entre atividade humana e a natureza (KRZEMIŃSKA et al., 2017).

2.3 Eficiência energética nas edificações

O mundo consome 50% a mais dos recursos naturais renováveis que a Terra é capaz de repor (MMA, 2015). O Guia Prático Philips Iluminação apresenta que 19% da energia produzida no mundo é consumida pela iluminação, na qual parte das instalações existentes são antiga e pouco eficiente (PHILIPS, 2009). Por conseguinte, a

escassez dos recursos energéticos tem impulsionado a racionalização do consumo de energia. Além disto, o crescimento populacional e a dependência energética provocam o aumento da demanda de geração de energia (ANEEL, 2008).

A Organização das Nações Unidas (ONU) lança iniciativa conhecida como *Sustainable Energy for All*, que estabelece como meta, dobrar a taxa de eficiência energética global até 2030 (MARCOVITCH, 2006). A Agência Internacional de Energia estima que com a adoção das ações de eficiência energética é possível reduzir 34% do consumo de energia e evitar o lançamento de 7 bilhões de toneladas de CO_2 na atmosfera (MMA, 2015). No Brasil as edificações representam cerca de 50% da energia elétrica consumida (MME, 2016), sendo as edificações residenciais responsáveis por 28,8% do consumo total da energia produzida, correspondendo a 132.872GWh (MME, 2018).

A eficiência energética na arquitetura, entendido também por bioarquitetura, é atributo para as edificações que apresentam potencial: i) conforto térmico, ii) visual e iii) acústico aos usuários, com reduzido consumo de energia. Assim, o que torna determinada edificação mais eficiente energeticamente que outra, é proporcionar as mesmas condições ambientais com menor consumo de energia (LAMBERTS et al., 1997). Estudos realizados pelo *American Council for an Energy-Efficient Economy*, o Brasil é o penúltimo na classificação de eficiência energética em 2019, sendo o setor residencial que apresenta maior desperdício de energia. Nas edificações, a maior parte da energia consumida é para a promoção do conforto térmico aos usuários, além disto, desperdiçam energia e aumentam seus custos operacionais por não utilizarem materiais construtivos adequados às condições climáticas externas (LAMBERTS et al., 1997); (YOUNG et al., 2014).

Bajcinovci e Jerliu (2016) estudam os princípios da arquitetura através da adoção de sistemas passivos para a promoção da bioarquitetura. Os métodos da pesquisa consistem: i) observação empírica através da zona espacial urbana e ii) coleta de dados através de mapas, características do microclima e atributos do espaço. Os autores destacam que o isolamento inadequado das: i) janelas, ii) portas, iii) paredes e iv) telhados causam 50% da perda de energia, principalmente na busca de equilíbrio térmico interno. Os resultados apontam que as perdas são: i) 33% nas paredes, ii) 26% no telhado, iii) 18% nas janelas e iv) 15% nas portas. Além disto, indica que a maneira mais eficaz de garantir a eficiência energética em edificação é através do isolamento térmico.

As preocupações ambientais resultantes das construções são consequência: i) tendências pelo maior uso de equipamentos elétricos, ii) hábitos e costumes e iii) instalação

de tecnologias para aquecimento e resfriamento de ambientes. Goldemberg e Luccon (2008) destacam que entre os gastos residenciais de energia, os chuveiros e a iluminação aparecem entre os três mais representativos. Uma das alternativas para suprir esta demanda é através da substituição do aquecimento elétrico por sistemas alternativos de geração de energia solar e aproveitamento da luz natural.

Heifferon e Long (2019) realizam aplicação de espumas nanoporosas, avaliando o aumento do isolamento na condutividade térmica do material, na eficiência energética e no controle das emissões de gases de efeito estufa das edificações. O estudo apresenta limitações para a adoção das espumas, sendo necessário: i) aprimoramento científico das pesquisas de melhorias dos materiais, ii) validação para aplicação em larga escala e iii) avaliação técnica, econômica e cultural. Vários são os estudos e pesquisas realizadas com o intuito de aumentar a eficiência energética das habitações, na qual deve-se modificar primeiramente a cultura para aproveitamento do que há de natural no local das construções.

2.4 Certificações e normatizações

A **Organização Internacional de Normalização (ISO)** disponibiliza métodos classificatórios para o desempenho energético nas edificações, tendo como principal objetivo a padronização das certificações dos edifícios e permite em alguns itens, adequação das características particulares de cada nação. Neste contexto, destaca as normas **ISO 16343**: Desempenho energético dos edifícios e métodos de desempenho energético e de certificação energética de edifícios (*Energy performance of buildings Methods for energy performance and for energy certification of buildings*) (ISO16343, 2011) e a **ISO 16346**: Desempenho energético dos edifícios e avaliação do desempenho energético global (*Energy performance of buildings Assessment of overall energy performance*) (ISO16346, 2013).

No Brasil, o racionamento de energia elétrica resultado da crise energética em 2001 desencadeia as ações de eficiência energética, com destaque para a **Lei N° 10.295** que dispõe sobre a política nacional de conservação e uso racional de energia (UNIÃO, 2001). Em 2002 é organizado o **Grupo Técnico (GT Edifica)** para efficientização da energia nas edificações no país tendo como intuito avaliar a eficiência energética das edificações e criar indicadores referenciais do consumo de energia nas edificações para certificação de conformidade com relação à eficiência energética (NAKAZATO, 2014).

Em 2006 é aprovado o **Regulamento Técnico de Edificações** que estabelece os

questos de classificação da eficiência energética, que através de revisões, torna-se base técnica para o **Programa de Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de Edificações**. Em 2010, é publicado pelo Inmetro o **Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) e Edifícios Residenciais (RTQ-R)** (INMETRO, 2012).

O **Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações (PBE Edifica)** é forma de avaliar o potencial de desempenho energético da edificação: i) comercial, ii) serviço, iii) público e iv) residencial. Este avalia o projeto e a edificação construída, se obedecem as normas e regulamentos específicos, a fim de promover a eficiência energética (INMETRO, 2013). É estimulado através do PBE a adoção das estratégias: i) adaptação às zonas bioclimáticas brasileiras, ii) análise da orientação solar, iii) conforto térmico, iv) aproveitamento natural da iluminação e ventilação e v) incorporação de tecnologias mais eficientes (MMA, 2015). Para submeter a documentação ao Organismo de Inspeção Acreditado (OIA), o interessado deve escolher entre os dois métodos de avaliação energética: i) prescritivo ou ii) simulação.

O método prescritivo, ilustrado na Figura 2.1, adaptada de MMA (2015), avalia as edificações de forma matemática (equações e tabelas). Neste método os requisitos e parâmetros são estipulados pelo regulamento para edifícios residenciais, avaliando os indicadores de consumo de energia e conforto térmico projetados para a edificação. O método de simulação, iustrada na Figura 2.2, adaptada de MMA (2015), compara os parâmetros da edificação proposta com modelo de referência em eficiência energética. Esta simulação avalia o consumo de energia anual em função das variações climáticas e dos hábitos de uso. É mais flexível e permite a incorporação de novas tecnologias.

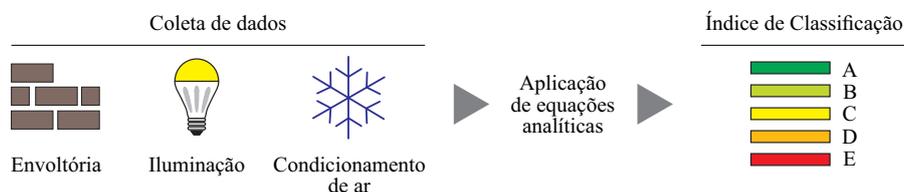


Figura 2.1 - Índices de classificação do Programa Brasileiro de Etiquetagem.

A etiqueta do PBE-Edifica é emitida pelo OIA, empresa autorizada e reconhecida pelo Inmetro. A Figura 2.3, adaptada de MMA (2015), ilustra as etapas para solicitar a etiqueta PBE. Os fatores que afetam o preço das etiquetas são referentes: i) tama-

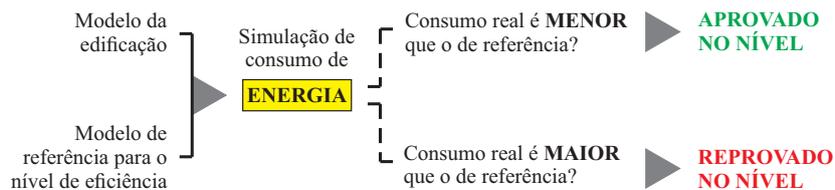


Figura 2.2 - Método de simulação do Programa Brasileiro de Etiquetagem.

nho, ii) complexidade da edificação, iii) escopo pretendido e iv) método escolhido, prescritivo ou simulação. Além disso, são adicionados custos adicionais referente a logística durante as inspeções do edifício construído. Depois de obtidos os selos, estes são expostos em locais visíveis.

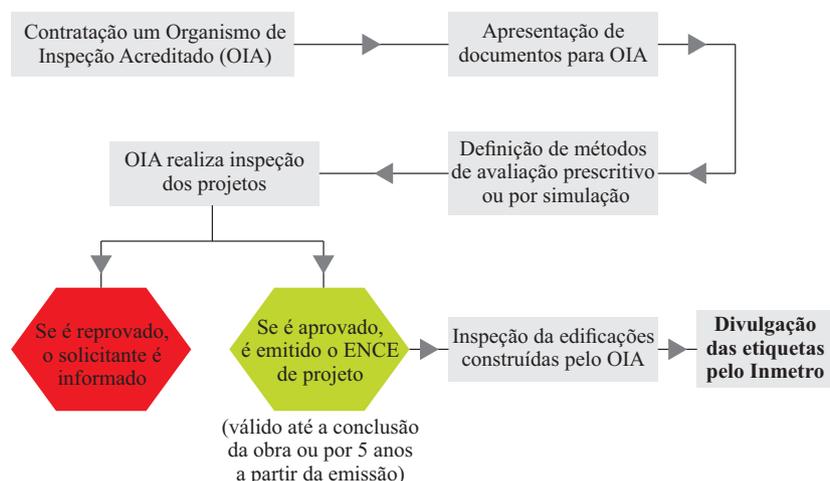


Figura 2.3 - Etapas de solicitação da etiqueta do Programa Brasileiro de Etiquetagem.

A **Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE)** estabelece que, quanto mais soluções sustentáveis incorporadas à edificação, maior é o reconhecimento de excelência, com classificação: i) classe A para as edificações mais eficiente e ii) classe E para as edificações menos eficientes.

As normas referentes ao desempenho da iluminação natural e térmico, estabelecem: i) **NBR 5.413** que fixa as iluminâncias mínimas a serem atingidas em função do tipo de tarefa visual (ABNT, 1992), ii) **NBR 15.220** apresenta os conceitos básicos e definições, procedimentos de cálculo de estimativa da disponibilidade de luz natural, verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações com método de medição, apresentando os símbolos e unidades, métodos de cálculo da transmitância térmica e do fator solar de elementos e componentes de edificações,

zoneamento bioclimático e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social, medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida, medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico (ABNT, 2005a).

A **Norma de Desempenho NBR 15.575/2013** estabelece parâmetros para avaliar tecnologias e sistemas construtivos das edificações habitacionais, considerando a durabilidade e tempo de vida útil, propondo simulações como ferramenta para estimar o desempenho e conforto (ABNT, 2013). O **Decreto n° 9.864/2019** dispõe sobre o comitê gestor de indicadores e níveis de eficiência energética (BRASIL, 2019).

O **Plano Nacional de Eficiência Energética 2010-2030** tem o intuito de planejar em longo prazo o setor energético do país e busca a redução da energia consumida pelos sistemas destinados a promover condições de conforto dos usuários e as condições necessárias à habitabilidade (TOLMASQUIM, 2007). Lamberts et al. (1997) destacam que somente o estabelecimento de normas não garantem edificação mais eficientes e confortáveis, no entanto, através destas ações, possibilitam a disseminação do conhecimento e conscientização para influenciar e estimular a adoção de mecanismos nos projetos e edificações almejando a redução do consumo de energia.

Diversos países desenvolvem metodologias para a avaliação e certificação ambiental das edificações, através de selos verdes. Dentre estes, destacam: i) Método de Avaliação Ambiental do *Building Research Establishment* (BRE) da Inglaterra, ii) *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* (BREEAM), iii) *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) dos Estados Unidos, iv) desafio da Construção Sustentável (GBC) que pertence ao consórcio de vários países, v) *Haute Qualité Environnementale* (HQE) da França e vi) Sistema de Avaliação de Eficiência Ambiental para Construção (CASBEE) do Japão (GRÜNBERG et al., 2014).

As certificações tem como intuito: i) impulsionar o desenvolvimento de ações sustentáveis na construção civil, reduzindo os impactos ambientais, melhorar a gestão, redução do consumo e perdas de materiais e ii) disseminar e indicar ao usuário as informações do desempenho ambiental da edificação, induzindo à busca das edificações com menores impactos energéticos e ambientais. No Brasil, as certificações mais adotadas são: i) LEED, ii) Alta Qualidade Ambiental (AQUA) e iii) Selo Caixa Azul (GRÜNBERG et al., 2014).

O sistema de certificação LEED, criado pelo *United States Green Building Council*

(USGBC), em 1998, certifica edifícios a partir de pré-requisitos e créditos, classificados em quatro níveis: i) certificado, ii) prata, iii) ouro e iv) platina. Os itens com maior importância são: i) eficiência energética e ii) redução da emissão de CO_2 . Em 2008, criado o *LEED for Homes*, tendo como diferencial: i) análise especificamente das edificações residenciais e ii) relação entre área e número de quartos (COUNCIL, 2001).

A AQUA avalia o desempenho ambiental da construção através da natureza arquitetônica, técnica e de gestão. Estrutura-se em dois instrumentos principais: i) Sistema de Gestão do Empreendimento (SGE) e ii) referencial da Qualidade Ambiental do Edifício (QAE). A metodologia adotada para classificação é estabelecida em catorze categorias ou conjuntos de preocupações, que são agrupadas em quatro grupos (ENVIRONNEMENTALE, 2001).

O **Selo Caixa Azul**, primeiro sistema de certificação brasileiro, criado em 2010 para classificação socioambiental de empreendimentos habitacionais financiados pela Caixa Econômica Federal, no qual sua adesão é voluntária. O intuito é incentivar o uso racional dos recursos naturais, reduzir o custo de manutenção dos edifícios e as despesas mensais dos usuários, além da conscientização das vantagens das construções sustentáveis. A análise para classificação avalia cinquenta e três critérios, divididos em seis categorias. As categorias são: i) qualidade urbana, ii) projeto e conforto, iii) eficiência energética, iv) conservação dos recursos materiais, v) gestão da água e vi) práticas sociais. A somatória dos pontos adquiridos resultam em selos de classificação: i) bronze, ii) prata e iii) ouro (CAIXA, 2010).

2.5 Considerações

Este capítulo apresentou os principais marcos da arquitetura e suas características, destacando as edificações com elementos arquitetônicos que permitem: i) baixo impacto energético e ambiental, ii) promoção da eficiência energética, iii) certificações e iv) normatizações, de forma a disseminar, conscientizar e estimular a adoção de mecanismos para o desenvolvimento sustentável nas edificações. O próximo capítulo descreve conceitos de fluxo luminoso, conforto térmico e as principais estratégias da bioarquitetura para a promoção da eficiência energética e conforto térmico nas unidades residenciais.

CAPÍTULO 3

ESTRATÉGIAS DE PROTEÇÃO E APROVEITAMENTO SOLAR

Este capítulo traz fundamentos sobre fluxo luminoso, conforto visual e térmico. São apresentadas estratégias de controle e diretrizes construtivas da bioarquitetura para alcance do desempenho ideal do aproveitamento do fluxo luminoso e conforto térmico, na tentativa do alcance da autossuficiência nas habitações residenciais.

3.1 Fluxo luminoso

Fluxo luminoso é a radiação emitida em todas as direções por determinada fonte luminosa que produz estímulo visual em comprimentos de onda de $380nm$ a $780nm$. A unidade de medida do fluxo luminoso é o lúmen [lm]. Na radiação solar, aproximadamente 50% é formado de fluxo luminoso de frequência na luz visível e o restante na frequência do infravermelho próximo e radiação ultravioleta. Esta radiação fornece anualmente para a atmosfera terrestre $1,5 \times 10^{18} kWh$ de energia, fonte de luminosidade e calor, que atinge a superfície terrestre e é recebida de forma distinta em decorrência do tipo de: i) solo, ii) vegetação, iii) topografia e iv) altitude, sendo fundamental na adoção da eficiência energética das edificações (LAMBERTS et al., 1997).

A radiação solar, para além de suportar a vasta maioria das cadeias tróficas, é o sustentáculo da vida no Planeta Terra, sendo a principal responsável pela dinâmica da atmosfera terrestre e pelas características climáticas do planeta. A posição do Sol na abóbada celeste pode ser definida através dos ângulos: i) altura solar e ii) azimute solar, que variam de acordo com a hora do dia e período do ano. Este movimento, ilustrado na Figura 3.1, adaptada de Lamberts et al. (1997), descreve a translação da Terra em plano inclinado de $23^{\circ} 27'$ em relação ao plano do equador, caracterizando as estações pelos solstício de inverno e verão e pelos equinócio de outono e primavera (LAMBERTS et al., 1997). Desta forma, quanto menor a altura solar, mais longo é o trajeto da radiação que atravessa a atmosfera e menos radiação chegará à superfície terrestre (KOENIGSBERGER et al., 1977).

Espaço mal concebido provoca desconforto aos usuários e tem sua forma arquitetônica, na dimensão sensível, comprometida e deficiente (FERNANDES, 2006). De acordo com Rodrigues (2002), os problemas mais frequentes relacionados à iluminação nas edificações são: i) iluminação em excesso, ii) falta de aproveitamento da iluminação artificial, iii) uso de equipamentos com baixa eficiência luminosa, iv) falta

(PEREZ, 2013). Deve considerar os aspectos existentes no local para identificar os diferentes tons de luz para que sejam combinados sutilmente, com a finalidade de criar ambientes com contrastes desejados e prevenir ofuscamento ou espaços escuros (BRAGATTO, 2013).

A Figura 3.2, adaptada de Frota e Schiffer (1995), ilustra as informações a serem representadas na carta solar para a posição horária do Sol determinando a trajetória aparente a partir dos ângulos azimutais e das alturas em função da latitude do observador, na qual: i) X representa a estrela localizada na esfera celeste, ii) A o observador, iii) AX' projeção de AX no plano do horizonte do observador e iv) h a altura. A altura h é a medida a partir do plano do horizonte do observador, indicando quantos graus do plano do horizonte o corpo celeste é visível ao observador correspondente à XX' . O azimute a é medido no plano do horizonte a partir da direção norte NX' . A trajetória aparente do sol é registrado no P_1, P_2 e P_3 e a projeção solar no plano do observador é registrada no no P'_1, P'_2 e P'_3 .

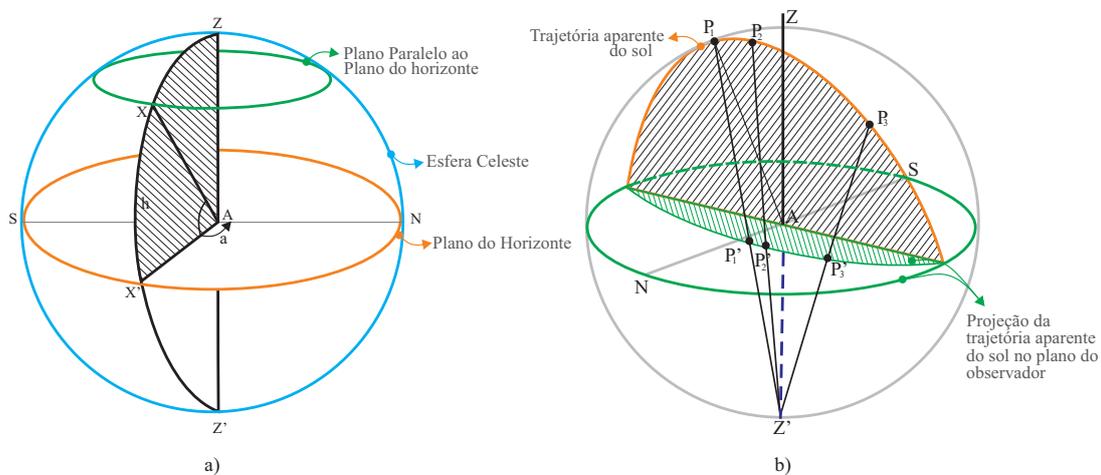


Figura 3.2 - Movimento solar: a) altura e azimute e b) projeção esferográfica da trajetória aparente solar.

LabEEE (2014) define que a Carta Solar é a representação gráfica dos percursos aparentes do sol na abóbada celeste ao longo do dia em diferentes épocas do ano. Estes percursos são identificados através da transposição do azimute e da altitude solar sobre o plano. É ferramenta prática para a obtenção das informações necessárias para avaliar a penetração solar, sombras projetadas pelo entorno e com isto, determinar a melhor orientação da edificação e as proteções solares necessárias às

aberturas.

Para auxiliar no estudo da iluminação natural, utiliza-se a Carta Solar, que permite: i) avaliar a geometria solar, ii) auxilia na análise dos impactos da insolação para aumento da eficiência do projeto e iii) indica as projeções da trajetória solar ao longo da abóbada celeste durante todo o ano, dada determinada latitude (LAMBERTS et al., 1997). A Figura 3.3, adaptada de Lamberts et al. (1997), ilustra as informações da Carta Solar: i) trajetória solar, ii) hora do dia, iii) altura solar, iv) azimute solar e v) número de horas de sol. A partir da Carta Solar pode-se projetar elementos de controle de luz solar direta (TOLEDO, 2008), sendo possível projetar ambientes capazes de aproveitar o máximo da radiação (luz e calor) disponibilizada pelo Sol.

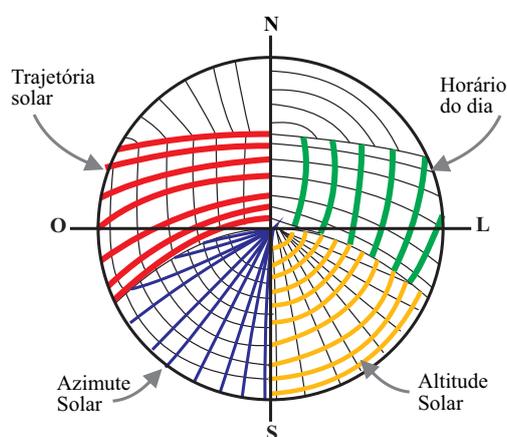


Figura 3.3 - Leitura da Carta Solar.

A radiação solar proporciona iluminação e calor para o interior da edificação, por este motivo, o estudo do sombreamento exige conhecimentos precisos para análise de melhor aproveitamento (LAMBERTS et al., 1997). A Tabela 3.1, adaptada de Lamberts et al. (1997), dispõe a necessidade de sombreamento N_{som} e a necessidade de insolação N_{ins} em algumas cidades brasileiras, segundo a Carta Bioclimática gerada pelo software *Analysis BIO*. Os valores de N_{som} e N_{ins} são dados em percentual das horas, do ano no período diurno e considerando horários entre as 6h e as 18h, quando a temperatura do ar supera o valor de 20°C.

3.1.1 Energia, fluxo luminoso e efeitos da incidência de raios luminosos

A energia radiante $Q_R [J]$ é grandeza radiométrica, e é a energia emitida, transferida ou recebida na forma de ondas eletromagnéticas. A energia luminosa $Q_F [lm.s]$ é grandeza fotométrica, e é a fração de energia transportada pela luz perceptível aos

Tabela 3.1 - Sombreamento e insolação em algumas cidades brasileiras.

Cidade	N_{som}	N_{ins}
Belém	100,0	0,0
Fortaleza	100,0	0,0
São Luís	100,0	0,0
Recife	100,0	0,0
Brasília	73,8	22,6
Florianópolis	69,9	25,6
Maceió	98,2	1,8
Natal	99,7	0,3
Rio de Janeiro	89,5	10,5
Salvador	98,6	1,4
Vitória	89,8	9,1
Curitiba	37,3	48,1
Porto Alegre	56,3	35,0
São Paulo	51,1	42,8

olhos humanos (BESUIEVSKY, 1992); (BASS, 1995) e (SMITH, 2008). O fluxo radiante ou potência radiante $\Phi_R [W]$ é grandeza radiométrica, e é a taxa de energia radiante por unidade de tempo (BESUIEVSKY, 1992); (BASS, 1995) e (SMITH, 2008) e pode ser definido por:

$$\Phi_R = \frac{dQ_R}{dt} \quad (3.1)$$

A grandeza fométrica correspondente ao fluxo radiante é o fluxo luminoso $\Phi_F [lm]$. Um lúmen $[lm]$ é definido como o fluxo luminoso Φ_F emitido em ângulo sólido de um estereorradiano $[sr]$ emitido por fonte pontual com intensidade de uma candela $[cd]$ em todas as direções (SMITH, 2008).

Ao incidir um raio luminoso sobre a interface entre dois meios materiais, ocorre com a energia luminosa: i) parte é refletida, obedecendo a Lei da Reflexão, ii) parte é absorvida pela própria superfície, obedecendo a Lei de Lambert e iii) parte é refratada pela superfície, obedecendo a Lei de Snell-Descartes. As características, composição e formato da superfície da interface influenciam em cada possibilidade, como ilustrado na Figura 3.4, adaptada de Besuievsky (1992). As expressões de Fresnel determinam a fração de energia refletida e transmitida pela superfície em função do: i) índice de refração e absorção dos materiais, ii) ângulo de incidência e iii) polarização da luz incidente (BESUIEVSKY, 1992).

O raio luminoso ao atravessar a superfície transparente que separa dois meios materiais sofre mudança abrupta de direção, se a velocidade da luz for diferente entre os meios, ocorre o fenômeno de refração, ilustrada na Figura 3.4, onde θ_i é o ângulo de incidência com a normal N , θ_r é o ângulo de reflexão com N , θ_t é o ângulo de

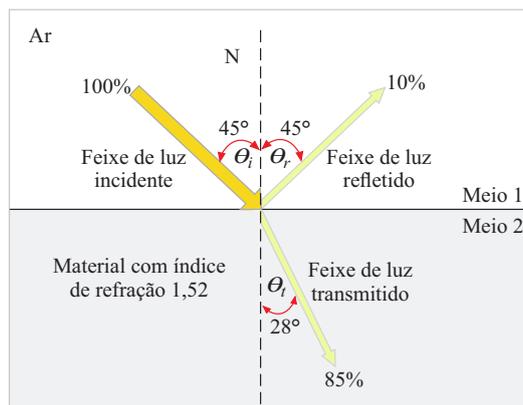


Figura 3.4 - Ilustração da incidência de raio luminoso em determinada interface.

refração com N (WEBER, 1974); (TAYLOR et al., 2000).

A Norma de Desempenho de Edificações Habitacionais ABNT NBR 15575/2013, define que durante o dia os ambientes de permanência prolongada – salas, dormitórios, cozinha, área de serviço e banheiro, devem cumprir o nível mínimo de iluminação de 60 lux , atendido apenas com iluminação natural. A NBR 15575 indica a obrigatoriedade de atender pelo menos o nível mínimo e como recomendação para promoção de maior conforto lumínico, deve-se adotar o nível intermediário ou superior, como disposto Tabela 3.2, adaptada de ABNT (2013). Na Tabela 3.2 não é informado a área do ambiente, horário ou época do ano.

Tabela 3.2 - Nível de iluminação natural para edificações residenciais.

Ambientes	Nível de iluminação natural		
	Mínimo	Intermediário	Superior
Sala de estar			
Dormitório			
Copa/Cozinha	$\geq 60 \text{ lux}$	$\geq 90 \text{ lux}$	$\geq 120 \text{ lux}$
Banheiro			
Área de serviço			
Corredor ou escada interna			
Corredor de uso comum	Não exigido	$\geq 30 \text{ lux}$	$\geq 45 \text{ lux}$
Garagens/estacionamentos			

3.2 Conforto visual para aplicação na bioarquitetura

A iluminação deve ser adequada à tarefa que é realizada em determinado ambiente, tendo em vista o conforto visual do indivíduo. As exigências de quantidade e qualidade da iluminação: i) iluminância, ii) luminância, iii) uniformidade, iv) contraste e v) cor que contribuem para determinar as condições de visibilidade (VILAR,

1996). Kralikova e Wessely (2016) expõem que o ambiente luminoso ativa série de mecanismos sobre os fatores fisiológicos e psicológicos humanos, que influenciam no desempenho e produtividade.

O conforto visual está relacionado com o conjunto de condições em determinado ambiente, no qual o ser humano pode desenvolver tarefas com maior precisão visual, menor esforço e reduzir os riscos de prejuízos e acidentes (LAMBERTS et al., 1997). O conforto visual depende do atendimento às seguintes condições de iluminação: i) intensidade, ii) uniformidade das densidades luminosas, iii) uniformidade temporal da luz e iv) eliminação do ofuscamento (KROEMER; GRANDJEAN, 2005).

A Figura 3.5, adaptada de Bortolan et al. (2019), ilustra que para haver conforto visual, as necessidades fisiológicas, físicas e psicológicas do ser humano devem ser atendidas. Assim, as características físicas do ambiente sob determinada iluminação correspondem à interação do usuário e seus efeitos nas dimensões fisiológicas, psicológicas e no desempenho das tarefas. Portanto, deve-se considerar para alcance do conforto visual, a interpretação de estímulos, os quais proporcionam satisfação para desempenho das tarefas.



Figura 3.5 - Tripé do conforto visual e interação do usuário no ambiente.

Badida et al. (2011) destacam que a iluminação exerce impacto sobre o conforto visual, contribui para o bem-estar psicológico, produtividade e confiabilidade do desempenho das atividades exercidas. Bear e Bell (1992) criaram índice de conforto, satisfação e desempenho, na qual relacionam três elementos que contribuem para a eficácia do ambiente visual: i) nível de conforto que existe em relação ao brilho, tamanho e posição das fontes de luz, ii) nível de satisfação que existe na aparência dos objetos e no espaço, e o brilho das superfícies e iii) nível de desempenho que

existe devido à distribuição de densidade de fluxo na área de tarefa e qualidade espectral da luz. As condições de desconforto visual produz: i) sinais e sintomas de fadiga visual, ii) visão turva, iii) irritabilidade, iv) dores de cabeça, v) dores musculares, vi) *stress* e vii) dificuldade de concentração (VEITCH et al., 2008).

