



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

**INTERAÇÃO ENTRE FATORES CLIMÁTICOS E UM
RECINTO LOCALIZADO NA CIDADE DE RECIFE: ESTUDO
TEÓRICO-EXPERIMENTAL**

MANUEL SÉRGIO MARTINS

RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL

SETEMBRO – 2002

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS
ENERGÉTICAS E NUCLEARES**

**INTERAÇÃO ENTRE FATORES CLIMÁTICOS E UM
RECINTO LOCALIZADO NA CIDADE DE RECIFE : ESTUDO
TEÓRICO EXPERIMENTAL**

MANUEL SÉRGIO MARTINS

**RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL
SETEMBRO -2002**

**INTERAÇÃO ENTRE FATORES CLIMÁTICOS E UM
RECINTO LOCALIZADO NA CIDADE DE RECIFE : ESTUDO
TEÓRICO EXPERIMENTAL**

MANUEL SÉRGIO MARTINS

**INTERAÇÃO ENTRE FATORES CLIMÁTICOS E UM
RECINTO LOCALIZADO NA CIDADE DE RECIFE: ESTUDO
TEÓRICO-EXPERIMENTAL**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-
Graduação em Tecnologias Energéticas e
Nucleares – PROTEN – Departamento de
Energia Nuclear da Universidade Federal de
Pernambuco para a obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de Concentração:
Fontes Renováveis de Energia.**

ORIENTADOR: PROF. Dr. NAUM FRAIDENRAICH

RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL

SETEMBRO - 2002

Aos que acreditam e trabalham pelo progresso da ciência e da cultura humana e superam, com determinação e inteligência, os desafios de produzir conhecimento e arte em nosso País.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Cumpre-me o dever de agradecer às Instituições e às pessoas que me concederam o tempo necessário, a infra-estrutura do local onde foi desenvolvido o trabalho e a colaboração financeira para levá-lo a cabo, conduzindo-me a um elevado patamar de consciência científica e intelectual.

À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) que, além de representar a Instituição responsável pela minha formação superior, tem sido a minha verdadeira Casa, a partir do momento em que fui acolhido e oficializado como residente da Casa do Estudante Universitário (CEUM) desta respeitada Instituição.

Ao ex-coordenador do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Energéticas e Nucleares (PROTEN) do Departamento de Energia Nuclear (DEN), Professor Clovis Abraão Hazin por ter exercido com competência e dedicação as suas funções na condução deste Programa.

Ao atual coordenador do PROTEN, Professor Carlos Alberto Brayner pela colaboração, incentivo e condução com competência, senso de justiça e seriedade as atividades desenvolvidas no DEN.

A todos os Professores e funcionários do DEN pelo apoio e amizade e, especialmente aos Professores do Grupo de Pesquisa em Fontes Alternativas de Energia Renováveis (FAE) Chigueru Tiba e Elielza Moura pela colaboração e incentivo.

Ao Professor Naum Fraidenaich, pelo exemplo de pesquisador a ser seguido por quem quiser chegar na fronteira do conhecimento, pela sua dedicação à pesquisa científica, refletindo-se em sua respeitada produção, caracterizada por inúmeros trabalhos publicados, orientações e atividades docentes. Agradeço-lhe, sobretudo, a concepção e brilhante orientação do presente trabalho.

Meus agradecimentos especiais à pesquisadora, atualmente integrante do Programa de fixação de Doutores (PROFIX do CNPq), Olga de Castro Vilela, pela tenacidade com que se dedica à pesquisa, pelo convívio harmonioso e produtivo no ambiente de trabalho compartilhado desde o meu ingresso no PROTEN e, sobretudo, por ter exercido, especialmente nos últimos seis meses, a função inegável de co-orientadora do trabalho, auxiliando-me na concatenação, organização e finalização.

Agradecimentos aos professores Jarnadan Roathgi, Noêmia Mesquita, Armando Medeiros, Maurílio Santos, Heitor Scalabrini e Everaldo Feitosa. do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFPE pelo conhecimento adquirido e finalização do curso de especialização na área de Energia Eólica.

Aos professores Marcelo Gomes e Celso Pinto de Melo do Departamento de Física da UFPE, pelas cartas de apresentação, encaminhadas à coordenação do programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e, logo em seguida, à do DEN.

Aos professores participantes dos seminários de acompanhamento da pesquisa pelas críticas construtivas e sugestões valiosas: Professor Ruskin Freitas (Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFPE), Professora Berenice Lins (Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFPE), Professor João Brito (Departamento de Eletrônica e Sistemas da UFPE), Professor Chigueru Tiba (Grupo FAE/DEN da UFPE) e Professor Carlos Brayner (DEN da UFPE).

Ao Rinaldo Oliveira, técnico do Grupo FAE, pelo apoio na montagem do arranjo experimental e coleta dos dados experimentais, essenciais para a elaboração deste trabalho. A Marcelo Ferreira e Martine Aguiar, corpo técnico do Grupo FAE, pela amizade e excelente convívio.

Aos estudantes de iniciação científica, também residentes da CEUM, Gilmário Lima e Carlos Oliveira pela colaboração na elaboração dos programas utilizados no tratamento dos dados experimentais e aplicação dos modelos teóricos.

Também agradeço à professora Eliane da Fonte, diretora do Departamento de Assuntos Estudantis (DAE/PROACAD), pela concessão da bolsa de manutenção acadêmica, durante o período da prorrogação da pesquisa, e pela sua competência e versatilidade para tratar das questões sociais que envolvem às CEU's.

Aos alunos das escolas da rede estadual de ensino em Camaragibe, Francisco de Paula e Santa Sofia, com os quais trabalho acerca dos quatro últimos meses lecionando as disciplinas de Física, Química e Introdução a Microinformática, pelas minhas ausências necessárias para o desenvolvimento e conclusão da pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro durante dois anos da minha permanência no PROTEN.

SUMÁRIO

	PÁGINA
DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
SUMÁRIO.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	xiii
ABREVIATURAS.....	xv
1 LETRAS DO ALFABETO LATINO.....	xv
2 LETRAS DO ALFABETO GREGO.....	xvii
RESUMO.....	xviii
ABSTRACT.....	xx
1.0 INTRODUÇÃO.....	01
1.1 Justificativas e objetivos	03
1.2 Descrição e organização do trabalho.....	05
2.0 REVISÃO DA LITERATURA.....	07
2.1 Conforto térmico.....	07
2.2 A carta bioclimática e suas estratégias de conforto.....	12
2.2.1 Carta bioclimática adotada no Brasil.....	14
2.2.2 O clima de Recife e as estratégias adotadas.....	22

3.0	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DE DETERMINAÇÃO DOS FATORES CLIMÁTICOS E DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UM RECINTO.....	24
3.1	Descrição do recinto estudado.....	26
3.2	Recursos utilizados.....	30
3.2.1	Medição da temperatura interna.....	30
3.2.2	Medição da temperatura ambiente, umidade relativa, direção e velocidade do vento.....	32
4.0	MEDIÇÃO DAS GRANDEZAS METEOROLÓGICAS.....	35
4.1	Umidade relativa e temperatura ambiente.....	35
4.2	Velocidade e direção do vento.....	39
5.0	TEMPERATURA INTERNA DO RECINTO E SUA COMPARAÇÃO COM A TEMPERATURA AMBIENTE.....	43
6.0	MODELOS DE CÁLCULOS DE RADIAÇÃO SOLAR, TEMPERATURA AMBIENTE E UMIDADE RELATIVA.....	50
6.1	Determinação da radiação solar incidente (H_{col}) ao longo do ano nas paredes e teto do recinto para diferentes azimutes.....	50
6.2	Geração de perfis diários de temperatura ambiente e umidade relativa comparados com dados experimentais.....	53
7.0	ESTIMATIVA TEÓRICA DA TEMPERATURA INTERNA VERSUS DADOS EXPERIMENTAIS.....	56
7.1	Descrição do modelo físico.....	56
7.2	Cálculo do valor máximo da temperatura ar-sol para a coberta do recinto.....	60

8.0	ESTRATÉGIAS DE CONFORTO.....	63
8.1	Estratégias de conforto para aproximar a temperatura do recinto da temperatura ambiente	65
8.2	Estratégias para reduzir a temperatura do recinto abaixo da temperatura média ambiente, com pouco consumo de energia.....	69
CONCLUSÕES.....		73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		75
APÊNDICE A - PROCEDIMENTO PARA O CÁLCULO E OBTENÇÃO DO PERFIL DIÁRIO DA TEMPERATURA AMBIENTE E UMIDADE RELATIVA.....		
A.1	Introdução.....	79
A.2	Detalhamento do procedimento de cálculo para obtenção dos perfis da temperatura ambiente e umidade relativa.....	80

LISTA DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 2.1 Carta bioclimática adotada no Brasil e delimitação das zonas estratégicas.....	15
Figura 2.2 Delimitação da zona de conforto (a) e de ventilação (b).....	17
Figura 2.3 Zona de ventilação, destacando-se a diurna e noturna (a) e zona de resfriamento evaporativo (b).....	18
Figura 2.4 Zona de massa térmica para resfriamento (a) e zona de ar condicionado (b)	19
Figura 2.5 Zona de umidificação (a) e zona de massa térmica e aquecimento solar (b).....	20
Figura 2.6 Zona de aquecimento solar passivo (a) e zona de aquecimento artificial (b)	21
Figura 2.7 Interseções entre ventilação, massa térmica para resfriamento e resfriamento evaporativo.....	22

Figura 2.8	Carta bioclimática com as estratégias de conforto indicadas para Recife.....	23
Figura 3.1	Vista dos laboratórios localizados na área de testes do Grupo FAE (em primeiro plano, à esquerda, o laboratório com a estação meteorológica e, à direita , o recinto cujas temperaturas internas foram monitoradas.....	25
Figura 3.2	Planta baixa do laboratório utilizado para o monitoramento da temperatura interna com as indicações da localização do arranjo dos seis sensores.....	27
Figura 3.3	Fachada SUL do laboratório utilizado para o monitoramento da temperatura interna	28
Figura 3.4	Fachada OESTE do laboratório utilizado para o monitoramento da temperatura interna.....	28
Figura 3.5	Corte AB do laboratório utilizado para o monitoramento da temperatura interna.....	29
Figura 3.6	Corte CD do laboratório utilizado para o monitoramento da temperatura interna.....	29
Figura 3.7	Detalhe do sensor LM35 utilizado para registrar as temperaturas internas do recinto.....	30
Figura 3.8	Detalhe do DATALOGGER utilizado para armazenar os dados da temperatura interna	31
Figura 3.9	Detalhe do posicionamento dos sensores LM35 no recinto	31

Figura 3.10	Sondar modelo HMP35C utilizado para medir umidade relativa e temperatura ambiente.....	32
Figura 3.11	Anemômetro (à esquerda) e instrumento utilizado para medir a direção do vento (à direita)	33
Figura 3.12	Posicionamento do instrumento utilizado para registrar a direção do vento.....	34
Figura 4.1	Dados de Umidade Relativa (ACIMA – Linha dos valores médios em vermelho) e temperatura ambiente (ABAIXO – Linha dos valores médios em azul) registrados no mês de março.....	36
Figura 4.2	Dados de Umidade Relativa (ACIMA – Linha dos valores médios em vermelho) e temperatura ambiente (ABAIXO – Linha dos valores médios em azul) registrados no mês de abril	36
Figura 4.3	Dados de Umidade Relativa (ACIMA – Linha dos valores médios em vermelho) e temperatura ambiente (ABAIXO – Linha dos valores médios em azul) registrados no mês de maio	37
Figura 4.4	Dados de Umidade Relativa (ACIMA – Linha dos valores médios em vermelho) e temperatura ambiente (ABAIXO – Linha dos valores médios em azul) registrados no mês de junho.....	37
Figura 4.5	Dados de Umidade Relativa (ACIMA – Linha dos valores médios em vermelho) e temperatura ambiente (ABAIXO – Linha dos valores médios em azul) registrados no mês de novembro.....	38
Figura 4.6	Registros de velocidade e direção do vento durante os meses de abril e novembro.....	39

Figura 4.7	Distribuição de probabilidade da velocidade do vento para os meses de medição.....	40
Figura 4.8	Distribuição de probabilidade da direção do vento para os meses de medição.....	41
Figura 5.1	Dados experimentais da temperatura interna (cinza) e ambiente (amarelo) ao longo do dia, juntamente com a linha dos valores médios da temperatura ambiente (azul) e da temperatura interna (vermelho) para o mês de março.....	43
Figura 5.2	Dados experimentais da temperatura interna (cinza) e ambiente (amarelo) ao longo do dia, juntamente com a linha dos valores médios da temperatura ambiente (azul) e da temperatura interna (vermelho) para o mês de abril.....	44
Figura 5.3	Dados experimentais da temperatura interna (cinza) e ambiente (amarelo) ao longo do dia, juntamente com a linha dos valores médios da temperatura ambiente (azul) e da temperatura interna (vermelho) para o mês de maio.....	44
Figura 5.4	Dados experimentais da temperatura interna (cinza) e ambiente (amarelo) ao longo do dia, juntamente com a linha dos valores médios da temperatura ambiente (azul) e da temperatura interna (vermelho) para o mês de junho.....	45
Figura 5.5	Dados experimentais da temperatura interna (cinza) e ambiente (amarelo) ao longo do dia, juntamente com a linha dos valores médios da temperatura ambiente (azul) e da temperatura interna (vermelho) para o mês de novembro.....	45

Figura 6.1	Sobreposição das curvas representativas do comportamento da radiação coletada pelas paredes e coberta do recinto estudado.....	52
Figura 6.2	Perfis teóricos da temperatura ambiente (azul) e linhas dos valores médios experimentais (vermelho) para os meses de abril (a) e novembro (b).....	54
Figura 6.3	Perfis teóricos da umidade relativa (azul) e linhas dos valores médios experimentais (vermelho) para os meses de abril (a) e novembro (b).....	54
Figura 7.1	Corte esquemático do recinto analisado e as grandezas físicas consideradas no modelo.....	57
Figura 7.2	Pontos representativos dos valores médios mensais de temperatura ambiente, temperatura interna teórica e experimental do recinto para os meses de março, abril, maio, junho e novembro.....	60
Figura 8.1	Corte esquemático da câmara de ar entre o telhado e a laje do recinto.....	65
Figura 8.2	Possibilidade da transferência de calor do ambiente para o recinto e do recinto para o ambiente.....	67
Figura 8.3	Possibilidade da transferência de calor do ambiente para o recinto e do recinto para o ambiente.....	68
Figura 8.4	Corte esquemático do sistema de injeção de ar frio no recinto.....	70

LISTA DE TABELAS

	PÁGINA
Tabela 1.1	Valores médios da radiação solar diária, temperatura ambiente e umidade relativa obtidos com base anual e para os meses de agosto e janeiro e valores máximos e mínimos de temperatura ambiente para a cidade de Recife-PE-Brasil.....02
Tabela 3.1	Dias válidos utilizados na caracterização das grandezas físicas estudadas (temperatura ambiente, temperatura interna, umidade relativa, velocidade e direção do vento).....26
Tabela 5.1	Valores médios mensais da temperatura ambiente e da temperatura interna do recinto. Mostra-se também as diferenças entre essas temperaturas para cada mês de medição.....47
Tabela 5.2	Carga térmica devido à incidência de radiação solar nas paredes e teto do laboratório, nos meses de junho e novembro47
Tabela 5.3	Amplitudes térmicas da temperatura ambiente e da temperatura interna para todos os meses de medição.....48
Tabela 7.1	Valores experimentais (\pm desvio padrão σ) e teóricos da temperatura interna média para os meses analisados.....59

Tabela 7.2	Coefficientes de absorção e emissão térmica Fonte: Roberto Rivero – FAU-USP.....	61
Tabela 7.3	Valores das grandezas envolvidas no cálculo da temperatura sol-ar máxima, considerando-se h_{ext} ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$) = 20,44 e dois coeficientes de absorção frente a radiação solar: $\alpha_1 = 0,675$ (concreto aparente) e $\alpha_2 = 0,915$ (pintura betuminosa).....	62

TABELAS DO APÊNDICE A

Tabela A.1	Valores de temperatura ambiente média mensal, temperatura ambiente mínima (média mensal das mínimas), temperatura máxima (média mensal das máximas) ($^\circ C$) (LYRA, F. J. M, 1992).....	81
Tabela A.2	Valores de Umidade relativa média mensal, Umidade relativa mínima (média mensal das mínimas) (Urm), Umidade relativa máxima (média mensal das máximas) (URM) (%) (LYRA, F. J. M, 1992).....	84

ABREVIATURAS

1 LETRAS DO ALFABETO LATINO

A_i	Área da superfície (parede, teto ou piso) (m^2);
c	Calor específico (KJ/kg·K);
C	Capacidade calorífica (KJ/K);
e_i	Espessura das paredes, laje e piso do recinto (m);
H_{col}	Radiação solar coletada ao longo do dia (MJ/m^2);
H_d	Radiação solar difusa (MJ/m^2);
h_{ext}	Coefficiente de transferência de calor externo (convecção e radiação) ($W/m^2 K$);
h_{int}	Coefficiente de convecção natural das diversas superfícies internas do recinto ($W/m^2 K$);
H_h	Radiação global solar no plano horizontal (MJ/m^2);
H_o	Radiação solar diária extraterrestre, média mensal (MJ/m^2);
I_{col}	Radiação solar coletada hora a hora (W/m^2);
$I_{col,max}$	Radiação solar máxima incidente no teto (W/m^2);
k_i	Coefficiente de condução de calor das paredes, telhado e piso ($W/m K$);
m	Massa (kg);
q_{ext}	Fluxo de calor de dentro do recinto para fora (J/m^2);
q_{int}	Fluxo de calor de fora para dentro do recinto (J/m^2);
R_i	Resistência térmica das “i” superfícies do recinto (W/K) ⁻¹ ;
r	Potência solar média diária (W/m^2);

r_u	Razão de umidade (g/Kg);
T_{aM}	Temperatura ambiente máxima, média mensal (K);
$T_{amb,Max}$	Valor médio das máximas temperaturas registradas (K);
T_{amb}	Temperatura ambiente (K);
T_{in}	Temperatura interna (K);
T_{am}	Temperatura ambiente mínima, média mensal (K);
T_{as}	Temperatura ar-sol (K);
$T_{as,max}$	Temperatura ar-sol máxima diária (K);
T_{amb}	Temperatura ambiente (K);
T_{amm}	Temperatura ambiente mensal (K);
TBS	Temperatura de bulbo seco (K);
TBU	Temperatura de bulbo úmido (K);
T_e	Temperatura externa (média das máximas registradas para cada mês) (K);
t_M	Hora média de ocorrência da temperatura ambiente máxima (h);
t_m	Hora média de ocorrência da temperatura ambiente mínima (h);
t_p	Instante do pôr do sol (h);
t_s	Instante do nascer do sol (h);
UR	Umidade relativa (%);
Us	Umidade de saturação (%);
v	Velocidade do vento (m/s);

2 LETRAS DO ALFABETO GREGO

α	Coefficiente de absorção da radiação solar;
α_T	difusividade térmica (m^2/s);
β	Ângulo formado entre uma superfície plana e o plano horizontal (graus);
δ	Declinação solar (graus);
ε	Coefficiente de emissividade;
ϕ	Ângulo azimute (graus);
λ	Latitude do local (graus);
θ	Ângulo formado pela direção dos raios do sol com a normal ao plano da parede (graus);
θ_z	Ângulo zenital (graus)
ρ	Densidade da parede (kg/m^3)
ω	Ângulo horário (graus);
ω_s	Ângulo do pôr do sol (graus)

INTERAÇÃO ENTRE FATORES CLIMÁTICOS E UM RECINTO LOCALIZADO NA CIDADE DE RECIFE: ESTUDO TEÓRICO-EXPERIMENTAL

Autor: **Manuel Sérgio Martins**

Orientador: Prof. Dr. **Naum Fraidenraich**

RESUMO

A existência de temperaturas compreendidas entre valores médios e elevados e pequena amplitude térmica, combinadas com valores elevados de umidade relativa e radiação solar, tornam a cidade do Recife uma região considerada como de escassas possibilidades em termos de oportunidades de climatização através de métodos passivos ou de baixo consumo de energia. Levando em conta essas características, as cartas bioclimáticas sugerem, como alternativa principal para a climatização local, a circulação natural de ar, recurso muitas vezes insuficiente. No intuito de identificar oportunidades de obtenção de conforto térmico, foi realizado um estudo teórico-experimental sobre a interação entre fatores ambientais e um recinto localizado na cidade do Recife. O comportamento térmico de um dos laboratórios do Grupo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia (Grupo FAE – DEN/UFPE) foi utilizado como referência experimental. Com tal fim, foram monitoradas, ao longo de vários meses, a temperatura interna desse laboratório, a radiação solar, a temperatura ambiente, a velocidade e direção do vento e a umidade relativa. A interação entre os fatores climáticos e o recinto foi estudada através da correlação entre sua temperatura interna e os parâmetros meteorológicos observados. Modelos disponíveis na literatura para representar analiticamente os valores de temperatura ambiente, umidade relativa e radiação solar

incidente nas paredes e teto do recinto, são fornecidos como uma proposta para generalizar os resultados obtidos para outras localidades e períodos do ano. Os resultados dos modelos de cálculo de umidade relativa e temperatura ambiente, baseados em valores médios, máximos e mínimos históricos dessas variáveis, são apresentados. A análise da carga térmica do laboratório nos meses de junho e novembro mostra que entre 76 a 78 % da mesma é devida a incidência de radiação solar no teto. Sua temperatura interna encontra-se em torno de 3 °C acima da temperatura média ambiente, com uma amplitude térmica entre 2,5 e 3,6 °C, enquanto que a amplitude térmica ambiente apresenta valores entre 5,9 e 8,2 °C. O conjunto de observações realizadas permite discutir as oportunidades que o clima de Recife oferece para a realização de projetos residenciais que forneçam condições térmicas confortáveis e com baixo consumo de energia. Por conseguinte, foram identificadas estratégias tais quais: a injeção de ar frio proporcionada pela ventilação noturna, durante o período em que o ar ambiente atinge temperaturas em torno de 23⁰C, promoção de transferência de calor através do piso da residência, mediante tratamento adequado de sua estrutura assim como do entorno da habitação, criação de micro-clima através do resfriamento evaporativo nos horários de maiores valores de temperaturas ambientes e menores de umidade relativa, além dos procedimentos habituais de isolamento térmico e radiante do telhado e ou uso de tintas seletivas, bloqueio da radiação incidente nas paredes mais atingidas e ventilação cruzada. Espera-se que este estudo possa contribuir no processo de planejamento e concepção de projetos bioclimáticos localizados em Recife, propiciados pela utilização de meios passivos e sustentáveis do ponto de vista energético e de conforto.

INTERACTION BETWEEN CLIMATIC FACTORS AND AN ENCLOSURE LOCATED IN THE CITY OF RECIFE: THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY

Author: MANUEL SÉRGIO MARTINS

Adviser: Prof. Dr. NAUM FRAIDENRAICH

ABSTRACT

Ambient temperatures lying between medium and high values, combined with small thermal amplitude, high values of relative humidity and solar radiation make the city of Recife a region that can be considered as having scarce possibilities for the use of passive or low energy consumption methods for providing thermal comfort conditions in local residences. Taking into account those characteristics, the bioclimate charts suggest, as the main alternative to promote thermal comfort, the natural circulation of air, a resource often clearly insufficient in urban areas. Intending to identify opportunities to create thermal comfort conditions, a theoretical-experimental study was accomplished on the interaction between environmental factors and a small building located in the city of Recife. The thermal behavior of a laboratory of the Research Group on Alternative Energy Sources (Group FAE-DEN/UFPE) was used as an experimental reference. With that purpose, along several months, the internal temperature of the laboratory, solar radiation, ambient temperature, speed and direction of the wind and relative humidity was monitored. The interaction between the climatic factors and the laboratory was studied through the correlation between its internal temperature and the meteorological parameters observed. Available models in literature that represent, analytically, the ambient temperature values, relative humidity and incident solar radiation in the walls and roof of the laboratory, are

supplied as a proposal to generalize the obtained results for other places and periods of the year. The results of the proposed models, to calculate the relative humidity and ambient temperature, based on historical averages of its mean, maximum and minimum values are presented. The analysis of the thermal load of the laboratory during the months of June and November shows that 76 to 78% of it is due to the incidence of solar radiation in the roof. The mean of its internal temperature is around 3 °C above the average ambient temperature, with thermal amplitude equal to 2.5 and 3.6 °C, while the thermal amplitude of the ambient temperature presents values between 5.9 and 8.2 °C. The set of accomplished observations allows identifying the opportunities that the climate of Recife offers for residential projects, supplying comfortable thermal conditions with low consumption of energy. In particular, were: the injection of cold air provided by night ventilation, during the period that the ambient air reaches temperatures around 23⁰C; promotion of heat transfer through the floor of the residence, by appropriate treatment of its structure as well as of the environment around the house; creation of micro-climate through evaporative cooling in the periods of large values of ambient temperatures and small relative humidity, besides the conventional procedures of thermal and radiant isolation of the roof and the use of selective paints; blocking the incident radiation in the walls, most exposed, and the promotion of crossed ventilation. It is expected that this study can contribute to the conception and design of houses located in the city of Recife, by using passive methods that provide thermal comfort and are sustainable from the energetic point of view.

1.0 INTRODUÇÃO

“Devemos começar por tomar nota dos países e climas onde edificações devam ser construídas se nossos projetos para elas pretendem ser corretos. Um tipo de casa parece apropriado ao Egito, outro para a Ibéria, outro ainda diferente para Roma e assim por diante, com terras e países de distintas características. Isto ocorre porque uma parte da Terra está diretamente sob o caminho do sol, outra está longe deste, enquanto outra parte está a meio caminho entre estas duas (...) Parece óbvio que o projeto de casas deve confrontar-se com as diversidades do clima.”

