



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ

Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação

**Núcleo de Referência em Ciências Ambientais do Trópico Ecotonal do Nordeste
(TROPEN)**

**Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais
(PGCA)**

**Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente
(PRODEMA)**

**Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente
(MDMA)**

**CONFORTO TÉRMICO E COBERTURAS: ESTUDOS PARA O AUMENTO DA
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES**

ROBERTO CRISTIAN ALBUQUERQUE OLMOS DE AGUILERA

PRODEMA

TERESINA

2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ (UFPI)

Núcleo de Referência em Ciências Ambientais do Trópico Ecotonal do Nordeste (TROPEN)

Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PGCA)

Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA)

Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente

(MDMA)

ROBERTO CRISTIAN ALBUQUERQUE OLMOS DE AGUILERA

**CONFORTO TÉRMICO E COBERTURAS: ESTUDOS PARA O AUMENTO DA
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal do Piauí (PRODEMA/UFPI/TROPEN), como requisito à obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Área de Concentração: Desenvolvimento do Trópico Ecotonal do Nordeste. Linha de Pesquisa: Biodiversidade e Utilização Sustentável dos Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Pedro W. G. N. Teixeira

TERESINA - PIAUÍ

2006

Aguilera, Roberto Cristian Albuquerque Olmos de

A283c

Conforto térmico e coberturas: estudos para o aumento da eficiência energética em edificações. / Roberto Cristian Albuquerque Olmos de Aguilera. Teresina: 2006

85 fls.

Dissertação (mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente)
UFPI.

1. Coberturas (construção). 2. Conforto Térmico (coberturas). I
Título.

ROBERTO CRISTIAN ALBUQUERQUE OLMOS DE AGUILERA

**CONFORTO TÉRMICO E COBERTURAS: ESTUDOS PARA O AUMENTO DA
EFICIENCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal do Piauí (PRODEMA/UFPI/TROPEN), como requisito à obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Área de Concentração: Desenvolvimento do Trópico Ecotonal do Nordeste. Linha de Pesquisa: Biodiversidade e Utilização Sustentável dos Recursos Naturais.

Teresina, 04 de julho de 2006.

Dr. Pedro Wellington G. N. Teixeira
Universidade Federal do Piauí (PRODEMA)

Dra. Wilza Gomes Reis Lopes
Universidade Federal do Piauí (PRODEMA)

Dr. George Santos Marinho
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

A Jones Albuquerque
(in-memorian)

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Pedro Wellington Gonçalves do Nascimento Teixeira, pela compreensão, paciência, amizade e orientação dada há de mais de 5 anos, desde a iniciação científica no período de graduação em Engenharia Civil;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa concedida;

À Professora Dra. Jaíra Alcobaça, pela dedicação com que conduz o Mestrado em Ciências Ambientais;

Ao Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), seus professores, funcionários e amigos do Núcleo de Referência em Ciências Ambientais do Trópico Ecotonal do Nordeste (TROPEN): Ribamar Andrade, Maridete Brito e Batista Araújo.

À Professora Dra. Wilza Gomes Reis Lopes e ao Professor Dr. José Ribeiro, pela grande ajuda e correção do trabalho na qualificação desta dissertação;

Ao pessoal da Divisão de Engenharia do Tribunal de Contas do Estado, pela amizade, e em especial ao Sr. Francisco José Soares Fernandes, meu chefe e amigo, pela compreensão quando precisei de algumas horas para concluir este trabalho;

Ao meu amigo e sócio Danilo Mascarenhas Prado, Engenheiro Civil, por passar algumas longas horas, ajudando-me na formatação deste trabalho e por suas idéias sempre formidáveis;

Ao meu amigo Helder Pontes Gomes, irmão de coração, por incentivar-me, mesmo estando a mais de mil quilômetros de distância;

À mestra em Ciências Ambientais, Socorro Sales, por ter me dado força na Paraíba, no período do Seminário Integrador.

A Ronaldo Jones Sá de Albuquerque, meu grande amigo, pelo companheirismo e amizade que tem por mim desde meus primeiros dias de vida;

Ao Professor Ozildo, pelas brilhantes sugestões dadas para o desenvolvimento deste trabalho;

A todos os colegas de Curso;

À Juliana Bendini pela ajuda dispensada nessa fase final de elaboração da dissertação;

Ao amigo Bernardo de Araújo Pereira Neto, pela preocupação diária, incentivo e amizade sincera;

Ao Sr. Valdemar Santos, Irenilde Ribeiro, Livia Ribeiro, Danilo Ribeiro e Mariana Santos, minha segunda família que sempre me acolheram muito bem e que compreenderam a minha ausência nesse período de estudo;

À Margaret Rose Sá de Albuquerque Porto, minha conselheira, que sempre esteve ao meu lado, ajudando-me a enfrentar os obstáculos;

A toda minha família, em especial a Dona Tereza Sá, minha avó-mãe;

À minha mãe, razão de eu ter chegado até aqui com seu constante zelo e carinho.

e, por último,

A Leorgina Maria Ribeiro dos Santos Barros, minha fortaleza, que muito me ajudou para a realização deste trabalho. Pelo incentivo, pela revisão dada a este trabalho, por ser minha companheira em tudo e em qualquer hora. Te Amo Hoje e Sempre!!

*Quando olhei pra cima, vi, bem no alto, a
primeira estrela da noite...*

*Fechei os olhos e pensei que aquele momento
devia ser eterno...*

*Segurei bem forte a sua mão e, sempre, sempre
mesmo, estarei com você...*

...mesmo se a primeira estrela não vier...

(R. C. Aguilera)

Resumo

As questões ambientais e a escassez de recursos energéticos fazem parte do discurso de sustentabilidade global tão difundido nos últimos anos. É na forma como arquitetos e engenheiros se inter-relacionam com esses temas que se dá a contribuição de suas áreas na sustentabilidade. O discurso ambiental só veio a se incorporar às preocupações energéticas na última década, como forma de contribuição no atendimento às metas estabelecidas no Protocolo de Kyoto. Nesse momento surgem as primeiras iniciativas no âmbito da economia e uso racional de energia elétrica, política que atingiu em cheio às edificações. Adequar a arquitetura e a estrutura de uma edificação ao clima de um determinado local significa construir espaços que possibilitem ao homem condições de conforto térmico. Portanto, para o projetista cabe amenizar as sensações de desconforto impostas por climas muito rígidos, que apresentam excesso de calor, de frio, ou de vento, como também propiciar ambientes que sejam, no mínimo, tão confortáveis como os espaços ao ar livre em climas amenos. Visando aumentar a eficiência energética nas edificações, optou-se por estudar as coberturas, elemento construtivo que possui grande interferência na temperatura interna das edificações. Teresina, por estar próxima à linha do Equador (latitude 05°05' - sul), recebe no plano horizontal o maior valor absoluto de radiação solar. As coberturas controlam grande parte do fluxo de calor transmitido para o interior da edificação, tornando-se importante, então, uma análise aprofundada dos vários parâmetros inerentes a esse elemento, procurando otimizá-lo termicamente. Então, o objetivo principal deste trabalho é estudar diferentes tipos de coberturas, variando-se parâmetros estruturais e térmicos, visando minimizar carga térmica e reduzir, assim, o consumo de energia elétrica para climatização artificial, bem como os efeitos da temperatura sobre a estrutura. Para isso, utilizou-se metodologia teórica, assim composta: a) revisão bibliográfica; b) escolha dos tipos de coberturas para estudos de caso; c) variação comparativa de parâmetros estruturais e arquitetônicos. Três parâmetros foram abordados neste estudo: inclinação, orientação e tipo de material utilizado na cobertura. Calculou-se os níveis de radiação solar para inclinações de 25%, 10% e 5%, correspondentes ao uso de telhas cerâmica, de aço e de amianto. Logo após esse estudo, foram considerados 15 casos, divididos em três grupos. Cada grupo corresponde a um tipo de telha já citado, e então, subdivididos em 5 casos: (1) não utilização de forro, forro de gesso, forro de PVC, forro de laje de concreto e forro em laje pré-moldada com capeamento. Conclui-se que, para Teresina, a orientação e a inclinação não influenciaram no resultado final de carga térmica, sendo, a utilização de forro o elemento mais importante, diminuindo em até 400% o valor final de carga térmica em relação ao caso mais desfavorável.

Palavras-Chave: Conforto Térmico; Coberturas; e, Eficiência Energética.

Abstract

The environment questions and the lack of energetic resources are part of speech about global sustainability so debated in the last years. Architects and engineers' contribution is in form of this relationship about these topics. The environment speech just became solid on the last decades, as a part of Kyoto's Protocol. At this moment was born the first economic activities and rational use of electric energy, policies that beat front to front to conceptions of buildings and its projects. To manage architecture and structure of a building to the local climate conditions is the same of build spaces that provides man natural conditions of termic comfort. So, the projectors have to fight with bad conditions forced upon some climates, that bring excess of heat, cold or wind, and also afford internal conditions as comfortable as spaces on the free air in the bland climates. Objectifying accrue the energetic efficiency on the buildings, was chosen study the roofs, constructive element that has great interference in the internal temperature. Teresina, because its location (near to Equatorial line), receives in the horizontal plan the most absolute value of sun radiation. The roofs control a big part of caloric flux conducted to the internal areas of buildings, became important a deep analysis of many parameters about this element, with the purpose of termic optimization. The most important objective of this study is detail different types of roofs, varing estructural and thermic parameters, aiming to minimize thermic load and to reduce the consumption of electric energy to artificial climatization. For that was used theoric methodology, just built-up of: a) bibliografic review; b) choise of different types of roofs for the case study; and c) comparative variance of architectural parameters. Three parameters were attacked on this study: inclination, orientation and type of material use don the roofs. The level of solar radiation were calculated to inclination of 25%, 10% e 5%, corresponding the use of tiles, steel and a type of cement component called fibrocimento. After that, 15 cases were analised, in 3 groups. Each group correspond to a type of roof, and then, subdivided in 5 cases: (1) no use of roof covering, roof covering by gypsum, roof covering by PVC, roof covering by concrete flagstone, and roof covering by pre fabricated flagstone (ceramic and concrete). It was possible to conclude that, for Teresina, capital of state of Piauí, the orientation na inclination has no big participation on the final results of Caloric Load, being the use of covering roofs the principal element to reduce it, decreasing about 80% in front os yhe worst case.

Key-Words: Caloric Comfort; Roofs; Energetic Efficiency; Caloric Load.

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 - Centro de Teresina (maioria de edificações horizontais) | 4 |
| Figura 1.2 – Fotografia de Satélite do centro de Teresina | 5 |
| Figura 3.1 - Área de abrangência de distribuição das concessionárias de energia elétrica | 11 |
| Figura 3.2 – Oferta interna de energia por unidade do PIB, discretizando cada parcela de contribuição das fontes geradoras de energia | 12 |
| Figura 3.3 – Oferta Interna de Energia por habitante | 13 |
| Figura 3.4 – Oferta Interna de Energia por unidade do PIB | 14 |
| Figura 3.5 - Quadro evolutivo dos consumos energéticos não-industrial em função das décadas de 80 e 90 | 17 |
| Figura 3.6 – Mapa Climatológico Simplificado do Brasil | 25 |
| Figura 3.7 – Zoneamento Bioclimático do Brasil | 26 |
| Figura 3.8 – Locação das 330 células analisadas | 27 |
| Figura 3.9 – Carta Bioclimática Brasileira, adaptada de GIVONI (1997) | 28 |
| Figura 3.10 – Carta Bioclimática para Teresina | 29 |
| Figura 3.11 – Cobertura em telha de aço | 31 |
| Figura 3.12 – Telha cerâmica | 31 |
| Figura 3.13 – Telha de fibrocimento | 31 |
| Figura 3.14 – Cobertura de palha | 31 |
| Figura 3.15 – Telha ecológica | 31 |
| Figura 3.16 – Cobertura “verde” | 31 |
| Figura 4.1 – Orientação genérica de inclinação de coberturas (N, E, S e W) | 37 |
| Figura 4.2 – Fluxograma para cálculo de carga térmica | 38 |
| Figura 4.3 – Carta Solar de Teresina – PI | 42 |
| Figura 4.4 – Transferidor para inclinação de 14° | 43 |
| Figura 4.5 – Transferidor para inclinação de 6° | 44 |
| Figura 4.6 – Transferidor para inclinação de 3° | 45 |
| Figura 4.7 – 3 Fases do Fluxo de Calor | 48 |
| Figura 5.1 – Variação da radiação solar global ao longo do dia para $i=25\%$ | 57 |
| Figura 5.2 - Comportamento dos valores de radiação solar global ao longo do dia para $i=10\%$ | 59 |
| Figura 5.3 - Comportamento dos valores de Radiação Solar Global ao longo do dia para $i=5\%$ | 61 |
| Figura 5.4 - Média diária de radiação solar, para os solstícios e equinócio – 25% Norte (W/m^2) | 61 |
| Figura 5.5- Média Diária de Radiação Solar, para os Solstícios e Equinócio – 25% Leste (W/m^2) | 62 |
| Figura 5.6- Média diária de radiação solar, para os solstícios e equinócio – 25% Sul (W/m^2) | 62 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.7 - Média Diária de Radiação Solar, para os Solstícios e Equinócio – 25% Oeste (W/m ²) | 63 |
| Figura 5.8 - Média diária de radiação solar, para os solstícios e equinócio – 10% Norte (W/m ²) | 63 |
| Figura 5.9 - Média diária de radiação solar, para os solstícios e equinócio – 10% Leste (W/m ²) | 64 |
| Figura 5.10 - Média diária de radiação solar, para os solstícios e equinócio – 10% Sul (W/m ²) | 64 |
| Figura 5.11 - Média diária de radiação solar, para os solstícios e equinócio – 10% Oeste (W/m ²) | 65 |
| Figura 5.12 - Média diária de radiação solar, para os solstícios e equinócio – 05% Norte (W/m ²) | 65 |
| Figura 5.13 - Média diária de radiação solar, para os solstícios e equinócio – 05% Leste (W/m ²) | 66 |
| Figura 5.14 - Média diária de radiação solar, para os solstícios e equinócio – 05% Sul (W/m ²) | 66 |
| Figura 5.15 - Média diária de radiação solar, para os solstícios e equinócio – 05% Oeste (W/m ²) | 66 |
| Figura 5.16 - Média anual de carga térmica devido à cobertura nos 15 casos analisados | 77 |
| Figura 5.17 – Vista dos módulos (cabines) | 78 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1 - Evolução da Demanda Máxima | 8 |
| Tabela 3.2 - Quadro Evolutivo de Oferta de Energia/PIB/População | 12 |
| Tabela 3.3 - Evolução da produção, do consumo e das perdas (1970-2002) | 16 |
| Tabela 3.4 – Estratégias Bioclimáticas para Teresina | 30 |
| Tabela 3.5 – Condições Internas de Verão | 32 |
| Tabela 3.6 – Normais Climatológicas – Teresina (1961-1990) | 33 |
| Tabela 4.1 – Tipos de cobertura selecionados | 36 |
| Tabela 4.2 - Tipo de material da telha e respectivas inclinações usuais | 36 |
| Tabela 4.3 – Condições Externas para Teresina (SILVEIRA,1999) | 39 |
| Tabela 4.4 – Incidência solar sobre planos verticais e horizontais (solstício de verão) – W/m ² | 39 |
| Tabela 4.5 – Incidência solar sobre planos horizontais e verticais (equinócio) – W/m ² | 40 |
| Tabela 4.6 – Incidência solar sobre planos horizontais e verticais (solstício de inverno) – W/m ² | 40 |
| Tabela 4.7 - Absortividade em função da cor | 48 |
| Tabela 4.8 - Condutibilidade Térmica de Alguns Materiais | 49 |
| Tabela 4.9 - Emissividade de Alguns Materiais | 50 |
| Tabela 4.10 - Resistência Térmica Superficial Interna e Externa | 50 |
| Tabela 4.11 - Transmitância Térmica, Capacidade Térmica e Atraso Térmico para Alguns Tipos de Cobertura | 51 |
| Tabela 5.1 - Valores de Radiação Solar Global em Superfícies Inclinadas em 14° | 56 |
| Tabela 5.2 -Valores de Radiação Solar Global em Superfícies Inclinadas em 06° | 58 |
| Tabela 5.3 - Valores de radiação solar global em superfícies inclinadas em 03° | 60 |
| Tabela 5.4 - Valores médios de radiação solar, para 14°, 06° e 03° de inclinação para N, E, S e W | 67 |
| Tabela 5.5 - Os 15 Casos de Estudo e suas Respectivas Características Construtivas | 69 |
| Tabela 5.6 - Valores de resistência térmica e transmitância para os 15 Casos de Estudo, segundo PN02:135.07-001/3:2003 | 70 |
| Tabela 5.7 - Valores de temperatura média máxima e temperatura mínima absoluta para os 12 meses do Ano | 71 |
| Tabela 5.8 - Valores de temperatura sol-ar equivalente máxima – TSA-MÀX (°C) | 72 |
| Tabela 5.9 - Dados físicos dos casos analisados | 72 |
| Tabela 5.10 - Valores de temperatura sol-ar equivalente média – TSA-MÉD (°C) | 73 |
| Tabela 5.11 - Valores de temperatura superficial interna média – TSI-MÉD (°C) | 73 |
| Tabela 5.12 - Valores da amplitude de onda externa (AE) - °C | 74 |
| Tabela 5.13 - Valores da amplitude de onda interna (AI) - °C | 74 |
| Tabela 5.14 - Valores de TSI-MÁX (°C) | 75 |
| Tabela 5.15 - Carga térmica ao longo de 12 meses para os casos analisados (W/m ²) | 76 |
| Tabela 5.16 – Gráfico de variação de temperatura (Elemento: Cobertura) | 79 |

Lista de Fórmulas

| | | |
|--------------|--|----|
| Fórmula 4.1 | $I_G = I_D + I_d \text{ (W/m}^2\text{)}$ | 41 |
| Fórmula 4.2 | $I_{i/n} = I_D / \text{sen } h \text{ (W/m}^2\text{)}$ | 43 |
| Fórmula 4.3 | $I_{d/\beta} = I_{d/h} \times [(1 + \cos \beta) / 2] \text{ (W/m}^2\text{)}$ | 45 |
| Fórmula 4.4 | $I_{D/\beta} = I_{i/n} \times \cos i \text{ (W/m}^2\text{)}$ | 45 |
| Fórmula 4.5 | $I_{g/\beta} = I_{D/\beta} + I_{d/\beta} \text{ (W/m}^2\text{)}$ | 45 |
| Fórmula 4.6 | $R = L / \lambda \text{ [m}^2 \cdot ^\circ\text{C / W]}$ | 49 |
| Fórmula 4.7 | $T_{SAM\acute{a}x} = t_E + \alpha \cdot I \cdot R_{se} \text{ (}^\circ\text{C)}$ | 53 |
| Fórmula 4.8 | $P = d_t \cdot e_t + d_f \cdot e_f + 20 \text{ (kg/m}^2\text{)}$ | 53 |
| Fórmula 4.9 | $T_{SAM\acute{e}d} = (T_{SAM\acute{a}x} + t_{\min}) / 2 \text{ (}^\circ\text{C)}$ | 53 |
| Fórmula 4.10 | $T_{SiM\acute{e}d} = [(T_{SAM\acute{e}d} - t_i) \cdot (R_T)^{-1} \cdot R_{si}] + t_i \text{ (}^\circ\text{C)}$ | 53 |
| Fórmula 4.11 | $T_{SiM\acute{a}x} = T_{SiM\acute{e}d} + A_I \text{ (}^\circ\text{C)}$ | 53 |
| Fórmula 4.12 | $q = (T_{SiM\acute{a}x} - t_i) / R_{si} \text{ (W/m}^2\text{)}$ | 54 |
| Fórmula 4.13 | $Q = q \cdot A \text{ (W)}$ | 54 |
| Fórmula 5.1 | $T_{SiM\acute{e}d} = [(T_{SAM\acute{e}d} - t_i) \cdot (R_T)^{-1} \cdot R_{si}] + t_i \text{ (}^\circ\text{C)}$ | 73 |
| Fórmula 5.2 | $2 \cdot A_E = T_{SA-M\acute{A}X} - T_{\min} \text{ (}^\circ\text{C)}$ | 74 |
| Fórmula 5.3 | $T_{SiM\acute{a}x} = T_{SiM\acute{e}d} + A_I \text{ (}^\circ\text{C)}$ | 75 |
| Fórmula 5.4 | $q = (T_{SiM\acute{a}x} - t_i) / R_{si} \text{ (W/m}^2\text{)}$ | 76 |

Lista de Símbolos

| | |
|---------------------|--|
| m | Metro |
| $^{\circ}C$ | Grau Celcius |
| s | Segundos |
| h | Hora |
| W | Watt |
| I_G | Índice de Radiação Solar Global Incidente |
| I_D | Índice de Radiação Solar Direta Incidente |
| I_d | Índice de Radiação Solar Difusa Incidente |
| $I_{d/\beta}$ | Índice de Radiação Solar Difusa em Plano Inclinado |
| $\text{sen } h$ | Seno da Altura Solar |
| R | Resistência Térmica |
| L | Espesura do Paramento |
| λ | Condutibilidade Térmica |
| $T_{SAM\acute{a}x}$ | Temperatura Sol-Ar Máxima (superfície externa) |
| t_E | Temperatura Exterior (ambiental) |
| A | Área de Superfície |
| I | Índice de Radiação Solar |
| R_{se} | Resistênciua da Superfície Externa |
| $t_{mín}$ | Temperatura ambiental interna |
| R_T | Resistencia Total do Conjunto |
| $T_{SiMéd}$ | Temperatura Média Superfície Interna |
| $T_{SAMéd}$ | Temperatura Sol-Ar Média |
| $T_{SiMáx}$ | Temperatura Máxima Superfície Interna |
| A_I | Amplitude de Onda Interna |
| A_E | Amplitude de Onda Externa |
| R_{si} | Resistência da Superfície Interna |
| q | Fluxo de Calor |
| Q | Carga Térmica |

Sumário

| | |
|---|-------------|
| RESUMO | viii |
| ABSTRACT | ix |
| | |
| LISTA DE FIGURAS | X |
| LISTA DE TABELAS | xii |
| LISTA DE FÓRMULAS | xiii |
| LISTA DE SÍMBOLOS | xiv |
| | |
| 1.0 INTRODUÇÃO | 01 |
| 2.0 OBJETIVOS | 06 |
| 3.0 REVISÃO DA LITERATURA | 07 |
| 3.1 Políticas Públicas e Energia: Quadro Evolutivo | 07 |
| 3.2 Crise Energética no Brasil x Crescimento da Demanda e da Oferta de Energia | 09 |
| 3.3 Retrato do Consumo Energético Brasileiro | 16 |
| 3.4 Eficiência Energética e Sustentabilidade Ambiental | 18 |
| 3.5 Conforto Térmico | 20 |
| 3.6 A Bioclimatologia nos Projetos Arquitetônicos | 23 |
| 3.7 O Clima do Brasil e seu Zoneamento Bioclimático Segundo o Projeto de Norma PN02:135.07-001/3:2003 | 24 |
| 3.8 Estratégias Bioclimáticas para Teresina | 29 |
| 3.9 Carga Térmica | 31 |
| 4.0 METODOLOGIA | 35 |
| 4.1 Etapas para Cálculo da Carga Térmica para casos indicados | 37 |
| 4.1.1 Determinação das Condições Climáticas Externas | 38 |
| 4.1.2 Cálculo do Índice de Radiação Global Incidente em Planos Inclinados | 39 |
| 4.1.2.1 Cálculo da Radiação Solar Incidente em Planos Inclinados em Função da Orientação | 40 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 4.2 | Determinação da Temperatura Interna Desejada | 46 |
| 4.3 | Rotina de Cálculo de Desempenho Térmico em uma Cobertura | 46 |
| 4.4 | Cálculo da Carga Térmica | 52 |
| 5.0 | APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 55 |
| 5.1. | Radiação Solar em Planos com Inclinação de 14° | 55 |
| 5.2. | Radiação Solar em Planos com Inclinação de 06° | 57 |
| 5.3. | Radiação Solar em Planos com Inclinação de 03° | 59 |
| 5.4. | Análise Comparativa dos Resultados Encontrados para Índices de Radiação Solar em Planos Inclinados | 60 |
| 5.5. | Determinação Teórica da Carga Térmica em Edificações devido às Coberturas | 67 |
| 5.6. | Comparação dos Resultados Encontrados com Dados de Temperatura Medidos em Teresina - PI | 75 |
| 6.0 | CONCLUSÕES | 80 |
| 7.0 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 84 |

1 INTRODUÇÃO

Adequar a arquitetura e a estrutura de uma edificação ao clima de uma determinada região significa construir espaços que possibilitem ao homem condições de conforto térmico. Portanto para o projetista cabe tanto amenizar as sensações de desconforto impostas por climas muito rígidos, tais como os de excessivo calor, frio ou ventos, como também, propiciar ambientes que sejam tão confortáveis como os espaços ao ar livre em climas amenos.

Dentre as variáveis climáticas que caracterizam uma região, podem-se distinguir as que mais interferem no desempenho térmico dos espaços construídos: a oscilação diária e anual da temperatura e umidade relativa, a quantidade de radiação solar incidente, o grau de nebulosidade do céu, a predominância de época e o sentido dos ventos e índices pluviométricos.

Os valores dessas variáveis se alteram para distintos locais da Terra em função da influência de alguns fatores como circulação atmosférica, distribuição de terras e mares, relevo, revestimento do solo, latitude e altitude.

Os fatores climáticos atuam de forma intrínseca na natureza. A ação simultânea das variáveis climáticas terá influência no espaço arquitetônico construído.

Para que se tenha uma compreensão facilitada, é conveniente dividir o clima em três escalas distintas, porém indissociáveis: macroclima, mesoclima e microclima.

As variáveis do macroclima são quantificadas a partir de dados de estações meteorológicas, podendo descrever as características gerais de uma região em termos de sol, temperatura, ventos, umidade e precipitações.

Chegando mais próximas ao nível da edificação, têm-se as escalas meso e microclimáticas. Alguns tipos de mesoclima podem ser identificados facilmente, como por exemplo: o litoral, o campo, as florestas, os vales, as cidades e as regiões montanhosas. É aqui que variáveis como a topografia, o tipo de solo e a presença de obstáculos naturais ou artificiais irão influenciar nas condições locais de clima. De forma semelhante, porém bem mais perto da edificação, tem-se o microclima. Este pode ser concebido e alterado pelo arquiteto e pelo engenheiro. O estudo das variáveis desta escala é fundamental para o lançamento do projeto, pois uma série de particularidades climáticas do local pode induzir à soluções e estratégias mais adequadas ao bem-estar das pessoas (LAMBERTS et al, 2004).

Em relação ao microclima, os fatores climáticos que participam diretamente da concepção do projeto e que devem ser traduzidos em estratégias são: a vegetação no entorno, a radiação solar, a temperatura do ar, a direção e velocidade dos ventos e a umidade. Tais fatores estudados em conjunto indicam que soluções são viáveis para tornar o ambiente mais agradável e propiciar, então, sensação de conforto térmico.

Lamberts et al (2004) define conforto térmico como "um estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa. Se o balanço de todas as trocas de calor a que está submetido o corpo for nulo e a temperatura e o suor estiverem dentro do limite, pode-se dizer que o homem sente conforto térmico".

As condições de conforto térmico estão vinculadas, portanto, a uma série de variáveis. Para avaliar tais condições, o indivíduo deve estar apropriadamente vestido e sem problemas de saúde ou aclimatação. É certo que as condições ambientais capazes de proporcionar sensação de conforto térmico para habitantes de locais de clima quente e úmido não são as mesmas que proporcionam sensação de conforto para habitantes de locais de clima seco e quente e, muito menos, para habitantes de locais onde predomina de clima temperado ou frio.

