

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE COBERTURAS EM CLIMA TROPICAL CONTINENTAL



SIMONE BERIGO BÜTTNER

Orientadora: Prof. Dra. Denise Helena Silva Duarte

São Paulo, 2008

SIMONE BERIGO BÜTTNER

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE
COBERTURAS EM CLIMA TROPICAL CONTINENTAL**

Dissertação apresentada à comissão de pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura

Orientadora: Prof. Da. Denise Helena Silva Duarte

São Paulo, novembro de 2008

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica:

Büttner, Simone Berigo

Avaliação de desempenho térmico e energético de coberturas em clima tropical continental / Simone Berigo Büttner -- São Paulo, 2008.

297p.: Il.

Dissertação (Mestrado – Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura) – FAUUSP.

Orientadora: Denise Helena Silva Duarte

1 - Desempenho térmico. 2. - Eficiência energética. 3 - Coberturas.

4 - Técnicas passivas.

BÜTTNER, Simone Berigo. **Avaliação de desempenho térmico e energético de coberturas em clima tropical continental**. Dissertação apresentada à comissão de pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de mestre.

Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura

Aprovada em:

Banca Examinadora:

1. Prof. Dra. Denise Helena Silva Duarte

Instituição: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo

.....

2. Prof. Dra. Anésia Barros Frota

Instituição: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo

.....

3. Prof. Dr. Alberto Hernandez Neto

Instituição: Escola Politécnica – Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade de São Paulo

.....

Aos meus pais *Peter* e *Luciene*, pelo amor incondicional e apoio integral em
todas as minhas conquistas;

Às minhas irmãs *Daniela* e *Marianne*, pela amizade e incentivo;

E ao *Paulo Vítor*, por tornar meus dias mais felizes.

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, por todos os dias da minha vida e pela oportunidade de enfrentar mais um desafio.

À minha família, pais e irmãs, e ao meu noivo, pela confiança depositada em mim e pelo apoio constante. Não há palavras para expressar o meu amor e a minha eterna gratidão.

À prof. Dra. Denise Helena Silva Duarte, pela dedicação e paciência em seu papel de orientadora, apoiando-me e incentivando-me durante todas as etapas desta pesquisa.

À FAPESP – Fundação de amparo à pesquisa do Estado de São Paulo, pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

À FAPEMAT – Fundação de amparo à pesquisa do Estado de Mato Grosso, por ter acreditado em mim e financiado parcialmente a pesquisa.

Aos professores do Labaut – Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, pelo incentivo e pela disponibilidade em transmitir o conhecimento na área de estudo, o que foi fundamental para o desenvolvimento do trabalho: Anésia Barros Frota, Joana Gonçalves, Márcia Alucci, Roberta Kronka e Fernando Cremonesi.

Aos colegas e também pesquisadores do Labaut – Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, pela convivência harmoniosa e pela troca de experiência que em muito contribuíram para o meu crescimento profissional: Alessandra Prata; Anna Mianna; Annarita Buoro; Bruna Luz; Cecília Mueller; Daniela Laudares; Erica Umakoshi; Jörg Spangenberg; José Ovídio; Leonardo Monteiro; Mônica Marcondes; Norberto Moura; Paula Shinzato; Rafael Brandão e Rodrigo Cavalcante.

Às amigas e também mestrandas Carolina Gaspar Leite, Hermínia Marchi e Luciana Correia, pela amizade e incentivo durante a minha permanência em São Paulo para a realização desta pesquisa.

Ao Prof. Alberto Hernandez Neto, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Departamento de Engenharia Mecânica) pela boa vontade, paciência e pelos inúmeros auxílios, em especial no que se refere ao programa *Energy Plus*.

Ao Prof. Fúlvio Vittorino, do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, pelas críticas e sugestões, e acima de tudo, pela atenção em todos os atendimentos concedidos.

Ao Laboratório Master - Meteorologia Aplicada aos Sistemas de Tempo Regionais do IAG /USP – Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo / Departamento de Ciências Atmosféricas, por terem me cedido gentilmente os dados climáticos da cidade de Cuiabá - MT.

À Sra. Elza Liyoko Umino Kuniuchi da empresa *Casa da Cozinha*, pela gentileza em ceder sua loja para a realização da pesquisa experimental.

À *Ebone Climatizadores*, por disponibilizar o espaço para as medições de campo, em especial ao Víctor Vinhal (in memorian), pelo auxílio durante as medições.

Aos Engenheiros Marcus Vinícius Ciocci da empresa *Evafrío* e Marco Antônio Quatrochi da empresa *Stormist*, pela atenção e auxílio durante o levantamento das técnicas de Resfriamento Evaporativo.

Aos funcionários dos fabricantes de componentes de cobertura: *Isoeste*, *Onduline*, *Vencor* e *Helme isolantes*, por fornecer dados técnicos e orçamentários dos componentes avaliados;

À secretaria de Pós-Graduação e ao Departamento de Tecnologia da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da USP, em especial às secretárias Silvana Marques Takamatsu, Viviane Gonçalves Delmondes e Maria Lúcia Vieira, sempre atenciosas.

A todos aqueles que contribuíram de certa forma para a realização deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi avaliar o desempenho térmico, energético e econômico de coberturas em edificações comerciais de partido horizontal, na região de clima tropical continental, nas quais a vedação superior é o elemento mais exposto às condições ambientais externas. A avaliação se deu a partir de uma análise comparativa de diferentes soluções de projeto, considerando como parâmetro a temperatura do ar interno, as temperaturas superficiais internas e externas e a carga térmica de resfriamento, incluindo o custo do investimento inicial com material e mão-de-obra. Foram selecionadas amostras de diversas tipologias construtivas, com novos materiais e componentes existentes no mercado, cujo desempenho térmico ainda é pouco conhecido. Foram realizadas simulações computacionais no programa *Energy Plus*, cujos resultados demonstram com clareza quais os sistemas de cobertura que apresentam um melhor desempenho térmico e energético para a localidade. Além dos componentes avaliados, estudou-se a possibilidade de aplicar duas estratégias passivas de atenuação da carga térmica proveniente da cobertura, o resfriamento evaporativo por meio de aspersão de água na cobertura e o sombreamento por meio de telas de proteção. Constatou-se que algumas soluções de baixo custo atingem resultados semelhantes ou mesmo superiores às técnicas mais sofisticadas, assim como, por exemplo, as barreiras radiantes, que contribuem significativamente na redução da carga térmica interna, sem exigir investimentos iniciais muito elevados. Também foi possível comprovar que o sombreamento, além de ser mais econômico, na maioria das vezes é mais satisfatório para a atenuação das temperaturas internas em relação ao resfriamento evaporativo, para as condições ambientais locais. Ao final, foram disponibilizadas as alternativas de aplicação em coberturas e seus respectivos resultados quanto ao desempenho térmico e custo-benefício, visando orientar as decisões de projeto de coberturas para que as futuras edificações ofereçam melhores condições de conforto térmico aos usuários e a otimização do consumo energético devido à climatização artificial.

ABSTRACT

The aim of this research is to analyze the thermal, energy and economic performance of single-story commercial building roofs, in the continental tropical climate region of Brazil, in which the horizontal surface represents the greatest thermal gains. The evaluation was done by the comparative analysis among some design solutions, taken as parameters the internal air temperature, the surface internal and external temperatures and the cooling rate, including the construction costs for materials and labor. Different typologies with new building components and materials, whose thermal performance are still not well known, were selected. Computer simulations were done, using *Energy Plus* software, and the results showed the roof systems with the better thermal and energy performances for the local climate conditions. Not only the components were evaluated, but two passive cooling techniques aiming to minimize the heat flux through the roof: the evaporative cooling, with water springing over the roof, and the solar shading, using a kind of screen protection. It was showed that some low cost solutions allows similar or better results than expensive solutions, so as the radiant barrier, for example, that may reduce the heat flux through the roof, without high initial costs. It was confirmed that shading the roof is a more economic and more efficient solution to reduce the heat transfer by the roof than the evaporative cooling, for the local climate conditions. At the end, this work presents some options of roof systems with their thermal and energy performance, besides cost-benefit, to support roof building design, aiming to improve thermal comfort level for the users with less energy consumption by air conditioning.

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1: Cobertura metálica de Ginásio poliesportivo, em Cuiabá / MT.	40
Fig. 2: Cobertura sombreada por lâminas de madeira, em edifício do Centro de Pesquisas da Comissão Européia, Em Ispra – Itália.....	40
Fig. 3: Resfriamento Evaporativo sob coberturas da Expo'92, em Sevilha.....	41
Fig. 4: Trocas Térmicas durante o dia nas superfícies de cobertura plana.....	42
Fig. 5: Trocas Térmicas durante a noite nas superfícies de cobertura plana.....	42
Fig. 6: Sistema de Umidificação das coberturas.....	49
Fig. 7: Protótipo de Ensaio de Campo. (esq.) e Fig. 8: Resultados das temperaturas.....	49
Fig. 9: Protótipo com telha de material reciclado, com telha de aço galvanizado e Estação meteorológica CR10X, respectivamente.....	50
Fig. 10: Representação do aparato instrumental utilizado na pesquisa de mestrado de Caren Michels.....	51
Fig. 11: Protótipo de edificação com cobertura ajardinada	52
Fig. 12: Composição da embalagem TetraPak.....	53
Fig. 13: Gráfico fornecido pelo Software RSPT – Performance of Radiative and Evaporative Cooling Techniques Systems on Roofs,	56
Fig. 14: Construção com cobertura abobadada, composta de terra vulcânica, algas, cana e estrutura de madeira.	60
Fig. 15: Estrutura de madeira com recobrimento de folhas e galhos.	60
Fig. 16: Diversas manifestações de arquitetura vernacular na África e Ásia.	61
Fig. 17 (esq.) e Fig. 18 (dir.): Lascas de pedra, nas <i>Malghes</i> ; e arquitetura circular em pedra, os <i>Nuraghis</i>	62
Fig. 19: Casa de Engenho do séc. XVI (esq.).	62
Fig. 20: Casarão antigo em São Paulo (dir.).....	62
Fig. 21 (esq.) e Fig. 22 (dir.): Aldeia e habitação indígena, respectivamente, do alto do Xingu, no nordeste de Mato Grosso.	63
Fig. 23 e Fig. 24: Projetos de Severiano Porto: Sua Casa, em Manaus, 1971 (esq.) e Centro de Proteção Ambiental de Balbina, 1983 (dir).	64
Fig. 25 (esq.) e Fig. 26 (dir.): O beiral quebrado: Muito utilizado em climas chuvosos e com radiação solar intensa.	64
Fig. 27 e Fig. 28: Coberturas dos Shoppings Market Place, em São Paulo (esq.); e Flamboyant, em Goiânia (dir.).....	67

Fig. 29: Processos térmicos na superfície externa e interna de cobertura plana.....	70
Fig. 30 (esq.) e Fig. 31 (dir.): Santorini: Coberturas brancas e em forma de abóbada são características tradicionais na arquitetura grega.....	71
Fig. 32: Gráfico demonstra a influência da absorção solar, durante o dia, nas temperaturas do ar ambiente e das temperaturas superficiais da cobertura	71
Fig. 33: Cobertura sombreada parcialmente por lâminas de madeira, na Itália.	72
Fig. 34: Fibras Minerais	73
Fig. 35: Aplicação de espuma para isolamento de cobertura.	73
Fig. 36 e Fig. 37: Residência em Pinheiros -SP: Exemplo de aplicação equivocada da barreira radiante	74
Fig. 38: Edificações com massa térmica, em Santorini (Grécia).....	75
Fig. 39 e Fig. 40: Princípio básico do resfriamento por meio de radiadores, à noite, e durante o dia....	77
Fig. 41 e Fig. 42: “Trickle Roof”: Água escorre sobre a cobertura, é resfriada a noite e armazenada em tanques.....	77
Fig. 43 e Fig. 44: Modelo de radiador à base de ar	78
Fig. 45: Resfriamento direto na World Expo, Sevilha – Espanha.....	80
Fig. 46: Aspersão d’água sob cobertura, em espaços abertos – 1992 World Expo, Sevilha – Espanha	80
Fig. 47: Resfriamento direto na World Expo, Sevilha - Espanha.	80
Fig. 48: Resfriamento de superfícies por meio de aspersão d’água.	80
Fig. 49: Resfriamento por meio de tanques d’água em coberturas, período diurno e noturno, respectivamente.	82
Fig. 50: Etapas da instalação experimental do tanque d’água com sistema de aspersão de água, em Almeria, Espanha.....	82
Fig. 51: Diferença de pressão e ventilação por meio de aberturas em coberturas.	83
Fig. 52 e Fig. 53: Edifício com átrio central e aberturas na cobertura.	84
Fig. 54: “A la catalana”: coberturas ventiladas tradicionais na região da Cataluña, Espanha.....	84
Fig. 55: Duto de ar, com resfriamento evaporativo, convectivo, isolamento e barreira radiante.....	85
Fig. 56: Hospital Sarah Kubitschek - RJ	85
Fig. 57: Residência com cobertura verde.	86
Fig. 58 e Fig. 59: Cobertura “verde” do Edifício Sede da Prefeitura do Município de São Paulo, no centro da cidade.	88
Fig. 60: Hotel Fairmont Waterfront, em Vancouver.....	89