Vitrúvio, primeiro século AC.

O pensamento de Vitrúvio, acima destacado, reflete ainda hoje o quão é importante o conhecimento dos fatores climáticos atuantes num projeto arquitetônico e sua correta harmonização com estes fatores. Assim sendo, a função primordial de um bom projeto arquitetônico está, sobretudo, representada pela sua correta adequação às condições ambientais que possam contribuir nas trocas de energia entre o meio e a edificação.

No contexto destas considerações, é oportuno mencionar que Vitrúvio, arquiteto do período clássico romano, procurou estudar a Arquitetura como um espaço habitável que deveria equilibrar apenas três aspectos: estruturais, funcionais e formais. Hoje, em decorrência do considerável aumento da demanda do consumo de energia, surge um novo vértice, denominado eficiência energética acrescido ao triângulo conceitual de Vitrúvio. A eficiência energética assume um papel tão importante quanto as demais variáveis que participam do universo da Arquitetura. Obter-se uma maior eficiência energética nas construções significa em primeiro lugar fornecer maior qualidade ao projeto e conforto aos seus usuários através de soluções que visem proporcionar maior bem-estar, acompanhado do uso racional de energia.

A cidade de Recife, localizada em uma região equatorial marítima, apresenta valores médios de temperatura ambiente e umidade relativa consideravelmente elevados, combinados com uma incidência importante de radiação solar (Tab. 1.1).

Tabela 1.1 Valores médios da radiação solar diária, temperatura ambiente e umidade relativa obtidos com base anual e para os meses de agosto e janeiro e valores máximos e mínimos de temperatura ambiente para a cidade de Recife-PE-Brasil.

	Anual	Mensal	
		Agosto	Janeiro
Radiação solar (Wh/m ²)	5332	5083	6126
Temperatura média (° C)	25,5	23,9	26,6
Temperatura média mínima (° C)	21,8	20,6	22,7
Temperatura média máxima (° C)	29,2	27,3	30,2
Umidade relativa (%)	79,8	85,0	73,0

Em decorrência disso, o problema da obtenção de conforto térmico de residências, por meios passivos ou de baixo consumo energético, torna-se bastante complexo.

As cartas bioclimáticas sugerem como alternativa principal para implementar processos de climatização, a circulação natural de ar (vento) (LAMBERTS, et al., 1997) que, sem dúvida, é um recurso disponível, mas muitas vezes insuficiente. Trata-se, portanto, de estudar com mais detalhe o comportamento do clima local, para verificar que recursos construtivos poderiam ser implementados com a finalidade de se obter condições favoráveis de conforto térmico, fazendo uso das ferramentas que a arquitetura solar proporciona.

1.1 JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS

Verifica-se na maioria dos prédios residenciais e comerciais construídos na região metropolitana de Recife, caracterizada por valores de temperatura ambiente geralmente entre 20^o C e 29^o C e umidade relativa quase sempre superior a 60%, uma tendência da incorporação dos sistemas de controle térmico artificiais em detrimento dos naturais. Por outro lado, a utilização de aparelhos de ar condicionado e sistemas de ventilação artificial para resolverem os problemas decorrentes do péssimo desempenho térmico das edificações, ocasionam um grave problema — um consumo elevado de energia neste centro urbano.

Diante da atual conjuntura energética brasileira e da necessidade da adequação da Arquitetura ao clima, tornando-a sustentável do ponto de vista energético e de conforto, a utilização de meios passivos no controle do ambiente construído surge como uma alternativa necessária, viável e econômica. Como consequência da crise no setor energético, demonstrada recentemente através do plano de racionamento de energia elétrica imposto pelo governo federal no ano de 2001, não tardará surgir uma maior consciência por parte dos Arquitetos e demais segmentos envolvidos com a construção civil, acerca da importância das soluções que contribuam para a sua maior eficiência energética. Estas soluções podem ser proporcionadas pelo maior controle da iluminação zenital, proteção das superfícies mais expostas à radiação solar, aproveitamento da ventilação dominante, sombreamento advindo da utilização de árvores, utilização de materiais que ofereçam maior versatilidade térmica dos sistemas de geração de energia provenientes de fontes renováveis e limpas, a exemplo da solar, eólica e biomassa.

Vale ainda ressaltar que, além do alto custo e dos impactos ambientais provocados pela construção das grandes usinas hidrelétricas na região Nordeste, não é possível construir estes sistemas geradores indefinidamente, pois hoje os recursos hídricos disponíveis para tais sistemas já foram plenamente utilizados. As reservas de combustíveis fósseis e sua queima, além de contribuírem para o aumento dos níveis de poluição e aquecimento global da Terra, estão se exaurindo com o passar do tempo.

Há casos extremos nos quais a utilização de sistemas artificiais de condicionamento térmico e de iluminação se faz necessária. No entanto, é importante, sempre que possível, explorá-los de forma integrada aos sistemas naturais, adotando-se as estratégias que forem mais adequadas ao local no qual se insere o projeto.

Engendrado por meio de uma total integração dos fatores climáticos (radiação solar, vento, temperatura ambiente, umidade relativa e precipitação) surge um fluxo natural de energia ao redor da edificação. Em 1988, EVANS & SCHILLER, enfatizaram esses aspectos quando salientaram que, para que a Arquitetura tenha relevância no futuro, é necessário trocar as regras estabelecidas durante as últimas décadas e tratar de entender como se elaboram projetos com a natureza e não contra ela e sugeriram que os edifícios atuais devem aproveitar as energias naturais do sol e do vento, incorporando-as ao próprio projeto arquitetônico.

Espera-se, portanto, que esta pesquisa possa ser útil para o uso da climatização de residências através do emprego dos princípios bioclimáticos adequados às regiões com características similares à tratada no presente trabalho.

O presente trabalho tem como objetivo principal:

- Sugerir soluções arquitetônicas que propiciem condições de conforto térmico com baixo consumo de energia para habitações localizadas na cidade de Recife.

Para atingir tal objetivo, propõe-se:

- Realizar um estudo do comportamento das principais variáveis climáticas da cidade do Recife;
- Analisar a resposta de um recinto localizado na área de testes do Grupo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia (FAE) do Departamento de Energia Nuclear (DEN) da UFPE às condições climáticas;
- Identificar as oportunidades que o clima e o processo de interação com o recinto apresentam para a obtenção de conforto térmico.

1.2 DESCRIÇÃO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O conteúdo da dissertação desenvolve-se e estrutura-se basicamente em três momentos. No primeiro, incorporadas à revisão da literatura, são apresentadas as características da carta bioclimática adotada no Brasil e as estratégias mais indicadas na concepção de um projeto arquitetônico localizado na cidade de Recife (LAMBERTS, et al., 1997). No segundo, é apresentado um estudo experimental detalhado das principais variáveis climáticas atuantes num recinto localizado na área de testes do Grupo FAE da UFPE e a interação destas com as variações de temperatura interna deste recinto. De forma concomitante à análise experimental são introduzidos resultados de modelos teóricos existentes na literatura que reproduzem o comportamento da temperatura ambiente, umidade relativa e da radiação solar incidente nas paredes e teto do recinto estudado. Enriquecendo a pesquisa, no que tange à análise da interação das variáveis climáticas e este recinto, são apresentados os dados decorrentes da utilização de um modelo que reproduz a sua temperatura interna através de parâmetros climáticos e característicos da própria construção (LIMA, et al., 2002). Por fim, baseando-se nas análises descritas no segundo momento, são considerados os recursos climáticos da região em estudo e as possibilidades de aproveitamento destes na climatização de ambientes através de alternativas que possam nortear Arquitetos e demais profissionais envolvidos com a tecnologia da construção civil a conceberem os seus projetos com características bioclimáticas.

Tratando-se de um tema relacionado ao estudo do comportamento dos fatores climáticos e sua influência nos projetos arquitetônicos desenvolvidos em Recife, tornou-se imprescindível o emprego do conceito de bioclimatologia aplicada à Arquitetura. Dessa forma, desenvolveram-se estudos que demonstram aspectos importantes acerca do comportamento das principais variáveis climáticas atuantes em uma construção, tais quais: a energia coletada pelas suas paredes e teto ao longo do ano, temperatura ambiente, umidade relativa, direção dominante e velocidade do vento. A temperatura interna de um recinto foi coletada ao longo de cinco meses do ano 2001 e comparada à temperatura ambiente.

A carta bioclimática adotada no Brasil (GIVONI, 1992) e as estratégias de conforto indicadas para residências localizadas em Recife (LAMBERTS, et al., 1997), fazem parte da revisão da literatura detalhada na seção 2.

A metodologia empregada para a obtenção dos valores experimentais dos fatores climáticos e os resultados do monitoramento destas variáveis meteorológicas, são apresentados nas seções 3 e 4. Implementando esta análise empírica, os dados referentes ao monitoramento da temperatura interna são apresentados na seção 5.

Na seção 6, são apresentados os resultados da aplicação dos procedimentos teóricos que permitem realizar cálculos da temperatura ambiente, umidade relativa (SPIRITO & VITALE, 1982) e da radiação solar incidente nas paredes e teto de um recinto para os doze meses do ano para uma dada localidade (COLLARES PEREIRA & RABL, 1979). Ainda na seção 6, os valores teóricos e experimentais da temperatura ambiente e umidade relativa são comparados. No caso particular da radiação solar, são considerados apenas os resultados obtidos teoricamente. Na seção 7, os resultados experimentais da temperatura interna do recinto são comparados com os resultados de um modelo que estima o comportamento médio desta temperatura (LIMA, et al., 2002).

Na seção 8, após as análises experimentais e teóricas dos fatores climáticos e a interação destes com o recinto através da correlação entre sua temperatura interna e os parâmetros meteorológicos observados, são mostradas as possibilidades de climatização de habitações localizadas em Recife através de recursos passivos e com baixo consumo de energia. Em seguida, a seção 9 traz as conclusões do trabalho.

2.0 REVISÃO DA LITERATURA

O tema relacionado à bioclimatologia tem sido alvo de interesse de vários pesquisadores nos últimos anos, especialmente após a crise energética do início dos anos setenta. Por se tratar de um tema bastante amplo sobre o qual vários trabalhos científicos são desenvolvidos e publicados, a revisão bibliográfica aqui apresentada, não poderia deixar de ser seletiva e específica.

No caso específico do estudo das possibilidades de concepção de uma arquitetura bioclimática requer inicialmente de quem o faça, face à complexidade da resolução dos inúmeros problemas de adequação da edificação ao meio ambiente, um conhecimento amplo dos principais fatores ambientais que exerçam influência no dia-a-dia dos seus usuários.

2.1 CONFORTO TÉRMICO

Por se tratar de uma definição intrinsecamente vinculada aos propósitos de uma arquitetura bioclimática, o conforto térmico será a seguir discutido.

A definição do termo conforto térmico, em relação ao projeto bioclimático, aparece em muitas pesquisas de Engenharia como o “estado da mente, no qual a pessoa expressa satisfação com o ambiente térmico que o cerca”. Por outro lado, por enfatizarem outras variáveis que muitos padrões de conforto não avaliam, muitos pesquisadores preferem usar o conceito de neutralidade térmica ao de conforto térmico. Estudos comparativos dos diferentes padrões existentes e suas referidas limitações podem ser obtidos no estudo de OLESEN, (1993).

O conforto ambiental remete ao bem estar físico e psicológico. Consiste na visão integrada de um conjunto de variáveis do ambiente construído, presente em todos os aspectos do projeto arquitetônico. Dentre elas, cabe destacar as variáveis climáticas, que integram no tempo os estados físicos do ambiente atmosférico, característicos de cada local. Fatores climáticos globais representam as variáveis determinantes dos estados físicos do ambiente atmosférico, levando em consideração aspectos macroscópicos, tais como: latitude, longitude, radiação solar, ventos, temperatura e umidade ambiente. As particularidades locais determinam o micro-clima que pode ser gerado principalmente em função da topografia do solo, da vegetação, construções próximas e intervenções paisagísticas e arquitetônicas.

Conforto ambiental e a teoria dos sistemas nebulosos

BIANCHI & GONÇALVES (2000) sustentam, de um modo geral, que as questões pertinentes ao conforto ambiental apresentam características que raramente podem ser definidas com grande precisão e, por conseguinte, não podem ser analisadas por meio de métodos matemáticos baseados em lógica tradicional. Desta maneira propõem, para analisar o conforto ambiental e, em particular, para avaliar a opinião dos usuários, uma lógica difusa (teoria dos sistemas nebulosos ou lógica *fuzzy*), baseada em intervalos de valores.

Os “Quadros de Mahonney” analisam as características climáticas com a finalidade de proporcionar subsídios para desenvolver projetos arquitetônicos adequados ao meio ambiente. Com tal fim, o procedimento define, de forma subjetiva, a sensação de bem-estar ou de rigor térmico. Regiões de transição, tratadas de forma determinística, atentam contra a conservação da subjetividade implícita na metodologia. HARRIS, et al. (2000), propõem uma remodelagem da metodologia utilizada nos “Quadros de Mahonney”, baseada na teoria dos sistemas nebulosos. Os autores verificam que pequenas diferenças climáticas conduzem, como é de se esperar, a pequenas diferenças nas recomendações do procedimento.

O conceito de neutralidade térmica é desenvolvido por FANGER, (1982) onde apresenta um modelo de estado estacionário para determinar o equilíbrio térmico. Neste

estado estacionário, a taxa de geração de calor é igual a taxa de perda de calor. Desprovido de um mecanismo fisiológico de controle termo-regulador, esta perda ocorre pela pele e pela respiração.

A obtenção do conforto térmico decorre das trocas térmicas que dependem de vários fatores, regidos por grandezas e processos físicos, tais quais: radiação solar, evaporação, condução e convecção. Nestes processos físicos, muitas variáveis se fazem presentes, dentre elas: a umidade relativa do ar, temperaturas das superfícies que envolvem o indivíduo, a resistência térmica das vestimentas e até mesmo o nível de atividade que o mesmo está desempenhando.

Vários pesquisadores buscam estabelecer padrões definidos de conforto. Para tanto, procuram delinear zonas e estabelecer vários limites, de maneira a atender o maior número possível de pessoas.

Apesar da versatilidade do ser humano de adaptar-se a diferentes tipos de clima, experiências comprovam que existem limites mínimos e máximos de temperatura, umidade e velocidade do ar que definem as condições ideais de conforto. Temperatura entre 22^o C e 26^o C, umidade relativa do ar entre 40% e 60% e velocidade do ar em torno de 1 m/s são considerados parâmetros internacionais de conforto (FROTA & SCHIFFER, 2000). As variações para mais ou para menos são aceitáveis em função das condições climatológicas locais ou das estações do ano.

A carta bioclimática desenvolvida por GIVONI (1992), adotada no Brasil, é útil no sentido de realçar a importância exercida pelas variáveis climáticas atuantes em uma habitação e suas influências na sensação de conforto ou desconforto térmico por parte dos seus usuários e por propor estratégias de conforto de caráter geral para determinada localidade.

A radiação solar, por se tratar de um fator atuante sobre a construção em grande parte do dia, exerce um papel decisivo no seu aquecimento. Numa cidade como Recife, que apresenta baixas amplitudes térmicas e umidade relativa elevada ao longo do ano, os cuidados com a influência das variáveis climáticas, especialmente a radiação solar, é fundamental. Para se obter os valores de radiação solar incidente em cada superfície (paredes e teto) da edificação, foram utilizados procedimentos de cálculos disponíveis na

literatura específica (FRAIDENRAICH & LYRA, 1995; DUFFIE & BECKMAN, 1974; RABL, 1985).

Os italianos SPIRITO & VITALE (1982) desenvolveram um modelo teórico que, a partir de variáveis peculiares à geometria solar e dados conhecidos e provenientes das normais climatológicas, reproduzem o comportamento diário das variáveis temperatura ambiente e umidade relativa para uma determinada localidade.

Análise de custo-benefício

Uma análise realizada na região metropolitana de Monterrey, México (FITCHER & MORILLÓN, 2001) mostra a importância, do ponto de vista econômico e ambiental, de um projeto que considere as exigências de conforto térmico adequadas às características climáticas locais. Acréscimos no custo de investimento, decorrentes de procedimentos de climatização com baixo consumo de energia, permitem economias no custo operacional do edifício, com a vantagem adicional de menor agressão ao meio ambiente.

Iluminação natural e conforto térmico

Um trabalho sobre o desenho bioclimático de escolas em climas subtropicais (Província de Tucumán, Argentina), realizado por ADJMAT & GUIJARRO (2001), mostra o equilíbrio que deve ser guardado entre a iluminação natural, admitida em um recinto, e a exclusão de radiação solar, necessária para preservar as condições de conforto térmico do local. Mediante o uso de um *software*, correlaciona-se o comportamento térmico dos ambientes interiores com a utilização de proteções externas das janelas.

Tema similar é analisado por GONZALO, et al., (2001) no caso de edifícios destinados a atividades escolares e escritórios, localizados na Província de Tucumán, Argentina. Os autores partem do pressuposto que o uso de janelas retraídas da frente do prédio, que permitem o ingresso de radiação difusa e bloqueiam a radiação direta nas horas de maior incidência da radiação solar, podem ser uma solução adequada para poder contar com iluminação natural sem afetar negativamente as condições de conforto térmico. Resultados experimentais, obtidos com um protótipo, confirmam a hipótese inicial.

Modelos de recintos no clima de Recife

A interação entre as variáveis climáticas que determinam o conforto térmico e um recinto localizado na cidade de Recife, foi analisada por BRITO & FRAIDENRAICH (1981). Trata-se de um modelo simplificado que considera um recinto formado por duas paredes paralelas, sendo uma externa, sobre a qual incide radiação solar, e outra interna. As soluções obtidas fornecem a variação temporal da temperatura interna para diversas situações de interesse, tais como: a) várias espessuras da parede externa; b) produção interna de calor ou esfriamento por meios ativos (aquecedores ou condicionadores de ar) e c) diversas massas térmicas localizadas no interior do recinto. São apresentadas soluções numéricas e discutidos os resultados. As soluções foram expressas em função de números adimensionais que representam o efeito da espessura, da radiação solar, da massa térmica do recinto e da produção interna de calor.

Parâmetros importantes, como o fenômeno de atenuação da amplitude térmica interna, e o deslocamento temporal ou retardo do valor máximo da temperatura interna com relação à temperatura externa, foram calculados em função desses números. O aumento da espessura da parede acentua os efeitos de atenuação da amplitude térmica interna e o retardo temporal. A radiação solar altera o perfil de temperatura interna e aumenta seu valor médio. A massa térmica interna atenua a amplitude térmica interna, sem alterar a forma do perfil e seu valor médio, aspectos determinados pelas características físicas do recinto. O efeito da produção de calor depende basicamente do perfil temporal. Um perfil uniforme, positivo ou negativo, desloca a temperatura para valores mais elevados ou mais baixos, respectivamente, modificando, conseqüentemente, o valor médio da mesma.

As ferramentas desenvolvidas no trabalho acima mencionado foram utilizadas pelos autores para analisar a influência das variações temporais da temperatura no consumo de energia elétrica para acondicionamento de recintos localizados na cidade de Recife (BRITO & FRAIDENRAICH, 1983). Calcula-se, dessa forma, a quantidade de energia térmica que deve ser retirada ou fornecida para se obter uma dada temperatura de conforto. Finalmente, é estimada a quantidade de energia elétrica necessária para acionar um sistema de refrigeração ideal que retire essa quantidade de calor do recinto. Uma parcela da energia

elétrica está associada ao valor médio da quantidade de calor a ser retirada e outra a suas flutuações.

Um modelo que considera a envolvente de um recinto, ou seja, a influência de todas as paredes, do teto e do piso, foi desenvolvido recentemente (LIMA, et al., 2002). Obtém-se como resultado a temperatura interna média diária para cada mês do ano. O modelo foi utilizado para estimar, na localidade de Recife, o aumento da temperatura média interna com relação à temperatura média externa, quando o recinto está sujeito à incidência da radiação solar e aos ventos. São calculadas também suas temperaturas ar-sol e temperaturas médias. Os resultados permitem visualizar o papel que desempenha cada uma das superfícies que fazem parte da envolvente e idealizar, portanto, soluções arquitetônicas que amenizem o rigor do clima da cidade do Recife.

2.2 A CARTA BIOCLIMÁTICA E SUAS ESTRATÉGIAS DE CONFORTO

O principal aspecto a ser tratado neste tópico refere-se à carta bioclimática de GIVONI (1992), detalhando-se as suas características. O modelo de carta ora apresentado resulta de um processo evolutivo iniciado pelos irmãos OLGAY (1963) até o modelo adotado atualmente para cidades de países em desenvolvimento, situadas em regiões quentes e úmidas.

Em 1979, publica-se a carta bioclimática revisada por GIVONI & MILNE, considerada mais evoluída por ter sido desenhada sobre uma carta psicométrica convencional e por ter utilizado também umidade absoluta como referência. A zona de conforto foi adaptada para regiões de clima temperado. GIVONI & MILNE (1979), quando analisam a carta bioclimática de OLGAY (1963), observam que são aplicáveis estritamente ao ambiente externo, pois todos os parâmetros utilizados no método consideram a edificação como completamente aberta a este ambiente. Relata, entretanto, o fato de que as condições internas de uma edificação de maior massa podem ser muito diferentes das condições ambientais exteriores, podendo apresentar a temperatura máxima

interna muito menor que a temperatura máxima externa. E considera ser um método mais apropriado para analisar edificações de massa “leve”, situadas em regiões úmidas.

A maior evolução da carta de GIVONI & MILNE (1979) em relação a de OLGYAY (1963) deve-se ao fato de que estendem a zona de conforto por meio das zonas das estratégias bioclimáticas. Relacionando as alterações das condições climáticas externas através de princípios básicos de projetos da edificação, juntamente com propriedades de sua envoltória, busca as condições internas de conforto térmico e procura tornar-se mais inerte ao clima externo.

A carta revisada por GIVONI & MILNE (1979) procurou também adaptar a carta para climas mediterrâneos e tropicais para ser utilizada em cidades da Venezuela. Os limites, tanto da zona de conforto, quanto das demais regiões estratégicas, ampliaram-se, principalmente nos casos de ventilação e massa térmica.

Em seu trabalho de 1992, GIVONI apresenta uma nova revisão para sua carta, com alterações baseadas em questionamentos e observações de estudos desenvolvidos por vários pesquisadores, sobre a aplicabilidade de padrões de conforto até então utilizados para qualquer país ou região. Este pesquisador observou que as pessoas que vivem e trabalham em cidades situadas em regiões úmidas e quentes, apresentavam-se aclimatadas para valores superiores de temperatura. Tal conclusão surgiu a partir de pesquisas sistemáticas, onde foram registrados em uma mesma carta psicométrica, dados climáticos de uma cidade mexicana (Colima). O gráfico resultante determinou a necessidade de condicionamento de ar mecânico durante todo o dia, para obtenção de conforto. A maioria das edificações de países subdesenvolvidos, em razão dos baixos níveis de renda familiar, não apresenta sistema de condicionamento de ar mecânico instalado. Observou-se que, na prática, as pessoas sob estas condições climáticas, respondiam de forma diferente ao que a teoria indicava.

Pelos resultados obtidos por GIVONI (1992), constatou-se a necessidade de haver uma diferenciação das diretrizes para projetos de edificações, baseadas em diagramas de conforto, propondo-se, então, duas cartas bioclimáticas: uma para países de clima temperado e outra para países de clima quente e úmido.

Observou-se que as cartas bioclimáticas resultantes destes novos estudos apresentaram os limites da zona de conforto alterados. Os países com zonas de clima

temperado, aproximaram-se mais da carta original, e os países com clima quente e úmido, demonstraram, para a obtenção de conforto, um maior inter-relacionamento dos níveis mais altos de temperatura em relação a umidade. A definição de muitas zonas, registradas nesta última carta, decorreu de pesquisas passadas do autor, observando-se que o objetivo desta carta foi o de rever e discutir estratégias de resfriamento.

A revisão de 1992 da carta de GIVONI encontra seu maior mérito na aplicabilidade aos países de clima quente e úmido, onde não existe fácil acesso a formas artificiais de condicionamento de ar e onde o fator de aclimação, bem como as características da região, refletem uma realidade própria.

2.2.1 Carta bioclimática adotada no Brasil

Antes do detalhamento das zonas estratégicas da carta bioclimática proposta por GIVONI (1992), vale destacar alguns conceitos físicos importantes para a sua melhor compreensão. O diagrama psicrométrico, sobre o qual as zonas estratégicas são sobrepostas, é delimitado por linhas representativas dos seguintes parâmetros climáticos:

Razão de umidade (r_u) é a relação entre a quantidade de vapor de água em gramas por quilogramas do ar seco (g/kg) e é representada no diagrama psicrométrico pelas linhas horizontais, variando em intervalos de 1 g/kg entre linhas. O ar a uma certa temperatura pode suportar só uma certa quantidade de umidade. O limite possível é conhecido como **umidade de saturação (u_s)**. Representando-se a umidade de saturação versus temperatura de bulbo seco, tem-se a base da carta psicrométrica;

Umidade relativa (UR) é uma expressão do conteúdo de umidade de uma dada atmosfera como porcentagem da umidade de saturação à mesma temperatura, ou seja: **UR = $100 \cdot r_u / u_s$ (%)**. No diagrama psicrométrico, a Umidade Relativa é representada por linhas curvas e varia de 10% entre linhas até atingir o seu valor máximo 100%;

Temperatura de bulbo úmido (TBU) é a temperatura medida por um termômetro com o bulbo envolto por uma mecha mantida úmida com água destilada e ventilado por um

ventilador ou pelo movimento giratório quando parte de um psicrômetro. A temperatura de bulbo úmido é representada por linhas transversais e varia de 1° C o intervalo entre linhas;

Temperatura de bulbo seco (TBS) é a temperatura medida por um termômetro em contato com o meio ambiente sem o seu bulbo envolto por uma mecha mantida úmida com água destilada e ventilado por um ventilador. No diagrama psicrométrico é representada por linhas verticais e varia de 1° C entre linhas. A temperatura de bulbo seco representa a temperatura ambiente.