Sabe-se que grande parte das edificações do Nordeste, e principalmente de Teresina, não propicia, naturalmente, conforto térmico aos seus usuários, sendo de baixa eficiência térmica. Assim, os usuários têm de se valer de meios artificiais para tornar habitáveis as edificações, haja vista que o desenvolvimento de tarefas e vivência, em níveis doméstico e profissional, em ambientes não adequados acarreta problemas físicos e psicológicos. Com isso, há um aumento, cada vez mais acentuado, do consumo de energia elétrica, através da utilização inevitável de condicionadores de ar, ventiladores e exaustores mecânicos (COUTINHO, 1998). Com isso, fica fácil associar os conceitos de eficiência térmica e eficiência energética. Segundo Lamberts (2004), a Eficiência Energética pode ser entendida como a obtenção de um serviço com baixo dispêndio de energia. Portanto, um edifício é mais eficiente energeticamente que outro quando proporciona as mesmas condições ambientais com menor consumo de energia.

Em regiões de baixas latitudes, o aumento da eficiência energética pode ser conseguido através da diminuição da carga térmica a qual uma edificação está submetida, uso da iluminação e ventilação naturais e de outros condicionantes que reduzam o consumo de energia. Visando aumentar a eficiência energética nas edificações residenciais de Teresina, optou-se por estudar um dos elementos construtivos que possui grande responsabilidade na temperatura interna das edificações: as coberturas. Estas recebem diretamente a radiação solar, controlando o fluxo de calor transferido para o interior da edificação, tornando-se importante, então, uma análise aprofundada dos vários parâmetros inerentes a esse elemento, para que seja possível otimizá-lo termicamente.

Atualmente existe o projeto de Norma n. 02:135.07-001 (ABNT,2000) que norteia o cálculo da Carga Térmica de uma edificação, fator muito importante, pois até meados de 2003, tais cálculos eram tomados por procedimentos variados, como os apresentados em (LAMBERTS et al, 2004) e em (FROTA e SHIFFER,2000). Não havia, portanto, uniformidade de procedimentos e nem de resultados.

Este trabalho foi voltado para o estudo dos efeitos térmicos em coberturas na cidade de Teresina, capital do Estado do Piauí, considerando-se variações na orientação da geratriz (eixo maior da edificação), o material utilizado (aço, concreto e cerâmica), a seção transversal, uso ou não de isolante térmico, tipo de forro e ático com e sem ventilação. Com

os valores da carga térmica é possível fazer um estudo comparativo para prever qual tipo de cobertura poderá resultar no uso mais racional de energia para climatização da edificação.

Por que, então, o estudo de coberturas em Teresina? Ora, é sabido que os dois parâmetros que recebem incidência solar direta nas edificações são as paredes e as coberturas. Como Teresina está próxima à Linha do Equador (latitude $05^{\circ}05'$) a incidência solar vertical é mais acentuada. Outro ponto importante é que, embora o consumo de energia nas edificações comerciais e residenciais seja menor que o consumo energético nas indústrias, esse apresenta um crescimento constante desde os anos 70 (taxa de 5% ao ano) independentemente das variações e tendências mundiais da economia. Teresina ainda é uma cidade predominantemente horizontal, com a grande maioria de suas edificações residenciais e comerciais de no máximo dois pavimentos (ver Figuras 1 e 2).



Figura 2.1 - Centro de Teresina

Fonte: Prefeitura Municipal de Teresina (2000)

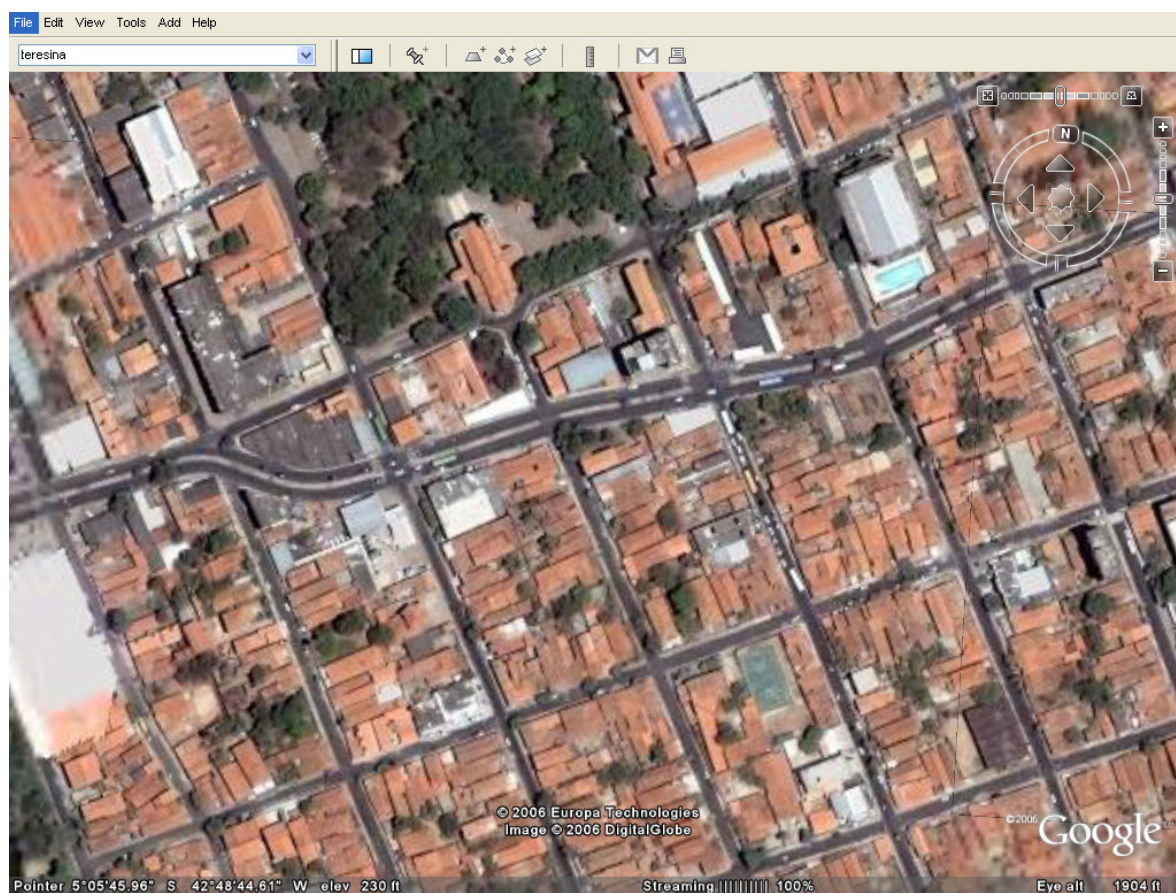


Figura 1.2 – Fotografia de Satélite do centro de Teresina

Fonte: *Software* GOOGLE EARTH (2006)

Considerando-se diferentes tipos de cobertura e parâmetros arquitetônicos e estruturais, tais como tipo de material utilizado, orientação, seção transversal, dentre outros, foi realizada uma análise comparativa para se determinar quais tipos de cobertura melhor se adequam ao clima de Teresina e qual a melhor orientação de inclinação para o projeto das coberturas. Com isso, espera-se propiciar clima adequado para uso privado e público e a possível redução do consumo de energia elétrica.

2 OBJETIVOS

a. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é análise comparativa de parâmetros para determinação de desempenho térmico de coberturas, considerando-se: material, inclinação, orientação, visando minimizar carga térmica e reduzir, assim, o consumo de energia elétrica para climatização artificial e propiciar condições climáticas mais amenas.

b. Objetivos Específicos

Realizar estudo comparativo para determinar qual a melhor orientação de inclinação para coberturas;

Determinar, ao longo do ano, valores médios de carga térmica devido às coberturas de edificações, utilizando diferentes sistemas construtivos;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Políticas Públicas e Energia: Quadro Evolutivo

São inegáveis os progressos ao longo das últimas décadas que vêm sendo feitos na área de energia no Brasil. A integração energética do território nacional vem se dando de forma crescente, energias não comerciais estão sendo substituídas, cada vez mais, por fontes energéticas comerciais mais modernas, a qualidade do abastecimento não cessa de melhorar, a eficiência técnica dos equipamentos de uso final cresce a cada ano. Todas estas transformações na área energética, são conseqüências de políticas voltadas para o desenvolvimento social e econômico.

Uma análise mais cuidadosa e aprofundada da realidade energética brasileira revela, entretanto, que boa parte dos ganhos auferidos nestas últimas décadas se distribuiu de maneira extremamente desigual entre os diferentes segmentos da sociedade brasileira. Percebe-se que, desigualdades no passado entre os meios rural e urbano continuam a persistir e, ainda, que, a urbanização intensa, que vem ocorrendo, causa desequilíbrios, que já se tornaram endêmicos, entre diferentes grupos sociais nas grandes cidades (ver Tabela 3.1).

Neste sentido, as desigualdades econômicas, sociais e energéticas, que se verificam no seio da sociedade brasileira são superiores às desigualdades médias que se observam entre as populações dos países desenvolvidos, onde as economias são as mais avançadas do planeta. Nota-se, claramente, essa diferenciação com base na tabela abaixo extraída de Martins (1999).

Tabela 3.1 - Evolução da Demanda Máxima

| Ano | Norte Nordeste (MW) | Sul, Sudeste, Centro-Oeste (MW) |
|------------|------------------------------------|--|
| 1970 | 825 | 6.638 |
| 1980 | 3.165 | 18.692 |
| 1990 | 6.835 | 29.619 |
| 1998 | 10.520 | 43.116 |
| 2002 | 12.680 | 48.225 |

Fonte: Martins, 1999

Como um dos temas que integram o debate atual de mudanças ambientais globais, o consumo de energia tem sido objeto de grandes discussões, no que toca seu papel no desenvolvimento dos países. O consumo de energia, base das atividades produtivas, ocasiona impactos sobre o meio ambiente. Assim, se no passado a energia era tratada como sendo meramente um problema de fornecimento de insumo para a produção, ameaçada nos anos 70 pela crise do petróleo e pela conseqüente elevação de seu preço, nos anos 80 torna-se uma questão ligada fortemente à preservação do meio ambiente. O que se constata nas discussões internacionais e nos estudos em diversos países é o aprofundamento dessa relação. A crescente ligação entre energia e meio ambiente articula-se com a ciência e a tecnologia, mobilizadas para resolver o problema de melhorar a eficiência na transformação (produção e consumo final), no transporte, na distribuição e na disposição dos resíduos (SCHAEFFER, 2003).

No entanto, as condições nas quais esse consumo deve ocorrer suscitam grandes debates. Algumas correntes econômicas afirmam que desenvolvimento e consumo de energia caminham necessariamente juntos, ressaltando uma relação quantitativa entre esses conceitos.

Ainda que o crescimento econômico implique em aumento do consumo de energia, em larga escala, o desenvolvimento, conceito muito mais amplo do que o primeiro, supõe uma análise mais qualitativa do problema energético. O conceito de estilo de desenvolvimento faz referência às noções de modo de vida, padrão de consumo e escolha tecnológica. Um estilo de desenvolvimento se traduzirá pela escolha de estratégias globais de desenvolvimento, assim

como, políticas apropriadas aos diversos setores da vida econômica e social: política industrial, energética, ambiental, agrícola, habitacional, de transportes e de tecnologia (COHEN, 2003). Em outras palavras, diferenciando-se crescimento de desenvolvimento é possível supor que há caminhos diversos dos que foram traçados pelos países desenvolvidos, não necessariamente tão centrais em energia. Uma diferenciação com relação aos caminhos já traçados pelos países desenvolvidos supõe, da mesma forma, um não-mimetismo do planejamento energético a ser implantado nos países em desenvolvimento, conjugado ao planejamento ao longo prazo, para que o consumo imediato não obstrua os projetos de sustentabilidade global.

A globalização e os padrões internacionais de cultura e de consumo têm tido um enorme efeito sobre os países em desenvolvimento, com conseqüências sociais bem conhecidas: o transplante de tecnologias caras, únicas disponíveis para a produção de bens de consumo, que desloca mão-de-obra e agrava, ainda mais, as desigualdades na distribuição de renda. Assim, pode-se considerar que o modelo imitativo de crescimento na periferia tem incorporado em seu seio um elemento de crise estrutural, que a disponibilidade de energia barata acentuou, na medida em que, levou à substituição de fatores de produção localmente abundantes por outros importados.

A abordagem da questão energética, sob o ponto de vista dos padrões de consumo, advindos do processo de urbanização sofrido nos países em desenvolvimento e, em particular, no Brasil, no contexto de mudanças ambientais globais, deve ser estudada e tratada de forma especial, pois a partir de uma boa fundamentação podem-se implementar políticas que conduzam à sustentabilidade energética (ANEEL, 2003).

3.2 Crise Energética no Brasil e Crescimentos da Demanda e da Oferta de Energia

Como já foi citado, o cenário energético brasileiro passou por uma crise na década de 70 e crescimento dos centros urbanos na década de 80, aumentando bruscamente o consumo de energia. Sistemas de iluminação e de climatização passaram a ser largamente utilizados.

A partir do período conhecido como milagre brasileiro (1968-1973), ocorreu expressiva expansão da economia, com conseqüente aumento da renda *per capita* nacional bem como do consumo *per capita* de energia elétrica. Ao longo da década de 70, o consumo de energia elétrica por unidade do produto interno bruto (PIB) evoluiu de 0,162 kWh/US\$ para 0,215 kWh/US\$ e o consumo *per capita* de 430 kWh/hab para 1.025 kWh/hab (ANEEL, 2003). Como conseqüência, a participação da eletricidade no balanço energético nacional saltou de 17% para 28%. Em 1990, o consumo de energia elétrica por unidade do PIB atingiu 0,326 kWh/US\$ e o consumo *per capita* de energia elétrica chegou a 1.510 kWh/hab, com 37% de participação da energia elétrica no balanço energético nacional. No quadriênio seguinte (90-94) o crescimento médio anual do consumo total de energia elétrica foi de 3,7%, situando-se acima do PIB, de 2,3% ao ano. Já no período 1994/1997, o consumo cresceu 5,3% ao ano e o PIB 3,6% ao ano.

Nos anos 80, o consumo de energia elétrica foi impulsionado pela maturação dos projetos industriais previstos no II PND – Plano Nacional de Desenvolvimento, implantados a partir do final dos anos 70, bem como pela queda constante do nível tarifário (MARTINS, 1999).

Para suprir a demanda, a produção de eletricidade teve de crescer muito, trazendo os inconvenientes do impacto ambiental, causados por novas usinas, como: inundações de áreas para represas elétricas e deslocamentos de populações, a poluição e os riscos para segurança pública causados por termoelétricas e nucleares. Além disso, a exigência de investimentos de alto valor reduzem os investimentos em outras áreas, como saúde e educação, por exemplo (LAMBERTS, 2004).

Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil – ANEEL, 2002.

Entre 1998 e 2003 os níveis de crescimento da demanda de energia elétrica ficaram na média de 3,8%. Em 2003 com a retomada do crescimento econômico acelerado, o Governo Federal tomou medidas de universalização da distribuição de renda, com programas que visam a 12 milhões de novas ligações até 2008 (ANEEL, 2003). Abaixo, tem-se o Quadro Evolutivo de Oferta de Energia/PIB/População (tabela 2) e os Gráficos Ilustrativos de Oferta de Energia Interna por População e PIB (gráficos 1, 2 e 3).

Tabela 3.2 - Quadro Evolutivo de Oferta de Energia/PIB/População

| OFERTA INTERNA DE ENERGIA/PIB/POPULAÇÃO | | | | | | | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| ESPECIFICAÇÃO | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 |
| OFERTA INT. ENERGIA-OIE. | 157,4 | 163,0 | 171,8 | 180,7 | 185,6 | 189,2 | 190,6 | 193,9 | 198,7 | 201,7 |
| PROD. INTERNO BRUTO-PIB | 416,7 | 434,3 | 445,9 | 460,5 | 461,1 | 464,8 | 485,1 | 491,9 | 499,4 | 498,4 |
| POPULAÇÃO RESIDENTE-POP | 156,8 | 159,0 | 161,2 | 163,5 | 165,7 | 167,9 | 170,1 | 172,4 | 174,6 | 176,9 |
| OIE/PIB | 0,378 | 0,375 | 0,385 | 0,392 | 0,403 | 0,407 | 0,393 | 0,394 | 0,398 | 0,405 |
| OIE/POP | 1,004 | 1,025 | 1,065 | 1,105 | 1,120 | 1,127 | 1,120 | 1,125 | 1,138 | 1,140 |

Fonte: ANEEL, 2004

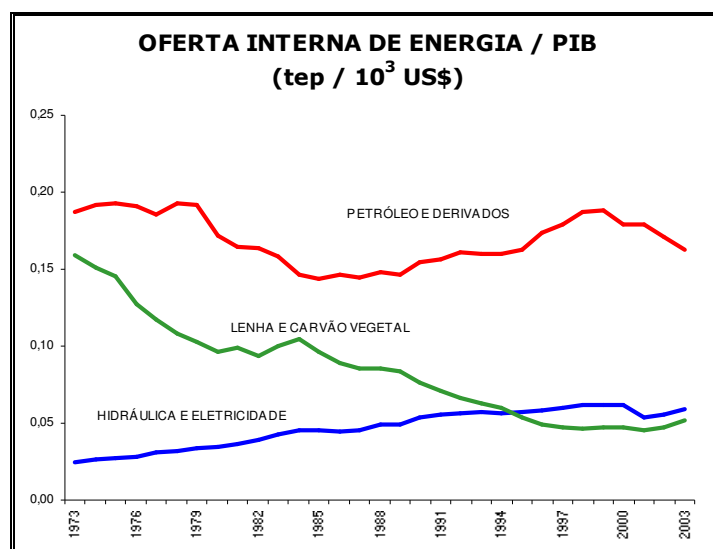


Figura 3.2 – Oferta interna de energia por unidade do PIB, discretizando cada parcela de contribuição das fontes geradoras de energia

Fonte: ANEEL, 2004

A Figura 3.2 faz uma relação entre a Oferta interna de energia e o Produto Interno Bruto do país, em dólares. Nota-se a contribuição de cada fonte geradora, sendo que o petróleo mantém a sua posição de maior contribuição desde a década de 70. Em 1995, a produção de energia por hidrelétricas supera a produção por lenha e carvão vegetal, mantendo sua posição ascendente até os dias atuais.

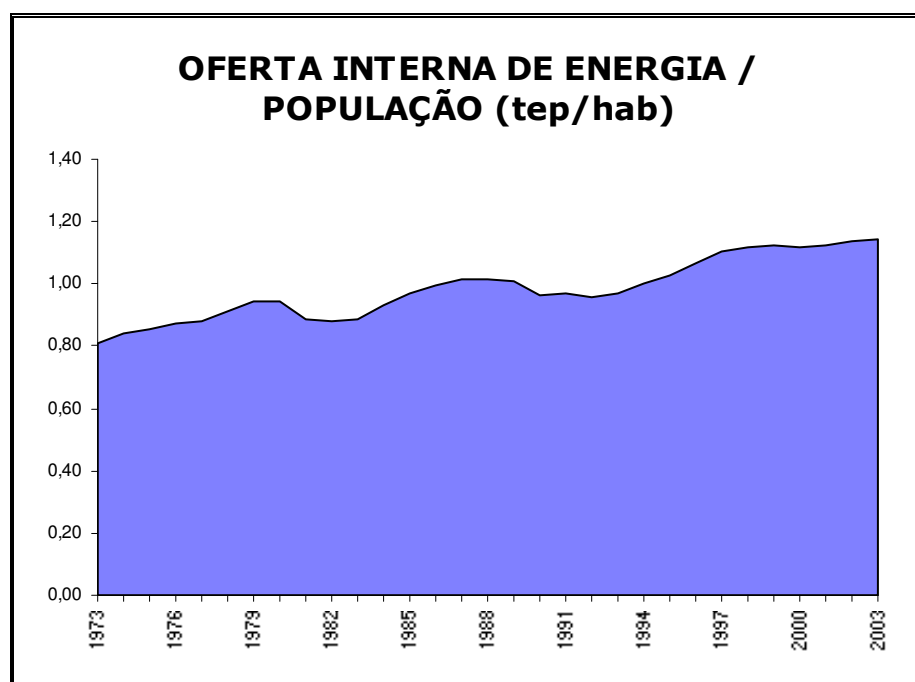


Figura 3.3 – Oferta Interna de Energia por habitante

(Fonte: ANEEL, 2004)

A Figura 3.3 mostra o crescente aumento da oferta de energia por habitante.

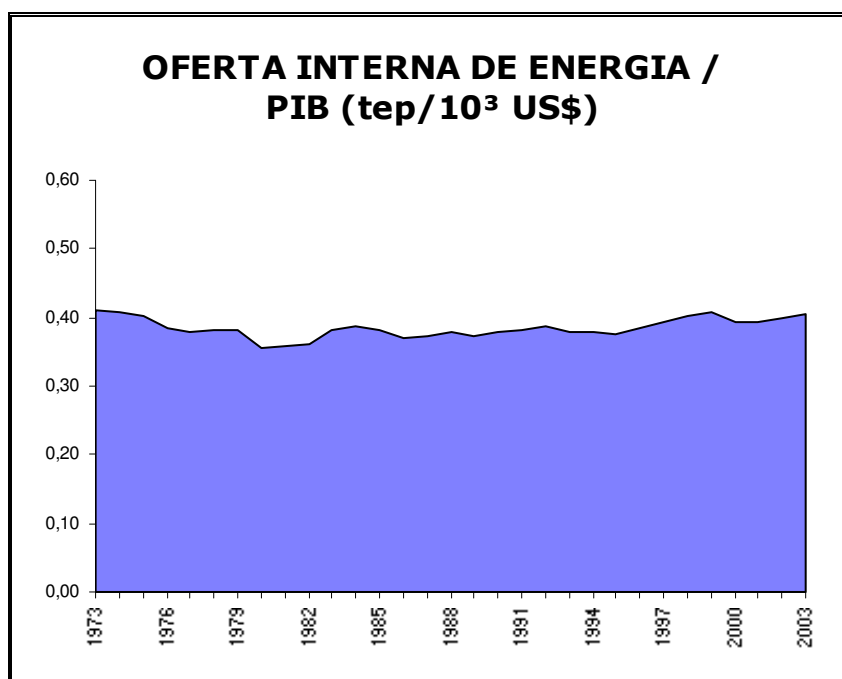


Figura 3.4 – Oferta Interna de Energia por unidade do PIB

(Fonte: ANEEL, 2004)

E, a figura 3.4, assim como a Figura 3.2, faz uma relação entre oferta de energia e o PIB, não discretizando as fontes geradoras de energia.

A unidade utilizada nesses gráficos, tonelada equivalente de petróleo (tep), é a unidade comum na qual se convertem os parâmetros de medida das diferentes formas de energia utilizadas no Balanço Energético Nacional. Os fatores de conversão são calculados com base no poder calorífico superior de cada energético em relação ao do petróleo, de 10.800 kcal/kg (PATUSCO, 1998).

Hoje se busca aumentar a eficiência no consumo de maneiras distintas, seja com a modernização dos equipamentos, para que consumam menos energia, seja com a reeducação dos usuários de equipamentos e com a construção e/ou adequação de edificações que atendam a plenas condições de uso e ocupação, necessitando cada vez menos de energia, ou para iluminação, ou resfriamento ou aquecimento (SIGNOR, 1999).

O Governo Federal, através do PROCEL, Programa Nacional de Energia Elétrica, vem acentuando a sua participação no controle e especificações de produtos e equipamentos.

Campanhas publicitárias também já se fazem presentes no rádio e na televisão. Cabe agora à toda massa intelectual de arquitetos, engenheiros e técnicos, através de pesquisas, desenvolverem procedimentos e normas que norteiem a construção de edificações termicamente eficientes, sempre se valendo de índices mínimos de Conforto Térmico.

Mesmo com todas essas medidas sendo tomadas, o Brasil enfrenta uma séria turbulência no seu sistema de produção de energia. Cerca de 95% da sua capacidade vem sendo utilizada, ficando assim quase sem reservas. Qualquer eventual problema pode colocar todo o sistema ou os subsistemas em colapso, ocasionando os blecautes, como os que ocorreram no sul do país (PATUSCO, 1998).

Segundo Martins (1999) um aspecto é digno de destaque na evolução recente do comportamento da demanda da eletricidade:

[...] o comportamento da demanda de energia elétrica mostra a existência de um componente inercial na dinâmica do mercado de energia elétrica, que induz seu crescimento mesmo com a economia em crise. Esse componente inercial foi sustentado pelo desempenho das classes residencial e comercial, visto que a classe industrial foi impactada pelas medidas de ajuste econômico adotadas para enfrentar a crise econômica internacional.

A sustentação da demanda em condições econômico-financeiras difíceis, em consequência da diminuição tarifária ocorrida, principalmente, no período 1979-1993, implicou numa apreciável deterioração do desempenho técnico do suprimento e do fornecimento do serviço elétrico (MARTINS, 1999). A evolução da produção, do consumo e das perdas de energia elétrica no Brasil, no período de 1970 aos dias atuais pode ser visualizada na tabela 3.3, onde as perdas representam a diferença entre a produção e o consumo. Essas perdas correspondem ao somatório das perdas em transmissão, subtransmissão e distribuição urbana e rural e das denominadas perdas comerciais.

Tabela 3.3 - Evolução da produção, do consumo e das perdas (1970-2002)

| Ano | Produção (TWh) | Consumo (TWh) | Perdas (%) |
|-------------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| 1970 | 43 | 36 | 16,3 |
| 1980 | 131 | 114 | 13,0 |
| 1990 | 236 | 205 | 13,1 |
| 1998 | 340 | 288 | 15,3 |
| 2002 | 378 | 323 | 14,6 |

Fonte: ELETROBRÁS, 2003

3.3 Retrato do Consumo Energético Brasileiro

Os responsáveis pelo consumo de energia elétrica no país podem ser classificados em setores: industrial, residencial, comercial e público. A energia consumida nos edifícios destes três últimos setores representa mais de 46% do total nacional. Além disso, em 2003 os setores residencial e comercial foram os grandes impulsionadores do crescimento do consumo, com colaborações de 8,6% e 7,7%, comparado a um crescimento de 1,9% no consumo da indústria (Brasil, Ministério de Minas e Energia, 2004). Na figura 3.5 mostra-se a evolução do consumo residencial nas décadas de 80 e 90. A linha tracejada não designada na legenda abaixo refere-se ao consumo energético industrial. Nota-se que tal consumo não é linear, uma vez que está sujeito à amplitude da macroeconomia. Então, o consumo é diretamente proporcional à capacidade de produção e exportação de bens industriais.

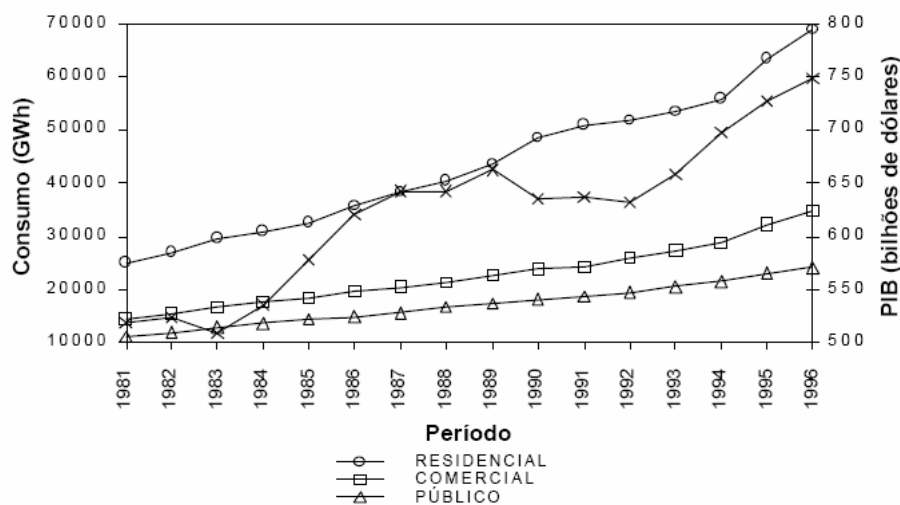


Figura 3.5 - Quadro evolutivo dos consumos energéticos não-industrial em função das décadas de 80 e 90

Fonte: ANEEL, 1997

Estes dados são suficientes para justificar iniciativas de conservação específicas para esses segmentos. Cabe lembrar, ainda, que o crescimento do setor residencial esteve sempre relacionado a novas ligações e à incorporação de bens de consumo, uma vez que, ainda não se tem energia elétrica e equipamentos em 100% das residências. Ainda com relação ao setor residencial, cabe acrescentar que, apesar de ter havido um acréscimo de cerca de 1,2 milhões de novas contas em 2003, o consumo médio por conta apresentou crescimento de 4,7% (MME, 2004).