3.3 Conforto térmico para aplicação na bioarquitetura

O conforto térmico é definido como a satisfação expressa a determinado ambiente térmico (ASHRAE, 2005). Para alcance do conforto térmico depende, além dos fatores ambientais e relacionados com o tipo de ocupação, fatores individuais de natureza psicológica e sociológica, designadamente a idade, hábitos socioculturais, sexo, adaptação ecológica às regiões, estado mental, educação, entre outros condicionantes (FANGER, 1970).

Segundo a Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* – ASHRAE), o conforto térmico é estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve o indivíduo (ASHRAE, 2005). Desta forma, o conforto térmico é o conjunto de condições que permitem ao ser humano: i) bem estar térmico, ii) visual, iii) acústico, iv) antropométrico¹, v) qualidade do ar e vi) conforto olfativo (LAMBERTS et al., 1997).

A energia gerada pelo calor interno do corpo humano, resultado das reações químicas e das trocas térmicas² entre o corpo e o meio, através da: i) condução, ii) convecção, iii) radiação, iv) evaporação e v) respiração (LAMBERTS et al., 1997), para análise do balanço térmico entre o corpo e o ambiente, atendendo aos aspetos fisiológicos estabelecidos por Fanger (1970), é dado por:

$$S = (M - W) - (Q_{sk} + Q_{res}) \quad (3.2)$$

na qual S representa a taxa de calor acumulado no corpo humano [W/m^2], M a taxa de metabolismo [W/m^2], W a taxa de trabalho mecânico realizado [W/m^2], Q_{sk} a taxa total de calor perdido pela pele [W/m^2] e Q_{res} a taxa total de calor perdido pela

¹Antropometria é o conjunto de técnicas utilizadas para medir o corpo humano ou suas partes, registro das particularidades físicas dos indivíduos (HOUAISS et al., 2001).

²Alteração da temperatura interior do ser humano, provoca aumento de esforço biológico para controlar a condição homeotérmica, acentuando a sensação de desconforto e fadiga com consequências negativas para a saúde e desempenho da tarefa efetuada pelo indivíduo (FROTA; SCHIFFER, 1995).

respiração [W/m^2]. Nos casos em que as variáveis ambientais conduzam ao resultado $S = 0$, é definido o estado de conforto térmico (FANGER, 1970).

Quanto maior a atividade física maior o calor gerado pelo metabolismo. O M_E é a unidade referente ao metabolismo, podendo ser medido em [met]. A Tabela 3.3, retirada de ISO7730 (2005), dispõe as taxas médias do metabolismo energético M_E em função da atividade típicas desenvolvidas através de ensaios fisiológicos. Assim, 1 met equivale a $58,15 W/m^2$ de área da superfície corporal. A menor taxa de metabolismo para as atividades é alcançado quando o corpo está deitado em repouso, correspondente a 0,8 met e a maior taxa de metabolismo é atingindo durante as práticas de esforços extremos, equivalente a 10 met (LAMBERTS, 2011).

Tabela 3.3 - Taxa de metabolismo energético \times atividade.

Atividade	M_E	
	(W/m^2)	(met)
Repouso, deitado	46	0,8
Repouso, sentado	58	1,0
Atividade sedentária	70	1,2
Atividade ligeira	93	1,6
Atividade média	113	2,0
Caminhada em terreno plano		
2 Km/h	110	1,9
3 Km/h	140	2,4
4 Km/h	165	2,8
5 Km/h	200	3,4
Práticas Esportivas		
Basquete	440	8,0
Práticas esportivas extremas	550	10,0

Tabela 3.4 - Resistência térmica \times vestuário.

Tipo de vestuário	Resistência Térmica (clo)
Somente calção	0,05
Vestuário para trabalho	0,5
Traje completo	1,0
Agasalho completo	4,0

A resistência térmica das roupas é importante na sensação de conforto térmico humano. A pele troca calor por condução, convecção e radiação com a roupa, que por sua vez troca calor com o ar por convecção e com outras superfícies por radiação. Quanto maior a resistência térmica da roupa, menor é a troca de calor com o meio. A Tabela 3.4, retirada de ISO7730 (2005), dispõe a resistência térmica R_T de acordo com o vestuário, na qual 1 clo representa a resistência térmica de $0,155 [m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}]$. As variáveis relacionadas ao conforto térmico são: i) pesso-

ais, relacionadas as atividades físicas e de vestimentas e ii) ambientais, relacionada a temperatura e velocidade do ar, temperatura média radiante e umidade relativa (LAMBERTS, 2011).

Algumas das estratégias da bioarquitetura adotadas no estudo preliminar para o alcance do conforto térmico nas edificações são: i) estudos das zonas bioclimáticas e ii) estudos das cartas bioclimáticas, que apresentam formas de análises do comportamento térmico considerando as características climáticas e o desempenho térmico de cada região para a promoção do conforto térmico humano (LAMBERTS, 2011); (SILVA et al., 2019).

O zoneamento bioclimático é o mapeamento e cadastramento sistemático que permite identificar áreas geográfica com condições climática similares, permitindo indicar estratégias de orientação para: i) aplicação de acondicionamento natural da promoção do conforto térmico e ii) redução do consumo de energia. As discussões acerca do zoneamento bioclimático brasileiro tem início em meados de 1988, com a criação do Grupo de Conforto Ambiental e Eficiência Energética da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC) (LAMBERTS, 2011); (SILVA et al., 2019).

O Brasil possui clima variado devido ao imenso território e por estar localizado em dois trópicos. Assim, o zoneamento brasileiro resulta em oito zonas bioclimáticas, ilustrada na Figura 3.6, adaptada de Lamberts et al. (1997). A Norma Técnica de Desempenho Térmico de Edificações: Parte 3 – zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social NBR 15220-3/2005, define as características principais e orienta diretrizes construtivas para cada uma das oito zonas bioclimáticas, tendo como relação: i) tamanho de aberturas para ventilação, ii) proteção das aberturas, iii) vedações externas ideal para cada tipo de parede e cobertura e iv) estratégias de condicionamento térmico passivo recomendadas para cada zona (ABNT, 2005b). Lamberts (2011) definem as características básicas de cada zona bioclimática brasileira, que são:

Zona 1 – Recomendações construtivas: i) uso de aberturas para ventilação com dimensões médias, ii) sombreamento destas aberturas de forma a permitir o sol do inverno e iii) adoção de paredes e coberturas de inércia térmica leve. As principais estratégias bioclimática para esta região são: i) aquecimento solar e ii) grande inercia térmica nas vedações internas;

Zona 2 – Recomendações construtivas: i) uso de aberturas para ventilação com di-

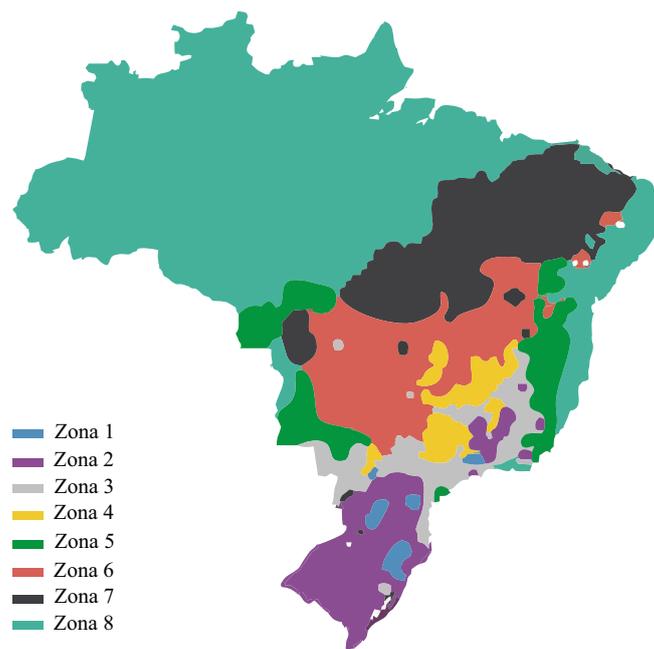


Figura 3.6 - Mapeamento do zoneamento bioclimático brasileiro.

mensões médias, ii) sombreamento destas aberturas de forma a permitir o sol do inverno e iii) adoção de paredes e coberturas de inércia térmica leve. As principais estratégias bioclimática para esta região são: i) aquecimento solar, ii) grande inercia térmica nas vedações internas e iii) ventilação cruzada no verão;

Zona 3 – Recomendações construtivas: i) uso de aberturas para ventilação com dimensões médias, ii) sombreamento destas aberturas de forma a permitir o sol do inverno e iii) adoção de paredes e coberturas de inércia térmica leve. As principais estratégias bioclimática para esta região são: i) aquecimento solar, ii) grande inercia térmica nas vedações internas, iii) ventilação cruzada no verão e iv) paredes externas leves e refletoras a radiação solar;

Zona 4 – Recomendações construtivas: i) uso de aberturas médias, ii) sombreamento necessário nas aberturas durante todo o ano, iii) parede pesada e iv) cobertura leve com isolamento térmico. As principais estratégias bioclimática para esta região são: i) resfriamento evaporativo, ii) inércia térmica para resfriamento, iii) ventilação seletiva no verão, iv) aquecimento solar e v) inércia térmica das vedações internas para o período frio;

Zona 5 – Recomendações construtivas: i) janelas de tamanho médio com sombreamento, ii) paredes leves e refletoras, iii) coberturas leves isoladas termi-

camente, iv) uso de ventilação cruzada no verão e v) vedações internas pesadas e com grande inércia térmica no inverno;

Zona 6 – Recomendações construtivas: i) uso de aberturas médias sombreadas, ii) parede pesadas, iii) coberturas leves com isolamento térmico, iv) uso de resfriamento evaporativo e ventilação seletiva no verão e v) uso de vedações internas pesadas no inverno;

Zona 7 – Recomendações construtivas: i) uso de aberturas pequenas e sombreadas o ano todo, ii) uso de paredes e coberturas pesadas, iii) uso de resfriamento evaporativo, iv) vedações com inércia para o resfriamento e v) ventilação no verão;

Zona 8 – Recomendações construtivas: i) uso de aberturas grandes e totalmente sombreadas, ii) uso de parede e coberturas leves e refletoras, iii) uso de ventilação cruzada permanente durante o ano todo.

A carta bioclimática, desenvolvida por Olgay (1953), sugere estratégias de adaptação para bioarquitetura com as condições externas, como ilustrada na Figura 3.7 a), adaptada de Olgay (1953) e Lamberts (2011), indicando as zonas de conforto. A Figura 3.7 b), adaptada de Givoni (1998) e Lamberts (2011), ilustra o diagrama das zonas do modelo Giovani: i) conforto, ii) ventilação natural, iii) inércia térmica para resfriamento, iv) resfriamento evaporativo e umidificação, v) aquecimento solar, vi) condicionamento artificial com isolamento térmico, vii) sombreamento e viii) interseções entre as estratégias. Além disto, é necessário realizar análise bioclimática do local a partir dos dados climáticos, sendo ideal utilizar o banco de dados do Ano Climático de Referência (*Test Reference Year* – TRY).

A carta bioclimática desenvolvida por Givoni (1998), busca, através do estabelecimento de zonas adequada para países em desenvolvimento, corrigir limitações nas cartas anteriores, incorporando: i) dados climáticos reais, ii) limites máximos da relação de conforto, iii) temperatura do ar e iv) umidade relativa, adaptada de Lamberts (2011).

As cartas bioclimáticas facilitam a análise das características climáticas de dado local sob o ponto de vista do conforto humano na edificação, enquanto apresentam, sobre carta psicrométrica³, a combinação corrente de temperatura e umidade em

³A psicrometria é o ramo da ciência que analisa as propriedades físicas e termodinâmicas das misturas entre gases, vapores e suas aplicações práticas. No contexto deste trabalho é a medição da quantidade de vapor existente na atmosfera (HOUAISS et al., 2001).

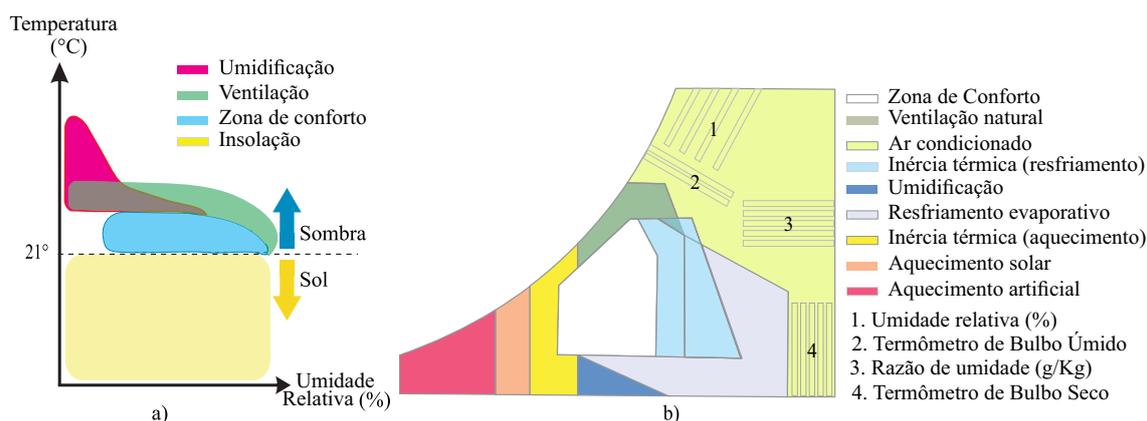


Figura 3.7 - Carta bioclimática: a) modelo de Olgyay (1953) e b) modelo Givoni (1998).

qualquer período dado, estabelecendo indicações fundamentais sobre a estratégia bioclimática a ser adotada no desenho do edifício para a promoção do conforto humano e aumento da eficiência energética (LAMBERTS, 2011); (SILVA et al., 2019).

A aplicação das cartas bioclimáticas propõe estratégias de adaptação da edificação ao clima, a partir de dados do clima externo com previsão de estratégias bioarquitetônicas para a correção do comportamento quando fora da zona correspondente ao conforto térmico. O Software *Analysis Bio* sintetiza os dados da carta de Givoni (Figura 3.7 b), com limites máximos de conforto expandidos, tendo em vista a aclimação dos habitantes de países em desenvolvimento com habitantes de países de clima quente. Além disto, esta carta bioclimáticas utiliza dois tipos de dados climáticos: a) *Test Reference Year* (TRY) com informações climáticas para as 8.760 [h/ano] e b) Normas Climatológicas correspondentes aos anos de 1961 à 1990 com valores médios mensais das principais variáveis climáticas.

3.4 Elementos arquitetônicos de proteção solar como estratégias de controle

Para aplicar os benefícios oferecidos pela luz natural no ambiente é necessário compreender o comportamento e desempenho da luz natural nas variáveis arquitetônicas. A luz natural penetra no ambiente interno da edificação por meio de componentes de passagens de luz: i) lateral – janelas e portas translúcidas, ii) zenitais – aberturas na cobertura e iii) global – superfícies totalmente translúcidas que contemplam aberturas nas laterais e zenitais, similares as estufas (CINTRA, 2011).

As principais estratégias arquitetônicas para aproveitamento da iluminação natural são: i) aquecimento solar passivo, ii) inércia térmica para aquecimento, iii) inércia

térmica para arrefecimento, iv) arrefecimento evaporativo, v) arrefecimento evaporativo com inércia térmica para arrefecimento, vi) arrefecimento evaporativo com inércia térmica para arrefecimento e ventilação natural, vii) sombreamento, viii) ventilação natural e ix) ventilação natural com inércia térmica para arrefecimento. [LaBEEE \(2014\)](#) define as estratégias bioclimáticas para adoção da iluminação natural, que são:

- 1– **Paredes com maior espessura** – tem intuito de aumento da capacidade térmica e promover o atraso térmico no interior da edificação;
- 2– **Parede trombe** – estratégia que consiste em uma parede convencional, camada externa de vidro, sendo separada por câmara de ar não ventilada;
- 3– **Piso para o aquecimento solar passivo** – abertura voltada para orientação para receber a radiação solar no piso;
- 4– **Estufa** – é reservatório térmico, composto por superfícies envidraçadas permitem a entrada da radiação direta. Deve-se atentar-se para promoção da ventilação e orientação adequada para minimizar o superaquecimento do ambiente;
- 5– **Edificação com inércia térmica** – proporciona diminuir as amplitudes térmicas internas e atraso térmico no fluxo de calor;
- 6– **Edificações semienterradas** – o contato com a terra diminui e atrasa as flutuações de temperatura. Deve-se adotar soluções construtivas para evitar elevados índices de umidade;
- 7– **Componentes internos e aquecimento solar passivo** – identificação de elementos de maior inércia;
- 8– **Tubos enterrados (ar)** – proporcionar o controle e o amortecimento das oscilações de temperatura diária, diminui a temperatura do ar interno em relação ao externo, promovendo conforto;
- 9– **Tubos enterrados (água)** – o ar do ambiente interno força através do trocador de calor a passagem do ar externo e reduz sua temperatura ao entrar em contato com a tubulação de água;
- 10– **Resfriamento radiante noturno** – climas secos onde há grandes variações de temperatura durante o dia, as coberturas pesadas e bem sombreadas podem atuar como receptor de calor proveniente do interior do

ambiente no período diurno e, no período noturno, como emissor do calor armazenado no decorrer do dia;

- 11– **Tanque de água na cobertura ou parede de água com isolante externo** – A utilização de tanque de água na cobertura ou superfícies com camada de água amplia sua capacidade térmica, evitando ganhos excessivos de calor no período diurno;
- 12– **Teto jardim e parede verde** – O uso de vegetação pode atuar como um isolante natural da parede, diminuindo os ganhos solares e reduzindo as temperaturas superficiais externas pela evaporação da água presente na camada de vegetação. O projeto de teto-jardim deve incluir sistema de impermeabilização;
- 13– **Parede com isolante térmico externo e ventilação noturna** – Paredes de alta inércia térmica ampliam a capacidade térmica e o atraso térmico, agindo como absorvedor de calor durante todo o ano. A exposição destas paredes a fontes de resfriamento, é favorável à redução de suas temperaturas superficiais;
- 14– **Tipos de proteção solar** – Os elementos externos de proteção solar podem ser horizontais ou verticais, ou uma combinação dos dois: i) sombreamento com vegetação, ii) uso de pérgulas, iii) uso do cobogó, iv) prateleira de luz, v) cortina proteção interna e vi) uso de brise;
- 15– **Melhor orientação e o que sombrear** – A orientação das superfícies determina a intensidade da radiação solar recebida e os respectivos tratamentos para proteção contra radiação. Considerando a radiação solar, as janelas devem preferencialmente ser localizadas nas fachadas, sob menor impacto da radiação, orientações norte e sul;
- 16– **Ventilação natural** – A ventilação pode exercer três diferentes funções em relação ao ambiente construído: i) renovação do ar, ii) resfriamento psicofisiológico, iii) resfriamento convectivo. Aplicação de ventilação natural na arquitetura: i) ventilação em pátios internos, ii) ventilação mecânica, iii) ventilação noturna, iv) ventilação cruzada, v) ventilação cruzada – janelas, vi) ventilação cruzada – plantas abertas, vii) ventilação cruzada – volumetria, viii) torres de resfriamento evaporativo, ix) torres de vento, x) escolha do sítio e orientação, xi) quebra vento, xii) efeito chaminé, xiii) efeito chaminé – fluxo acelerado, xiv) efeito chaminé – fluxo interno,

xv) aumentando o diferencial de pressão, xvi) captação com uso da vegetação, xvii) cobertura e parede ventilada e xviii) abertura em apenas uma fachada;

- 17– Ventilação natural com inércia térmica para resfriamento** – A ventilação cruzada promove a remoção do calor por acelerar as trocas por convecção e também contribui para melhoria da sensação térmica dos ocupantes por elevar os níveis de evaporação. E se somada com elevada inércia térmica, que proporciona diminuição das amplitudes térmicas internas e atraso térmico no fluxo de calor devido a sua alta capacidade de armazenar calor, fazendo com que o pico de temperatura interna apresente amortecimento em relação as temperaturas externas. Deve atentar-se que, a escolha do material, de acordo com suas respectivas orientações solares é fundamental para resposta térmica desejada;
- 18– Envelope de alta inércia térmica** – Aplicar componentes de elevada inércia térmica, promovendo o envelopamento da edificação: i) parede, ii) piso e iii) cobertura. O envelopamento da edificação auxilia na redução das flutuações térmicas diárias, em que o calor armazenado durante o dia é reirradiado como energia térmica à noite. Quanto maior a inércia mais tempo o calor armazenado levará para ser liberado, ou seja, mais tarde da noite, quando as temperaturas são mais baixas. Para tanto é necessário que a edificação seja fechada durante o dia para minimizar a entrada de calor, mantendo o interior fresco durante o dia;
- 19– Fonte de água em ambiente internos** – O uso da massa de água em ambientes internos tem potencial para reduzir as flutuações térmicas diárias devido a sua elevada inércia térmica, bem como para reduzir as temperaturas internas pelo efeito do resfriamento evaporativo através do processo de evaporação da água, que pode ser acelerado pela criação de correntes de convecção;
- 20– Microclima local** – A cobertura vegetal do entorno da edificação traz aumento de conforto térmico, pois retém água, que por processos naturais de convecção é evaporada provocando resfriamento pela diminuição da temperatura do ar. A diferença da temperatura superficial entre a grama e o asfalto pode exceder 13°C;
- 21– Equipamentos** – Os equipamentos para condicionamento térmico e iluminação artificial deve ser aprovados no Programa Brasileiro de Etique-

tagem – PBE e constar a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE. Os equipamentos utilizados: i) ar condicionado, ii) climatizador, iii) aquecedores, iv) ventilação mecânica, v) iluminação artificial, vi) fontes alternativas de energia e vii) aquecimento solar.

3.5 Considerações

Este capítulo apresentou os conceitos do fluxo luminoso, conforto visual e térmico para a bioarquitetura. Além disto, foram apresentadas diretrizes arquitetônicas construtivas para alcance do desempenho ideal no aproveitamento do fluxo luminoso e conforto térmico, na tentativa de alcançar a adoção da bioarquitetura e da autosuficiência nas habitações residenciais. O próximo capítulo descreve os fundamentos referente ao sistema, modelo e simulação.

CAPÍTULO 4

SISTEMA, MODELO E SIMULAÇÃO

Este capítulo descreve fundamentos referente aos sistemas, modelos e simulação. Inicialmente conceitua e investiga propriedades comuns dos sistemas e por fim, são apresentados alguns softwares de simulação e o processo otimização com o intuito de aplicar os conceitos da bioarquitetura.

4.1 Sistema e modelo

Os sistemas são constituídos de unidades básicas com diferentes denominações: i) elementos, ii) componentes, iii) entidades ou iv) partes, que interagem trocando informações ou materiais por meio de interfaces comuns (RECHTIN; MAIER, 2010). O comportamento do sistema está diretamente ou indiretamente relacionado a sua organização: i) estrutural, ii) funcional e iii) hierárquicas dos elementos constituintes (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2009). A Figura 4.1, adaptada de Paiva (2016), ilustra o conceito de sistema, com ênfase nas diferentes organizações estruturais de cinco elementos e conseqüentemente, diferentes comportamentos.

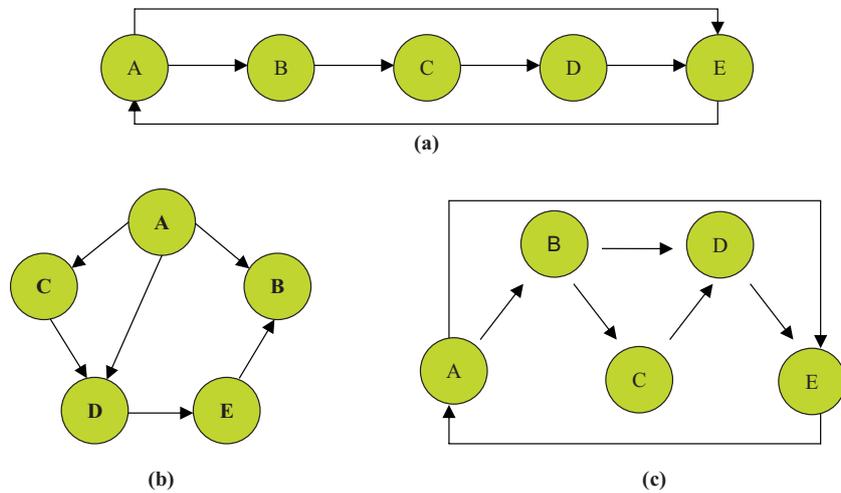


Figura 4.1 - Diferentes organizações para o conjunto de cinco elementos.

Segundo Aguirre (2004) todo sistema real é classificado como dinâmico, podendo ser modelado como estático se suas variações no tempo não são relevantes. Chwif e Medina (2014), considera que modelar o sistema consiste em representar, de modo simplificado, as diferentes interações entre suas partes. Desta forma, o modelo é a abstração da realidade, tendo o comportamento similar do sistema real, porém mais

simples.

O modelo tem o intuito de permitir a verificação do sistema real, considerando principalmente os aspectos que realmente interferem (CHWIF; MEDINA, 2014); (LACERDA; CARVALHO, 1999). Os modelos podem ser: i) físicos e ii) matemáticos. Os modelos físicos abrangem a parte de protótipos e plantas-piloto do projeto. Os modelos matemáticos utilizam representação abstrata da realidade, seja por notações simbólicas ou por expressões matemáticas que descrevem o sistema, de forma computacional ou não (BASTOS, 2004).

4.2 Simulação

A simulação permite o conhecimento prévio antes da construção do modelo, auxiliando: i) na redução do tempo de construção do protótipo/modelo, ii) na análise financeira e iii) no histórico dos dados reais e experimentais (PAIVA, 2016). Esta ferramenta torna possível, conhecer e analisar o comportamento do sistema real antes de sua implantação, permitindo compreensão do funcionamento, confrontando resultados e medindo a eficiência (CHWIF; MEDINA, 2006). A simulação é classificada como: i) computacional e ii) não computacional (PAIVA, 2016).

Pegden et al. (1995) e Sadowski et al. (1998) afirmam que a simulação é o processo de projetar e criar modelo semelhante ao sistema real e é utilizada com o intuito de compreender o comportamento e/ou avaliar as estratégias de operação. Banks (1998) e Law et al. (2000) definem a simulação como a imitação da operação do processo ou do sistema real. Chwif e Medina (2014) definem que a simulação permite análise a partir das alterações dos parâmetros de entrada no modelo e traz como vantagem a possibilidade da previsão de diversas características, parâmetros, cenários e comportamentos do sistema.

4.3 Softwares de simulação com aplicação na bioarquitetura

Há diversos instrumentos de modelagem e simulação gráfica que auxiliam na concepção dos projetos arquitetônicos, permitindo simular diferentes aplicações da bioarquitetura com o intuito de obter índices de probabilidade, ampliando as possibilidades assertivas na promoção da eficiência energética das habitações. O Analysis-CST é *software* que aplica os conceitos de voto médio estimado (*Predicted Mean Vote* –

PMV¹) e percentual de pessoas insatisfeitas (*Predicted percent dissatisfied* – PPD²) e sua relação com variáveis ambientais: i) temperatura, ii) umidade relativa, iii) temperatura radiante média, iv) vestimenta e v) metabolismo.

Tanto o PMV quanto o PPD tem bases nas análises estatísticas, sendo índices que prevê o valor médio de determinado grupo, seguindo a escala de sensações de sete pontos, que definem através de valor numérico a sensibilidade humana ao frio e ao calor. O índice ideal para o PMV e PPD encontra-se no intervalo $(-0,5 < \text{PMV} < +0,5)$. Ambos são calculados utilizando tabelas disponíveis na Norma ISO 16343: *Moderate thermal environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort* (ISO7730, 2005). A ferramenta Analysis-CST é indicada para o estudo preliminar das etapas do projeto bioarquitetônico, pois auxilia na compreensão das alterações térmicas do corpo humano em determinado ambiente.

O EnergyPlus é ferramenta de simulação para: i) desempenho termoenergético de edificação, com base em arquivos climáticos e em parâmetros de entrada do modelo de construção e parâmetros de saída que podem ser calculados para diferentes períodos do ano, considerando sua geolocalização real, ii) cálculo de índices de conforto térmico, baseado nas atividades dos usuários, temperatura interna do bulbo seco e umidade, iii) cálculo avançado de infiltração de ar e de aberturas e iv) modelagem da transferência de calor do solo (CRAWLEY et al., 2001).

Vários são os softwares para análise de iluminação solar. Maciel (2006) analisa diversos destes softwares, entre eles: i) *overhagn design*, ii) posição do sol, iii) *sunpath*, iv) *sunangle*, v) *window heat gain*, vi) *suncast*, vii) *shadow calculator*, viii) *shadowfx*, ix) *sun chart solar design*, x) solar 2, xi) *awnshade*, xii) *lesoshade*, xiii) *sunspec* e xiv) *sundi*, e os softwares nacionais: i) luz do sol e ii) *analysis sol-ar* ambos desenvolvidos no Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina (MACIEL, 2006). De acordo com o autor, nenhum software analisado adota dados climáticos e proteção solar como estratégias recomendadas.

O *Google SketchUp*³ é ferramenta de interfase intuitiva e lúdica, que permite modelagem em 3D para o desenvolvimento de objetos e estudos volumétricos. A interface

¹Índice que indica a sensação térmica das pessoas expostas ao mesmo ambiente, prevendo o valor médio do grupo e caracterizando em escala de sensações de sete pontos, desde muito frio até muito quente.

²Índice que indica o percentual de pessoas insatisfeitas em determinado ambiente com relação ao conforto térmico.

³Google SketchUp8 é software desenhado por @Lastsoftware, de licença livre.

do software é caracterizada por área central destinada à representação dos desenhos, *menus pull down* de ferramentas disposta na parte superior, além de disponibilizar *box* de informações referentes ao *status* do sistema, tópico de ajuda e ícones para visualização dos objetos a serem representados (CHOPRA, 2007).