Fig. 61: Cobertura ajardinada de edifício em Toronto.....	89
Fig. 62 e Fig. 63: Vista da área central de São Paulo.....	91
Fig. 64: Vista da região Central de São Paulo.....	92
Fig. 65: Bairro da Bexiga e Bela Vista: região mais densa da cidade.....	92
Fig. 66: Ocupação do solo no município de São Paulo.....	92
Fig. 67: Mapa das temperaturas superficiais de SP.....	92
Fig. 68: Vista aérea do centro de São Paulo como está hoje.....	93
Fig. 69: uma simulação de como poderia ser diferente aplicando-se vegetação em suas superfícies..	93
Fig. 70 e Fig. 71: Uso predominante de telhas metálicas, cimento-amianto e laje de concreto, em São Paulo (SP).	94
Fig. 72: Mapa do Brasil e imagem da cidade de Cuiabá-MT.	101
Fig. 73 e Fig. 74: Vistas da cidade de Cuiabá – MT.	102
Fig. 75: Classificação climática para Cuiabá – MT, segundo Mahoney.....	103
Fig. 76: Distribuição da temperatura ao longo do ano.	103
Fig. 77: Variação da temp. (esq.) e umidade (dir.) para setembro.....	104
Fig. 78: Distribuição mensal e em 24 h de precipitação em Cuiabá.	104
Fig. 79: Distribuição mensal de insolação e nebulosidade em Cuiabá.	104
Fig. 80: Carta bioclimática demonstrando a necessidade de cada estratégia para obtenção do conforto.	105
Fig. 81: Quadro de estratégias de conforto para Cuiabá, adaptada para as condições brasileiras, segundo Givoni.....	105
Fig. 82: Estação do Aeroporto Marechal Rondon.....	107
Fig. 83: 9º Distrito de Meteorologia (Inmet).....	107
Fig. 84: Estação da UFMT.	108
Fig. 85: Telha tipo sanduíche, com lâmina externa de aço pré-pintado.....	110
Fig. 86 e Fig. 87: Cobertura de cobre (esq.) e aço galvanizado (dir).....	110
Fig. 88 e Fig. 89: Sedes industriais com coberturas em telhas de fibra vegetal, na Turquia (dir) e Espanha.	111
Fig. 90 e Fig. 91: Coberturas Têxteis no aeroporto de Recife (PE) e na Universidade de Caxias do Sul (RS), respectivamente.	113
Fig. 92: Canteiro experimental <i>Domingos Bataglia</i> da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAU USP).....	113

Fig. 93: Cobertura de vidro do Aeroporto de Recife – PE.....	114
Fig. 94: Aeroporto de Maceió – AL.	114
Fig. 95: O Projeto Éden, em Cornwall, Inglaterra.	115
Fig. 96: Estádio Allianz Arena, em Munique – Alemanha:	116
Fig. 97: O “Water Cube”, em Pequim e a malha tridimensional das bolhas de ETFE.....	116
Fig. 98: Escola <i>Classroom of the Future</i> , Londres.....	117
Fig. 99: Poliestireno extrudado	119
Fig. 100: Diferentes tipos de materiais isolantes.....	119
Fig. 101: Vermiculita em várias classificações, conforme granulometria.	120
Fig. 102: As telhas sanduíches recebem lã de rocha; de vidro ou ainda espumas plásticas no miolo entre duas lâminas.....	121
Fig. 103: Diferentes composições das barreiras radiantes, conhecidas como “foil de alumínio”.	122
Fig. 104: Demonstração de como as barreiras radiantes são aplicadas equivocadamente do lado externo da cobertura, em São Paulo.	123
Fig. 105: Vista aérea da avenida Rubens de Mendonça (CPA).	124
Fig. 106 : Cruzamento das Av. Rubens de Mendonça e Miguel Sutil	124
Fig. 107: Trecho da Av. Tenente Coronel Duarte	124
Fig. 108: Trecho da Av. Miguel Sutil	124
Fig. 109: Vista aérea de um trecho da Av. Carmindo de Campos	125
Fig. 110: Avenida Fernando Correia da Costa.....	125
Fig. 111 e Fig. 112: Vistas aéreas de Cuiabá - MT, em julho de 2007.	126
Fig. 113: Vista aérea de Várzea Grande, cidade vizinha de Cuiabá.....	126
Fig. 114: Vista aérea das cidades de Cuiabá e Várzea Grande (MT), separadas pelo rio Cuiabá, em dezembro de 2007.	126
Fig. 115: Cobertura metálica convencional, com exaustores, no Shopping popular – camelódromo, localizado na av. Carmindo de Campos.	127
Fig. 116: Cobertura metálica projetada para a saída de ar quente e iluminação natural, em galeria comercial.	127
Fig. 117: Cobertura metálica intercalada com chapas translúcidas.....	127
Fig. 118: Galpões na Av. Miguel Sutil - Coberturas metálicas com exaustores.....	128
Fig. 119: Edificação religiosa, com cúpula metálica.....	128
Fig. 120: Cobertura metálica (com forro) do hospital Santa Rosa	128
Fig. 121: Telhas metálicas com forro isolante, intercaladas com telhas translúcidas no supermercado	

MAKRO.....	129
Fig. 122: Cobertura de telha metálica isolante com enchimento em poliestireno expandido, em galpão comercial na av. Barão de Melgaço.....	129.
Fig. 123: Ginásio poliesportivo, no bairro Verdão, com cobertura curva	129
Fig. 124: Secretaria de Fazenda do Estado de Mato Grosso	130
Fig. 125: Edifício novo do Instituto de Educação da UFMT – Cobertura com telha metálica simples e forro.	130
Fig. 126: Universidade de Cuiabá – UNIC	130
Fig. 127: Faculdade de Tecnologia e Engenharias da Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT, respectivamente.	131
Fig. 128: Tribunal de Contas da União: Cobertura metálica ondulada, com sistemas de aberturas, projeto do arq. Lelé.....	131
Fig. 129: SEMA - Secretaria do Meio Ambiente, cobertura metálica sextavada, com sistema de ventilação.....	131
Fig. 130 e Fig. 131: Assembléia Legislativa e Moitará Sebrae Center, respectivamente: telhas metálicas.	132
Fig. 132: Parte das instalações do Detran – cobertura com telha metálica simples	132
Fig. 133: Cobertura do Fórum de Cuiabá	132
Fig. 134: Fórum de Cuiabá: Cobertura atirantada, ora metálica ora translúcida.....	133
Fig. 135: Vistas internas da cobertura metálica do Fórum de Cuiabá.....	133
Fig. 136: Cobertura com grama sintética para circulação vertical, no CPA	133
Fig. 137: Shopping Goiabeiras: Cobertura metálica sem isolante e alto consumo de energia elétrica com o sistema de ar condicionado.....	134
Fig. 138: Shopping Três Américas: telhas metálicas simples.....	134
Fig. 139: Shopping Pantanal: O mais recente shopping da cidade.....	134
Fig. 140: Hobo	136
Fig. 141: Globo pintado de cinza	136
Fig. 142: Anemômetro.	136
Fig. 143: Bússula.	137
Fig. 144: termômetro infravermelho.....	137
Fig. 145: Fachada frontal (NE) do galpão 01, com edifícios adjacentes	139
Fig. 146: Imagem Aérea do entorno do galpão 01.....	139

Fig. 147: Planta Baixa do Galpão 01 – Térreo e Mezanino	141
Fig. 148: Corte do Galpão.....	141
Fig. 149: Imagens internas do estabelecimento.....	141
Fig. 150: Ponto 01 de medição (térreo) do galpão 01.....	142
Fig. 151: Ponto 02 de medição (mezanino) do galpão 01.....	142
Fig. 152: Vistas da fachada frontal do galpão 02 com entorno.	144
Fig. 153: Imagem aérea do entorno do galpão 02 e vista aproximada	145
Fig. 154: Telha com isolamento térmico do fabricante ISOESTE	146
Fig. 155: Subsolo/garagem.....	146
Fig. 156: Piso cimentado	146
Fig. 157: Janela no térreo com folhas de correr de vidro comum transparente.	146
Fig. 158: Planta Baixa do Galpão 02.	146
Fig. 159: Corte do Galpão 02.....	147
Fig. 160: Ponto de medição do galpão 02.....	147
Fig. 161: Sala de gerência	149
Fig. 162: Interligação da sala de gerência com o espaço do galpão: janela e porta constantemente abertas.....	149
Fig. 163: Vista do forro com luminárias.....	149
Fig. 164: Ponto interno de medição no galpão 02: próximo à fachada NW.	150
Fig. 165: Vista da cobertura, do local de onde se teve acesso.	152
Fig. 166: Primeira opção de zoneamento do térreo.	170
Fig. 167: Zoneamento definitivo do galpão: zonas 01, 02, 04, 05 e 06 - térreo.	171
Fig. 168: Planta do Galpão com zona 03 – subsolo.....	171
Fig. 169: Corte esquemático indicando as 06 (seis) zonas.	171
Fig. 170: Imagem tridimensional das zonas no galpão	172
Fig. 171: Superfícies de transferência de calor, do galpão 02.	173
Fig. 172: Tela do <i>IDF editor</i>	175
Fig. 173: Dados no campo <i>Simulation parameters / Building</i> , do <i>IDF Editor</i>	176
Fig. 174: Dados do local, no campo <i>Location - Climate - Weather File Access / Location</i> , do <i>IDF Editor</i>	176
Fig. 175: Dados do dia de projeto com as características climáticas do dia 28.06.2007 - <i>Climate</i> -	

<i>Weather File Access / DesignDay, do IDF Editor</i>	177
Fig. 176: Dados no <i>Surface Construction Elements//Material:Regular</i> ,	178
Fig. 177: Dados no <i>Surface Construction Elements/Material:Reg.-R</i> ,	178
Fig. 178: <i>Surface Construction Elements / Material:Air</i>	179
Fig. 179: Dados no <i>Surface Construction Elements / Material:WindowGlass</i>	179
Fig. 180: Dados no <i>Surface Construction Elements / Construction</i>	180
Fig. 181: Dados no <i>Thermal Zone Description / Geometry / Zone</i>	180
Fig. 182: Dados no <i>Thermal Zone Description / Geometry / Zone</i>	181
Fig. 183: Dados no <i>Thermal Zone Description / Geometry / SurfaceGeometry</i>	182
Fig. 184: Planta do galpão, com a classificação dos tipos de superfícies.....	182
Fig. 185 : Dados do <i>Schedules / Schedule Type</i>	185
Fig. 186: Configuração dos <i>Schedules / Schedule Compact</i>	185
Fig. 187: Continuação da Configuração dos <i>Schedules / Schedule Compact</i>	186
Fig. 188: Dados de ocupação, no item <i>Internal Gains/People</i> ,	186
Fig. 189: Dados de iluminação - item <i>Internal Gains / Lights</i>	187
Fig. 190: Carga de equipamentos editadas no item <i>Internal Gains / Electric Equipment</i>	187
Fig. 191: Dados da ventilação no item <i>AirFlow / Ventilation</i>	188
Fig. 192: Dados da ventilação no item <i>AirFlow / Ventilation</i>	188
Fig. 193: Configuração dos dados de saída	189
Fig. 194: Tela do <i>EP-Launch</i>	190
Fig. 195: Exemplo de aplicação da tela de proteção solar e a variedade de telas disponíveis no mercado.....	211
Fig. 196: Sistema de dutos e aspersores instalados na cobertura, com detalhe do sprinkler.....	212
Fig. 197: Painel de comando e vista do Reservatório, bomba, filtro e registros.....	212

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Resultado da medição de inverno no galpão 01/Ponto 01	153
Gráfico 2 - Temperaturas internas e externas em °C, do galpão 01/Ponto 01, dia 22.06.2007	153
Gráfico 3 - Temperaturas internas e externas em °C, do galpão 01/Ponto 01, 28.06.2007	154
Gráfico 4 - Temperatura do ar interno, temperatura radiante e temperatura do ar externo, em °C, Galpão 01/Ponto01, dias 21, 22 e 23.06.2007	154
Gráfico 5 - Temperatura do ar interno, temperatura radiante e temperatura do ar externo, em °C, Galpão 01/Ponto01, dias 27, 28 e 29.06.2007	155
Gráfico 6 - Resultado da medição de inverno no galpão 01/Ponto 02	156
Gráfico 7-Temperatura do ar interno, temperatura radiante e temperatura do ar externo em °C, galpão 01/Ponto 02, dia 22.06.2007	157
Gráfico 8 - Temperatura do ar interno, temperatura radiante e temperatura do ar externo em °C, galpão 01/ponto02, dia 28.06.2007	157
Gráfico 9 - Temperatura do ar interno, temperatura radiante e temperatura do ar externo, em °C, galpão 01/Ponto 02, Dias 21, 22 e 23.06.2007	157
Gráfico 10 - Temperatura do ar interno, temperatura radiante e temperatura do ar externo, em °C ,galpão 01/Ponto 02, Dias 27, 28 e 29.06.2007	158
Gráfico 11 - Resultado da medição de inverno (período completo) no galpão 02	160
Gráfico 12 - Temperaturas superficiais internas e externas, temperaturas do ar internas e externas e temperatura radiante média, galpão 02, dia 22.06.2007	161
Gráfico 13 - Temperaturas superficiais internas e externas, temperaturas do ar internas e externas e temperatura radiante média, galpão 02, dia 28.06.2007	161
Gráfico 14 - Temperaturas internas do ar, radiantes e externas do ar, em °C, Galpão 02, dias 21, 22 e 23.06.2007	162
Gráfico 15 - temperaturas internas do ar, radiantes e externas do ar, em °C, Galpão 02, dias 27, 28 e 29.06.2007	162
Gráfico 16 - Temperaturas do ar interno, em °C: medidas e simuladas.....	192
Gráfico 17 - Temperaturas radiantes, em °C: medidas e simuladas.....	193
Gráfico 18 - Temperaturas superficiais internas e externas, em °C: medidas e simuladas	195
Gráfico 19 - Temperaturas do ar externo, em °C: medidas e simuladas.....	195
Gráfico 20 - Carga Térmica de resfriamento para a telha isolante tipo sanduíche, para os 03 dias de referência avaliados	221
Gráfico 21 - Temperatura superficial externa em °C, para a telha Isolante tipo sanduíche, para os 03 dias de referência avaliados.....	222

Gráfico 22 - Temperatura superficial interna em °C , para a telha Isolante tipo sanduíche, para os 03 dias de referência avaliados.....	222
Gráfico 23 - Temperatura do ar interno – tbs em °C,para a telha Isolante tipo sanduíche, para os 03 dias de referência avaliados.....	222
Gráfico 24 - Carga térmica de resfriamento para a telha asfáltica, nas 04 variações, em março (período úmido).....	223
Gráfico 25 - Carga Térmica de resfriamento para a telha asfáltica, nas 04 variações, em julho (período seco).....	223
Gráfico 26 - Carga térmica de resfriamento para a telha asfáltica, nas 04 variações, em outubro (período mais quente).....	224
Gráfico 27 - Temperatura superficial externa em °C ,para a telha asfáltica, nas 04 variações, em março (período úmido).....	224
Gráfico 28 - Temperatura superficial externa em °C ,para a telha asfáltica, nas 04 variações, em julho (período seco).....	224
Gráfico 29 - Temperatura superficial externa em °C para a telha asfáltica, nas 04 variações, em outubro (período mais quente).....	225
Gráfico 30 - Temperatura superficial interna em °C , para a telha asfáltica, nas 04 variações, em março (período seco).....	225
Gráfico 31 - Temperatura superficial interna em °C, para a telha asfáltica, nas 04 variações, em julho (período seco).....	225
Gráfico 32 - Temperatura superficial interna em °C, para a telha asfáltica, nas 04 variações, em outubro (período mais quente).....	226
Gráfico 33 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha asfáltica, nas 04 variações, em março (período úmido).....	226
Gráfico 34 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha asfáltica, nas 04 variações, em julho (período seco).....	226
Gráfico 35 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha asfáltica, nas 04 variações, em outubro (período mais quente).....	227
Gráfico 36 - Carga térmica de resfriamento para a telha orgânica, nas 04 variações, em março (período úmido).....	227
Gráfico 37 - Carga térmica de resfriamento para a telha orgânica, nas 04 variações, em julho (período seco).....	227
Gráfico 38 - Carga térmica de resfriamento para a telha orgânica, nas 04 variações, em outubro (período mais quente).....	228
Gráfico 39 - Temperatura superficial externa em °C, para a Telha Orgânica, nas 04 variações, em março (período úmido).....	228