Baseado em estudos realizados em países em desenvolvimento com características climáticas similares às do Brasil, clima predominantemente quente e úmido, GIVONI (1992) propôs um modelo de carta bioclimática que, quando conhecido o comportamento das variáveis ambientais, pode-se delimitar áreas que refletem a melhor estratégia de conforto a ser adotada para determinada cidade (Fig. 2.1).

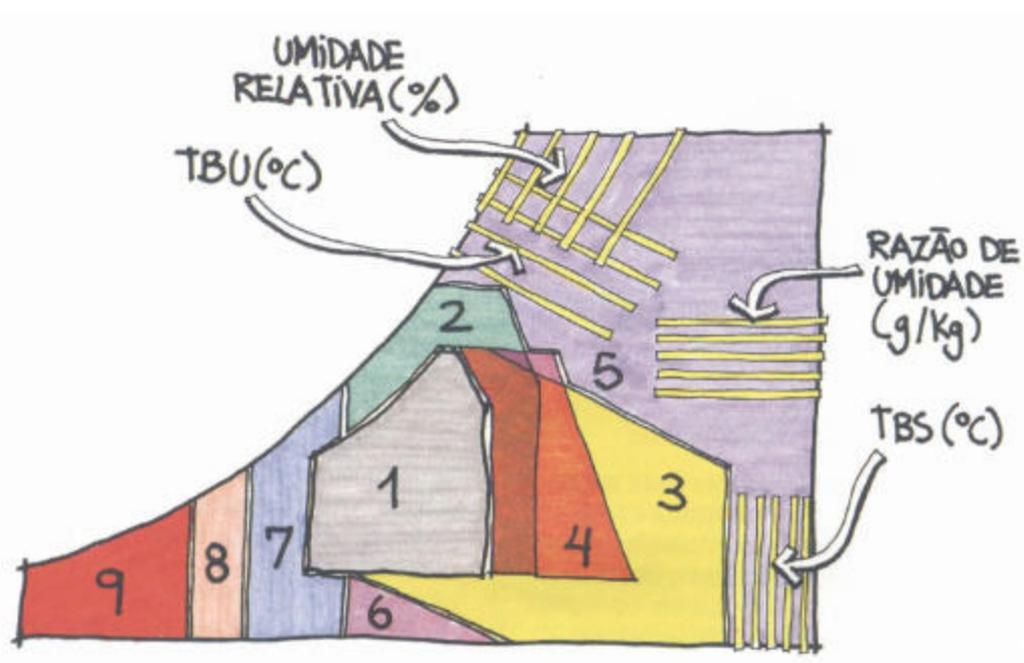


Figura 2.1 Carta bioclimática adotada no Brasil e delimitação das zonas estratégicas

Zona de conforto (1); Zona de ventilação (2); Zona de resfriamento evaporativo (3); Zona de massa térmica para resfriamento (4); Zona de ar-condicionado (5); Zona de umidificação (6); Zona de massa térmica para aquecimento (7); Zona de aquecimento solar passivo (8); Zona de aquecimento artificial (9).

O organismo humano pode estar em conforto mesmo em diversos limites de umidade relativa (entre 20% e 80%) e de temperatura (entre 18^o C e 29^o C), como se verifica em lugares de clima quente e úmido (GIVONI, 1992).

Assim, por exemplo, nas condições delimitadas pela zona destacada na Fig. 2.2 (a) (zona de conforto) haverá uma grande probabilidade de que as pessoas se sintam confortáveis no ambiente interior. Quando o ambiente interior estiver com temperatura próxima a 18^o C, deve-se evitar o impacto do vento, que pode produzir desconforto. Em situações de temperatura próxima a 29^o C é importante controlar a incidência da radiação solar sobre as pessoas.

Analisando ainda a Fig. 2.2 (b) na zona delimitada (ventilação) observa-se que se a temperatura do interior ultrapassar os 29^o C ou a umidade relativa for superior a 80%, a ventilação pode melhorar a sensação térmica. No clima quente e úmido, adota-se a ventilação cruzada, fazendo, porém, que a temperatura interior acompanhe a variação da temperatura exterior. Supondo que a velocidade máxima permitida para o ar interior é da ordem de 2 m/s, a ventilação é aplicável até o limite de temperatura exterior de 32^o C, pois a partir daí os ganhos térmicos por convecção tornam esta estratégia indesejável.

Em regiões onde a temperatura diurna é maior que 29^o C e a umidade relativa é inferior a 60%, o resfriamento convectivo noturno é mais adequado.

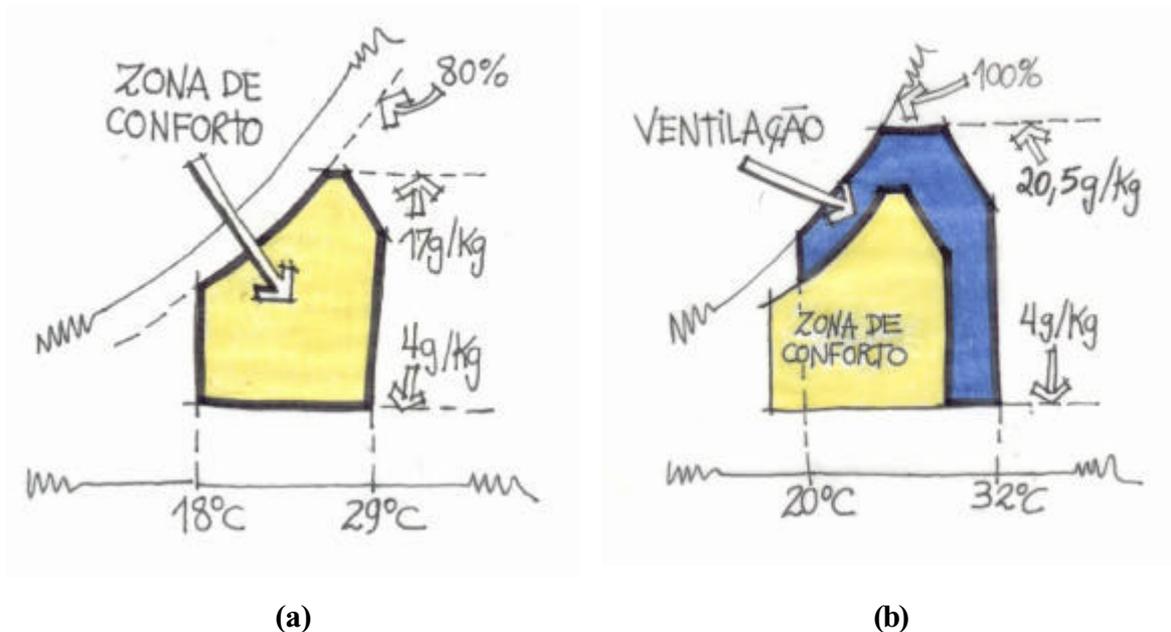


Figura 2.2 Delimitação da zona de conforto (a) e de ventilação (b).

Observando a Fig. 2.3 (a), pode-se concluir que a divisão da região de ventilação em duas representa uma estratégia aplicável principalmente em regiões áridas, onde a temperatura diurna é de 30°C a 36°C e a temperatura noturna se situa por volta de 20°C . O princípio bioclimático se resume a controlar a ventilação durante o dia para reduzir o ingresso de ar quente e incrementar a ventilação noturna, aproveitando o ar mais fresco para resfriar o interior.

Em regiões áridas, onde a temperatura diurna é superior a 36°C , a ventilação noturna não é suficiente para o conforto. Outros sistemas de resfriamento (ar condicionado, resfriamento evaporativo ou massa térmica) são necessários. Mesmo assim o resfriamento convectivo não deve ser descartado, pois pode significar a redução do tempo de uso dos outros sistemas.

Os recursos que se fundamentam na evaporação da água diretamente no ambiente que se quer resfriar denomina-se resfriamento evaporativo direto e podem ser representados pelo uso de vegetação (evapotranspiração), fontes de água, espelhos d'água, molhagem do telhado etc.

No resfriamento direto dos espaços interiores através da evaporação se requer boa taxa de ventilação para evitar o acúmulo de vapor de água. Considerando-se este fator,

pode-se sugerir que o resfriamento evaporativo é aconselhável apenas quando a temperatura de bulbo úmido (TBU) máxima não excede os 24°C e a temperatura de bulbo seco (TBS) máximo não ultrapassa os 44°C , de acordo com a representação na Fig. 2.3 (b).

O emprego de tanques de água sombreados no telhado constitui uma forma indireta de resfriamento do interior da construção. Neste caso, a temperatura da água inicialmente é igual à do ambiente interior. Com a evaporação, a água perderá calor, diminuindo a temperatura do teto e, conseqüentemente, a temperatura radiante média do interior.

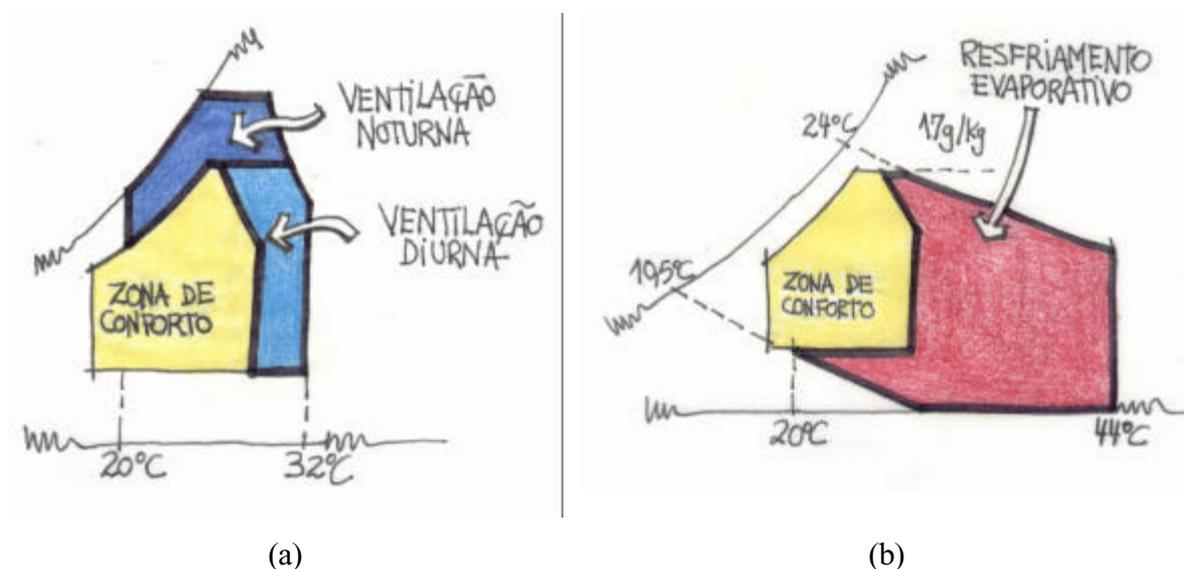


Figura 2.3 Zona de ventilação, destacando-se a diurna e noturna (a) e zona de resfriamento evaporativo (b).

A estratégia verificada na Fig. 2.4 (a) (massa térmica para resfriamento) pode ser usada com sucesso em locais onde as condições de temperatura e umidade relativa se situam entre os limites da zona de massa térmica e consiste no uso da inércia térmica de uma edificação, podendo diminuir a amplitude da temperatura interior em relação à exterior, evitando-se os picos.

O comportamento da temperatura em um ambiente que se utilize desta estratégia é o seguinte: o calor armazenado na estrutura térmica da edificação durante o dia é devolvido ao ambiente somente à noite, quando as temperaturas externas diminuem. De forma

complementar, a estrutura térmica resfriada durante a noite, permanece fria durante a maior parte do dia, reduzindo as temperaturas interiores nestes períodos.

Analisando a Fig. 2.4 (b), observa-se que a estratégia representada pela utilização de ar condicionado deve ser empregada em regiões nas quais o clima apresenta-se muito severo, ultrapassando os limites de temperatura e umidade relativa que tornam viável a aplicação de algum sistema passivo para resfriamento. A utilização de ar condicionado é recomendada para climatização quando a temperatura de bulbo seco for maior que 44°C e a de bulbo úmido for superior a 24°C . O uso dos sistemas naturais de resfriamento pode não ser suficiente nestas condições extremas, mas poderão, se empregados conjuntamente ao ar condicionado, reduzir a dependência do ambiente ao uso deste e, conseqüentemente, o consumo de energia.

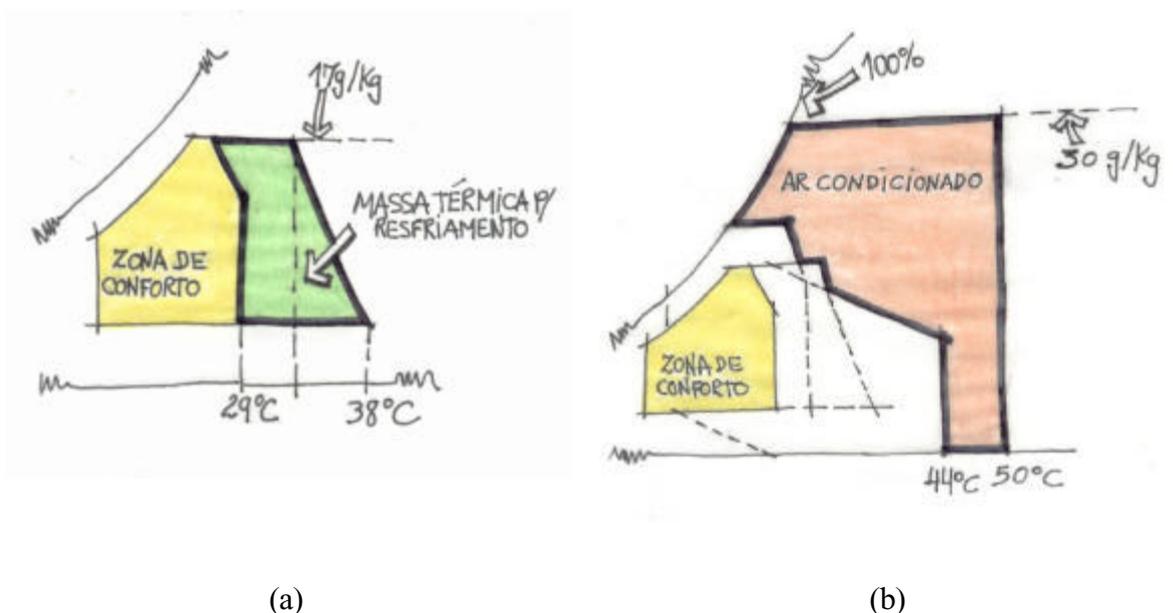


Figura 2.4 Zona de massa térmica para resfriamento (a) e zona de ar condicionado (b).

A Fig. 2.5 (a) mostra a região na qual a estratégia de umidificação emprega-se quando a umidade relativa do ar for muito baixa e a temperatura é inferior a 27°C , ocasionando desconforto térmico devido à secura do ar. Nestes casos, a umidificação do ar melhora a sensação de conforto ainda que possa produzir um efeito de resfriamento evaporativo indesejável. Alguns recursos simples podem ser empregados no interior dos ambientes, como a utilização de recipientes com água e a hermeticidade das aberturas, que

ajudam a conservar o vapor proveniente das plantas e das atividades realizadas no interior da construção.

Na região da carta, situada entre 14°C e 20°C (ver Fig. 2.5 (b)), pode-se utilizar a massa térmica junto ao aquecimento solar passivo ou o aquecimento solar passivo com isolamento térmico. A primeira alternativa (massa térmica com ganho solar) pode compensar as baixas temperaturas pelo armazenamento do calor solar, que fica retido nas paredes da edificação e pode ser devolvido ao interior nos horários mais frios, geralmente à noite. Na segunda opção (aquecimento solar com isolamento térmico), podem-se evitar as perdas de calor da edificação para o exterior enquanto se aproveitam os ganhos de calor internos (pessoas, aparelhos elétricos, cozinha e banho), aumentando a temperatura interior.

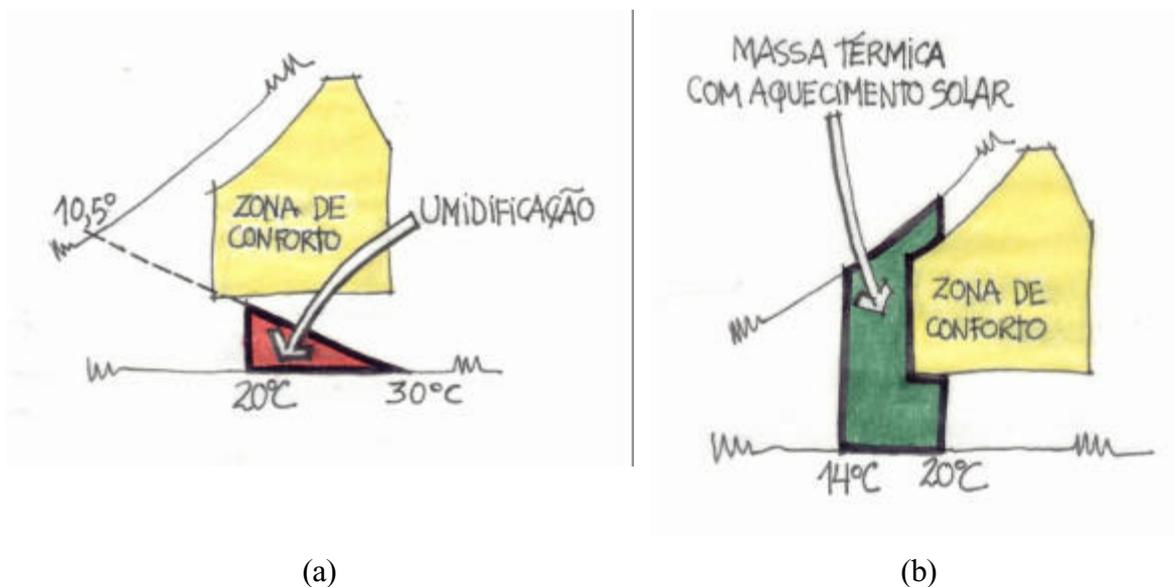


Figura 2.5 Zona de umidificação (a) e zona de massa térmica com aquecimento solar (b).

Na Fig. 2.6 (a) observa-se a região na qual a estratégia do aquecimento solar passivo é mais indicada quando a zona estiver compreendida entre 10°C e 14°C . Nesta região, é recomendado o isolamento térmico do edifício de forma mais rigorosa, pois as perdas de calor tenderão a ser muito grandes. O edifício deve incorporar superfícies envidraçadas orientadas ao sol, aberturas reduzidas nas orientações menos favoráveis e proporções apropriadas de espaços exteriores para coletar energia solar no inverno.

Em locais frios, com temperaturas normalmente inferiores a 10°C , o aquecimento solar passivo pode não ser suficiente para o conforto, recorrendo-se ao emprego do aquecimento artificial (ver Fig. 2.6 (b)). Convém lembrar que o uso em conjunto dos dois sistemas (artificial e solar passivo) é aconselhável, pois reduz a dependência do consumo de energia para condicionamento.

Na verdade, a carta bioclimática oferece um panorama geral das zonas estratégicas cuja utilização depende essencialmente de informações advindas das estações meteorológicas.

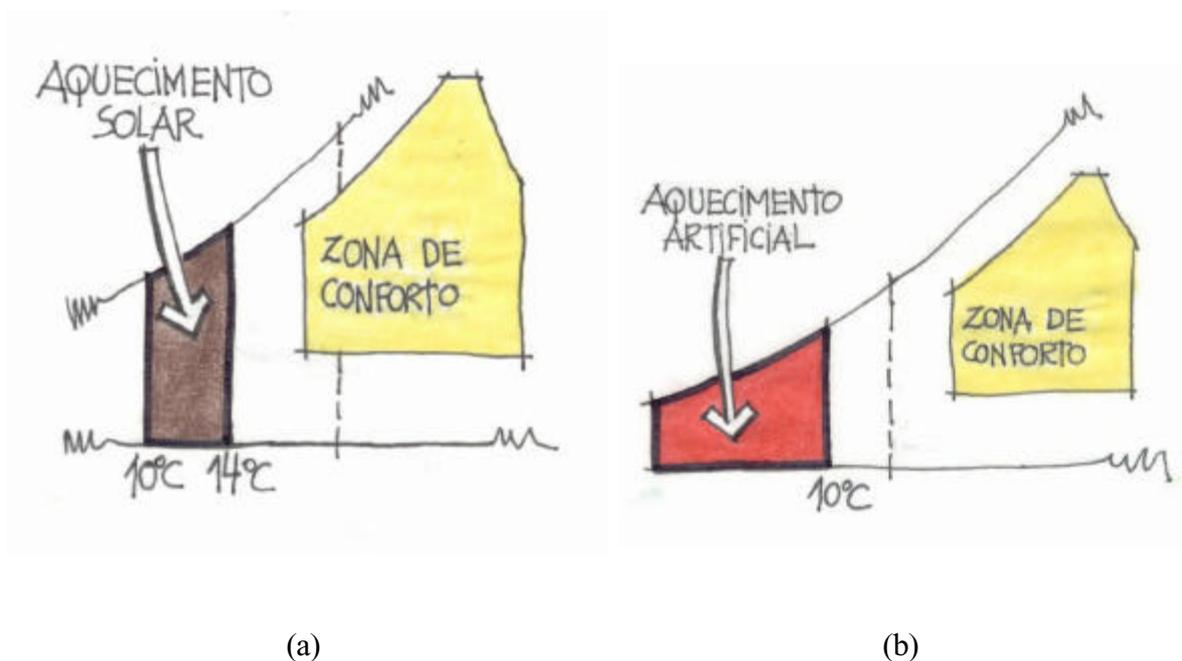


Figura 2.6 Zona de aquecimento solar passivo (a) e zona de aquecimento artificial (b).

A Fig. 2.7 mostra as interseções entre as regiões de ventilação, massa térmica para resfriamento e resfriamento evaporativo. A região “A” representa a interseção entre a zona de ventilação e a zona de massa térmica para resfriamento. Para esta situação, pode-se adotar ambas as estratégias, inclusive simultaneamente.

Seguindo o mesmo raciocínio, na região “B” pode-se utilizar os benefícios da massa térmica para resfriamento ou do resfriamento evaporativo. E, na região “C”, as três estratégias podem ser aplicadas separadamente ou em conjunto.

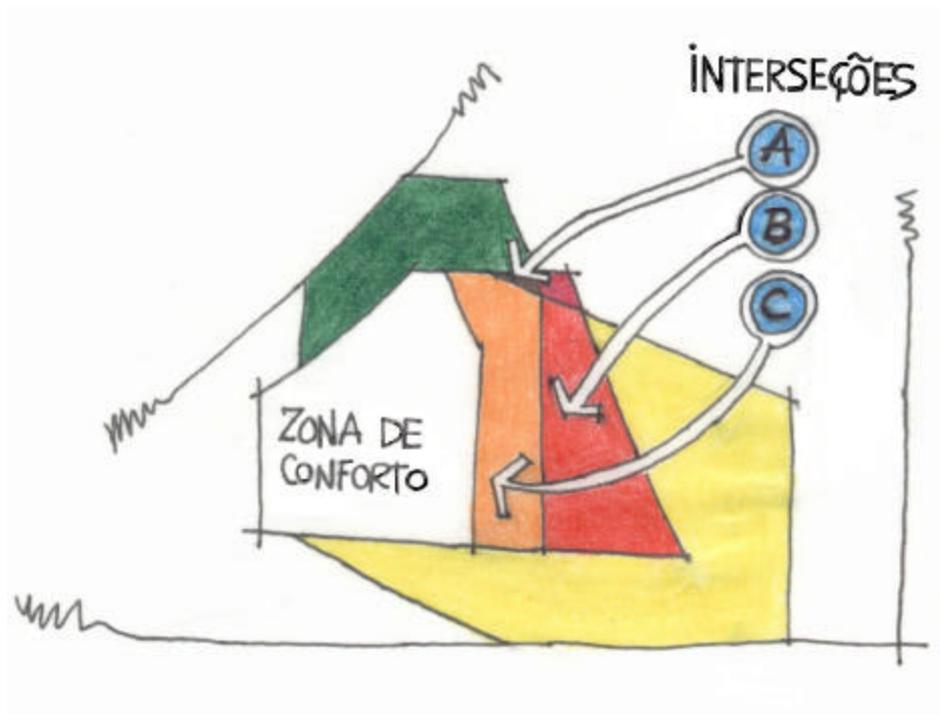


Figura 2.7 Interseções entre ventilação, massa térmica para resfriamento e resfriamento evaporativo.