A ferramenta permite a simulação do estudo solar, destacando as áreas de insolação e sombreamento projetadas para três períodos distintos do ano: i) solstício de inverno, ii) equinócio (primavera/outono) e iii) solstício de verão. Assim, o software permite estudo com intuito de simular e definir a melhor posição dos cômodos em função das condições reais simuladas de insolação em diferentes períodos do ano e dado georreferenciado (CHOPRA, 2007).

4.4 Processo de otimização

Otimizar é a tentativa de tornar o processo mais eficiente, sendo necessário o conhecimento do sistema ou modelo e definição das variáveis a serem otimizadas (CALIXTO, 2010). Os métodos de otimização são utilizados para resolver problemas em que há necessidade de minimizar ou maximizar os valores de saída, em determinado domínio, que normalmente está definido no conjunto de restrições das variáveis envolvidas.

O processo de otimização é composto pelas etapas: i) modelagem, ii) simulação e iii) medida de otimalidade. Inicialmente é modelado o sistema para permitir sua simulação e ao final o modelo é validado através de análise comparativa com o sistema real, antes de realizar o processo de otimização (RECHTIN; MAIER, 2010). O processo de otimização é ilustrado na Figura 4.2, adaptada de Reis (2014), na qual $f(x^*)$ é o valor ótimo ou otimizado dos parâmetros de entrada.

4.4.1 Algoritmo genético e método de Quase-Newton

O algoritmo genético (AG) faz parte do grupo de métodos de otimização heurística. Baseado em populações e na troca de informações entre os indivíduos, estes métodos são inspirados na teoria da evolução das espécies e aplicados na resolução de problemas (TANOMARU, 1995). Os algoritmos genéticos apresentam as seguintes características em relação a outros métodos de busca: i) baseados em conjuntos de soluções possíveis, ii) utilizam a informação da função objetivo e não de sua derivada, iii) apresenta como resultado a população de soluções e não uma solução e iv) utiliza regras de transição probabilística para busca no espaço de soluções e não regra determinísticas (MAGALHÃES, 2020).

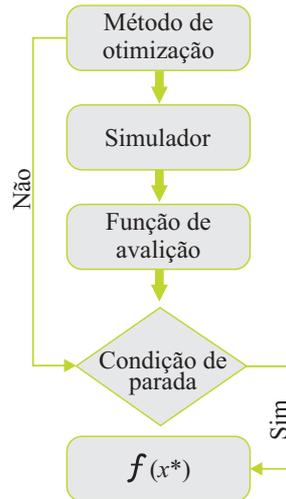


Figura 4.2 - Fluxo do processo de otimização.

O método de Quase-Newton (MQN) faz parte do grupo de métodos de otimização determinística. Ele inicia com os valores da estimativa inicial, indicada pelo especialista e desenvolve função quadrática aproximada da função de avaliação. A minimização da função quadrática é exata e o ponto de mínimo da função quadrática indica possível ponto que conduzirá ao menor valor da função de avaliação. Este procedimento se repete até que o critério de parada do algoritmo seja atendido (LACERDA; CARVALHO, 1999); (CALIXTO, 2011); (REIS, 2020). Para a utilização do algoritmo de Quase-Newton em problema de otimização discreta é necessário construir a função de avaliação de forma contínua para ser diferenciável (REIS, 2020).

4.4.2 Processo de hibridização

O processo de hibridização, dentro do processo de otimização, é a troca de soluções entre diferentes métodos de otimização (GOMES et al., 2016). A hibridização é utilizada a fim de: i) melhorar o desempenho de técnicas já existentes e ii) melhorar a busca por soluções não encontradas pelos métodos/algoritmos separadamente. De forma geral, pode-se escolher qualquer método de otimização para ser hibridizado, ou seja, a hibridização pode ocorrer entre diversas técnicas resolvendo diversos problemas (ARAJO et al., 2017).

Por exemplo, pode-se utilizar a hibridização do algoritmo genético, que é método heurístico com o método de otimização determinístico de Quase-Newton. O processo de otimização inicia-se com o algoritmo genético que após determinado número de gerações g , passa sua melhor solução para o método de Quase-Newton. Após o

método de Quase-Newton cessar seu fluxo, um indivíduo da população do algoritmo genético é sorteado aleatoriamente e a solução obtida pelo método de Quase-Newton é inserida no lugar do indivíduo sorteado. O processo de hibridização é ilustrado na Figura 4.3, adaptada de Reis (2020).

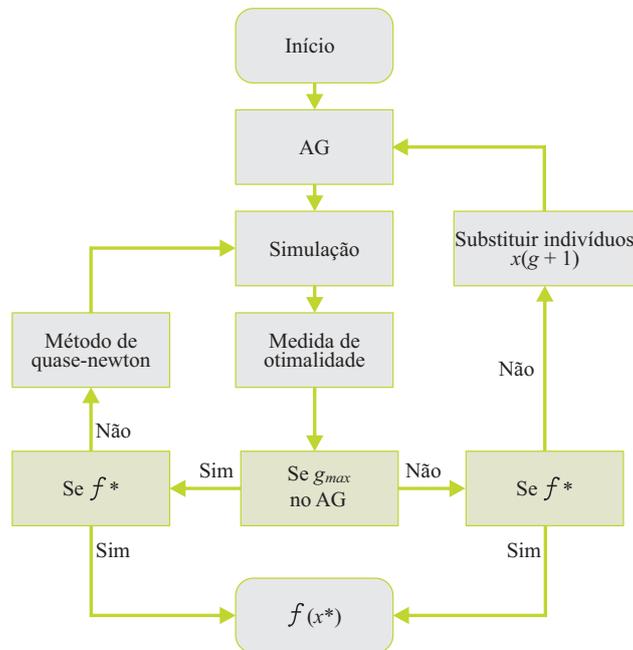


Figura 4.3 - Fluxograma do processo de hibridização do algoritmo genético com método de Quase-Newton no processo de otimização.

4.4.3 Processo de regressão paramétrica

O Método de regressão é modelo matemático que relaciona o comportamento de determinada variável com outra, necessitando do conhecimento prévio do sistema real analisado com o intuito de desenvolver e implementar o modelo deste sistema real. As etapas do processo de regressão paramétrica são: i) análise do modelo similar ao sistema real, ii) realização de testes experimentais dos dados de entrada e saída no modelo, iii) validar os dados coletados para análise dos parâmetros internos do sistema, iv) validar os valores de saída do modelo com os valores de saída do sistema real e v) otimização que é o procedimento numérico que determina os valores dos parâmetros a serem testados. (MAGALHÃES, 2020).

A regressão paramétrica é metodologia utilizada para determinar os valores dos parâmetros internos de sistemas reais, utilizando processo de otimização (REIS et al., 2019). A Figura 4.4, adaptada de Magalhães (2020), ilustra a metodologia proposta

utilizada no processo de regressão.

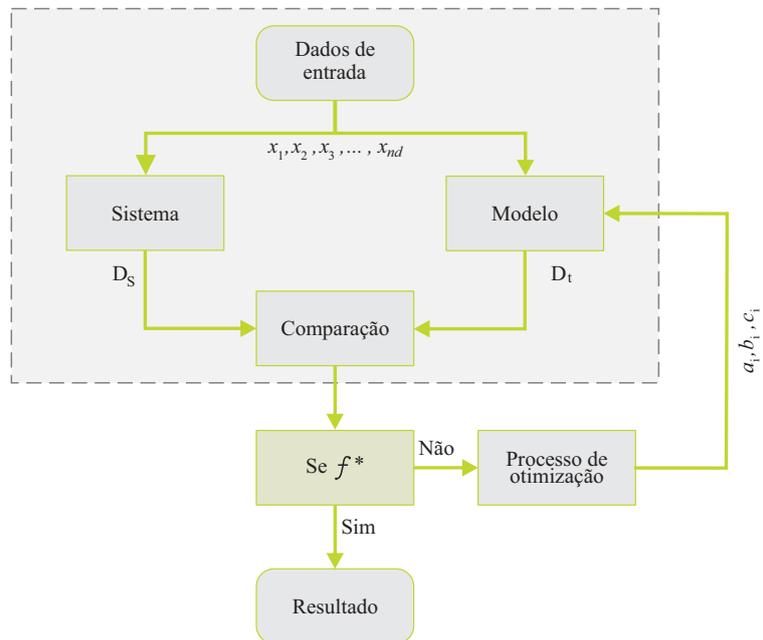


Figura 4.4 - Ilustração do processo de regressão paramétrica.

4.5 Considerações

Neste capítulo foram discutidos os conceitos de sistema, modelo, simulação e processos de otimização, itens fundamentais para o desenvolvimento e compreensão da metodologia apresentada no próximo capítulo.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada para a aplicação da bioarquitetura em projetos residenciais com foco na eficiência energética. São descritas: i) contextualização, ii) dimensionamento das variáveis de simulação, iii) dispositivos de simulação do fluxo natural, iv) isocurvas da área de iluminação e expressão para determinar a superfície de iluminação e v) conforto térmico humano e estratégias de controle.

5.1 Contextualização

Para verificar e viabilizar o estudo do desempenho energético da edificação, a área de estudo está inserida em dois conjuntos de variáveis, no campo da eficiência energética e da bioarquitetura. A Figura 5.1 ilustra o fluxo da área de estudo e diretrizes do trabalho proposto, que objetiva desenvolver método para adequação das edificações utilizando simulações computacionais que busquem soluções da bioarquitetura, viabilizando a redução dos impactos ambientais e a melhoria na eficiência energética. A Figura 5.2 ilustra o objetivo resultante da proposta deste trabalho, apresentando a aplicação da bioarquitetura com o intuito de promover a redução do consumo energético nas habitações após intervenção na utilização correta do fluxo luminoso e promoção do conforto térmico.

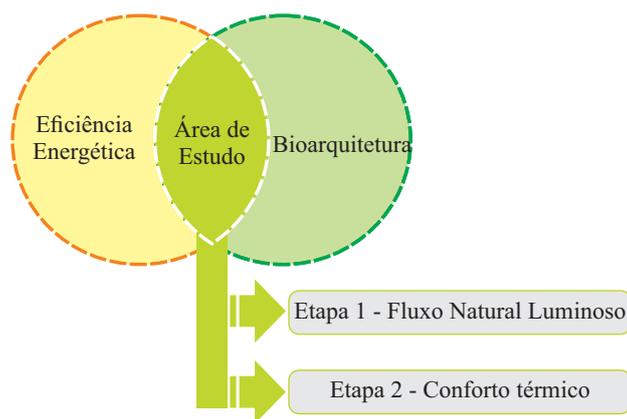


Figura 5.1 - Recorte da área de estudo.

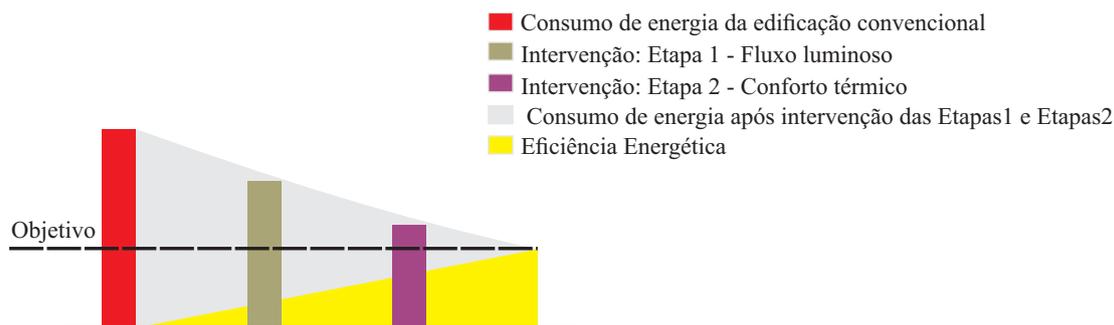


Figura 5.2 - Ilustração da redução do consumo energético.

5.2 Definição da geometria de simulação

O dimensionamento do ambiente utilizado para simulação é definido a área da abertura de 1/6 da área de piso do ambiente, semelhante aos modelos utilizados para os testes de desempenho térmico e energético do Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) (SORGATO et al., 2011). A área de abertura é sem esquadria, conforme exigência em ambientes de permanência prolongada estabelecida no RTQ-R (FERNANDES, 2009); (INMETRO, 2010). A Figura 5.3 ilustra as proporções hipotéticas do ambiente residencial utilizado para simulação.

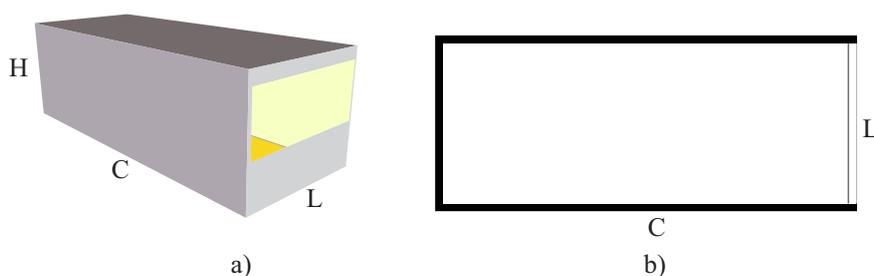


Figura 5.3 - Ilustração hipotética da proporção do ambiente residencial para simulação: (a) volume do ambiente e (b) planta baixa.

na qual as proporções correspondem à C é o comprimento, L é a largura e H é a altura do ambiente simulado.

5.2.1 Escolha do local da pesquisa

A escolha do sítio de implantação da edificação é fundamental para garantir adequada aplicação na bioarquitetura, condicionamento bioclimático, conforto térmico e conseqüentemente, a promoção da eficiência energética, pois normalmente há no entorno: i) fator de reflexão da radiação, ii) presença de vegetação, iii) mapa dos ventos e do Sol, iv) umidade, v) barreiras naturais e/ou construídas e vi) natureza da superfície, que impactam nos índices de promoção de eficiência energética.

5.3 Ambiente hipotético para estudo de caso

Para análise comparativa do comportamento do fluxo luminoso e do conforto térmico em residência, é necessário modelar a planta residencial estabelecendo os critérios: i) análise das atividades realizadas em cada ambiente, ii) estudo do local de implantação, iii) dimensionar o ambiente, iv) verificar a relação da área de abertura de cada ambiente pela profundidade do ambiente e v) análise do conforto térmico para cada ambiente simulado, identificando qual é a melhor orientação para se construir cada cômodo da residência.

Primeiramente é necessário avaliar o comportamento da luz natural, com o estabelecimento das seguintes variáveis de simulação: i) orientação dos pontos cardeais (Norte, Sul, Leste e Oeste) e colaterais (Nordeste, Noroeste, Sudeste e Sudoeste), ii) coordenadas geográficas, iii) condições climáticas do local escolhido, iv) comportamento da iluminação natural correspondente a latitude do local de estudo, v) percentual de autonomia da iluminação natural, vi) exigência de iluminância mínima permitida na tipologia da residência, vii) dimensão fixa da abertura, viii) dimensionamento do ambiente e ix) desconsiderar as especificações das características das superfícies dos materiais simulados.

A interferência na sensação do conforto térmico humano é avaliada através das variáveis: i) temperatura do ar, ii) temperatura radiante, iii) umidade relativa, iv) velocidade do ar, v) vestimentas, vi) atividades realizadas, vii) condições climáticas e viii) hábitos e costumes locais, auxiliando na compreensão de como pode acontecer alterações térmicas do ser humano no ambiente construído.

5.4 Dispositivos de simulação do fluxo natural

Para realizar a análise da incidência do fluxo luminoso natural no ambiente é necessário estabelecer parâmetros de avaliação. O software para simular o comportamento do fluxo luminoso: i) modelar tridimensionalmente o ambiente, ii) implantar o mo-

delo nas coordenadas geográficas reais da região de estudo, iii) adotar características solares reais considerando o solstício de inverno e verão, iv) projetar a incidência solar no ambiente simulado em períodos diferentes do ano e v) mensurar as medidas das áreas de incidência solar projetada em cada superfície.

Para a aquisição dos dados simulados considera-se as orientações cardeais e colaterais analisando individualmente cada superfície: i) parede direita, ii) parede esquerda, iii) parede do fundo e iv) piso, como ilustrado na Figura 5.3. É considerada a área da média mensal de incidência solar (m^2) a cada hora solar durante o período de um ano. A Figura 5.4 ilustra o fluxograma das etapas de aquisição dos dados de simulação.

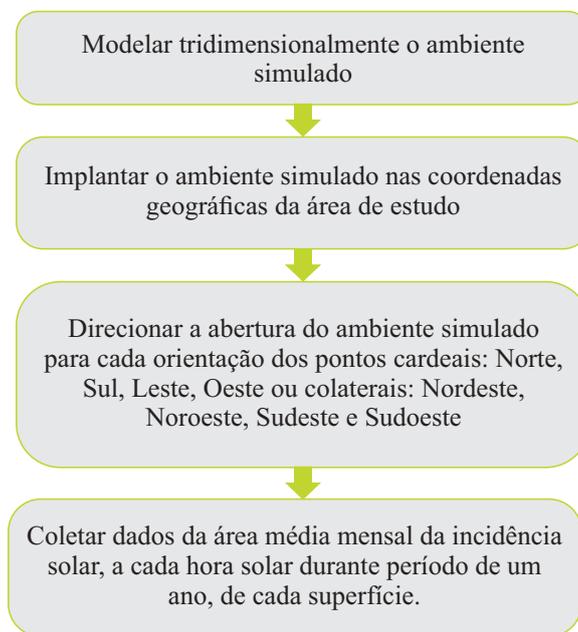


Figura 5.4 - Fluxograma da metodologia proposta para mensurar a incidência luminosa.

A partir dos dados adquiridos por simulação, é possível identificar quais superfícies recebem mais incidência em determinada orientação no decorrer do ano, mesmo com as alterações do caminho solar. De posse da análise do fluxo natural no interior do ambiente, identifica-se qual orientação recebe maior incidência solar no decorrer de um ano. A partir desta orientação, realiza-se redução das dimensões de profundidade do ambiente na tentativa de analisar o comportamento do fluxo luminoso \times profundidade do ambiente residenciais, isto permite a identificação da potencialidade do fluxo luminoso na promoção da eficiência energética.

5.4.1 Isocurva da área de iluminação e expressão para determinar a superfície de iluminação

Para avaliações do comportamento da profundidade alcançada pela luz natural no ambiente interno, deve-se: i) definir altura do plano de trabalho, ii) analisar as orientação \times incidência solar, iii) estabelecer malha, que são os número de pontos com espaçamentos iguais no ambiente simulado, iv) coletar os dados da área iluminada naturalmente em toda a malha estabelecida, v) verificar as áreas iluminadas máximas e mínimas alcançadas no ambiente, vi) analisar a distribuição da iluminação natural e vii) verificar os pontos de necessidade de complemento de iluminação artificial. Estas análises são realizadas através das isocurvas de iluminação.

De posse dos dados de simulação e das análises das isocurvas, é possível construir a expressão matemática que indique previamente a relação entre a profundidade do ambiente P , definido *a priori* e a área da incidência direta I_d com valores simulados em cada período anual P_a . Para encontrar a expressão que melhor se adéque aos dados de simulação, é utilizado método de otimização sobre o modelo dado por:

$$f(P_a, P) = [a_1 \cdot \sin(a_2 \cdot P_a + a_3) + a_4 \cdot P^{a_5}] + [b_1 \cdot P_a^{b_2} + b_3 \cdot \sin(b_4 \cdot P + b_5)] + [c_1 \cdot e^{(c_2 \cdot P_a \cdot P)}] \quad (5.1)$$

na qual $f(P_a, P)$ é o valor da área da incidência direta, a_i , b_i e c_i são os coeficientes relacionados ao mês do ano (período anual P_a) e a profundidade P . Os coeficientes são encontrados através de método de otimização e o resultado da expressão (5.1) é a superfície que relaciona as três variáveis $P \times P_a \times I_d$. A expressão (5.1) é definida nos polinômios de Legendre que tem comportamento para ajustar dados de funções contínuas, na série trigonométrica de Fourier que tem comportamento periódico e na função exponencial. Estes três modelos são associados por serem representativos dos prováveis comportamentos da superfície de iluminação direta.

A função de avaliação $f(D_s, D_t)$ para o método de otimização é definida como a relação entre os dados adquiridos em simulação D_s e os dados obtidos de (5.1) D_t , dada por:

$$f(D_s, D_t) = \sum_{i=1}^N \left| \frac{D_{s_i} - D_{t_i}}{D_{s_i}} \right| \quad (5.2)$$

na qual D_{s_i} e D_{t_i} são os pontos nas superfícies D_s e D_t , $f(D_s, D_t)$ é a medida do desvio entre os N pontos de ambas com $i = 1, 2, \dots, N$. Em (5.1) $f(P_a, P)$ é a função contínua, sendo $f(P_a, P) = D_t$. Desta forma, $f(D_s, D_t) = f(D_s, f(P_a, P))$, na qual D_t é a função definida no intervalo de estudo. A metodologia utilizada para encontrar a expressão que melhor mapeia os pontos da superfície de iluminação direta simulada, utiliza o processo de regressão que compara a superfície medida D_{t_i} com a superfície simulada D_{s_i} .

5.4.2 Conforto térmico humano e estratégias de controle

Para a análise da interferência na sensação do conforto térmico humano é necessário o estabelecimento dos índices proporcionado pelo equilíbrio das trocas de calor humano com o ambiente externo, sendo assim, deve-se analisar: i) variáveis do conforto térmico humano, ii) índices de conforto térmico e iii) estratégias de controle a serem adotadas nos projetos arquitetônico, visando a aplicação da bioarquitetura, promoção do conforto humano e redução no consumo de energia.

As variáveis do conforto térmico analisadas são: i) metabolismo humano em decorrência da atividade [W/m^2 ou met], ii) área da superfície corporal [m^2], conforme expressão de Hardy et al. (1938) dada por (5.3) e iii) índices de resistências térmicas das vestimentas [clo], considerando que quanto maior a resistência térmica da roupa, menor são as trocas térmicas com o meio.

$$A_{DU} = 0,202 \cdot m^{0,425} \cdot l^{0,725} \quad (5.3)$$

na qual, A_{DU} representa a área da superfície do corpo ou área de DuBois [m^2], m é a massa corporal [kg] e l é a altura do corpo [m].

Para o estabelecimento dos índices de conforto térmico é necessário adotar variáveis ambientais incluindo: i) temperatura radiante média, ii) velocidade do ar, iii) umidade relativa, iv) temperatura do ar, v) atividade física e vi) resistência térmica das vestimentas. Posteriormente, deve-se identificar: i) temperaturas médias $\overline{T_m}$, ii) temperaturas médias das máximas $\overline{T_{max}}$, iii) temperaturas médias das mínimas $\overline{T_{min}}$ e iv) umidade relativa média $\overline{UR_m}$ para identificação das zonas de estratégia de controle a serem adotadas no projeto arquitetônico, como: i) zonas de conforto, ii) zona de ventilação natural, iii) zona de inércia térmica para resfriamento, iv) zonas de resfriamento evaporativo e umidificação, v) zona de aquecimento solar, vi) zonas de condicionamento artificial com isolamento térmico e vii) zona de sombreamento.

5.5 Considerações

Com o procedimento metodológico proposto é possível identificar o comportamento do fluxo luminoso e do conforto térmico dos usuários de determinada residência, critérios fundamentais para a aplicação da bioarquitetura e conseqüentemente da promoção da eficiência energética. No próximo capítulo são apresentados os resultados obtidos decorrentes da metodologia apresentada.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

Neste capítulo são dispostos os resultados obtidos utilizando a metodologia proposta para o estudo da bioarquitetura nas habitações. O conteúdo está dividido: i) dimensionamento das variáveis da simulação, ii) dispositivos de simulação do fluxo natural, iii) isocurva de iluminação e expressão para determinar a eficiência energética local, iv) estudo de caso em residência e v) estudo do conforto térmico humano e estratégias de controle.

6.1 Definição das variáveis de simulação

Para realizar os estudos foi definido ambiente de simulação com base nos modelos utilizados para testes de desempenho térmico, energético e conforme exigência de ambientes de permanência prolongada, ambas estabelecidas no Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). As dimensões do ambiente simulado são: largura $L = 3,00m$, profundidade $C = 7,66m$ e pé-direito $H = 2,50m$, como apresentado na Figura 6.1 e disposto na Tabela A.1. A área de abertura é definida com 1/6 da área do piso, sem esquadria e com dimensões: largura da abertura $L_a = 3,00m$, altura da abertura $h = 1,27m$ e peitoril $p = 1,00m$.

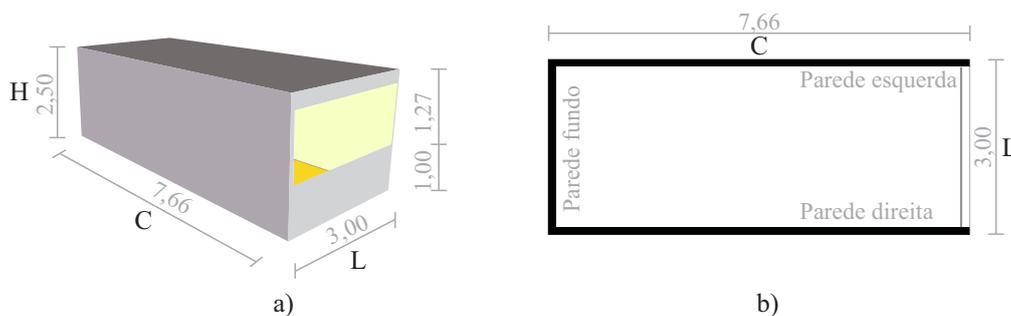


Figura 6.1 - Dimensões do ambiente de simulação: a) volume do ambiente e b) planta baixa.

6.1.1 Local para realização do estudo de caso

A região escolhida para realizar os estudos de casos é o Centro-Oeste do Brasil na Cidade de Goiânia/Goiás, localizado na latitude $16^{\circ} 41' sul$, longitude $49^{\circ} 17' oeste$, altitude média entre $600m$ e $1.000m$, na linha divisória entre a zona tropical e a

Tabela 6.1 - Dimensões das áreas externas do ambiente de simulação.

Área de Estudo	Dimensão	Área
Parede direita	7,66 x 2,50	19,15
Parede esquerda	7,66 x 2,50	19,15
Parede fundo	3,00 x 2,50	7,5
Piso	7,66 x 3,00	22,98
Total		68,78

subtropical. A região da Cidade de Goiânia sofre oscilações na temperatura ao longo do ano, na qual a Figura 6.2, adaptada de LabEEE (2014), apresenta os valores de temperatura média, máxima e mínima no decorrer do ano e destaca a zona de conforto para a Cidade de Goiânia.

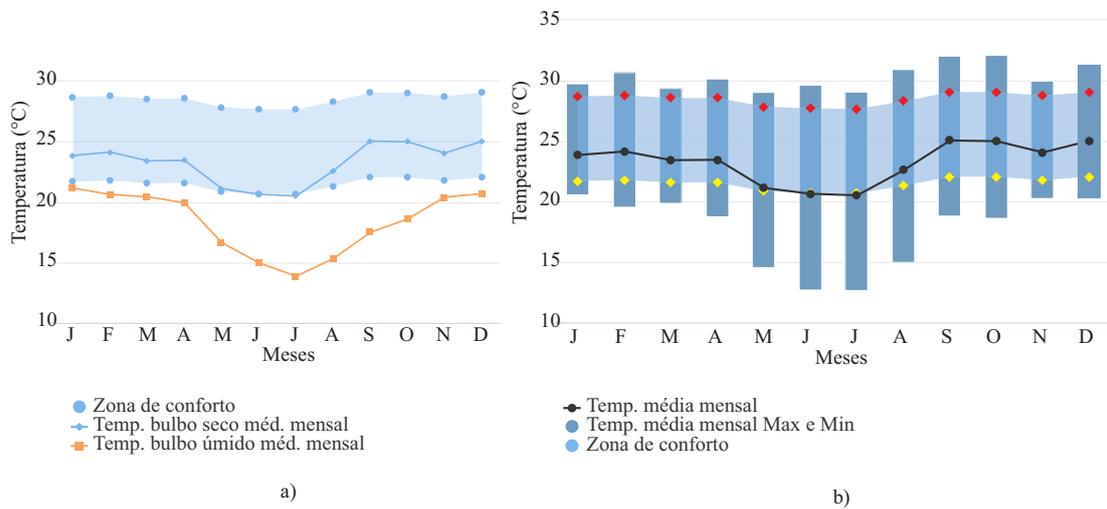


Figura 6.2 - Temperatura e zona de conforto para a Cidade de Goiânia: (a) temperatura média mensal do bulbo seco e úmido e (b) temperatura média mensal das máximas e das mínimas.

As oscilações ao longo do ano apresentadas na Figura 6.2, podem ser interpretadas: i) os meses de maio, junho e julho são críticos para a promoção do conforto térmico e ii) a zona de conforto está em torno de 21,56°C à 28,56°C. O mês de julho é o que apresenta a menor temperatura de bulbo úmido, que é a indicação da quantidade de umidade no ar, correspondendo a 13,87°C. Quanto menor a umidade relativa do ar, maior o arrefecimento. Assim, na Cidade de Goiânia predomina calor durante à tarde do ano inteiro e frio na madrugada durante os meses da estação de seca, correspondendo aos meses de maio, junho, julho e agosto.

A Figura 6.3, adaptada de Fernandes (2007), apresenta a variação da média mensal da amplitude térmica diária, que representa a diferença entre média das máximas

e média das mínimas. Pode-se observar que o ápice da amplitude térmica mensal na Cidade de Goiânia acontece no mês de agosto, com variação de aproximadamente 19°C , correspondendo ao mês mais seco do ano. Esta alta amplitude térmica é semelhante aos climas desérticos. Já os meses que registram as menores amplitudes térmicas são os meses de janeiro, fevereiro, março, novembro e dezembro, que correspondem aos meses mais úmidos.