Gráfico 40 - Temperatura superficial externa em °C, para a telha orgânica, nas 04 variações, em julho (período seco)	228
Gráfico 41 - Temperatura superficial externa em °C, para a telha orgânica, nas 04 variações, em outubro (período mais quente)	229
Gráfico 42 - Temperatura superficial interna em °C, para a telha orgânica, nas 04 variações, em março (período seco)	229
Gráfico 43 - Temperatura superficial interna em °C, para a telha orgânica, nas 04 variações, em julho (período seco)	229
Gráfico 44 - Temperatura superficial interna em °C, para a telha orgânica, nas 04 variações, em outubro (período mais quente)	230
Gráfico 45 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha orgânica, nas 04 variações, em março (período úmido)	230
Gráfico 46 - Temperatura do ar interno - tbs em °C, para a telha orgânica, nas 04 variações, em julho (período seco)	230
Gráfico 47 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha orgânica, nas 04 variações, em outubro (período mais quente)	231
Gráfico 48 - Carga térmica de resfriamento para a telha metálica simples com forro de pvc, nas 04 variações, em março (período úmido)	231
Gráfico 49 - Carga Térmica de resfriamento para a Telha metálica simples com forro de pvc, nas 04 variações, em julho (período seco)	231
Gráfico 50 - Carga térmica de resfriamento para a telha metálica simples com forro de pvc, nas 04 variações, em outubro (período mais quente)	232
Gráfico 51 - Temperatura superficial externa em °C, para a telha metálica simples com forro de pvc, nas 04 variações, em março (período úmido)	232
Gráfico 52 - Temperatura superficial externa em °C, para a telha metálica simples com forro de pvc, nas 04 variações, em julho (período seco)	232
Gráfico 53 - Temperatura superficial externa em °C, para a telha metálica simples com forro de pvc, nas 04 variações, em outubro (período mais quente)	233
Gráfico 54 - Temperatura superficial interna em °C, para a telha metálica simples com forro de pvc, nas 04 variações, em março (período seco)	233
Gráfico 55 - Temperatura superficial interna em °C, para a telha metálica simples com forro de pvc, nas 04 variações, em julho (período seco)	233
Gráfico 56 - Temperatura superficial interna em °C, para a telha metálica simples com forro de pvc, nas 04 variações, em outubro (período mais quente)	234
Gráfico 57 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha metálica simples com forro de pvc, nas 04 variações, em março (período úmido)	234

Gráfico 58 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha metálica simples com forro de pvc, nas 04 variações, em julho (período seco).....	234
Gráfico 59 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a Telha metálica simples com forro de pvc, nas 04 variações, em outubro (período mais quente)	235
Gráfico 60 - Carga Térmica de resfriamento para todas as tipologias de telhas avaliadas, em março (período úmido).....	235
Gráfico 61 - Carga Térmica de resfriamento para todas as tipologias de telhas avaliadas, em julho (período seco).....	236
Gráfico 62 - Carga Térmica de resfriamento para todas as tipologias de telhas avaliadas, em outubro (período mais quente).....	236
Gráfico 63 - Temperatura do ar interno - tbs em °C, para todas as tipologias de telhas avaliadas, em março (período úmido).....	237
Gráfico 64 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para todas as tipologias de telhas avaliadas, em julho (período seco)	237
Gráfico 65: Temperatura do ar interno – tbs em °C, para todas as tipologias de telhas avaliadas, em outubro (período mais quente).....	237
Gráfico 66 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha asfáltica marrom, nos 03 modelos, em março (período úmido)	243
Gráfico 67 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha asfáltica marrom, nos 03 modelos, em julho (período seco).....	243
Gráfico 68 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha asfáltica marrom, nos 03 modelos, em outubro (período mais quente)	243
Gráfico 69 - Temperatura do a interno – tbs em °C, para a telha metálica branca com forro de pvc, nos 03 modelos, em março (período úmido).....	244
Gráfico 70 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha metálica branca com forro de pvc, nos 03 modelos, em julho (período seco)	244
Gráfico 71 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha metálica branca com forro de pvc, nos 03 modelos, em outubro (período mais quente).....	244
Gráfico 72 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha asfáltica marrom, no modelo 01, em março (período úmido).....	245
Gráfico 73 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha metálica branca com forro de pvc, no modelo 01, em março (período úmido)	246
Gráfico 74 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha asfáltica marrom, no modelo 01, em março (período úmido).....	247
Gráfico 75 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha metálica branca com forro de pvc, no modelo 01, em março (período úmido).....	247

Gráfico 76 - Carga térmica diária de resfriamento (W) para a telha asfáltica marrom, nos modelos 02 e 03, em março, julho e outubro.....	248
Gráfico 77 - Temperatura do ar interno – tbs (°C), para a telha asfáltica marrom, nos modelos 02 e 03, em março (período úmido).....	249
Gráfico 78 - Temperatura do ar interno – tbs (°C), para a telha asfáltica marrom, nos modelos 02 e 03, em julho (período seco)	249
Gráfico 79 - Temperatura do ar interno - tbs (°C), para a telha asfáltica marrom, nos modelos 02 e 03, em outubro (período mais quente).....	249
Gráfico 80 - Carga térmica diária de resfriamento (W) para a telha metálica branca com forro de pvc, nos modelos 02 e 03, em março, julho e outubro.....	250
Gráfico 81 - Temperatura do ar interno - (°C), para a telha metálica branca com forro de pvc, nos modelos 02 e 03, em março (período úmido)	250
Gráfico 82 - Temperatura do ar interno – tbs (°C), para a telha metálica branca com forro de pvc, nos modelos 02 e 03, em julho (período seco)	250
Gráfico 83 - Temperatura do ar interno – tbs (°C), para a telha metálica branca com forro de pvc, nos modelos 02 e 03, em outubro (período mais quente).....	251
Gráfico 84 - Carga térmica diária de resfriamento (W) para a telha asfáltica marrom, nos modelos 02 e 03, em março, julho e outubro.....	252
Gráfico 85 - Temperatura do ar interno – tbs (°C), para a telha asfáltica marrom, nos modelos 02 e 03, em março (período úmido).....	252
Gráfico 86 - Temperatura do ar interno – tbs (°C), para a telha asfáltica marrom, nos modelos 02 e 03, em julho (período seco)	253
Gráfico 87 - Temperatura do ar interno – tbs (°C), para a telha asfáltica marrom, nos modelos 02 e 03, em outubro (período mais quente).....	253
Gráfico 88 - Carga térmica diária de resfriamento (W) para a telha metálica branca com forro de pvc, nos modelos 02 e 03, em março, julho e outubro.....	256
Gráfico 89 - Temperatura do ar interno – tbs (°C), para a telha metálica branca com forro de pvc, nos modelos 02 e 03, em março (período úmido).....	257
Gráfico 90 - Temperatura do ar interno – tbs (°C), para a telha metálica branca com forro de pvc, nos modelos 02 e 03, em julho (período seco)	257
Gráfico 91 - Temperatura do ar interno – tbs (°C), para a telha metálica branca com forro de pvc, nos modelos 02 e 03, em outubro (período mais quente).....	257

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Temperaturas máximas e mínimas absolutas das capitais brasileiras	98
Tabela 2 - Estações meteorológicas e bases de dados.....	106
Tabela 3 - Equipamentos utilizados na medição.....	136
Tabela 4 - Dimensões do galpão 01	140
Tabela 6 - Carga térmica – Ocupação do galpão 01	143
Tabela 7 - Carga térmica – Iluminação do galpão 01	143
Tabela 8 – Dimensões do Galpão 02.....	145
Tabela 9 – Materiais e componentes do Galpão 02.....	145
Tabela 10 - Carga térmica – Ocupação do Galpão 02.....	148
Tabela 11 – Carga térmica – Equipamentos do Galpão 02	148
Tabela 12 – Carga térmica – Iluminação do Galpão 02 / Loja	149
Tabela 13 - Temperaturas obtidas - Galpão 01 / Ponto 01, dias 22 e 28.06.2007	153
Tabela 14 – Temperaturas obtidas - Galpão 01 / Ponto 02, dias 22 e 28.06.2007	156
Tabela 15 – Temperaturas obtidas - Galpão 02.....	160
Tabela 16 - Principais variáveis nos 3 pontos medidos no inverno.....	163
Tabela 17 - Tipos de superfícies.....	182
Tabela 18 - Temperaturas do ar interno: medidas e simuladas	192
Tabela 19 - Temperaturas radiantes: medidas e simuladas	193
Tabela 20 - Temperaturas superficiais internas e externas: medidas e simuladas.....	195
Tabela 21 - Temperaturas externas do ar: medidas e simuladas	196
Tabela 22 - Característica dos modelos	202
Tabela 23 - Combinações de componentes para a etapa 01	213
Tabela 24 - Combinações para a etapa 02.....	215
Tabela 25 - Combinações para a etapa 03 - Sombreamento	216
Tabela 26 - Combinações para a etapa 03 – Resfriamento Evaporativo.....	217
Tabela 27 – Custo-benefício para a Telha asfáltica marrom (M01 – 300m ²).....	240
Tabela 28 – Custo-benefício de intervenções na Telha orgânica vermelha.....	240
Tabela 29 - Custo-benefício de intervenções na Telha metálica com forro de pvc	240

Tabela 30 - Custo dos materiais e mão-de-obra, para outubro/2008.....	241
Tabela 31 – Custo x benefício dos sistemas de cobertura	241
Tabela 32 - Comparação entre o resfriamento evaporativo e o sombreamento, para a Telha asfáltica marrom, baseando-se na redução da tbs (°C)	254
Tabela 33 - Comparação entre o resfriamento evaporativo e o sombreamento, para a Telha asfáltica marrom, baseando-se na redução da carga térmica (W)	254
Tabela 34 - Relação custo-benefício das estratégias avaliadas	255
Tabela 35 - Retorno financeiro do investimento.....	256
Tabela 36 - Comparação entre o resfriamento evaporativo e o sombreamento, para a Telha metálica simples branca com forro de pvc, baseando-se na redução da tbs (°C).....	258
Tabela 37 - Comparação entre o resfriamento evaporativo e o sombreamento, para a Telha metálica simples branca com forro de pvc, baseando-se na redução da carga térmica (W)	259
Tabela 38 - Comparação entre os resultados de carga térmica (kW) obtidos com o sombreamento e a aplicação de barreira radiante, para a Telha Asfáltica marrom.	259

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA - Architectural Association Graduate School

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (EUA)

BEN- Balanço Energético Nacional

EERE - Eficiência Energética e Energia Renovável

DCLG - Department for Communities and Local Government

DOE - Department of Energy / USA

FAPEMAT - Fundação de Amparo à pesquisa do estado de Mato Grosso

FAPESP - Fundação de Amparo à pesquisa do estado de São Paulo

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IAG USP - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP.

IEA - International Energy Agency

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

LABAUT - Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética

LABEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações

MASTER - Meteorologia Aplicada aos Sistemas de Tempo Regionais

PVC – poli cloreto de vinila

EPS - Poliestireno expandido

UFMT – Universidade Federal de Mato Grosso

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

USP - Universidade de São Paulo

SWERA - Solar and Wind Energy Resource Assessment

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$ - graus Celcius

gm/m^3 – miligramas por metro cúbico

e - espessura

h – hora

$\text{m} / \text{cm} / \text{mm}$ – metro / centímetro / milímetro

m^2 - metro quadrado

m^3 - metro cúbico

m/s - metros por segundo

$\text{N} / \text{S} / \text{E} / \text{W}$ – norte / sul / leste / oeste

t_r - temperatura média radiante em $^{\circ}\text{C}$;

t_g - temperatura de globo em $^{\circ}\text{C}$;

t_{bs} - temperatura de bulbo seco em $^{\circ}\text{C}$;

un - unidade

v_a - velocidade do ar em m/s .