Nas edificações dos setores público e comercial grande parte do consumo é atribuída a variáveis arquitetônicas e construtivas, já que, em média, 64% de seu consumo é devido ao condicionamento ambiental (que vem crescendo constantemente) e à iluminação (GELLER, 1994). Razão pela qual pode-se demonstrar a responsabilidade dos projetistas e construtores no consumo final de energia elétrica nas construções. Estima-se que edifícios com projetos adequados possam consumir em torno de 30% menos energia, que outros que ofereçam níveis de conforto e utilização similares (SIGNOR, 1994).

Embora existam essas possibilidades, ainda não há uma formação voltada para o setor, e não existe uma cultura conservacionista, tão necessária à elaboração de projetos energeticamente eficientes. Torna-se difícil projetar prédios eficientes quando não se tem

clara idéia de quanto uma determinada medida pode ser significativa para o consumo. Além disso, interações entre diversas medidas combinadas entre si, ou entre elas, e o clima da localidade em que será construído podem ser avaliadas agora pelo projeto de norma da ABNT que trata do desempenho térmico e cálculo da carga térmica em edificações (Projeto ABNT n. 02:135.07-001 a 005, ABNT, 2002).

3.4 Eficiência Energética e Sustentabilidade Ambiental

A crise de energia pela qual vem passando o Brasil obrigou o Governo Federal, as Instituições e Órgãos Controladores e Normatizadores do setor energético a tomarem medidas que visem ao uso eficiente da energia. Na área da Construção Civil, cabe aos engenheiros e arquitetos repensar as formas como são projetadas e construídas as edificações visando reduzir o consumo de energia. O conceito de Eficiência Energética é há muito tempo conhecido dos projetistas, mas há uma grande insipiência nos projetos. É fato que a maioria dos projetos não leva em consideração um melhor aproveitamento das condições naturais climáticas como meio de reduzir gastos excessivos de energia elétrica, seja com climatização ou iluminação (CARDOSO, 2002).

A atividade de projetar não pode estar vinculada apenas à caracterização estética ou orgânica. Todos os dados do entorno, procedimentos construtivos possíveis e tipos de material devem ser levados em consideração no projeto. Assim, certamente, haverá maiores chances de economia, tanto na construção, quanto na operação e manutenção no decorrer dos anos com contas de energia. Para que o projeto seja dinâmico e tenha um sentido de progresso, através do qual são produzidas soluções para os problemas de conforto, eficiência energética, desperdícios e perdas, deve, obviamente justificar o investimento.

A Arquitetura e a Engenharia são hoje áreas multidisciplinares onde, cada vez mais, os profissionais são solicitados a apresentar soluções tecnológicas economicamente viáveis e ambientalmente corretas.

Segundo Cardoso (2002), tais soluções devem garantir o bem-estar dos usuários das edificações e reduzir o impacto ambiental. Mesmo por que o custo da energia tende a se

e elevar, o que exigirá do profissional de arquitetura um projeto que garanta à edificação maior eficiência energética; sendo necessária, portanto, uma maior conscientização por parte dos projetistas.

De acordo com Afonso (2002), o ambiente urbano é diferente em caráter do ambiente natural, mas eles são similares em pelo menos um aspecto fundamental: ambos dependem do mesmo processo básico. Nas cidades, é comum a população esquecer destas ligações vitais porque as fontes naturais de energia, alimentação e água se tornaram freqüentemente quase totalmente banalizadas, uma vez que, salvo casos raros, a população urbana dispõe em suficiência de tais fontes.

Para Meiriño (2003), o conceito de sustentabilidade energética só agora começa a chegar ao Brasil, possivelmente porque as hidroelétricas – responsáveis por 82,36% da energia elétrica produzida no país – produzem um impacto ambiental muito menor do que aquelas causadas pelas emissões das termelétricas. Conservação e uso racional de energia elétrica passou a ser preocupação constante, impulsionando inclusive a certificação de aparelhos domésticos, facilitando a opção por esses equipamentos.

Os setores de edificações residenciais e comerciais consomem 46% de energia elétrica no Brasil. Em pesquisa, MARCARÓ (2001) constatou que:

[...] 20 a 30% da energia consumida seriam suficientes para o funcionamento da edificação; 30 a 50% da energia consumida são desperdiçados por falta de controles adequados da instalação, por falta de manutenção e também por mau uso; 25 a 45 % da energia são consumidos indevidamente por má orientação da edificação e por desenho inadequado de suas fachadas, principalmente. (MASCARÓ, 2001).

A relação entre Arquitetura, Engenharia e Sustentabilidade ocorre na medida em que o uso racional da energia elétrica em edificações garante a preservação dos recursos energéticos e ambientais para as gerações vindouras, sem prejuízo ao progresso da humanidade.

3.5 Conforto Térmico

O homem é um animal homeotérmico. Seu organismo é mantido a uma temperatura interna constante da ordem de 37°C, com limites muito estreitos – entre 36,1° e 37,2°C –, sendo 32°C o limite inferior e 42°C o limite superior para sobrevivência, em estado de enfermidade (FROTA e SHIFFER, 2000).

Os organismos homeotérmicos, ainda de acordo com Frota (2000), pode ser comparado a uma máquina térmica – sua energia é conseguida através de processos térmicos. A energia térmica produzida pelo organismo humano advém de reações químicas internas, sendo a mais importante a combinação do carbono, introduzido no organismo sob a forma de alimentos, com o oxigênio, extraído do ar pela respiração.

A manutenção da temperatura interna do organismo humano, relativamente constante em ambientes cujas condições termo-higrométricas são as mais variadas e variáveis, se faz por intermédio de seu aparelho termorregulador, que comanda a redução dos ganhos ou o aumento das perdas de calor através de alguns mecanismos de controle, como: a vasodilatação e exsudação (reação ao calor) e a vasoconstricção e arrepio (reação ao frio).

Para Frota (2000), o organismo passa diariamente por uma fadiga:

A fadiga física faz parte do processo normal de metabolismo. A fadiga termo-higrométrica é resultante do trabalho excessivo do aparelho termorregulador, pela existência de condições ambientais desfavoráveis, no tocante à temperatura do ar, tanto com relação ao frio quanto ao calor, e à umidade do ar.

Em Mascaró (2001) tem-se que ao efetuar trabalho mecânico, os músculos se contraem. Tal contração produz calor. A quantidade de calor liberado pelo corpo, por essa razão, será função do trabalho desenvolvido, podendo chegar a um máximo da ordem de 1200 W, desde que por pouco tempo. Esse calor é dissipado por meio de mecanismos de troca térmica entre o corpo e o ambiente, envolvendo a troca seca – condução, convecção e radiação – e a troca úmida – evaporação. O calor perdido para o ambiente através de trocas secas é denominado calor sensível e é função das diferenças de temperatura entre corpo e ambiente. Já o calor perdido para o ambiente através de trocas úmidas é denominado calor

latente e envolve mudança de estado de agregação – o suor, líquido, passa ao estado de vapor, através da evaporação (MASCARÓ 2001). Sendo a pele o principal órgão termorregulador do organismo humano, é através dela que se realizam as trocas de calor. A temperatura da pele é regulada pelo fluxo sanguíneo que a percorre – quanto mais intenso o fluxo, mais elevada sua temperatura.

Para Lamberts et al (2004) a vestimenta é uma barreira para as trocas de calor por convecção. A vestimenta adequada será função da temperatura média do ambiente, do movimento do ar, do calor produzido pelo organismo, da umidade do ar e da atividade a ser desenvolvida pelo indivíduo. No cálculo de índices de Conforto Térmico a unidade de vestimenta é o “*clo*” e equivale a $0,155 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$.

De acordo com Frota e Shiffer (2000), as condições de conforto térmico são função, portanto, de uma série de variáveis. Para avaliar tais condições, o indivíduo deve estar apropriadamente vestido e sem problemas de saúde ou de aclimação. É certo que as condições ambientais capazes de proporcionar sensação de conforto térmico em habitantes de clima quente e úmido não são as mesmas que proporcionam sensação de conforto em habitantes de clima quente e seco e, muito menos, em habitantes de regiões de clima temperado ou frio. Isso levou os estudiosos a desenvolver índices que agrupam as condições que proporcionam as mesmas respostas – *os índices de conforto térmico*.

De acordo com Frota e Schiffer (2000), os primeiros estudos acerca da influência das condições termo-higrométricas sobre o rendimento no trabalho foram desenvolvidas pela Comissão Americana da Ventilação em 1916, presidida por Winslow. Essa comissão efetuou estudos e pesquisas com o objetivo de determinar a contribuição das condições termo-higrométricas no rendimento do trabalho, visando, principalmente, ao trabalho físico do operário, aos interesses da produção, surgidos com a Revolução Industrial, e às situações especiais de guerra, quando as tropas são deslocadas para regiões de diferentes tipos de clima. A Comissão concluiu que:

- para o trabalho físico, o aumento da temperatura ambiente de 20°C para 24°C diminui o rendimento em 15%;

- a 30°C de temperatura ambiente, com umidade relativa 80%, o rendimento cai 28%.

Para Lamberts (2004), os índices de conforto térmico procuram englobar, num único parâmetro, o efeito conjunto das variáveis já citadas, como vestimenta, organismo humano, temperatura ambiente, tipo de atividade, etc.

Segundo Frota (2000), os índices de conforto térmico foram desenvolvidos com base em diferentes aspectos do conforto e podem ser classificados em:

- *índices biofísicos*: que se baseiam nas trocas de calor entre o corpo e o ambiente, correlacionando os elementos do conforto com as trocas de calor que dão origem a esses elementos;
- *índices fisiológicos*: que se baseiam nas reações fisiológicas originadas por condições conhecidas de temperatura seca do ar, temperatura radiante média, umidade do ar e velocidade do ar;
- *índices subjetivos*: que se baseiam nas sensações subjetivas de conforto experimentadas em condições em que os elementos de conforto térmico variam.

A escolha de um ou outro tipo de índice de conforto deve estar relacionada com as condições ambientais e a atividade desenvolvida pelo indivíduo, pela maior ou menor importância de um ou outro aspecto do conforto. Há condições termo-higrométricas que podem, mesmo que apenas por algum tempo, ser consideradas como de conforto em termos de sensação e provocar distúrbios fisiológicos ao fim desse tempo. É o caso, por exemplo, de indivíduos expostos a condições de baixo teor de umidade e que, não percebendo que não estão transpirando, porque o suor é evaporado rapidamente, não tomam líquido em quantidade suficiente e se desidratam.

A ASHRAE (1992) considera que, para os climas mais quentes da América do Norte, 25°C é a temperatura ótima, podendo variar entre 23 e 27°C, sendo esses valores aplicáveis para:

- Velocidade do ar de 0,5 m/s;

- Umidade relativa entre 30 e 70%;
- Inverno;
- Vestimenta Normal;
- Pessoa sentada;
- Ocupação sedentária;
- Temperatura radiante média igual à temperatura do ar.

Recomenda-se ainda:

- Acrescentar 2°C para velocidade do ar igual 0,25 m/s;
- Para banheiro ou similar acrescentar de 3 a 5 °C;
- Deduzir até 5°C para ocupação ativa;
- Deduzir de 3 a 5°C para áreas de trânsitos.

3.6 A Bioclimatologia nos Projetos Arquitetônicos

Segundo Lamberts et al (2004), na década de 60, os irmãos Olgyay aplicaram a bioclimatologia à arquitetura, colocando como parâmetro no quadro inicial de necessidades o conforto térmico humano. Criaram, então, a expressão “projeto bioclimático”. A arquitetura assim concebida busca utilizar o clima com o objetivo de satisfazer as exigências de conforto térmico do homem. Como um dos frutos desse trabalho, também foi desenvolvido por Olgyay um diagrama bioclimático que propõe estratégias de adaptação da arquitetura ao clima.

Em 1969 Givoni concebeu uma carta bioclimática para edifícios. A carta se baseia em temperaturas internas do edifício, propondo estratégias construtivas para adequação da arquitetura ao clima (LAMBERTS et al, 2004).

Givoni (1992), explica que o clima interno em edifícios não climatizados reage mais à variação do clima externo e à experiência de uso dos habitantes. Pessoas que moram em edifícios sem climatização e naturalmente ventilados aceitam usualmente uma grande variação de temperatura e velocidade do ar como situação normal, demonstrando assim sua aclimação. Givoni concebeu, então, uma carta bioclimática adequada para países em

desenvolvimento, na qual os limites máximos de conforto da sua carta anterior foram expandidos. Recentemente, o referido autor desenvolveu uma revisão bibliográfica abordando o tema bioclimatologia aplicada à arquitetura, com o objetivo de selecionar uma metodologia bioclimática a ser adotada para o Brasil.

De acordo com Lamberts et al (2004), a carta foi construída sobre o diagrama psicrométrico, que relaciona a temperatura do ar e a umidade relativa. Obtendo os valores destas variáveis para os principais períodos do ano climático da localidade, o arquiteto ou engenheiro poderá ter indicações fundamentais sobre a estratégia bioclimática a ser adotada no desenho do edifício. Os dados de temperatura e umidade relativa do ar exterior podem ser plotados diretamente sobre a carta, onde são identificadas nove zonas de atuação na carta conforme a seqüência:

1. Zona de Conforto;
2. Zona de Ventilação;
3. Zona de Resfriamento Evaporativo;
4. Zona de Massa Térmica para Resfriamento;
5. Zona de Ar-Condicionado;
6. Zona de Umidificação;
7. Zona de Massa Térmica para Aquecimento;
8. Zona de Aquecimento Solar Passivo;
9. Zona de Aquecimento Artificial.

3.7 O Clima do Brasil e seu Zoneamento Bioclimático Segundo o Projeto de Norma PN02:135.07-001/3:2003

Por possuir um território muito grande e por se localizar entre os dois trópicos, o Brasil possui uma grande diversidade climática, apresentando regiões de climas semi-úmido, quente seco, temperado e quente úmido, como pode ser visto no mapa climatológico simplificado do Brasil (Figura 3.6).

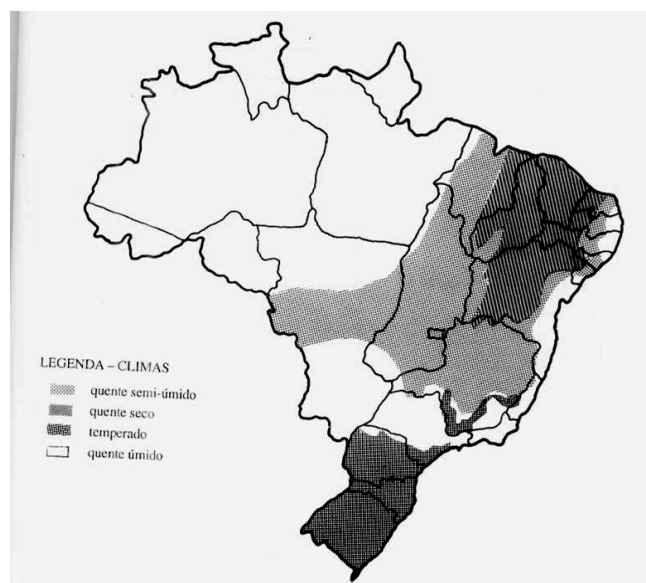


Figura 3.6 – Mapa Climatológico Simplificado do Brasil

Fonte: IBGE (1993) apud *FROTA (2000)*

Apesar de se ter uma visão panorâmica, mas simplificada, sobre o clima brasileiro, isto não é suficiente para a aplicação de estratégias bioclimáticas em projetos para uma determinada localidade.

O Projeto de Norma PN02:135.07-001/3:2003 da ABNT (2003) traz o zoneamento bioclimático brasileiro, com o intuito de ilustrar melhor as condições climatológicas de cada parte do país, assim como, auxiliar e complementar a bibliografia existente sobre o assunto. Com isso, têm-se dados que podem auxiliar nos projetos de edificações. O zoneamento bioclimático brasileiro compreende, de acordo com a referida norma, oito diferentes zonas, conforme indica a figura 3.7:

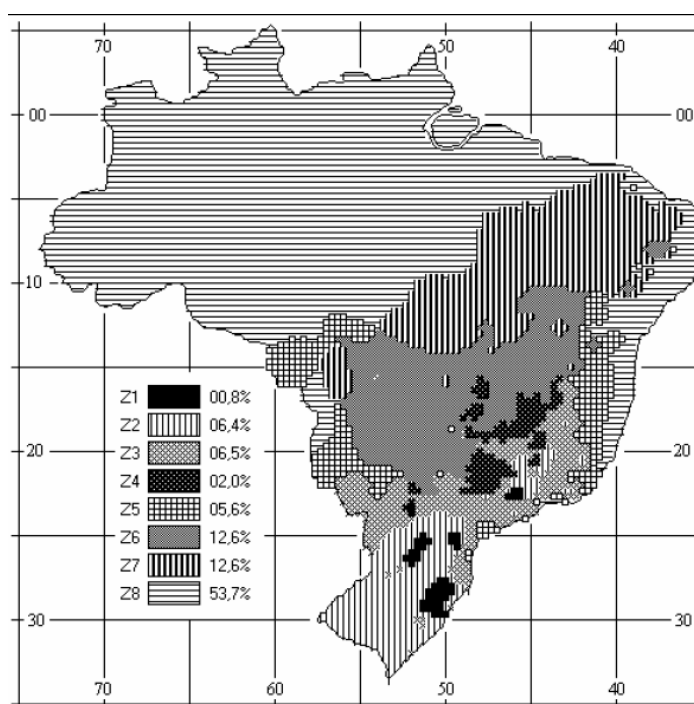


Figura 3.7 – Zoneamento Bioclimático do Brasil

Fonte: PN02:135.07-001/3:2003

Para cada uma destas zonas, formulou-se um conjunto de recomendações técnico-construtivas, com o objetivo de otimizar o desempenho térmico das edificações e orientar na elaboração de projetos, através de sua melhor adequação climática.

Segundo está exposto no Projeto de Norma, o território brasileiro foi dividido em 6500 células, cada uma das quais foi caracterizada pela posição geográfica e pelas seguintes variáveis climáticas:

- a) Médias mensais das temperaturas máximas;
- b) Médias mensais das temperaturas mínimas; e
- c) Médias mensais das umidades relativas do ar.

As 330 células analisadas contaram com dados das Normais Climatológicas e outras fontes medidas desde 1931 a 1960 em 124 cidades medidos desde 1961 a 1990 em 206 cidades, e, para as demais células o clima foi estimado, por interpolação. Na figura 3.8 estão localizadas as 330 células.

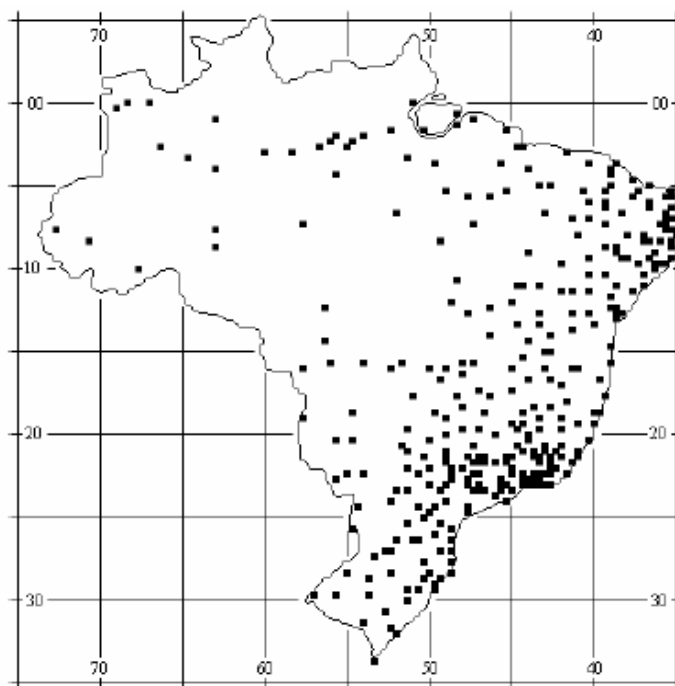


Figura 3.8 – Locação das 330 células analisadas

Fonte: PN02:135.07-001/3:2003

A ABNT, através do PN02:135.07-001/3:2003, adotou uma nova carta bioclimática para o Brasil, adaptada daquela exposta na figura 3.8. A nova Carta apresenta o formato representado na Figura 3.9.

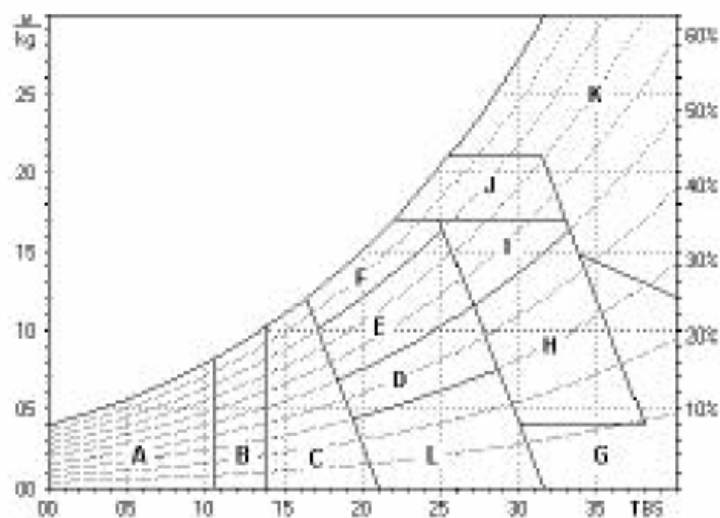


Figura 3.9 – Carta Bioclimática Brasileira, adaptada de GIVONI (1997)

Fonte: PN02:135.07-001/3:2003

Onde:

A – Zona de Aquecimento Artificial (calefação);

B – Zona de Aquecimento Solar da Edificação;

C – Zona de Massa Térmica para Aquecimento;

D – Zona de Conforto Térmico (baixa umidade);

E – Zona de Conforto Térmico;

F – Zona de Desumidificação (renovação de ar);

G + H – Zona de Resfriamento Evaporativo;

H + I – Zona de Massa Térmica de Refrigeração;

I + J – Zona de Ventilação;

K – Zona de Refrigeração Artificial;

L – Zona de Umidificação do Ar.

Nota-se claramente uma justaposição de estratégias comparando a Carta Bioclimática de GIVONI (1997) a esta apresentada pela ABNT, somente havendo uma adaptação ao clima brasileiro.

3.8 Estratégias Bioclimáticas para Teresina

Tomando como base o trabalho de Silveira e Romero (1999), o clima de Teresina apresenta-se do tipo quente-úmido durante o primeiro semestre do ano e quente-seco durante o segundo semestre. Conseqüentemente, as necessidades humanas de conforto são diferentes ao longo do ano e exigem soluções adequadas às diversas condições climáticas. Segundo as autoras, as exigências climáticas para a região foram analisadas de acordo com Givoni (1997) e Mahoney apud Koenigsberger (1977).

Na figura 3.10 apresenta-se a Carta Bioclimática para a cidade de Teresina, e na tabela 3.4 mostram-se as porcentagens de cada estratégia bioclimática adequada ao clima de Teresina, de acordo com Silveira e Romero (1999).

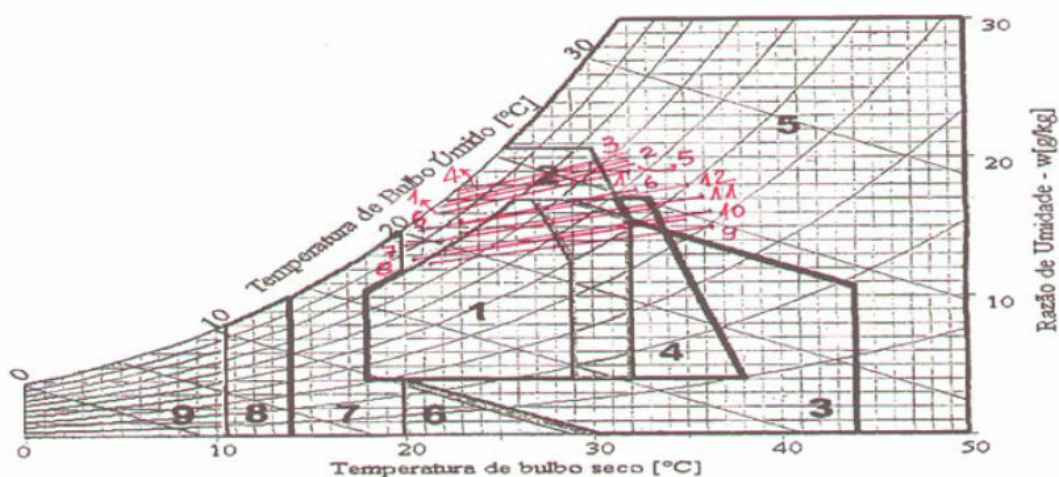


Figura 3.10 – Carta Bioclimática para Teresina

Fonte: SILVEIRA (1999)

Tabela 3.4 – Estratégias Bioclimáticas para Teresina

| Situação | Estratégias (%) | Porcentagem (%) |
|--------------------------|---|-------------------|
| CONFORTO | - | 24,4 |
| DESCONFORTO (Calor) | Ventilação - 35,80 Ventilação + Massa Resfriamento - 2,7 Vent. + Massa Resf. + Resf. Evap. - 16,5 Massa Resfriamento + Resf. Evaporat. - 3,6 Massa Resfriamento - 2,3 Ar-condicionado - 14,7 | 75,6 |

Fonte: Silveira e Romero (1999)

Em relação aos modelos estruturais utilizados em coberturas na cidade de Teresina-PI, pouco trabalha-se na perda de calor por meio dessas. Os tipos de cobertura que podem ser encontrados são: (1) em telha cerâmica; (2) em telha de fibrocimento (amianto); (3) em telha de aço; (4) em telha de fibra vegetal prensada (conhecida popularmente como “telha ecológica”); (5) jardins sobre lajes (cobertura verde); (6) fibra vegetal natural (palha).

As coberturas mais largamente utilizadas são as três primeiras listadas (cerâmica, fibrocimento e amianto), sendo que não há dados que quantifiquem precisamente quão utilizados eles são. As telhas de fibra vegetal prensada estão sendo cada vez mais utilizadas. O uso de jardins em coberturas é mais raro, haja vista que a manutenção de áreas verdes é muito cara. A utilização de cobertura em palha ainda é presente, embora gradativamente venha sendo abandonada.

Abaixo, nas figuras 3.11 a 3.16 apresentam-se fotos desses modelos de coberturas encontrados na cidade de Teresina-PI.