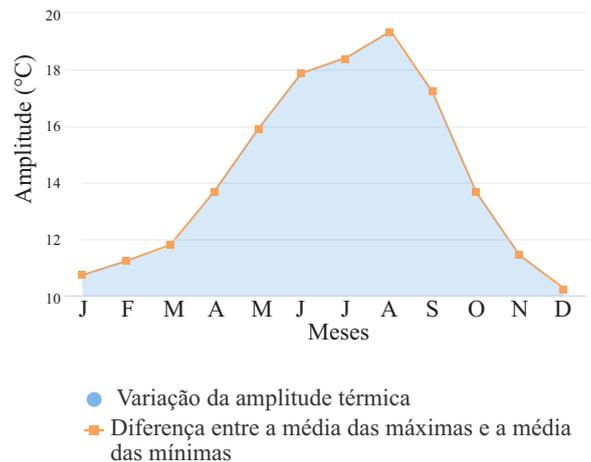


Figura 6.3 - Média mensal da amplitude térmica diária.

A região Centro-Oeste ocupa a segunda melhor região do país quando se considera índice de irradiação média global, dividindo o posto de melhor região quando se trata de irradiação média global sob o plano inclinado com $5.7\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$.

Os valores da radiação global horizontal média, que é a soma da radiação direta do sol e da radiação difusa proveniente da atmosfera, para a Cidade de Goiânia pode ser obtidos através de arquivos climáticos fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia. Os valores da radiação global horizontal média mensal são apresentados na Figura 6.4 e indicam que os meses de menor radiação solar são os meses de junho, julho e maio, correspondendo à $744\text{Wh}/\text{m}^2$, $755\text{Wh}/\text{m}^2$ e $757\text{Wh}/\text{m}^2$, respectivamente. Os meses de maior radiação global são fevereiro, dezembro e novembro, correspondendo à $944\text{Wh}/\text{m}^2$, $911\text{Wh}/\text{m}^2$ e $883\text{Wh}/\text{m}^2$. Considerando os dados da radiação global diária, das máximas e mínimas, observa-se que os meses que apresentam a menor radiação global horizontal corresponde aos meses de maio, junho e julho.

É possível realizar a análise pluviométrica para a Cidade de Goiânia utilizando os dados do Instituto Nacional de Meteorologia. Estes dados apresentados na Figura 6.5

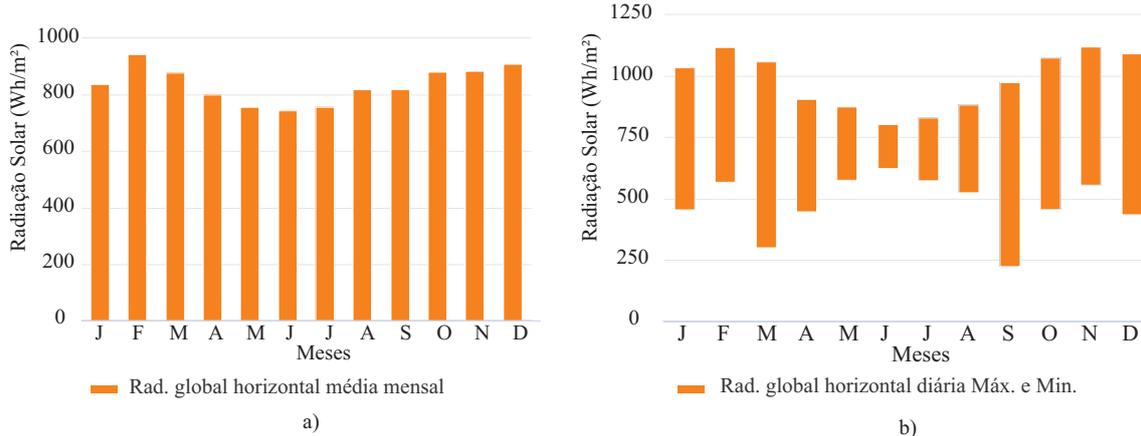


Figura 6.4 - Radiação solar: (a) médias mensais e (b) médias diária das máximas e mínimas durante o mês.

indicam que os meses de maio, junho, julho, agosto e setembro são os que apresentam menores índices de precipitação pluviométrica durante o ano, correspondendo a cinco meses praticamente sem chuva. Nos registros da umidade relativa do ar, que é a relação entre a quantidade de água existente no ar (umidade absoluta) e a quantidade máxima que poderia haver na mesma temperatura (ponto de saturação), indicam que os índices de umidade relativa média anual na Cidade de Goiânia está fora da zona de conforto, sendo necessário adoção de estratégias arquitetônicas e sustentáveis para alcance do conforto térmico no interior da edificação. Isto, pois, em regiões com baixa umidade apresentam dias quentes e noites frias.

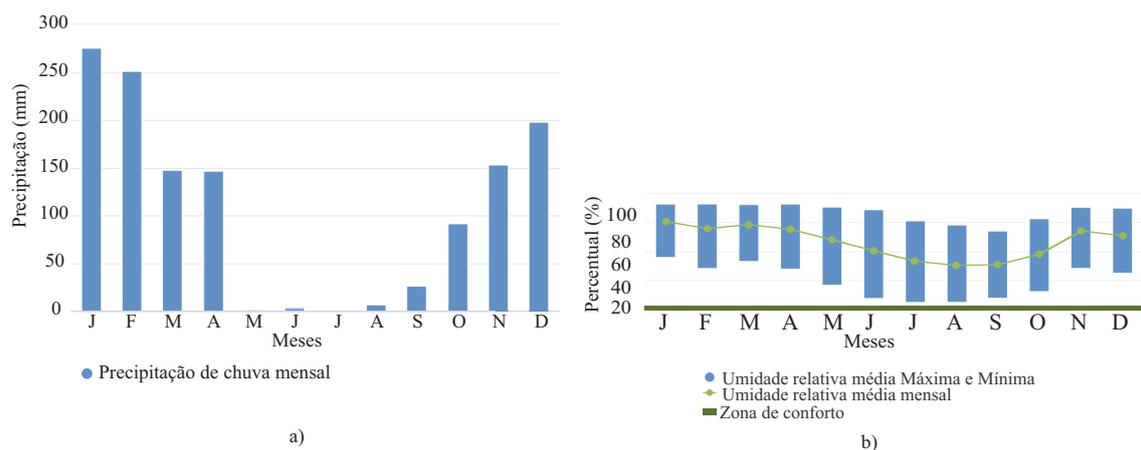


Figura 6.5 - Período chuvoso: (a) comportamento pluviométrico e (b) umidade relativa.

Com relação aos ventos na Cidade de Goiânia, existe a predominância na direção

sudoeste (SE) como apresentado na Figura 6.6, na qual são registrados: a) velocidade do vento, ii) direção e iii) frequência. Assim, pode se afirmar que os ventos na região de estudo predomina na direção sudeste e leste, com frequência de 15% à 20% e com velocidade média entre $0m/s$ à $4m/s$.

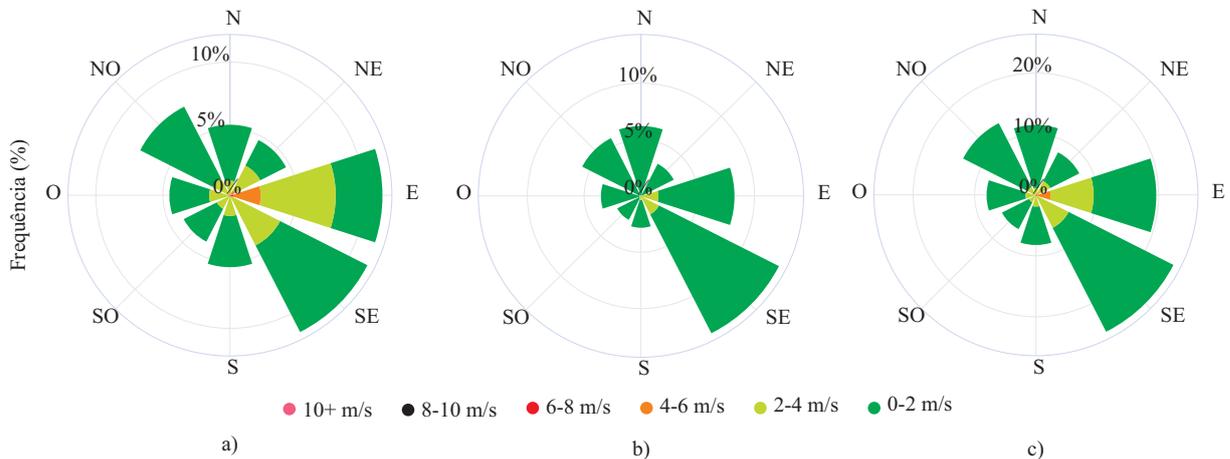


Figura 6.6 - Ventos dominantes: (a) dia, (b) noite e (c) média geral (dia/noite).

A análise dos ventos dominantes são importantes medidores para o desenvolvimento e definições arquitetônicas nas quais buscam a sustentabilidade e eficiência energética. A chuva acompanha o sentido dos ventos, indicando a necessidade de adotar artifícios ou elementos impeditores da penetração da água, tais como: i) uso de beirais ou varandas e ii) posicionamento das aberturas contrárias ao sentido da chuva nos telhados. Estas são algumas opções a serem adotadas.

6.2 Ambiente para estudo e simulação do fluxo luminoso natural

Para realização da análise do comportamento do fluxo luminoso foi utilizado o Software de modelagem 3D *SketchUp*. Esta ferramenta possibilita a elaboração do modelo com identificação dos elementos a serem utilizados no planejamento da insolação, com base na área de projeção das incidências solares direta. A Figura 6.7 apresenta o ambiente a ser simulado considerando as condições da incidência solar real condizentes com o solstício (verão e inverno) e equinócio do local estudado. Na interface do Software *SketchUp* é possível realizar análise da radiação solar direta no ambiente simulado, considerando: i) as coordenadas geográficas, ii) horários do dia, iii) média mensal e iv) área de incidência solar direta I_d projetada em cada superfície do ambiente.

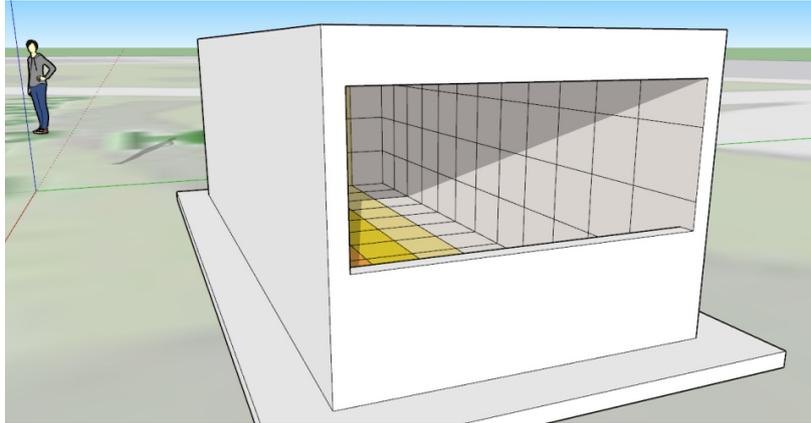


Figura 6.7 - Ambiente para estudo de caso.

Para análise do comportamento do fluxo luminoso no ambiente escolhido, foram consideradas: i) orientações – norte, sul, leste, oeste, nordeste, noroeste, sudoeste, sudeste, ii) área de incidência direta I_d em cada superfície do ambiente – parede esquerda, parede direita, parede do fundo e piso e iii) período de análise – a) das 05h às 19h e b) janeiro/2019 à dezembro/2019. Assim, a abertura do ambiente é direcionada a cada orientação e os registros coletados correspondem a área mensal da incidência solar projetada em cada superfície no período de um ano e a cada hora.

6.2.1 Orientações cardeais norte, sul, leste e oeste

De posse do simulador é possível realizar a análise do ambiente proposto na Tabela A.1 e Figura 6.7 em várias orientações e no período de um ano. Para a **orientação norte**, o comportamento da área de incidência solar registra particularidades, por exemplo, a área de incidência solar na superfície da parede direita ocorre somente entre os meses de março à outubro, com área máxima de incidência direta de $I_{d_{max}} = 12,5m^2$, predominantemente no período das 07:00h às 12:00h. No mês de junho houve único registro de $\approx 1,8m^2$ de área média de incidência direta no período das 17:00h às 18:00h. Na superfície da parede esquerda ocorre a incidência solar direta somente no período vespertino, das 12:00h às 18:00h nos meses de março à outubro, com $I_{d_{max}} = 9,6m^2$.

Não houve nenhum registro de incidência solar na superfície da parede do fundo em todo o período analisado. Na superfície do piso, a área de incidência ocorre nos meses de março à outubro, no período das 09:00h às 16:00h, com $I_{d_{max}} = 13m^2$. Considerando a análise geral dos dados obtidos para a **orientação norte**, observa-

se que: i) ocorre maior incidência solar no período de março à outubro, ii) o horário de maior incidência solar é das 07:00h às 18:00h e iii) a área de incidência média mensal mínima é de $A_{min} = 1,3m^2$ e a área de incidência média mensal máxima é de $A_{max} = 33,8m^2$. A Figura 6.8 apresenta os valores obtidos da simulação para a **orientação norte**.

ORIENTAÇÃO CARDEAL - NORTE

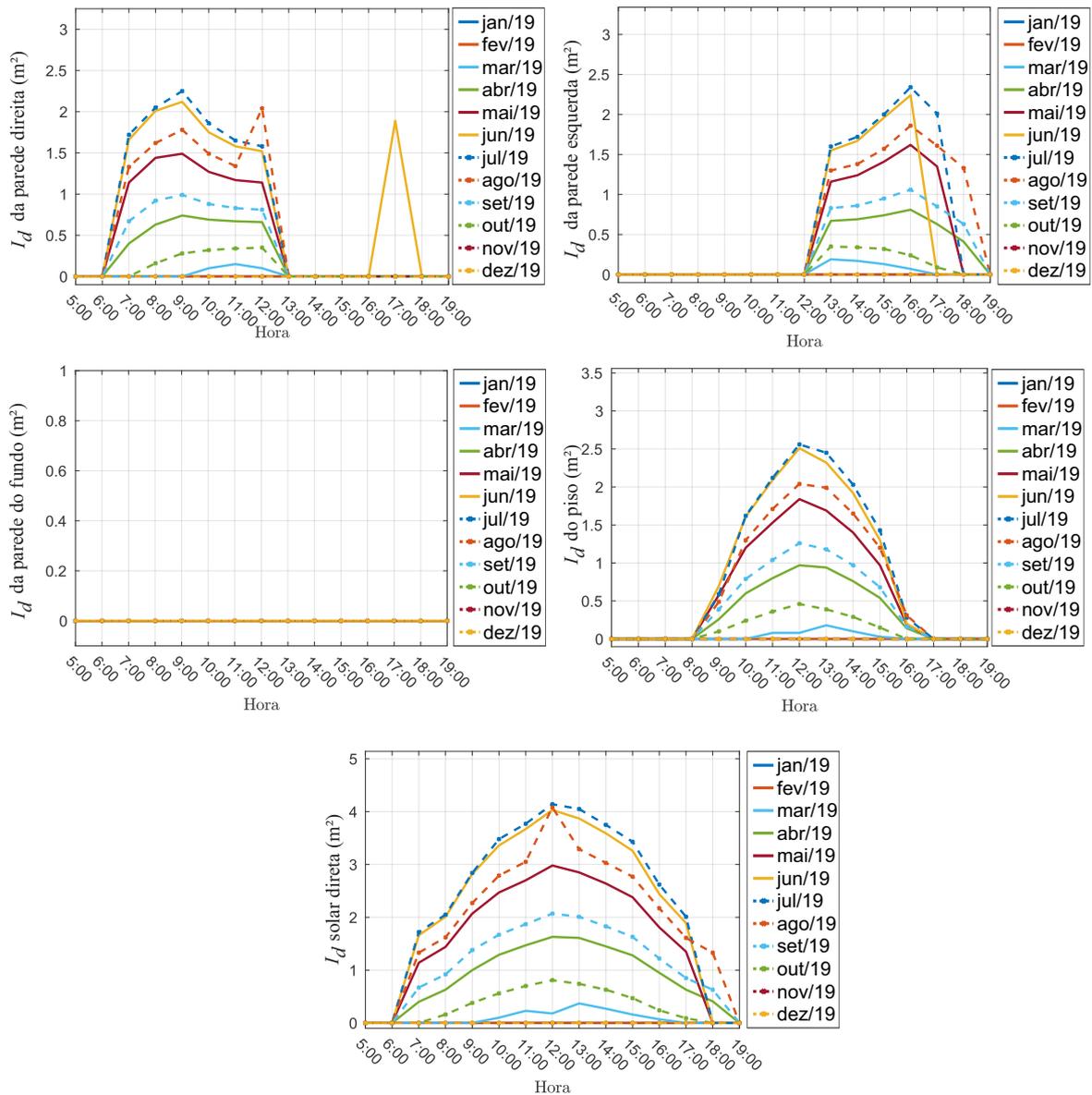


Figura 6.8 - Comportamento do fluxo luminoso nas superfícies considerando a **orientação norte**.

Para a **orientação sul**, os dados obtidos na superfície da parede direita apresentam

incidência solar direta nos meses de janeiro à março e outubro à dezembro, com $I_{d_{max}} = 3,4m^2$ no período das 13:00h às 18:00h. Não houve registro de incidência solar nos meses de abril à setembro. Na superfície da parede esquerda ocorre incidência solar nos meses de janeiro à março, novembro e dezembro, no período das 06:00h às 12:00h, com $I_{d_{max}} = 4,8m^2$. Não houve registros de incidência solar nos meses de abril à outubro.

Não houve nenhum registro de incidência solar na superfície da parede do fundo no período analisado. Na superfície do piso foram obtidos dados de incidência solar direta nos meses de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro, com ocorrências no período das 08:00h às 11:00h e das 14:00h às 17:00h, com $I_{d_{max}} = 1m^2$. Na análise geral para a **orientação sul**, observa-se que: i) a incidência solar ocorre no período entre janeiro à março e outubro à dezembro, ii) o horário de maior incidência é das 08:00h às 18:00h e iii) a área de incidência média mensal mínima é de $A_{min} = 0,1m^2$ e a área de incidência média mensal máxima é de $A_{max} = 9,4m^2$. A Figura 6.9 apresenta os valores obtidos da simulação para a **orientação sul**.

Na **orientação leste**, predominantemente em todas as superfícies analisadas, a incidência solar direta ocorre no período das 05:00h às 12:00h. Na superfície da parede direita, houve incidência solar no período de janeiro à março e nos meses de novembro e dezembro, com $I_{d_{max}} = 22,6m^2$. Na superfície da parede esquerda ocorre incidência solar no período de março à novembro, com $I_{d_{max}} = 21,5m^2$ e não ocorre incidência solar direta nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro. A incidência solar na superfície da parede do fundo ocorre nos meses de fevereiro à abril e de agosto à novembro, no entanto, com $I_{d_{max}} < 2,1m^2$.

Na superfície do piso, a área de incidência solar direta ocorre em todos os meses do ano, com destaque para os meses de outubro e novembro, que correspondem aos meses de maiores incidência solar direta, com $I_{d_{max}} = 22,3m^2$. Considerando a análise geral dos dados obtidos para a **orientação leste**, observa-se que: i) a incidência solar ocorre no período de janeiro à dezembro, ii) o horário de maior incidência é das 06:00h às 11:00h e iii) a área de incidência média mensal mínima é de $A_{min} = 24,5m^2$ e a área de incidência média mensal máxima é de $A_{max} = 40,4m^2$. A Figura 6.23 apresenta os valores obtidos da simulação para a **orientação leste**.

Para a **orientação oeste**, na superfície da parede direita foram obtidos dados de incidência solar nos meses de março à novembro, no período das 13:00h às 18:00h, não houve registros de incidência nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro. A área de incidência solar máxima projetada na superfície da parede direita $I_{d_{max}} = 23,6m^2$.

ORIENTAÇÃO CARDEAL - SUL

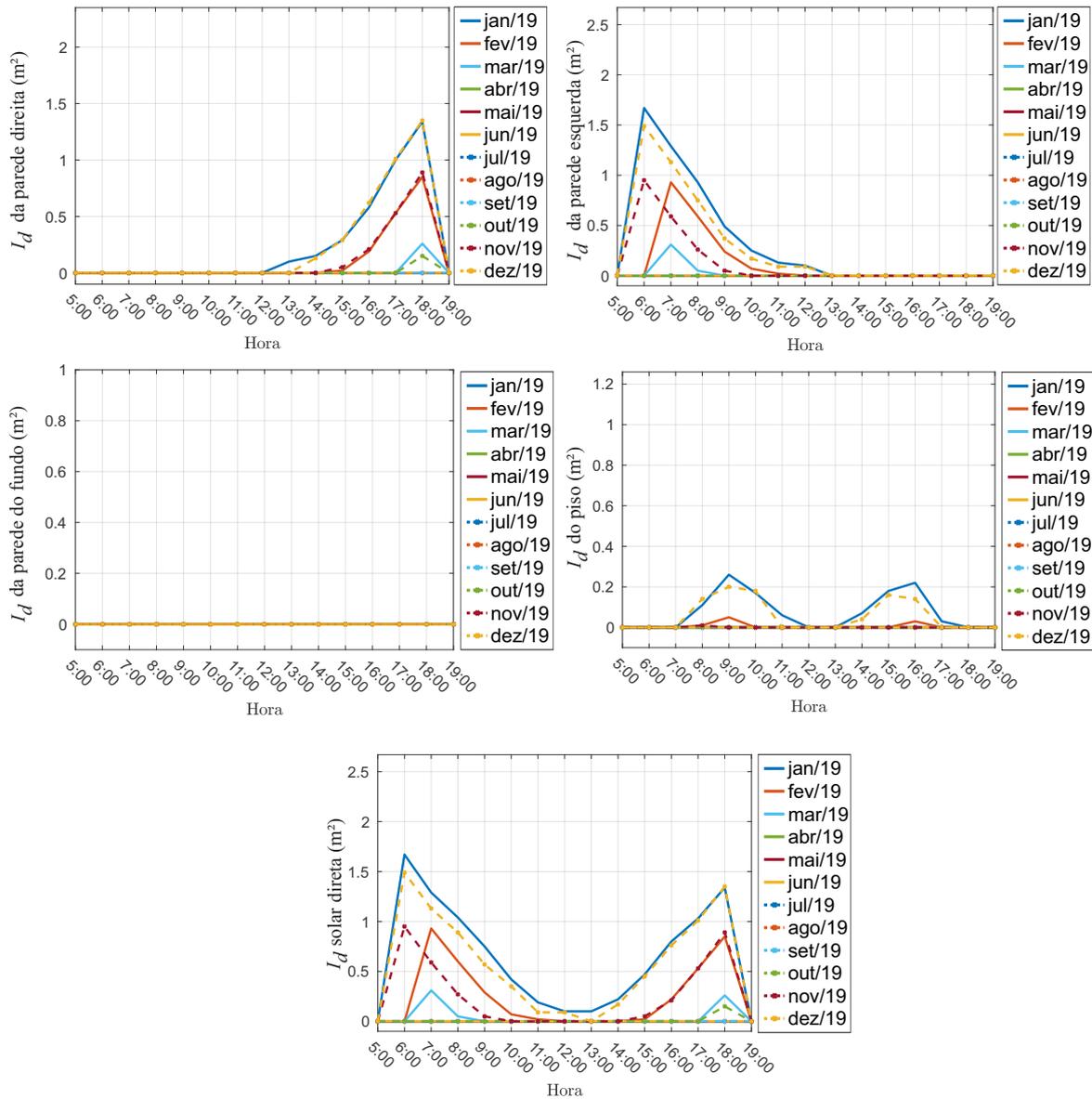


Figura 6.9 - Comportamento do fluxo luminoso nas superfícies considerando a **orientação sul**.

Na superfície da parede esquerda ocorre incidência solar direta somente nos meses de janeiro à março e outubro à dezembro, predominantemente no período das 13:00h às 18:00h, com $I_{d_{max}} = 20,8m^2$. Não houve registros de incidência solar nos meses de abril à setembro.

A incidência solar na superfície da parede do fundo aparece nos meses de janeiro à abril e de setembro à dezembro no período de 17:00h às 18:00h, com $I_{d_{max}} =$

ORIENTAÇÃO CARDEAL - LESTE

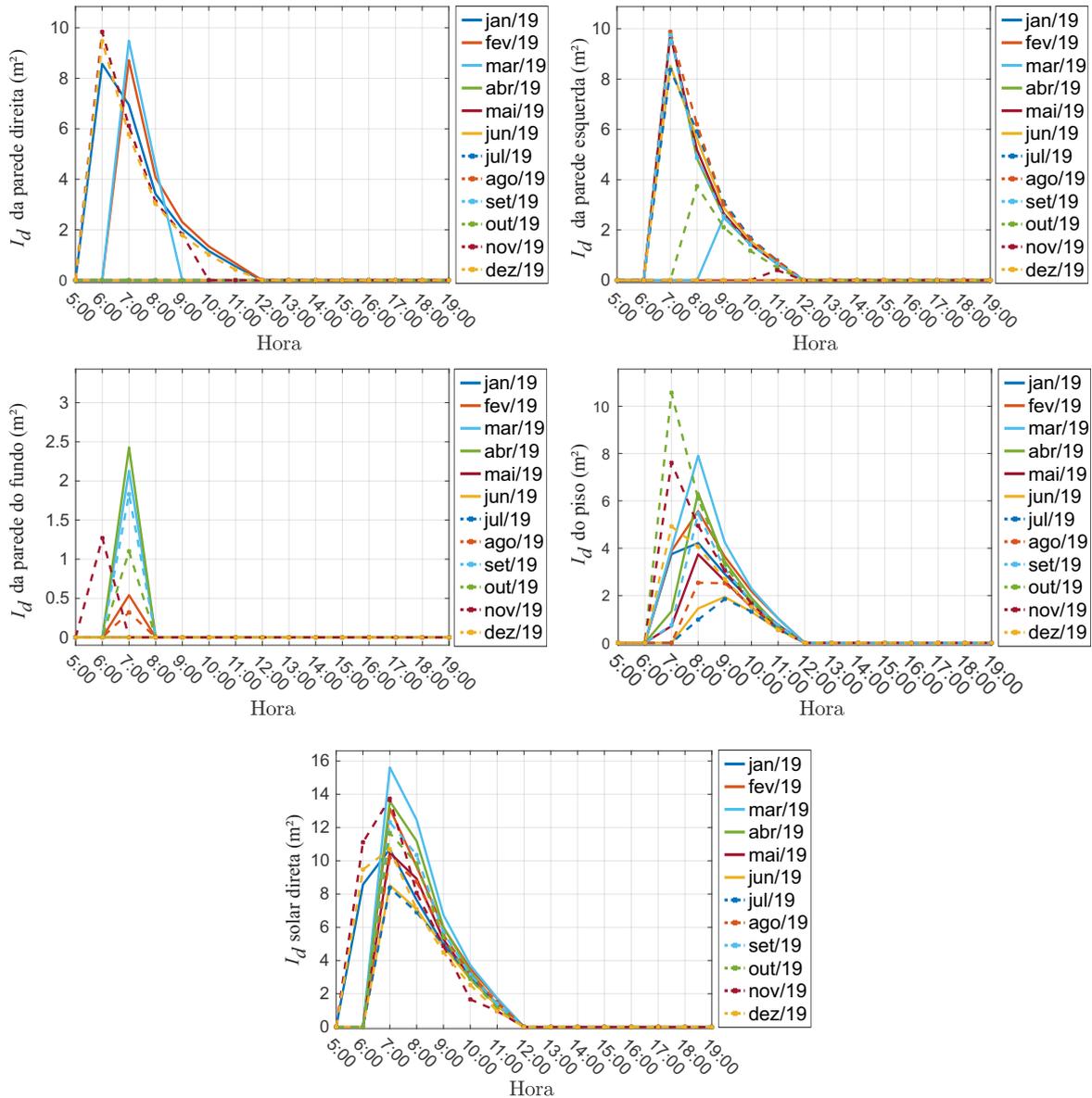


Figura 6.10 - Comportamento do fluxo luminoso nas superfícies considerando a **orientação leste**.

$3,3m^2$. Não houve registro de incidência solar nos meses de junho, julho e agosto. Na superfície do piso a incidência solar ocorre em todos os meses do ano, com $I_{d_{max}} = 21,5m^2$, predominantemente no período das 13:00h às 18:00h. Na análise geral para a **orientação oeste**, observa-se que: i) a incidência solar ocorre no período de janeiro à dezembro, ii) o horário de maior incidência é das 13:00h às 18:00h e iii) a área de incidência média mensal mínima é de $A_{min} = 17,9m^2$ e a área de incidência média mensal máxima é de $A_{max} = 47,9m^2$. A Figura 6.11 apresenta os

valores obtidos da simulação para a **orientação oeste**.