2.2.2 O clima de Recife e as estratégias adotadas

Segundo dados apresentados por LAMBERTS, et al. (1997), baseados na carta bioclimática de GIVONI (1992), o clima de Recife, apresenta temperaturas geralmente entre 20^o C e 29^o C e umidades relativas quase sempre superiores a 60%. O conforto térmico atinge 31,6% das horas do ano e o desconforto totalmente provocado pelo calor, chega a 68,3 % das horas do ano. As estratégias recomendadas para Recife são:

- Ventilação 60,8 %
- Ventilação, massa térmica para resfriamento e resfriamento evaporativo (7,1%)

A carta bioclimática, adotada para cidade de Recife, é mostrada a seguir (LAMBERTS, et al., 1997). Cada ponto representa valores horários para cada dia do ano e,

naturalmente, decorrem do monitoramento das variáveis características do diagrama psicométrico, tais quais: temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, umidade relativa e temperatura ambiente. O resultado da representação dos pontos é uma mancha que abrange parte das regiões estratégicas comentadas anteriormente (ver Fig. 2.8).

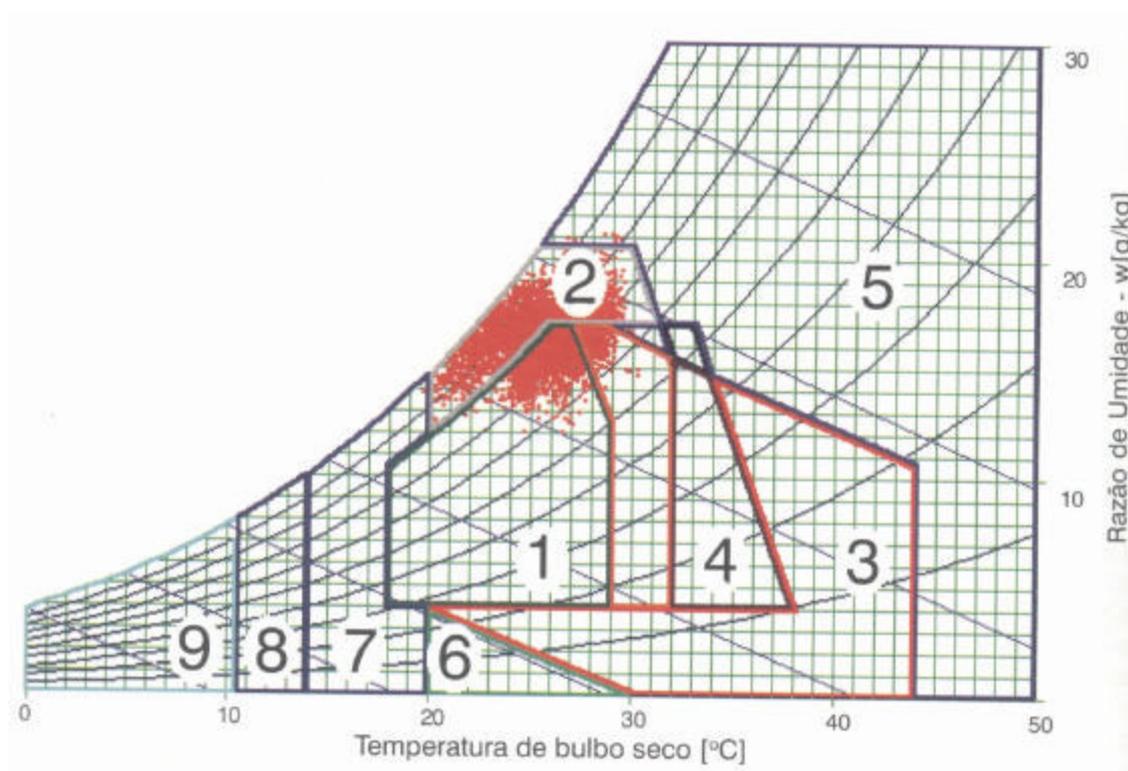


Figura 2.8 Carta bioclimática com as estratégias de conforto indicadas para Recife.

3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DE DETERMINAÇÃO DOS FATORES CLIMÁTICOS E DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UM RECINTO

Com o propósito de analisar a influência dos fatores climáticos em um recinto localizado na cidade de Recife, foram realizados experimentos ao longo de cinco meses na área de testes do Grupo de Fontes Alternativas de Energia (FAE) do Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). As grandezas monitoradas foram: velocidade e direção do vento, temperatura ambiente e umidade relativa e temperatura interna do recinto.

O experimento foi montado no final do mês de fevereiro do ano de 2001, e as primeiras medições foram iniciadas no mês seguinte. Os dados foram registrados em intervalos de 5 minutos.

Para viabilizar a análise simultânea das variáveis medidas, foram utilizados dois arranjos experimentais: um instalado em um dos laboratórios do Grupo FAE responsável pelo monitoramento da temperatura interna do recinto e, o segundo, no laboratório meteorológico próximo ao primeiro, responsável pela coleta dos dados de temperatura ambiente, umidade relativa, direção e velocidade do vento (ver Fig. 3.1).

No arranjo destinado ao acompanhamento da temperatura interna do recinto, foram utilizados seis sensores distribuídos em pontos estratégicos do laboratório.



Figura 3.1 Vista dos laboratórios localizados na área de testes do Grupo FAE (em primeiro plano, à esquerda, o laboratório com a estação meteorológica e, à direita, o recinto cujas temperaturas internas foram monitoradas).

Devido a problemas técnicos na coleta de dados ocorridos durante alguns dias e, para compatibilizar as medidas realizadas dentro e fora do recinto, houve a necessidade de filtragem dos dados coletados. Os dias remanescentes desta filtragem (Tab. 3.1) passaram a constituir a base representativa do processo experimental tratado no presente trabalho.

Tabela 3.1 Dias válidos utilizados na caracterização das grandezas físicas estudadas (temperatura ambiente, temperatura interna, umidade relativa, velocidade e direção do vento)

Mês	Dias de medições válidos (ano de 2001)																						
MAR.	10	11	13	17	18	24	25	28	29	30													
ABR.	01	02	03	04	08	09	11	12	13	14	15	16	17	18	21	22	23	24	29				
MAI.	05	06	07	08	09	12	13	28															
JUN.	03	05	11																				
NOV.	04	05	06	11	15	16	17	18	21	24	25	30											

3.1 DESCRIÇÃO DO RECINTO ESTUDADO

O recinto utilizado como referência possui paredes em alvenaria revestida com argamassa e pintada na cor branca, teto formado por uma laje plana revestida com pintura betuminosa, revestimento do piso em cimento queimado, espessura das paredes e laje em torno de 15 centímetros e pé-direito aproximadamente de 3,06 m.

A planta baixa do recinto é mostrada na (Fig. 3.2). Os pontos S1 a S6 mostram a localização dos sensores utilizados para as medições de temperatura interna.

Características da construção:

As Figuras 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 representam o ambiente no qual os dados da temperatura interna foram monitorados e coletados.

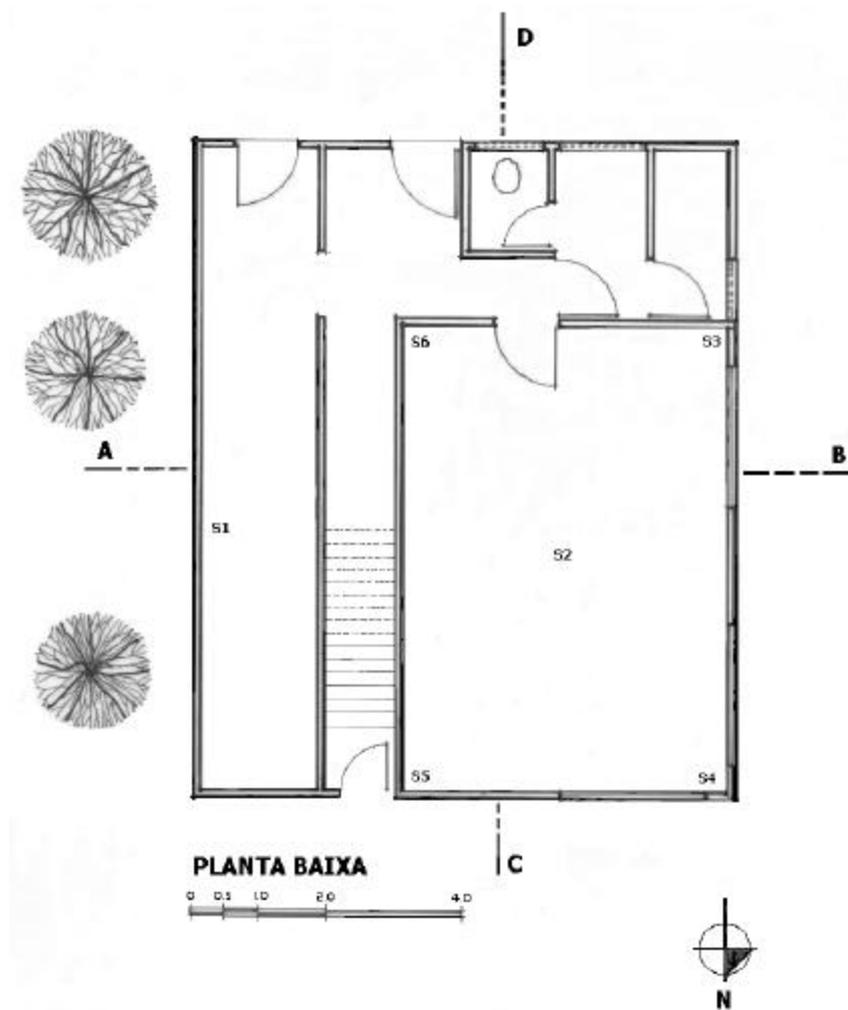


Figura 3.2 Planta baixa do laboratório utilizado para o monitoramento da temperatura interna com as indicações da localização do arranjo dos seis sensores.



Figura 3.3 Fachada SUL do laboratório utilizado para o monitoramento da temperatura interna.



Figura 3.4 Fachada OESTE do laboratório utilizado para o monitoramento da temperatura interna.

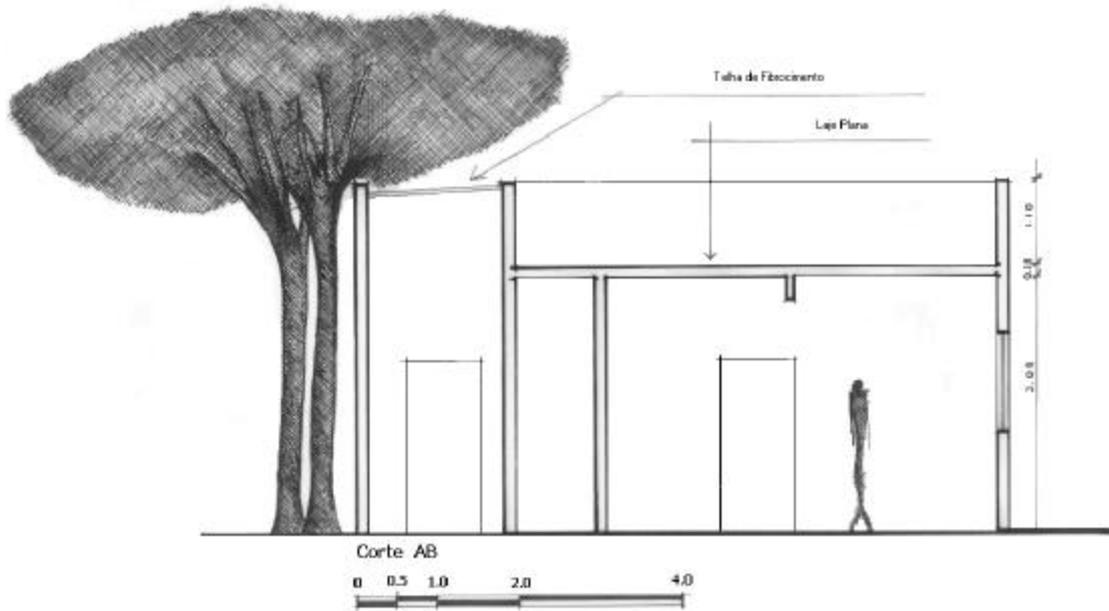


Figura 3.5 CORTE AB do laboratório utilizado para o monitoramento da temperatura interna.

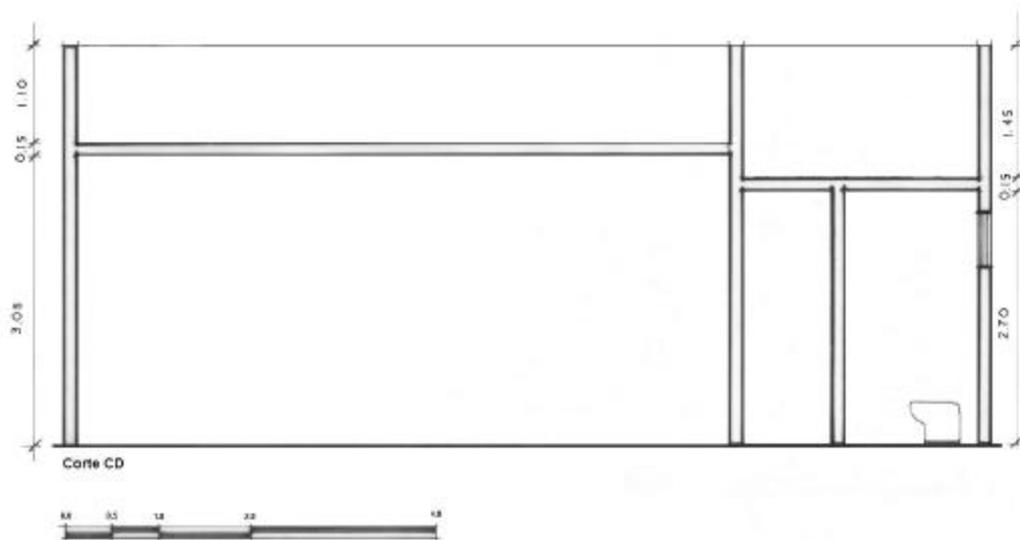


Figura 3.6 Corte CD do laboratório utilizado para o monitoramento da temperatura interna.

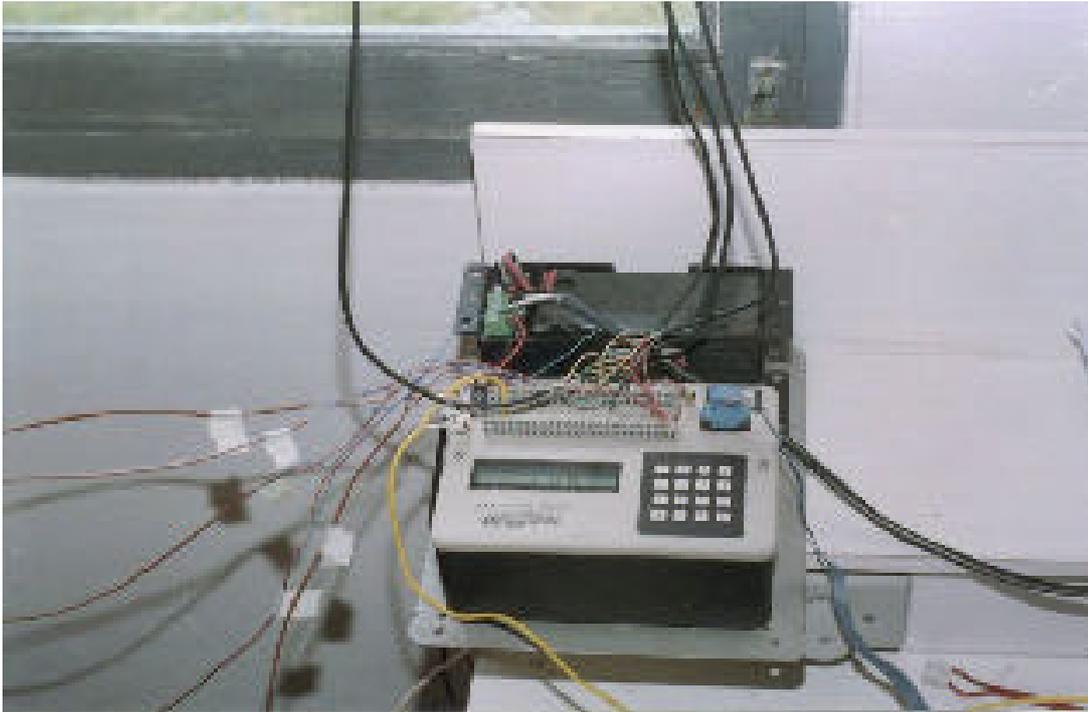


Figura 3.8 Detalhe do “datalogger” utilizado para armazenar os dados da temperatura interna

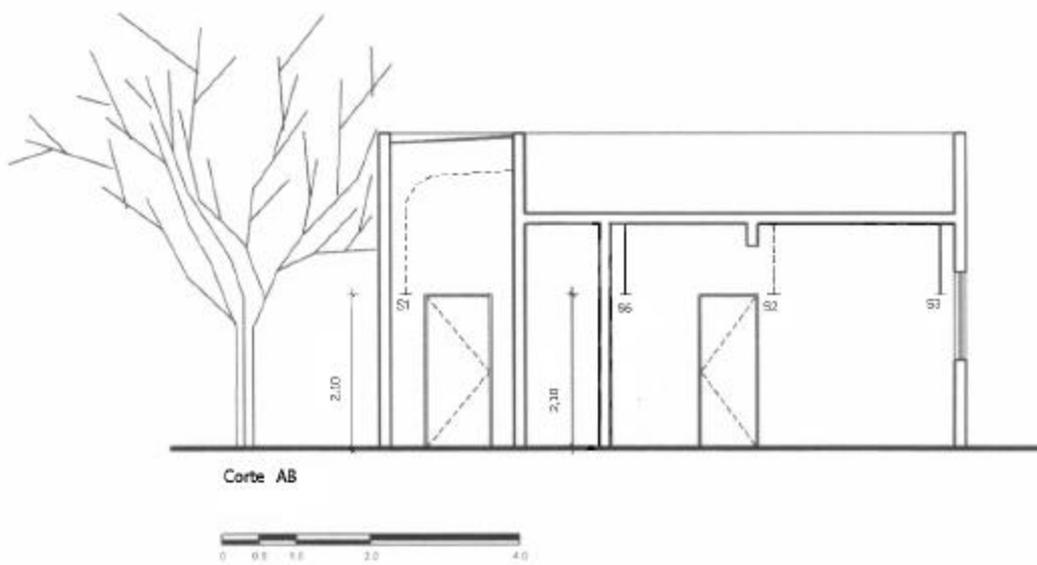


Figura 3.9 Detalhe do posicionamento dos sensores LM35 no recinto

3.2.2 Medição da temperatura ambiente, umidade relativa, direção e velocidade do vento

A temperatura externa, umidade relativa, direção e velocidade do vento foram medidas na estação meteorológica do grupo FAE (laboratório - Fig. 3.1). Assim como as medidas de temperatura interna, os instrumentos utilizados foram acoplados a um “datalogger” (sistema de aquisição de dados) e posteriormente processados.

As medidas de umidade relativa, temperatura ambiente, velocidade e direção do vento foram realizadas com sensores da marca Campbell (Figs. 3.10 e 3.11).



Figura 3.10 Sondar Modelo HMP35C utilizado para medir umidade relativa e temperatura ambiente.

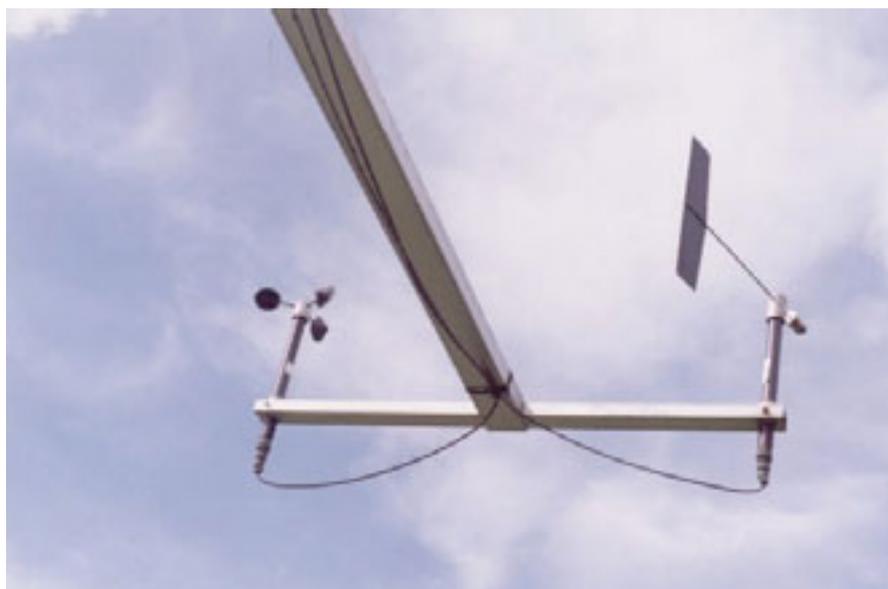


Figura 3.11 Anemômetro (à esquerda) e o instrumento utilizado para medir a direção do vento (à direita).

O Sondar modelo HMP35C (Fig. 3.10) apresenta o sensor de temperatura ambiente com precisão de $\pm 0,4^{\circ} \text{C}$ no intervalo de -33°C a $+ 48^{\circ} \text{C}$. Quanto ao sensor de umidade relativa, também parte integrante do sondar modelo HMP35C, apresenta um alcance de medição entre 0 a 100% de umidade relativa e precisão de $\pm 1\%$, cuja temperatura de operação varia entre -20°C a 60°C .

As medidas de velocidade e direção do vento foram realizadas com sensores localizados a uma altura de aproximadamente 4 m do solo (Fig. 3.11). O sensor de direção do vento fornece uma leitura de um ângulo α em graus (partindo da direção norte, no sentido horário). Para valor de $\alpha = 0^{\circ}$, vento no sentido Norte-Sul; para $\alpha = 90^{\circ}$, vento no sentido Leste-Oeste (ver fig. 3.12). As medidas de velocidade do vento são dadas em m/s e o sensor registra apenas valores acima de 0,5 m/s.

Segundo informações fornecidas pelo terceiro distrito de meteorologia de Recife, os instrumentos de medição de velocidade e direção do vento são posicionados a uma altura de 10m do solo.

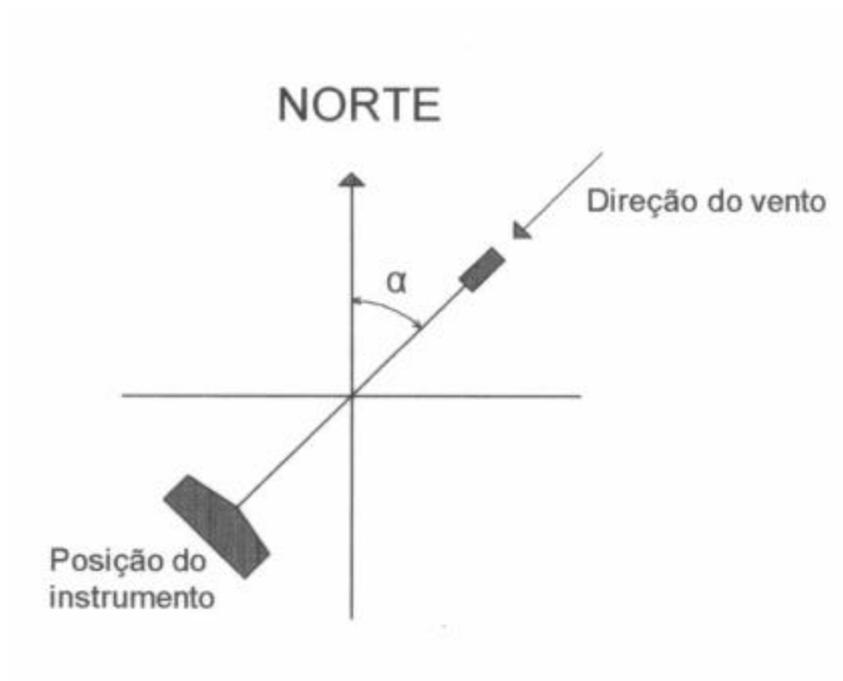


Figura 3.12 Posicionamento do instrumento utilizado para registrar a direção do vento

4.0 MEDIÇÃO DAS GRANDEZAS METEOROLÓGICAS

4.1 UMIDADE RELATIVA E TEMPERATURA AMBIENTE

Os valores medidos de temperatura ambiente e umidade relativa foram representados, para cada mês, ao longo dos dias analisados. Os resultados dos perfis experimentais são apresentados nas figuras 4.1 a 4.5.

Observa-se nas Figs. 4.1 a 4.5 que as variáveis analisadas apresentam um comportamento oposto ao longo do dia. A umidade relativa atinge o seu ponto máximo de manhã (aproximadamente às 6 horas). A partir deste ponto, decresce atingindo o seu mínimo, próximo ao meio dia, voltando a crescer atingindo outro ponto de máximo local, próximo da meia noite. Quanto à temperatura ambiente, percebe-se exatamente o contrário. Parte de um ponto de mínimo, próximo às 6 horas, onde, a partir deste ponto, começa a crescer até atingir o ponto de máximo, próximo ao meio dia, voltando a decrescer até atingir outro ponto de mínimo, próximo da meia noite.