W – watt

c – calor específico, em $\text{Wh}/\text{Kg}\text{-}^{\circ}\text{C}$

α – Coeficiente de Absorção

λ – Condutibilidade, em $\text{W}/\text{m } ^{\circ}\text{C}$

U – Coeficiente Global de Transmitância Térmica, em $\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$

d – Densidade, em Kg/m^3

Str – Fator Solar

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	06
RESUMO	07
ABSTRACT	08
LISTA DE FIGURAS	14
LISTA DE GRÁFICOS.....	19
LISTA DE TABELAS.....	21
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	22
LISTA DE SÍMBOLOS	23

PARTE 01 - INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1. INTRODUÇÃO	27
1.1. Colocação do Problema e Justificativa da pesquisa.....	27
1.2. Objeto de estudo	29
1.3. Objetivos da dissertação	29
1.4. Metodologia.....	30
1.5. Estrutura do trabalho.....	36
2. REFERÊNCIAS ANTERIORES	39
2.1. O desempenho térmico dos edifícios na região de clima tropical continental.....	42
2.2. A função de proteção e seletividade da Cobertura.....	44
2.3. Modelos matemáticos para avaliação de desempenho térmico de coberturas	54
2.4. Panorama atual e considerações finais.....	56
3. TIPOLOGIAS DE COBERTURAS: UMA ABORDAGEM HISTÓRICA	59
3.1. Revisão da arquitetura vernacular.....	59
3.2. Características da arquitetura vernacular de Cuiabá - MT	65
3.3. O avanço tecnológico das coberturas	66
4. TROCAS TÉRMICAS EM COBERTURAS.....	69
4.1. Estratégias de proteção.....	69
4.1.1. Controle Solar.....	70
4.1.2. Isolamento Térmico	72
4.1.3. Capacidade Térmica.....	75
4.2. Estratégias de resfriamento complementares (Seletividade).....	75
4.2.1. Resfriamento Radiante	76
4.2.2. Resfriamento Evaporativo.....	79
4.2.3. Resfriamento Convectivo.....	82

4.2.4.	Plantio (Tetos verdes).....	86
5.	A RELAÇÃO DAS COBERTURAS COM O AMBIENTE URBANO.....	91

PARTE 02 - LEVANTAMENTO DE DADOS PRIMÁRIOS E SECUNDÁRIOS

6.	CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA.....	97
6.1.	O Clima Brasileiro.....	97
6.2.	Características do Clima Tropical Continental.....	99
6.3.	A escolha do local	101
6.4.	Características geográficas de Cuiabá.....	101
6.5.	Registro de dados climáticos.....	106
7.	COMPONENTES DE COBERTURA E SUBCOBERTURA.....	109
7.1.	Materiais utilizados em coberturas	109
7.2.	Materiais utilizados em subcoberturas	117
7.2.1.	Isolantes Resistivos	118
7.2.2.	Isolantes Refletivos e Barreiras Radiantes	121
7.3.	Coberturas e subcoberturas mais usuais na região de estudo.....	123
8.	MEDIÇÕES DE CAMPO.....	135
8.1.	Método	135
8.2.	Equipamentos utilizados.....	136
8.3.	Períodos de medição.....	137
8.4.	Galpões estudados.....	138
8.4.1.	Galpão 01	138
8.4.2.	Galpão 02	144
8.5.	Considerações quanto ao procedimento de medição:.....	150
8.5.1.	Quanto à disposição dos equipamentos.....	150
8.5.2.	Quanto à medição do vento.....	151
8.5.3.	Quanto à medição da temperatura superficial	151
8.6.	Resultados obtidos e análise geral.....	152
8.6.1.	Resultados – galpão 01 / ponto 01	153
8.6.2.	Resultados – galpão 01 / ponto 02	156
8.6.3.	Resultados – galpão 02.....	160
9.	FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS DE SIMULAÇÃO TÉRMICA E ENERGÉTICA	165
9.1.	Introdução e escolha da ferramenta.....	165
9.2.	O Programa Computacional Energy Plus.....	167
9.3.	Simulação para treinamento do programa.....	169
9.4.	Considerações finais	196

PARTE 03 - SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E CONCLUSÕES

10. MÉTODO EXPERIMENTAL PARA AS SIMULAÇÕES	201
10.1. Definição dos modelos	201
10.2. Seleção dos componentes de cobertura e subcobertura	206
10.2.1. Telha isolante tipo sanduíche (C01)	206
10.2.2. Telha Asfáltica (C02)	207
10.2.3. Telha de fibras orgânicas vegetais (C03)	208
10.2.4. Telha metálica simples com forro de PVC (C04)	209
10.2.5. Componente de subcobertura	210
10.3. Estratégias adotadas para atenuar a carga térmica	210
10.3.1. Sombreamento	210
10.3.2. Resfriamento Evaporativo.....	211
10.4. Etapas de simulação	213
10.4.1. Etapa 01: Avaliação de componentes de cobertura e subcobertura.....	213
10.4.2. Etapa 02: Avaliação da influência da carga térmica interna, da ventilação natural e das dimensões do modelo.....	214
10.4.3. Etapa 03: Avaliação das estratégias de atenuação da carga térmica.....	216
10.5. Procedimento de simulação	217
10.5.1. Metodologia adotada para avaliação do resfriamento evaporativo no Energy Plus...218	
11. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	221
11.1. Etapa 01	221
11.2. Etapa 02	242
11.2.1. Influência da geometria do edifício	242
11.2.2. Influência da carga interna.....	245
11.2.3. Influência da ventilação natural	246
11.3. Etapa 03	248
11.3.1. Resfriamento Evaporativo.....	248
11.3.2. Sombreamento	252
12. CONSIDERAÇÕES FINAIS	261
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	265
APÊNDICE E ANEXOS	279
APÊNDICE A: Planilha de cálculo para o resfriamento evaporativo.....	281
ANEXO A: Arquivo <i>Audit</i> fornecido pelo <i>Energy Plus</i> , da simulação do componente C01 (telha isolante) da primeira etapa das simulações	283
ANEXO B: Teste de fator de forma.....	295

PARTE 01

*Introdução e
fundamentação teórica*

1. INTRODUÇÃO

1.1. Colocação do Problema e Justificativa da pesquisa

A temperatura interna de uma edificação depende dos parâmetros climatológicos externos da envoltória e das cargas internas, tais como as atividades humanas, iluminação artificial e equipamentos existentes. Estes parâmetros interagem entre si e com a edificação, por meio das envoltórias, onde ocorrem os fenômenos de transferência de calor.

Em cidades de clima tropical, as edificações ficam expostas à radiação solar intensa e às elevadas temperaturas do ar e superficiais, podendo resultar em ambientes internos desconfortáveis e de baixa eficiência energética. Para alcançar o conforto térmico é necessário controlar a carga térmica externa e, dependendo do grau de aquecimento, remover o excesso de calor no ambiente, buscando atingir condições adequadas para a atividade e o bem estar humano. É na etapa inicial do projeto de arquitetura que se deve buscar soluções que visam a proteção em relação ao ambiente externo, por meio da orientação do edifício, do uso de materiais adequados e tecnologias passivas e/ou de baixo consumo de energia para o condicionamento ambiental, entre outras preocupações recorrentes.

No que diz respeito às envoltórias, a cobertura é o principal componente responsável pelo aumento da carga térmica no ambiente construído, principalmente em edificações predominantemente horizontais, onde este elemento representa a maior área exposta ao meio exterior e durante maior período ao longo do dia. Segundo Mascaró (s/d), da quantidade de calor que chega numa edificação de um único andar, em latitudes baixas, cerca de 70% vêm pela cobertura, e 30% pelas fachadas, influenciando bastante no comportamento e no conforto térmico do ambiente.

Uma das soluções que têm sido adotadas para satisfazer as condições de conforto no interior das edificações é a climatização artificial. Porém, esta apresenta a desvantagem quanto à qualidade do ar (quando a manutenção deixa a desejar) e, principalmente, ao grande consumo de energia, refletindo em custos elevados para o usuário e na degradação do meio ambiente. Segundo dados do BEN-Balanco Energético Nacional (2003)¹, o setor dos edifícios é responsável por cerca de 24% do total do consumo de energia elétrica do país, excluindo-se o setor industrial. Do consumo total de energia elétrica, no ano de 2005, o setor industrial foi responsável por 46,7%, o residencial por 22,2%, o comercial por 14,3% e o público por 8,7% do consumo (BEN, 2006). No Brasil, segundo o Procel (1998), a iluminação e o ar condicionado são os grandes consumidores de energia no setor de edifícios comerciais e públicos, sendo o condicionamento de ambientes responsável, em média, por 50% da

¹ Disponível em: <ben.epe.gov.br>. Acesso em 12 de novembro de 2008. As publicações mais recentes não apresentam dados de consumo desagregado de energia por uso, para cada setor.

energia elétrica consumida em um edifício comercial típico. Esta parcela potencialmente pode ser minimizada pelos projetistas, por meio da utilização de tecnologias passivas, reduzindo-se o uso de tecnologias ativas e, conseqüentemente, o consumo para o condicionamento ambiental. O relatório *Indicadores de Desenvolvimento Sustentável 2008*, divulgado recentemente pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), aponta que os mecanismos de melhoria na eficiência no uso de energia ainda são incipientes. Segundo os dados apurados no decorrer de uma década, entre 1995 e 2006, o consumo de energia no País cresceu 37,37%, ante um avanço no PIB, de 31,46%. Ao longo do período é possível verificar que o índice de eficiência energética, medida a partir destes dois parâmetros, avançou apenas poucas casas decimais, de 0,84 tep (toneladas equivalentes de petróleo)/ R\$ 1 mil de crescimento no PIB, para 0,87.

O crescimento descontrolado da população e das cidades, aliado ao avanço tecnológico e aumento da produtividade nas últimas décadas, é responsável pelo aumento da demanda energética, que se agrava devido ao princípio equivocado da disponibilidade infinita dos recursos naturais, contribuindo assim para o atual panorama da crise energética mundial. Com a crise, a preocupação com os aspectos ambientais e de sustentabilidade na sociedade em geral tem levado ao desenvolvimento de novas tecnologias construtivas com menor impacto ambiental. Em especial, os projetistas e fabricantes de materiais de construção civil têm buscado novas alternativas no que se refere ao desempenho térmico de coberturas para climas quentes, como a ventilação do ático, o uso de materiais isolantes, de barreira à radiação e o uso da capacidade térmica da vedação horizontal.

Há diversas possibilidades de se reduzir o fluxo de calor através da cobertura, assim como, por exemplo, adotando-se a ventilação natural no ático das edificações, que reduz o fluxo de calor para o forro, pelo mecanismo da convecção que retira calor das telhas, reduzindo sua temperatura. A utilização de materiais isolantes, como o poliestireno expandido e a lã de vidro, reduz o fluxo de calor por condução. A barreira de radiação consiste de uma película de metal polido, de baixa emissividade, colocada abaixo das telhas, reduzindo a transferência de calor por radiação para o forro. Em coberturas pesadas pode-se utilizar a capacidade térmica da cobertura para controlar, através do retardo térmico, o fluxo de calor para o interior da edificação (BUENO, 1994).

Há uma série de trabalhos científicos que visam resolver os problemas de transferência de calor através da cobertura. Com a avaliação do comportamento térmico de novos materiais e dos fenômenos físicos decorrentes das estratégias de resfriamento aplicados no conjunto da cobertura, é possível uma melhor compreensão nos processos de transferência de energia que ocorrem numa edificação. Algumas iniciativas do governo, em parceria com entidades envolvidas com a questão energética, demonstram interesse nestes trabalhos, já que é mais viável e racional investir em pesquisa para a redução do consumo energético do que investir na geração de energia elétrica.

Cabe então aos profissionais da construção civil tomar medidas neste sentido, priorizando as estratégias passivas de projeto por meio da escolha dos materiais das envolventes, principalmente da cobertura, e de técnicas de resfriamento passivo e/ou de baixo consumo de energia. Uma vez

conhecidos os fenômenos físicos de trocas térmicas e as propriedades termofísicas dos materiais, é possível adequar a construção ao clima, propiciando um ambiente interno mais confortável com o mínimo de consumo energético. Estas medidas devem ser incorporadas ao projeto desde a fase de concepção arquitetônica, evitando posteriormente a necessidade de medidas corretivas, que nem sempre são igualmente satisfatórias.

No entanto, a falta de compreensão destes fenômenos e o desconhecimento das propriedades termofísicas dos materiais por parte dos projetistas, juntamente com a carência de especificações técnicas que deveriam ser divulgadas pelos fornecedores, tem levado à aplicação inadequada de determinados componentes, prejudicando o desempenho térmico e a viabilidade da construção.

A especificação do material de cobertura, principalmente da superfície externa, tem grande influência no desempenho térmico da edificação, não somente para o aquecimento interno, mas também na escala urbana, contribuindo para a formação de ilhas de calor nos centros urbanos. De acordo com estudos realizados por Taha (1997), aumentos razoáveis no albedo urbano podem alcançar uma diminuição maior que 2°C na temperatura externa do ar. Portanto as características de refletância das coberturas contribuem em grande parcela para os efeitos de aquecimento urbano que, por sua vez, é um dos responsáveis pelo aquecimento global.

1.2. Objeto de estudo

O objeto da pesquisa consiste na combinação de tipos de componentes de coberturas e subcoberturas com estratégias de resfriamento passivo e/ou de baixo consumo de energia, aplicada em edificações predominantemente horizontais dotadas de cobertura plana, localizadas em clima tropical continental, visando minimizar as transferências de calor através deste componente do edifício.

1.3. Objetivos da dissertação

O objetivo é avaliar quantitativamente o desempenho térmico e energético de 04 (quatro) tipologias de coberturas com variações quanto à cor e à composição do sistema, na região tropical continental brasileira, sob condições de clima rigoroso, com duas estações bem definidas (quente-seca e quente-úmida), fazendo uso de estratégias de proteção solar e de resfriamento de baixo consumo (resfriamento evaporativo) para minimizar a carga térmica interna da edificação.

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Avaliar o desempenho térmico e energético de alguns componentes de cobertura isoladamente, para três dias de referência representativos do clima local;
- Avaliar o desempenho de um componente principal, combinado com um componente de

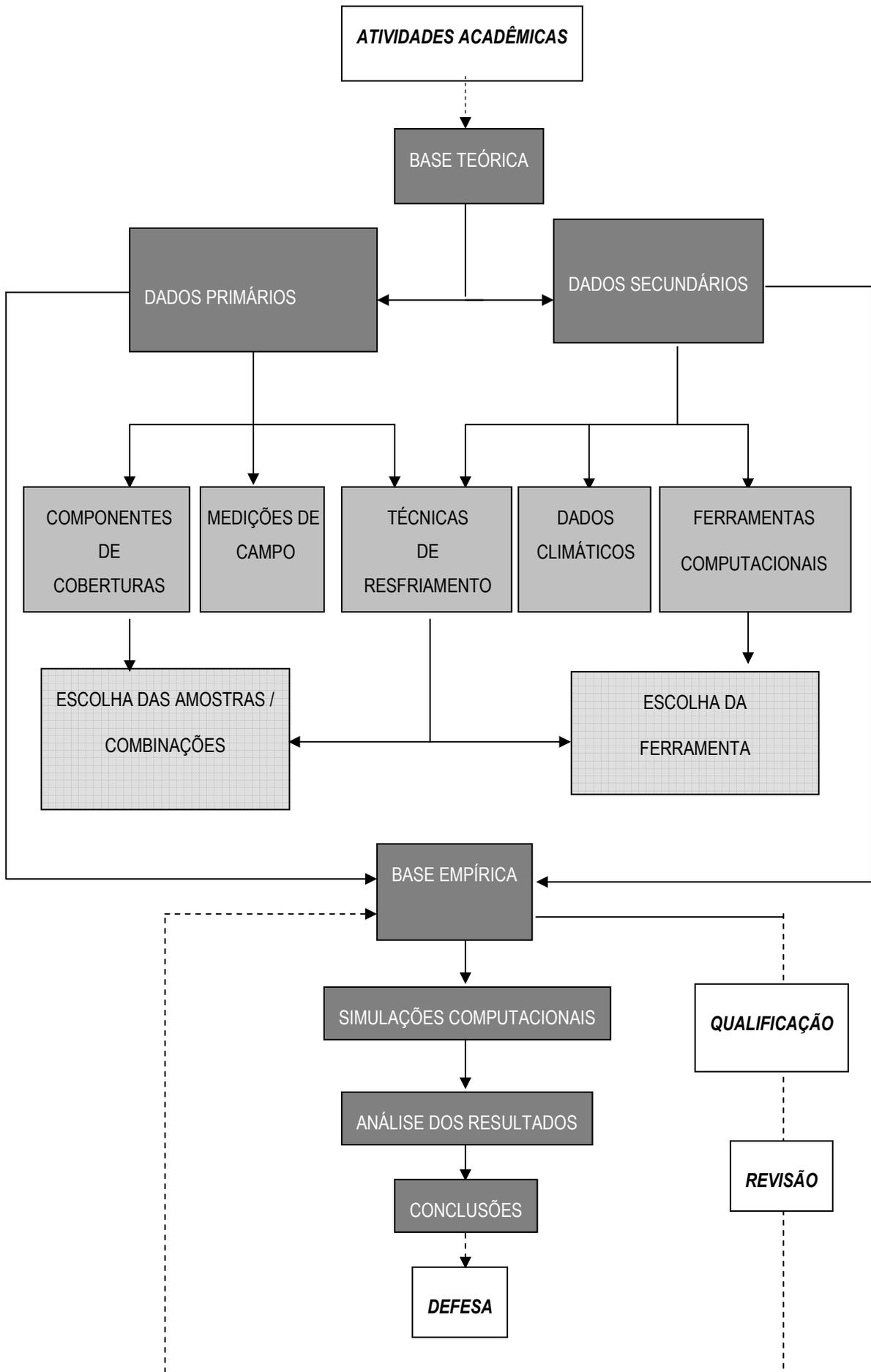
subcobertura (barreira radiante) e alterando-se o albedo das superfícies externas, para três dias² de referência representativos do clima local;