ORIENTAÇÃO CARDEAL - OESTE

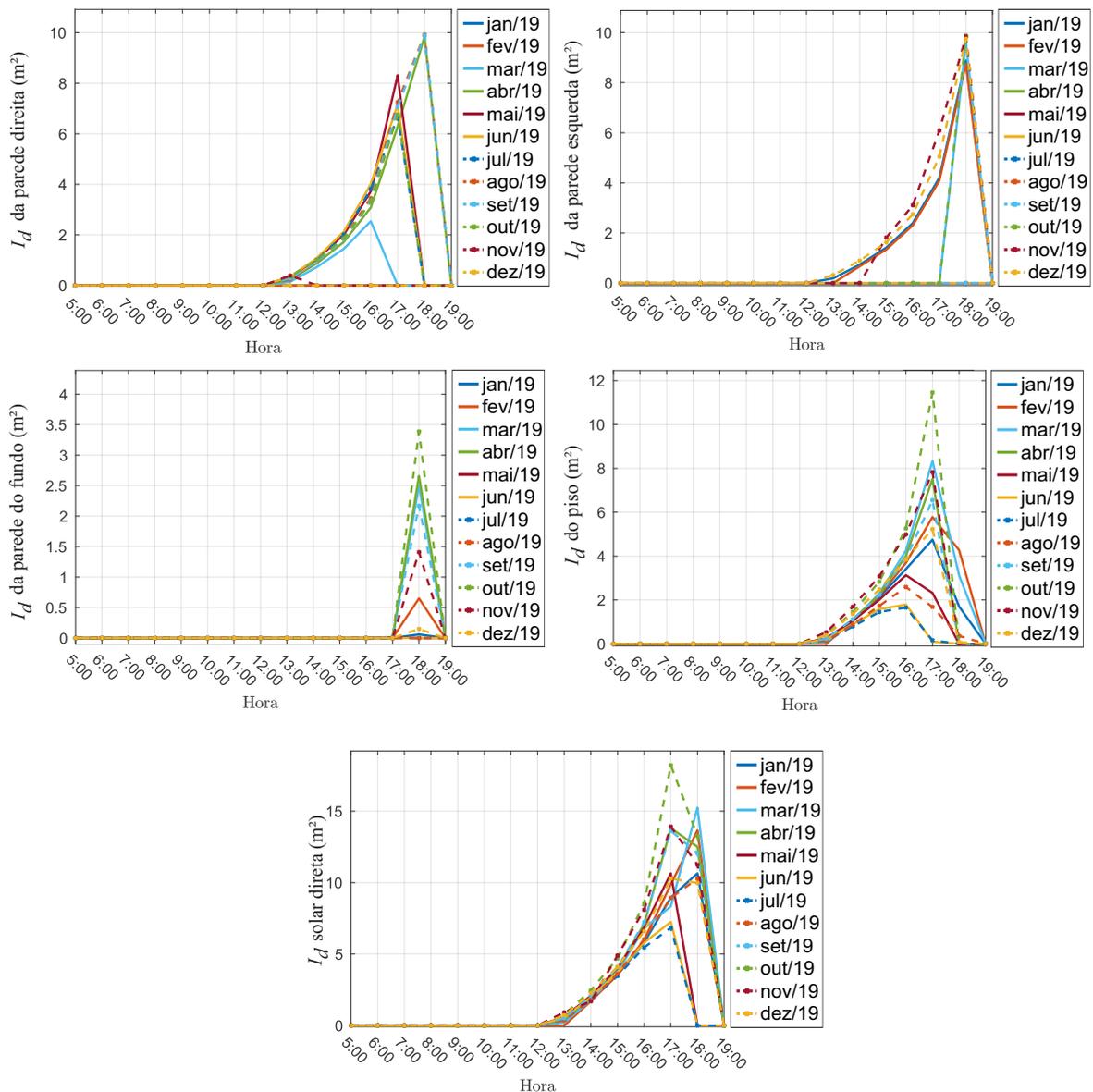


Figura 6.11 - Comportamento do fluxo luminoso nas superfícies considerando a **orientação oeste**.

6.2.2 Orientações colaterais nordeste, noroeste, sudeste e sudoeste

Para a **orientação nordeste**, na superfície da parede direita foram obtidos dados de incidência solar em todos os meses do ano, no período das 06:00h às 12:00h. A área de incidência solar máxima projetada na superfície da parede direita é $I_{d_{max}} = 21,1m^2$.

Na superfície da parede esquerda ocorre incidência solar direta somente nos meses de março à setembro, predominantemente no período das 10:00h às 13:00h, com $I_{d_{max}} = 6,7m^2$. Não houve registros de incidência solar nos meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro.

A incidência solar na superfície da parede do fundo ocorre nos meses de junho e julho no período de 07:00h às 08:00h, com $I_{d_{max}} = 0,4m^2$. Na superfície do piso a incidência solar ocorre em todos os meses do ano, com $I_{d_{max}} = 21,5m^2$, predominantemente no período das 07:00h às 14:00h. Na análise geral para a **orientação nordeste**, observa-se que: i) a incidência solar ocorre em todos os meses do ano, ii) o horário de maior incidência é das 06:00h às 14:00h e iii) a área de incidência média mensal mínima é de $A_{min} = 8,2m^2$ e a área de incidência média mensal máxima é de $A_{max} = 49,8m^2$. A Figura 6.12 apresenta os valores obtidos da simulação para a **orientação nordeste**.

Para a **orientação noroeste**, os dados obtidos na superfície da parede direita apresentam incidência solar direta nos meses de março à outubro, com $I_{d_{max}} = 16,6m^2$ no período das 10:00h às 14:00h. Não houve registro de incidência solar nos meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro. Na superfície da parede esquerda ocorre incidência solar em todos os meses do ano, no período das 13:00h às 18:00h, com $I_{d_{max}} = 22,5m^2$.

A incidência solar na superfície da parede do fundo aparece nos meses de junho e julho às 17:00h, com $I_{d_{max}} = 0,3m^2$. Não houve registro de incidência solar nos meses de agosto à maio (nove meses). Na superfície do piso a incidência solar ocorre em todos os meses do ano, $I_{d_{max}} = 20,1m^2$, predominantemente no período das 11:00h às 17:00h. Na análise geral para a **orientação noroeste**, observa-se que: i) a incidência solar ocorre durante todo ano, ii) o horário de maior incidência é das 10:00h às 18:00h e iii) a área de incidência média mensal mínima é de $A_{min} = 6,6m^2$ e a área de incidência média mensal máxima é de $A_{max} = 41,9m^2$. A Figura 6.13 apresenta os valores obtidos da simulação para a **orientação noroeste**.

Para a **orientação sudeste**, não houve registro de incidência solar na superfície da parede direita e na parede do fundo no período analisado. Na superfície da parede esquerda ocorre incidência solar em todos os meses do ano, no período das 06:00h às 12:00h, com $I_{d_{max}} = 22,2m^2$.

Na superfície do piso a incidência solar ocorre nos meses de janeiro à maio e de agosto à dezembro, com $I_{d_{max}} = 8,9m^2$, predominantemente no período das 07:00h

ORIENTAÇÃO COLATERAL - NORDESTE

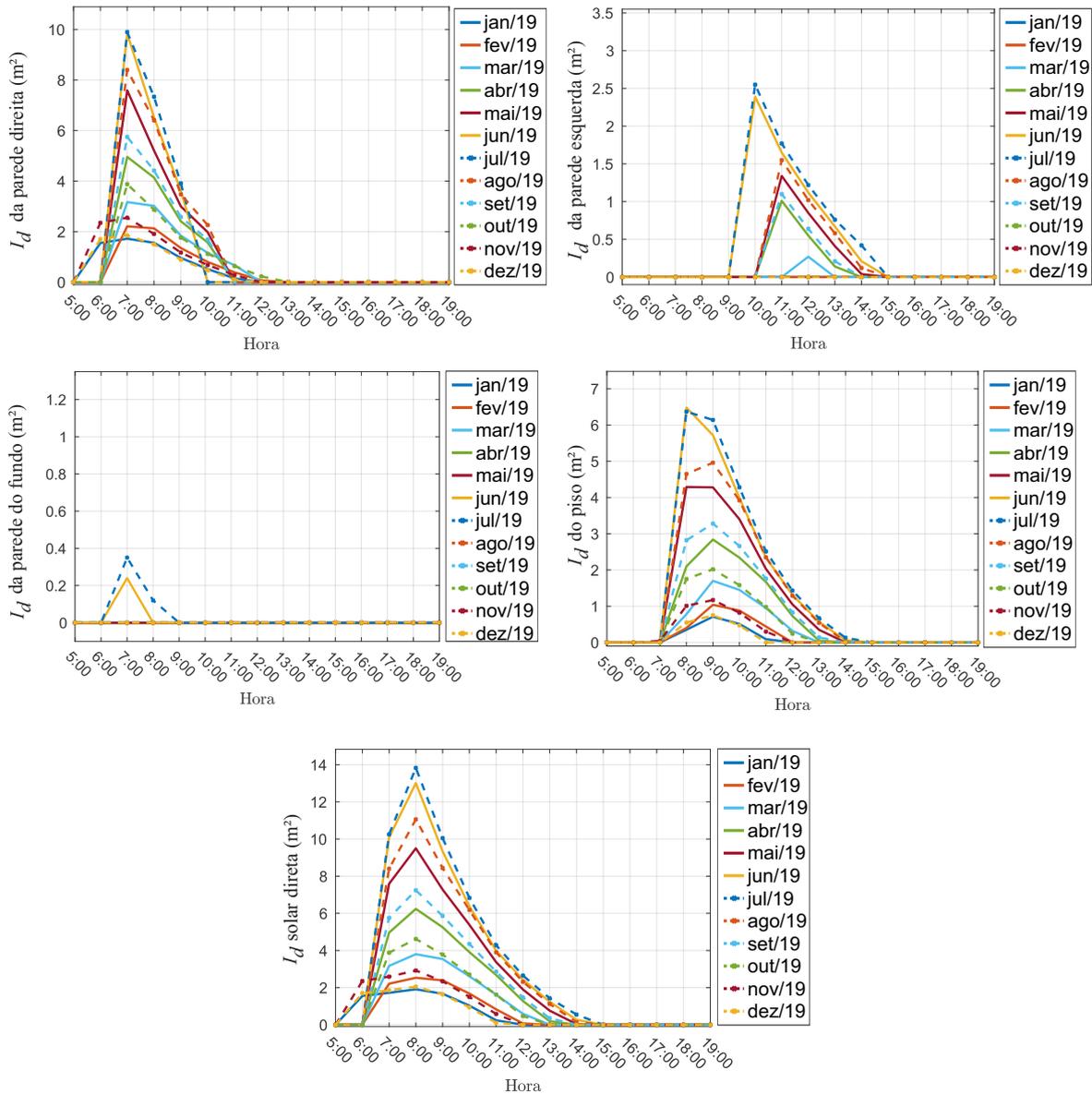


Figura 6.12 - Comportamento do fluxo luminoso nas superfícies considerando a **orientação nordeste**.

às 11:00h. Não houve registros de incidência solar nos meses de junho e julho. Na análise geral para a **orientação sudeste**, observa-se que: i) a incidência solar ocorre em todos os meses do ano, ii) o horário de maior incidência é das 06:00h às 12:00h e iii) a área de incidência média mensal mínima é de $A_{min} = 2,4m^2$ e a área de incidência média mensal máxima é de $A_{max} = 31,1m^2$. A Figura 6.14 apresenta os valores obtidos da simulação para a **orientação sudeste**.

ORIENTAÇÃO COLATERAL - NOROESTE

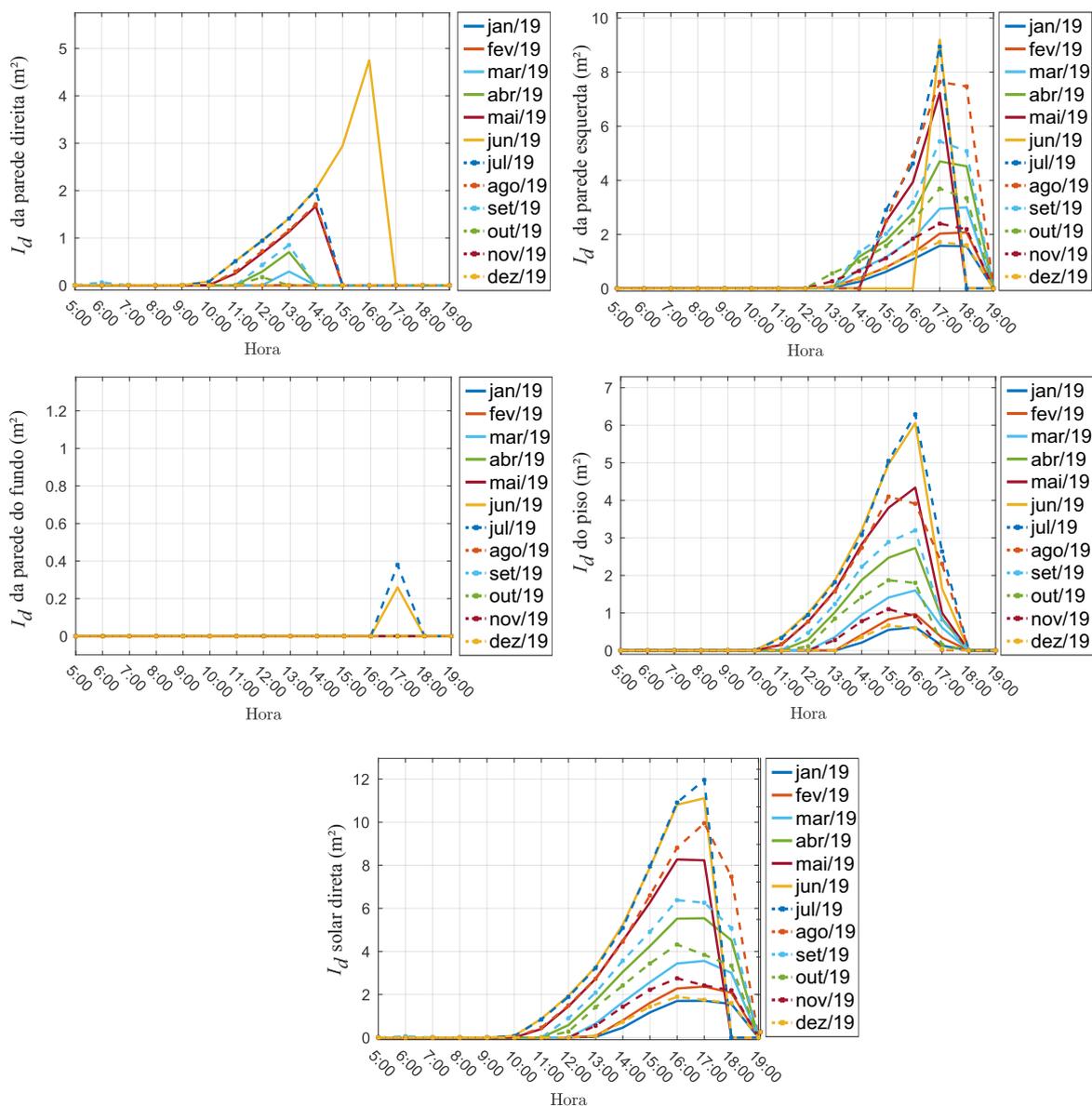


Figura 6.13 - Comportamento do fluxo luminoso nas superfícies considerando a **orientação noroeste**.

Na **orientação sudoeste**, os dados obtidos para a superfície da parede direita apresentam incidência solar direta em todos os meses do ano, com $I_{d_{max}} = 15,7m^2$ no período das 13:00h às 18:00h. Na superfície da parede esquerda ocorre incidência solar no mês de janeiro, às 12:00h, com $I_{d_{max}} = 0,02m^2$.

Na superfície do piso a incidência solar ocorre nos meses de janeiro à março e de agosto à dezembro, com $I_{d_{max}} = 8,6m^2$, predominantemente no período das 13:00

ORIENTAÇÃO COLATERAL - SUDESTE

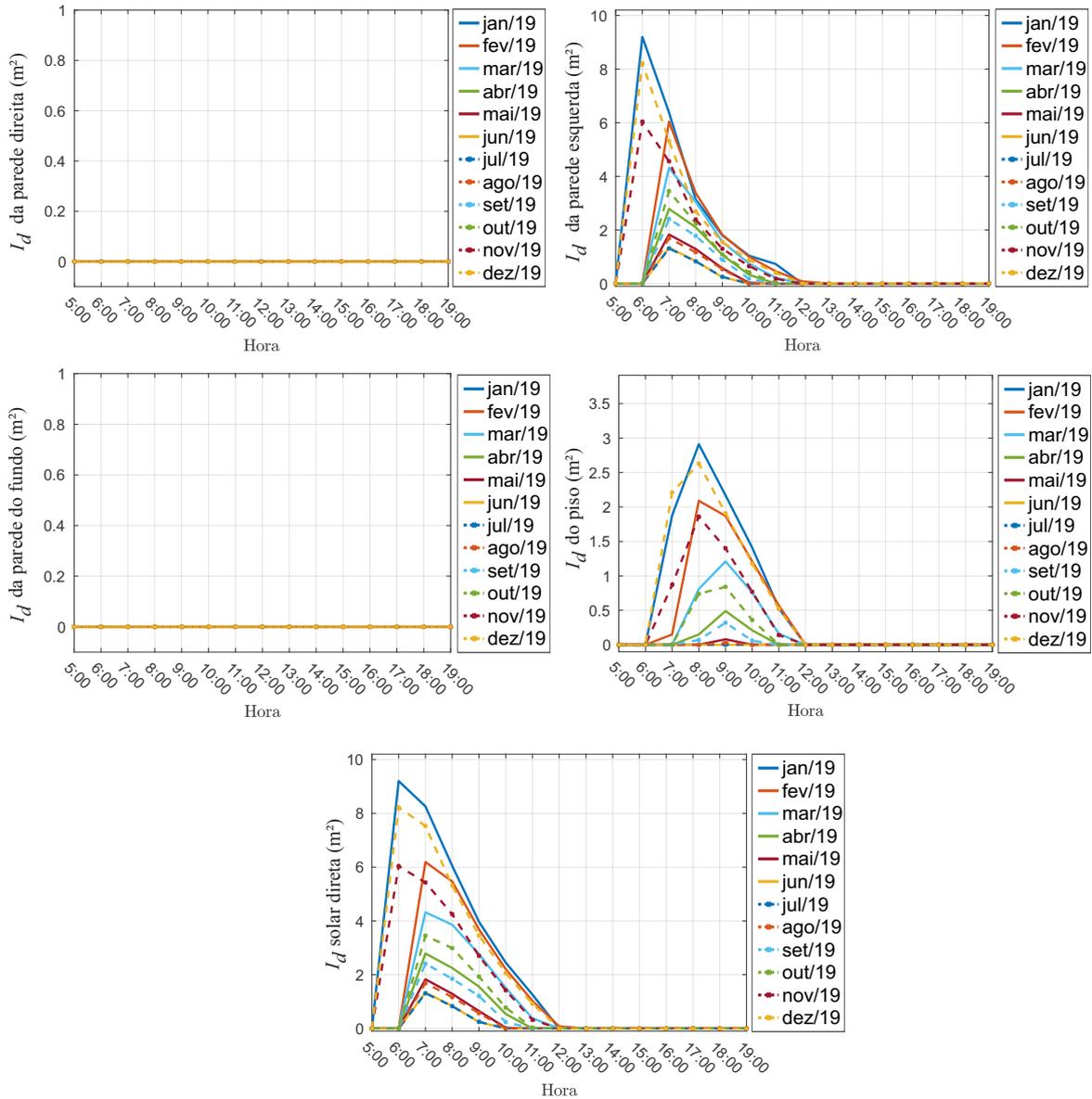


Figura 6.14 - Comportamento do fluxo luminoso nas superfícies considerando a **orientação sudeste**.

às 18:00h. Não houve registros de incidência solar nos meses de junho e julho. Na análise geral para a **orientação sudoeste**, observa-se que: i) a incidência solar ocorre durante todo o ano, ii) o horário de maior incidência é das 12:00h às 18:00h e iii) a área de incidência média mensal mínima é de $A_{min} = 1,3m^2$ e a área de incidência média mensal máxima é de $A_{max} = 24,5m^2$. A Figura 6.15 apresenta os valores obtidos da simulação para a **orientação sudoeste**.

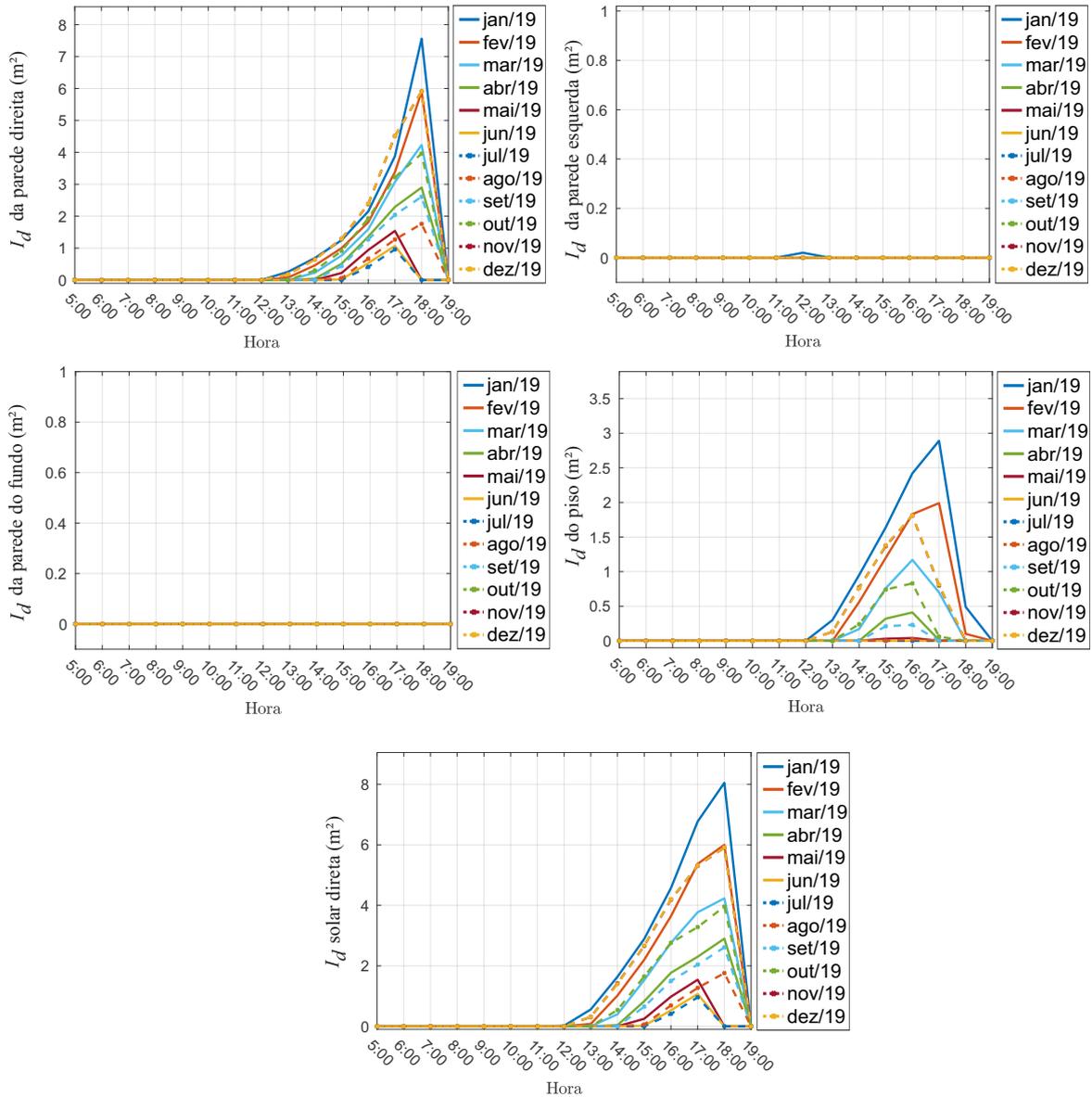


Figura 6.15 - Comportamento do fluxo luminoso nas superfícies considerando a **orientação sudoeste**.

6.3 Análise da incidência solar nas orientações cardeais e colaterais

O objetivo desta análise é identificar o comportamento da área de incidência solar com base na intensidade e no horário/período. São analisados os dados simulados das orientações cardeais e colaterais que apresentam características particulares. No entanto, as orientações colaterais apresentam comportamentos similares aos das orientações cardeais. Desta forma, a Figura 6.16 apresenta os diferentes comporta-

mentos identificados na: i) **orientação norte** a incidência solar ocorre no período das 06:00h às 19:00h, com máximo às 12:00h e $I_{d_{max}} = 4m^2$, ii) **orientação sul** a incidência solar ocorre no período das 05:00 às 19:00 com dois máximos, um as 06:00h outro as 18:00h e $I_{d_{max}} = 1,5m^2$, iii) **orientação leste** a incidência solar ocorre no período das 05:00 às 12:00h, com máximo às 07:00h e $I_{d_{max}} = 15,8m^2$, e iv) **orientação oeste** a incidência solar ocorre no período das 12:00h às 19:00h, com máximo às 17:00h e $I_{d_{max}} = 15,9m^2$.

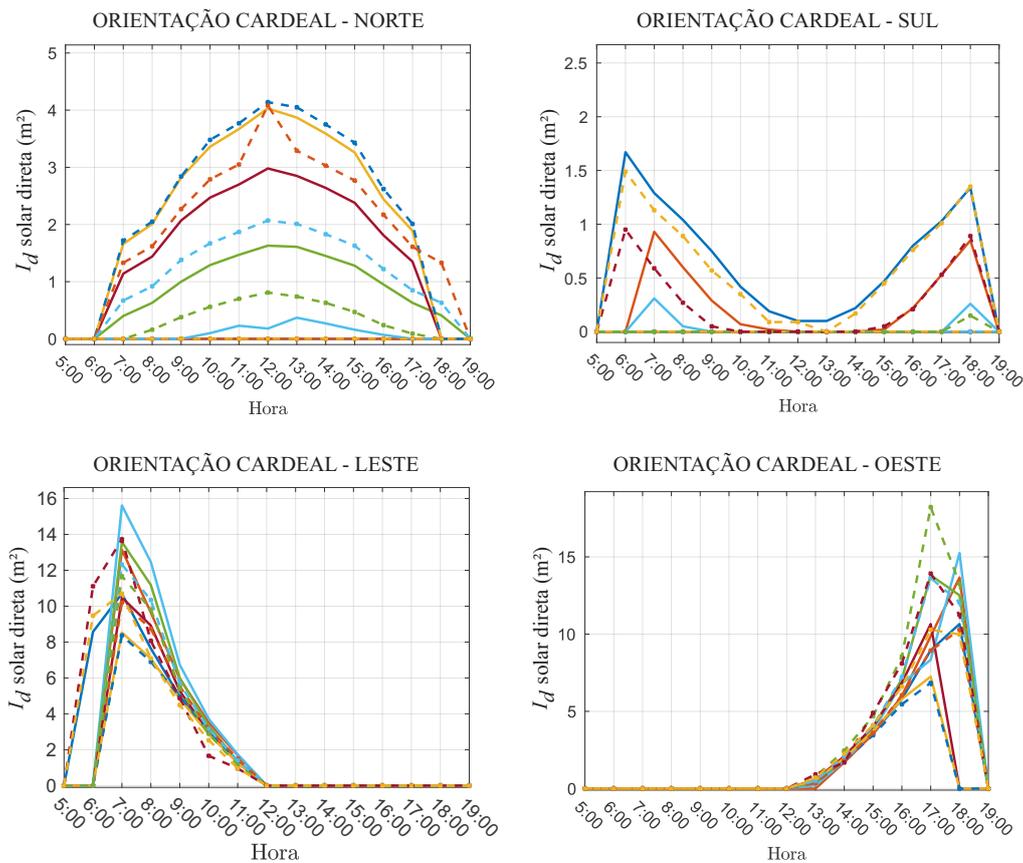


Figura 6.16 - Comportamento da incidência solar natural no ambiente em estudo.

Com os dados de simulação tratados/ordenados, é possível identificar a orientação que possibilita a ocorrência da maior área de incidência solar nas superfícies internas do ambiente em estudo. Nesta análise, adota-se como critério de medida a área de incidência solar média anual A_{isma} para cada orientação. A Figura 6.17 apresenta os valores obtidos por superfície e total, na qual identifica-se que na superfície da parede direita na **orientação nordeste** e **orientação oeste** apresentam as maiores médias da área de incidência solar anual e a **orientação sul** apresenta a menor área média. Para a parede esquerda, a **orientação noroeste** e **orientação leste** apresentam

as maiores médias da área de incidência solar anual e na **orientação sudoeste** não há incidência solar durante todo ano.

Na superfície da parede do fundo a maior média da área da incidência solar ocorre na **orientação oeste** e na **orientação norte**, **orientação sul**, **orientação sudoeste** e **orientação sudoeste** não há incidência solar durante todo ano. Para a superfície do piso, a maior incidência solar ocorre na **orientação oeste** e **orientação leste**, na **orientação sul** ocorre a menor média da área de incidência nesta superfície. Nesta análise observando os valores de A_{isma} , é identificado que: i) na **orientação oeste** $A_{isma} = 33,0m^2/ano$, ii) na **orientação leste** $A_{isma} = 32,7m^2/ano$, iii) na **orientação nordeste** $A_{isma} = 24,7m^2/ano$, iv) na **orientação noroeste** $A_{isma} = 23,3m^2/ano$ e v) na **orientação sul** $A_{isma} = 2,1m^2/ano$ correspondendo a menor média da área de incidência solar.

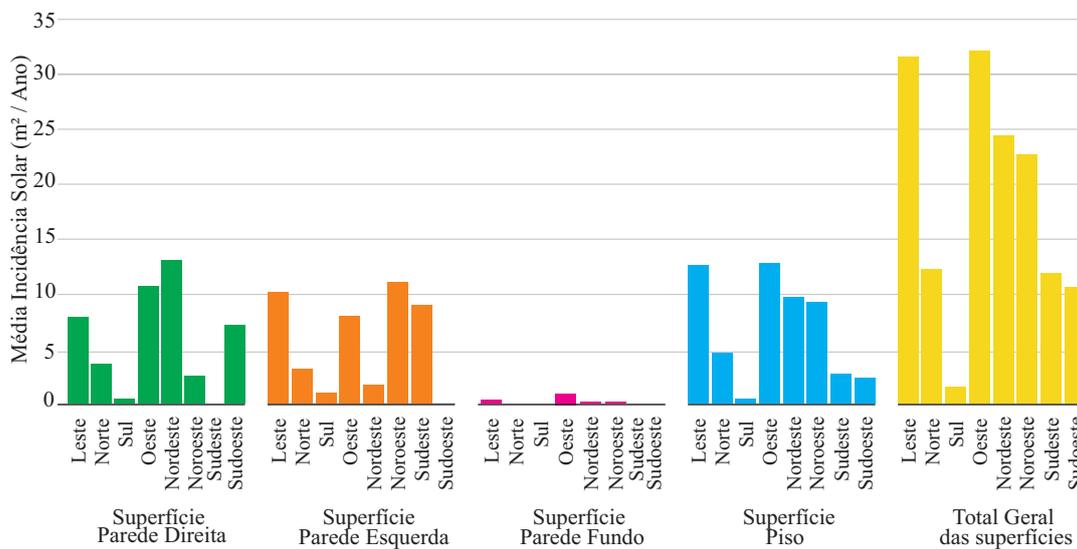


Figura 6.17 - Análise geral da média da área da incidência solar anual em cada superfície e total.