Fig. 3.11 – Cobertura em telha de aço

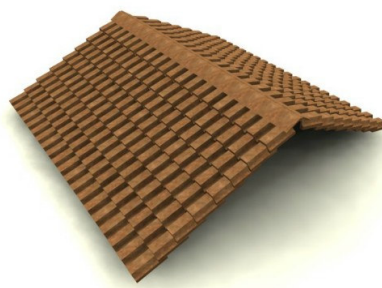


Fig. 3.12 – Telha cerâmica



Fig. 3.13 – Telha de fibrocimento



Fig. 3.14 – Cobertura de palha



Fig. 3.15 – Telha ecológica



Fig. 3.16 – Cobertura “verde”

3.9 Carga Térmica

De acordo com Lamberts et al (2004), denomina-se carga térmica ao calor (sensível ou latente) a ser fornecido ou extraído do ar, por unidade de tempo, para manter no recinto as condições desejadas. Esta quantidade de calor é calculada para duas condições, de modo a nunca se ter situações de desconforto térmico nas épocas críticas do ano.

Os principais fatores a considerar no levantamento de carga térmica são:

- Climáticas:

- insolação;
- temperatura do ar externo;
- umidade do ar externo.

- Humanas:

- ocupantes (depende do tipo de atividade desenvolvida);

- Arquitetônicas:

- fechamentos opacos;
- fechamentos transparentes;
- iluminação artificial;
- equipamentos;
- infiltração e renovação de ar.

A carga térmica varia com a estação. Como a cidade de Teresina é, de acordo com Silveira e Romero (1999), de clima quente e úmido no primeiro semestre do ano e quente e seco no segundo semestre, só se considera para o presente estudo sobre carga térmica em coberturas, a carga térmica de verão.

Segundo Ioshimoto (2004), os cálculos prevêm regime permanente nos processos de transferência de calor. A determinação da carga térmica passa por etapas. Inicialmente, devem-se estabelecer as condições (temperatura e umidade) do ar externo e interno. Na tabela 3.5 apresentam-se as condições internas para o verão, recomendável e máxima de temperatura de bulbo seco (TBS) e umidade relativa (UR).

Tabela 3.5 – Condições Internas de Verão

| FINALIDADE | LOCAL | RECOMENDÁVEL | | MÁXIMA | |
|---|---------------------------------|--------------|----------|----------|--------|
| | | TBS (°C) | UR (%) | TBS (°C) | UR (%) |
| Conforto | Residências, Hotéis | 23 a 25 | 40 a 60 | 26,5 | 65 |
| | Escritórios, Escolas | | | | |
| Lojas de curto tempo de duração | Bancos, Barbearia | 24 a 26 | 40 a 60 | 27 | 65 |
| | Cabelereiros, Lojas | | | | |
| | Magazines, Supermercados | | | | |
| Ambientes com grande carga de calor latente e/ou sensível | Teatros, Auditórios, Bares | 24 a 26 | 40 a 65 | 27 | 65 |
| | Cinemas, Templos, Bibliotecas | | | | |
| | Auditórios, estúdio de TV e Som | | | | |
| Locais de Reuniões com Movimento | Boates, Salões de Baile | 24 a 26 | 40 a 65 | 24 | 65 |
| Ambientes de Arte 1 | Manuscritos, Depósito de Livros | 21 a 23* | 40 a 50* | --- | --- |
| | Obras Raras | | | | |
| Ambientes de Arte 2 | Museus e Galerias de Arte | 21 a 23* | 50 a 55* | --- | --- |
| Acesso | Halls de Elevadores | --- | --- | 28 | 70 |

* Condições Constantes o Ano Inteiro

Fonte: Ioshimoto (2004)

Na tabela 3.6, têm-se as condições externas para a cidade de Teresina, de acordo com as Normais Climatológicas, medidas de 1961 a 1990.

Tabela 3.6 – Normais Climatológicas – Teresina (1961-1990)

| | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez | Total |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|
| Temperatura Média (°C) | 26,7 | 23,6 | 25,9 | 26,3 | 26,1 | 24,0 | 26,0 | 25,7 | 28,4 | 29,0 | 28,7 | 28,0 | 26,5 |
| Temp. Média Máx. (°C) | 32,2 | 30,1 | 30,1 | 31,6 | 31,8 | 32,4 | 33,3 | 33,5 | 35,8 | 36,4 | 35,4 | 34,2 | 33,1 |
| Temp. Média Mín. (°C) | 22,5 | 22,4 | 22,4 | 22,7 | 22,4 | 21,2 | 20,4 | 20,5 | 22,0 | 22,8 | 23,0 | 23,1 | 22,1 |
| Temp. Máx. Absoluta (°C) | 38,4 | 36,6 | 36,8 | 34,6 | 35,0 | 35,8 | 37,2 | 38,6 | 39,6 | 40,3 | 39,7 | 39,5 | |
| Temp. Mín. Absoluta (°C) | 20,0 | 19,2 | 20,2 | 19,9 | 19,4 | 16,4 | 15,0 | 15,8 | 16,4 | 18,8 | 19,4 | 20,0 | |
| Precipitações (mm) | 248,3 | 261,0 | 286,3 | 267,9 | 109,5 | 25,4 | 12,7 | 11,6 | 16,9 | 18,0 | 64,8 | 126,1 | 1678,9 |
| Umidade Relativa (%) | 75,0 | 83,0 | 83,0 | 84,0 | 81,0 | 72,0 | 65,0 | 59,0 | 56,0 | 58,0 | 60,0 | 64,0 | 70,0 |
| Nebulosidade (0-10) | 6,8 | 6,7 | 6,9 | 6,7 | 4,6 | 3,3 | 2,9 | 2,9 | 3,3 | 4,3 | 4,9 | 5,8 | 4,9 |

Fonte: Silveira e Romero (1999)

Da tabela 3.6, pode-se extrair alguns dados significativos, tais como:

- o mês de outubro é o que apresenta os maiores valores de temperatura média, média máxima e absoluta, sendo, portanto o mês crítico em relação à temperatura;
- o menor valor de umidade relativa foi registrado no mês de setembro, e,
- o menor índice pluviométrico está no mês de agosto.

Nota-se que, o período crítico é o segundo semestre, mais precisamente entre agosto e novembro, que registra maiores temperaturas, menores umidade e índice pluviométrico.

Continuando com o procedimento de Ioshimoto (2004), o passo seguinte é a determinação da quantidade de calor que penetra a edificação por meio de Convecção e Condução. Tal processo ocorre através de fechamentos opacos (paredes externas, paredes internas e cobertura) e fechamentos transparentes (vidros).

O terceiro passo, ainda segundo Ioshimoto (2004), é a determinação do ganho de calor por radiação. Nota-se que os três primeiros passos estão relacionados com as características climáticas de cada região e com a arquitetura da edificação (características físicas como forma e tipo de paredes e fechamentos transparentes), enquanto que no cálculo da radiação leva-se em conta a posição geográfica do local. Por último, deve-se somar ao resultado obtido o ganho de calor devido aos ocupantes, equipamentos, renovação de ar e iluminação.

Assim, com o valor total da carga térmica, pode-se quantificar a participação de cada componente em porcentagem e valores absolutos, e, então, determinar a quantidade de tonelada-refrigeração ou BTU que a edificação deve perder para se tornar termicamente confortável e qual fator deve ser trabalhado para aumentar a eficiência do processo de transferência de calor da edificação para o meio.

4 METODOLOGIA

De início, o primeiro passo dado para a realização deste trabalho foi a determinação do tipo de edificação e qual fechamento (cobertura os paredes) seriam analisados, em termos de conforto térmico e eficiência energética. Optou-se por estudar as coberturas de edificações, sejam elas térreas ou com pavimentos.

Sabe-se que, em uma edificação térrea, a área de contribuição de cobertura é geralmente maior que a área de parede que recebe insolação direta. Mas edifícios altos também recebem calor, através da cobertura por via do pavimento mais alto. Ou seja, o último pavimento recebe tanto calor por meio da cobertura quanto uma edificação térrea.

Como foi citado na revisão bibliográfica, Teresina está localizada próxima à linha do Equador (latitude $05^{\circ} 05'$ - sul) e, por isso, a incidência solar vertical (meio-dia) é mais forte que a incidência horizontal (quatro horas da tarde). Então, a carga térmica de uma edificação tem um valor substancialmente maior em valores absolutos por meio da cobertura do que por meio das paredes.

O passo seguinte foi a determinação das variáveis arquitetônicas e climáticas que seriam aplicadas nas coberturas. Foram escolhidos 15 (quinze) casos de coberturas, de acordo com a tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Tipos de cobertura selecionados

| Nº do Caso | Tipo de Cobertura |
|-------------------|---|
| <i>Caso 1</i> | <i>Telha Cerâmica sem utilização de forro</i> |
| <i>Caso 2</i> | <i>Telha Cerâmica com uso de forro de gesso</i> |
| <i>Caso 3</i> | <i>Telha Cerâmica com uso de forro PVC</i> |
| <i>Caso 4</i> | <i>Telha Cerâmica com uso de forro de laje de concreto armado</i> |
| <i>Caso 5</i> | <i>Telha Cerâmica com uso de forro de laje pré-moldada</i> |
| <i>Caso 6</i> | <i>Telha de Aço sem utilização de forro</i> |
| <i>Caso 7</i> | <i>Telha de Aço com uso de forro de gesso</i> |
| <i>Caso 8</i> | <i>Telha de Aço com uso de forro PVC</i> |
| <i>Caso 9</i> | <i>Telha de Aço com uso forro de laje de concreto armado</i> |
| <i>Caso 10</i> | <i>Telha de Aço com uso de forro de laje pré-moldada</i> |
| <i>Caso 11</i> | <i>Telha de Amianto sem utilização de forro</i> |
| <i>Caso 12</i> | <i>Telha de Amianto com uso de forro de gesso</i> |
| <i>Caso 13</i> | <i>Telha de Amianto com uso de forro PVC</i> |
| <i>Caso 14</i> | <i>Telha de Amianto com uso forro de laje de concreto armado</i> |
| <i>Caso 15</i> | <i>Telha de Amianto com uso de forro de laje pré-moldada</i> |

Os dados sobre radiação solar encontrados na bibliografia pesquisada possuem valores para superfícies horizontais. Observa-se que cada cobertura de edificação, por motivos arquitetônicos e de escoamento de águas pluviais, deve necessariamente possuir inclinação, sendo que esta varia de acordo com o material. Para esse trabalho, foram consideradas as inclinações especificadas na tabela 4.2:

Tabela 4.2 - Tipo de material da telha e respectivas inclinações usuais

| Material da Telha | Inclinação |
|--------------------------|---------------------------|
| <i>Cerâmica</i> | <i>25,0% - (14°2'10")</i> |
| <i>Aço</i> | <i>5,0% - (2°51'47")</i> |
| <i>Amianto</i> | <i>10,0% - (5°42'38")</i> |

Foram adotadas as inclinações de 14°, 3° e 6° para telhas cerâmicas, de aço e de amianto, respectivamente.

Outro parâmetro variável considerado para cálculo da carga térmica devido às coberturas é o índice de radiação solar. Essa, por sua vez, depende da orientação. Na figura 4.1 ilustra esse item:

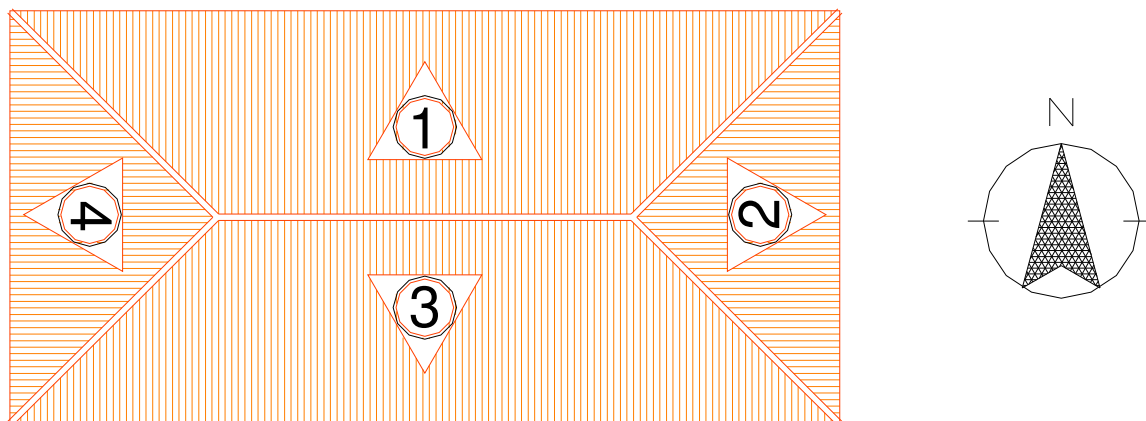


Figura 4.1 – Orientação genérica de inclinação de coberturas (N, E, S e W)

Calcularam-se, então, os valores de Radiação Solar Global para as inclinações citadas para três épocas do ano: Solstício de Verão (22 de dezembro), Equinócio (21 de março e 23 de setembro) e Solstício de Inverno (21 de junho). A partir desses resultados, foi possível elaborar gráficos comparativos tendo-se valores individuais e agrupados em média aritmética para os valores de radiação solar em distintas épocas do ano incidentes em coberturas com diferentes inclinações.

Com a definição dos casos de estudo e dos respectivos valores de índices de radiação solar global incidente, foi possível calcular o desempenho térmico das coberturas escolhidas.

4.1 Etapas para Cálculo da Carga Térmica para casos indicados

Como citado anteriormente, o passo inicial foi a escolha dos casos de estudo, totalizando 15 (quinze). Nesta etapa foram definidos tipos de material, inclinação, uso ou não de forro e peso da cobertura.

O passo seguinte foi a compilação de dados sobre a climatologia geral de Teresina-PI, o cálculo dos índices de radiação solar global incidente em superfícies inclinadas e,

concluindo a segunda etapa, definição das condições ambientais escolhidas para o interior da edificação.

Com esses valores definidos, pode-se passar ao cálculo do desempenho térmico em coberturas, levando-se em conta todas as características físicas e bioclimáticas da cobertura e de seu entorno. Na figura 4.2 apresenta-se um fluxograma para cálculo da carga térmica.

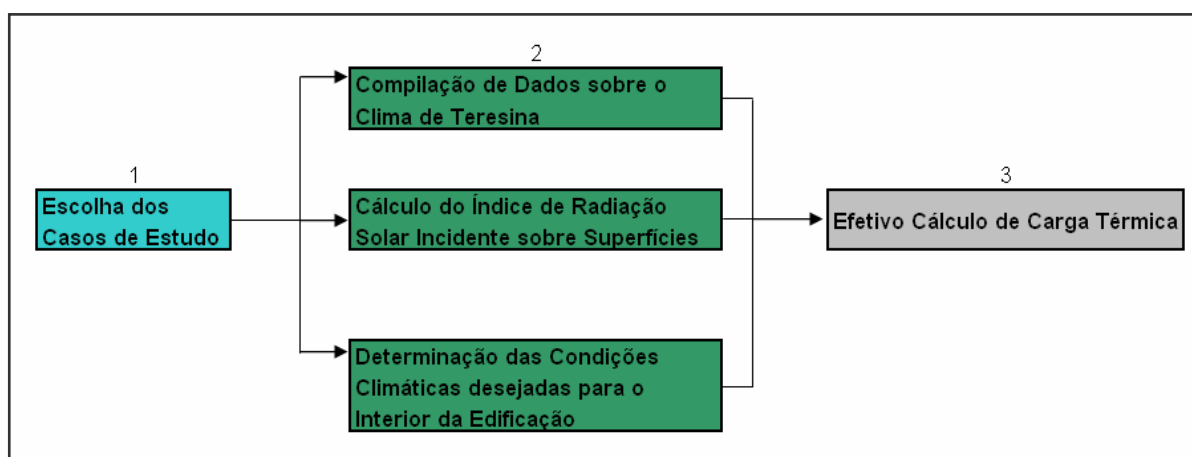


Figura 4.2 – Fluxograma para cálculo de carga térmica

4.1.1 Determinação das Condições Climáticas Externas

Após a escolha do modelo estrutural a ser adotado para o estudo comparativo das coberturas, a etapa seguinte foi a determinação das condições meso e microclimáticas para o entorno da edificação. Para tanto, extraíram informações cujas condições externas utilizadas para o cálculo da carga térmica durante os doze meses do ano encontram-se na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Condições Externas para Teresina (SILVEIRA,1999)

| | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Temp. Média Máxima- T_E - (°C) | 32,2 | 30,1 | 30,1 | 31,6 | 31,8 | 32,4 | 33,3 | 33,5 | 35,8 | 36,4 | 35,4 | 34,2 |
| Temp. Média Mínima - T_e - (°C) | 22,5 | 22,4 | 22,4 | 22,7 | 22,4 | 21,2 | 20,4 | 20,5 | 22,0 | 22,8 | 23,0 | 23,1 |
| Umidade Relativa Média - h - (%) | 75,0 | 83,0 | 83,0 | 84,0 | 81,0 | 72,0 | 65,0 | 58,0 | 56,0 | 58,0 | 60,0 | 64,0 |

4.1.2 Cálculo do Índice de Radiação Global Incidente em Planos Inclinados

Para o cálculo da carga térmica de uma edificação é necessário, para condições externas, ter em mãos os valores de Incidência de Radiação Solar (W/m^2), temperatura externa máxima (°C), temperatura mínima do dia (°C) e umidade relativa (%).

Os valores da Incidência de Radiação Solar foram extraídos de FROTA (2000), conforme expostos nas tabelas 4.4, 4.5 e 4.6:

Tabela 4.4 – Incidência solar sobre planos verticais e horizontais (solstício de verão) – W/m^2

| Dezembro 22 | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 6h | 7h | 8h | 9h | 10h | 11h | 12h | 13h | 14h | 15h | 16h | 17h | 18h |
| S | 26 | 222 | 321 | 365 | 386 | 402 | 400 | 402 | 386 | 365 | 321 | 222 | 26 |
| SE | 57 | 480 | 664 | 691 | 598 | 476 | 303 | 129 | 60 | 55 | 48 | 33 | 5 |
| E | 57 | 476 | 647 | 626 | 495 | 311 | 68 | 65 | 60 | 55 | 48 | 33 | 5 |
| NE | 25 | 207 | 278 | 239 | 137 | 65 | 68 | 65 | 60 | 55 | 48 | 33 | 5 |
| N | 5 | 33 | 48 | 55 | 60 | 65 | 68 | 65 | 60 | 55 | 48 | 33 | 5 |
| NW | 5 | 33 | 48 | 55 | 60 | 65 | 68 | 65 | 137 | 239 | 278 | 207 | 25 |
| W | 5 | 33 | 48 | 55 | 60 | 65 | 68 | 311 | 495 | 626 | 647 | 476 | 57 |
| SW | 5 | 33 | 48 | 55 | 60 | 129 | 303 | 476 | 598 | 691 | 664 | 480 | 57 |
| H | 13 | 203 | 462 | 704 | 902 | 1018 | 1072 | 1018 | 902 | 704 | 462 | 203 | 13 |

Fonte: Frota (2000)

Tabela 4.5 – Incidência solar sobre planos horizontais e verticais (equinócio) – W/m²

| Março 22 / Setembro 22 | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 6h | 7h | 8h | 9h | 10h | 11h | 12h | 13h | 14h | 15h | 16h | 17h | 18h |
| S | 0 | 30 | 48 | 55 | 63 | 68 | 65 | 68 | 63 | 55 | 48 | 30 | 0 |
| SE | 16 | 344 | 498 | 473 | 365 | 205 | 65 | 68 | 63 | 55 | 48 | 30 | 0 |
| E | 22 | 481 | 710 | 690 | 548 | 328 | 65 | 68 | 63 | 55 | 48 | 30 | 0 |
| NE | 16 | 355 | 535 | 534 | 447 | 298 | 123 | 68 | 63 | 55 | 48 | 30 | 0 |
| N | 0 | 38 | 73 | 99 | 121 | 134 | 130 | 134 | 121 | 99 | 73 | 38 | 0 |
| NW | 0 | 30 | 48 | 55 | 63 | 68 | 123 | 298 | 447 | 534 | 535 | 355 | 16 |
| W | 0 | 30 | 48 | 55 | 63 | 68 | 65 | 328 | 548 | 690 | 710 | 481 | 22 |
| SW | 0 | 30 | 48 | 55 | 63 | 68 | 65 | 205 | 365 | 473 | 498 | 344 | 16 |
| H | 0 | 180 | 477 | 474 | 960 | 1100 | 1139 | 1100 | 960 | 747 | 477 | 180 | 0 |

Fonte: Frota (2000)

Tabela 4.6 – Incidência solar sobre planos horizontais e verticais (solstício de inverno) – W/m²

| Junho 21 | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 6h | 7h | 8h | 9h | 10h | 11h | 12h | 13h | 14h | 15h | 16h | 17h | 18h |
| S | - | 28 | 45 | 53 | 58 | 63 | 63 | 63 | 58 | 53 | 45 | 28 | - |
| SE | - | 166 | 230 | 178 | 63 | 63 | 63 | 63 | 58 | 53 | 45 | 28 | - |
| E | - | 380 | 608 | 605 | 713 | 288 | 63 | 63 | 58 | 53 | 45 | 28 | - |
| NE | - | 404 | 657 | 708 | 651 | 533 | 380 | 214 | 58 | 53 | 45 | 28 | - |
| N | - | 196 | 347 | 428 | 474 | 502 | 511 | 502 | 474 | 428 | 347 | 196 | - |
| NW | - | 28 | 45 | 53 | 58 | 214 | 380 | 533 | 651 | 708 | 657 | 404 | - |
| W | - | 28 | 45 | 53 | 58 | 63 | 63 | 288 | 713 | 605 | 608 | 380 | - |
| SW | - | 28 | 45 | 53 | 58 | 63 | 63 | 63 | 63 | 178 | 230 | 166 | - |
| H | - | 200 | 406 | 642 | 834 | 957 | 991 | 957 | 834 | 642 | 406 | 200 | - |

Fonte: Frota (2000)

Os dados que estão nas tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 são válidos para latitude 04° Sul. Em toda literatura pesquisada, tal latitude é a mais próxima da de Teresina (05° 05' sul) que não possui valores coletados.

Os dados elencados nas tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 são referentes a índices de radiação solar global incidente em superfícies verticais (sul, sudeste, leste, nordeste, norte, noroeste, oeste e sudoeste) e em superfície horizontal. Não existem valores de tal índice para superfícies inclinadas. Portanto, foram necessários cálculos desses índices de acordo com Método proposto por Frota e Schiffer(2004).

4.1.2.1 – Cálculo da radiação solar incidente em planos inclinados em função da orientação

Segundo Frota e Schiffer (2004), para cálculo da radiação solar sobre superfícies inclinadas, é necessária a determinação dos seguintes dados:

- a) Radiação Solar Global (I_G), Direta (I_D) e Difusa (I_d), para planos horizontais;
- b) Altura Solar (h);
- c) Ângulos de Incidência para superfícies inclinadas (i/n);
- d) Inclinação (β);
- e) Orientação da Superfície.

A partir do conhecimento desses dados de entrada, são seguidos 7 (sete) passos para determinação dos valores de radiação solar incidente global, direta e difusa. Nas tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam-se os dados de Radiação Solar Global Incidente (I_G), sendo necessário decompô-lo em Radiação Direta (I_D) e Radiação Difusa (I_d), seguindo-se a equação dada por:

$$I_G = I_D + I_d \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (4.1)$$

De acordo com Frota e Schiffer (2004), a radiação solar difusa em um plano horizontal é o dobro da radiação solar difusa em superfícies verticais. Por exemplo, às 4 horas da tarde, uma superfície vertical orientada para leste só receberá radiação solar difusa, sendo, portanto, a metade da radiação difusa em um plano horizontal.

Os 7 (sete) passos para o cálculo da Radiação Solar Incidente em superfícies inclinadas, a partir, de valores de radiação solar incidentes em superfícies horizontais são:

1º Passo: Obter, a partir de I_G , os valores de I_D e I_d , para todas as horas (6h às 18h). Os valores de radiação solar em plano horizontal estão contidos nas tabelas 4.4, 4.5 e 4.6;

2º Passo: Determinar, sobre a carta solar, os valores de h - altura Solar - hora a hora. Observando a carta solar para Teresina, a altura solar é extraída, para qualquer época do ano, para cada hora do dia, marcando-se a interseção entre a trajetória do sol para a época desejada e as 9 (nove) circunferências que formam a carta. Cada circunferência equivale a um valor em graus, sendo a mais externa igual a zero, e o ponto central equivalente a 90° (ver figura 4.3);

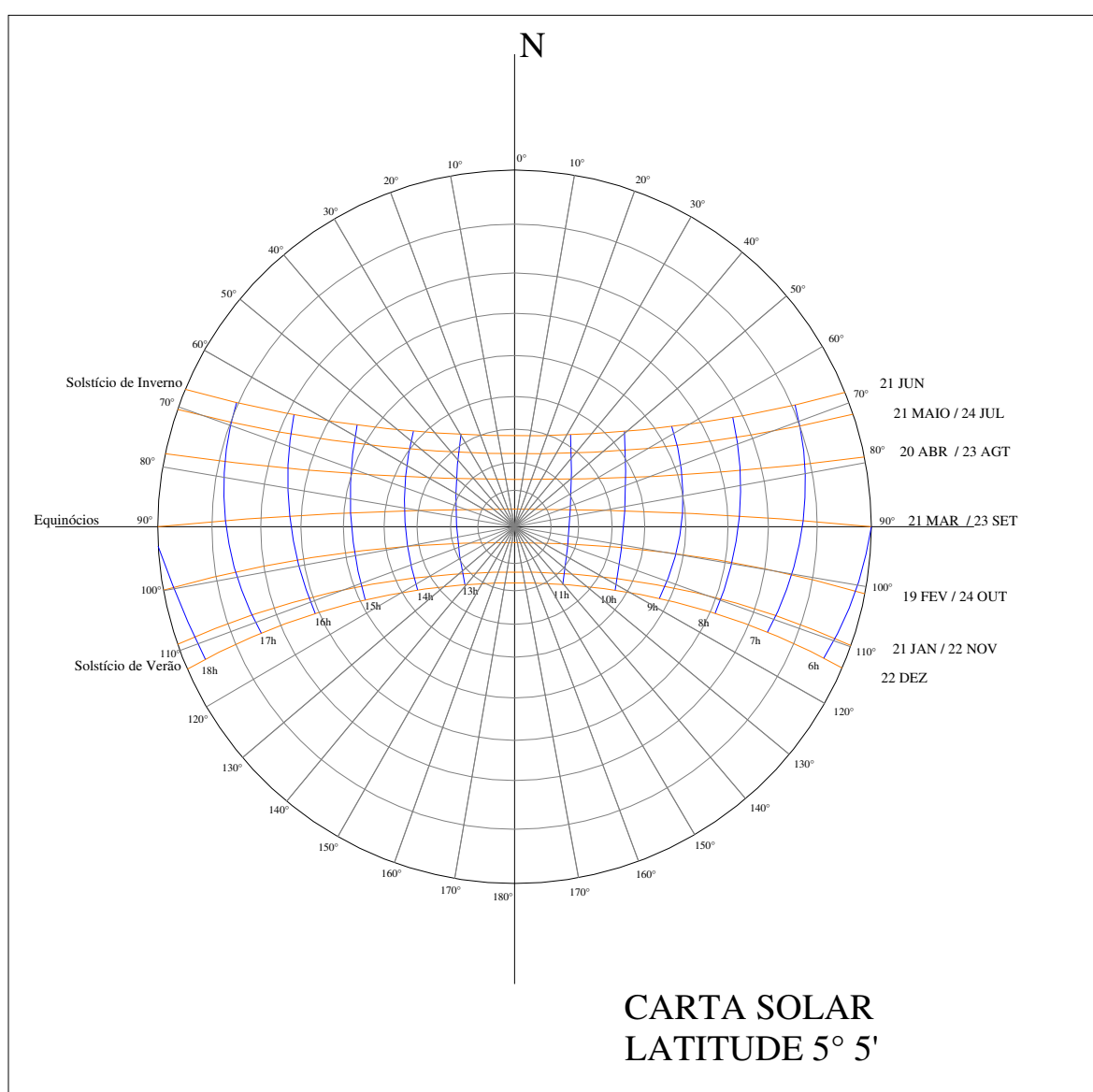


Figura 4.3 – Carta Solar de Teresina - PI

3º Passo: Determinar os valores de $I_{i/n}$ - intensidade de radiação solar direta incidente sobre plano normal - para cada hora, dado por:

$$I_{i/n} = I_D / \sin h \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (4.2)$$

4º Passo: Sobrepondo o transferidor de ângulos de incidência sobre planos inclinados, para a orientação desejada, determinar, graficamente, os ângulos de incidência do Sol, hora a hora.