- Avaliar o conjunto de cobertura, combinado com uma estratégia de resfriamento de baixo consumo (resfriamento evaporativo) e outra de proteção solar (sombreamento), para três dias de referência representativos do clima local;
- Fazer uma análise comparativa quanto ao custo-benefício de cada um dos sistemas avaliados;
- Disponibilizar um elenco de sistemas mais adequados ao clima rigoroso da região e seus respectivos desempenhos térmicos, energéticos e econômicos;
- Orientar as decisões de projeto.

1.4. Metodologia

O trabalho foi desenvolvido seguindo a metodologia ilustrada no fluxograma que da próxima página. Em seguida serão detalhadas as diversas etapas, descrevendo as técnicas utilizadas e a sequência na qual as atividades foram realizadas.

² Ver no capítulo 06 – Caracterização do Clima, item 6.2 e 6.3, a justificativa e descrição dos 03 (três) dias de referência



a. Base Teórica

Esta etapa consiste na pesquisa referencial, ou seja, na revisão bibliográfica cujo objetivo é a contextualização do assunto abordado, buscando fundamentá-lo por meio de conceitos teóricos relacionados com o mesmo e inseri-lo numa linha cronológica de evolução dos tipos de coberturas. Para isto, foram levantadas referências anteriores de trabalhos relevantes sobre desempenho de sistemas de coberturas já realizados no contexto internacional, nacional e local (região centro-oeste, mais especificamente no Estado de Mato Grosso³); além de uma revisão da arquitetura vernacular; do avanço tecnológico das coberturas, de fenômenos físicos de trocas térmicas e estratégias de resfriamento complementares aplicados em coberturas. As atividades acadêmicas, tais como aulas, seminários e estágio docente⁴ tiveram um papel fundamental para esta etapa de fundamentação teórica, contribuindo para o aprendizado e amadurecimento profissional da aluna.

b. Levantamento de Dados Secundários

Consistiu basicamente no levantamento dos seguintes dados:

- Levantamento dos programas computacionais disponíveis para simulação de desempenho térmico e a escolha da ferramenta. Dentre as diversas ferramentas encontradas atualmente, foram investigadas duas das mais utilizadas em pesquisas internacionais e nacionais, o *Energy Plus* (DOE/USA, 2006) e o TAS (EDSL, 2007). Ambas têm sido largamente utilizadas pela comunidade científica e pelos maiores escritórios de consultoria na área de desempenho térmico e energético em diversas regiões do mundo; porém, por uma questão de disponibilidade do programa computacional, foi escolhido o *Energy Plus* para a realização das simulações desta pesquisa de mestrado, já que se trata de um software de uso gratuito e que atende plenamente as necessidades desta pesquisa, conforme explicado no capítulo 09 – Ferramentas computacionais de simulação térmica e energética. Um terceiro programa computacional foi estudado, o RSPT, desenvolvido por Yannas, Erell e Molina (2006), cujo objetivo é específico para o desempenho térmico de técnicas de resfriamento em coberturas, no entanto não foi utilizado nesta pesquisa por causa das limitações do programa. Devido à falta de experiência e conhecimento anterior da aluna nos programas computacionais escolhidos, esta etapa exigiu tempo e dedicação para o aprendizado dos mesmos.
- Caracterização do clima e levantamento dos dados climáticos. Em um primeiro momento buscou-se a caracterização do clima tropical continental, em especial das peculiaridades da cidade de Cuiabá, junto ao Departamento de Geografia da Universidade Federal de Mato

³ Ver justificativa da escolha do local, no capítulo 06 – Caracterização do Clima / item 6.3.

⁴ Foram realizados dois estágios do PAE – Programa de Aperfeiçoamento de Ensino, em disciplinas diferentes da área de conforto.

Grosso⁵. Posteriormente, foi feito um levantamento dos bancos climáticos disponíveis sobre o local, a análise e a escolha do banco a ser utilizado. No caso desta pesquisa, adotou-se o arquivo *epw* (formato padrão - *Energy Plus*) de Cuiabá, disponível no endereço eletrônico do programa, cuja fonte é a SWERA⁶, responsável por desenvolver pesquisas sobre energia solar e eólica de alta qualidade em 14 (quatorze) países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, e avaliar dados horários climáticos em 156 (cento e cinquenta e seis) locais distribuídos nestes países. O arquivo corresponde à montagem de um ano climático padrão, que representa as condições do clima local, a partir do levantamento e avaliação dos últimos anos. Contudo, para a primeira simulação de treinamento do programa computacional, na qual são verificados os dados medidos em relação aos simulados, foram utilizados dados de um dia específico, ou seja, para o dia em que foram feitas as medições, baseado nos dados da Estação do Aeroporto Marechal Rondon (SBCY), obtidos junto ao Laboratório Master – Meteorologia Aplicada aos Sistemas de Tempo Regionais, do IAG USP - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP⁷. Para esta simulação não poderia ser adotado o ano climático de referência (*epw*), já que se trata de uma montagem derivada de vários anos e não do ano específico em que ocorreram as medições.

c. Levantamento de Dados Primários

- Levantamento de tipologias de coberturas (componentes e materiais) mais atuais e usuais no mercado da construção civil. Para este levantamento foram incluídos materiais tradicionais e inovadores de componentes de cobertura e subcobertura, assim como sistemas compostos por mais de um componente. A pesquisa se deu por meio de revistas técnicas, bibliografias especializadas, catálogos (impressos e digitais) de fabricantes e, também, por meio de visitas em obras comerciais, industriais e institucionais, dotadas de um partido predominantemente horizontal, e em lojas de materiais de construção. A partir deste levantamento foi possível definir as amostras a serem avaliadas, selecionando-se alguns componentes de cobertura para formar diferentes alternativas de combinações entre componentes de cobertura e subcoberturas a serem testadas e comparadas, a fim de se encontrar as soluções mais adequadas de projeto, para o clima em questão. Portanto, as amostras escolhidas nesta etapa seriam as variáveis da pesquisa experimental.
- Levantamento de estratégias de resfriamento e de proteção, incluindo as técnicas passivas ou de baixo consumo de energia com o objetivo de atenuar a carga térmica proveniente da cobertura. Entre elas, soluções de resfriamento que tiram proveito das propriedades

⁵ Estudos sobre Climatologia da região Tropical Continental (MAITELLI, 1994)

⁶ SWERA - Solar and Wind Energy Resource Assessment. Disponível em: <<http://swera.unep.net>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2008.

⁷ IAG USP - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP. Disponível em: <<http://www.iag.usp.br>>. Acesso em: 27 de agosto de 2007.

termofísicas dos materiais e dos princípios físicos de trocas térmicas, tais como o resfriamento evaporativo, radiante e convectivo, cada qual com seus princípios de funcionamento e peculiaridades, e técnicas simples de controle solar, tais como o sombreamento. O levantamento se deu por meio de pesquisa em internet, bibliografia especializada, revistas técnicas e visitas em empresas no ramo de resfriamento evaporativo.

- Medições de campo realizadas no período de inverno e verão⁸, em galpões comerciais na cidade de Cuiabá – MT, com o intuito de se verificar os resultados obtidos neste processo experimental frente àqueles resultantes da simulação computacional. Esta etapa foi de extrema importância para o treinamento no programa computacional a ser adotado, testando-o para que o mesmo pudesse ser utilizado com confiabilidade na pesquisa de mestrado da aluna. As medições também tiveram a finalidade de familiarizar a aluna com os equipamentos de medição, apesar do prévio conhecimento por parte desta, porém com pouca experiência prática. Desta forma, foi estudado o funcionamento dos equipamentos de medição das variáveis térmicas, por meio da leitura de manuais, normas e trocas de informações com os pesquisadores do LABAUT (Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética da FAUUSP)⁹, que já faziam uso desses equipamentos. Além do funcionamento dos equipamentos, é fundamental para o pesquisador na área de conforto ambiental a realização de experiências práticas, atribuindo-lhe maior conhecimento quanto aos fenômenos térmicos e, conseqüentemente, uma maior compreensão dos resultados obtidos, garantindo-lhe maior confiabilidade quanto aos parâmetros de medição, variáveis e aos imprevistos e que ocorrem no processo de medição, que na falta de experiência, podem comprometer a veracidade dos resultados.

d. Base Empírica

A partir do levantamento de dados primários e secundários foi possível reunir as informações necessárias para formar a base empírica, ou seja, a base de dados para inserção no programa computacional de simulação. Entre os dados de entrada exigidos estão as características construtivas do modelo geométrico, as propriedades dos materiais de construção avaliados, os dados climáticos e os dados das cargas térmicas internas, como ocupação, iluminação e equipamentos. A escolha do modelo geométrico deve ser criteriosamente estudada, pois deve representar ao máximo as condições reais que se deseja simular, levando-se em consideração as simplificações necessárias. Portanto, alguns critérios foram considerados para a definição das dimensões, forma, arranjo espacial, aberturas, assim como as variáveis que determinam o número de simulações a serem realizadas. Foi durante esta etapa da pesquisa que se realizou o exame de qualificação, cujas críticas e sugestões da banca examinadora contribuíram significativamente para dar-se continuidade na pesquisa, sendo o momento

⁸ Ver capítulo 06 – Caracterização do Clima, na página 101.

⁹ Disponível em: <www.usp.br/fau/pesquisa/laboratorios/labaut>

oportuno para revisões, correções e acréscimos. Algumas simulações computacionais já haviam sido realizadas, somente a título de treinamento e com a finalidade de apresentar alguns resultados preliminares.

e. Realização das simulações computacionais

Todas as etapas anteriores serviram de embasamento para dar-se início ao processo de simulação. Esta etapa consiste na parte experimental da pesquisa, adotando-se a ferramenta computacional escolhida. O processo se dá com a inserção dos dados de entrada, a modelagem e a definição de todas as variáveis que interferem no desempenho térmico do componente avaliado. Após a leitura de todos os dados inseridos, o *Energy Plus* processa a simulação de desempenho térmico e energético do modelo geométrico, gerando resultados em forma de texto, que devem ser analisados para se extrair as conclusões desejadas.

f. Análise dos Resultados

Os resultados obtidos na simulação computacional foram analisados, seguindo alguns critérios e os seguintes parâmetros de avaliação: temperatura interna do ar (°C), temperatura interna radiante (°C) e a carga térmica de resfriamento (W), comparando-se os resultados de cada sistema de cobertura avaliado. As demais variáveis foram mantidas inalteradas, permitindo, assim, avaliar-se a contribuição proveniente somente da cobertura, sem considerar as demais interferências para as condições internas do ambiente. Não foram discutidas neste trabalho as condições de conforto térmico, somente o desempenho térmico dos sistemas de cobertura.

g. Considerações Finais

As discussões ocorridas durante a análise dos resultados geraram algumas conclusões quanto às tipologias de cobertura que apresentam melhor desempenho térmico para o clima tropical continental, assim como as estratégias de atenuação da carga térmica que contribuem para a redução das temperaturas internas. No final, demonstra-se de que maneira o trabalho contribuiu para esta área do conhecimento e como e porque outros trabalhos devem continuar a investigação sobre o desempenho térmico de coberturas. Após a conclusão e a entrega da dissertação, começaram os preparativos para a defesa

h. Recursos e Restrições

Esta pesquisa foi realizada com o apoio financeiro de duas agências: Primeiramente da FAPEMAT – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso, no período de junho de 2006 a setembro de 2007 e posteriormente da FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, no

período entre outubro de 2007 e maio de 2008.

A bibliografia utilizada foi consultada nas bibliotecas do sistema *Dedalus* pertencente à Universidade de São Paulo, nos sistemas informatizados de busca das demais Universidades brasileiras, além de artigos científicos, teses e dissertações disponibilizadas na internet.

Foram realizadas duas viagens com o objetivo de realizar levantamento de dados primários no local de estudo, sendo uma delas parcialmente financiada pela FAPESP. A distância entre o local de estudo e a Instituição de pesquisa dificultou a realização das medições de campo devido à questão de empréstimo e segurança de equipamentos e à falta de voluntários para auxiliar no procedimento. Apesar disto foi realizada a medição de acordo com as condições disponíveis.

A pesquisa apresentou restrição de tempo em relação à construção de protótipos, principalmente no que se refere à avaliação de resfriamento evaporativo em coberturas, para qual não se encontrou uma ferramenta computacional destinada a esta finalidade. Buscou-se então uma alternativa, utilizando-se tanto a simulação computacional quanto cálculos manuais para se atingir aos resultados desejados. Quanto à ferramenta computacional, optou-se por um programa de acesso gratuito, entre outros motivos¹⁰ para possibilitar a realização da pesquisa também na cidade de origem (local de estudo) e em outros locais, sem que a pesquisadora ficasse limitada à instituição de pesquisa onde desenvolve o mestrado.