6.4 Análise da área de incidência solar × profundidade do ambiente

Da Figura 6.17, observa-se que a **orientação oeste** apresenta maior média da área de incidência solar anual. Desta forma, a **orientação oeste** é escolhida como orientação para os demais estudos de caso deste trabalho. Com o objetivo de analisar o comportamento da incidência solar × profundidade do ambiente em estudo, realiza-se redução gradativa na profundidade do ambiente em porção de $0,5m$, iniciando com a profundidade máxima de $7,66m$ até atingir a profundidade mínima de $0,66m$.

A Figura 6.18 apresenta os valores das áreas de todas as superfícies internas que recebem o fluxo luminoso a cada profundidade analisada, na qual é observado que: i) quanto maior a profundidade menor é a área da incidência solar, ii) simetria do comportamento da área da incidência solar, iii) março, abril, setembro, outubro, novembro e dezembro são os meses de maior incidência solar e iv) maio, junho e julho são os meses que apresentam as menores áreas de incidência solar.

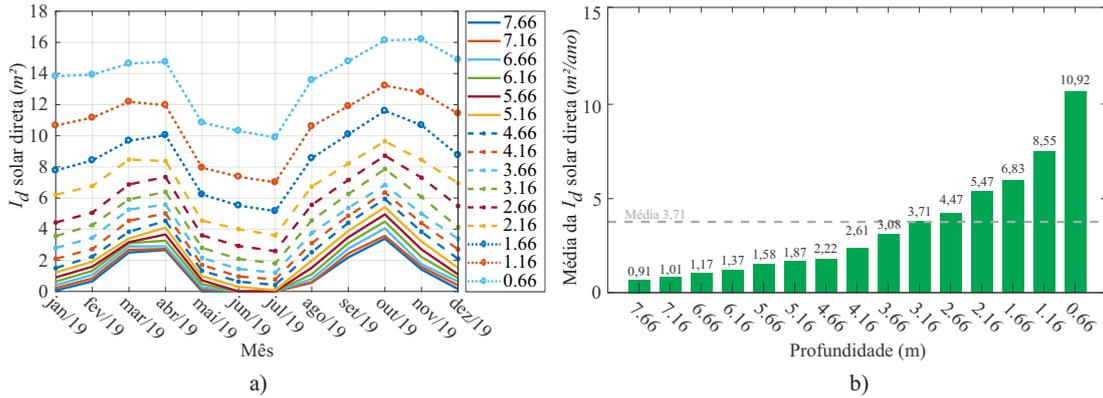


Figura 6.18 - Comportamento do fluxo luminoso na **orientação oeste**: a) área da incidência solar \times profundidade e b) média anual da incidência solar \times profundidade.

6.5 Isocurvas da área de iluminação e cálculo da superfície de iluminação direta

O objetivo desta análise é realizar estudo de complemento luminoso no ambiente de simulação. Neste estudo de caso será utilizada a parede do fundo na **orientação oeste** como exemplo. A parede do fundo tem área total de $7,5m^2$ e no período de um ano com a abertura voltada para a **orientação oeste**, obteve área de iluminação média de $1,13m^2$ com $I_{d_{max}} = 2,66m^2$, e nos meses de junho e julho não houve nenhuma iluminação direta. Considerando o somatório de todas as áreas dos doze meses do ano, tem-se $A_{isma} = 13,59m^2$, no entanto, deste valor não há como abstrair os locais de iluminação, uma vez que a área anual total iluminada é maior que a área da parede do fundo.

A forma de abstrair os locais de maior iluminação é a sobreposição de todas as áreas dos doze meses formando linhas equipotenciais em determinada superfície. A Figura 6.19 apresenta as curvas equipotenciais que identificam a necessidade de complemento luminoso artificial a partir da altura de $\approx 0,5m$. Na Figura 6.19 as cores de tonalidade amarela indicam maior tempo de iluminação e as cores de tonalidade

azul indicam menor tempo de iluminação ou nenhuma iluminação.

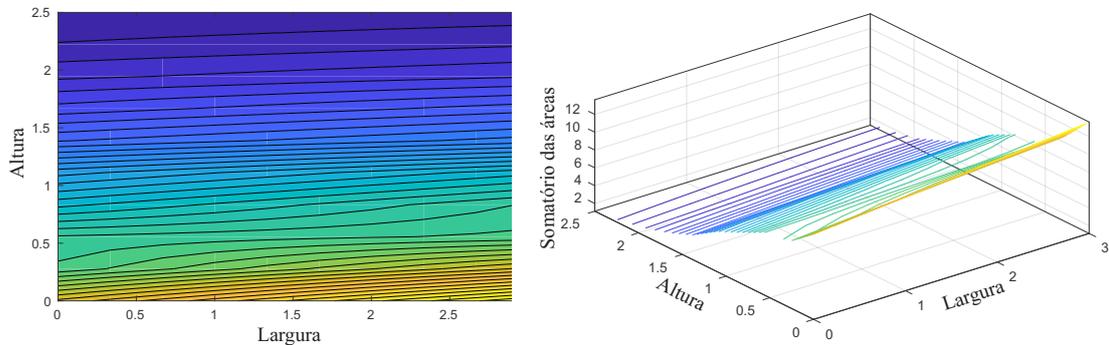


Figura 6.19 - Isocurva da área de iluminação na **orientação oeste**: a) apresentação da área de iluminação na parede do fundo e b) representação 3D do somatório das áreas de iluminação.

Na Figura 6.19 a) são apresentadas 40 isolinhas que formam a superfície com as isocurvas das áreas de iluminação anual, sobrepondo mensalmente os locais iluminados e na Figura 6.19 b) são apresentadas tridimensionalmente as isolinhas do somatório das áreas, ambas indicando a intensidade luminosa anual sobre a parede do fundo do ambiente estudado. Observa-se ainda na Figura 6.19 que a profundidade alcançada pela luz natural no ambiente simulado perde totalmente a iluminação na altura $\approx 1,25m$, comprometendo as habitabilidades ou estabelecendo a necessidade de gastos energéticos com a iluminação artificial para compensação luminosa interna. A indicação do complemento do fluxo luminoso por meio da iluminação artificial requer a análise aprofundada para obter adequação da iluminação no ambiente, considerando a luminância recomendada pela NBR, para cada atividade realizada.

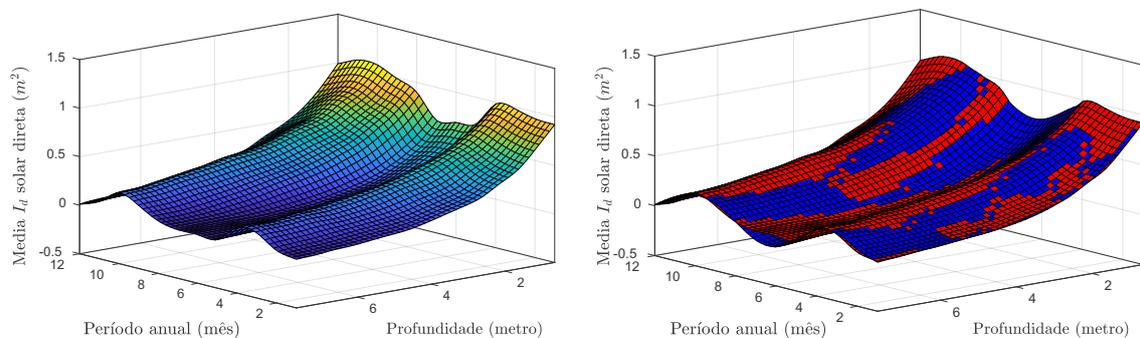


Figura 6.20 - Superfície $P \times P_a \times I_d$: a) superfície obtida em simulação e b) superfícies de simulação \times expressão otimizada.

Com o objetivo de encontrar a expressão que defina a melhor área de incidência luminosa direta, foram utilizadas as três variáveis: i) profundidade do ambiente P , ii) período anual (mês do ano) P_a e iii) área da incidência direta I_d . Estas variáveis foram mapeadas e estão apresentadas na Figura 6.20 a). De posse dos valores de $P \times P_a \times I_d$ foi implementado o processo de otimização para encontrar a expressão que relacione as três variáveis. Neste processo foi utilizado hibridização do algoritmo genético (AG) com método de Quase-Newton (QN). O AG foi configurado com população de 40 indivíduos, valor máximo de gerações $g_{max} = 100$, seleção por torneio, mutação uniforme e cruzamento heurístico. O valor da função de avaliação final foi de $f(x^*) = 0,082$, que indica que houve desvio entre os pontos das curva de dados mapeados e curva otimizada de $\approx 8,2\%$. A Figura 6.20 b) apresenta a superfície de dados obtidos da simulação (na cor vermelha) e a superfície obtida pela expressão otimizada (na cor azul), dada por:

$$f(P_a, P) = \begin{aligned} & [0,50 \cdot \sin(0,41 \cdot P_a + 0,24) + 0,44 \cdot P^{0,30}] + \\ & [0,99 \cdot P_a^{0,02} + 0,42 \cdot \sin(-0,70 \cdot P + 2,75)] + \\ & [-1,32 \cdot e^{(-0,48 \cdot P_a \cdot P)}] \end{aligned} \quad (6.1)$$

Os coeficientes a_i , b_i e c_i da expressão (5.1) foram encontrados utilizando o processo de otimização para formar a expressão (6.1). Os valores com todas as casas decimais destes coeficientes estão disposto no Apêndice A. Utilizando a expressão (6.1) e os valores de P e P_a é possível encontrar matematicamente os valores de I_d que extrapolam ou interpolam os valores simulados da profundidade P . Por exemplo, na interpolação, caso necessite de análise para o mês de julho $P_a = 7$ e $P = 4m$, $I_d \approx 0,94m^2$. Na extrapolação, por exemplo, para o mês de agosto $P_a = 8$ e $P = 8,5m$, $I_d \approx 0,5m^2$.

6.6 Estudo luminoso e térmico para aplicação da bioarquitetura

Todos os estudos realizados até o momento utilizou o software SketchUp. Neste sistema, cada orientação deve ser simulada separadamente e a coleta de dados das superfícies é realizada de forma manual, onerando o tempo utilizado em cada projeto. Com o objetivo de acelerar os estudos, adota-se o método de análise da incidência solar por meio da Carta Solar com projeção estereográfica para confrontar os dados obtidos com os dados coletados. Assim, simplifica-se a aplicação no estudo do fluxo

natural luminoso para o alcance da eficiência energética e análise do conforto térmico nas habitações residenciais.

Para a continuidade dos estudos são considerados: i) as mesmas orientações, iii) a mesma localidade e iv) o mesmo período de análise. É desconsiderado o amortecimento e o atraso da onda de calor dos materiais externos e internos. Nesta nova análise foi utilizada a Carta Solar simulada através do software Analysis Sol-Ar. A ferramenta possibilita estudo das projeções solares por meio de visualização gráfica e com indicação de: i) horário de insolação sobre superfícies horizontais e verticais, ii) representação das trajetórias solares projetadas no plano horizontal, iii) visualização de intervalos de temperatura anuais correspondentes às trajetórias solares ao longo do dia e do ano e iv) possibilidade de obtenção da rosa dos ventos para frequência de ocorrência dos ventos e velocidade média para cada estação do ano.

A Carta Solar permite simular: i) a incidência solar a partir da orientação, ii) o horários de incidência solar no equinócio e solstício, iii) a indicação das proteções solares e iv) a altura H e o azimute Az . A Figura 6.21 apresenta a Carta Solar para Latitude $16,40^{\circ}S$, que corresponde a Cidade de Goiânia, na qual a extrema direita está representado o nascer do Sol e a extrema esquerda está representado o pôr do Sol. Na Figura 6.21 os valores de **6** até **18**, na parte inferior e os valores de **7** até **17** na parte superior são indicativos das horas no decorrer do dia.

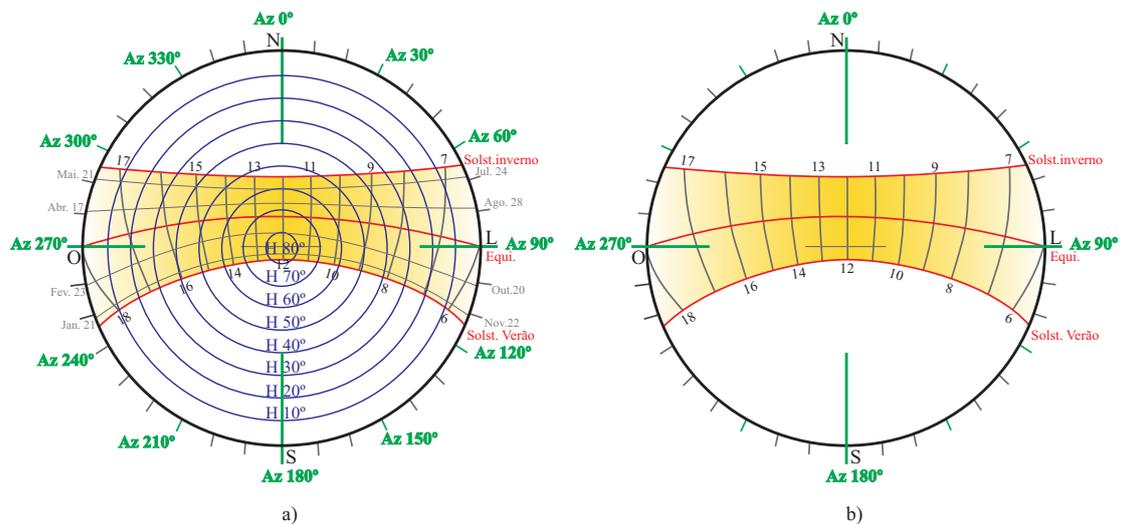


Figura 6.21 - Carta solar com projeção estereográfica para a latitude $16,40^{\circ}S$, plano horizontal: a) carta solar completa e b) carta solar simplificada.

Utilizando os dados obtidos para a localização $16,40^{\circ}S$, ao analisar o período da

incidência solar projetada em cada orientação, apresentada na Figura 6.22, observa-se que: i) há incidência solar em todas as orientações, ii) na orientação norte há incidência solar durante o ano todo, predominância dos equinócios e do solstícios, iii) na orientação sul há incidência solar no amanhecer e no entardecer, com predominância do solstício de verão, iv) na orientação leste há registro de incidência solar somente no período matutino nos equinócios e nos solstícios e v) na orientação oeste há registro de incidência solar somente no período vespertino nos equinócios e nos solstícios.

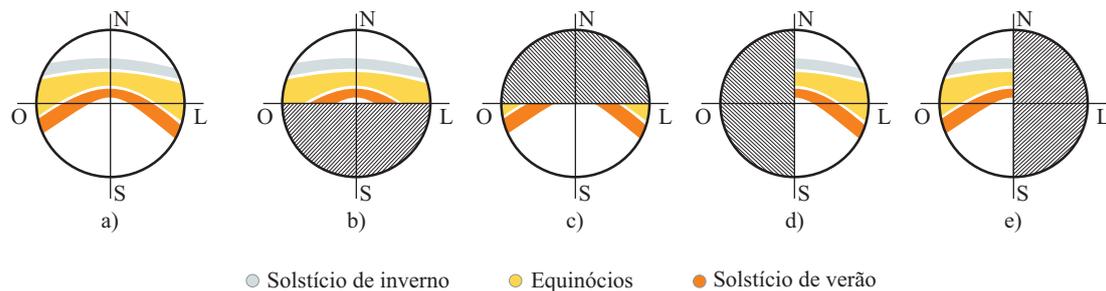


Figura 6.22 - Análise da incidência solar predominante em cada orientação a partir da carta solar: a) carta solar completa, b) orientação norte, c) orientação sul, d) orientação leste e e) orientação oeste.

Na utilização do software Analysis Sol-Ar foram considerados os parâmetros: i) Latitude $16,40^{\circ}S$, iii) ângulo de referência interno (concepção de elementos de proteção solar), iv) ativação do campo da representação da trajetória solar e do transferidor, v) campo de orientação com Az em relação ao norte (o ângulo inserido é computado somente no sentido horário e os valores negativos não são compreendidos pelo software) e vi) determinação dos ângulos para a máscara de sombreamento para o qual o período da insolação é indesejado. A Figura 6.23 apresenta a interface de configuração do Software Sol-Ar. O parâmetro de controle da proteção solar é realizado pelas configurações das máscaras solares: i) ângulo α que é o medidor de ângulos verticais frontais, representando os protetores horizontais, ii) ângulo β que é o medidor de ângulos horizontais, representando os protetores verticais e iii) ângulo γ que é o medidor de ângulos verticais laterais, representando os protetores verticais e horizontais.

Primeiramente é realizada análise sem a adição de proteção solar nas aberturas, observa-se que ao traçar linhas retas na carta solar, ortogonal a $Az = 45^{\circ}$, $Az = 135^{\circ}$, $Az = 225^{\circ}$ e $Az = 315^{\circ}$, é possível na intercepção destas linhas, projetar a trajetória solar nas fachadas, indicando os horários de incidência solar correspon-

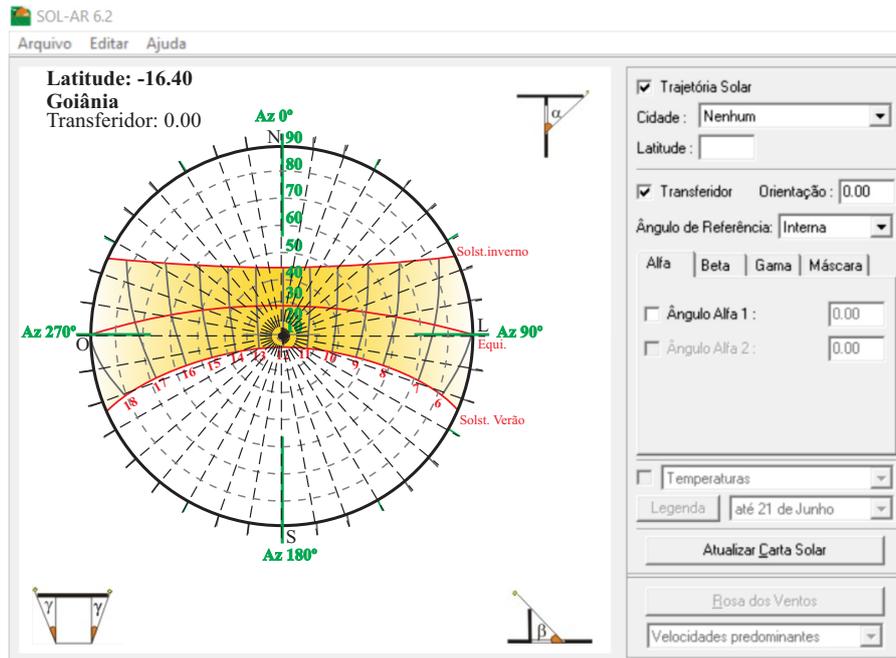


Figura 6.23 - Interface do software Analysis Sol-Ar e indicação dos ângulos α , β e γ .

dentes ao solstício de verão, solstício de inverno e equinócios, como disposto na Tabela 6.2 e apresentado na Figura 6.24.

Tabela 6.2 - Incidência solar para a localização $16,40^{\circ}S$ nos azimutes: a) $Az = 45^{\circ}$, b) $Az = 135^{\circ}$, c) $Az = 225^{\circ}$ e d) $Az = 315^{\circ}$.

Fachada	Solst. de inverno	Equinócios	Solst. de verão
Nordeste $Az = 45^{\circ}$	até às 14:30h	até às 13:00h	até às 11:30h
Sudeste $Az = 135^{\circ}$	até às 09:30h	até às 11:00h	até às 12h:30
Sudoeste $Az = 225^{\circ}$	após às 14:30h	após às 13:00h	após às 11:30h
Noroeste $Az = 315^{\circ}$	após às 09:30h	após às 11:00h	após às 12:30h

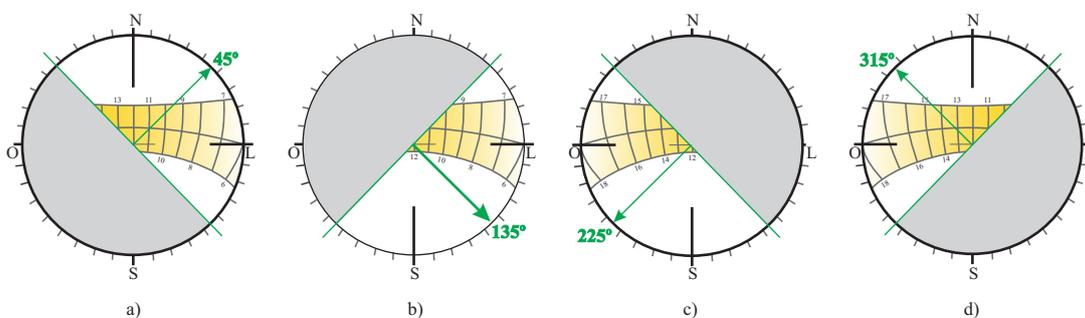


Figura 6.24 - Simulação da incidência solar nos azimutes: a) $Az = 45^{\circ}$, b) $Az = 135^{\circ}$, c) $Az = 225^{\circ}$ e d) $Az = 315^{\circ}$.

De posse dos resultados, analisa-se a incidência solar em determinada residência utilizando a carta solar. A residência analisada contém dois dormitórios, sala, cozinha e banheiro, como apresentado na Figura 6.25. Para realizar a simulação na carta solar é necessário: i) sobrepor a fachada da planta baixa no eixo central da carta solar, ii) manter o ângulo da fachada direcionando-o a abertura para o azimute da carta solar, iii) registrar o horário de incidência solar nas aberturas, iv) registrar a temperatura da incidência solar na fachada e iv) registrar a radiação direta normal.

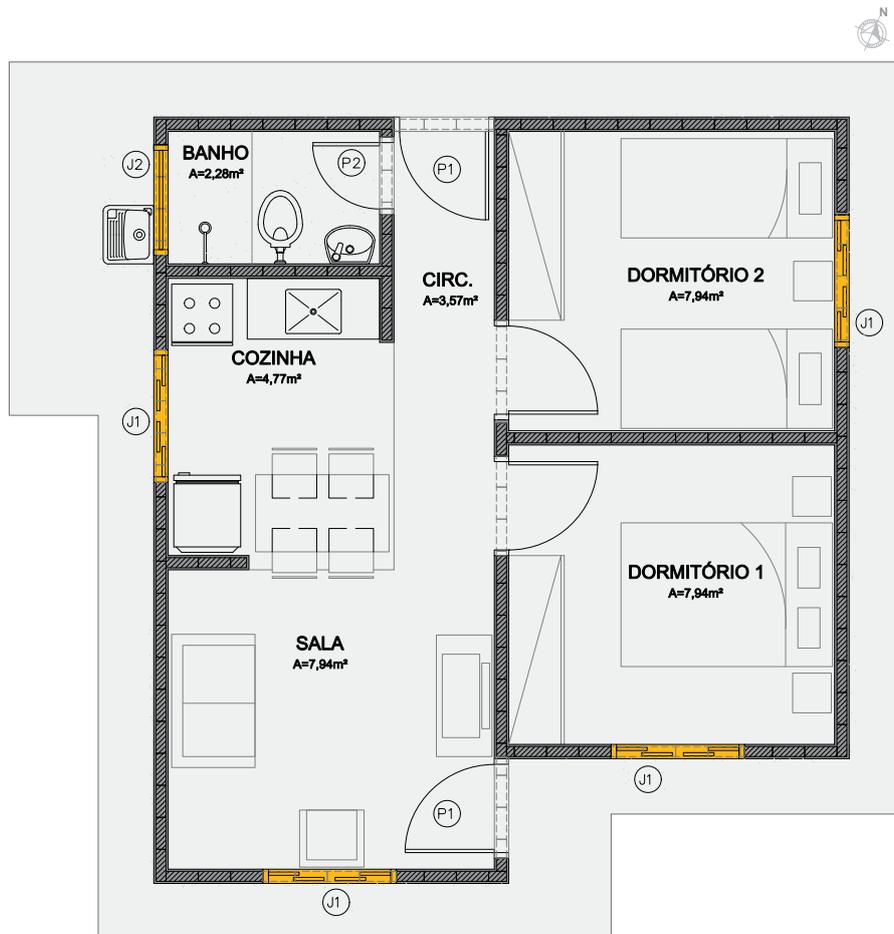


Figura 6.25 - Planta baixa residencial utilizada na simulação.

Utilizando a planta baixa residencial da Figura 6.25 na Carta Solar com a fachada direcionada para o $Az = 70^\circ$, correspondente à orientação nordeste, a abertura da fachada é no ambiente Dormitório 2 e os dados de incidência solar foram registrados nos horários: i) até às 13:00h no solstício de inverno, ii) até às 12:30h nos equinócios e iii) até às 11:30h no solstício de verão, como apresentado na Figura 6.26. Os registros apontam predominância solar somente no período matutino com temperaturas de

bulbo seco (TBS) no solstício de inverno que registram: i) temperaturas inferiores à 10°C do nascer do sol até as 08:00h, ii) das 08:00h às 10:30h com temperaturas superiores de 10°C e inferiores à 14°C e iii) das 10:30h às 13:00h com temperaturas superiores de 20°C e inferiores à 25°C .

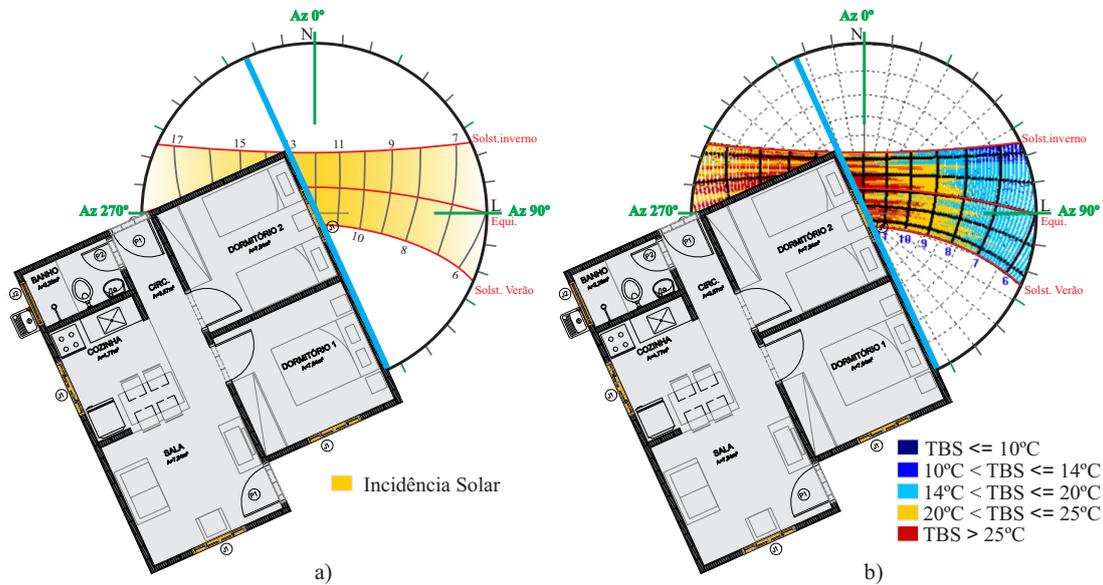


Figura 6.26 - Incidência solar para $Az = 70^{\circ}$, correspondente à orientação nordeste: a) registros dos horários de incidência solar nas aberturas e b) registros das temperaturas de bulbo seco.

Ainda para o $Az = 70^{\circ}$, as TBS nos equinócios registram: i) temperaturas superiores de 10°C e inferiores à 14°C do nascer do sol até às 08:00h, ii) das 08:00h às 10:00h com temperaturas superiores à 20°C e inferiores à 25°C e iii) das 10:00h às 12:30h registram temperaturas superiores de 25°C . No solstício de verão registram: i) temperaturas acima de 10°C e inferiores à 14°C do nascer do sol até às 07:30h e ii) das 07:30h às 11:30h com temperaturas superiores de 20°C e inferiores à 25°C .

Direcionando as aberturas da fachada para $Az = 150^{\circ}$, orientação sudeste, os ambiente Dormitório 1 e ambiente Sala fazem parte da fachada analisada. Os dados de incidência solar são registrados nos horários: i) até às 07:00h no solstício de inverno, ii) até às 10:00h nos equinócios e iii) até às 13:00h no solstício de verão, como apresentado na Figura 6.27. Os registros apontam predominância solar somente no período matutino com as TBS no solstício de inverno registrando temperaturas inferiores à 10°C do nascer do sol até as 07:00h.

Ainda para o $Az = 150^{\circ}$, as TBS nos equinócios registram: i) temperaturas supe-

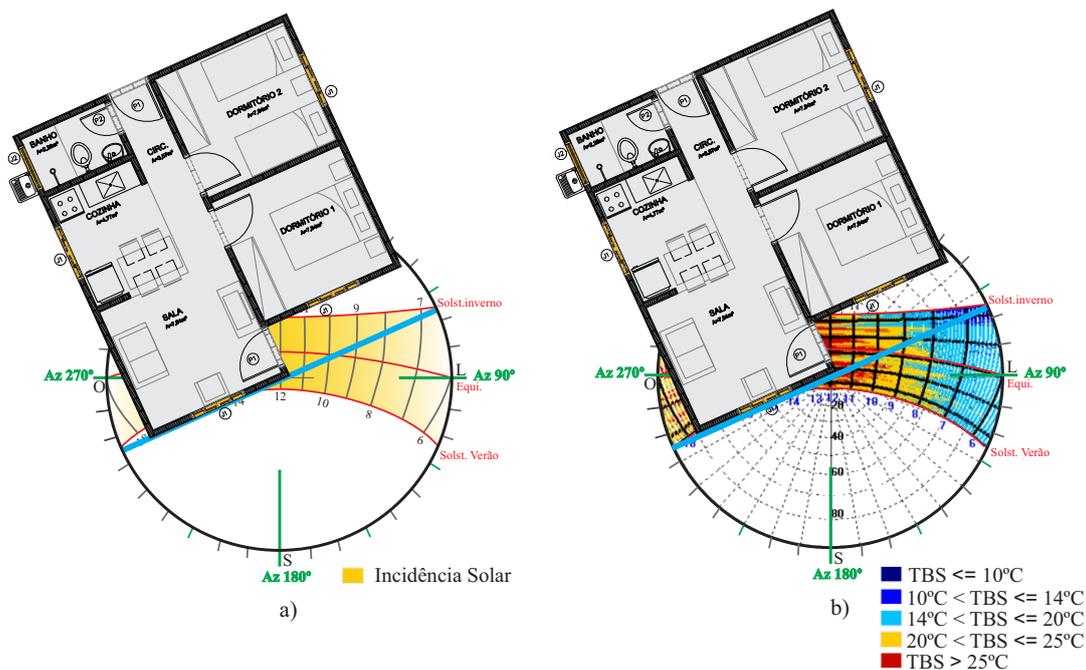


Figura 6.27 - Incidência solar para $Az = 150^\circ$, correspondente à orientação sudeste: a) registros dos horários de incidência solar nas aberturas e b) registros das temperaturas de bulbo seco.

riores à $10^\circ C$ e inferiores à $14^\circ C$ do nascer do sol até as 08:00h e ii) das 08:00h às 10:00h com temperaturas superiores à $20^\circ C$ e inferiores à $25^\circ C$. As TBS no solstício de verão registram: i) temperaturas superiores à $10^\circ C$ e inferiores à $14^\circ C$ do nascer do sol até às 07:30h, ii) das 07:30h às 10:30h com temperaturas superiores à $20^\circ C$ e inferiores à $25^\circ C$ e iii) das 10:30h às 13:00h com temperaturas superiores à $25^\circ C$.