Cada inclinação e cada orientação possui seu próprio transferidor de ângulos de incidência. Faz-se uma sobreposição do transferidor na Carta Solar e determinam-se os ângulos de incidência. Nas figuras 4.4, 4.5 e 4.6 encontram-se os transferidores solares para inclinações de 14°, 06° e 03°.

TRANSFERIDOR 14°

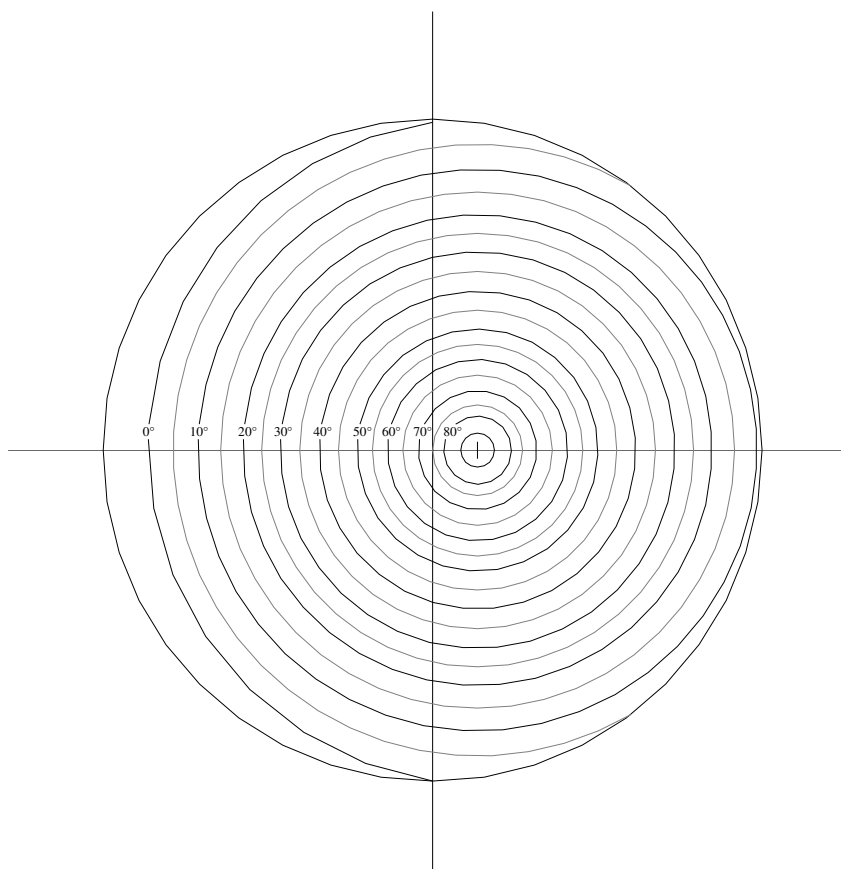


Figura 4.4 – Transferidor para inclinação de 14°

TRANSFERIDOR 6°

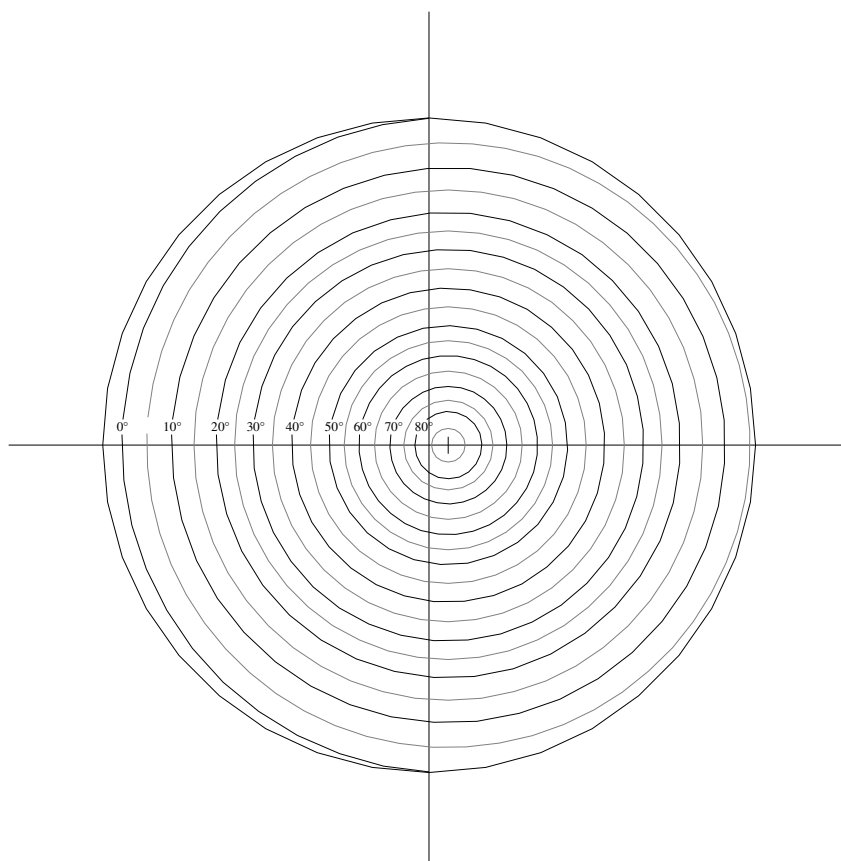


Figura 4.5 – Transferidor para inclinação de 06°

TRANSFERIDOR 3°

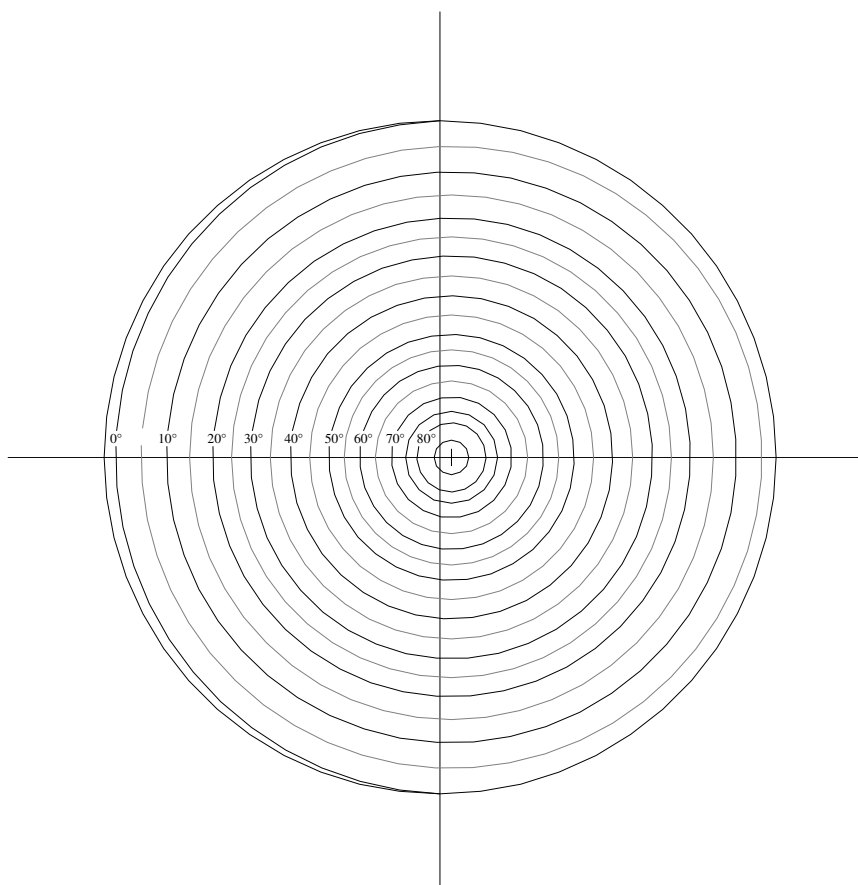


Figura 4.6 – Transferidor para inclinação de 03°

5º *Passo*: Determinar a Intensidade de Radiação Solar Difusa incidente sobre a superfície inclinada, através da expressão:

$$I_{d/\beta} = I_{d/h} \times [(1 + \cos \beta) / 2] \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (4.3)$$

6º *Passo*: Determinar a Intensidade de Radiação Solar Direta incidente sobre a superfície inclinada, através da expressão:

$$I_{D/\beta} = I_{i/n} \times \cos i \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (4.4)$$

7º *Passo*: Determinar a Intensidade de Radiação Solar Global incidente, através da fórmula:

$$I_{g/\beta} = I_{D/\beta} + I_{d/\beta} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (4.5)$$

Foram elaboradas planilhas para a automatização destes cálculos, perfazendo um total de 9 (nove). Foram calculados índices de radiação solar global incidente para 3 (três) inclinações diferentes, citadas anteriormente: $\beta = 14^\circ$, 6° e 3° , referentes às inclinações usuais de coberturas em telha cerâmica, de amianto e de aço, respectivamente. Isso para os solstícios de verão e de inverno e para o equinócio.

4.2 Determinação da Temperatura Interna Desejada

As condições climáticas internas de uma edificação são determinadas a partir de seu uso, sua ocupação. Obviamente, as condições climáticas internas de um supermercado devem ser diferentes das condições internas de uma indústria. Isto é, para cada tipo de edificação existe uma requisição necessária de temperatura e umidade a ser conseguida naturalmente ou mecanicamente (aquecedores ou condicionadores de ar).

Para determinação de temperatura interna mais adequada para fins, tanto residencial como comercial, foi decidido que o valor de 28° seria utilizado como parâmetro de cálculo. Tal valor de temperatura aplica-se em climas como o da região de Teresina, valendo lembrar que, cada clima possui sua temperatura interna adequada, ou seja, cada região tem sua aclimação específica.

4.3 Rotina de Cálculo de Desempenho Térmico em uma Cobertura

Segundo Lamberts (2004), a forma arquitetônica pode ter influência no conforto ambiental em uma edificação e no seu consumo de energia, visto que, interfere diretamente sobre os fluxos de ar no interior e no exterior e, também, na quantidade de luz e calor solar recebidos pelo edifício.

A quantidade de radiação solar que incide em cada superfície externa de uma edificação, paredes e cobertura, é variável segundo a orientação e a época do ano. Isto significa que o mesmo volume de espaço interior pode ter diversas formas, apresentando comportamentos térmicos e visuais distintos. Assim, a forma arquitetônica é um importante

parâmetro para as condições interiores de conforto e, em consequência, para o desempenho energético da edificação.

Continuando com o pensamento do mesmo autor, a função arquitetônica, interage com a forma e com a eficiência energética de um edifício. O mesmo projeto arquitetônico, se destinado a fins distintos como comércio ou habitação, por exemplo, pode resultar em comportamentos energéticos diferentes. As funções residencial, comercial e pública são distintas do ponto de vista da dependência do clima e, conseqüentemente, do consumo de energia.

Numa arquitetura residencial cabe ao arquiteto tomar as decisões de acordo com a vontade do cliente, sempre alertando para possíveis estratégias de aquecimento ou resfriamento passivo ou ativo. Nos setores comercial e residencial, embora a utilização de sistemas naturais de condicionamento e iluminação não seja normalmente explorada, estas aparecem como opção para a economia de energia. O uso de sistemas naturais de condicionamento evitará a dependência por sistemas mecânicos, que usualmente consomem muita energia elétrica.

Mascaro (2001) afirma que em uma edificação, as trocas de energia (luz e calor) entre os meios exterior e interior têm como cerne o envoltório construtivo, que circula o ser humano. Neste sentido, é importante conhecer tal envoltório e dividi-lo em duas partes distintas: os fechamentos opacos (paredes e coberturas) e os transparentes (vidro). A sua principal diferença é que os fechamentos opacos não possuem a capacidade de transmitir a radiação solar para o ambiente interno enquanto os fechamentos transparentes possuem. Portanto, a parcela de radiação transmitida para o interior atuará nas condições de conforto de forma instantânea, sendo então a principal fração dos ganhos térmicos em ambientes.

O presente trabalho foi baseado em cálculo de carga térmica através da cobertura da edificação, portanto, trata-se um fechamento opaco. Segundo Frota (2000), em um fechamento opaco, a transmissão de calor acontece quando há uma diferença de temperatura entre suas superfícies interior e exterior. O sentido do fluxo de calor será sempre da superfície mais quente para a mais fria. Lamberts (2004) divide esse fenômeno em três fases:

Fase 1 – Troca de Calor com Meio Exterior: A superfície externa da edificação recebe calor do meio por convecção e radiação. Há um aumento de temperatura desta superfície, em uma proporção que depende da sua resistência superficial externa (R_{se}). O valor de R_{se} é adotado 0,04 [m²K/W]. A figura 4.7 ilustra essa fase.

A parcela de calor referente à radiação incidente no paramento externo (opaco) será em parte refletida e absorvida. Os valores de cada parte dependem dos índices de refletibilidade (ρ) e da absortividade (α) do material (tabela 7). Sabe-se que $\alpha + \rho = 1$.

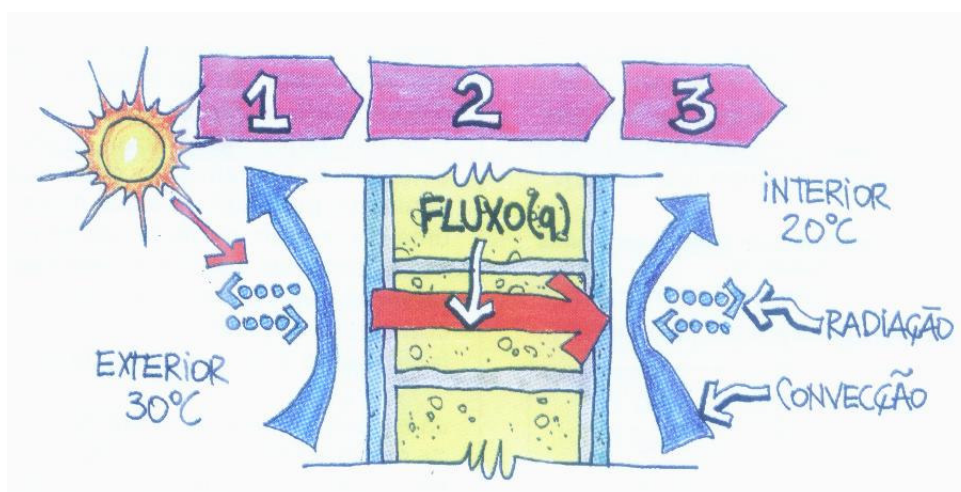


Figura 4.7 – 3 Fases do Fluxo de Calor

Fonte: Lamberts (2004)

Tabela 4.7 - Absortividade em função da cor

| CORES | α |
|-----------------|-----------|
| Escuras | 0,7 a 0,9 |
| Média (tijolos) | 0,5 a 0,7 |
| Claras | 0,2 a 0,5 |

Fonte: LAMBERTS (2004)

Fase 2 – Condução Através do Fechamento Opaco: Se a temperatura exterior é mais elevada que a temperatura interior, existirá um diferencial de temperatura, que indicará

trocas de calor entre si, com o intuito de se atingir o equilíbrio térmico. Essa troca se dará pelo processo chamado condução, e a intensidade de calor que passa do meio exterior (mais quente) para o meio interior (mais frio) dependerá diretamente da condutibilidade térmica (λ) do material – propriedade que depende da densidade; quanto maior sua condutibilidade térmica, maior quantidade de calor por unidade de tempo ultrapassará o fechamento (vide tabela 8).

Tabela 4.8 - Condutibilidade Térmica de Alguns Materiais

| MATERIAL | λ [W/m°C] |
|-----------------|-------------------------------------|
| Concreto | 1,50 |
| Tijolo | 0,65 |
| Madeira | 0,14 |
| Isopor | 0,03 |

Fonte: LAMBERTS (2004)

Outro dado importante neste estudo é o valor da espessura do paramento, ou fechamento. Através de seu valor, tendo-se previamente conhecimento dos valores de condutibilidade térmica dos materiais, pode-se calcular o valor da Resistência Térmica (R) – propriedade do material em resistir à passagem de calor. A Resistência Térmica é o quociente entre espessura e condutibilidade (fórmula 1):

$$R = L / \lambda \text{ [m}^2 \cdot ^\circ\text{C / W]} \quad (4.6)$$

A parcela referente à troca térmica por radiação depende do índice de emissividade da superfície do material em contato com a camada de ar (ϵ). A emissividade é uma propriedade física que indica a quantidade de energia térmica que é transmitida por unidade de tempo. É importante destacar que esta propriedade pertence à camada superficial do material emissor. Os materiais de construção, em relação a esse índice, são classificados em: materiais de baixa emissividade (os metálicos com emissividade compreendida entre 0,05 e 0,30) e os de alta emissividade (os não metálicos, cujas emissividades variam de 0,85 a 0,90). A tabela 4.9 contém alguns dados de emissividade de alguns materiais.

Tabela 4.9 - Emissividade de Alguns Materiais

| MATERIAL | ϵ |
|--------------------------------|------------------------------|
| Alumínio Polido | 0,05 |
| Ferro Galvanizado | 0,20 |
| Demais Materiais de Construção | 0,90 |

Fonte: LAMBERTS (2004)

Fase 3 – Troca de Calor com o Meio Interior: Na última fase do método de troca de calor as trocas térmicas ocorrem novamente por processos de convecção e por radiação. O calor que penetra para o meio interior provoca o aumento da temperatura da superfície interna do fechamento em relação à temperatura do ar. Lamberts et al (2004) cita: “As perdas de calor por convecção dependerão da Resistência Superficial Interna (R_{si}) e as perdas por radiação da emissividade superficial do material (ϵ)”. O valor de R_{si} está na tabela 4.10:

Tabela 4.10 - Resistência Térmica Superficial Interna e Externa

| R_{si} [$m^2 \cdot ^\circ C/W$] | | | R_{se} [$m^2 \cdot ^\circ C/W$] | | |
|--|------------|-------------|--|------------|-------------|
| Direção do Fluxo de Calor | | | Direção do Fluxo de Calor | | |
| Horizontal | Ascendente | Descendente | Horizontal | Ascendente | Descendente |
| 0,13 | 0,10 | 0,17 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |

Fonte: LAMBERTS (2004)

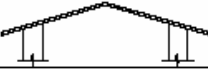

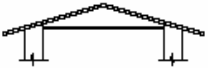
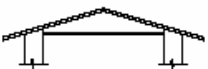




É importante citar que cada parte de um fechamento possui uma resistência térmica distinta. Como exemplo pode-se citar uma parede de alvenaria, construída de forma convencional, tendo, em corte transversal, as partes extremas a pintura, e na parte central o revestimento, geralmente reboco de argamassa ou gesso e a alvenaria em si, que pode ser constituída de tijolos cerâmicos ou de concreto.

Lamberts et al (2004) escreve:

O inverso da Resistência Total (R_T) que inclui a resistência das duas superfícies, interna (R_{si}) e (R_{se}) é a sua Transmitância Térmica (U). O cálculo da Transmitância Térmica é o ponto mais importante deste estudo, pois através desta variável se pode avaliar o comportamento de um fechamento opaco frente a transmissão de calor, tendo subsídios inclusive para comparar diversas opções de fechamentos.”

O Projeto de Norma PN02:135.07-001/3:2003 da ABNT (2003), em sua segunda parte trás os valores da Transmitância Térmica de vários tipos de coberturas, conforme apresentado na tabela 4.11:

Tabela 4.11 - Transmitância Térmica, Capacidade Térmica e Atraso Térmico para Alguns Tipos de Cobertura

| Cobertura | Descrição | U [$W/(m^2.K)$] | C_T [$kJ/(m^2.K)$] | ϕ [horas] |
|---|--|---------------------|------------------------|----------------|
|  | Cobertura de telha de barro sem forro Espessura da telha: 1,0 cm | 4,55 | 18 | 0,3 |
|  | Cobertura de telha de fibro-cimento sem forro Espessura da telha: 0,7 cm | 4,60 | 11 | 0,2 |
|  | Cobertura de telha de barro com forro de madeira Espessura da telha: 1,0 cm Espessura da madeira: 1,0 cm | 2,00 | 32 | 1,3 |
|  | Cobertura de telha de fibro-cimento com forro de madeira Espessura da telha: 0,7 cm Espessura da madeira: 1,0 cm | 2,00 | 25 | 1,3 |
|  | Cobertura de telha de barro com forro de concreto Espessura da telha: 1,0 cm Espessura do concreto: 3,0 cm | 2,24 | 84 | 2,6 |
|  | Cobertura de telha de fibro-cimento com forro de concreto Espessura da telha: 0,7 cm Espessura do concreto: 3,0 cm | 2,25 | 77 | 2,6 |
|  | Cobertura de telha de barro com forro de laje mista Espessura da telha: 1,0 cm Espessura da laje: 12,0 cm $R_{t(laje)} = 0,0900$ ($m^2.K/W$) $C_{T(laje)} = 95$ ($kJ/(m^2.K)$) | 1,92 | 113 | 3,6 |
|  | Cobertura de telha de fibro-cimento com forro de laje mista Espessura da telha: 0,7 cm Espessura da laje: 12,0 cm $R_{t(laje)} = 0,0900$ ($m^2.K/W$) $C_{T(laje)} = 95$ ($kJ/(m^2.K)$) | 1,93 | 106 | 3,6 |

Fonte: Projeto de Norma PN02:135.07-001/3:2003 da ABNT (2003)

Então, de acordo com Frota (2000), o cálculo da carga térmica tem início com a determinação de sua Transmitância Térmica. A partir dela, pode-se partir para o cálculo do Fluxo Total de Calor (q) pelo fechamento.

De acordo com Mascaró (1991) e Lamberts et al (2004) o cálculo do ganho de calor por paredes e coberturas segue a seguinte rotina:

- 1) Cálculo da Resistência Total (R_T) do Fechamento;
- 2) Cálculo da Transmitância (U);
- 3) Cálculo da Temperatura Sol-Ar ($T_{SAM_{\max}}$) – é a temperatura da superfície externa;
- 4) Cálculo do Peso da Cobertura (P) – depende do material da estrutura (cerâmica, madeira, forro e etc.);
- 5) Cálculo da Temperatura Sol-Ar média no Exterior ($T_{SAM_{\text{éd}}}$) – é a temperatura média da superfície externa;
- 6) Cálculo da Temperatura Superficial Interna Média ($T_{SIM_{\text{éd}}}$);
- 7) Cálculo da Temperatura Superficial Interna Máxima ($T_{SIM_{\max}}$);
- 8) Cálculo do Fluxo de Calor (q);
- 9) Cálculo do Calor Total ou Carga Térmica (Q) – é o valor do fluxo multiplicado pela área da edificação.

4.4 Cálculo da Carga Térmica

Após a determinação das condições internas e externas da edificação, a etapa seguinte foi o cálculo das cargas térmicas, de acordo com o item 4.3.

Seguindo então os passos listados, a metodologia constituiu-se, nesse caso, nas seguintes etapas.

- 1) *Cálculo da Resistência Total:* é o valor inverso da transmitância térmica. O valor da transmitância é dado no Projeto de Norma PN02:135.07-001/3:2003 da ABNT e varia de acordo com o esquema construtivo (tipo de telha, uso ou não de forro, tipo de forro, espessura do forro, ventilação do ático, etc);

2) *Cálculo da Temperatura Sol-Ar ($T_{SAMáx}$):* é dado pela fórmula 4.7:

$$T_{SAMáx} = t_E + \alpha \cdot I \cdot R_{se} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (4.7)$$

onde, t_E é o valor da média das temperaturas máximas exteriores.

3) *Cálculo do Peso da Cobertura (P):* é em função do material e do sistema construtivo. Para cálculo do peso utiliza-se a fórmula 4.8:

$$P = d_t \cdot e_t + d_f \cdot e_f + 20 \text{ (kg/m}^2\text{)} \quad (4.8)$$

onde, d_t e d_f são as densidades da telha e forro respectivamente;

e_t e e_f são as espessuras da telha e do forro; e

a parcela 20 kg/m² corresponde ao peso da estrutura de madeira.

4) *Cálculo da Temperatura Sol-Ar Média ($T_{SAMéd}$):* é calculada pela seguinte expressão:

$$T_{SAMéd} = (T_{SAMáx} + t_{\min}) / 2 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (4.9)$$

onde, t_{\min} é a temperatura mínima registrada no dia.

5) *Cálculo da Temperatura Superficial Interna Média e Máxima ($T_{SiMéd}$ e $T_{SiMáx}$):* são determinadas por meio das seguintes expressões:

$$T_{SiMéd} = [(T_{SAMéd} - t_i) \cdot (R_T)^{-1} \cdot R_{si}] + t_i \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (4.10)$$

$$T_{SiMáx} = T_{SiMéd} + A_I \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (4.11)$$

onde, t_i é a temperatura interna adotada;

A_I é a amplitude de onda interna (depende do valor da capacidade térmica dada no Projeto de Norma para cada tipo de cobertura).

6) *Cálculo do Fluxo de Calor (q):* é calculado por meio da seguinte expressão:

$$q = (T_{SiMáx} - t_i) / R_{si} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (4.12)$$

7) *Cálculo do Calor Total ou Carga Térmica (Q)*: o seu valor é dado pela fórmula 19:

$$Q = q \cdot A \text{ (W)} \quad (4.13)$$

onde, **A** é o valor da área em m² da edificação considerada.

Após determinação do valor da carga térmica é possível saber quanto a edificação terá que consumir em energia elétrica para o seu condicionamento, ou seja, para reduzir mecanicamente sua temperatura. Nota-se que não foi considerado neste caso ventilação.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

De acordo com a metodologia descrita no Capítulo 4, foram calculados os índices de radiação solar global incidente em superfícies inclinadas em 14°, 6° e 3° nas 4 orientações principais: norte, sul, leste e oeste. Nos itens 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam-se os resultados desses cálculos.

5.1. Radiação Solar em Planos com Inclinação de 14°

Como foi citado, 14° foi a inclinação adotada para coberturas com telhas cerâmicas. Abaixo, têm-se os resultados encontrados para radiação solar global incidente em superfícies inclinadas nas 4 direções principais, tendo-se uma média aritmética dos valores encontrados nos solstícios de verão e de inverno e no equinócio (ver tabela 5.1):

Tabela 5.1 - Valores de Radiação Solar Global em Superfícies Inclinadas em 14°

| | IG/14° Norte | IG/14° Leste | IG/14° Sul | IG/14° Oeste |
|----------------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|
| 6 h | 10,60 | 14,37 | 11,36 | 9,85 |
| 7 h | 162,13 | 235,32 | 159,31 | 100,04 |
| 8 h | 419,72 | 537,56 | 417,90 | 300,32 |
| 9 h | 661,80 | 768,35 | 651,15 | 533,35 |
| 10 h | 850,58 | 968,83 | 839,30 | 750,37 |
| 11 h | 940,69 | 980,64 | 905,88 | 860,48 |
| 12 h | 1018,17 | 989,78 | 968,25 | 988,22 |
| 13 h | 940,69 | 848,68 | 905,88 | 983,67 |
| 14 h | 850,58 | 738,77 | 839,30 | 979,79 |
| 15 h | 661,80 | 520,04 | 651,15 | 793,21 |
| 16 h | 419,72 | 300,32 | 417,90 | 559,15 |
| 17 h | 162,13 | 97,49 | 159,31 | 235,17 |
| 18 h | 10,60 | 9,85 | 11,36 | 11,60 |
| Média (W/m²): | 546,86 | 539,23 | 533,70 | 546,56 |

Da tabela 5.1 constata-se que, para as quatro orientações, os valores máximos de radiação solar ocorrem ao meio-dia. Isso acontece pois, como já foi citado, Teresina fica localizada próxima à linha do Equador, e, assim, os raios solares às 12 horas incidem em planos horizontais quase que verticalmente.