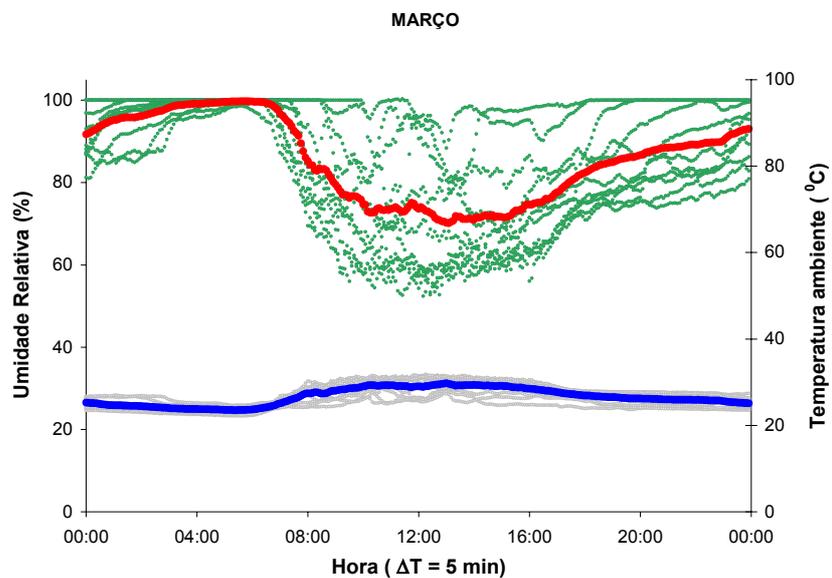


Figura 4.1 Dados de Umidade Relativa (ACIMA – Linha dos valores médios em vermelho) e Temperatura Ambiente (ABAIXO - Linha dos valores médios em azul) registrados no mês de março.

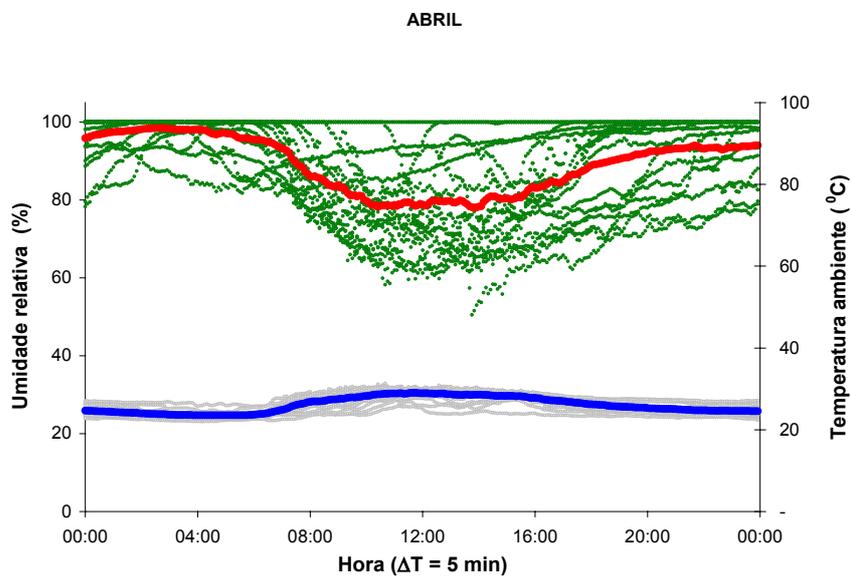


Figura 4.2 Dados de Umidade Relativa (ACIMA – Linha dos valores médios em vermelho) e Temperatura Ambiente (ABAIXO - Linha dos valores médios em azul) registrados no mês de abril.

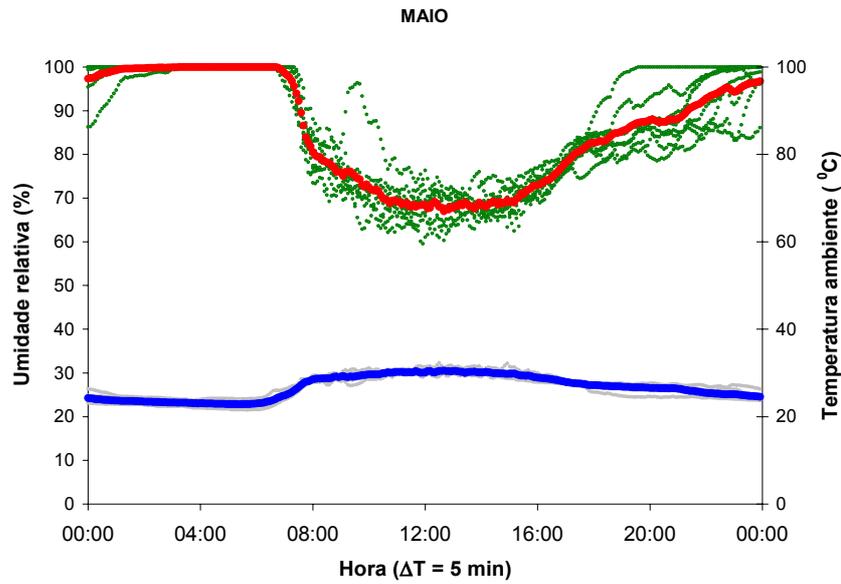


Figura 4.3 Dados de Umidade Relativa (ACIMA – Linha dos valores médios em vermelho) e Temperatura Ambiente (ABAIXO - Linha dos valores médios em azul) registrados no mês de maio.

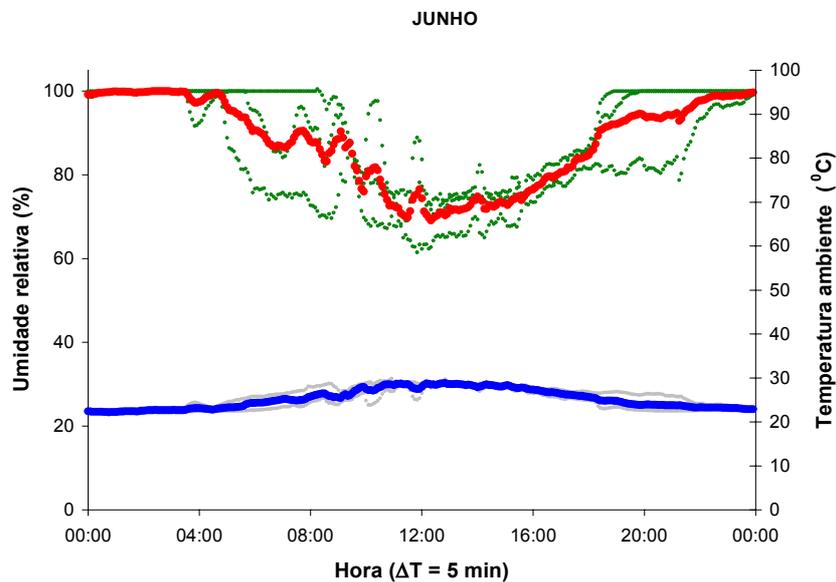


Figura 4.4 Dados de Umidade Relativa (ACIMA – Linha dos valores médios em vermelho) e Temperatura Ambiente (ABAIXO - Linha dos valores médios em azul) registrados no mês de junho.

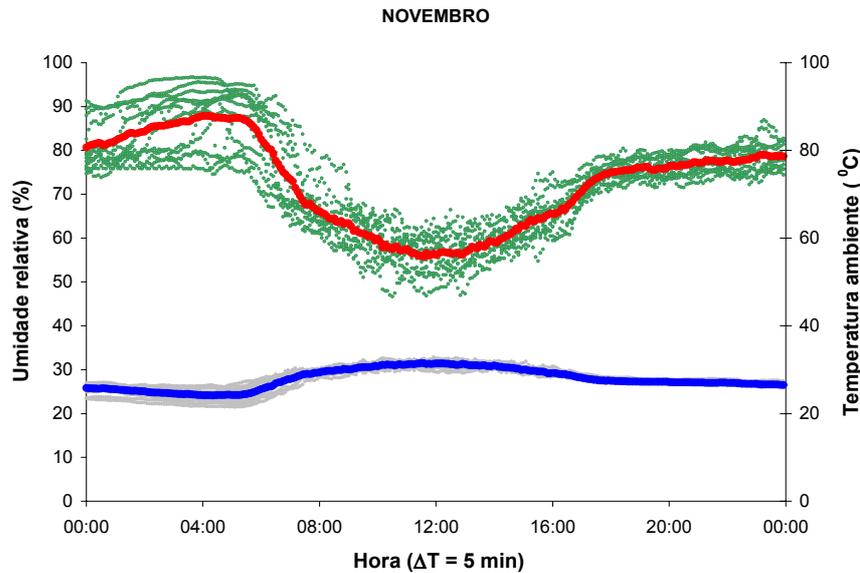


Figura 4.5 Dados de Umidade Relativa (ACIMA – Linha dos valores médios em vermelho) e Temperatura Ambiente (ABAIXO - Linha dos valores médios em azul) registrados no mês de novembro.

Analisando-se o comportamento médio diário da umidade relativa (linhas dos valores médios), verifica-se nas Figs. 4.1 a 4.5 que os meses característicos do inverno (março, abril, maio e junho) apresentam valores superiores a 70% e inferiores a 99%. Já a média diária dos valores médios dos meses de inverno, encontra-se em torno de 88%. O mês de novembro (Fig. 4.5), que representa um mês típico de verão, apresenta, em seu comportamento médio diário (linha dos valores médios) valores mais baixos de umidade relativa, entre 58% e 90%, com uma média diária na faixa de 72%.

Acerca da análise do comportamento da temperatura ambiente, para os meses típicos de inverno, registram-se valores diários médios superiores a 24^o C e inferiores a 27^o C. O valor médio das médias diárias de temperatura ambiente para os meses de inverno encontra-se em torno de 26^o C. Por outro lado, para o mês de novembro, registraram-se valores diários médios superiores a 26^o C e inferiores a 29^o C. O valor médio das médias diárias para este mês é de aproximadamente 28^o C.

O comportamento antagônico das variáveis umidade relativa e temperatura ambiente pode ser aproveitado adequadamente para melhorar as condições de conforto

térmico das edificações através de processos de resfriamento evaporativo. Esta consideração é importante, pois com fundamento nos valores médios da umidade relativa e da temperatura ambiente, habitualmente a possibilidade de resfriamento evaporativo é descartada. Entretanto, uma análise instantânea, temporal, evidencia essa possibilidade.

4.2 VELOCIDADE E DIREÇÃO DO VENTO

As grandezas velocidade e direção do vento para os meses de abril e novembro são mostradas na Fig. 4.6. Considera-se, como já mencionado, que estes meses são representativos dos períodos de inverno e verão para Recife.

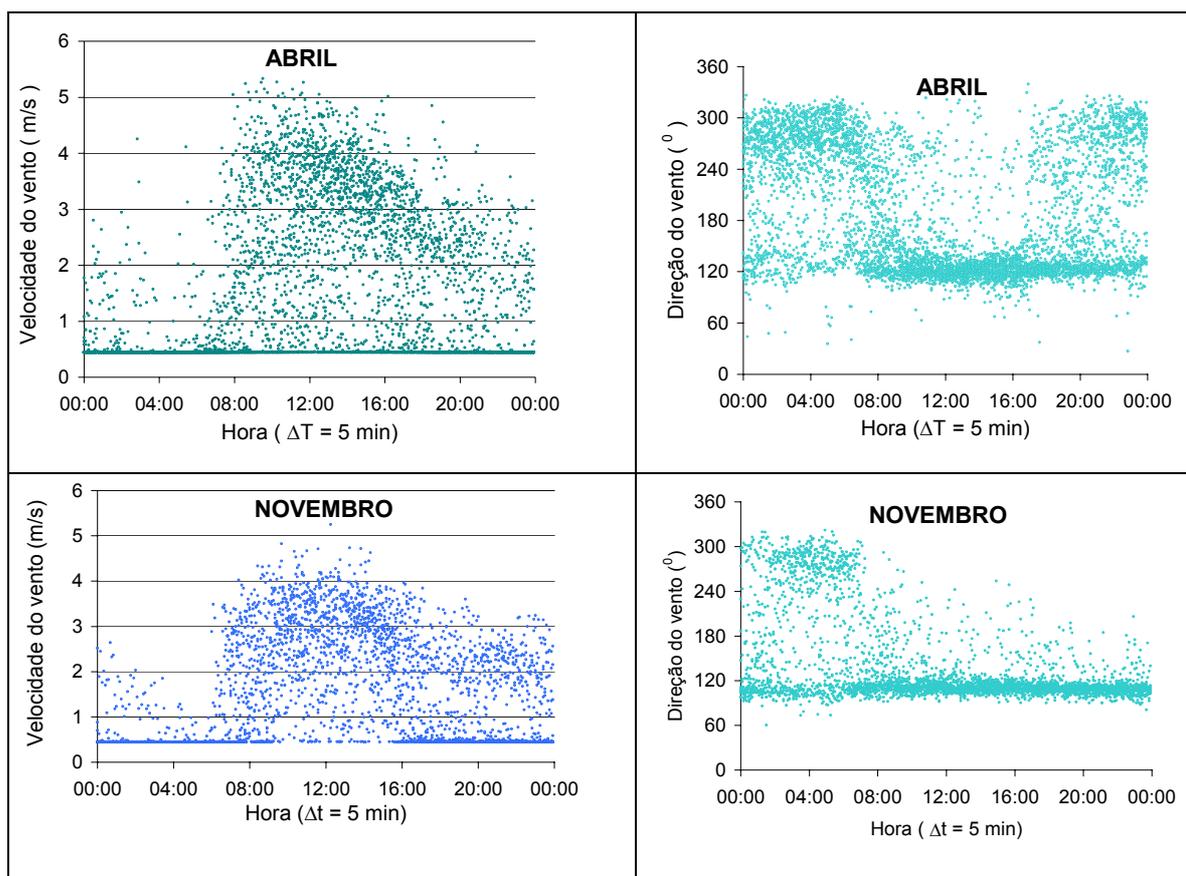


Figura 4.6 Registros de velocidade e direção do vento durante os meses de abril e novembro.

As medidas apresentadas mostram que ambas grandezas apresentam um comportamento característico ao longo do dia. A velocidade do vento apresenta valores baixos no início do dia, atingindo os maiores valores no período próximo ao meio dia, chegando até 5m/s, e diminuindo novamente no fim da tarde. Quanto à direção do vento, observa-se que possui uma direção predominante ao longo dos dias analisados, detectando-se apenas uma mudança no seu sentido como se pode ver no gráfico representativo da distribuição de pontos para o mês de abril (Fig. 4.6).

Estas grandezas foram tratadas através do estudo da distribuição de sua probabilidade. As Figs. 4.7 e 4.8 mostram, respectivamente, os gráficos da distribuição de probabilidade para a velocidade e direção do vento ao longo dos meses de março, abril, maio, junho e novembro.

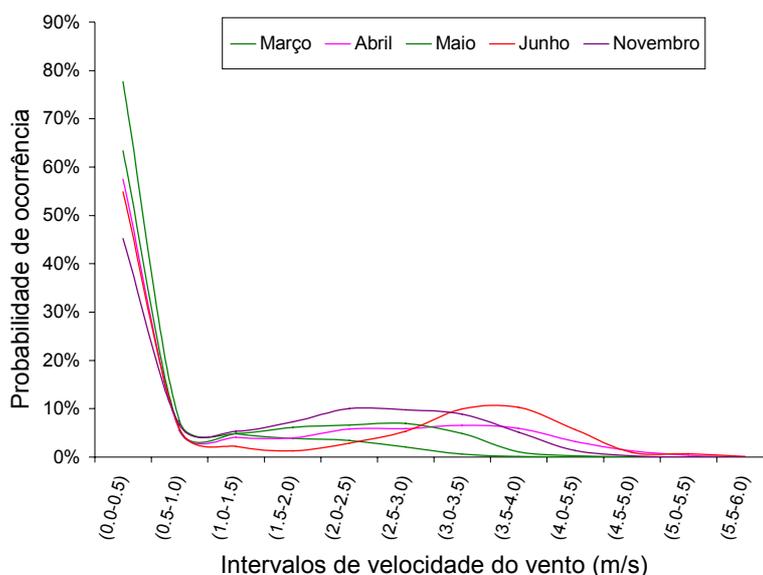


Figura 4.7 Distribuição de probabilidade da velocidade do vento para os meses de medição.

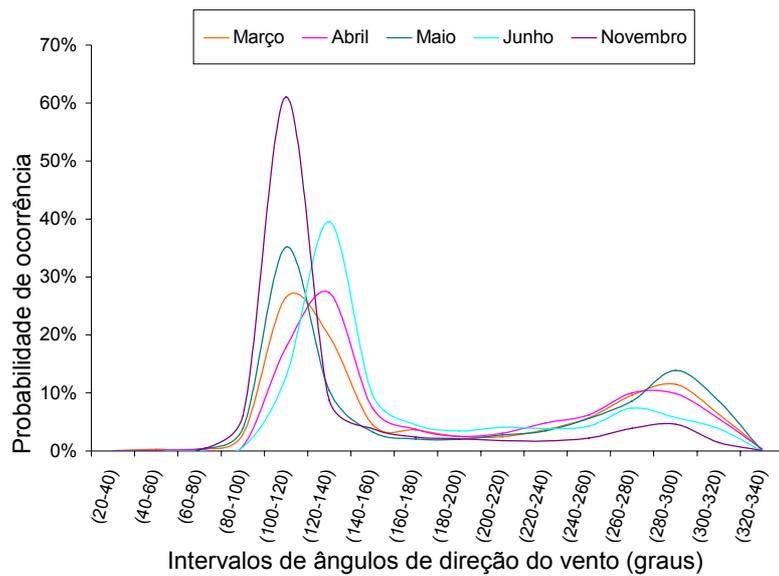


Figura 4.8 Distribuição de probabilidade da direção do vento para os meses de medição

Embora medidas históricas da velocidade do vento, fornecidas por institutos de meteorologia para a cidade do Recife, apresentem uma média anual em torno de 3 m/s, a distribuição de probabilidade dos valores obtidos no laboratório do grupo FAE (Fig. 4.7) mostra uma grande frequência de valores abaixo de 1m/s. A diferença observada deve-se à presença de barreiras para o vento, como árvores e edificações nas proximidades do laboratório, além da localização do instrumento (aproximadamente 4,5 m do nível do solo) que difere das condições usuais de medição que utiliza os instrumentos de medição de velocidade e direção do vento a uma altura de 10m do nível do solo (terceiro distrito meteorológico de Recife). Pode-se dizer que as condições de vento medidas representam bem a situação de edificações localizadas em regiões urbanas. Cabe ressaltar que a velocidade mínima medida pelo instrumento é de 0,5 m/s, o que explica a grande ocorrência de valores nesta faixa.

Na Fig. 4.8 verifica-se que a distribuição da direção do vento é bi-modal. Observa-se, com mais clareza, a concentração de valores principalmente nas faixas 100° a 140° (sentido sudeste - ventos marítimos) e 280° a 300° (noroeste – sentido terra mar). Os ventos que sopram no sentido terra – mar (terral) são observados prioritariamente durante a noite até aproximadamente 7:30 h da manhã, período este caracterizado pelo fato de que a temperatura da superfície terrestre é menor que a temperatura da água do mar. A inversão

das temperaturas terra-mar, após esse período, determina os ventos no sentido contrário (sudeste).

A análise descrita acima reflete um fenômeno local, característico de uma cidade localizada numa região de clima tropical atlântico e mais próxima da costa, tal qual Recife, onde a influência da massa d'água nos ventos depende da hora do dia. Durante o dia, o vento tende a se direcionar da costa para o interior, quando o ar que sobe da terra aquecida é substituído pelo ar fresco que vem da água, provocando as chamadas brisas locais. Por outro lado, os ventos tendem a se dirigir da terra para a água, quando a água está mais quente que a terra. Os gráficos mostrados na Fig. 4.1 evidenciam o comportamento descrito acima, onde no mês característico do inverno no hemisfério sul (abril) os ventos no sentido da terra para mar, são bem percebidos entre 0h às 7:30h, aproximadamente. A partir deste horário, ocorre uma inversão, surgindo os ventos marítimos. No caso particular do mês de novembro quando é verão no hemisfério sul, apesar de se registrarem os ventos terrais (sentido terra-mar), percebe-se claramente um domínio ao longo do dia dos ventos marítimos.

Em uma análise global das variáveis estudadas, pode-se dizer que baixos valores de velocidades do vento correspondem a baixos valores de temperatura ambiente (período noturno). Durante o período diurno, quando a temperatura ambiente aumenta, verifica-se um crescimento da velocidade do vento e uma diminuição da umidade relativa. Este comportamento indica boas possibilidades de climatização por ventilação forçada noturna, ventilação diurna e resfriamento evaporativo no período de baixa umidade relativa.

5.0 TEMPERATURA INTERNA DO RECINTO E SUA COMPARAÇÃO COM A TEMPERATURA AMBIENTE

Os dados de temperatura interna do recinto foram obtidos calculando-se a média, a cada cinco minutos das temperaturas dos seis sensores dispostos no laboratório. Para efeito de comparação, o perfil dos valores médios diários da temperatura interna é representado para os meses de março, abril, maio, junho e novembro, juntamente com as linhas dos valores médios obtidas anteriormente para a temperatura ambiente (Figs. 5.1 a 5.5).

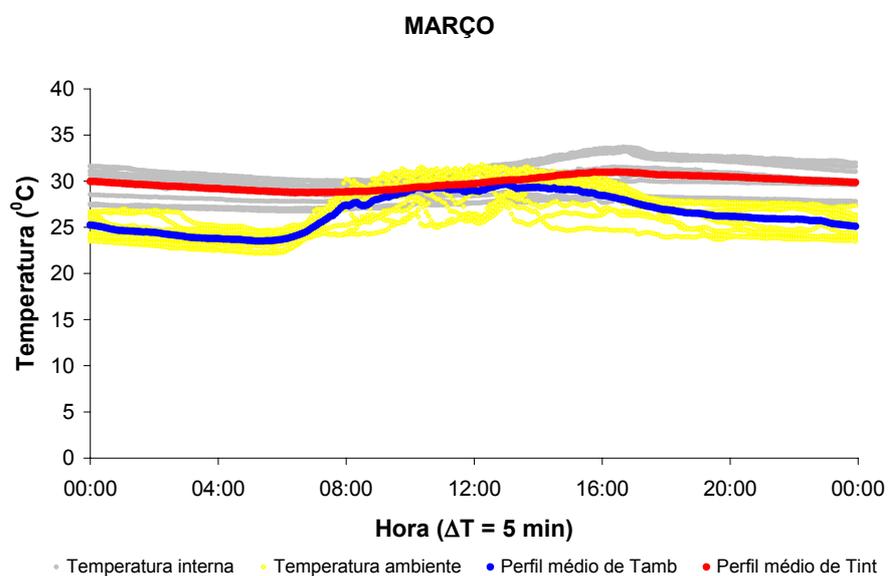


Figura 5.1 Dados experimentais da temperatura interna (cinza) e ambiente (amarelo) ao longo do dia, juntamente com as linhas dos valores médios da temperatura ambiente (azul) e da temperatura interna (vermelho) para o mês de março.

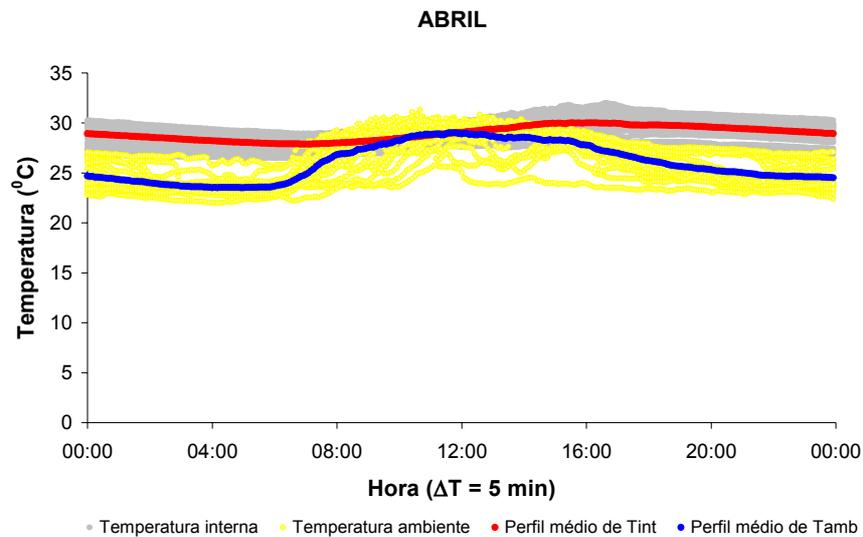


Figura 5.2 Dados experimentais da temperatura interna (cinza) e ambiente (amarelo) ao longo do dia, juntamente com as linhas dos valores médios da temperatura ambiente (azul) e da temperatura interna (vermelho) para o mês de abril.

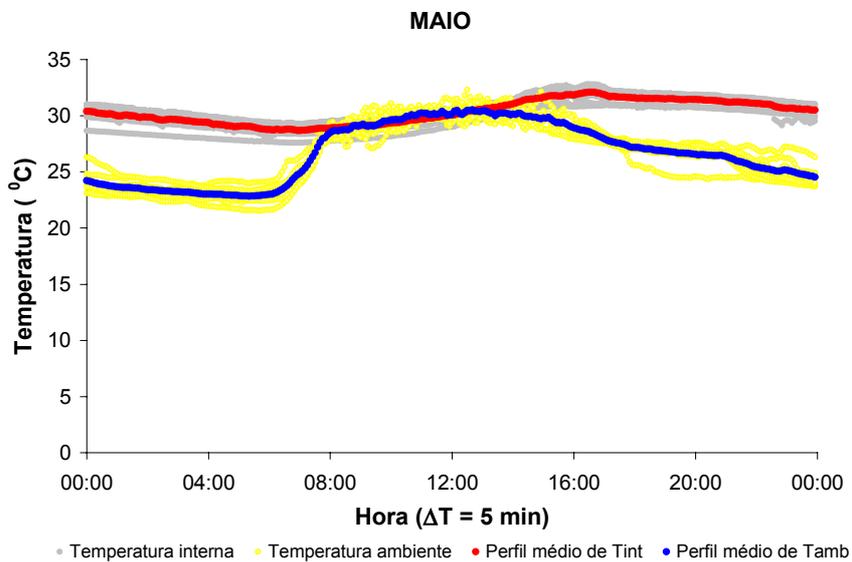


Figura 5.3 Dados experimentais da temperatura interna (cinza) e ambiente (amarelo) ao longo do dia, juntamente com as linhas dos valores médios da temperatura ambiente (azul) e da temperatura interna (vermelho) para o mês de maio.