As aberturas da fachada voltadas para $Az = 240^\circ$, orientação sudoeste, contêm os ambiente Cozinha e ambiente Banho, como apresentado na Figura 6.28. Os dados de incidência solar destes ambientes são registrados nos horários: i) após às 13:30h no solstício de inverno, ii) após às 12:30h nos equinócios e iii) após às 11:30h no solstício de verão. Os registros apontam predominância solar somente no período vespertino com TBS no solstício de inverno e solstício de verão superiores à $20^\circ C$ e nos equinócios as temperaturas registradas predominam as superiores à $25^\circ C$.

No $Az = 330^\circ$, orientação noroeste, não possui aberturas na fachada, no entanto, observa-se que as temperaturas nesta fachada, apresentadas na Figura 6.29, são elevadas. Observa-se que as TBS no solstício de inverno registram: i) temperaturas inferiores à $10^\circ C$ do nascer do sol até as 08:00h, ii) das 08:00h às 10:30h com temperaturas superiores à $10^\circ C$ e inferiores à $14^\circ C$ e iii) das 10:30h até o por do

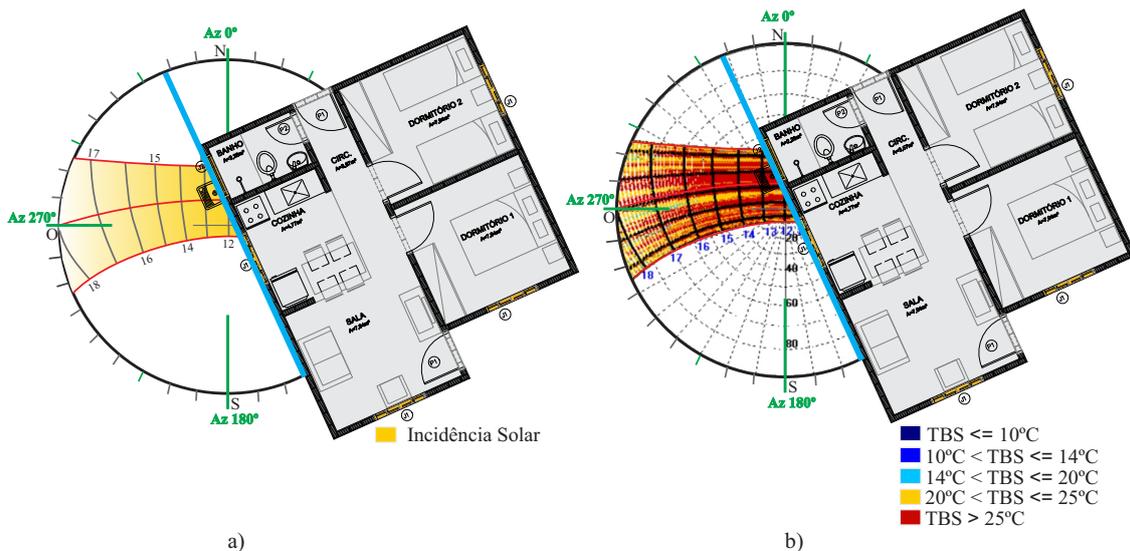


Figura 6.28 - Incidência solar para $Az = 240^\circ$, correspondente à orientação sudoeste:
 a) registros dos horários de incidência solar, b) registros das temperaturas de bulbo seco.

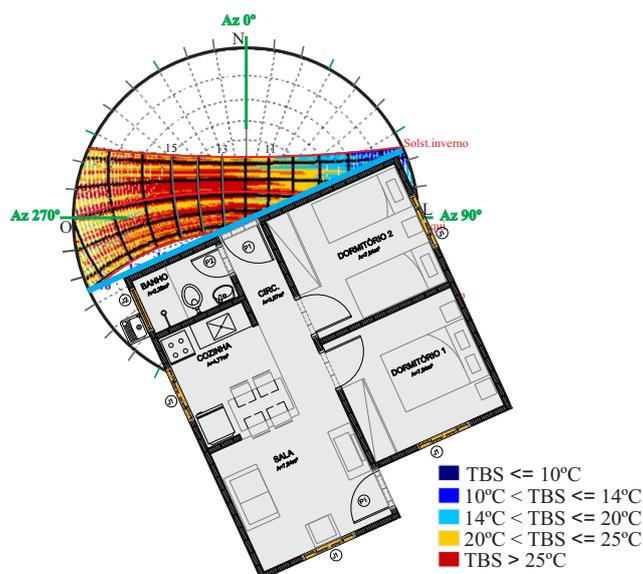


Figura 6.29 - Registros das temperaturas de bulbo seco da incidência solar no $Az = 330^\circ$ correspondente à orientação noroeste.

sol registram temperaturas superiores à $20^\circ C$. As TBS nos equinócios registram:
 i) das 10:00h até o por do sol temperaturas superiores à $25^\circ C$ e no solstício de verão registram temperaturas superiores à $20^\circ C$ das 14:00h até o por do sol.

6.6.1 Conforto térmico humano e estratégias de controle

Para impedir que a radiação solar atinja excessivamente no ambiente em determinadas épocas e horários, é essencial o monitoramento das atividades executadas no ambiente relacionando-as com o estudo solar. Desta forma, obtendo melhor aproveitamento da incidência do fluxo luminoso e promoção da eficiência energética. A determinação do tipo e dimensão do dispositivo de proteção solar é realizada em função da eficácia desejada, podendo ser explorada e/ou evitada.

Para análise simplificada da incidência solar nos ambientes residenciais apresentados na Figura 6.25, foi realizada simulação individual, possibilitando ao profissional arquiteto ferramenta simples para ser implementada no desenvolvimento do projeto, considerando as definições funcionais e plásticas da arquitetura. Na análise dos ambientes **Dormitório 1** e **Dormitório 2**, apresentados nas Figura 6.30 e Figura 6.31, respectivamente, observa-se que o uso do ambiente possui característica diferenciada, classificado como ambiente de permanência transitória, ou seja, ambientes de uso de curtos períodos de tempo durante o dia, para permanência prolongada no período noturno. Foram identificadas que na orientação norte e oeste apresentam-se incidência solar intensa registrada predominantemente no período vespertino, tornando o ambiente aquecido no período noturno. Sugere-se que os dormitórios, preferencialmente sejam direcionados suas aberturas para orientação leste ou sul, ou de outra forma, que se adote proteções solares para evitar o aquecimento interno do ambiente.

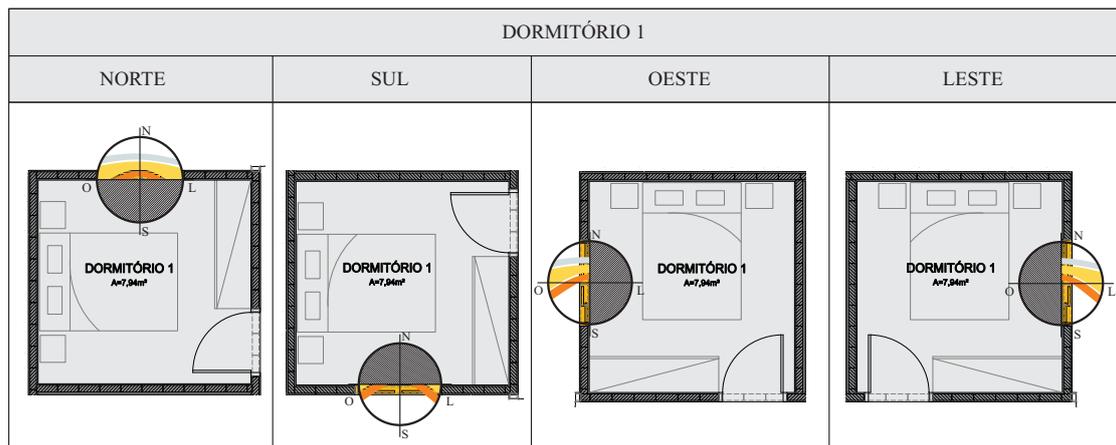


Figura 6.30 - Análise da incidência solar no ambiente Dormitório 1.

O ambiente **Sala** é classificado como de permanência prolongada. Identifica-se que na orientação leste e sul a incidência solar direta é registrada no período matutino e no

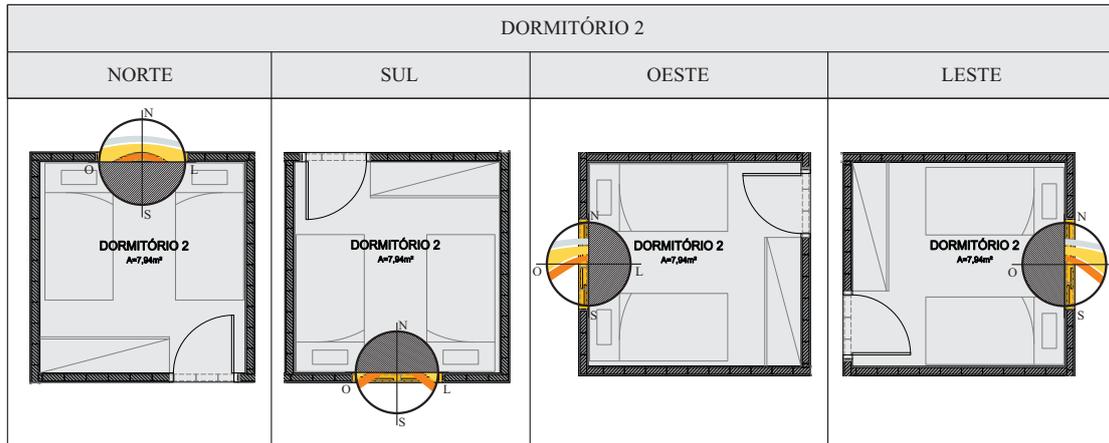


Figura 6.31 - Análise da incidência solar no ambiente Dormitório 2.

final do período vespertino, o que favorece a utilização do ambiente, como ilustrado na Figura 6.32. No entanto, se caso o ambiente for direcionado à orientação norte e oeste deve-se adotar mecanismos de proteção solar das aberturas.

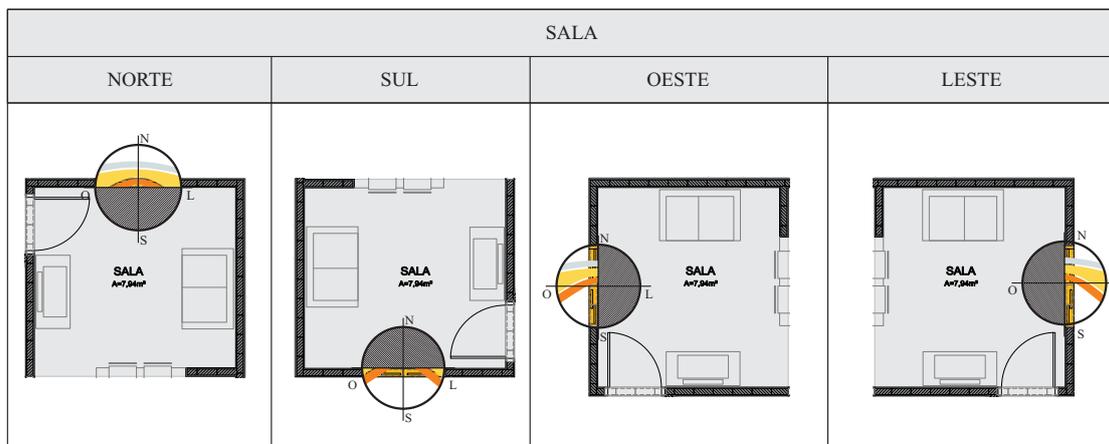


Figura 6.32 - Análise da incidência solar no ambiente Sala.

No projeto arquitetônico as áreas molhadas, correspondentes aos ambientes **Cozinha**, **Banheiro** e **Área de Serviço**, apresentada na Figura 6.33, geralmente são agrupados para minimizar os custos com tubulações hidráulicas. São ambientes classificados como de permanência transitória. No entanto, geralmente, no planejamento dos ambientes, a setorização dos serviços da residência conecta com o setor íntimo e social, tornando o espaço essencial para o condicionamento do conforto térmico da edificação. A análise do ambiente **Banheiro**, classificado como de permanência

transitória não requer atenção para a incidência, pelo contrário, quanto mais luz e sol adentrar ao ambiente, mais salubre será o espaço.

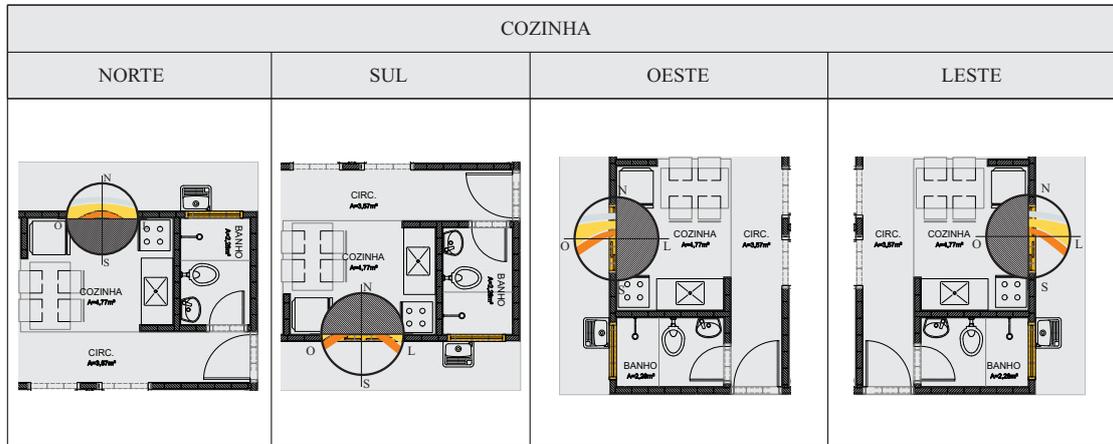


Figura 6.33 - Análise da incidência solar no ambiente Cozinha.

Na análise do comportamento do fluxo luminoso, Figura 6.18, é apresentado os dados da média anual da área da incidência solar \times a profundidade. Observa-se nesta análise que quanto menor a profundidade do ambiente maior é a área de incidência solar e consequentemente, maior é o aumento das cargas térmicas que penetram o ambiente interno. Desta forma, a falta da análise do comportamento do fluxo luminoso pode comprometer a habitabilidade ou estabelecer necessidade de gastos energéticos com a climatização artificial para compensação térmica interna.

Para os ambientes que necessitam do controle da incidência solar, adotou-se a instalação de proteção solar. O quebra-sol (*brise-soleil*), conhecido como brise-soleil, utilizados nas disposições: i) horizontal, ii) vertical e iii) grelha (horizontal e vertical concomitantemente), instaladas com o intuito de minimizar os ganhos de calor no ambiente, podendo ser elementos fixos ou articuláveis, além apresentar ampla possibilidades construtivas e plásticas para adequar a função e a arquitetura da edificação. Para análise da implantação dos *brises*: i) verticais foi realizada o estudo por meio das representação do projeto arquitetônico e ii) horizontais foi necessário o estudo das representação dos cortes arquitetônicos da edificação.

Foi simulado a instalação de proteções solares na abertura do ambiente **Dormitório 1**, nas orientações cardeais leste, norte, oeste e sul. Partindo do princípio que se pretende proteger em relação ao sol incidente no ambiente, é necessário: i) representar as proteções verticais na abertura, ii) definir o ângulo de proteção e iii) rebater

os ângulos encontrados na máscara solar. Observa-se que nas aberturas direcionadas à orientação leste e oeste, apresentadas nas Figura 6.34 e Figura 6.35, respectivamente, a proteção solar torna-se ineficiente tendo em vista que não inibe a incidência solar direcionada no ambiente simulado.

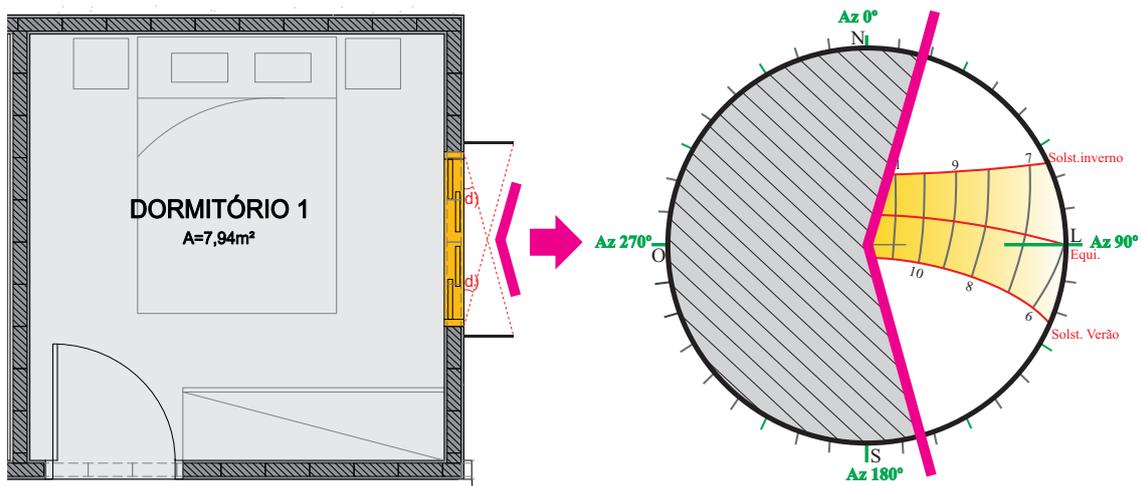


Figura 6.34 - Estudo da proteção solar vertical na orientação leste, ambiente Dormitório 1.

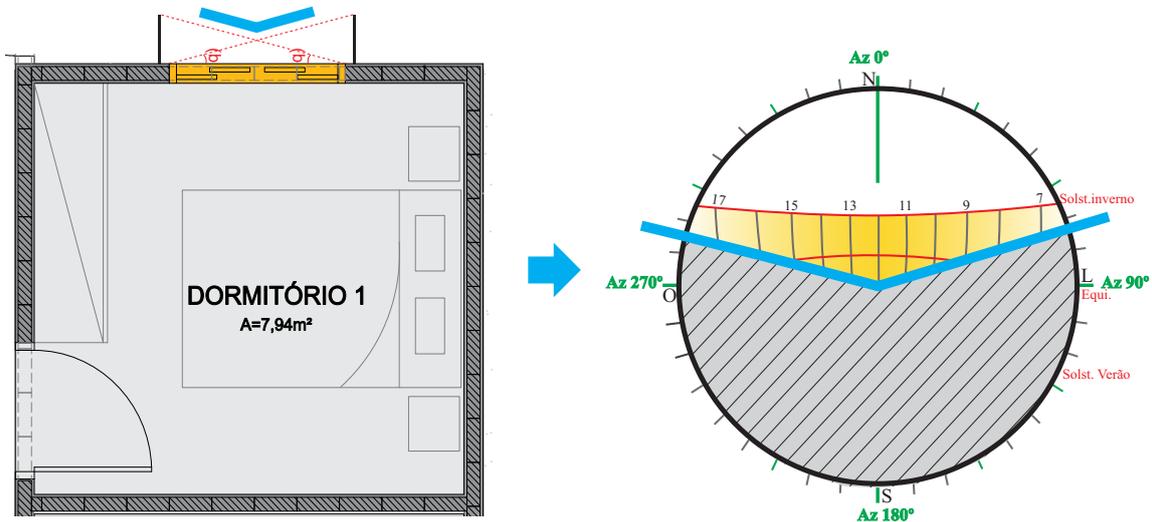


Figura 6.35 - Estudo da proteção solar vertical na orientação norte, ambiente Dormitório 1.

Direcionando a abertura à orientação norte e sul, apresentadas nas Figura 6.36 e Figura 6.37, respectivamente, a proteção solar vertical torna-se eficiente, no entanto,

devido a intensa incidência solar na orientação norte é necessário aumento da proteção para minimizar os ganhos térmicos no ambiente. Deve-se atentar para a utilização do espaço e quais horários faz-se necessário a exploração e/ou impedimento da incidência solar direta neste ambiente.

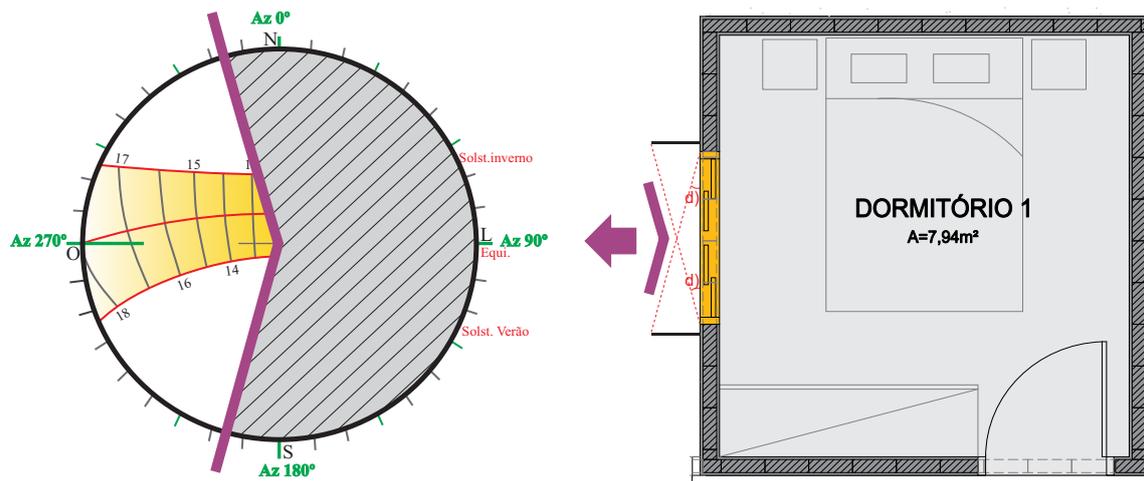


Figura 6.36 - Estudo da proteção solar vertical na orientação oeste, ambiente Dormitório 1.

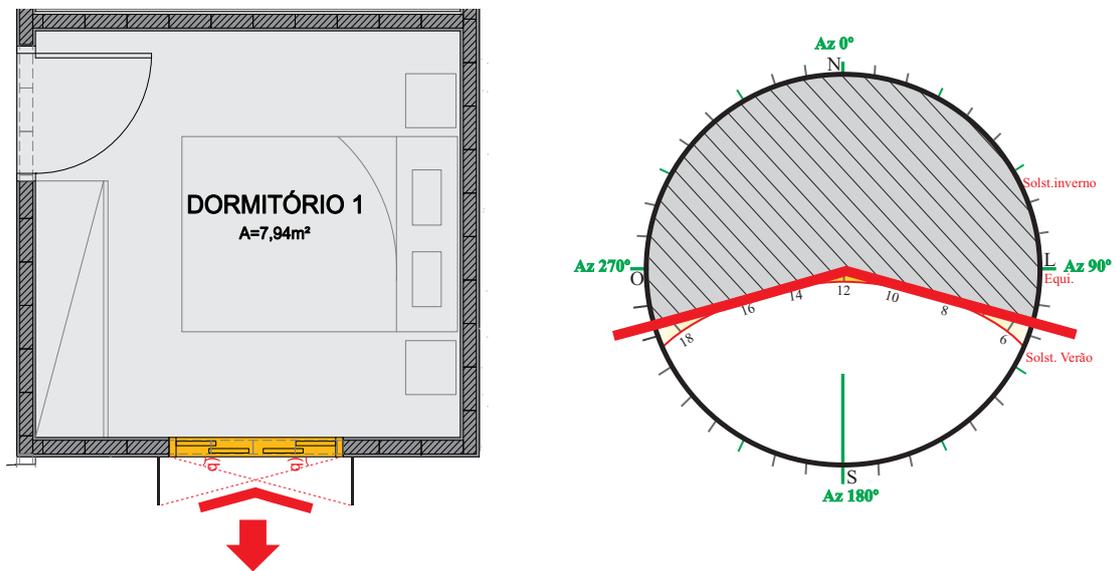


Figura 6.37 - Estudo da proteção solar vertical na orientação sul, ambiente Dormitório 1.

6.7 Discussão

Conhecer os espaços e suas ambiências, considerando as variáveis climáticas, tecnológicas e biológicas é romper com as questões meramente plásticas da arquitetura e incorporar ao projeto arquitetônico, desempenho, conforto, eficiência e economia. A adoção dos elementos que promovem o conforto térmico e eficiência energética devem ser incorporados desde o processo de concepção inicial da proposta projetual, integrando as estratégias da bioarquitetura na plástica arquitetônica.

Dentre os resultados apresentados pelo desenvolvimento deste trabalho, o principal foi estimular os questionamentos dos rumos atuais da arquitetura brasileira. Frequentemente os projetistas ignoram as condições do ambiente externo, interno, dos usuários e de suas atividades, gerando conseqüentemente, redução da zona de conforto térmico, lumínico, aumento do consumo de energia elétrica e dos impactos ambientais. Para proporcionar a compreensão do trabalho desenvolvido, foram realizadas duas etapas de análises da aplicação da bioarquitetura residencial com foco na promoção do conforto e da eficiência energética por meio do estudo do fluxo natural luminoso e do conforto térmico.

Inicia-se o trabalho com a análise do comportamento do fluxo natural luminoso em cada superfície das orientações cardeais e colaterais em ambiente hipotético na qual foi estabelecida as definições das variáveis de simulação externas e internas. Observa-se os valores obtidos por superfície e total, na qual identifica-se que na superfície da parede direita na orientação nordeste e orientação oeste apresentam as maiores médias da área de incidência solar anual e a orientação sul apresenta a menor área média. Para a parede esquerda, a orientação noroeste e orientação leste apresentam as maiores médias da área de incidência solar anual e na orientação sudoeste não há incidência solar durante todo ano.

Na superfície da parede do fundo a maior média da área da incidência solar ocorre na orientação oeste e na orientação norte, orientação sul, orientação sudoeste e orientação sudoeste não há incidência solar durante todo ano. Para a superfície do piso, a maior incidência solar ocorre na orientação oeste e orientação leste, na orientação sul ocorre a menor média da área de incidência nesta superfície.

Com a simulação da projeção da incidência solar no ambiente, foi possível identificar que a orientação oeste é a que apresentou a maior média da área de incidência solar anual na área em estudo. Os valores das áreas de todas as superfícies internas na orientação oeste, recebeu o fluxo luminoso em cada profundidade analisada, na qual

é observado que: i) quanto maior a profundidade menor é a área da incidência solar projetada, ii) simetria do comportamento da área da incidência solar, iii) março, abril, setembro, outubro, novembro e dezembro são os meses de maior incidência solar e iv) maio, junho e julho são os meses que apresentaram as menores áreas de incidência solar.

O levantamento dos dados do comportamento do fluxo luminoso da área da incidência solar anual projetada no ambiente foi fundamental para o desenvolvimento da expressão de simulação da incidência solar no ambiente com dimensão da profundidade variável. Isso permite que o projetista possa conceber e simular por meio da expressão matemática, dimensionando a profundidade dos ambientes ideais para cada orientação, proporcionando espaços eficientes.

Os resultados alcançados por meio da aplicação da carta solar permite, de forma simplificada, identificar a predominância da incidência solar projetada nas orientações e correlacioná-las com as atividades peculiares exercidas em cada ambiente. Isso permite ao projetista, durante o processo de concepção plástica e funcional da edificação, incorporar as estratégias da bioarquitetura tornando o ambiente mais eficiente e com maior conforto térmico aos seus usuários.

A análise do comportamento solar, principalmente nas localidades onde o clima é predominantemente quente, é fundamental, pois o projetista deve atentar-se na análise das orientações das aberturas e no estabelecimento de quais horários a incidência solar irá ser explorada e/ou impedida de penetrar ao ambiente. As maiores dificuldades neste trabalho foram: i) ausência de plataforma integrada para a simulação e coleta das informações do comportamento solar por meio de Software de modelagem 3D e ii) automação da coleta da área de incidência solar projetada no ambiente.

Dos possíveis equívocos cometidos na execução do trabalho o principal foi pela utilização de Software sem interface de coleta dos dados da área solar projetada no ambiente de forma automática. Não necessariamente é considerado como um erro, mas a adoção do Software utilizado despendeu tempo para registrar manualmente todas as áreas projetadas em cada superfície e isso dificultou a aplicação em outra localidade com o intuito de confrontar os dados coletados.

Sugere-se aos pesquisadores que procuram aprofundar a análise apresentada neste trabalho: i) utilizar a Carta bioclimática para promoção do equilíbrio do conforto térmico no ambiente, ii) equações de equilíbrio térmico, iii) aplicação das estratégias de controle/proteção solar, horizontais, verticais e/ou com automação, nas edifica-

ções e iv) análise comparativa dos dados simulados com protótipo do ambiente e equipamentos de coleta dos registros reais de incidência solar.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

A questão energética constitui um dos maiores desafios da atualidade, e consequentemente é nas edificações os maiores percentuais de consumo de energia. No Brasil, onde o clima é predominantemente quente, o projetista deve atentar-se para a análise do comportamento solar, explorando ou evitando na concepção arquitetônica, plástica e funcional.