Nota-se que os maiores valores absolutos, neste caso, ocorreram nas orientações Norte (1018,17 W/m²) e Leste (989,78 W/m²), ambos ao meio-dia. Observou-se, também, que a média dos valores de radiação solar ao longo do dia para as quatro orientações resultaram em valores muito próximos.

Na figura 5.1 ilustra-se a variação da radiação global ao longo do dia em função da orientação de sua inclinação:

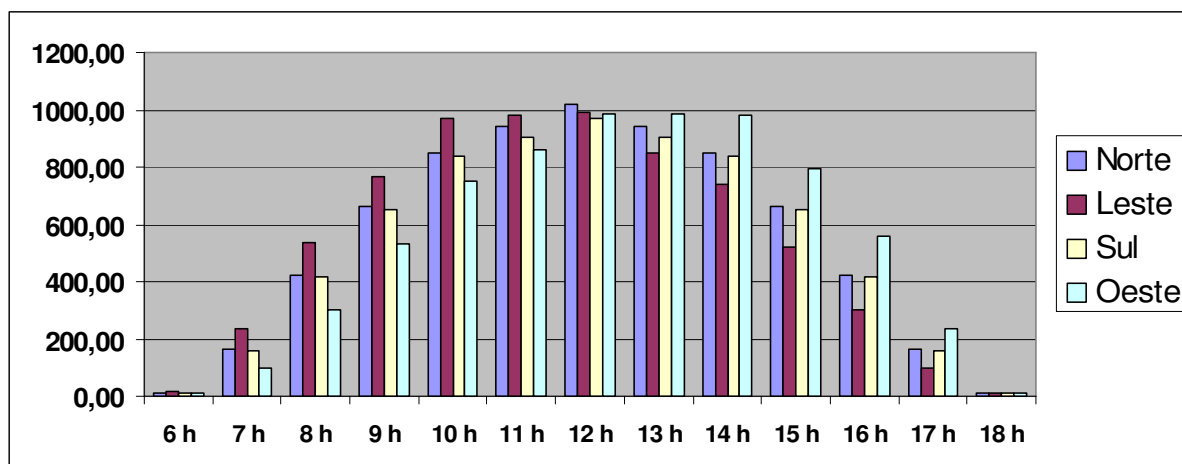


Figura 5.1 – Variação da radiação solar global ao longo do dia para $i=25^\circ$

A partir da figura 5.1, fica claro o comportamento simétrico dos índices de radiação solar em coberturas com orientações para o Norte e para o Sul, uma vez que a Trajetória do Sol também se faz praticamente simétrica ao seu eixo transversal. Quanto às orientações Leste e Oeste, a primeira mantém valores maiores pela manhã que pela tarde, e a segunda, tem comportamento exatamente oposto.

5.2. Radiação Solar em Planos com Inclinação de 06°

A inclinação de 06° (seis graus) é referente à coberturas com telhas de fibrocimento (amianto), calculada em 10%. Os resultados encontrados para radiação solar global incidente em Superfícies inclinadas nas 4 direções principais, tendo-se uma média aritmética dos valores encontrados nos solstícios de verão e de inverno e no equinócio estão na tabela 5.2:

Tabela 5.2 - Valores de Radiação Solar Global em Superfícies Inclinadas em 06°

| | IG/06° Norte | IG/06° Leste | IG/06° Sul | IG/06° Oeste |
|---------------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|
| 6 h | 10,60 | 12,37 | 11,36 | 10,10 |
| 7 h | 167,60 | 201,85 | 170,11 | 135,39 |
| 8 h | 435,85 | 492,04 | 435,07 | 382,00 |
| 9 h | 674,53 | 723,96 | 673,05 | 620,66 |
| 10 h | 875,07 | 925,33 | 875,71 | 823,51 |
| 11 h | 951,58 | 972,16 | 933,42 | 914,05 |
| 12 h | 1024,41 | 1016,30 | 1002,57 | 1012,86 |
| 13 h | 951,58 | 914,05 | 933,42 | 972,77 |
| 14 h | 875,07 | 839,62 | 875,71 | 935,32 |
| 15 h | 674,53 | 620,96 | 673,05 | 728,10 |
| 16 h | 435,85 | 373,16 | 435,07 | 491,52 |
| 17 h | 167,60 | 138,20 | 170,11 | 201,85 |
| 18 h | 10,60 | 9,85 | 11,36 | 11,60 |
| Média [W/m²] | 558,07 | 556,91 | 553,85 | 556,90 |

Nota-se, a partir dos resultados da Tabela 5.2, que a média dos valores de radiação solar para as orientações norte, leste, sul e oeste, apresentaram valores muito próximos. Contudo, houve um aumento de aproximadamente 4% em relação às médias encontradas na inclinação de 14° (ver Tab. 5.1). Isso ocorre porque a inclinação analisada neste item se aproxima mais de um plano horizontal. Os maiores valores absolutos ocorreram, como previsto, às 12 horas.

Na figura 5.2 apresenta-se a variação ao longo do dia da radiação solar global em coberturas inclinadas 06° para norte, sul, leste e oeste.

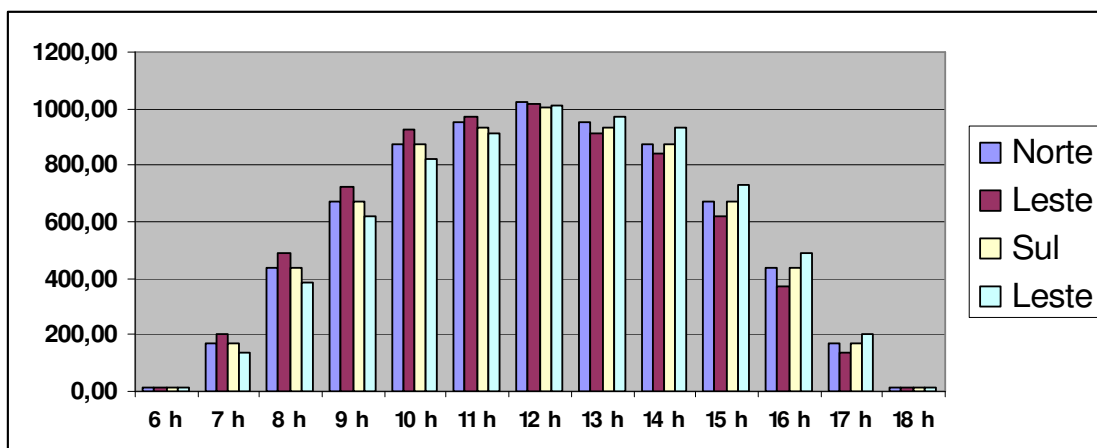


Figura 5.2 - Comportamento dos valores de radiação solar global ao longo do dia para $i=10^\circ$

Constata-se que, para inclinações em orientações Norte e Sul, os índices mantiveram-se simétricos, enquanto, para Leste e Oeste, têm-se valores mais altos pela manhã e pela tarde, respectivamente.

5.3. Radiação Solar em Planos com Inclinação de 03° (5%)

A inclinação de 03° é referente à de coberturas com telhas de aço. Os valores encontrados para radiação solar global incidente em superfícies inclinadas nas 4 direções principais, tendo-se uma média aritmética dos valores encontrados nos solstícios de verão e de inverno e no equinócio, estão na tabela 5.3:

Tabela 5.3 - Valores de radiação solar global em superfícies inclinadas em 03°

| | IG/14° Norte | IG/14° Leste | IG/14° Sul | IG/14° Oeste |
|---------------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|
| 6 h | 10,60 | 11,36 | 11,11 | 9,85 |
| 7 h | 167,45 | 183,40 | 162,13 | 148,68 |
| 8 h | 440,01 | 468,36 | 435,85 | 403,07 |
| 9 h | 678,67 | 705,31 | 673,35 | 637,83 |
| 10 h | 875,07 | 900,84 | 873,78 | 842,52 |
| 11 h | 951,28 | 960,06 | 944,32 | 928,28 |
| 12 h | 1017,54 | 1014,11 | 1050,62 | 1015,98 |
| 13 h | 951,28 | 926,16 | 944,32 | 964,60 |
| 14 h | 875,07 | 860,89 | 873,78 | 917,28 |
| 15 h | 678,67 | 646,12 | 673,35 | 705,01 |
| 16 h | 440,01 | 402,55 | 435,85 | 471,75 |
| 17 h | 167,45 | 151,65 | 162,13 | 186,06 |
| 18 h | 10,60 | 10,60 | 11,11 | 11,36 |
| Média (W/m²) | 558,75 | 557,03 | 557,82 | 557,10 |

Os resultados encontrados nesta análise mostram um comportamento muito parecido com a inclinação de 10%. A média dos valores encontrados para as quatro orientações são praticamente iguais à inclinação analisada no item anterior. Uma diferença, que pode ser citada é que o maior valor absoluto (1.050,62 W/m²) ocorreu para a orientação sul, ao contrário das inclinações 25% e 10%, que apresentaram seus maiores valores absolutos para orientações NORTE e LESTE.

Na figura 5.3 mostra-se a variação ao longo do dia de radiação solar global em coberturas inclinadas 06° para norte, sul, leste e oeste. Notam-se os comportamentos simétricos para inclinações orientados em norte e sul, e valores maiores de radiação solar pela manhã para orientação leste, e pela tarde para orientação oeste.

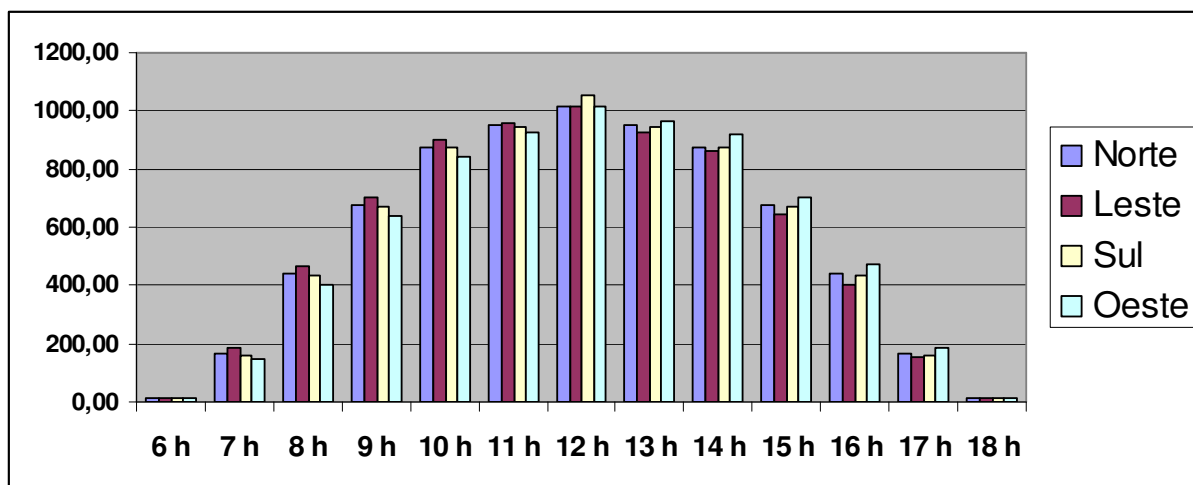


Figura 5.3 - Comportamento dos valores de Radiação Solar Global ao longo do dia para $i=5\%$

5.4. Análise Comparativa dos Resultados Encontrados para Índices de Radiação Solar em Planos Inclinados

Nas figuras 5.4 a 5.7 apresentam-se as médias diárias de radiação solar para os solstícios de verão, equinócio e solstício de inverno, para inclinação da cobertura em 25%, ou 14°.

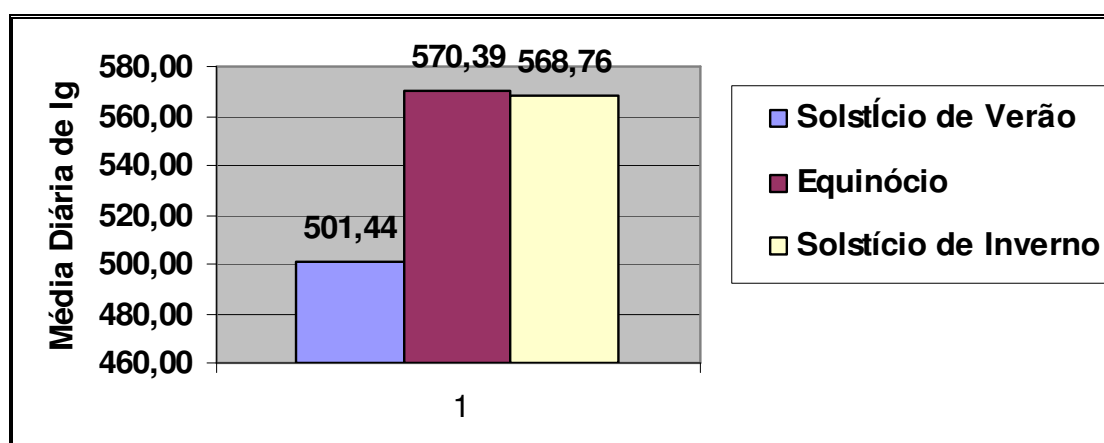


Figura 5.4 - Média diária de radiação solar, para os solstícios e equinócio – 25° Norte (W/m²)

No solstício de inverno e no equinócio, ocorreram maiores valores médios, sendo praticamente iguais (568,76 W/m² e 570,39 W/m², respectivamente). No solstício de verão, o

valor médio foi de 501,44 W/m². Isso ocorre porque o sol mantém uma trajetória aparente deslocada mais ao sul no solstício de verão, diminuindo assim os índices de radiação nas inclinações orientadas ao norte. Já no solstício de inverso, a trajetória do sol é deslocada mais ao norte, ocorrendo então o inverso.

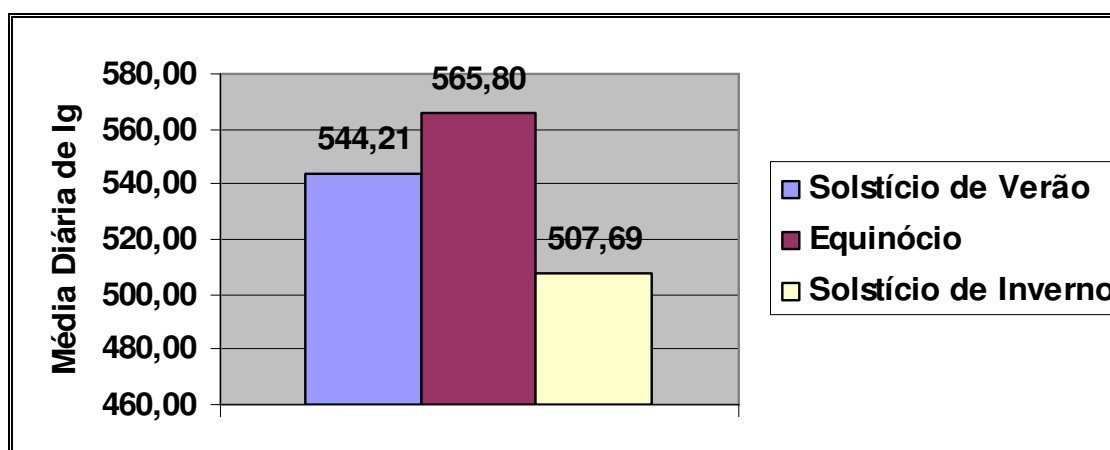


Figura 5.5- Média Diária de Radiação Solar, para os Solstícios e Equinócio – 25% Leste (W/m²)

Dentre os valores médios apresentados na Figura 5.5, o maior ocorreu no equinócio (565,80 W/m²).

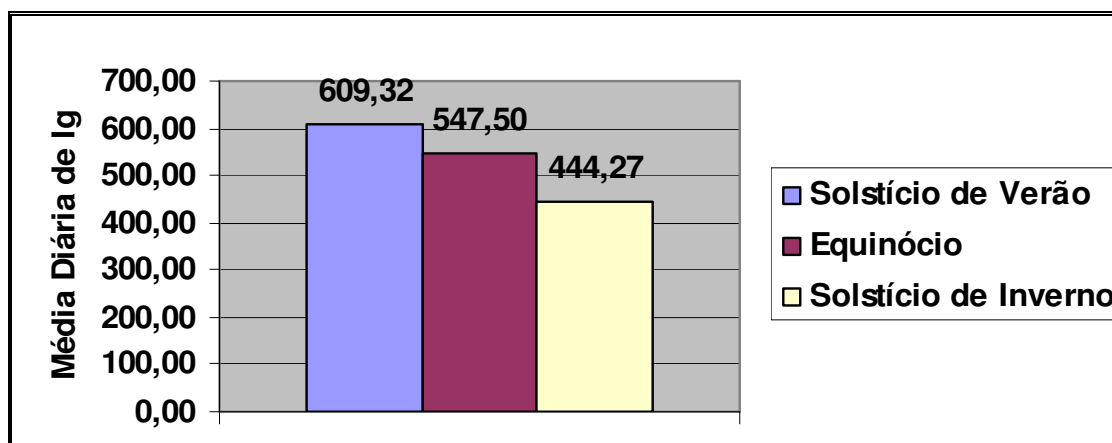


Figura 5.6- Média diária de radiação solar, para os solstícios e equinócio – 25% Sul (W/m²)

De acordo com o figura 5.6, pode-se visualizar o processo inverso ocorrido nas inclinações voltadas ao Norte (ver figura 5.4). Isso porque, como foi citado, a trajetória no solstício de verão fica descolada mais ao sul, aumentando a incidência solar em superfícies inclinadas nesta orientação.

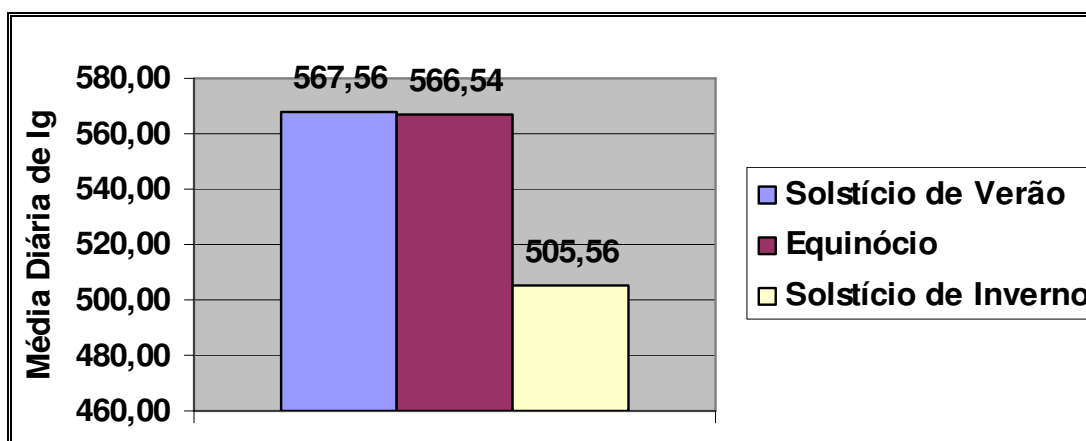


Figura 5.7 - Média Diária de Radiação Solar, para os Solstícios e Equinócio – 25% Oeste (W/m²)

Na situação ilustrada na figura 5.7, observa-se que os valores médios de radiação solar ao longo do dia, nos solstícios de verão e no equinócio, foram praticamente iguais (em torno de 566 W/m²), sendo estes os maiores em relação ao valor obtido no solstício de inverno.

Nas figuras 5.8 a 5.11 apresentam-se as médias diárias de radiação solar para superfícies inclinadas em 10% (06°), nos solstícios de verão e inverno e no equinócio, orientadas ao norte, leste, sul e oeste.

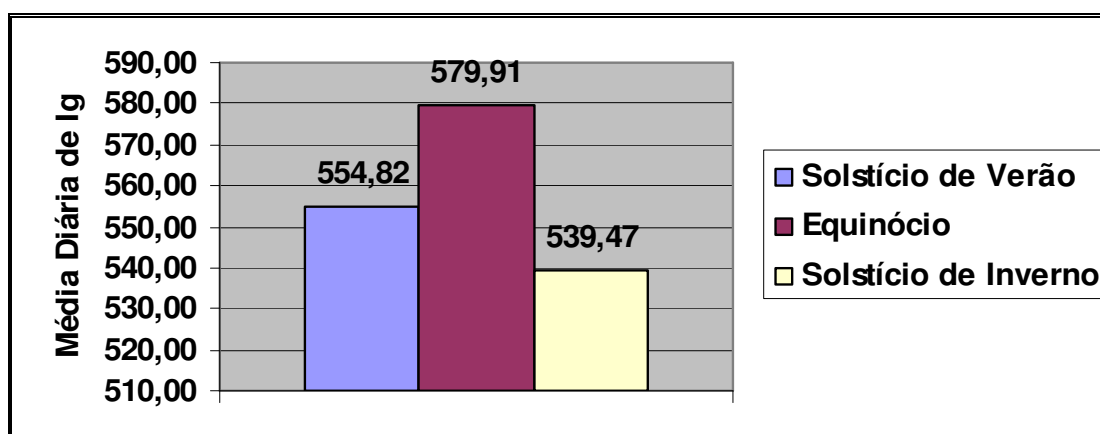


Figura 5.8 - Média diária de radiação solar, para os solstícios e equinócio – 10% Norte (W/m²)

Da figura 5.8, pode-se observar que o maior valor médio de radiação solar ocorreu no equinócio (579,91 W/m²).

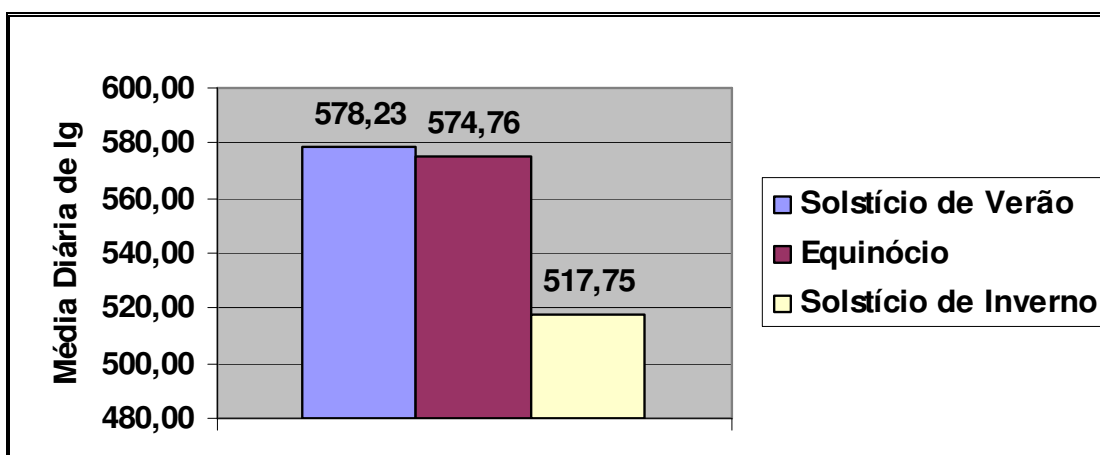


Figura 5.9 - Média diária de radiação solar, para os solstícios e equinócio – 10% Leste (W/m²)

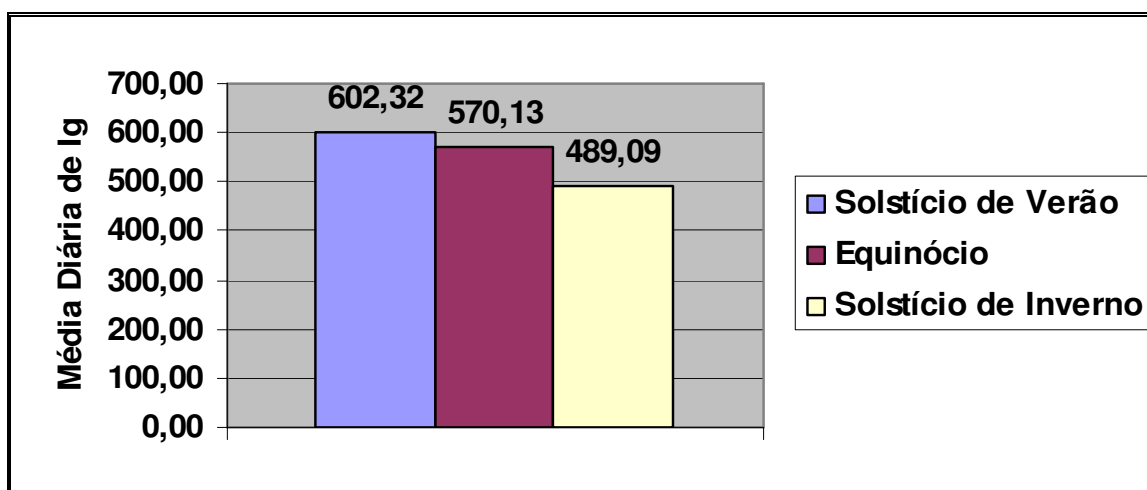


Figura 5.10 - Média diária de radiação solar, para os solstícios e equinócio – 10% Sul (W/m²)

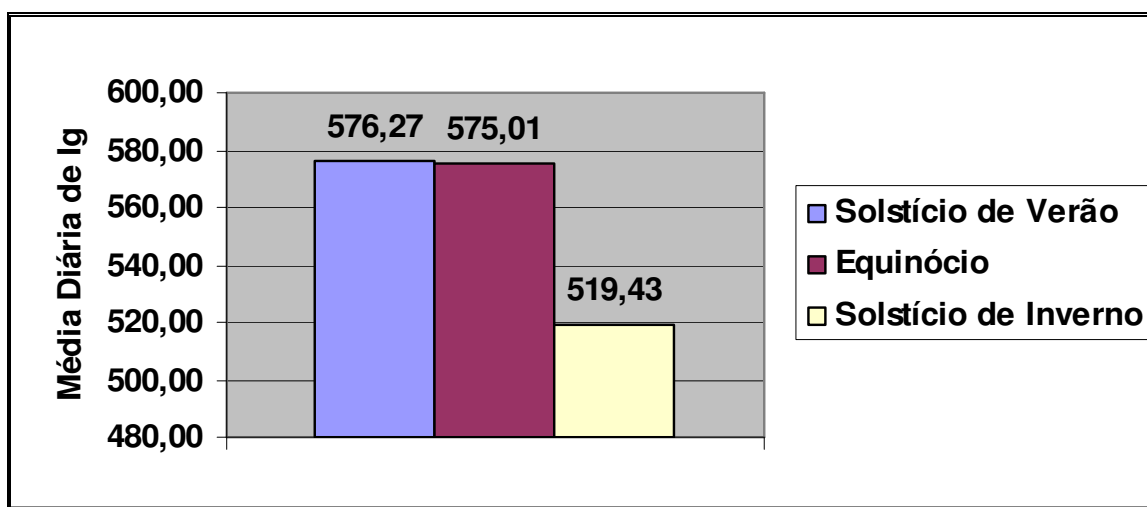


Figura 5.11 - Média diária de radiação solar, para os solstícios e equinócio – 10% Oeste (W/m²)

Nota-se, a partir da análise das figuras 5.8 a 5.11, que os menores valores médios ocorreram no solstício de inverno, para todas as orientações. Para a orientação norte, o maior valor médio ocorreu no equinócio (579,91 W/m²) e para as outras orientações (leste, sul e oeste) os maiores valores médios ocorreram no solstício de verão, porém quase iguais ao encontrados no equinócio.