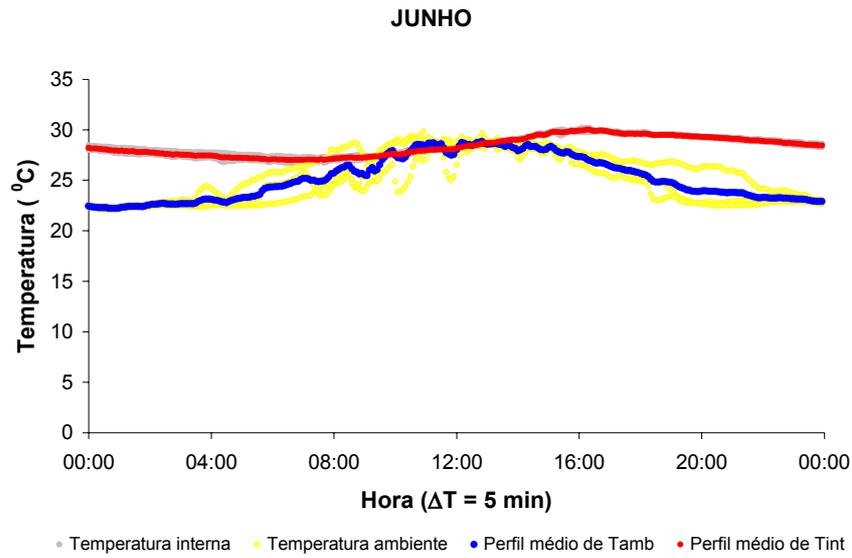


Figura 5.4 Dados experimentais da temperatura interna (cinza) e ambiente (amarelo) ao longo do dia, juntamente com as linhas dos valores médios da temperatura ambiente (azul) e da temperatura interna (vermelho) para o mês de junho.

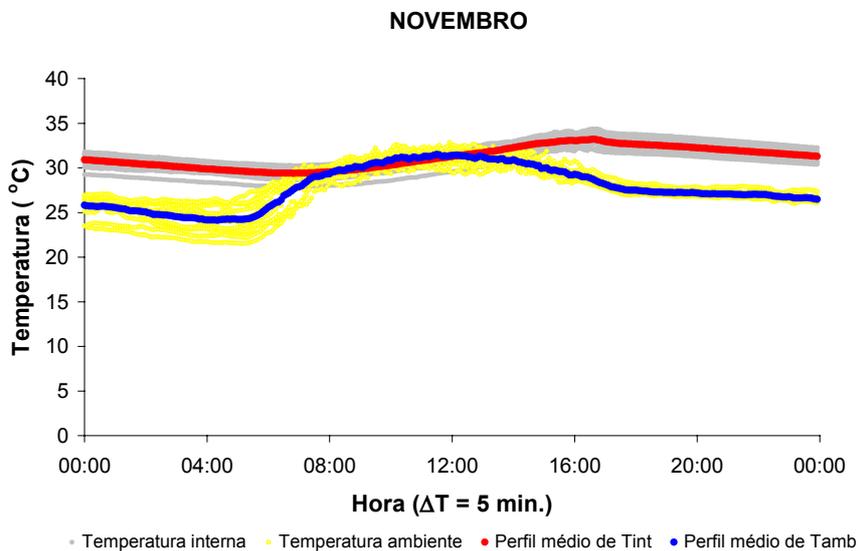


Figura 5.5 Dados experimentais da temperatura interna (cinza) e ambiente (amarelo) ao longo do dia, juntamente com as linhas dos valores médios da temperatura ambiente (azul) e da temperatura interna (vermelho) para o mês de novembro.

Verifica-se nas Figs. 5.1 a 5.5 que em todos os meses a temperatura interna do recinto supera a temperatura ambiente durante a maior parte do dia. Embora os valores médios da temperatura ambiente não sejam tão elevados, as temperaturas internas observadas se afastam significativamente das condições de conforto térmico. Cabe salientar que os valores instantâneos da temperatura interna podem atingir temperaturas de até 2° C acima dos valores médios, como pode ser observado nas Figs. 5.1 e 5.2.

Comparando-se os perfis de temperatura interna do recinto com os da temperatura ambiente (Figs. 5.1 a 5.5), verificam-se três efeitos importantes: a) aumento do valor médio, b) redução da amplitude térmica e c) deslocamento temporal.

O aumento do valor médio de temperatura do recinto (diferença TI-TA), é mostrado na Tab. 5.1. Este aumento pode ser atribuído, basicamente, à carga térmica decorrente da incidência de radiação solar no teto e paredes. Cabe mencionar que o número de pessoas e a frequência de ocupação do laboratório, durante o período de medições, foram muito baixos, e que os equipamentos existentes são de baixo consumo de energia, contribuindo em conjunto com uma parcela muito pequena para a carga térmica total.

Os sensores que registram a temperatura interna do laboratório foram aferidos com relação ao sensor de temperatura ambiente. O procedimento utilizado constituiu na determinação dos registros dos diferentes sensores instalados em um pequeno volume de temperatura uniforme (caixa de isopor). Os valores obtidos foram corrigidos de forma que suas leituras fossem iguais quando a temperatura monitorada fosse a mesma, tomando como referência o sensor de temperatura ambiente. Garante-se desta forma, que as diferenças de temperatura observadas na Tab. 5.1 sejam precisas.

Tabela 5.1 Valores médios mensais da temperatura ambiente e da temperatura interna do recinto. Mostra-se também as diferenças entre essas temperaturas para cada mês de medições.

Meses	Temperatura interna do	Temperatura ambiente,	TI - TA
	recinto, média mensal (TI)	média mensal (TA)	
	(°C)	(°C)	(°C)
Março	29,8	26,6	3,2
Abril	28,8	26,0	2,8
Maio	29,7	26,7	3,0
Junho	28,4	25,2	3,2
Novembro	31,2	27,8	3,4

A título de ilustração, a carga térmica, resultante da radiação solar incidente em cada superfície do recinto, calculada para os meses de junho, mês de menor radiação ao longo do ano, e novembro, mês de maior radiação, é mostrada na Tab. 5.2.

Tabela 5.2 Carga térmica devido à incidência de radiação solar nas paredes e teto do laboratório, nos meses de junho e novembro.

Cálculo da carga térmica devido à incidência de radiação solar nas paredes e teto do laboratório

Superfície	Área (m ²)	H _{col} (MJ/m ²)	Carga Térmica (MJ)	H _{col} (MJ/m ²)	Carga Térmica (MJ)
		(Junho)	(Junho)	Novembro	(Novembro)
Sul ($\phi = 0^\circ$)	24	4,52	43,40	11,51	110,54
Oeste ($\phi = 90^\circ$)	30	7,74	92,87	12,42	149,07
Norte ($\phi = 180^\circ$)	24	10,92	104,83	6,52	62,61
Leste ($\phi = 270^\circ$)	30	7,74	92,87	12,42	149,07
Teto	80	14,38	1035,26	22,81	1642,66

Relação entre o teto e o total (%):

76

78

α_1 (Superfícies claras - paredes) = 0,40

α_2 (Pinturas betuminosas - teto) = 0,90

A massa térmica total do laboratório (paredes, teto, piso, mobiliário, equipamentos) incide na redução da amplitude térmica do recinto, onde se observam valores compreendidos no intervalo de 2,5°C a 3,6°C, enquanto a amplitude térmica da temperatura ambiente varia entre 5,9 °C e 8,2 °C, ambos no período estudado (Tab. 5.3).

Tabela 5.3 Amplitudes térmicas da temperatura ambiente e da temperatura interna para todos os meses de medição.

Mês	Temperatura ambiente mínima e máxima (°C)	Amplitude térmica da temperatura ambiente (°C)	Valores mínimos e máximos dos perfis médios de temperatura interna (°C)	Amplitude térmica da temperatura interna (°C)
Março	23,2 e 29,5	6,3	28,4 e 31,4	3,0
Abril	23,1 e 29,0	5,9	28,0 e 30,5	2,5
Maiο	21,8 e 30,0	8,2	28,7 e 32,2	3,6
Junho	22,5 e 28,6	6,1	27,0 e 29,9	2,9
Novembro	23,2 e 31,4	8,2	31,3 e 34,9	3,6

O deslocamento temporal, ou tempo de retardo (MASCARÓ, 1995), entre temperatura interna e ambiente (em torno de 5 horas), pode ser explicado pela influência da espessura das paredes e de sua difusividade térmica (α_T), parâmetro que relaciona a condutividade térmica (k) com a densidade (ρ) e o calor específico (c) da parede ($\alpha = k/(\rho \cdot c)$). Estimativas simples, realizadas para paredes de 0,15 m de espessura e variações da temperatura ambiente, com período de 24 horas, mostram que esse retardo é de aproximadamente 5 horas (BRITO FILHO, 1983), intervalo de tempo que concorda com o valor observado.

Uma análise mais detalhada do sistema considerado (recinto-ambiente) mostra que as paredes e teto do recinto desempenham diferentes funções, dependendo do isolamento e contato com o meio externo. Por exemplo, se o telhado encontra-se desprovido de algum

tipo de proteção, como é o caso analisado, uma fração considerável de radiação ingressa através do mesmo. Nesse caso, as paredes, apesar de estarem expostas também à radiação solar, embora em proporção bastante menor que o telhado, desempenham o papel de dissipadores de calor (a temperatura interna do recinto é maior que a temperatura externa das paredes).

Estas funções podem mudar de acordo com a introdução de algumas modificações no recinto, como por exemplo, utilização de câmara de isolamento térmico e radiante no teto. Desta forma, a maior parte da radiação solar passa a ingressar através das paredes mais expostas e é dissipada pelas paredes que recebem menos radiação e pelo piso.

Estratégias de conforto para reduzir significativamente a diferença, tanto instantânea como média entre a temperatura do recinto e a temperatura ambiente, são discutidas no capítulo 8.

6.0 MODELOS DE CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR, TEMPERATURA AMBIENTE E UMIDADE RELATIVA

Nesta seção, são descritos os resultados da aplicação de modelos que permitem representar a variação temporal diária da temperatura ambiente, umidade relativa e radiação solar incidente nas diferentes paredes do recinto. A variação temporal e a correlação entre essas grandezas é da maior importância para identificar oportunidades de climatização de recintos. As normais climatológicas e bancos de dados solarimétricos fornecem valores diários, médios mensais, insuficientes para o tipo de análise proposto neste trabalho, que requer detectar possibilidades dependentes, não só do comportamento médio dessas grandezas, mas também de suas variações temporais relativas ao longo do dia.

Uma alternativa de obtenção dos valores teóricos de umidade relativa e temperatura ambiente é apresentada através da aplicação do modelo de SPIRITO & VITALE, (1982), cujos resultados, são comparados com os dados experimentais.

A possibilidade de contar com estes modelos permite estender as informações experimentais obtidas durante alguns meses, para todos os meses do ano e, se for necessário, para diferentes localidades.

6.1 DETERMINAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (H_{col}) AO LONGO DO ANO NAS PAREDES E TETO DO RECINTO PARA DIFERENTES AZIMUTES

A simulação do comportamento da radiação solar coletada é útil na concepção do projeto, pois fornece ao projetista uma indicação dos meses nos quais a incidência da radiação solar será mais ou menos intensa para uma determinada fachada. De posse dessas informações, pode-se realizar o zoneamento dos espaços de um projeto arquitetônico, priorizando ambientes e localizando-os de acordo com a maior e menor necessidade da radiação solar. Assim sendo, localizar-se-ão as áreas molhadas, a exemplo dos banheiros e áreas de serviço, em locais de maior incidência solar e os espaços de convivência prolongada obedecendo as orientações que propiciem maior conforto térmico especialmente no verão. Este zoneamento, baseado na distribuição da energia solar ao longo do ano, evitará e controlará os ganhos térmicos decorrentes da incidência solar.

Os valores calculados da radiação solar para cada superfície podem auxiliar na escolha da melhor localização das aberturas, elementos de proteção solar e na forma do projeto face à sua localização.

Além das vantagens supracitadas, o conhecimento da radiação solar incidente em um recinto é de fundamental importância para o estudo do comportamento térmico do mesmo.

O cálculo da radiação solar incidente I_{col} (radiação coletada hora a hora) no recinto e a simulação do comportamento desta variável ao longo do ano foi realizada utilizando-se o modelo de COLLARES PEREIRA & RABL (1979) aplicado à cidade de Recife (Latitude – 8° 03' e Longitude 34° 55').

As paredes do laboratório utilizado como referência experimental para este estudo foram classificadas de acordo com sua orientação ou ângulo azimutal (ϕ) - da seguinte maneira: fachada sul ($\phi = 0^\circ$), fachada oeste ($\phi = 90^\circ$), fachada norte ($\phi = 180^\circ$) e fachada leste ($\phi = 270^\circ$) e teto (qualquer azimute e $\beta = 0^\circ$).

Os resultados da aplicação do Modelo de COLLARES PEREIRA & RABL (1979) para o cálculo da energia solar diária incidente nas paredes e teto do laboratório são apresentados na Fig. 6.1 que mostra sua variação ao longo do ano para cada superfície. Assume-se que o recinto está livre de sombras e bloqueio de radiação devido a construções, árvores e anteparos circundantes.

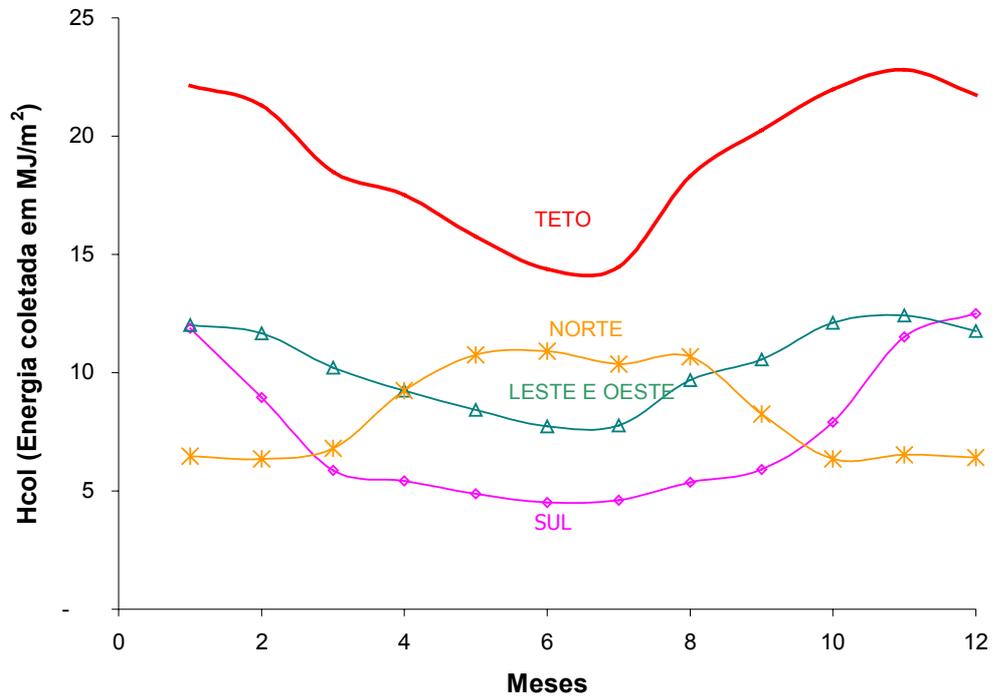


Figura 6.1 Sobreposição das curvas representativas do comportamento da radiação coletada pelas paredes e cobertura do recinto estudado.

A radiação solar incidente nas paredes orientadas para Leste e Oeste apresenta as menores variações ao longo do ano, com valores compreendidos para as direções Leste e Oeste, entre $7,74 \text{ MJ/m}^2$ (período de inverno) e $12,42 \text{ MJ/m}^2$ (período de verão) (valor médio anual igual a $10,30 \text{ MJ/m}^2$).

Durante o verão (hemisfério sul), as paredes Leste, Oeste e Sul são as que recebem maior quantidade de energia solar diária (máximo de aproximadamente $12,50 \text{ MJ/m}^2$). Já a parede Norte (azimute 180°) recebe os maiores valores de radiação solar diária no período de inverno (máximo de $10,92 \text{ MJ/m}^2$).

Em síntese, durante o período do verão, quando a temperatura ambiente é elevada, as paredes que recebem mais radiação são as orientadas para o Leste, Oeste e Sul. Já para a parede Norte, a maior incidência de radiação solar ocorre no período do inverno, quando a temperatura ambiente é mais baixa.

A parede voltada para o Sul apresenta, na maioria dos meses do verão a maior coleta de energia solar. Por outro lado, na maioria dos meses de inverno a contribuição para a coleta de energia solar é pequena.

No teto da construção observa-se, como já se esperava, valores de H_{col} expressivos. O menor valor registrado ($14,4 \text{ MJ/m}^2$) supera o maior valor registrado para qualquer parede analisada. Os cuidados com a cobertura são de vital importância. Assim sendo, deve-se utilizar materiais que apresentem coeficiente de absorção da radiação solar baixo, alta emissividade e refletividade.

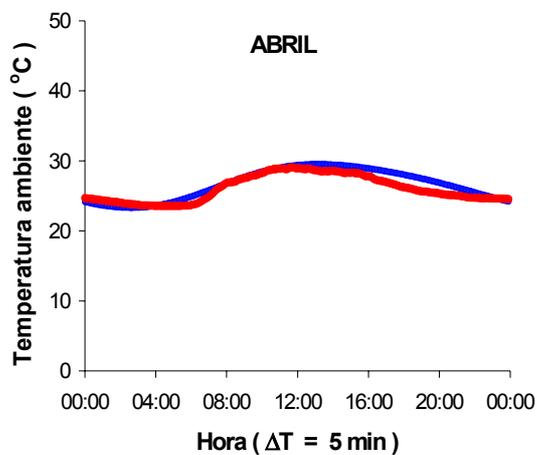
6.2 GERAÇÃO DE PERFIS DIÁRIOS DE TEMPERATURA AMBIENTE E UMIDADE RELATIVA COMPARADOS COM DADOS EXPERIMENTAIS

Além dos perfis de temperatura ambiente e umidade relativa obtidos com os dados experimentais, foram calculados através de um modelo teórico (SPIRITO & VITALE, 1982) (Apêndice A) perfis que reproduzem o comportamento dessas variáveis utilizando valores médios mensais, máximos e mínimos médios como parâmetros de entrada.

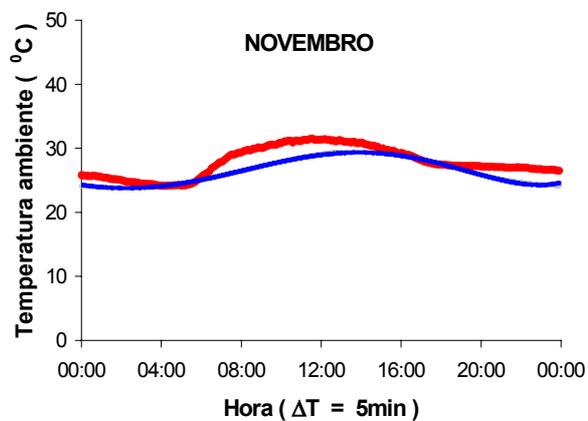
No caso da temperatura ambiente, esses parâmetros encontram-se disponíveis em normais climatológicas. Reportando-se às informações referentes à variável umidade relativa, somente o valor médio mensal é fornecido pelas tabelas de normais climatológicas. Neste caso, os valores de máximos e mínimos médios de umidade relativa foram obtidos a partir de gráficos diários fornecidos pelo INEMET (Instituto Nacional de Meteorologia), abrangendo vários dias de cada mês ao longo de apenas um ano (1988) (LYRA, 1992).

Um programa computacional que viabiliza realizar simulações para diferentes localidades e períodos do ano foi desenvolvido.

Os valores gerados de temperatura ambiente e umidade relativa para os meses de abril e novembro são mostrados a seguir (Figs. 6.2 e 6.3), juntamente com as linhas dos valores médios obtidas com os experimentos (seção 4).

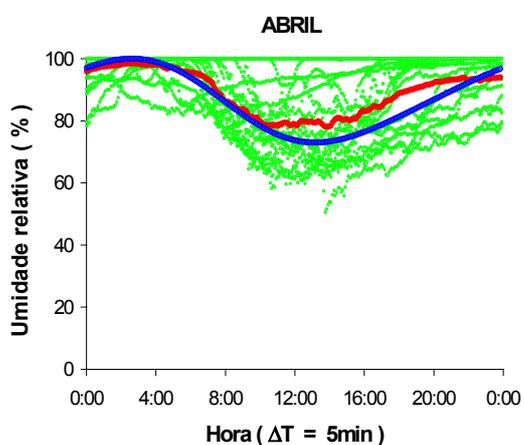


(a)

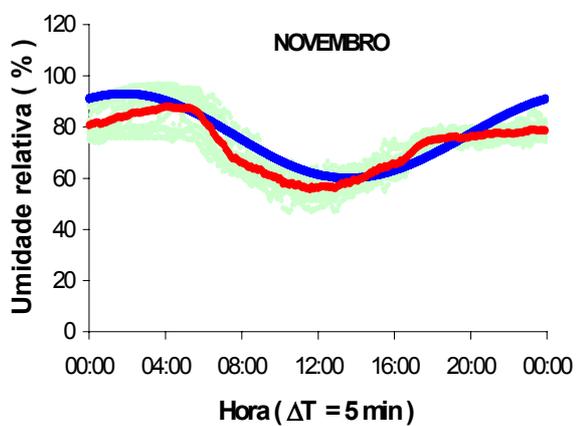


(b)

Figura 6.2 Perfis teóricos da temperatura ambiente (azul) e linhas dos valores médios experimentais (vermelho) para os meses de abril (a) e novembro (b).



(a)



(b)

Figura 6.3 Perfis teóricos da umidade relativa (azul) e linhas dos valores médios experimentais (vermelho) para os meses de abril (a) e novembro (b).

Os resultados apresentados nas (Fig. 6.2 e 6.3) mostram que, para os meses analisados, a aplicação do modelo teórico desenvolvido por SPIRITO & VITALE (1982) para expressar a temperatura ambiente e umidade relativa resultou em curvas com comportamentos semelhantes às obtidas experimentalmente. Cabe ressaltar que as comparações realizadas são apenas qualitativas, uma vez que, para ambas variáveis, as medidas foram obtidas em um período menor que um ano. No caso das simulações, os dados de entrada utilizados no modelo para calcular a temperatura ambiente representam médias de vários anos de medições. Já para o cálculo do perfil de umidade relativa, foram utilizados dados referentes a um ano de medidas desta variável, não apresentando necessariamente os mesmos valores médios, máximos e mínimos do período analisado.

Considera-se, portanto, que as curvas geradas representam apenas uma indicação do comportamento médio destas variáveis ao longo de cada mês de referência.

7.0 ESTIMATIVA TEÓRICA DA TEMPERATURA INTERNA VERSUS DADOS EXPERIMENTAIS

De forma concomitante à análise dos fatores climáticos atuantes no recinto adotado como referência para a presente pesquisa e a interação destes com este ambiente construído, foi utilizado um modelo teórico que, considerando os fatores climáticos e as grandezas físicas peculiares à construção e ao meio que a envolve, reproduz o comportamento da temperatura interna do recinto e, conseqüentemente o cálculo da sua carga térmica (LIMA, et al., 2002).

A importância deste modelo deve-se ao fato que permite conhecer a contribuição no processo de trocas de calor do ambiente com o interior do recinto e vice-versa através da simulação da temperatura interna do mesmo.

7.1 DESCRIÇÃO DO MODELO FÍSICO

O modelo considera a interação entre as variáveis climáticas, tais quais: radiação solar, temperatura ambiente, velocidade e direção do vento (as últimas incorporadas no coeficiente de troca de calor entre as paredes do recinto e o meio ambiente). A temperatura interna é calculada através de um balanço de energia que considera a quantidade de radiação solar absorvida pelas paredes e teto e a quantidade de calor transferida entre o recinto e o meio ambiente pelos processos de condução, convecção e radiação térmica. Os procedimentos de cálculos foram implementados na forma de um algoritmo e de um programa desenvolvido em MATHCAD (LIMA, et al., 2002).

A Fig. 7.1 mostra, de forma esquemática, os parâmetros físicos envolvidos no modelo proposto.

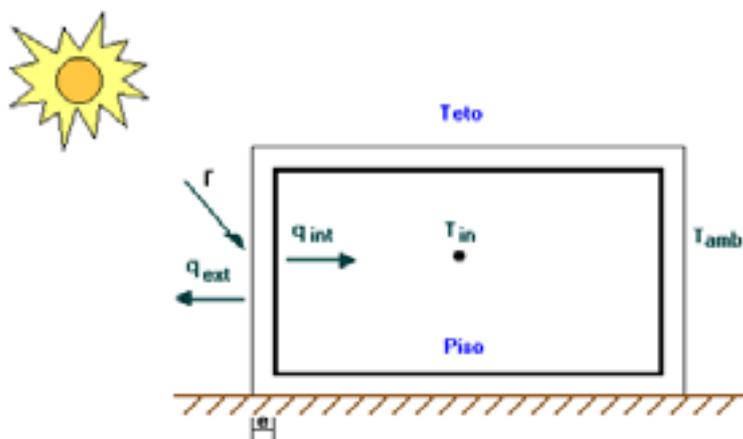


Figura 7.1 Corte esquemático do recinto analisado e as principais grandezas físicas consideradas no modelo.