O desenvolvimento deste trabalho promove o questionamento dos rumos adotados pelos projetistas no âmbito da bioarquitetura brasileira, partindo do princípio que, em muitas vezes a concepção arquitetônica plástica é priorizada, deixando as estratégias da bioarquitetura, como o conforto térmico, eficiência energética e até mesmo os elementos funcionais da edificação, para solucionar após sua ocupação. Mesmo com o estabelecimento das estratégias pós ocupação, são soluções que não visam a eficiência energética e economia, gerando altos custos de manutenção da edificação e da promoção do conforto térmico interno.

Diante do exposto, explora-se neste trabalho a análise do comportamento do fluxo luminoso a partir dos dados de simulação tratados/ordenados em ambiente hipotético, considerando as condições climáticas do local de estudo. Realiza-se simulação da área de incidência solar média mensal em cada superfície do ambiente. A coleta dos valores de área de incidência média anual possibilitou a indicação das orientações que recebem maiores e menores incidências solar no ambiente. Os dados de simulação apresentam que as **orientação oeste** $A_{isma} = 33,0m^2/ano$, **orientação leste** $A_{isma} = 32,7m^2/ano$, **orientação nordeste** $A_{isma} = 24,7m^2/ano$, **orientação noroeste** $A_{isma} = 23,3m^2/ano$ e na **orientação sul** $A_{isma} = 2,1m^2/ano$ correspondendo a menor média da área de incidência solar anual.

Da análise da incidência solar no ambiente de estudo, seleciona-se a orientação com maior média anual de incidência solar, correspondendo a orientação oeste, e relaciona-se com a análise da profundidade do ambiente em porção de $0,5m$, iniciando com a profundidade máxima do ambiente de $7,66m$ até atingir a profundidade mínima de $0,66m$. Os dados coletados pela simulação permitiu, por meio da expressão matemática, sintetizar os coeficientes das simulações das áreas de incidência solar média mensal em relação a profundidade do ambiente. A elaboração da expressão traz inovação à sociedade e contuibuição no desenvolvimento científico no âmbito da arquitetura, eficiência energética e da bioarquitetura, pois permite ao projetista de

forma simplificada simular a profundidade ideal para promover, explorar ou evitar a incidência gerando economia e conforto térmico interno das edificações residenciais.

Aplicando a Carta Solar realiza-se de forma simplificada e lúdica a identificação das orientações que recebem a incidência considerando os equinócios e solstícios. Permite a compreensão da utilização do ambiente em relação à incidência solar interna, favorecendo ao projetista de forma simplificada a análise da bioarquitetura no ambiente idealizado. Além disso, este estudo permite realizar a análise da implantação de proteções solares nas aberturas, considerando quais horários deve-se explorar ou evitar a incidência solar direta ou indireta.

Uma das principais dificuldades encontradas no desenvolvimento deste trabalho foi o levantamento do referencial teórico da análise do fluxo natural luminoso, térmico e dos conceitos da bioarquitetura. Vários são os trabalhos desenvolvidos, no entanto, são tratados de forma separadas e com métodos empíricos, obtendo números elevados de soluções com critérios multiobjetivos e em várias vezes, sem aplicação prática na bioarquitetura/arquitetura, ou seja, o projetista diante da concepção arquitetônica, plástica e funcional não consegue incorporar as estratégias da bioarquitetura nos projetos.

Portanto, conclui-se que este trabalho realizou investigação da interferência solar nas edificações, propôs processo para otimizar a eficiência energética das habitações residenciais e promoveu o questionamento dos rumos adotados pelos projetistas no âmbito da bioarquitetura. Realizou simulações computacionais utilizando softwares para analisar os fluxos luminosos e térmicos das residências, indicando que para o local estudado, as orientações oeste, leste e nordeste têm as maiores áreas médias de incidência solar. Na análise, foi observado que as aberturas direcionadas para as orientações de maior área de incidência solar são os ambientes mais quentes, requerendo equipamentos para a promoção do conforto térmico. Foram indicadas as melhores orientações solares para proporcionar aumento da eficiência energética, economia, redução do consumo de recursos naturais, melhoria da qualidade de vida, promoção da preservação do meio ambiente e melhor aproveitamento luminoso e térmico.

7.1 Contribuições do trabalho

As contribuições deste trabalho para a sociedade são:

- Estimular os questionamentos dos rumos atuais da arquitetura brasileira

por meio da aplicação da bioarquitetura;

- Demonstrar a viabilidade da aplicação da incidência solar na promoção da eficiência energética e do conforto térmico em habitações;
- Simplificar a aplicação da bioarquitetura na concepção inicial do projeto;

As contribuições científicas através das publicações de artigos nos anais de eventos internacionais:

- 1- Tsuruda, L. K., Alves, A. J., **Vitor, L. R.**, Souza, M. B, e Calixto, W. P. Evaluations of energy efficiency and economic impact of the application of retrofit lighting in popular housing. In: Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), 2017 CHILEAN Conference on. IEEE, 2017.
- 2- Tsuruda, L. K., **Vitor, L.R**, Salles, D. M., Alves, A. J., Souza, M. B. S., e Calixto, W. P. Energy efficiency, rationalization of energy and water consumption in popular houses. In: Electric Power Engineering (EPE), 2017 18th International Scientific Conference on. IEEE, 2017. p. 1-6.
- 3- Tsuruda, L. K., **Vitor, L.R**, Souza, M. B. S., Reis, M. R. C., Fonseca V. P. Y., Calixto, W. P. Evaluation of technologies to reduce energy and water consumption in popular housing. International Conference on Environment and Electrical Engineering, Palermo, Itália, 2018.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

- a) Remodelar a expressão matemática incluindo mais uma variável, a posição geográfica, fundamental para a análise da incidência solar na edificação;
- b) Monitoramento solar utilizando duas regiões do planeta, com o intuito de realizar análise geral dos resultados obtidos nas duas localidades confrontando-as e identificando os principais parâmetros para a aplicação da bioarquitetura nas duas localidades;
- c) Aplicação da Carta bioclimáticas para análise da promoção do conforto térmico, eficiência energética e economia nas habitações, permitindo a explorar ou evitar a incidência solar na concepção arquitetônica, plástica e funcional das residências;

- d) Desenvolver ferramenta computacional com o intuito de condensando os resultados coletados e otimizar, indicando as melhores estratégias para a aplicação da bioarquitetura nas residências e promoção do conforto térmico.

APÊNDICE A

COEFICIENTES DA EXPRESSÃO

Tabela A.1 - Coeficientes a_i , b_i e c_i da expressão.

Coeficiente	Área da Incidência Solar
a_1	0,505029759
a_2	0,417194928
a_3	0,246721922
a_4	0,441180115
a_5	0,303339832
b_1	0,994944612
b_2	0,020920101
b_3	0,422107288
b_4	-0,705192772
b_5	2,759482547
c_1	-1,323164915
c_2	-0,489809211
a_6	-0,089696536
a_7	0,991516063
a_8	1,21594555
a_9	-0,230660656
a_{10}	-0,009888571
b_6	0,001004521
b_7	-6,21948343
b_8	0,694398596
b_9	-0,276978383
b_{10}	0,193909551
c_3	0,374580094
c_4	-0,010932415

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, N. 5413: Iluminância de interiores. **Rio de Janeiro**, 1992. 42
- _____. 15215: Iluminação natural. **Rio de Janeiro**, 2005. 43
- _____. 15220: Desempenho térmico de edificações. **Rio de Janeiro**, 2005. 54
- _____. 15575: Partes 1-6: Desempenho de edifícios habitacionais. **Rio de Janeiro**, 2013. 25, 43, 50
- ADAM, R. S. Ecoedifício: Interação entre ecologia, consciência e edifício. **São Paulo: Aquariana Ltda**, 2001. 38
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas da Energia Elétrica no Brasil**. Brasília, 2008. 39
- AGUIRRE, L. A. **Introdução à identificação de sistemas –Técnicas lineares e não lineares aplicadas a sistemas reais**. [S.l.]: Editora, Universidade Federal de Minas Gerais, 2004. 62
- ALBERTI, L. B. **De re aedificatoria**. [S.l.]: Ediciones Akal, 1991. 36
- ALVES, H. F. N. **Eficiência energética em edifícios da Lipor I**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2011. 27
- ARAJO, W. R.; REIS, M. R.; CALIXTO, W. P.; WAINER, G. A.; MAGALHES, A. S.; GOMES, F. A. Nonlinear simulation methodology for switched reluctance machine using induction profile found by parametric regression. In: IEEE. **2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)**. [S.l.], 2017. p. 1–8. 66
- ARMSTRONG, R.; SPILLER, N. Synthetic biology: Living quarters. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 467, n. 7318, p. 916, 2010. 34, 37
- ASHRAE, F. Ashrae handbook. **IP Editions**, 2005. 52
- BADIDA, M.; KRÁLIKOVÁ, R.; LUMNITZER, E. Modeling and the use of simulation methods for the design of lighting systems. **Acta Polytechnica Hungarica**, v. 8, n. 2, p. 91–102, 2011. 51

BAJCINOVCI, B.; JERLIU, F. Achieving energy efficiency in accordance with bioclimatic architecture principles. **Environmental and Climate Technologies**, De Gruyter Open, v. 18, n. 1, p. 54–63, 2016. 39

BANKS, J. **Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1998. 63

BASS, M. **Handbook of Optics, vol. II 2nd Ed., Ch. 8**. [S.l.]: McGraw Hill, New York, 1995. 49

BASTOS, E. A. Otimização de seções retangulares de concreto armado submetidas à flexo-compressão oblíqua utilizando algoritmos genéticos. **Rio de Janeiro, RJ**, 2004. 63

BEAR, A.; BELL, R. The csp index: A practical measure of office lighting quality as perceived by the office worker. **Lighting Research & Technology**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 24, n. 4, p. 215–225, 1992. 51

BESUIEVSKY, S. G. **Cálculo da iluminação em síntese de imagens através de ray-tracing estocástico**. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Física, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 1992. 49

BLASER, W. **Mies Van Der Rohe: Less is more**. [S.l.]: Waser, 1986. 36

BORTOLAN, G. M. Z.; FERREIRA, M. G. G.; TEZZA, R. Conforto e desconforto: Revisão de conceitos e elaboração de um modelo de conforto visual. **Human Factors in Design**, v. 8, n. 15, p. 067–084, 2019. 51

BRAGATTO, N. C. A importância da iluminação nos bares e restaurantes e sua influência no comportamento dos usuários. **Revista Especialize Online**, 2013. 47

BRAJAL, F. M. G. **Edifícios de emissão quase zero-Guia de requisitos para a construção**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Aveiro, 2012. 26

BRUNDTLAND, C. Comissão mundial sobre meio ambiente e desenvolvimento: o nosso futuro comum. **Universidade de Oxford. Nova Iorque**, 1987. 37

BUTERA, F. Da caverna à casa ecológica. **História do conforto e da energia. Tradução Elza Bassetto**. São Paulo: Nova Técnica, 2009. 36

CAIXA, C. E. F. **Selo Casa Azul: Boas práticas para habitação mais sustentável**. [S.l.]: Páginas e Letras–Editora e Gráfica, 2010. 44

CALIXTO, W. P. Nota de aula - algoritmo genético para iniciantes. Universidade de Coimbra, Portugal, 2010. 65

_____. Mathematical operator of chromosomal extrapolation to real-coded genetic algorithm applied to problems of geoelectrical prospecting. In: . [S.l.: s.n.], 2011. v. 1. 66

CÂNDIDO, C.; BITTENCOURT, L.; OLIVEIRA, J.; FONTAN, J. Avaliação da localização das aberturas de captadores de vento na ventilação natural de edificações escolares. **São Paulo**, p. 14, 2004. 36

CARRINGTON, T. **BIOARCHITECTURE & CARBON NEGATIVE BUILDINGS**. Tese (Doutorado) — Deakin University, 2015. 33, 34

CARVALHAL, C. M. **Simulação do comportamento térmico de edifícios com fachadas ventiladas**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Aveiro, 2008. 28

CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S. **Introduction to discrete event systems**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2009. 62

CAVALARO, J. Bioarquitetura. **Educere-Revista da Educação da UNIPAR**, v. 13, n. 1, p. 129–140, 2013. 33, 38

CHEIKH, H. B.; BOUCHAIR, A. Passive cooling by evapo-reflective roof for hot dry climates. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 29, n. 11, p. 1877–1886, 2004. 27

CHOPRA, A. **Google SketchUp for Dummies**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007. 65

CHWIF, L.; MEDINA, A. **Modelagem e simulação de eventos discretos, 4ª edição: Teoria e aplicações**. [S.l.]: Elsevier, Brasil, 2014. 62, 63

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos**. [S.l.]: Afonso C. Medina, 2006. 63

CINTRA, M. S. **Arquitetura e luz natural: a influência da profundidade de ambientes em edificações residenciais**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de arquitetura e urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2011. 29, 57

CORBELLA, O. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos: conforto ambiental**. [S.l.]: Editorial Revan, 2003. 38

CORBUSIER, L. **Por uma arquitetura**. [S.l.]: Perspectiva, São Paulo, 1981. 36

- CORBUSIER, L.; DÍAZ, M. L. **El Modulor**. [S.l.]: Poseidón, 1980. 36
- COUNCIL, U. G. B. **Leadership in energy and environmental design (LEED)**. [S.l.]: LEED - Green Building Rating System, 2001. 44
- CRAWLEY, D. B.; LAWRIE, L. K.; WINKELMANN, F. C.; BUHL, W. F.; HUANG, Y. J.; PEDERSEN, C. O.; STRAND, R. K.; LIESEN, R. J.; FISHER, D. E.; WITTE, M. J. et al. Energyplus: creating a new-generation building energy simulation program. **Energy and buildings**, Elsevier, v. 33, n. 4, p. 319–331, 2001. 64
- EDWARDS, B. **O guia básico para a sustentabilidade**. [S.l.]: Editorial Gustavo Gili, 2008. 38
- ENVIRONNEMENTALE, H. H. Q. Définition explicite de la qualité environnementale. **Référentiel dès caractéristiques HQE. Paris, Association HQE, document**, v. 5, p. 15, 2001. 44
- ESCH, M. V.; LOOMAN, R.; BRUIN-HORDIJK, G. The effects of urban and building design parameters on solar access to the urban canyon and the potential for direct passive solar heating strategies. **Energy and Buildings**, Elsevier, v. 47, p. 189–200, 2012. 46
- EUROPEU, P.; CONSELHO. **I Relatório sobre a proposta de diretiva do Parlamento Europeu e do Conselho relativa à limitação da colocação no mercado e da utilização de nonilfenol, etoxilato de nonilfenol e cimento (vigésima sexta alteração da Diretiva 76/769/CEE do Conselho, de 27 de julho de 1976)**. 2002. 26
- FANGER, P. O. **Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering**. Copenhagen: Danish Technical Press., 1970. 52, 53
- FERNANDES, A. M. C. **Clima, homem e arquitetura**. [S.l.]: Trilhas Urbanas, 2006. 45
- FERNANDES, A. M. C. P. **Arquitetura e sombreamento: parâmetros para a região climática de goiânia**. 2007. 77
- FERNANDES, J. E. P. **O contributo da arquitectura vernacular portuguesa para a sustentabilidade dos edifícios**. Tese (Doutorado), 2012. 35
- FERNANDES, J. T. **Código de obras e edificações do DF: inserção de conceitos bioclimáticos, conforto térmico e eficiência energética**. 2009. 70

FERREIRA, C. C.; PEREIRA, I. M. Avaliação do desempenho térmico de habitação de interesse social de acordo com a NBR 15575, para as diversas zonas bioclimáticas. **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONTRUÍDO**, v. 14, 2012. 29

FERREIRA, V. R.; BRAGA, G. Baudrillard e o efeito bauborg: centro nacional de arte e cultura georges-pompidou e sua carcaça. **SEMANA DE FILOSOFIA: FILOSOFIA FRANCESA CONTEMPORÂNEA**, v. 12, 2009. 36

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. [S.l.]: Studio Nobel, 1995. 47, 52

GALLO, C. et al. Bioclimatic architecture. **Renewable Energy**, Oxford; New York: Pergamon Press, c1991-, v. 5, n. 5, p. 1021–1027, 1994. 36

GARCIA, M. Histories, theories and futures of the details of architecture. **Architectural Design**, v. 4, n. 84, p. 14–25, 2014. 34

GARROCHO, J. S. Luz artificial na reabilitação do ambiente. **Reabilitação Ambiental Sustentável Arquitetônica e Urbanística**. Brasília: FAU/UnB, 2009. 46

GIVONI, B. **Climate considerations in building and urban design**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1998. 15, 56, 57

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. [S.l.]: Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. 40

GOMES, F. A.; GOMES, V. M.; ASSIS, A. d. O.; REIS, M. R. d. C.; CRUZ, G. da; CALIXTO, W. P. Heuristic regression method for descriptive data analysis. In: **IEEE. 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)**. [S.l.], 2016. p. 1–5. 66

GRÜNBERG, P. R. M.; MEDEIROS, M. H. F. D.; TAVARES, S. F. Certificação ambiental de habitações: comparação entre leed for homes, processo aqua e selo casa azul. **Ambiente & Sociedade**, Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade, v. 17, n. 2, p. 195–214, 2014. 43

HARDY, J. D.; BOIS, E. F. D.; SODERSTROM, G. The technic of measuring radiation and convection: one figure. **The Journal of Nutrition**, Oxford University Press, v. 15, n. 5, p. 461–475, 1938. 74

HEIFFERON, K. V.; LONG, T. E. Advanced polymers for reduced energy consumption in architecture. **Macromolecular rapid communications**, Wiley Online Library, v. 40, n. 3, p. 1800597, 2019. 40

HOLMGREN, D. Permacultura: princípios e caminhos além da sustentabilidade. **Porto Alegre: Via Sapiens**, 2013. 34

HOUAISS, A.; VILLAR, M. d. S.; FRANCO, F. M. d. M. Dicionário houaiss da língua portuguesa. In: **Dicionário Houaiss da língua portuguesa**. [S.l.: s.n.], 2001. p. lxxiii–2922. 52, 56

INGENIEROS, J. **O homem medíocre**. [S.l.]: Icone Editora, São Paulo. 35

INMETRO. **PORTARIA N 18, Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, RTQ-R**. [S.l.]: Inmetro, Rio de Janeiro, 2012. 41

_____. **PORTARIA N 50, Requisitos de Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de Edificações**. [S.l.]: Inmetro, Rio de Janeiro, 2013. 41

INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION. **Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries: a discussion document**. Pretoria, 2002. 37

ISO16343, N. **ISO16343 Energy performance of buildings Methods for expressing energy performance and for energy certification of buildings**. [S.l.]: International Organization for Standardization, 2011. 25, 40

ISO16346, N. **ISO16346 Energy performance of buildings Assessment of overall energy performance**. [S.l.]: International Organization for Standardization, 2013. 25, 40

ISO7730, N. **ISO7730 Ergonomics of the physical environment**. [S.l.]: International Organization for Standardization, 2005. 53, 64

KOENIGSBERGER, O. H.; INGERSOLL, T.; MAYHEW, A.; SZOKOLAY, S. V.; ROS, E. R. **Viviendas y edificios en zonas cálidas y tropicales**. [S.l.: s.n.], 1977. 45

KRALIKOVA, R.; WESSELY, E. Lighting quality, productivity and human health. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT**

MANUFACTURING AND AUTOMATION. [S.l.: s.n.], 2016. v. 27, p. 59–65. 51

KROEMER, K. H.; GRANDJEAN, E. **Manual de ergonomia: adaptando o trabalho ao homem.** [S.l.]: Bookman Editora, 2005. 51

KRÜGER, E. L.; DUMKE, E. M. Avaliação integrada da vila tecnológica de curitiba. **Ciência e Cultura, Tuiuti**, v. 25, p. 63–82, 2001. 26

KRZEMIŃSKA, A.; ZAREBA, A.; DZIKOWSKA, A. Bioarchitecture—a new vision of energy sustainable cities. In: EDP SCIENCES. **E3S Web of Conferences.** [S.l.], 2017. v. 22, p. 00091. 38

LABEEE, L. D. E. E. E. Labeee. **Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, s/d. Homepage do laboratório de pesquisa. Disponível em:** < <http://www.labeee.ufsc.br>, 2014. 47, 58, 77

LACERDA, E. G. de; CARVALHO, A. D. Introdução aos algoritmos genéticos. **Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais**, v. 1, p. 99–148, 1999. 63, 66

LAMBERTS, R. **Conforto e stress térmico.** [S.l.]: LabEEE, Universidade Federal de Santa Catarina, 2011. 53, 54, 56, 57

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiência Energética na Arquitetura.** 3. ed. Rio de Janeiro: ELETROBRAS/PROCEL, 2014. 25, 26

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura.** [S.l.]: PW Editores São Paulo, 1997. 35, 37, 39, 43, 45, 48, 51, 52, 54

LAW, A. M.; KELTON, W. D.; KELTON, W. D. **Simulation modeling and analysis.** [S.l.]: McGraw-Hill New York, 2000. 63

LIMONAD, E. **Paris em chamas: arquitetura ou revolução.** [S.l.]: Biblio 3W, Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales, Universidad Barcelona, 2006. 35, 36

MACIEL, A. **Integração dos Conceitos Bioclimáticos ao Projeto Arquitetônico.** Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. 64

MAGALHÃES, A. d. S. **Repotencialização na operação paralela de gerador síncrono com gerador de indução.** Tese (Doutorado), 2020. 65, 67

MARCOVITCH, J. **Para mudar o futuro: mudanças climáticas, políticas públicas e estratégias empresariais.** [S.l.]: Edusp, 2006. 25, 39

MARTAU, B. T. **A luz além da visão: iluminação e sua relação com a saúde e bem-estar de funcionárias de lojas de rua e de shopping centers em Porto Alegre.** [S.l.]: Faculdade de Engenharia, arquitetura e urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2009. 46

MASCARENHAS, A. C. R. **Avaliação do consumo de energia após melhoria nas instalações elétricas internas e substituição de lâmpadas em habitações populares.** Dissertação (Mestrado), 2003. 26

MINISTÉRIO DE DESENVOLVIMENTO SOCIAL – 17 ODS. **Transformando nosso mundo: a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável.** Brasília, 2016. 38

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Estudos da Demanda de Energia.** Brasília, 2016. Demanda de Energia 2050, Empresa de Pesquisa Energética - EPE. 39

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018 - Ano base 2017.** Brasília, 2018. 39

MINISTÉRIO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR. **PORTARIA N 372, de 17 de setembro de 2010.** Rio de Janeiro, 2010. 25, 70

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Eficiência energética: Guia para etiquetagem de edifícios.** Brasília, 2015. 38, 39, 41

MOLDOVAN, M. D.; VISA, I.; NEAGOE, M.; BURDUHOS, B. G. Solar heating & cooling energy mixes to transform low energy buildings in nearly zero energy buildings. **Energy Procedia**, Elsevier, v. 48, n. 2014, p. 924–937, 2014. 28

MONTANER, J. M. **Depois do movimento moderno – Arquitetura da Segunda metade do século XX.** [S.l.: s.n.], 2014. 36

NAKAZATO, N. Z. Impactos das certificações leed e aqua no processo de etiquetagem de edifícios procel edifica. Curso de Pós- Graduação em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos, Universidade Federal de Santa Maria, 2014. 40

- NERY, G. Protocolo de kyoto. **Democracia Digital e Governo Eletrônico. Florianópolis**, 2005. 37
- OLGYAY, V. Bioclimatic approach to architecture. In: NATIONAL RESEARCH COUNCIL WASHINGTON, DC. **BRAB conference report**. [S.l.], 1953. v. 5. 15, 56, 57
- PACHECO, M. T.; LAMBERTS, R. Edifícios de energia zero: definições, políticas, exemplos. **ENTAC-Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Fortaleza**, 2008. 26
- PAIVA, J. R. B. **Métrica de complexidade em sistemas a eventos discretos**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós Graduação, Goiânia, 2016. 62, 63
- PEGDEN, C. D.; SADOWSKI, R. P.; SHANNON, R. E. **Introduction to simulation using SIMAN**. [S.l.]: McGraw-Hill, Inc., 1995. 63
- PEREZ, D. R. C. **Diretrizes Solares Para o Planejamento Urbano: o envelope solar como critério para adensamento e verticalização**. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2013. 47
- PHILIPS. **Lâmpadas, Reatores**. [S.l.]: Guia Prático Philips Iluminação, 2009. 38
- PINTO, G. S. P. **Proposta de edificação experimental com balanço energético nulo para a Universidade de Brasília**. Brasília: Bacharelado em Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 2014. 29
- PRESIDENTA DA REPÚBLICA. **DECRETO Nº9864: Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética**. 2019. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dispõe sobre o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética. 43
- RECHTIN, E.; MAIER, M. W. **The art of systems architecting**. [S.l.]: CRC Press is an imprint of the, London – New York, 2010. 62, 65
- REES, W.; WACKERNAGEL, M.; TESTEMALE, P. **Our ecological footprint: Reducing human impact on the earth**. [S.l.]: New Society Publishers Gabriola Island, BC, 1996. 37
- REIS, M. R. d. C. **Análise comparativa de métodos de otimização aplicados à sintonia do controlador PI**. Dissertação (Mestrado), 2014. 65

REIS, M. R. d. C. **Técnica de acionamento e controle ótimo aplicados ao motor a relutância chaveado para maximizar o rendimento.** Tese (Doutorado), 2020. 66, 67

REIS, M. R. da C.; ARAUJO, W. R. H. de; GOMES, V. M.; SILVA, F. d. S. e; GANZAROLI, C. A.; GOMES, F. A.; WAINER, G. A.; CALIXTO, W. P. Optimized techniques for driving and control of the switched reluctance motor to improve efficiency. **Control Engineering Practice**, Elsevier, v. 90, p. 1–18, 2019. 67

RIBEIRO, V. **Materiais, sistemas e técnicas de construção tradicional: Contributo para o estudo da arquitectura vernácula da região oriental da serra do Caldeirão.** [S.l.: s.n.], 2008. 35

RIPLEY, R. L.; BHUSHAN, B. Bioarchitecture: bioinspired art and architecture-a perspective. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, The Royal Society Publishing, v. 374, n. 2073, p. 20160192, 2016. 33

RODRIGUES, P. Manual de iluminação eficiente. **Procel–Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. 1ª. Edição. Julho, 2002.** 45, 46

SACHS, I. Ecodesenvolvimento: crescer sem destruir. In: **Ecodesenvolvimento: crescer sem destruir.** São Paulo: Vértice, 1986. 37

SACHT, H. M. Módulos de fachada para reabilitação eco-eficiente de edifícios. 2013. 27

SADOWSKI, R. P.; KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P. **Simulation with ARENA.** [S.l.]: McGraw-Hill, 1998. 63

SILVA, M. F. d. et al. Estratégias bioclimáticas para seis cidades alagoanas: contribuições para a adequação da arquitetura ao clima local. Universidade Federal de Alagoas, 2019. 54, 57

SMITH, W. J. **Modern optical engineering.** [S.l.]: Tata McGraw-Hill Education, 2008. 49

SORGATO, M. J.; VERSAGE, R.; LAMBERTS, R. Sombrear ou não sombreador janelas. **Nota técnica**, n. 02, 2011. 70

- SOUZA, M. B. d. et al. Potencialidade de aproveitamento da luz natural através da utilização de sistemas automáticos de controle para economia de energia elétrica. Florianópolis, SC, 2003. 28
- SULLIVAN, L. H. **The tall office building artistically considered**. [S.l.: s.n.], 1922. 36
- SUNKEL, O. A sustentabilidade do desenvolvimento atual na américa latina. **Razões e ficções do desenvolvimento**. São Paulo: Ed. UNESP: EDUSP, p. 267–309, 2001. 37
- TANOMARU, J. Motivação, fundamentos e aplicações de algoritmos genéticos. In: **II Congresso Brasileiro de Redes Neurais**. [S.l.: s.n.], 1995. p. 373–403. 65
- TAYLOR, A. E. et al. Illumination fundamentals. **Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute**, 2000. 50
- TOLEDO, B. G. Integração de iluminação natural e artificial: métodos e guia prático para projeto lumonotécnico. 2008. 48
- TOLMASQUIM, M. Plano nacional de energia 2030. **Conselho Nacional de Política Energetica-CNPE, Brasília, Brazil, accessed**, v. 1, n. 10, 2007. 43
- UNIÃO, D.-D. O. da. Lei n 10.295, de 17 de outubro de 2001. ano cxxxvii, n 200, seção 1. **Brasília**, v. 18, n. 10, p. 2001, 2001. 40
- VEITCH, J. A.; NEWSHAM, G. R.; BOYCE, P. R.; JONES, C. Lighting appraisal, well-being and performance in open-plan offices: A linked mechanisms approach. **Lighting Research & Technology**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 40, n. 2, p. 133–151, 2008. 52
- VILAR, J. Xxxvi curso de medicina do trabalho–noções gerais de higiene do trabalho. **Lisboa: Escola Nacional da Saúde Pública**, 1996. 51
- VITRÚVIO, M. P. Da arquitetura. **São Paulo: Hucitec**, 1999. 36
- WANG, L.; GWILLIAM, J.; JONES, P. Case study of zero energy house design in uk. **Energy and buildings**, Elsevier, v. 41, n. 11, p. 1215–1222, 2009. 28
- WEBER, R. L. **College physics**. [S.l.]: McGraw-Hill Companies, 1974. 50
- WIJK, A. V.; WIJK, I. van. **3D printing with biomaterials: Towards a sustainable and circular economy**. [S.l.]: IOS press, 2015. 34

YOUNG, R.; HAYES, S.; KELLY, M.; VAIDYANATHAN, S.; KWATRA, S.;
CLUETT, R.; HERNDON, G. The 2014 international energy efficiency scorecard.
In: **American Council for an Energy-Efficient Economy**. [S.l.: s.n.], 2014. 39