Os dados secundários referentes às variáveis climáticas foram cedidos, sem custo, pelo Laboratório Master – Meteorologia Aplicada aos Sistemas de Tempo Regionais, do IAG USP - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP.

1.5. Estrutura do trabalho

A dissertação está dividida em três partes: A primeira apresenta a introdução e a fundamentação teórica; a segunda, o levantamento de dados primários e secundários, e a terceira, as simulações, análises dos resultados e conclusões, contendo os seguintes capítulos:

- **Parte 1 - Introdução e fundamentação teórica**

A primeira parte introduz e contextualiza o assunto, e é responsável pelo embasamento teórico da pesquisa. O capítulo 1 refere-se à introdução: apresenta o tema, demonstrando o papel da cobertura na carga térmica total de um ambiente interno e a influência das diferentes tipologias de componentes e tecnologias, aplicadas em coberturas situadas em clima tropical continental, para o conforto térmico e a eficiência energética da edificação, justificando a importância da pesquisa. O capítulo delimita o tema

¹⁰ Ver justificativas no capítulo 09 – Ferramentas computacionais de simulação térmica e energética (página 163)

da pesquisa no que diz respeito ao objeto e objetivo da mesma, menciona os recursos/restrições e apresenta a metodologia empregada, descrevendo cada procedimento adotado, desde o levantamento de dados primários e secundários, passando pelas etapas experimentais de medições e simulações computacionais até a análise dos resultados e conclusões.

O capítulo 2 aborda a literatura existente sobre o tema, mencionando as principais referências anteriores. Já o terceiro capítulo trata das tipologias de coberturas, com uma abordagem histórica, resgatando-se algumas técnicas e sistemas da arquitetura vernacular internacional, brasileira e regional, e a evolução dos materiais empregados em coberturas, sempre relacionando os tipos de coberturas com o clima.

O capítulo 4 apresenta os fenômenos físicos de trocas térmicas que ocorrem entre a cobertura e o meio ambiente, citando algumas técnicas passivas, como as estratégias de proteção e de resfriamento complementar que interferem nas trocas.

O capítulo 5 relaciona as coberturas com o ambiente urbano, demonstrando a importância destes componentes não somente para o conforto da edificação, mas para uma melhor qualidade ambiental dos espaços urbanos.

- **Parte 2 – Levantamento de dados primários e secundários**

O capítulo 6 aborda o levantamento de dados secundários, descrevendo as características do clima de Cuiabá - MT, segundo as referências bibliográficas consultadas.

No capítulo 7 são apresentados os dados referentes aos materiais e componentes de coberturas e subcoberturas aplicados atualmente no mundo, no Brasil e na região de estudo.

O capítulo 8 descreve as medições de campo realizadas no período de inverno e verão, em dois galpões comerciais, cujos resultados serviram de referência para a etapa posterior de simulações, além de permitir uma análise prévia quanto ao comportamento de algumas tipologias de coberturas no clima de Cuiabá (MT).

O capítulo 9 refere-se à investigação da ferramenta de cálculo a ser utilizada na pesquisa, apresentando duas ferramentas disponíveis, entre as mais usadas pela comunidade científica e principais escritórios de consultorias nesta área, e descrevendo o processo aprendizagem da aluna quanto ao uso desta ferramenta e a sua escolha decisiva, de acordo com as necessidades, dificuldades e possibilidades encontradas.

- **Parte 3 – Simulações computacionais e conclusões**

O capítulo 10 descreve o método experimental, apresentando a metodologia empregada, incluindo os critérios para a definição dos modelos, dos componentes de cobertura e subcobertura avaliados, das estratégias de atenuação da carga térmica e a definição das etapas de simulação.

No capítulo 11 os resultados são apresentados e em seguida analisados, comparando-os a fim de se identificar o(s) sistema(s) de cobertura mais adequado(s) para o clima em questão. A análise aborda ainda questões quanto ao custo-benefício, comparando o investimento inicial e a redução da carga térmica alcançada por cada um dos sistemas.

Finalmente, no capítulo 12 estão as considerações finais, contendo as discussões sobre as avaliações realizadas ao longo da pesquisa, e as conclusões obtidas por meio da análise dos resultados, explicando a inserção deste trabalho no estado da arte e indicando caminhos para trabalhos futuros nesta área do conhecimento.

2. REFERÊNCIAS ANTERIORES

Principalmente após a crise do petróleo na década de 70, começaram a surgir, no Brasil e no mundo, preocupações quanto à eficiência energética na arquitetura, determinada, em grande parte, pelas envoltórias da edificação. Neste período, já se conhecia as propriedades termofísicas dos materiais e componentes e muitos dos fenômenos sobre os processos de trocas térmicas entre ambientes externos e internos. Porém, diante de novas necessidades, emergiram pesquisas com o objetivo de caracterizar o comportamento térmico de materiais usados em vedações e, ao mesmo tempo, desenvolver métodos de cálculo de transferência de calor e métodos de avaliação de desempenho dos componentes construtivos, ou das condições de conforto das edificações como um todo.

A seguir serão relatadas diversas pesquisas já realizadas quanto ao desempenho térmico de edificações, em especial do componente de coberturas, abordando trabalhos em diversas regiões do mundo, inclusive no Brasil, e em diferentes épocas. O objetivo é a elaboração de um quadro de referência teórica, incluindo os autores que contribuíram para o conhecimento do desempenho térmico de determinadas tipologias de coberturas e técnicas passivas de resfriamento em coberturas. Pretende-se, portanto, apresentar o estado da arte nesta área do conhecimento, para que haja uma maior compreensão quanto aos aspectos que ainda carecem de novas investigações.

Dentre as pesquisas encontradas, a maioria trata do desempenho térmico da edificação como um todo, abrangendo todas as variáveis que interferem no conforto térmico da edificação, como a ventilação e a contribuição das envoltórias: cobertura e fachadas. Contudo, muitos dos estudos encontrados referentes ao desempenho térmico das coberturas são anteriores aos novos materiais e sistemas construtivos utilizados atualmente na construção civil, sendo reduzido o número de pesquisas mais recentes, perante a necessidade aferida.

Após o levantamento bibliográfico de pesquisas nacionais e internacionais realizadas quanto ao desempenho térmico de coberturas, pôde-se classificá-las quanto ao conteúdo abordado, em quatro grupos principais de pesquisas:

a. Quanto ao desempenho térmico das coberturas, na região tropical continental.

Inclui as pesquisas locais, realizadas na região central do país, de clima tropical continental, como é o caso de Cuiabá – MT, onde estão presentes duas situações climáticas bem definidas: uma estação quente e seca e outra quente e úmida, ambas apresentando temperaturas bastante elevadas. A realização de pesquisas relacionadas ao desempenho térmico e energético de edificações neste contexto se justifica pelo rigor climático da região, que tem Cuiabá como uma das 03 (três) capitais mais quentes do país, juntamente com Teresina e Palmas (IBGE, 1995). Neste grupo, poucas foram as

pesquisas encontradas, em relação ao montante geral das pesquisas nacionais e internacionais, sendo que a maioria das pesquisas científicas realizadas e em andamento tratam das questões de desempenho e conforto térmico do edifício como um todo, abordando os aspectos gerais e não determinada variável específica.



Fig. 1: Cobertura metálica de Ginásio poliesportivo, em Cuiabá / MT. (Foto: S. Büttner)

b. Quanto à função de proteção da cobertura:

Estão incluídas nesta categoria todas as pesquisas que tratam das estratégias de *controle solar*, *isolamento térmico*, *armazenamento de calor* e *capacidade térmica de coberturas*. Percebe-se nas pesquisas deste grupo a variação da metodologia empregada, de acordo com a tecnologia disponível para a realização da pesquisa; o modelo adotado, físico e matemático, também conforme os avanços adquiridos nesta área do conhecimento; assim como o objeto de estudo, que se difere com os novos materiais e componentes que surgiram no mercado no decorrer dos anos. São comuns pesquisas que fazem uma análise comparativa entre o desempenho térmico de diferentes componentes, ou que buscam soluções alternativas para melhorar o desempenho de um mesmo componente.



Fig. 2: Cobertura sombreada por lâminas de madeira, em edifício do Centro de Pesquisas da Comissão Européia, Em Ispra – Itália. (Fonte: YANNAS, ERELL e MOLINA, 2006)

c. Quanto à função de seletividade da cobertura:

Refere-se às pesquisas que abordam as técnicas de *resfriamento passivo ou de baixo consumo energético – evaporativo, radiativo e convectivo, e as possibilidades de plantio nas coberturas*. Estas visam testar as técnicas aplicadas em componentes ou conjunto de componentes já estudados anteriormente em pesquisas classificadas no primeiro grupo, buscando soluções complementares de atenuação da carga térmica proveniente da cobertura, como uma forma de minimizar os consumos energéticos com a climatização artificial. O termo “seletividade”, adotado neste trabalho, é usado por Yannas, Erell e Molina (2006) para expressar a função do componente de “selecionar”, ou “filtrar” o que deve entrar no ambiente, para melhorar o desempenho térmico da edificação. Neste grupo, encontram-se em grande parte as pesquisas mais recentes, ainda que o tema possa ser encontrado em estudos anteriores também.



Fig. 3: Resfriamento Evaporativo sob coberturas da Expo'92, em Sevilha. (Fonte: YANNAS, ERELL e MOLINA, 2006)

d. Quanto aos modelos matemáticos para cálculo de temperaturas e fluxo de calor em coberturas:

Consiste em estudos cujo objetivo é *desenvolver, testar e/ou comprovar modelos matemáticos para cálculo de temperaturas e fluxo de calor em coberturas*. Estes estão em menor número, porém, de fundamental contribuição aos demais estudos.

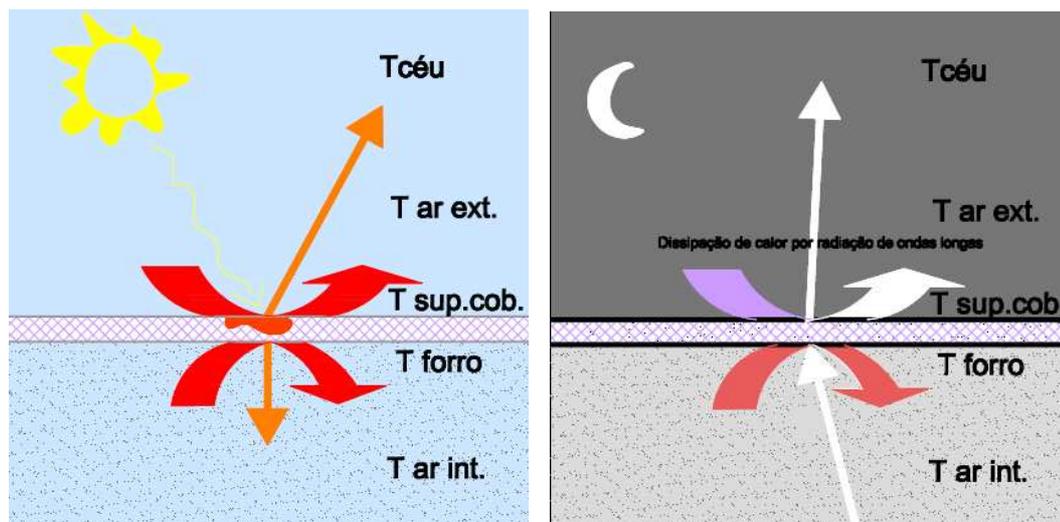


Fig. 4: Trocas Térmicas durante o dia nas superfícies de cobertura plana. (BÜTTNER, S.)

Fig. 5: Trocas Térmicas durante a noite nas superfícies de cobertura plana. (BÜTTNER, S.)

É importante deixar claro que esta classificação é somente uma maneira sistemática de organizar as pesquisas existentes, facilitando a compreensão quanto às diferentes funções da cobertura. Porém, muitos estudos abordam tanto a função de proteção quanto a de seletividade, analisando o efeito combinado das estratégias. Aliás, este tipo de abordagem tem caracterizado as mais recentes pesquisas que tratam o assunto, buscando soluções mais eficazes, sejam elas devido à proteção, à seletividade, ou à combinação de ambas as estratégias. Por este motivo, neste trabalho, as pesquisas que tratam de ambas as funções, separadamente ou combinadas, serão apresentadas no mesmo item, de acordo com a seqüência cronológica.

2.1. O desempenho térmico dos edifícios na região de clima tropical continental

O número de pesquisas com o objetivo de avaliar o desempenho térmico de coberturas, em climas tropicais continentais, principalmente no estado de Mato Grosso, é bastante reduzido. Neste estado, do qual se trata a atual pesquisa, o quadro se explica devido ao reduzido número de cursos de graduação em Arquitetura e Urbanismo, no total 03 (três) e ao curto tempo de existência destes. Nenhum deles oferece curso de pós-graduação, o que leva os pesquisadores a procurar outras áreas para a realização de pesquisas de mestrado e/ou doutorado. Já o único curso de Engenharia Civil, funcionando desde 1972, não tem tradição de pesquisa na área de conforto ambiental.

Foram encontrados alguns trabalhos na UFMT (Universidade Federal de Mato Grosso) e UNEMAT (Universidade do Estado de Mato Grosso) relacionados ao conforto ambiental de edifícios para o clima em questão, entre eles trabalhos de final de curso de graduação, monografias do curso de especialização em engenharia de segurança, alguns trabalhos de iniciação científica e trabalhos apresentados em eventos, tratando de conforto ambiental como um todo, sem um aprofundamento mais específico. Entre alguns trabalhos de iniciação científica encontrados destacam-se os de Schrader

(2007) e Moraes (2003), que analisaram o desempenho térmico e luminoso de ambientes de trabalho do tipo galpões comerciais/industriais e em escritórios, respectivamente. O desempenho térmico de ambientes de trabalho do tipo galpões comerciais e industriais continuou sendo estudado por outras alunas, cujas pesquisas ainda se encontram em andamento: Peres (início: 2007) e Apolônio (início: 2007).