Na Fig. 7.1, T_{amb} representa a temperatura ambiente, T_{in} a temperatura interna, e a espessura de cada parede do recinto, r a potência solar média diária, q_{ext} o fluxo de calor de dentro para fora e q_{int} o fluxo de calor de fora para dentro.

Como resultado do balanço de energia entre o recinto e o meio externo, encontrou-se a seguinte expressão:

$$T_{in} - T_{amb} = \frac{\sum T_{ar:sol_i} \frac{1}{R_i + \frac{1}{h_{ext,i}A_i}}}{\sum \frac{1}{R_i + \frac{1}{h_{ext,i}A_i}} + R_{solo}} \quad (7.1)$$

Na equação 7.1, destacam-se dois tipos de resistências: R_i que constitui a resistência das superfícies do recinto (paredes, piso e teto) e R_{solo} que constitui a resistência do solo.

A resistência das superfícies R_i com $1 \leq i \leq 6$ é dada pela seguinte equação:

$$R_i = \frac{1}{A_i} \cdot \left(\frac{e_i}{K_i} + \frac{1}{h_{int_i}} \right) \quad (7.2)$$

Na equação 7.2 destacam-se: a área da superfície (parede, teto ou piso) representada por A_i , a espessura da parede, piso e teto (e_i); o coeficiente de condução das paredes, teto e piso representado por K_i e o coeficiente de convecção natural das diversas superfícies internas do recinto representado por h_{int} .

A resistência do solo é dada pela seguinte equação:

$$R_{solo} = \frac{1}{A_{piso}} \cdot \left(\frac{1}{h_{int}} + \frac{e_{laje}}{k_{laje}} \right) \quad (7.3)$$

Outra variável importante verificada na equação 7.1 é a temperatura ar-sol. Em linhas gerais, a temperatura ar-sol pode ser definida como o valor de temperatura que a parede atingiria, se o calor transferido para o recinto fosse nulo (parede adiabática). Uma simulação desta temperatura fictícia é realizada ainda nesta seção para verificar como a escolha de determinados materiais de revestimento da cobertura do recinto pode contribuir no aquecimento do mesmo. A diferença entre a temperatura ar-sol e a temperatura ambiente é dada pela seguinte expressão:

$$T_{arsoli} - T_{amb} = \frac{\alpha_i \cdot r_i}{h_{ext_i}} \quad (7.4)$$

Destacam-se na equação 7.4 o coeficiente de absorção da radiação solar representado por α , a potência solar média diária representada por r e o coeficiente de transferência de calor externo por convecção e radiação representado por h_{ext}

A seguir, são apresentados os resultados obtidos para a temperatura interna do recinto mediante a aplicação do modelo proposto para os meses de março, abril, maio, junho e novembro. Com a finalidade de simplificar os cálculos, as resistências das paredes,

telhado e piso, foram consideradas iguais. Os resultados experimentais e teóricos da temperatura interna do recinto são mostrados na Tab. 7.1.

Tabela 7.1 Valores experimentais (\pm desvio padrão σ) e teóricos da temperatura interna média para os meses analisados.

MESES	$T_{in} \text{ (exp)} \text{ } ^{\circ}\text{C} \pm \sigma$	$T_{in} \text{ (teo)} \text{ } ^{\circ}\text{C}$
MARÇO	$29,8 \pm 1,45$	29,9
ABRIL	$28,8 \pm 0,85$	28,9
MAIO	$29,7 \pm 0,60$	30,1
JUNHO	$28,4 \pm 0,10$	28,3
NOVEMBRO	$31,2 \pm 0,60$	32,2

Comparando-se os valores médios mensais teóricos da temperatura interna do recinto com os obtidos experimentalmente (Tab. 7.1 e Fig. 7.2), observa-se que, para a maioria dos meses analisados, os valores teóricos encontram-se dentro da faixa dada pelo desvio padrão dos valores experimentais e, quando fora, no caso mais específico do mês de novembro, apresenta valor teórico próximo ao experimental. Dessa forma, pode-se afirmar que a diferença entre a temperatura interna calculada e a experimental é aceitável, face à complexidade da interação entre as variáveis climáticas, as características físicas do recinto e à simplicidade do modelo utilizado.

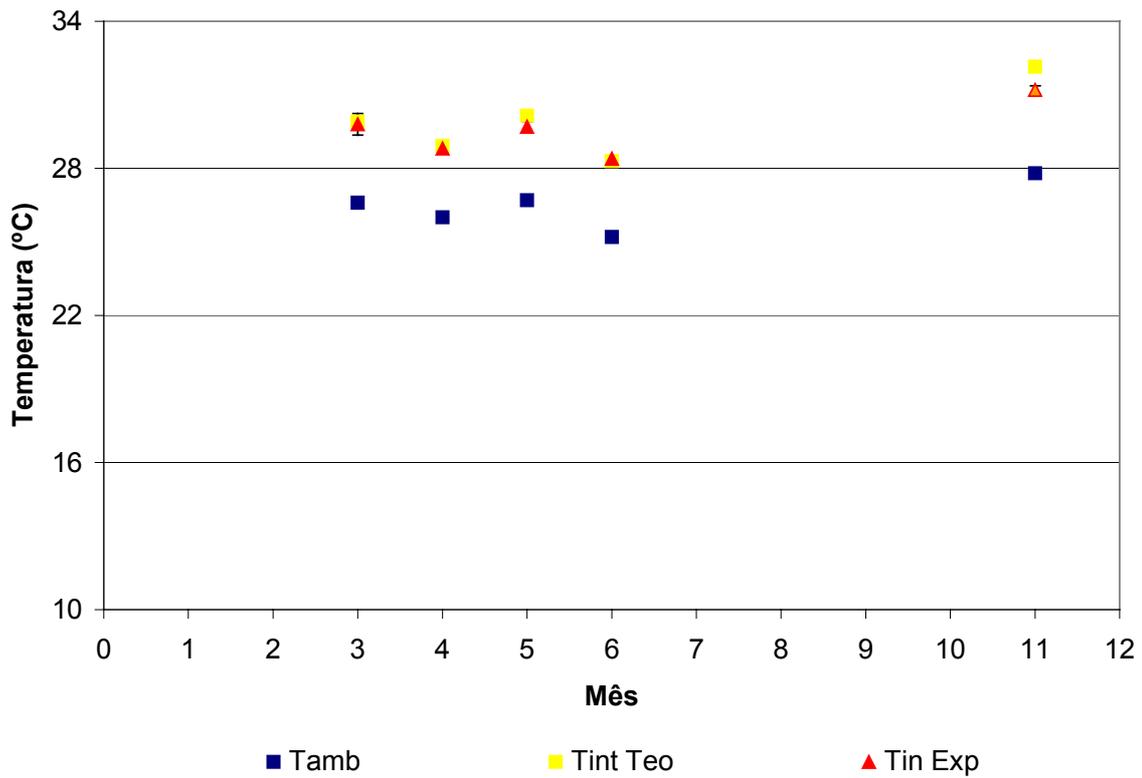


Figura 7.2 Pontos representativos dos valores médios mensais de temperatura ambiente, temperatura interna teórica e experimental do recinto para os meses de março, abril, maio, junho e novembro.

7.2 CÁLCULO DO VALOR MÁXIMO DA TEMPERATURA AR-SOL PARA A COBERTA DO RECINTO

Para ilustrar a importância da utilização dos materiais de revestimento da cobertura e sua influência nos processos de transferência de calor, calcula-se, a seguir, a temperatura ar-sol máxima diária $T_{as,máx}$ para todos os meses do ano para a cidade de Recife:

$$T_{as,máx} = T_{amb,máx} + \frac{\alpha \cdot I_{col,máx}}{h_{ext}} \quad (7.2)$$

onde $T_{amb,máx}$ é o valor médio das máximas temperaturas registradas para cada mês, e $I_{col,máx}$ é a radiação solar máxima incidente no teto. $I_{col,máx}$ pode ser obtido considerando-se o valor da radiação solar incidente, no plano horizontal, ao meio dia solar (COLLARES PEREIRA e RABL, 1979).

Para efeito de comparação, a temperatura ar-sol foi calculada para duas situações diferentes, considerando-se como acabamento superficial, dois possíveis tipos de materiais utilizados no revestimento da laje: concreto aparente ou pintura betuminosa (Tab.7.2).

Tabela 7.2 Coeficientes de absorção e emissão térmica Fonte: Roberto Rivero – FAU-USP

Acabamento Superficial	(Absorção) α	(Emissão) ϵ
Superfícies muito escuras	0,85 – 0,98	0,90 – 0,98
Superfícies escuras (cerâmica vermelha, aço ou ferro com ferrugem)	0,64 – 0,80	0,85 – 0,95
Superfícies claras (branco, creme)	0,30 – 0,50	0,85 – 0,95
Concreto aparente	0,65 – 0,70	0,90
Pinturas betuminosas	0,85 – 0,98	0,95
Pinturas de alumínio ou bronze	0,30 – 0,50	0,40 – 0,60
Chapa de ferro galvanizado ou alumínio nova	0,40 – 0,65	0,20 – 0,30
Chapa de fibrocimento nova	0,45 – 0,60	0,95
Chapa de ferro galvanizado suja	0,70 – 0,90	0,20 – 0,30
Chapa de fibrocimento suja	0,70 – 0,40	0,95
Alumínio, cromo e cobre polido	0,10 – 0,40	0,02 – 0,04

Verifica-se na Tab. 7.3 que a escolha entre o concreto aparente e a pintura betuminosa pode representar uma diferença significativa para a temperatura ar-sol (em média, 9° C).

Tabela 7.3 Valores das grandezas envolvidas no cálculo da temperatura ar-sol máxima considerando-se $h_{\text{ext}} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)} = 20,44$ e dois coeficientes de absorção frente a radiação solar: $\alpha_1 = 0,675$ (concreto aparente) e $\alpha_2 = 0,915$ (pintura betuminosa).

MÊS	$I_{\text{col,máx}}$ (W/m ²)	$I_{\text{col,máx}}$ (Kcal/m ² h)	T_{amb} (°C)	$T_{\text{as}(\alpha_1)}$ (°C)	$T_{\text{as}(\alpha_2)}$ (°C)	$\alpha_1 = \mathbf{0,675}$ $\alpha_2 = \mathbf{0,915}$
JAN	852,37	733,04	30,1	58,2	68,3	$h_{\text{ext}} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)} = \mathbf{20,44}$
FEV	830,78	714,47	30,2	57,6	67,4	
MAR	733,88	631,14	30,0	54,2	62,9	
ABR	705,73	606,93	29,5	52,8	61,1	
MAI	643,06	553,03	28,6	49,8	57,4	
JUN	590,61	507,92	27,6	47,1	54,0	
JUL	592,52	509,56	27,0	46,6	53,5	
AGO	741,43	637,63	27,1	51,6	60,3	
SET	808,91	695,66	27,9	54,6	64,1	
OUT	862,02	741,33	28,9	57,4	67,5	
NOV	881,64	758,21	29,5	58,6	69,0	
DEZ	834,11	717,34	29,8	57,3	67,1	
		Valor médio	28,8	53,8	62,7	

8.0 ESTRATÉGIAS DE CONFORTO

A análise do comportamento térmico do laboratório do Grupo FAE, sujeito aos diversos fatores ambientais, permitiu identificar oportunidades para se criar condições confortáveis de habitação no clima da cidade do Recife, utilizando, basicamente, procedimentos passivos ou de baixo consumo energético.

As observações realizadas, relativas aos parâmetros meteorológicos, tais quais: temperatura ambiente, umidade relativa, velocidade e direção do vento e as variações da temperatura interna do interior do recinto sugerem um conjunto de soluções arquitetônicas baseadas em princípios bioclimáticos.

Em termos de diagnóstico, cabe mencionar, em princípio, que as diferenças observadas entre a temperatura do recinto e a temperatura ambiente, devem-se, em uma medida importante, ao efeito da radiação solar. A possibilidade de evitar, portanto, a transferência de calor para o interior do ambiente construído, poderá reduzir o aumento da temperatura interna do laboratório em relação à temperatura ambiente. Este é um dos objetivos importantes a serem alcançados, arbitrando uma série de recursos arquitetônicos. Uma redução ulterior da temperatura interior, abaixo da temperatura ambiente, poderá ser obtida através de procedimentos de climatização por meios passivos.

Como estratégias de conforto para aproximar a temperatura do recinto da temperatura ambiente, pode-se sugerir:

- Uso de isolamento térmico e radiante do telhado, com relação ao ambiente interno. O telhado é responsável por cerca de 70% da carga térmica devido à radiação solar incidente na envoltória (ver Tab. 5.2);
- Bloqueio da radiação solar incidente nas paredes mais atingidas mediante proteções externas (brises, anteparos, alpendres e superfícies claras (branco ou creme) com baixo

coeficiente de absorção na região solar ($\alpha = 0,30 - 0,50$) e considerável coeficiente de emissão térmica ($\epsilon = 0,85 - 0,95$);

- Posicionamento das aberturas de forma a favorecer a ventilação cruzada nas direções que prevalecem em cada época do ano. Durante o dia, no sentido mar - terra, e durante a noite, no sentido terra - mar;
- Estudar a estrutura do piso de forma a promover uma transferência eficiente de calor do ambiente interno para o solo;
- Arborização do entorno da construção de forma a produzir sombras que protejam as fachadas mais atingidas pela radiação em determinadas horas do dia.

Como estratégias de conforto para reduzir a temperatura do recinto abaixo da temperatura média ambiente, com pouco consumo de energia, sugere-se:

- Injeção de ar frio durante o período no qual a temperatura ambiente é baixa. Esse processo poderia ser realizado através de um sistema de ventilação forçada noturna;
- Resfriamento evaporativo nos horários nos quais são registrados baixos valores de umidade relativa e alta temperatura ambiente, tal como se verifica a partir dos perfis já analisados. O resfriamento evaporativo dar-se-ia através de arborização, espaços verdes e umidificação do ambiente utilizando-se fontes controláveis, acionadas durante esses períodos. A utilização de espelho de água não funciona muito bem ao longo de todo o dia, visto que se trata de um recurso fixo. Assim sendo nos períodos de alta umidade e baixa temperatura são desnecessários.

Além da temperatura média e as estratégias para reduzi-la, interessa considerar a temperatura instantânea, e em particular seu valor máximo ou, o que é equivalente a amplitude térmica. Esta última pode ser reduzida devido ao efeito da massa térmica das paredes e massa térmica interna, pelo que se sugere:

- Considerar, no projeto arquitetônico, a influência da espessura das paredes, sua relação com as condições de conforto térmico e o custo necessário para sua obtenção.

A seguir, serão detalhadas as medidas sugeridas.

8.1 ESTRATÉGIAS DE CONFORTO PARA APROXIMAR A TEMPERATURA DO RECINTO DA TEMPERATURA AMBIENTE

Isolamento térmico e radiante do telhado, com relação ao ambiente interno

Evitar o ingresso da radiação solar através do telhado deverá contribuir para uma redução significativa da diferença entre a temperatura média do recinto e a temperatura ambiente. Com tal fim, podem ser adotadas diversas providências.

Câmara de ar entre o telhado e a laje do recinto

A câmara de ar deve ser ventilada para evitar aquecimento excessivo e transferência de calor da câmara para o ambiente. Por exemplo, através de elementos vazados laterais, que permitam a renovação de ar da mesma. O isolamento térmico que separa a superfície inferior da câmara do ambiente a ser climatizado contribuirá na redução do efeito de transferência de calor do ambiente para o recinto devido à radiação solar. Uma superfície refletiva aderida à superfície inferior da câmara funcionará como blindagem radiante melhorando o isolamento do recinto com relação ao ambiente (ver Fig. 8.1).

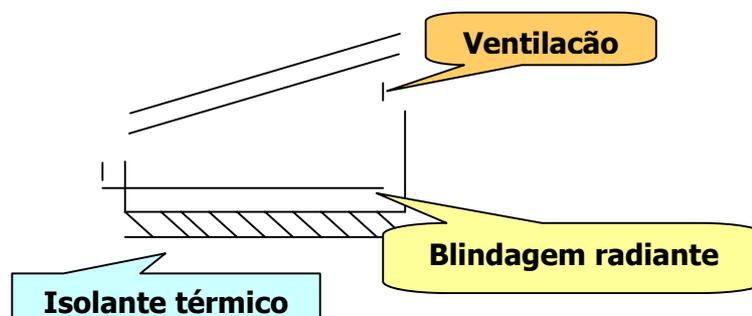


Figura 8.1 Corte esquemático da câmara de ar entre o telhado e a laje do recinto

Uso de tintas seletivas na pintura do telhado

Uma alternativa diferente pode ser estudada. Trata-se da utilização de tintas seletivas, de boa refletividade e baixa absorvidade na região do espectro solar e de elevada emissividade na região do infravermelho próximo. São tintas claras, quase brancas, que refletem a radiação solar e são excelentes emissoras de radiação às temperaturas que o telhado assume como resultado do aquecimento solar. As tintas combinadas com câmaras de ar podem resultar em uma redução importante da radiação solar que ingressa no recinto via telhado.

Bloqueio da radiação solar incidente nas paredes mais atingidas mediante proteções externas

O tratamento das paredes, mediante proteções externas (brises e anteparos), contribuirá na redução da incidência de radiação solar. Este recurso tem ainda a vantagem de permitir o ingresso de radiação solar difusa que contribui para a iluminação natural dos ambientes e bloquear a radiação direta evitando seus efeitos térmicos no interior da construção.

A construção de alpendres estabelece uma transição entre o ambiente externo e interno, promove a circulação de ar se devidamente orientado, e bloqueia a incidência de radiação solar nas paredes adjacentes.

A arborização em torno da residência, além de sombrear parte da envoltória, pode reduzir a temperatura externa devido ao mecanismo de esfriamento evaporativo.

Posicionamento das aberturas de forma a favorecer a ventilação cruzada nas direções preponderantes em cada época do ano, durante o dia, no sentido mar - terra, e durante a noite, no sentido terra – mar

O vento que prevalece com maior intensidade durante o ano tem direção sudeste, e sua inversão, na direção noroeste, se apresenta com intensidade bem menor. O posicionamento das janelas de forma a favorecer a circulação preferencial nesse sentido pode ajudar a climatizar os ambientes internos, retirar calor e igualar a temperatura interna com a externa, termalizando também a massa térmica da residência.

Estudar a estrutura do piso de forma a promover uma transferência eficiente de calor do ambiente interno para o solo

Uma análise detalhada do sistema recinto-meio ambiente mostra que as paredes e o teto do recinto desempenham diferentes funções, dependendo do isolamento e contato com o meio externo. Por exemplo, se o telhado encontra-se desprovido de algum tipo de proteção, como é o caso analisado, uma fração considerável de radiação, convertida em calor, ingressa através do mesmo. Nesse caso, as paredes, apesar de estarem expostas também à radiação solar, embora em proporção bastante menor que o telhado, desempenham o papel de dissipadores de calor (a temperatura interna do recinto é maior que a temperatura externa das paredes), de acordo com o que se indica esquematicamente na (Fig. 8.2).

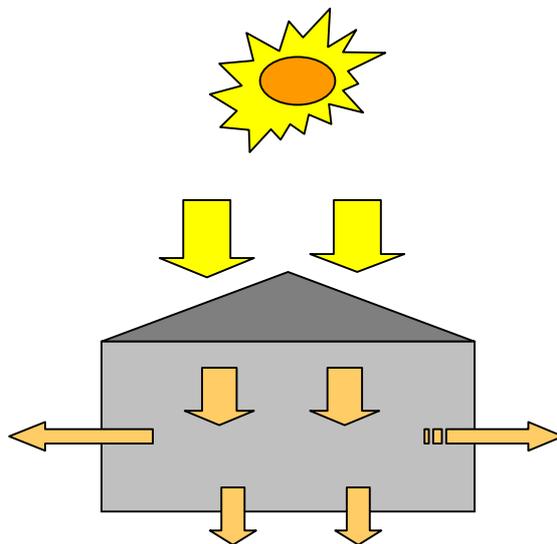


Figura 8.2 Possibilidade da transferência de calor do ambiente para o recinto e do recinto para o ambiente

Estas funções podem mudar de acordo com a introdução de algumas modificações no recinto, como por exemplo, utilização de câmara de isolamento térmico e radiante no teto. Desta forma, sem proteção, o telhado é responsável por uma fração compreendida entre 76 e 78% da transferência de calor do ambiente para o interior, devida à radiação solar. Uma vez protegida a cobertura superior, a configuração da transferência de calor se modifica substancialmente. A maior parte da radiação solar passa a ingressar através das paredes mais expostas e é dissipada pelas paredes que recebem menos radiação e pelo piso (Fig 8.3).

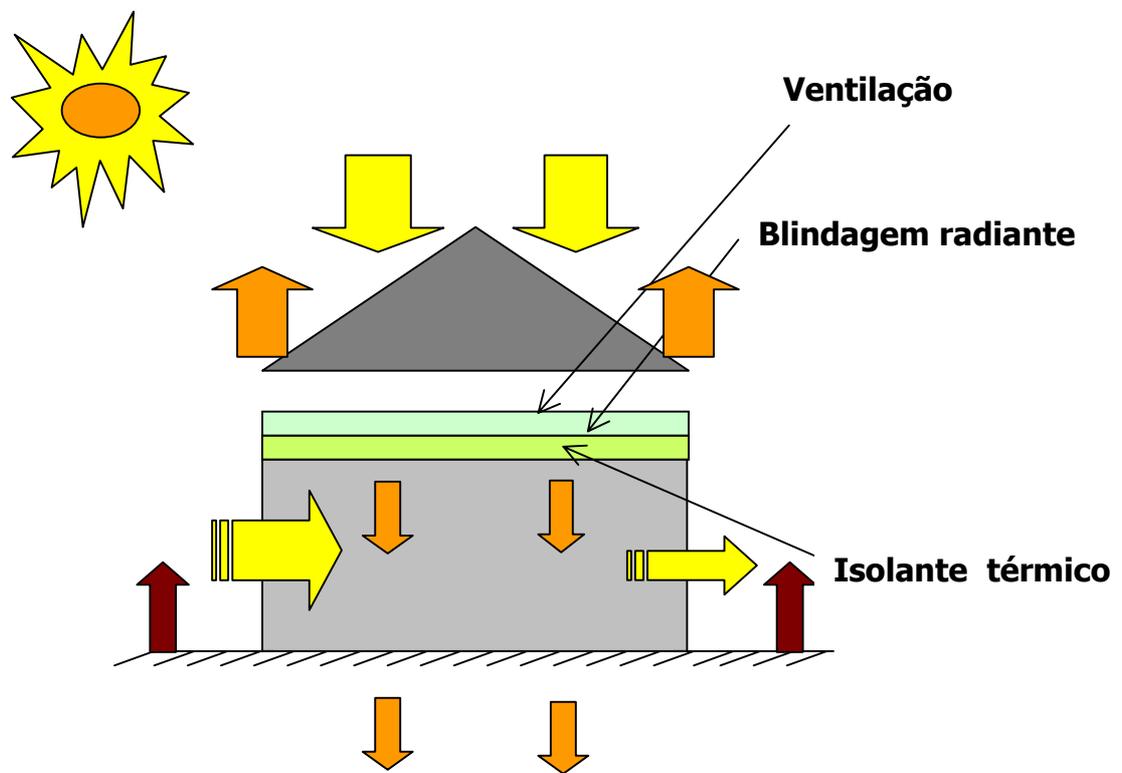


Figura 8.3 Possibilidade da transferência de calor do ambiente para o recinto e do recinto para o ambiente

Protegendo o teto, a transferência de calor através do mesmo diminui substancialmente, e as paredes passam a contribuir com a parcela maior. O piso que participa com uma fração substancial da superfície envolvente do recinto, transfere para o exterior, adjacências, boa parte da radiação que ingressa em forma de calor.

Este processo de transferência de calor pode ser intensificado melhorando, por diversos meios, o contato térmico entre o piso e o ambiente exterior. Por exemplo, reduzindo a resistência térmica piso-solo mediante o uso de uma composição de materiais de boa condutividade térmica. No entanto, deve-se fazer um tratamento adequado do entorno da residência de forma a promover a transferência de calor do interior para o ambiente externo. Não se recomenda a utilização de concreto e/ ou outras superfícies que, quando expostas ao sol, possam adquirir temperaturas elevadas promovendo a inversão do fluxo de calor, do ambiente externo para o recinto.

Outro recurso que pode ser utilizado é uma estrutura de tubos na forma de serpentina, configurando um trocador de calor por onde circula água a temperatura ambiente. Naturalmente, esta proposta deve ser analisada e comparada com outras alternativas para verificar qual delas apresenta a relação de custo-benefício mais conveniente.

8.2 ESTRATÉGIAS PARA REDUZIR A TEMPERATURA DO RECINTO ABAIXO DA TEMPERATURA MÉDIA AMBIENTE , COM POUCO CONSUMO DE ENERGIA

Ventilação forçada noturna, durante o período de baixa temperatura ambiente

É sabido que um recinto sujeito a um intercâmbio passivo de energia com o meio ambiente haverá de experimentar uma temperatura média igual a temperatura média ambiente. Só poderá ser superior quando existe uma fonte de energia externa, que é o caso da radiação solar (BRITO FILHO & FRAIDENRAICH, 1981). Da mesma forma, a temperatura média do recinto poderá assumir valores inferiores se existirem equipamentos de resfriamento, tal como ar condicionado, que retiram calor em forma ativa.