Finalizando, nas figuras 5.12 a 5.15 apresentam-se as médias diárias da radiação solar, nos solstícios e no equinócio, para superfícies inclinadas nas orientações norte, leste, sul e oeste, para superfícies inclinadas em 5% (03° aproximadamente).

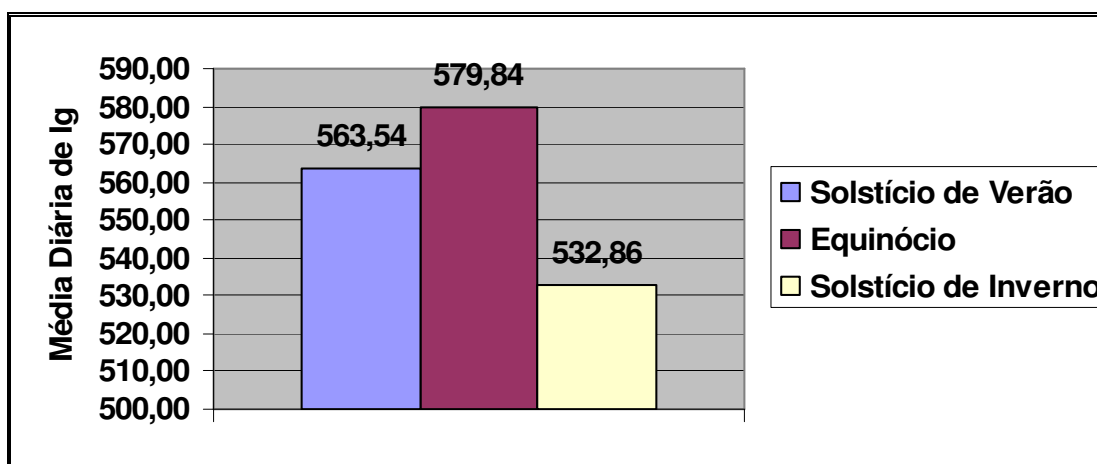


Figura 5.12 - Média diária de radiação solar, para os solstícios e equinócio – 05% Norte (W/m²)

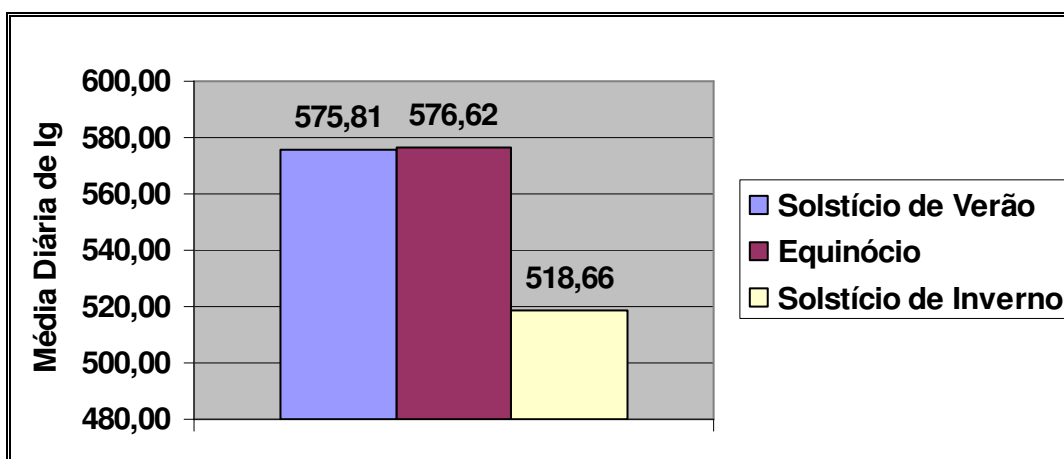


Figura 5.13 - Média diária de radiação solar, para os solstícios e equinócio – 05% Leste (W/m²)

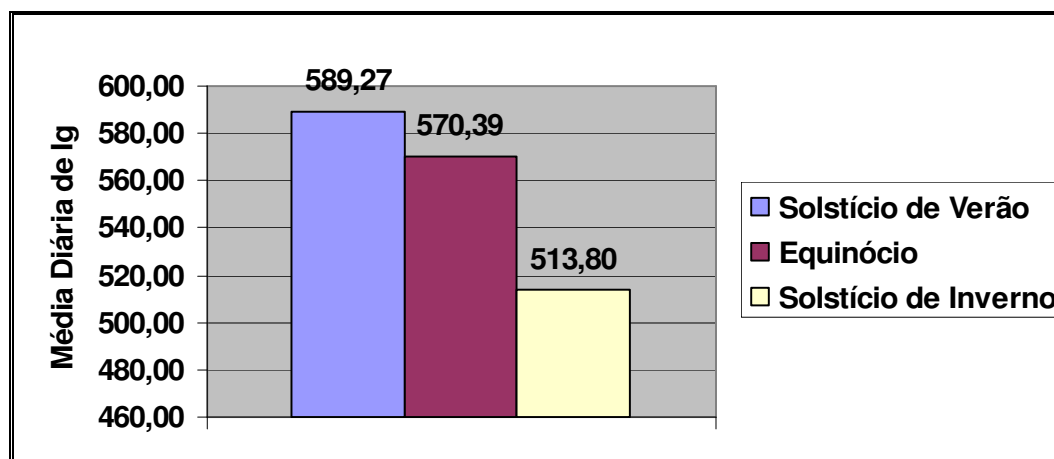


Figura 5.14 - Média diária de radiação solar, para os solstícios e equinócio – 05% Sul (W/m²)

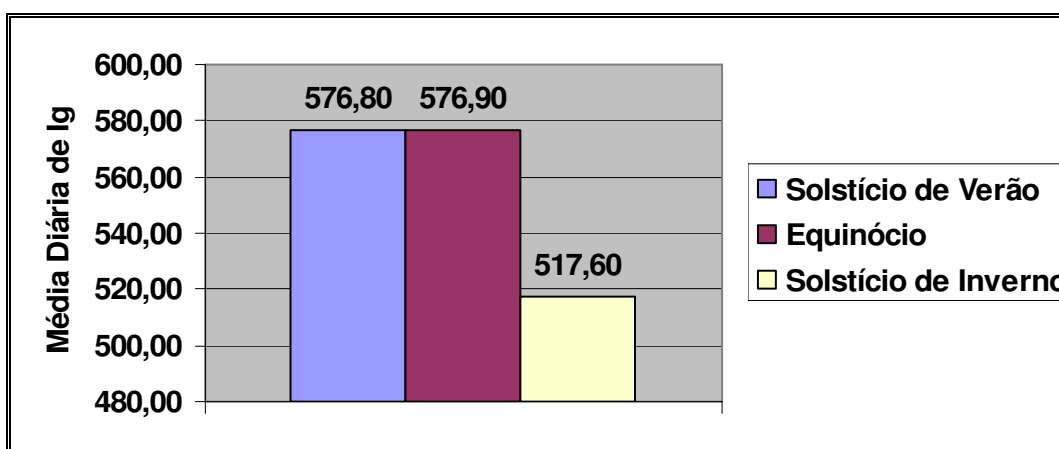


Figura 5.15 - Média diária de radiação solar, para os solstícios e equinócio – 05% Oeste (W/m²)

Analisado-se as figuras 5.16 a 5.19, nota-se semelhanças de comportamento em relação à inclinação de 6°, menores valores médios para solstício de inverno. Para orientação sul, o maior valor médio ocorreu no solstício de verão (589,27 W/m²). Assim como na inclinação de 06°, a orientação norte possui maior valor médio no equinócio (579,84 W/m²). Para as orientações leste e oeste houve equivalência de valores médios (maiores) para os solstícios de verão e equinócio.

Observa-se que, para todas as inclinações, de uma forma geral, a orientação norte apresenta menores valores médios no solstício de verão, enquanto a orientação sul apresenta a menor média no solstício de inverno. Isso se explica pelo fato de o sol manter uma trajetória aparente deslocada para o sul no solstício de verão, reduzindo a sua incidência em superfícies inclinadas para o norte. O efeito contrário acontece em relação ao solstício de inverno.

Os níveis de radiação solar incidente nas superfícies inclinadas, no equinócio, apresentaram valores relativamente altos, para todas as orientações.

Como forma de analisar comparativamente os resultados acima, organizou-se na tabela 5.4 as médias de radiação solar global incidente em cada inclinação, e sua respectiva orientação, mostrando-se, assim, uma estimativa de valores de cada superfície inclinada.

Tabela 5.4 - Valores médios de radiação solar, para 14°, 06° e 03° de inclinação para N, E, S e W

| | Inc. 14° | | | | Inc. 06° | | | | Inc. 03° | | | |
|--|----------|-----|-----|-----|----------|-----|-----|-----|----------|-----|-----|-----|
| | N | E | S | W | N | E | S | W | N | E | S | W |
| I_G (W/m²) | 546 | 533 | 533 | 546 | 558 | 557 | 553 | 557 | 559 | 557 | 558 | 557 |
| Média (W/m²) | 540 | | | | 556 | | | | 558 | | | |

Nota-se um comportamento médio muito parecido entre as superfícies inclinadas em 10% e 5%. A explicação decorre de dois fatores: (1) como tais inclinações se aproximam muito de um plano horizontal, o comportamento tende a ser realmente semelhante, pois a diferença é de apenas 03°; (2) esse estudo diz respeito à Teresina, situadas muito próximo ao Equador, e, por isso, o Sol descreve uma trajetória aparente muito perto da incidência vertical ao meio dia.

Os valores encontrados para superfície inclinada em 14° foram os menores, mantendo uma diferença da ordem de 20 W/m² em relação às outras duas inclinações (06° e 03°).

Para efeito de cálculo de carga térmica, utilizou-se a média, para cada inclinação, dos valores obtidos de radiação solar nas 04 (quatro) orientações (N, E, S e W).

5.5. Determinação Teórica da Carga Térmica em Edificações devido às Coberturas

A carga térmica correspondente a cada tipo de cobertura serve para determinar o consumo de energia elétrica, detectando seus principais pontos de contribuição no ganho de calor da edificação.

Na tabela 5.5 apresentam-se os 15 (quinze) tipos de cobertura que foram analisados e suas respectivas características estruturais e construtivas. Esses tipos de cobertura acima descritos foram escolhidos por serem os mais comumente utilizados em edificações na cidade de Teresina – PI.

Tabela 5.5 - Os 15 Casos de Estudo e suas Respectivas Características Construtivas

| Caso | Tipo de Telha | Tipo de Forro | Espessura do forro (mm) | Área de Proj. Horizontal (m²) | Peso Total (Kg/m²) |
|----------------|----------------------|----------------------|--------------------------------|---|--------------------------------------|
| Caso 1 | Cerâmica | Sem forro | - - - - - | 100 | 48,80 |
| Caso 2 | Cerâmica | Gesso | 30 mm | 100 | 74,30 |
| Caso 3 | Cerâmica | PVC | 10 mm | 100 | 53,60 |
| Caso 4 | Cerâmica | Laje de Concreto | 80 mm | 100 | 240,80 |
| Caso 5 | Cerâmica | Lajota + Capeamento | 120 mm | 100 | 234,40 |
| Caso 6 | Aço | Sem forro | - - - - - | 100 | 7,00 |
| Caso 7 | Aço | Gesso | 30 mm | 100 | 29,50 |
| Caso 8 | Aço | PVC | 10 mm | 100 | 11,80 |
| Caso 9 | Aço | Laje de Concreto | 80 mm | 100 | 199,00 |
| Caso 10 | Aço | Lajota + Capeamento | 120 mm | 100 | 192,60 |
| Caso 11 | Amianto | Sem forro | - - - - - | 100 | 20,80 |
| Caso 12 | Amianto | Gesso | 30 mm | 100 | 43,30 |
| Caso 13 | Amianto | PVC | 10 mm | 100 | 25,60 |
| Caso 14 | Amianto | Laje de Concreto | 80 mm | 100 | 212,80 |
| Caso 15 | Amianto | Lajota + Capeamento | 120 mm | 100 | 206,40 |

O primeiro passo para cálculo da carga térmica é a determinação da resistência total do conjunto. Na tabela 5.6 apresentam-se os valores das resistências térmicas totais (R_T) para os 15 (quinze) casos considerados no presente estudo. Do Projeto de Norma PN02:135.07-001/3:2003, foram retirados os valores de transmitância térmica, e a partir de tal valor obtido pelo seu inverso o valor da resistência térmica.

Tabela 5.6 - Valores de resistência térmica e transmitância para os 15 Casos de Estudo, segundo PN02:135.07-001/3:2003

| Caso de Estudo | R_T [m²h°C/Kcal] | U [Kcal/m².h°C] |
|-----------------------|---|-----------------------------------|
| <i>Caso 1</i> | 0,273 | 3,66 |
| <i>Caso 2</i> | 0,604 | 1,655 |
| <i>Caso 3</i> | 0,661 | 1,512 |
| <i>Caso 4</i> | 0,585 | 1,709 |
| <i>Caso 5</i> | 0,768 | 1,302 |
| <i>Caso 6</i> | 0,470 | 2,127 |
| <i>Caso 7</i> | 0,537 | 1,862 |
| <i>Caso 8</i> | 0,594 | 1,683 |
| <i>Caso 9</i> | 0,518 | 1,930 |
| <i>Caso 10</i> | 0,701 | 1,426 |
| <i>Caso 11</i> | 0,249 | 4,016 |
| <i>Caso 12</i> | 0,546 | 1,831 |
| <i>Caso 13</i> | 0,603 | 1,658 |
| <i>Caso 14</i> | 0,527 | 1,897 |
| <i>Caso 15</i> | 0,710 | 1,408 |

Os menores valores de resistências dos conjuntos (telha, estrutura e forro), obviamente ocorreram nos casos 1, 6 e 11 (cobertura em telha cerâmica, aço e amianto, respectivamente – todas sem utilização de forro). Os maiores valores de resistência ocorreram com o uso de forro de laje pré-moldada, haja vista que esse é composto por uma camada heterogênea (cobrimento em concreto e lajotas). E também por que sua espessura é maior – 12 cm. Em todos os casos que se utilizou forro, as resistências foram elevadas devido à camada de ar que existe entre ele e o telhamento. A resistência de uma camada de ar é da ordem de 0,23 m²h°C/kcal. Corresponde em torno de 30% a 48% do valor da resistência total do conjunto.

Os valores de temperatura mínima absoluta e média máxima externa para todos os meses estão contidos na tabela 5.7:

Tabela 5.7 - Valores de temperatura média máxima e temperatura mínima absoluta para os 12 meses do Ano

| | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| t_e (°C) | 32,2 | 30,1 | 30,1 | 31,6 | 31,8 | 32,4 | 33,3 | 33,5 | 35,8 | 36,4 | 35,4 | 34,2 |
| t_{\min} (°C) | 20,0 | 19,2 | 20,2 | 19,9 | 19,4 | 16,4 | 15,0 | 15,8 | 16,4 | 18,8 | 19,4 | 20,0 |

Nota-se, a partir da tabela 5.7 que os maiores valores de média máxima estão nos meses de agosto a dezembro, sendo o mês de outubro o mais crítico nesse sentido. Quanto à temperatura mínima absoluta, o menor valor também ocorre nos meses do segundo semestre, denotando, assim, uma alta amplitude térmica.

Para cálculo de carga térmica, os dados constantes utilizados nas equações já citadas são os seguintes:

Temperatura Interna Adotada (T_I) = 28°C;

Resistência da Superfície Externa (R_{se}) = 0,05 m²h°C/kcal;

Resistência da Superfície Interna (R_{si}) = 0,19 m²h°C/kcal ;

Área da Projeção Horizontal da Superfície de Cobertura (A) = 100 m²;

Absortividade (α) = 0,72 (para telha cerâmica), 0,52 (para telha de aço) e 0,67 (para telha de amianto);

Seguindo a Metodologia apresentada no capítulo 4, o segundo passo para cálculo da carga térmica consta da determinação da Temperatura Sol-Ar Equivalente ($T_{sa-máx}$ - °C). Na tabela 5.8 apresentam-se os resultados para os casos analisados.

Tabela 5.8 - Valores de temperatura sol-ar equivalente máxima – T_{SA-MAX} (°C)

| | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Caso 1 a 5 (°C) | 51,6 | 49,5 | 49,5 | 51,0 | 51,2 | 51,8 | 52,7 | 52,9 | 55,2 | 55,8 | 54,8 | 53,6 |
| Caso 6 a 10 (°C) | 46,7 | 44,6 | 44,6 | 46,1 | 46,3 | 46,9 | 47,8 | 48,0 | 50,3 | 50,9 | 49,9 | 48,7 |
| Caso 11 a 15 (°C) | 50,8 | 48,7 | 48,7 | 50,2 | 50,4 | 51,0 | 51,9 | 52,1 | 54,4 | 55,0 | 54,0 | 52,8 |

Observa-se que, para o cálculo da Temperatura Sol-Ar Máxima, as variáveis são temperatura externa, absortividade, radiação solar e resistência térmica superficial interna. Por isso, agruparam-se os casos de acordo com o tipo de cobertura – cerâmica, aço e amianto – pois as variáveis citadas são constantes para cada tipo de material da telha.

Na tabela 5.9 apresentam-se os valores de resistência dos elementos do conjunto (R_c), calor específico (c), capacidade calorífica (C), coeficiente “a”, quociente entre as amplitudes de onda externa e interna (A) e o peso total do conjunto (telha, estrutura e forro) (P_t).

Tabela 5.9 - Dados físicos dos casos analisados

| | R_c [m ² .h.°C/Kcal] | c [Kcal/kg.°C] | C [Kcal/m ² .°C] | a | A | P_t [kg/m ²] |
|----------------|--|---------------------------------------|--|-----------------------|-----------------------|---|
| Caso 1 | 0,033 | 0,220 | 10,736 | 0,093 | 1,500 | 48,800 |
| Caso 2 | 0,364 | 0,210 | 14,973 | 1,426 | 4,000 | 71,300 |
| Caso 3 | 0,421 | 0,252 | 13,507 | 1,488 | 5,000 | 53,600 |
| Caso 4 | 0,345 | 0,230 | 55,384 | 5,000 | 6,000 | 240,800 |
| Caso 5 | 0,528 | 0,225 | 52,740 | 7,287 | 8,700 | 234,400 |
| Caso 6 | 0,000 | 0,110 | 0,770 | 0,000 | 2,800 | 7,000 |
| Caso 7 | 0,297 | 0,155 | 4,573 | 0,355 | 3,700 | 29,500 |
| Caso 8 | 0,354 | 0,197 | 2,325 | 0,215 | 3,600 | 11,800 |
| Caso 9 | 0,278 | 0,175 | 34,825 | 2,533 | 4,500 | 199,000 |
| Caso 10 | 0,461 | 0,170 | 32,742 | 3,950 | 6,500 | 192,600 |
| Caso 11 | 0,239 | 0,200 | 4,160 | 0,260 | 1,000 | 20,800 |
| Caso 12 | 0,306 | 0,200 | 8,660 | 0,693 | 3,700 | 43,300 |
| Caso 13 | 0,363 | 0,242 | 6,195 | 0,588 | 3,500 | 25,600 |
| Caso 14 | 0,287 | 0,220 | 46,816 | 3,516 | 5,000 | 212,800 |
| Caso 15 | 0,470 | 0,215 | 44,376 | 5,458 | 7,000 | 206,400 |

Com base nos resultados apresentados na tabela 5.9, pôde-se calcular então, para os 12 (doze) meses do ano, a temperatura Sol-ar Média (ver tabela 5.10):

Tabela 5.10 - Valores de temperatura sol-ar equivalente média – $T_{SA-MÉD}$ (°C)

| | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Caso 1 a 5 (°C) | 35,8 | 34,4 | 34,9 | 35,5 | 35,3 | 34,1 | 33,9 | 34,4 | 35,8 | 37,3 | 37,1 | 36,8 |
| Caso 6 a 10 (°C) | 33,4 | 31,9 | 32,4 | 33,0 | 32,9 | 31,7 | 31,4 | 31,9 | 33,4 | 34,9 | 34,7 | 34,4 |
| Caso 11 a 15 (°C) | 35,4 | 34,0 | 34,5 | 35,1 | 34,9 | 33,7 | 33,5 | 34,0 | 35,4 | 36,9 | 36,7 | 36,4 |

A temperatura sol-ar equivalente média é a média da temperatura superficial externa da cobertura, que recebe a radiação solar diretamente.

Calculou-se então a temperatura superficial interna média ($T_{SI-MÉD}$), utilizando-se a equação 5.1:

$$T_{SiMéd} = [(T_{SAMéd} - t_i) \cdot (R_T)^{-1} \cdot R_{si}] + t_i \text{ (°C)} \quad (5.1)$$

Os resultados obtidos encontram-se na tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Valores de temperatura superficial interna média – $T_{SI-MÉD}$ (°C)

| | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Caso 1 (°C) | 33,4 | 32,4 | 32,8 | 33,2 | 33,1 | 32,3 | 32,1 | 32,4 | 33,4 | 34,5 | 34,3 | 34,1 |
| Caso 2 (°C) | 30,5 | 30,0 | 30,2 | 30,3 | 30,3 | 29,9 | 29,8 | 30,0 | 30,5 | 30,9 | 30,9 | 30,8 |
| Caso 3 (°C) | 30,2 | 29,8 | 30,0 | 30,1 | 30,1 | 29,8 | 29,7 | 29,8 | 30,2 | 30,7 | 30,6 | 30,5 |
| Caso 4 (°C) | 30,5 | 30,1 | 30,2 | 30,4 | 30,4 | 30,0 | 29,9 | 30,1 | 30,5 | 31,0 | 31,0 | 30,9 |
| Caso 5 (°C) | 29,9 | 29,6 | 29,7 | 29,8 | 29,8 | 29,5 | 29,5 | 29,6 | 29,9 | 30,3 | 30,3 | 30,2 |
| Caso 6 (°C) | 32,2 | 31,1 | 31,5 | 32,0 | 31,8 | 30,9 | 30,7 | 31,1 | 32,2 | 33,4 | 33,3 | 33,0 |
| Caso 7 (°C) | 29,9 | 29,4 | 29,6 | 29,8 | 29,7 | 29,3 | 29,2 | 29,4 | 29,9 | 30,4 | 30,4 | 30,2 |
| Caso 8 (°C) | 29,7 | 29,2 | 29,4 | 29,6 | 29,6 | 29,2 | 29,1 | 29,2 | 29,7 | 30,2 | 30,1 | 30,0 |
| Caso 9 (°C) | 30,0 | 29,4 | 29,6 | 29,8 | 29,8 | 29,3 | 29,2 | 29,4 | 30,0 | 30,5 | 30,4 | 30,3 |
| Caso 10 (°C) | 29,5 | 29,1 | 29,2 | 29,4 | 29,3 | 29,0 | 28,9 | 29,1 | 29,5 | 29,9 | 29,8 | 29,7 |
| Caso 11 (°C) | 30,9 | 30,4 | 30,6 | 30,8 | 30,7 | 30,3 | 30,2 | 30,4 | 30,9 | 31,5 | 31,5 | 31,3 |
| Caso 12 (°C) | 30,6 | 30,1 | 30,2 | 30,5 | 30,4 | 30,0 | 29,9 | 30,1 | 30,6 | 31,1 | 31,0 | 30,9 |
| Caso 13 (°C) | 30,3 | 29,9 | 30,0 | 30,2 | 30,2 | 29,8 | 29,7 | 29,9 | 30,3 | 30,8 | 30,7 | 30,7 |
| Caso 14 (°C) | 30,7 | 30,1 | 30,3 | 30,5 | 30,5 | 30,1 | 30,0 | 30,1 | 30,7 | 31,2 | 31,1 | 31,0 |
| Caso 15 (°C) | 30,0 | 29,6 | 29,7 | 29,9 | 29,8 | 29,5 | 29,5 | 29,6 | 30,0 | 30,4 | 30,3 | 30,3 |

Analisando-se a tabela 5.11, nota-se que a média das temperaturas superficiais internas são muito parecidas, ou seja, seus valores estão muito próximos. Os maiores valores ocorreram para o caso 1, cobertura em telha cerâmica sem utilização de forro, pois, para esse material, a absortividade é a mais alta.

Para o cálculo da temperatura interna máxima ($T_{SI-MÁX}$) é necessário, de antemão, ter os valores da amplitude de onda interna (A_I). Determina-se o seu valor pelo quociente entre a amplitude de onda externa (A_E) e o valor de 'A' (já exposto na tabela 5.9).

A equação 5.2 refere-se ao cálculo de A_E :

$$2.A_E = T_{SA-MÁX} - T_{\min} (^\circ\text{C}) \quad (5.2)$$

Nas tabelas 5.12 e 5.13 apresentam-se os valores de A_E e os valores de A_I , para todos os casos analisados.