Em se tratando de estudos mais específicos sobre desempenho térmico de coberturas foram encontrados 02 (dois): um consiste em trabalho final de curso de graduação em Arquitetura e Urbanismo, em andamento, intitulado “Desempenho térmico de coberturas para Cuiabá/MT” (KOURY, início: 2007) e o outro consiste em uma comparação entre o desempenho térmico das coberturas de fibrocimento, com e sem pintura, na grande Cuiabá, desenvolvido em um estágio supervisionado. Contudo, ambos não apresentam o aprofundamento científico de uma pesquisa de mestrado ou doutoramento.

As dissertações de mestrado, cujos temas são mais próximos ao tema desta pesquisa (desempenho térmico de edificações) são: Conforto ambiental de escolas estaduais de Cuiabá - MT (DURANTE, 2000), Desempenho Térmico em habitações populares para regiões de clima tropical - Estudo de caso em Cuiabá (LEÃO, 2006); Análise de desempenho térmico e consumo de energia em residência na cidade de Cuiabá-MT (OLIVEIRA, 2007) e Análise do desempenho térmico e luminoso de habitações populares em Cuiabá-MT (SAMPAIO, 2006), todos pela UFMT – Universidade Federal de Mato Grosso, nas áreas de Educação e Física e Meio Ambiente. Pela Universidade de São Paulo em São Carlos, Duarte (1995) estudou O Clima como parâmetro de projeto para a região de Cuiabá em sua dissertação de mestrado.

Abrangendo o clima urbano, destacam-se as teses de Maitelli (1994) e Duarte (2000), ambos desenvolvidos pela Universidade de São Paulo, nas áreas de Geografia e Arquitetura e Urbanismo, respectivamente. Não podem ser desconsideradas as dissertações e, mais recentemente, algumas teses desenvolvidas no curso de pós-graduação em Física e Meio Ambiente, cujos temas relacionados ao clima urbano e à influência do processo de urbanização, têm aumentado a cada ano com a crescente participação de arquitetos.

Outras pesquisas na área de conforto ambiental vêm sendo desenvolvidas pelo grupo de pesquisa em Tecnologia e Arquitetura Ambiental, com ênfase em Adequação Ambiental, da UFMT. As demais universidades da região centro-oeste não foram visitadas pessoalmente, porém incluídas no sistema de busca on line das bibliotecas, por meio de palavras-chave e pesquisadas nos sites das instituições. Assim, puderam ser identificados alguns grupos de pesquisa, cujos coordenadores se destacam em pesquisas e demais trabalhos sobre conforto ambiental e eficiência energética em edifícios, como é o caso do grupo da UNB: “A sustentabilidade em Arquitetura e Urbanismo”, coordenado por Romero (1985, 1993, 2006) e Amorim (1997). Na região norte, em Piauí, Silveira (1999), que também participa do grupo acima mencionado, coordena e realiza pesquisas na área de arquitetura bioclimática e sustentabilidade ambiental, destacando sua dissertação de mestrado com o título: “Diretrizes de projeto para construção de prédios escolares em Teresina/PI”. A contribuição desta para o presente trabalho

se dá em função da semelhança do clima de Teresina / PI e Cuiabá / MT, em se tratando do rigor climático de verão. Ainda na região centro-oeste, a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul dispõe de um laboratório, o LADE – Laboratório de Análise e Desenvolvimento de Edificações, coordenado pelo engenheiro Wagner Augusto Adreasi, responsável pela orientação e realização de alguns projetos neste contexto. Na Universidade Católica de Goiás, só foram encontradas pesquisas de desempenho térmico voltadas para a agropecuária, não sendo, por este motivo, avaliadas.

Alguns dos pesquisadores e, principalmente, os coordenadores de projetos e grupos de pesquisa foram contatados a fim de se obter maiores informações a respeito de novas pesquisas; porém, apesar das variadas pesquisas e/ou trabalhos realizados por estes grupos de pesquisadores na região centro-oeste, não foi encontrada uma pesquisa específica sobre o desempenho de componentes de coberturas ou sistemas de resfriamento passivo aplicados neste mesmo componente, tratando-se, em sua maioria, de trabalhos que visam recomendações e diretrizes gerais de conforto para o projeto de arquitetura.

Percebe-se, então, a necessidade de se realizar pesquisas sobre o assunto, principalmente com o intuito de oferecer novas ferramentas de projeto para os profissionais locais, que dispõem de poucas opções de materiais e tecnologias construtivas, se comparadas às dos grandes centros, e ao pouco conhecimento quanto ao comportamento térmico dos mesmos, tudo isso agravado pelo rigor climático da região.

2.2. A função de proteção e seletividade da Cobertura

Inúmeras são as pesquisas que avaliam o desempenho térmico de determinado material ou componente do sistema de cobertura. Algumas são mais específicas e outras de caráter mais geral, umas com maior nível de aprofundamento em relação às outras.

Consistem em avaliações que, em sua maioria, utilizam o método comparativo entre os resultados obtidos com experimentações em laboratório, ou em protótipos, ou mesmo por meio de simulações, sejam elas computacionais ou por cálculo manual, adotando-se, na maioria dos casos, modelos matemáticos já existentes e validados. As metodologias de pesquisa encontradas variam conforme a época em que foram realizadas, de acordo com os avanços tecnológicos de equipamentos, materiais e modelos computacionais, e do avanço científico no conhecimento das propriedades termofísicas dos componentes.

Uma das primeiras referências significativas encontradas, que foca a influência do tipo de cobertura adotado no projeto do edifício, para o conforto térmico, é de Givoni (1962), avaliando a influência da cobertura na temperatura interna. Diversas foram as contribuições deste autor, além da citada acima, também para climas tropicais, tais como o trabalho que relata alguns ensaios, entre eles um realizado em Israel, mostrando a diferença entre a temperatura superficial interna do forro de uma cobertura com telhas de barro vermelhas e a mesma cobertura com as telhas pintadas na cor branca, comprovando,

por meio de ensaios experimentais, o efeito da cor das superfícies na absorção de radiação solar (GIVONI 1969). Neste trabalho, o autor aborda coberturas planas (pesadas) e inclinadas (leves), mencionando os fenômenos de transferência de calor que ocorrem neste elemento da construção, assim como os principais fatores que interferem nestes, como a cor externa, a resistência e a capacidade térmicas. Quanto às estratégias de resfriamento e proteção nas coberturas, o autor avaliou questões relacionadas à ventilação do ático, ao resfriamento evaporativo e ao posicionamento da camada isolante entre as camadas da cobertura (GIVONI, 1969). Os resultados obtidos quanto às soluções mais eficientes de desempenho térmico representaram um grande avanço nesta área, sendo válidos até os dias atuais. Em sua obra publicada em 1976, deu continuidade aos estudos sobre a influência da ventilação do ático na redução do fluxo de calor através do forro, com diferentes tipos de telhas, tanto em Israel quanto na África do Sul.

Nomes como Gomes (1962,1967,1968) e Olgyay (1973) se destacaram nesta área do conhecimento por meio de seus estudos relacionando a edificação e seus componentes com as questões climáticas. Gomes (1962) realizou experimentos em Lisboa em coberturas de terraços, compostas por lajes de concreto, para as quais poucos estudos haviam sido realizados até o momento. Tratou de questões de inércia e resistência térmica; da aplicabilidade de materiais isolantes, avaliando diferentes espessuras e posicionamentos; de isolamento por espaços de ar; de barreiras radiantes e de técnicas de proteção à radiação solar, analisando não somente questões de desempenho térmico, mas também do efeito da ação da umidade e das tensões estruturais na laje.

Na Argentina, foi desenvolvido um ensaio pelo INTI – Instituto Nacional de Tecnologia Industrial para verificar o comportamento dos “colchões de ar ventilados”, comparando-se algumas alternativas com diferentes taxas de renovação do ar, absorvidades da cobertura, espessuras da camada de isolante térmico sobre o forro e emissividades. Os resultados obtidos permitiram uma maior compreensão quanto aos fenômenos físicos que envolvem as trocas térmicas entre o meio e as vedações, e servem de auxílio aos projetistas de coberturas quanto às opções mais eficientes em termos de desempenho térmico, perante as possíveis variáveis de seus componentes e do efeito das combinações entre estes (LOTERSZTAIN; MURATURA, 1974).

Ahmad (1975), pelo BRE – Building Research Establishment, avaliou o desempenho térmico de lajes de concreto e painéis de sombreamento feitos de um material obtido a partir da cana de açúcar, sob condições de verão árido.

Na África do Sul, novamente, foi realizado outro ensaio, pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo / Brasil (IPT, 1977), com a finalidade de analisar a influência de uma isolamento térmica adicional do forro, no fluxo de calor através do mesmo, demonstrando a eficiência deste componente na redução da temperatura superficial interna.

No Brasil, Cunha (1978) realizou, pela Escola Politécnica da USP - Universidade de São Paulo, um estudo comparativo entre coberturas inclinadas e planas (também denominadas de leves e pesadas, respectivamente), considerando os fatores, individualmente ou combinados, que influenciam no

desempenho: a cor da pintura externa, a resistência térmica, o efeito da inércia para as coberturas planas e do ático ventilado nas coberturas inclinadas, além de analisar outras formas não usuais de proteção, como sombreamento e lâmina d'água sobre a vedação superior, apresentando, desde então, possibilidades alternativas de resfriamento passivo, o que categoriza a pesquisa como pioneira no assunto. No entanto, devido à ausência de dados experimentais na época, foram adotados modelos simplificados (métodos ASHRAE e CSTB), perante a complexidade do problema e ao número de variáveis, cujos resultados, segundo o autor, não apresentam conclusões definitivas sobre qual cobertura apresenta melhor desempenho. Ainda assim, houve grande contribuição ao fornecer instrumentos para a tomada de decisão aos profissionais, quanto à melhoria das condições de conforto, obtidas com a escolha adequada do sistema de coberturas.

Na mesma época, Santos (1979), pela UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul propôs, em sua pesquisa de mestrado, soluções técnicas de proteção contra insolação de coberturas, tomando como base as condições climáticas da região sul do país.

A partir de 1980, com as regulamentações impostas pela Trade Regulation Rule (FTC), quanto ao fornecimento das propriedades termofísicas por parte dos fabricantes de materiais isolantes, nota-se o crescimento, na Europa, de ensaios e pesquisas relacionadas a desempenho térmico de componentes, em especial, de coberturas. No Brasil encontram-se, nesta época, algumas valiosas contribuições, das quais se destaca a UFRGS, com o trabalho sobre coberturas com ático, de Oliveira (1984), que analisa o desempenho térmico de verão do telhado em cimento-amianto com ático, e de Aroztegui (1984), que comparou o efeito de diferentes possibilidades de utilização dos componentes de coberturas (10 combinações), para a redução da carga térmica, entre elas, variáveis como a cor e a emissividade das superfícies envolvidas, analisando também a continuidade do efeito no decorrer do tempo. Neste último, o autor registrou que há a insuficiência dos levantamentos empíricos feitos para abranger os principais tipos de telhados com suas alternativas e destacou a necessidade da regulamentação da qualidade térmica dos edifícios. Todavia, os resultados obtidos foram de grande validade e interesse para fins de se avaliar a qualidade térmica das coberturas. Em 1987, na ocasião da 8th Conference on Roofing Technology, Desjarlais e Tye (1987) apresentaram um método experimental para determinação do desempenho térmico de isolantes de plástico celular usados em coberturas.

No final da década de 1980 surgiram novas pesquisas sobre o assunto, principalmente em se tratando de novos materiais, sistemas e técnicas passivas de resfriamento, que se justificavam com o avanço tecnológico de novos componentes e com as primeiras discussões o sobre aquecimento global.

Uma vez conhecendo-se melhor as propriedades termofísicas de alguns componentes de cobertura e os princípios físicos de trocas térmicas, alguns pesquisadores partiram para a experimentação destas técnicas passivas de resfriamento, ou ativas de baixo consumo de energia, com a finalidade de se analisar o fenômeno e a influência deste para o conforto interno da edificação, como uma forma de minimizar os consumos energéticos com climatização.

Na Índia, Kishorel (1988) realizou nas cidades de New Delhi e Madras, estudos sobre resfriamento

evaporativo em duas condições climáticas: quente e seco e quente e úmido, constatando que este sistema passivo de resfriamento é altamente eficiente em clima quente e seco, onde a umidade relativa é baixa. Outros trabalhos realizados neste período são: Derizans (1989) e Krauze (1990), o primeiro com o título de “Conservação de energia: superfícies refletivas, proteção contra a insolação, e ventilação”, e a segunda: “Coberturas, conforto higrotérmico, edificações: ponderações e propostas para clima tropical”, ambas dissertações de mestrado da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

É interessante observar que os estudos desta época já apresentam um caráter diferente dos ensaios empíricos anteriores. O desenvolvimento da área de informática permitiu a realização de simulações computacionais, cujos modelos ainda se encontravam em fase de validação.

Na maioria das pesquisas, nesse período, foram adotados ensaios experimentais e simulações computacionais para comparar resultados e testar a eficiência dos novos modelos que estavam sendo propostos.

Já na década de 1990, em São Carlos, na Universidade de São Paulo (USP), outras pesquisas de relevância podem ser citadas: Souza (1990) comparou os resultados obtidos em medições de campo com os de simulação computacional por meio do software NBSLD – National Bureau of Standard Load determination, cujas diferenças eram pequenas e justificáveis, comprovando, portanto, a validade do modelo computacional, apesar de suas limitações. Lopes (1993) realizou um estudo em Belém, abordando não somente o comportamento dos diversos tipos de coberturas, mas também de paredes, demonstrando as soluções mais eficientes para climas quentes, enquanto Souza (1996) estudou as coberturas dos hotéis de selva no estado do Amazonas, em clima equatorial.

Em Santa Catarina, Bueno (1994) fez uma análise, pela UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, com a realização de ensaios de campo, ensaios laboratoriais e simulações numéricas para a avaliação da transferência de calor e umidade em diferentes tipos de telhas. Entre outros resultados, concluiu que as telhas permeáveis (porosas, tais como a telha cerâmica) têm temperatura noturna maior e diurna menor do que as impermeáveis, apresentando uma amplitude térmica menor e um desempenho térmico superior.