Os equipamentos de ar condicionado cumprem a função de retirar calor do ambiente interno, que habitualmente ingressa em quantidades importantes devido a que as soluções arquitetônicas utilizadas não cumprem a função de inibir o intercâmbio de calor com o exterior. Assiste-se, dessa forma, a um círculo perverso de aquecimento espontâneo

de ambientes submetidos à ação das forças naturais e seu resfriamento promovido por consumo intensivo de energia.

Alternativamente, como comentado na parte que antecede, os ambientes podem ser protegidos, controlando as quantidades de calor que ingressam e saem do recinto.

Adicionalmente, podem ser utilizados recursos que aproveitem a variação temporal da temperatura ambiente, já que a mesma permanece durante um número considerável de horas, no período noturno, por baixo da temperatura média ambiente. A introdução de ar externo, durante o período noturno, pode contribuir significativamente para reduzir sua temperatura média a valores inferiores à temperatura média ambiente. Este recurso, de baixo consumo de energia, relativamente ao uso de ar condicionado, permite acumular “frio” na massa térmica da residência e criar um ambiente mais ameno durante o período diurno (Fig. 8.4).

Na cidade do Recife verificam-se temperaturas ambiente da ordem dos 22 a 25 °C, durante 4 a 5 horas ao longo da noite. Um sistema de injeção de ar, ventilador mais sistema de distribuição, controlado eventualmente por temperatura, pode promover o ingresso de ar frio noturno contanto que se encontre dentro de uma faixa preestabelecida de temperaturas, como, por exemplo, a mencionada acima. Ar, nesse intervalo de temperaturas, combinado seguramente com uma elevada umidade relativa, o que acontece à noite, se encontra ainda dentro de uma região de conforto térmico que pode ser aproveitada ao custo de um baixo consumo relativo de energia.

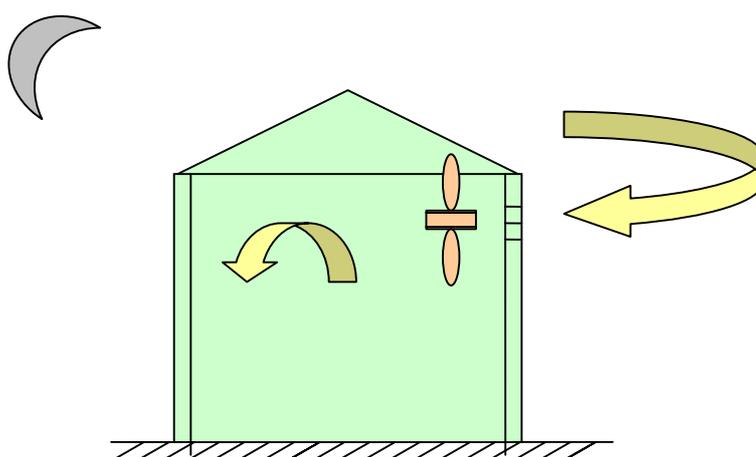


Figura 8.4 Corte esquemático do sistema de injeção de ar frio no recinto

A acumulação de ar frio pela massa térmica da construção ocorrerá através da injeção de ar durante o período noturno, estendendo-se o período de conforto durante um número considerável de horas, especialmente durante o período do dia no qual a temperatura for alta.

Resfriamento evaporativo através de arborização, espaços verdes e umidificação do ambiente em períodos de baixa umidade relativa e alta temperatura

Embora a umidade relativa média da cidade do Recife seja elevada e sugira, em princípio, descartar o resfriamento evaporativo como recurso de climatização, a análise do comportamento instantâneo dessa variável mostra que, em determinados períodos do dia, esse procedimento apresenta um bom potencial de utilização, especialmente em torno do meio dia.

De maneira análoga ao que acontece durante o período noturno, porém de forma anti-simétrica, em torno do meio-dia, o clima da cidade experimenta elevadas temperaturas e baixa umidade relativa, sendo possível, portanto, obter, em áreas verdes e arborizadas e mediante a umidificação do ambiente (fontes de água), reduções de temperatura entre 0,5 e 1,0 °C. A criação deste micro-clima em torno de residências possibilita ainda uma transferência mais efetiva de calor do interior para o ambiente externo além de estabelecer uma referência da temperatura média externa menor que a temperatura ambiente. É possível, portanto, através de processos com baixo consumo de energia, atingir temperaturas internas menores que a temperatura média ambiente, em uma fração de grau centígrado. Ainda que, possa parecer desprezível, efeitos dessa magnitude são apreciáveis, devido à extrema sensibilidade do corpo humano à pequenas variações de temperatura.

Recurso à massa térmica das paredes e à massa térmica interna na obtenção de condições de conforto térmico

A massa térmica, quer seja das paredes ou interna, não modifica a temperatura média interna. Simplesmente acumula calor durante um certo número de horas e retorna esse calor durante o período diário complementar. Porém, não só a temperatura média é

importante para determinar as condições de conforto térmico de recintos, já que o organismo é sensível à temperatura instantânea, ou seja, ao valor que assume a temperatura interna a cada momento.

Uma forma prática de considerar o perfil de temperatura em sua totalidade é decompor em duas partes, o valor médio e a amplitude térmica. Precisamente, a massa térmica tem influência sobre esta última. A onda de calor que se propaga desde o exterior para o interior sofre dois efeitos, um de atenuação da amplitude térmica e outro de deslocamento temporal. O máximo da temperatura interna ocorre num certo número de horas depois do momento em que a temperatura externa atinge esse valor. Ambos, atenuação e retardo, dependem da espessura e composição da parede. Focalizando especialmente a amplitude térmica, tem-se observado nas experiências realizadas que seu valor é aproximadamente igual à metade da amplitude térmica ambiente, ou seja, uma parede de 0,15 m de espessura tem um efeito significativo na redução das oscilações da temperatura em torno de seu valor médio, fenômeno que contribui na melhora das condições de conforto térmico interno.

Espessuras maiores poderiam ter efeitos mais acentuados sobre a amplitude térmica, porém não afetam como mencionado a temperatura média. Neste aspecto, é necessário avaliar o custo resultante do aumento da espessura das paredes e o benefício em termos de conforto. Requer-se ainda considerar outras opções para obter condições similares e recorrer àquelas soluções menos onerosas levando-se sempre em consideração a relação custo benefício.

CONCLUSÕES

A carta bioclimática de GIVONI (1992) adotada no Brasil, apesar de indicar estratégias de conforto para a cidade de Recife, enfatizando especialmente a ventilação como principal recurso, não apresenta uma análise detalhada do comportamento das variáveis climáticas que a originaram. Neste aspecto, o trabalho desenvolvido contribui para um maior conhecimento destas variáveis e a influência destas nas condições de conforto de um determinado recinto.

A análise dos perfis diários de umidade relativa e temperatura ambiente para a cidade de Recife, mostra que há uma relação de oposição entre estas grandezas – o aumento da temperatura ambiente ocasiona a diminuição da umidade relativa e, conseqüentemente, a diminuição da temperatura ambiente ocasiona o aumento da umidade relativa. Este comportamento sugere a adoção do resfriamento evaporativo nos períodos de alta temperatura registrados ao longo de parte significativa do dia. O estudo realizado permite definir o período diário em que este recurso pode ser utilizado.

Ainda considerando o comportamento característico da umidade relativa, comparando-o ao da temperatura ambiente, pode-se recorrer a uma estratégia de injeção de ar frio no ambiente nos períodos de maior umidade e menor temperatura. Esta proposta dar-se-á por meio de um sistema de ventilação programado para ser acionado no período que proporcione ao ambiente o seu resfriamento, contribuindo para minimizar o desconforto nos horários de maior temperatura e menor umidade relativa.

Comparando-se os perfis de temperatura interna do recinto com os da temperatura ambiente, pôde-se verificar três efeitos importantes: a) aumento do valor médio, b) redução da amplitude térmica e c) deslocamento temporal.

O aumento do valor médio da temperatura, em aproximadamente 3 °C é atribuído, basicamente, à carga térmica decorrente da incidência de radiação solar no teto (entre 76 e 78%) e paredes. A redução da amplitude térmica do recinto (entre 2,5 °C a 3,6 °C) com relação à amplitude da temperatura ambiente (entre 5,9 °C e 8,2 °C), deve-se à massa térmica total do laboratório (paredes, teto, piso, mobiliário, equipamentos). O deslocamento temporal, ou tempo de retardo entre temperatura interna e ambiente (em torno de 5 horas), pode ser explicado pela influência da espessura das paredes e de sua difusividade térmica (α_T).

Acerca do comportamento da radiação solar incidente nas paredes do laboratório estudado, verificou-se que as fachadas Oeste e Leste apresentam a menor variação ao longo do ano, com valores compreendidos entre 6,4 MJ/m² (período de inverno) e 9,9 MJ/m² (período de verão). A maior parte da energia coletada pelo recinto incide no teto, com um mínimo de 12,7 MJ/m² no inverno e máximo de 21 MJ/m² no verão. Estes dados tornam o tratamento da cobertura algo imprescindível num projeto arquitetônico com características bioclimáticas. Para tal, sugere-se utilizar uma câmara de ar entre o telhado e a laje além de isolante térmico e blindagem radiante associados à ventilação.

As soluções indicadas no capítulo oito assumem caráter geral e podem ser exploradas das mais diversas formas por projetistas criativos que, naturalmente, possam tirar partido destas soluções de climatização por meios passivos ou de baixo consumo de energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADJMAT, R. F. & GUIJARRO, J. L. P. Iluminación natural y radiación solar en ventanas de aulas escolares en clima subtropical. In: ASADES (Avances en Energia Renovables y Medio Ambiente, 5., 2001. Mendoza Argentina, 2001. Buenos Aires, INENCO, 2001. p. 05.11 – 05.12.
- BIANCH, S. A. & GONÇALVES, A. C. M. Conforto ambiental analisado através da lógica Fuzzy. In: NUTAU (Núcleo da Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo). Universidade de São Paulo, 2000. p. 1035 – 1041.
- BRITO FILHO, J. P. *Importância de uma análise em função do tempo do problema da transferência de calor entre um recinto e o meio ambiente*. Mestrado em Ciências e Tecnologia Nuclear do Departamento de Energia Nuclear da UFPE. Recife, 1983.
- BRITO FILHO, J. P. & FRAIDENRAICH, N. *Simulação da transferência dinâmica de calor entre o meio ambiente e um recinto*. In: VI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 1981. Trabalho N^o A-7. p. 71-81.
- BRITO FILHO, J. P. & FRAIDENRAICH, N. Análise dinâmica do consumo de energia elétrica empregada no acondicionamento de recintos. In: VII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica COBEM 83, Uberlândia, 1983. Trabalho A-5. p. 39-48.

- COLLARES PEREIRA M. C & RABL A. Simple procedure for predicting long term average performance of nonconcentrating and of concentrating solar collectors. Solar Energy 23, 1979. p 235-253
- DUFFIE, J. A. & BECKMAN, W.A. Extraterrestrial Solar Radiation. In: Duffie, John A. & Beckman, William A. Solar Energy Thermal processes. ed. Estados Unidos da América. John Wiley & Sons, 1974. Cap. 1,2 e 3, p. 1-60.
- EVANS, M.; SCHILLER, S. Diseno Bioambiental y Arqitutura Solar, Universidad de Buenos Aires, Série Ediciones Previas, nº 9, 1988.
- FANGER, P. O. Thermal Confort, Robert E. Krieger Publishing Co. Malabar, Flórida USA., 1982.
- FITCHER, J. M & MORILLÓN, D. El confort térmico como variable adicional al método tradicional de valuación de inmuebles: caso vivienda del área metropolitana de Moterrey, Nuevo León, México. In: ASADES (Avances en Energia Renovables y Medio Ambiente, 5., 2001. Mendoza Argentina, 2001. Buenos Aires, INENCO, 2001. p. 01.87 - 01.91.
- FRAIDENRAICH, N. & LYRA, F. Fundamentos e tecnologias de conversão heliotermoelétrica e fotovoltaica. Ed. Recife - PE, Universitária da UFPE, 1995. 471p.
- FROTA, A. B. & SCHIFFER, S. R. Manual de conforto térmico. 4 ed. São Paulo , Studio Nobel, 2000. 243p.
- GIVONI, B & MILNE, M. *Architectural Design Based on Climate, Energy Conservation Through Buildings Design, edited by Donald Watson, MacGraw Hill Book Company, 1979*

- GIVONI, B. Confort, climate analysis and building design guidelines. Energy and Building, 3 ed. Princeton, University Press, 1992. Vol. 18, Cap. 1, pp. 11-23.
- GONZALO, G. et al. Evaluación comparativa del comportamiento lumínico y termico de diferentes soluciones de aventanamiento para escuelas y oficinas de la provincia de Tucuman. In: ASADES (Avances en Energia Renovables y Medio Ambiente, 5., 2001. Mendoza Argentina, 2001. Buenos Aires, INENCO, 2001. p. 05.13 – 05.18.
- HARRIS, A. L. N. C. et. al. Remodelagem dos grupos climáticos dos “Quadros de Mahoney” utilizando a teoria dos sistemas nebulosos. In: NUTAU (Núcleo da Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo). Universidade de São Paulo, USP, 2000. p.1134 – 1141.
- IZARD, J, & GUYOT, A. *Arquitetura Bioclimática*. México: Ediciones G. Gili. S.A., 1983
- LIMA, G. A.; FRAIDENRAICH, N. & VILELA, O. C. Climatização de edificações com baixo consumo de energia. In: XI Congresso Ibérico e VI Congresso Ibero-americano de Energia Solar . Vilamoura (Algarve), Portugal, 2002.
- KOENIGSBERGER, O.H. et al. Viviendas y edificios en zonas cálidas y tropicales. Paraninfo S.A., Madrid, Espanha. 1977.
- KOENIGSBERGER, O. H. et al. *Viviendas y Edificios en Zonas Calidas y Tropicales ed Paraninfo*. Sapain, 1977.
- LAMBERTS, R. et al. *Eficiência energética na arquitetura*. 3. ed. São Paulo, PW, 1997. 248p.
- LYRA, F. J. M. *Simulação numérica de uma central fotovoltaica interligada com a rede de energia elétrica*. Mestrado em Ciências e Tecnologia Nuclear do Departamento de Energia Nuclear.da UFPE. Recife, 1992. Apêndice D, pp. 202 – 216.

- MASCARENHAS, A. C. R. et al. Conservação de Energia em Edificações Comerciais da Cidade de Salvador. In: Anais do III Encontro Nacional e I Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído. RS 1995, p 421 – 426.
- MASCARÓ, L. R. Energia na edificação estratégias para minimizar o seu consumo. 2 ed. São Paulo SP, Projetos Editores Associados, 1991. 213p.
- Normais Climatológicas, (1931-1960). Instituto Nacional de Meteorologia, Ministério da Agricultura, Rio de Janeiro, RJ. 1979.
- Normais Climatológicas, (1931-1960). Instituto Nacional de Meteorologia, Ministério da Agricultura, Rio de Janeiro, RJ. 1979.
- OLESEN, B. Standard for design and evaluation of the in door thermal environment. ASHRAE Jornal, August, 1993.
- OLGYAY, V. Design with climate. bioclimatic approach to architectural regionalism. 4 ed. Princeton, Ney Jersey. U.S.A., Princeton University Press, 1963.
- RABL, A. Active Solar Collector and their applications. Ed. Oxford university Press, 1985. Cap. 2, p. 28-47.
- SPIRITO, P and VITALE, G. *Course on Photovoltaic Solar Devices.* Itália, Instituto Elethro tecnico, University of Napoles, 1982.
- VITRUVIO, M. L. Los diez libros de arquitectura. Barcelona, Iberia S.A., 1982.
- WATSON, D. and LABS, K. Climatic Building Design: Energy- Efficient Buildings/ Principles and Praticce, ed. MacGraw-Hill, Inc. New York, 1983.

APÊNDICE A

PROCEDIMENTO PARA O CÁLCULO E OBTENÇÃO DO PERFIL DIÁRIO DA TEMPERATURA AMBIENTE E UMIDADE RELATIVA

A.1 INTRODUÇÃO

O procedimento de cálculo a seguir apresentado foi sintetizado num programa elaborado em Mathcad 7 tornando viável estabelecer instantaneamente a comparação entre os perfis experimentais e teóricos para as variáveis umidade relativa e temperatura ambiente. O programa gerado para se obter os perfis da temperatura ambiente e umidade relativa considera basicamente uma matriz que relaciona os valores da temperatura ambiente (média mensal), temperatura ambiente máxima (média mensal), temperatura ambiente mínima (média mensal), hora média de ocorrência da temperatura máxima e hora média de ocorrência da temperatura mínima. Os valores médios mensais de temperatura ambiente, temperatura mínima e máxima foram extraídos das tabelas das Normais Climatológicas (1931 – 1960) e (1961 – 1990). Já os valores médios mensais máximos e mínimos referentes à umidade relativa, não são normalmente fornecidos nas Normais Climatológicas e podem ser obtidos a partir do estudo dos perfis diários dos dados provenientes das estações meteorológicas do INEMET. No entanto, os instantes de ocorrência dos máximos e mínimos para temperatura ambiente e umidade relativa foram calculados mediante a utilização do método de obtenção do perfil diário de temperatura, mostrado por SPIRITO & VITALE (1982).

Vale ainda observar que a utilização deste método para calcular as horas de máximo e mínimo apresenta a vantagem dos seus valores serem expressos no tempo solar utilizado no procedimento do programa, ao passo que, as horas de temperatura máxima e mínima fornecidas nos gráficos do INEMET são dados pela hora legal do local, fazendo-se necessária a conversão para o tempo solar de forma a atender as exigências do programa.

A comparação dos perfis de temperatura ambiente e umidade relativa apresentados no capítulo 6 com os resultantes do procedimento de cálculo demonstrado a seguir só foi possível após a conversão dos dados de tempo relógio para tempo solar. Conseqüentemente, foi possível gerar equações da temperatura ambiente e umidade relativa em função do ângulo solar (ω).

A.2 DETALHAMENTO DO PROCEDIMENTO DE CÁLCULO PARA OBTENÇÃO DOS PERFIS DA TEMPERATURA AMBIENTE E UMIDADE RELATIVA

Em linhas gerais, o perfil da temperatura ambiente é obtido a partir das seguintes informações:

T_{amm} = Temperatura média mensal;

T_{am} = Temperatura ambiente mínima, média mensal;

T_{aM} = Temperatura ambiente máxima, média mensal;

tM = Hora média de ocorrência da T_{aM} (temperatura ambiente máxima);

tm = Hora de ocorrência da T_{am} (temperatura ambiente mínima)

A seguir apresenta-se a matriz utilizada no procedimento de cálculos que gerou os perfis da temperatura ambiente para os meses de março, abril, maio, junho e novembro tabela. A.1.

Tabela A.1 Valores de temperatura ambiente média mensal, temperatura ambiente mínima (média mensal das mínimas), temperatura máxima (média mensal das máximas) ($^{\circ}\text{C}$) LYRA, F. J. M, 1992).

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
TaM	30,1	30,2	30,0	29,5	28,6	27,6	27,0	27,1	27,9	28,9	29,5	29,8
$Tamm$	27,0	27,1	27,0	26,6	25,6	24,7	24,2	24,2	25,0	25,9	26,4	26,7
Tam	24,4	24,5	24,1	23,3	22,5	21,8	21,2	21,2	22,4	23,4	23,9	24,2

Análise dos dados diários fornecidos pelo INEMET mostram que o perfil médio da temperatura ambiente em um dia, pode ser representado pelos dois primeiros harmônicos da série de Fourier com a frequência fundamental dada pelo ângulo horário.

$$Ta(t) = Tamm + A \cos(\mathbf{w}) + B \sin(\mathbf{w}) + C \cos(2\mathbf{w}) + D \sin(2\mathbf{w}) \quad (\text{A.1})$$

Os coeficientes A, B, C e D foram obtidos resolvendo o sistema de equações formado por:

$$Ta(t_M) = TaM \quad (\text{A.2})$$

$$Ta(t_m) = Tam \quad (\text{A.3})$$

$$\left. \frac{(dTa(t))}{dt} \right|_{t=t_M} = 0 \quad (\text{A.4})$$

$$\left. \frac{(dTa(t))}{dt} \right|_{t=t_m} = 0 \quad (\text{A.5})$$

Aplicando (A.2) em (A.1), decorre que:

$$TaM = Tamm + A \cos(\mathbf{w}) + B \sin(\mathbf{w}) + C \cos(2\mathbf{w}) + D \sin(2\mathbf{w}) \quad (\text{A.6})$$

Aplicando (A.3) em (A.1), decorre que:

$$Tam = TamM + A \cos(\mathbf{w}) + B \sin(\mathbf{w}) + C \cos(2\mathbf{w}) + D \sin(2\mathbf{w}) \quad (\text{A.7})$$

Da relação (A.4) que representa a função derivada de (A.1), decorre que:

$$-A \cdot \sin(\mathbf{w}_M) + B \cdot \cos(\mathbf{w}_M) - 2C \cdot \sin(2\mathbf{w}_M) + 2D \cdot \cos(2\mathbf{w}_M) = 0 \quad (\text{A.8})$$

Da relação (A.5) que representa a função derivada de (A.1), decorre que:

$$-A \cdot \sin(\mathbf{w}_m) + B \cdot \cos(\mathbf{w}_m) - 2C \cdot \sin(2\mathbf{w}_m) + 2D \cdot \cos(2\mathbf{w}_m) = 0 \quad (\text{A.9})$$

O sistema de equações formado por (A.6), (A.7), (A.8) e (A.9) foi resolvido utilizando-se um programa que disponibiliza quatro métodos de resolução, dois diretos e dois indiretos. Utilizou-se neste trabalho os diretos, especialmente o de Gauss-Jordam. Conseqüentemente, cada mês dá origem a um sistema de equações.

O cálculo da temperatura máxima (TM) e da temperatura mínima (Tm) foi realizado mediante a representação utilizada por SPIRITO & VITALE (1982), que expressa a temperatura ambiente em função de Tam , TaM e \mathbf{w}_s .

A seguir será apresentada uma expressão geral da qual resultará, através de alguns procedimentos de cálculos, os valores de Tm e TM :

$$Ta(t) = Tam + (TaM - Tam) \cdot Y_1 \cdot Y_2 \quad (\text{A.10})$$

$$\therefore Y_1 = \frac{\left\{ \left[\sin\left(\mathbf{w} + \frac{\mathbf{w}_s}{2}\right) \right] + \sin(\mathbf{w}_s) - \left(\mathbf{w} + \frac{3}{2} \cdot \mathbf{w}_s\right) \cdot \cos(\mathbf{w}_s) \right\}}{\sin \mathbf{w}_s - \mathbf{w}_s \cdot \cos \mathbf{w}_s} \quad (\text{A.11})$$

$$\therefore Y_2 = 0,492 - 6,88 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\mathbf{w} - \frac{\mathbf{w}_s}{2} \right) \quad (\text{A.12})$$

Fazendo-se

$Ta(tm) = Tam$ em (A.10), obtêm-se:

$$Y_1 \cdot Y_2 = 0 \quad (\text{A.13})$$

Cuja solução válida ocorre quando:

$$Y_1 = 0 \quad (\text{A.14})$$

Por outro lado, fazendo-se $Ta(tM) = TaM$ em (A.10), tem-se:

$$Y_1 \cdot Y_2 = 1 \quad (\text{A.15})$$

Decorrente das condições estabelecidas em (A.14) e (A.15), calcula-se os valores de $\mathbf{wm}(0)$ e $\mathbf{wM}(0)$.

Finalmente, obtêm-se tm (tempo de mínima temperatura) e tM (tempo de máxima temperatura) a partir da resolução numérica, pelo método de Newton, das equações (A.14) e (A.15). Os valores iniciais para a iteração numérica são $\mathbf{wm}(0) = -\mathbf{w}_s$, considerando-se que o mínimo da temperatura ambiente ocorre próximo ao nascer do sol e $\mathbf{wM}(0) = 0$, pois a temperatura ambiente máxima ocorre, normalmente, no período próximo ao meio dia solar.

Como resultado final do procedimento de cálculo, anteriormente sequenciado, obtêm-se um conjunto de doze equações que representam a temperatura ambiente em função do ângulo solar (\mathbf{w}) geradas uma para cada mês do ano.

O perfil teórico de umidade relativa foi obtido através de um procedimento análogo ao da temperatura ambiente. A diferença básica é que a temperatura máxima corresponde a menor umidade relativa e a temperatura mínima a maior umidade relativa tal qual pode-se observar nos perfis obtidos experimentalmente para estas duas variáveis. Vale ressaltar

que, no caso particular da umidade relativa, apenas o valor médio mensal é fornecido das Normais Climatológicas (1931-1960) e (1961-1990). Na falta de quaisquer informações acerca dos valores máximos e mínimos médios de umidade relativa, a alternativa adotada foi considerar estes valores extraídos de vários gráficos diários fornecidos pelo INEMET, abrangendo-se vários dias de cada mês do ano de 1988 . Os valores utilizados para gerar os perfis teóricos da umidade relativa para os meses de março, abril, maio, junho e novembro são mostrados na tabela A.2.

Tabela A.2 Valores de Umidade Relativa média mensal (URmm), Umidade Relativa mínima (média mensal das mínimas) (URm), Umidade Relativa máxima (média mensal das máximas) (URM) (%) (LYRA, F. J. .M, 1992)

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
URM	100	100	100	100	100	100	96,0	95,0	95,0	87,0	93,0	80,0
URmm	76,3	77,4	78,8	80,8	82,5	82,7	81,6	80,4	78,4	76,4	76,4	76,3
URm	66,0	70,0	60,0	73,0	66,0	80,0	80,0	67,0	70,0	62,0	60,0	63,0