Tabela 5.12 - Valores da amplitude de onda externa (A_E) - $^\circ\text{C}$

| | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Caso 1 a 5 ($^\circ\text{C}$) | 15,8 | 15,2 | 14,7 | 15,6 | 15,9 | 17,7 | 18,9 | 18,6 | 19,4 | 18,5 | 17,7 | 16,8 |
| Caso 6 a 10 ($^\circ\text{C}$) | 13,4 | 12,7 | 12,2 | 13,1 | 13,5 | 15,3 | 16,4 | 16,1 | 17,0 | 16,1 | 15,3 | 14,4 |
| Caso 11 a 15 ($^\circ\text{C}$) | 15,4 | 14,8 | 14,3 | 15,2 | 15,5 | 17,3 | 18,5 | 18,2 | 19,0 | 18,1 | 17,3 | 16,4 |

Tabela 5.13 - Valores da amplitude de onda interna (A_I) - $^\circ\text{C}$

| | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Caso 1 ($^\circ\text{C}$) | 12,17 | 11,67 | 11,28 | 11,98 | 12,25 | 13,63 | 14,52 | 14,28 | 14,94 | 14,25 | 13,63 | 12,94 |
| Caso 2 ($^\circ\text{C}$) | 3,96 | 3,79 | 3,67 | 3,89 | 3,98 | 4,43 | 4,72 | 4,64 | 4,86 | 4,63 | 4,43 | 4,21 |
| Caso 3 ($^\circ\text{C}$) | 3,16 | 3,03 | 2,93 | 3,11 | 3,18 | 3,54 | 3,77 | 3,71 | 3,88 | 3,70 | 3,54 | 3,36 |
| Caso 4 ($^\circ\text{C}$) | 2,64 | 2,53 | 2,45 | 2,60 | 2,65 | 2,95 | 3,15 | 3,10 | 3,24 | 3,09 | 2,95 | 2,80 |
| Caso 5 ($^\circ\text{C}$) | 1,82 | 1,74 | 1,69 | 1,79 | 1,83 | 2,04 | 2,17 | 2,13 | 2,23 | 2,13 | 2,04 | 1,93 |
| Caso 6 ($^\circ\text{C}$) | 4,77 | 4,54 | 4,36 | 4,68 | 4,81 | 5,45 | 5,86 | 5,75 | 6,06 | 5,73 | 5,45 | 5,13 |
| Caso 7 ($^\circ\text{C}$) | 3,61 | 3,43 | 3,30 | 3,54 | 3,64 | 4,12 | 4,43 | 4,35 | 4,58 | 4,34 | 4,12 | 3,88 |
| Caso 8 ($^\circ\text{C}$) | 3,71 | 3,53 | 3,39 | 3,64 | 3,74 | 4,24 | 4,56 | 4,47 | 4,71 | 4,46 | 4,24 | 3,99 |
| Caso 9 ($^\circ\text{C}$) | 2,97 | 2,82 | 2,71 | 2,91 | 2,99 | 3,39 | 3,65 | 3,58 | 3,77 | 3,57 | 3,39 | 3,19 |
| Caso 10 ($^\circ\text{C}$) | 2,05 | 1,95 | 1,88 | 2,02 | 2,07 | 2,35 | 2,52 | 2,48 | 2,61 | 2,47 | 2,35 | 2,21 |

| | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Caso 11 (°C) | 15,41 | 14,76 | 14,26 | 15,16 | 15,51 | 17,31 | 18,46 | 18,16 | 19,01 | 18,11 | 17,31 | 16,41 |
| Caso 12 (°C) | 4,17 | 3,99 | 3,85 | 4,10 | 4,19 | 4,68 | 4,99 | 4,91 | 5,14 | 4,90 | 4,68 | 4,44 |
| Caso 13 (°C) | 4,40 | 4,22 | 4,08 | 4,33 | 4,43 | 4,95 | 5,28 | 5,19 | 5,43 | 5,18 | 4,95 | 4,69 |
| Caso 14 (°C) | 3,08 | 2,95 | 2,85 | 3,03 | 3,10 | 3,46 | 3,69 | 3,63 | 3,80 | 3,62 | 3,46 | 3,28 |
| Caso 15 (°C) | 2,20 | 2,11 | 2,04 | 2,17 | 2,22 | 2,47 | 2,64 | 2,59 | 2,72 | 2,59 | 2,47 | 2,34 |

O passo seguinte foi o cálculo da Temperatura Superficial Interna Máxima (T_{SI-MAX}), através da equação 5.3:

$$T_{SiMáx} = T_{SiMéd} + A_I (°C) \quad (5.3)$$

Na tabela 5.14 apresentam-se os resultados relativos a T_{SI-MAX} :

Tabela 5.14 - Valores de T_{SI-MAX} (°C)

| | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Caso 1 (°C) | 45,6 | 44,1 | 44,1 | 45,2 | 45,3 | 45,9 | 46,6 | 46,7 | 48,4 | 48,7 | 48,0 | 47,1 |
| Caso 2 (°C) | 34,4 | 33,8 | 33,8 | 34,2 | 34,3 | 34,4 | 34,6 | 34,6 | 35,3 | 35,6 | 35,3 | 35,0 |
| Caso 3 (°C) | 33,4 | 32,9 | 32,9 | 33,3 | 33,3 | 33,3 | 33,5 | 33,5 | 34,1 | 34,4 | 34,2 | 33,9 |
| Caso 4 (°C) | 33,2 | 32,6 | 32,7 | 33,0 | 33,0 | 32,9 | 33,1 | 33,2 | 33,8 | 34,1 | 33,9 | 33,7 |
| Caso 5 (°C) | 31,8 | 31,3 | 31,4 | 31,6 | 31,6 | 31,6 | 31,6 | 31,7 | 32,2 | 32,4 | 32,3 | 32,1 |
| Caso 6 (°C) | 37,0 | 35,6 | 35,8 | 36,6 | 36,6 | 36,3 | 36,6 | 36,8 | 38,3 | 39,2 | 38,7 | 38,2 |
| Caso 7 (°C) | 33,5 | 32,8 | 32,9 | 33,3 | 33,4 | 33,4 | 33,6 | 33,7 | 34,5 | 34,8 | 34,5 | 34,1 |
| Caso 8 (°C) | 33,4 | 32,8 | 32,8 | 33,2 | 33,3 | 33,4 | 33,6 | 33,7 | 34,4 | 34,7 | 34,4 | 34,0 |
| Caso 9 (°C) | 32,9 | 32,3 | 32,3 | 32,7 | 32,8 | 32,7 | 32,9 | 33,0 | 33,7 | 34,1 | 33,8 | 33,5 |
| Caso 10 (°C) | 31,5 | 31,0 | 31,1 | 31,4 | 31,4 | 31,3 | 31,4 | 31,5 | 32,1 | 32,3 | 32,2 | 31,9 |
| Caso 11 (°C) | 46,4 | 45,1 | 44,8 | 46,0 | 46,3 | 47,6 | 48,6 | 48,5 | 50,0 | 49,6 | 48,8 | 47,8 |
| Caso 12 (°C) | 34,7 | 34,1 | 34,1 | 34,6 | 34,6 | 34,7 | 34,9 | 35,0 | 35,7 | 36,0 | 35,7 | 35,4 |
| Caso 13 (°C) | 34,7 | 34,1 | 34,1 | 34,6 | 34,6 | 34,7 | 35,0 | 35,1 | 35,8 | 36,0 | 35,7 | 35,3 |
| Caso 14 (°C) | 33,8 | 33,1 | 33,2 | 33,6 | 33,6 | 33,5 | 33,7 | 33,8 | 34,5 | 34,8 | 34,6 | 34,3 |
| Caso 15 (°C) | 32,2 | 31,7 | 31,8 | 32,1 | 32,1 | 32,0 | 32,1 | 32,2 | 32,7 | 33,0 | 32,8 | 32,6 |

Como parte final desta análise comparativa, calculou-se a carga térmica referente às coberturas em questão, onde utilizou-se a seguinte expressão:

$$q = (T_{SiMáx} - t_i) / R_{si} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (5.4)$$

Os resultados finais de carga térmica estão expostos na tabela 5.15:

Tabela 5.15 - Carga térmica ao longo de 12 meses para os casos analisados (W/m²)

| | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez | Média |
|---------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Caso 1 (°C) | 92,7 | 84,8 | 84,6 | 90,4 | 91,3 | 94,2 | 97,9 | 98,5 | 107,3 | 109,1 | 105,1 | 100,4 | 96,4 |
| Caso 2 (°C) | 33,8 | 30,5 | 30,7 | 32,9 | 33,1 | 33,4 | 34,5 | 35,0 | 38,5 | 39,8 | 38,4 | 36,7 | 34,8 |
| Caso 3 (°C) | 28,5 | 25,6 | 25,8 | 27,7 | 27,8 | 27,9 | 28,7 | 29,2 | 32,3 | 33,6 | 32,4 | 31,0 | 29,2 |
| Caso 4 (°C) | 27,2 | 24,2 | 24,6 | 26,4 | 26,5 | 26,0 | 26,6 | 27,2 | 30,4 | 32,2 | 31,1 | 29,8 | 27,7 |
| Caso 5 (°C) | 19,8 | 17,5 | 17,8 | 19,1 | 19,2 | 18,7 | 19,1 | 19,5 | 21,9 | 23,3 | 22,6 | 21,7 | 20,0 |
| Caso 6 (°C) | 47,4 | 40,1 | 41,3 | 45,5 | 45,5 | 43,9 | 45,0 | 46,5 | 54,2 | 58,7 | 56,4 | 53,5 | 48,2 |
| Caso 7 (°C) | 29,0 | 25,3 | 25,6 | 28,0 | 28,2 | 28,5 | 29,7 | 30,2 | 34,1 | 35,6 | 34,1 | 32,3 | 30,1 |
| Caso 8 (°C) | 28,5 | 25,1 | 25,3 | 27,6 | 27,8 | 28,5 | 29,7 | 30,1 | 33,8 | 35,0 | 33,5 | 31,7 | 29,7 |
| Caso 9 (°C) | 26,0 | 22,4 | 22,8 | 25,0 | 25,1 | 24,9 | 25,8 | 26,4 | 30,2 | 32,0 | 30,7 | 29,1 | 26,7 |
| Caso 10 (°C) | 18,5 | 15,9 | 16,2 | 17,7 | 17,8 | 17,6 | 18,1 | 18,6 | 21,4 | 22,8 | 21,8 | 20,7 | 18,9 |
| Caso 11 (°C) | 96,6 | 90,1 | 88,6 | 94,6 | 96,1 | 103,0 | 108,6 | 108,0 | 115,5 | 113,9 | 109,3 | 103,9 | 102,4 |
| Caso 12 (°C) | 35,5 | 31,9 | 32,1 | 34,5 | 34,7 | 35,1 | 36,3 | 36,8 | 40,6 | 42,1 | 40,6 | 38,8 | 36,6 |
| Caso 13 (°C) | 35,5 | 32,1 | 32,2 | 34,5 | 34,8 | 35,5 | 36,8 | 37,2 | 40,9 | 42,0 | 40,5 | 38,6 | 36,7 |
| Caso 14 (°C) | 30,3 | 26,9 | 27,3 | 29,4 | 29,4 | 29,1 | 29,8 | 30,4 | 34,1 | 36,0 | 34,8 | 33,2 | 30,9 |
| Caso 15 (°C) | 22,0 | 19,5 | 19,8 | 21,3 | 21,4 | 21,1 | 21,6 | 22,1 | 24,7 | 26,2 | 25,3 | 24,2 | 22,4 |

Os maiores valores de carga térmica encontrados nesse estudo foram para as coberturas de telha cerâmica e telha de amianto sem utilização de forro – caso 1 e caso 11, respectivamente. A média do caso 1 é de 96,3 W/m², e o maior valor absoluto ocorre no mês de outubro, 109,1 W/m². Para o caso 11, a média anual é de 102,4 W/m² e o maior valor de carga térmica ocorre no mês de setembro (115,5 W/m²).

O caso 6, cobertura em telha de aço sem utilização do forro, apresentou a terceira situação mais desfavorável, com média anual de 48,2 W/m² e maior valor absoluto no mês de outubro, com 58,7 W/m². Nota-se uma diferença acentuada frente aos casos já citados – caso 1 e caso 11. Isso ocorre porque a telha de aço possui o menor índice de absortividade dentre os materiais para telhas aqui estudados ($\alpha = 0,52$) e é um material de baixa emissividade (ε),

ou seja, a capacidade de transmitir menos energia térmica por unidade de tempo frente aos demais materiais de construção.

As menores médias ocorreram para os casos 5, 10 e 15 – telha cerâmica, de aço e de amianto com utilização de forro de laje pré-moldada. Isso ocorre devido à maior resistência do forro, que é uma camada heterogênea (concreto de cobrimento e lajotas com vazios no interior), tendo, assim, maior capacidade de resistir à transferência de calor.

Finalmente, na figura 5.16 apresentam-se as médias aritméticas dos valores constantes da tabela 5.15. Nota-se, aqui, os casos mais desfavoráveis: nº 01 e 11 (telha cerâmica e telha de amianto, ambos sem forro) e os mais favoráveis: casos de nº 5, 10 e 15 (telha cerâmica, de aço e de amianto com uso de forro de laje pré-moldada).

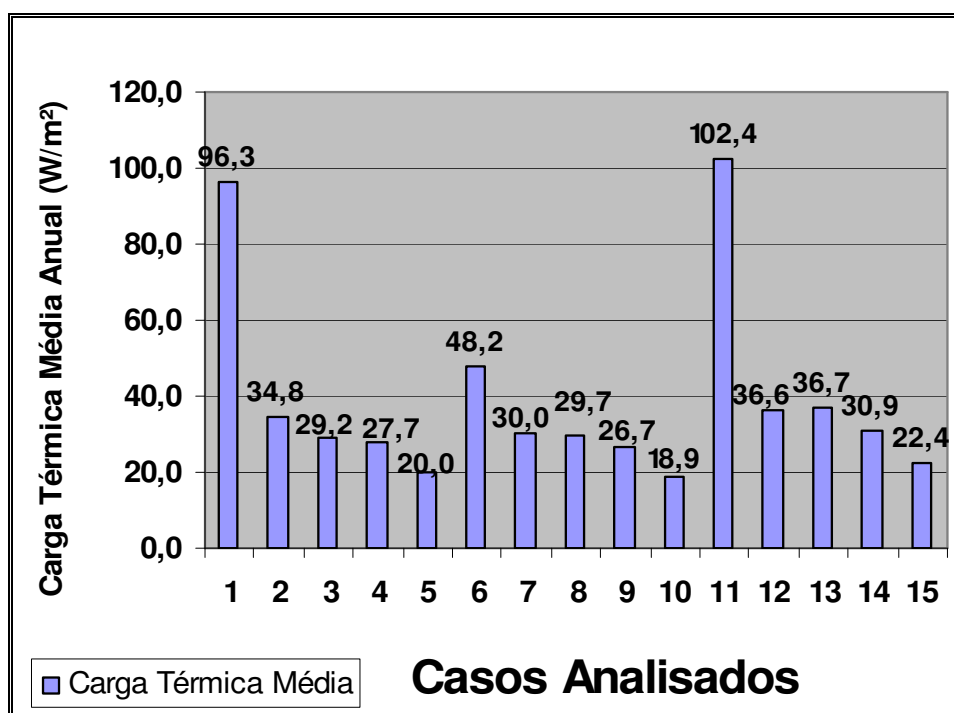


Figura 5.16 - Média anual de carga térmica devido à cobertura nos 15 casos analisados

5.6. Comparação dos Resultados Encontrados com Dados de Temperatura medidos em Teresina-PI

Em 2004, foram compilados em relatório, dados de temperatura medidos na cidade de Teresina, capital do estado do Piauí. As medições ocorreram durante 02 (dois) meses, nos horários de 07:00, 11:00, 15:00 e 19:00 hs. Foram utilizados 06 (seis) cabines de acordo com a figura 5.17. O trabalho fez parte do Projeto CT ENERG – Processo nº 552.372/01-3, e foi intitulado “Sistemas construtivos alternativos para redução do consumo de energia elétrica na climatização de edificações”.



Figura 5.17 – Vista dos módulos (cabines)

Os materiais utilizados nas cabines foram: alvenaria de blocos estruturais cerâmicos nas paredes (material que também possui bom desempenho térmico) e nas coberturas fez-se variar os materiais. Duas são em concreto armado, nomeadas de Cabine 1 e Cabine 2; três em lajes sanduíches com camadas de isopor variando de 1cm, 2cm e 3cm nomeadas de Cabine 3, Cabine 4 e Cabine 5 respectivamente; e uma última cabine recebeu cobertura de telha cerâmica e foi nomeada de Cabine 6. Além das cabines as paredes de cada cabine também foram nomeadas, neste caso estes elementos foram nomeados de Parede 1, Parede 2 e Parede 3, seguindo caminhamento anti-horário a partir da abertura das cabines. Estas numerações

foram importantes para a simplificação e melhor organização da coleta dos dados (CARVALHO 2004).

Para efeito de aferição dos resultados encontrados para telha cerâmica neste trabalho, comparou-se os valores de temperatura externa e interna superficiais ($T_{SA,MÁX}$ e $T_{SI,MÁX}$) com os valores médios coletados no trabalho de Carvalho, 2004, para a cabine 06.

Abaixo, na tabela 5.16, encontram-se dados relativos à temperatura coletada na cabine 06 (CARVALHO, 2004):

**Tabela 5.16: GRÁFICO DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA (°C)
ELEMENTO: COBERTURA**

| | | Horário das Leituras | | | |
|----------|----------|----------------------|--------|--------|--------|
| | | 07:00h | 11:00h | 15:00h | 19:00h |
| CABINE 1 | inferior | 28,2 | 43,2 | 48,7 | 36,9 |
| | superior | 32,1 | 53,1 | 53,3 | 31,5 |
| | | | | | |
| CABINE 5 | inferior | 28,8 | 43,0 | 47,5 | 36,9 |
| | superior | 34,0 | 57,7 | 55,4 | 30,2 |
| | | | | | |
| CABINE 6 | inferior | 30,6 | 45,2 | 43,1 | 31,6 |
| | superior | 32,3 | 48,5 | 46,4 | 25,8 |

Os valores medidos acima puderam ser comparados com os dados obtidos neste trabalho, encontrados a partir de metodologia teórica. Nota-se que na tabela 5.16 os valores absolutos mais elevados aconteceram ao meio-dia, confirmando assim os dados encontrados nesse trabalho (ver figuras 5.1, 5.2 e 5.3).

Contudo, os valores medidos apresentam média de temperatura exterior superficial de 38,25 °C, enquanto que, utilizando-se metodologia teórica, para este trabalho, obteve-se média de 52,4 °C (ver tabela 5.8). A divergência de valores pode estar numa falha na metodologia de cálculo, dados não precisos de radiação solar e capacidade da telha de absorver umidade, favorecendo assim a evaporação da água presente na telha ao invés do seu aquecimento imediato.

6 CONCLUSÕES

Neste estudo foram considerados três parâmetros de cobertura de edificações: a inclinação, a orientação solar e os elementos construtivos constituintes desta. Para todos foram escolhidos os modelos mais aplicados na construção civil.

A partir da análise comparativa entre níveis de radiação solar em superfícies inclinadas, pode-se concluir que quanto maior for a inclinação da superfície, menor será média diária de incidência global de radiação solar. Entretanto, as diferenças foram pequenas, de no máximo 3,2%, relacionando a maior e menor inclinação aqui analisadas. Isso ocorre porque a cidade de Teresina - PI, está localizada próxima à linha do Equador (latitude de 05° 05' - Sul).

Observou-se que a menor média diária de radiação solar global incidente ocorre na inclinação de 25%, com valor de 540 W/m². As inclinações de 10% e 5% apresentaram médias de 556 W/m² e 558 W/m², respectivamente.

No estudo específico de inclinações de 25%, ocorreram maiores valores absolutos de radiação solar global incidente nas orientações Norte (1.018 W/m²) e Leste (989 W/m²). Ambos os valores foram encontrados às 12 horas (meio-dia). A média dos valores de radiação

solar ao longo do dia para as quatro orientações em planos inclinados em 25% resultou em valores muito próximos.

Para superfícies inclinadas em 10%, o comportamento foi muito semelhante ao de 25%, essa com maiores valores absolutos para orientações norte (1024 W/m^2) e leste (1016 W/m^2), ao meio-dia. Com valor médio maior 2,8% que as superfícies inclinadas em 25%.

Em relação às inclinações de 5%, o maior valor absoluto se deu para a orientação sul, de 1050 W/m^2 . A média diária foi praticamente igual ao valor encontrado nas superfícies com inclinações de 10%, com apenas 0,4% (2 W/m^2) de diferença.

Observa-se que, para todas as inclinações (25%, 10% e 5%), de uma forma geral, a orientação norte apresenta menores valores médios no solstício de verão, enquanto a orientação sul apresenta a menor média no solstício de inverno. Isso se explica pelo fato de o sol manter uma trajetória aparente deslocada para o sul no solstício de verão, reduzindo a sua incidência em superfícies inclinadas para o norte. O efeito contrário acontece em relação ao solstício de inverno.

Conclui-se que a inclinação não influencia significativamente na carga térmica em latitudes próximas a 0° (Linha do Equador), uma vez que a média de radiação solar diária, considerando o equinócio e os solstícios de verão e de inverno, apresentou pequenas diferenças. Ao contrário do verificado quando a análise foi aplicada ao estudo comparativo entre parâmetros construtivos.

O estudo da determinação da carga térmica devido as cobertura indicou que a não utilização de forro eleva muito os seus valores finais. Isso ocorre porque a camada de ar existente entre o forro e o telhamento possui uma resistência elevada em relação à resistência total do conjunto.

Os casos mais desfavoráveis encontrados foram os casos 1 e 11 (telha cerâmica e telha de amianto, sem utilização de forro, respectivamente), com médias anuais de $96,3 \text{ W/m}^2$ e $102,4 \text{ W/m}^2$. O caso 6 (telha de aço sem utilização de forro) apresentou média anual de carga térmica de $48,2 \text{ W/m}^2$, valor esse 53% menor que o caso mais desfavorável (caso 11). Isso

ocorreu devido ao aço ser um material de baixa emissividade e possuir a menor absortividade dentre os outros materiais de telha aqui analisados – cerâmica e amianto.

De acordo com os resultados encontrados, conclui-se que os forros de gesso e de PVC apresentaram resultados similares, para todos os tipos de cobertura. Possuem média de aproximadamente 32 W/m².

Os casos que utilizam forros de laje de concreto maciço apresentaram comportamento mais favorável, em relação à não utilização de forro e ao uso de forros de gesso e PVC. A carga térmica média nos casos 4, 9 e 14 apresentou média na ordem de 28 W/m².

O caso mais favorável ocorreu com o uso de forro de laje pré-moldada. Os valores médios de radiação solar ao longo do ano foram de 20,0 W/m², 18,9 W/m² e 22,4 W/m², para os casos 5, 10 e 15, respectivamente.

Pode-se concluir, então, que edificações que não possuem forro estão sujeitas a uma carga térmica até 400% maior. Vale lembrar que este estudo é voltado para o cálculo de carga térmica devido às coberturas, não sendo consideradas aqui a utilização de equipamentos eletrônicos, usuários e radiação recebida pelos paramentos verticais (paredes).

Ao se compilar os resultados obtidos na análise de cada parâmetro conclui-se que dentre todas as combinações de inclinação, orientação, material da telha e utilização de forro a única mudança que gera uma grande redução na carga térmica final é o uso de forro. E, ainda, que o melhor tipo de forro para eficiência energética de uma cobertura é o de laje pré-moldada (lajota e capeamento em concreto).

É importante citar que, a metodologia aplicada no estudo apresentado neste trabalho se sobrepõe aos resultados aqui encontrados. Isto é, a metodologia aplicada é eminentemente teórica e o procedimento de cálculo indica alguns resultados fora do padrão. Tais falhas existentes podem ocorrer a partir da entrada de dados (valores do índice de radiação solar incidente exatos para a localização estudada e coeficientes precisos para cada tipo de material de cobertura).

As imperfeições presentes neste procedimento podem ser comprovadas a partir da comparação dos valores da temperatura sol-ar máxima (equivalente à temperatura máxima da superfície externa da cobertura) obtidos por meio da equação

A partir da análise presente nesta dissertação, abre-se um campo muito grande para continuidade deste estudo. Compilação de dados de carga térmica com combinação da contribuição de paredes e cobertura, comparação entre os valores de temperatura atingidos em análise teórica com medições aparelhadas, implementação de diretrizes construtivas em edificações de caráter social (pessoas de baixa renda), quantificação de energia elétrica gasta em cada caso e seu respectivo custo, são alguns tópicos sugeridos.

Com o uso de coberturas adaptadas ao clima de cada região, no caso deste trabalho à cidade de Teresina, pode-se reduzir consideravelmente a carga térmica em ambientes internos, atingindo-se, assim, espaços mais confortáveis termicamente. Com isso, tem-se ambientes com climas mais amenos, propiciando melhores condições para moradores, no caso de residências, e usuários, no caso de edificações públicas e comerciais.

A diminuição de carga térmica no interior das edificações, implica em redução do consumo de energia elétrica para climatização artificial (ventiladores e condicionadores de ar). Contribuindo diretamente para o uso mais racional dos recursos naturais necessários para a produção de energia elétrica, um passo importante para se conseguir atingir um desenvolvimento sustentável.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABILUX. Projetos Arquitetônicos adequados reduzem o consumo de energia em até 60%. Associação Brasileira da Indústria de Iluminação. Jornal Abilux, ano VI, n. 62, 1996.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. Projeto 023: 135.07-003. Desempenho térmico de edificação – Parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro de diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social, 2003.

AFONSO, Sônia. Paisagem e ambiente urbano sustentáveis: métodos e ferramentas. ENEPEA, 2002. Artigo Técnico *in*: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE PAISAGISMO EM ESCOLAS DE ARQUITETURA.

ANEEL:Atlas de Energia Elétrica do Brasil. 2002. Disponível em: www.aneel.com.br. acesso em 15.set.2004.

ANEEL, Agencia Nacional de Energia Elétrica, 2003. Disponível em: www.aneel.gov.br. Acesso em 25.abril.2005.

ASHRAE – American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioned Engineers. Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, USA: Standard 55-1992.

CARDOSO, J. C. M. Estratégias visando eficiência energética e conforto térmico incorporados aos Projetos de Edificações em Maringá-PR. 2002. 203 páginas. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) Programa Pós-Graduação em Engenharia Civil. UFSC, Florianópolis, 2002.

COHEN, C. et al. Energy requirements of households in Brazil – Energy Policy. GB, 2003.

COUTINHO, A. S. Conforto e insalubridade térmica em ambientes de trabalho. 1. ed. João Pessoa: Editora Universitária, 1998.

FROTA, Anésia B. & SCHIFFER, Sueli R. Manual do Conforto Térmico. 4 ed. São Paulo: Studio Nobel, 2000.

GELLER, H. O uso eficiente da eletricidade – uma estratégia de desenvolvimento para o Brasil. Tradução por Maria de Fátima Costa. ACEEE. Washington, 1991.

GELLER, H.; JANUZZI, G. M.; SCHAEFFER, R.; TOLMASQUIM, M. T. The efficient use of electricity in Brasil: progress and oportunities. ACEEE. Washington, May. 1997.

IBGE: (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Censo 1991. IBGE / DPE/ Departamento de População e Indicadores Sociais. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/>. Acesso em 22. mar. 2005.

IBGE: (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Censo 2000. IBGE / DPE/ Departamento de População e Indicadores Sociais. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/>. Acesso em 22. mar. 2005.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2002, “Indicadores de Desenvolvimento Sustentável: Brasil 2002, Brasil. Disponível em www.ibge.gov.br. Acesso em 25.abril.2005.

IOSHIMOTO, E. et al. Cálculo de Carga Térmica. 2004. Disponível em: <http://pcc261.pcc.usp.br/>. Acesso em 22.dez.2004.

KOENINGSBERGER, O. et al. Viviendas y edificios en zonas cálidas e tropicales. Paraninfo, Madrid, 1977.

KRONKA, R. C. Arquitetura de baixo impacto energético e ambiental – nova arquitetura *in* V ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO & II

ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Fortaleza, 1999. Artigo Técnico

LAMBERTS, Roberto et alli. Eficiência Energética na Arquitetura. 1 ed. São Paulo:PW Editores., 2004.

MASCARÓ, Lucia R. Energia na edificação: estratégia para minimizar seu consumo. São Paulo: Ed. Projeto, 1991.

MEIRIÑO, M. J. Arquitetura e sustentabilidade. 2003. Disponível em: www.unb.br/fau/disc/SC1/SC1-Textos/012-Arquiteturaesustentabilidade.pdf. Acesso em 15.set.2004.

MME: BEN: Balanço energético nacional. Ministério das Minas e Energia. 2000. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/sem>. Acesso em 18. mar. 2005.

MME, Ministério de Minas e Energia, 1995. Balanço de Energia Útil 1993. Brasília, DF, Brasil.

MME, Ministério de Minas e Energia, 2001. Balanço Energético Nacional 2001. Brasília, DF, Brasil.

MME/ELETROBRÁS, 2001. Relatório Analítico de Mercado: Mercado de Energia Elétrica, ciclo 2000. Rio de Janeiro, Brasil.

PROCEL: Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, 2000. Disponível em: <http://www.eletrobrás.gov.br/procel/>. Acesso em 20. jan. 2005.

RORIZ, Maurício, GHISI, Enedir; LAMBERTS, Roberto. Uma proposta de norma técnica brasileira sobre o desempenho térmico de habitações populares. V Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído & II Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Fortaleza, 1999. Artigo Técnico.

SCHAEFFER, R. et al. Energia e pobreza: problemas de desenvolvimento energético e grupos sociais marginais em áreas rurais e urbanas do Brasil. CEPAL. División de Recursos Naturales e Infraestructura. Santiago de Chile, 2003.

SIGNOR, Régis. Análise de regressão do consumo de energia elétrica frente a variáveis arquitetônicas para edifícios comerciais climatizados em 14 capitais brasileiras. 1999. 193 páginas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa Pós-Graduação em Engenharia Civil. UFSC Florianópolis.

SIGNOR, Régis. Estudo do consumo de energia do edifício do Fórum. *in* IV SEMINÁRIO CATARINENSE DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA. Imprensa Universitária, Florianópolis, 1994.

SILVEIRA, A. L. ; ROMERO M.A. Diretrizes de Projeto para construção de prédios escolares em Teresina/PI. V Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído; II ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Fortaleza: EDITORA ANTAC, 1999. CD-ROM.