Outro destaque é dado ao trabalho desenvolvido pelo grupo de Termotecnia do Departamento de Engenharia Energética e Mecânica dos Fluidos da Universidade de Sevilha, para a exposição mundial de 1992 em Sevilha, a EXPO'92, uma das maiores referências em termos de inovação na área de condicionamento natural para climas quentes, de grande valia até os dias atuais (GUERRA, 1994). O trabalho teve o objetivo de propiciar condições de conforto térmico nos espaços abertos e favorecer o microclima para a integração e comunicação social. O maior desafio era minimizar o rigor climático por meio de inovações tecnológicas em diversas técnicas passivas, aplicando soluções tradicionais, aperfeiçoadas com tecnologias mais atuais, baseadas em conceitos físicos fundamentais. A metodologia empregada incluiu a análise do comportamento térmico do corpo humano em espaços abertos; o comportamento térmico das coberturas; a determinação de sombras a partir destas; o resfriamento de superfícies, abordando o comportamento térmico da sala e pavimentos (convencionais

e frios); o resfriamento do ar mediante condutores enterrados; lâminas d'água com vaporização; o resfriamento evaporativo (convecção natural e forçada) e movimentos de ar entre diferentes zonas térmicas, visando conhecer as propriedades dos materiais, avaliar qualitativamente o comportamento dos sistemas empregados e comprovar a validade dos modelos teóricos, por meio da comparação dos resultados destes com os do experimento. Foi apresentado um estudo detalhado de coberturas, considerando o primeiro critério básico para o condicionamento de um espaço aberto o controle da radiação solar. Este caráter prioritário deriva do fato de que a radiação solar constitui o ganho de calor mais importante, sendo uma prioridade metodológica o planejamento dos elementos de obstrução e controle. Assim foram estudados tipos de coberturas simples, duplas, múltiplas e coberturas vegetais, analisando-se sempre parâmetros de transmissão, absorção, reflexão e emissividade, influenciados pela forma, dimensões, distância da cobertura à área de ocupação, tipo de materiais utilizados e cores, apresentando também as vantagens e desvantagens de cada sistema, assim como fatores determinantes na escolha, como custo, estética, funcionalidade e manutenção. Segundo o autor, a cobertura é o elemento mais importante para um projeto eficaz de uma área de passagem ou permanência. “Uma cobertura mal projetada pode pressupor uma situação praticamente impossível de se compensar mediante o emprego de outras técnicas de acondicionamento”. (GUERRA, 1994)¹¹

Este trabalho tem grande relevância por tratar de coberturas e de estratégias de resfriamento passivo, como resfriamento evaporativo, radiativo, o efeito do plantio e da ventilação, apesar de se destinar a áreas abertas, onde inúmeras variáveis influenciam no conforto, diferentemente de espaços fechados. Durante o processo os dados climáticos foram selecionados, experimentados e posteriormente verificados com os modelos matemáticos propostos, disponibilizando assim, ferramentas seguras para a quantificação dos fenômenos físicos, a partir da comparação com a realidade física observada.

Mais recentemente, no Brasil, alguns trabalhos merecem destaque, como o de Cavalcanti (2001), que comparou, por meio de método experimental, os resfriamentos radiativos e evaporativos em coberturas com telhas de fibrocimento, em clima quente e úmido, chegando a importantes conclusões quanto à eficiência das duas técnicas. Concluiu, por exemplo, que o resfriamento radiativo (telhas com pintura na cor branca) tem mais efeito que o evaporativo (evaporação da água no telhado), em horários com a presença de radiação solar, invertendo-se o resultado no período noturno. Avaliou também a influência da emissividade e da ação da degradação da telha (poluição e poeira) para a eficácia, principalmente, do resfriamento radiativo.

Posteriormente, Ferreira (2002) desenvolveu um banco de dados para auxiliar profissionais em seus projetos, em relação à influência térmica do albedo de coberturas.

Roriz (2005), em um estudo experimental, quantificou e comparou os efeitos da evaporação da água sobre a temperatura superficial de diferentes tipos de coberturas; o autor verificou a eficiência de

¹¹ Tradução: BUTTNER, S.

diferentes dispositivos de umidificação (gotejamento ou aspersão) e identificou uma relação entre as variáveis climáticas, as propriedades térmicas das coberturas e as características dos sistemas de umidificação, contribuindo significativamente para o equacionamento matemático dos fenômenos físicos envolvidos.

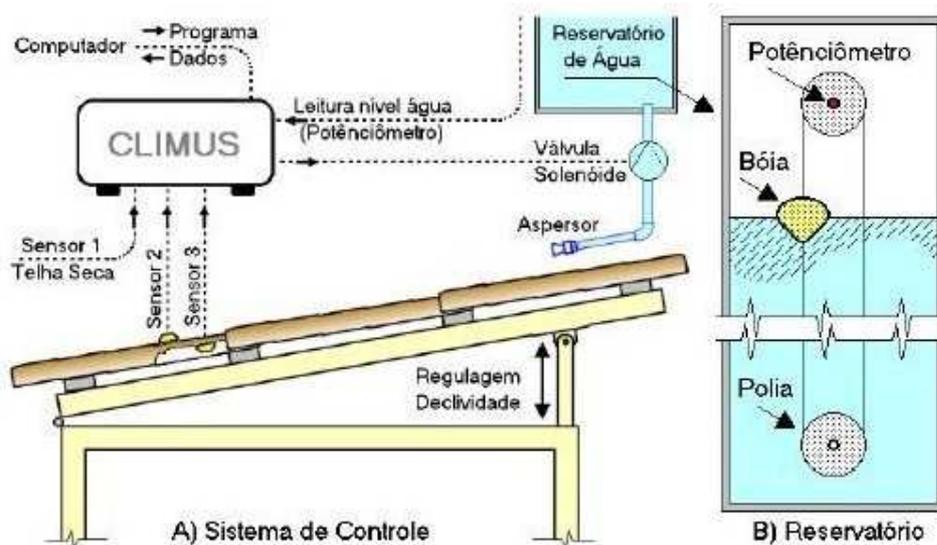


Fig. 6: Sistema de Umidificação das coberturas. (Fonte: RORIZ, 2005)

Nascimento (2005) tratou da refrigeração evaporativa de telhados por meio de gotejamento de água, e Teixeira (2006) avaliou o comportamento térmico de coberturas de fibrocimento em Campinas – SP, aplicando-se técnicas passivas ou ativas de baixo consumo de energia, tais como a aspersão de água e adoção de pintura branca ou de alta refletância, analisando as diversas combinações possíveis entre técnicas e materiais. Concluiu que o resfriamento evaporativo é capaz de reduzir até 8 °C da temperatura superficial interna de uma cobertura padrão no local de estudo, conforme se observa no gráfico da figura 8.

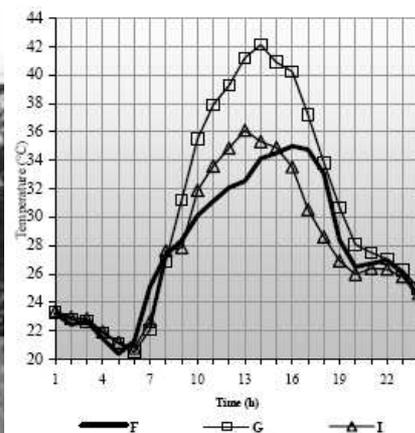


Fig. 7: Protótipo de Ensaio de Campo. (esq.) e Fig. 8: Resultados das temperaturas: F – temp. do ar externo / G – temp. superficial interna da cobertura padrão / I – temp. superficial interna da cobertura com resfriamento evaporativo (dir.).

(Fonte: TEIXEIRA, 2006)

Quanto ao resfriamento evaporativo tem-se também a pesquisa de Araújo (2006), pela Universidade Federal de Pernambuco, que leva o título de “Análise do desempenho térmico de fibras vegetais em sistemas de resfriamento evaporativo” cujo objetivo foi avaliar experimentalmente o desempenho de fibras vegetais locais, tais como a bucha vegetal (*Luffa Cylindrica*), o sisal (*Agave Sisalana* Perrine, Amarilidaceae) e a fibra de côco (*Cocos nucifera* Linnaeus). Os resultados foram coerentes com dados experimentais de outros autores, mostrando que o sisal é eficiente para este fim. Os testes com a fibra de côco são inéditos e indicam ser esse material bastante promissor, com eficiência comparável à do sisal.

Peralta (2006), pela Escola de Engenharia de São Carlos, realizou análises comparativas das temperaturas internas e da superfície das telhas em quatro células teste: com telha de aço, de fibrocimento, cerâmica e de material reciclado (de embalagem longa vida). Em uma segunda etapa, as telhas de aço e fibrocimento foram selecionadas para receberem a aplicação de tinta látex acrílico branco. Foi verificada, após análise comparativa, a importância do tratamento superficial externo em coberturas e a necessidade de normas específicas para o desempenho térmico de telhas.



Fig. 9: Protótipo com telha de material reciclado, com telha de aço galvanizado e Estação meteorológica CR10X, respectivamente. (Fonte: PERALTA, 2006)

Com o título de “Análise da transferência de calor em coberturas com barreiras radiantes”, Michels (2007) desenvolveu sua pesquisa de mestrado, pela UFSC, cujos resultados permitiram comprovar que as barreiras radiantes são eficazes para reduzir a transmissão de calor para o interior da edificação. Em sua pesquisa, algumas mantas alcançaram boa eficiência, enquanto outras não atingiram a eficiência esperada, evidenciando que muitas barreiras radiantes disponíveis no mercado não apresentam a principal característica de uma barreira radiante: baixa emissividade. Segundo Michels, isto pode ocorrer devido à presença de uma camada de polietileno sobre o alumínio ou o depósito de poeira sobre a superfície aluminizada da barreira radiante, o qual piora o desempenho da manta.

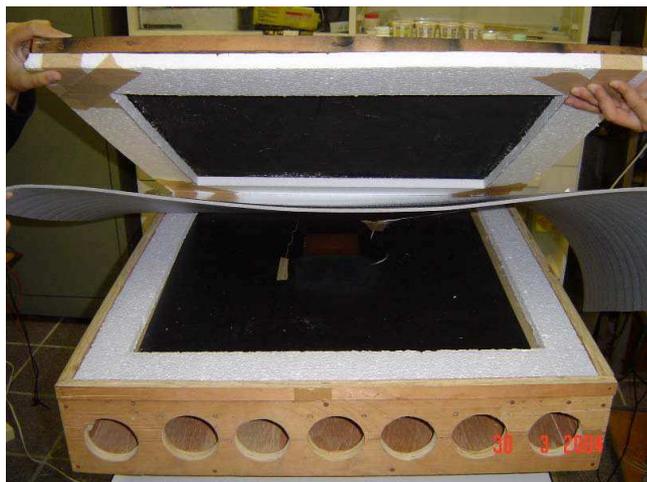


Fig. 10: Representação do aparato instrumental utilizado na pesquisa de mestrado de Caren Michels.

(Fonte: MICHELS, 2007)

Em se tratando de coberturas vegetais, podemos citar Moraes (2003) e Krebs (2005), em estudos para a região de São Carlos e Porto Alegre, respectivamente. Segundo Moraes (2003), pode-se concluir que as coberturas ajardinadas são alternativas técnica e economicamente viáveis para o clima de São Carlos, com amplas possibilidades de utilização.

[...] Adicionalmente, os benefícios ambientais destes sistemas, extrapolam a própria edificação e atingem toda uma região em torno da mesma, com melhoria da qualidade do ar e incorporação integrada e harmoniosa entre vegetação e áreas edificadas. (MORAIS, 2003).

Os “tetos verdes” têm sido objeto de estudo também de Vecchia (2005), que apresentou os resultados experimentais do comportamento térmico de uma Cobertura Verde Leve (CVL), comparando-o com os sistemas tradicionais de cobertura existentes no Brasil, descrevendo sucintamente o sistema construtivo proposto para telhados verdes, de característica leve, com a utilização de materiais que provoquem o menor impacto ambiental, de caráter sustentável, que permitam, além disso, a introdução de sistemas de reuso de água e melhorias no escoamento das águas de chuva, responsáveis pelas enchentes no meio urbano. Com a experiência foi possível concluir que o sistema de coberturas CVL, em relação ao peso próprio, se apresentou adequado à sua ampla utilização em edifícios. Quanto ao aspecto térmico coube verificar a amplitude térmica do sistema de cobertura verde leve (CVL), que é menor em relação aos demais tipos de coberturas que foram elencados para a verificação e comparação entre eles, apresentando temperaturas superficiais internas menores e, portanto, melhor desempenho térmico.

Romero *et al.* (2006), propuseram recomendações sustentáveis para a Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, entre elas a utilização de tetos verdes, para a melhoria do conforto térmico da edificação e demais vantagens apresentadas por este sistema, de acordo com as conclusões já apresentadas de outros estudos.



Fig. 11: Protótipo de edificação com cobertura ajardinada (Fonte: MORAIS, 2003)

O maior e mais recente estudo quanto às técnicas de resfriamento em coberturas é o trabalho de Yannas, Erell e Molina (2006), recentemente listado entre os seis melhores livros do ano pelo *RIBA Books - 2005 International Book Award for Architecture*. A grande contribuição, em especial para esta pesquisa, reside no fato deste trabalho ser focado no resfriamento de coberturas, com estudos desenvolvidos para a Grécia, Israel e sul da Espanha, que também são locais de climas quentes; esse fato difere da maioria dos trabalhos estrangeiros anteriores, que enfatizam o aquecimento como principal estratégia de climatização. Neste material são abordadas as questões referentes à função de proteção, ou seja, o controle solar, o isolamento térmico e o armazenamento de calor; e a função de seletividade das coberturas, que diz respeito às estratégias de resfriamento radiativo, evaporativo, convectivo e as possibilidades de plantio. Novos algoritmos de cálculo foram propostos, incluindo novos sistemas e componentes empregados em coberturas, tratando dos princípios físicos envolvidos em cada técnica, demonstrando as suas vantagens e desvantagens, aplicações, trabalhos experimentais recentes e demais considerações de projeto.

Além de teses e dissertações, há outros trabalhos que tratam das questões ligadas ao comportamento térmico das envoltórias, sejam elas sistemas de coberturas mais comuns na construção civil, ou propostas de novas soluções de proteção deste componente. Entre alguns autores, não se pode deixar de mencionar algumas publicações, como a de Lamberts (1990); Basso; Lucini e Roriz (1990), e Souza (2001), focados para habitação de interesse social. Buscando soluções alternativas, e de baixo custo, para aplicação em cobertura, Labaki, Oliveira e Ciochi (2003); Krüger, Suetake e Adiazola (2005) e Harris (2005) levantam as possibilidades da utilização de materiais recicláveis, como a embalagem “Longa Vida” (Tetra Pak) e o desenvolvimento de mantas térmicas a partir do lixo reciclável. Outro material alternativo é analisado por Oliveira *et al.* (2003), em uma análise comparativa experimental sobre o uso de isolante térmico, fabricado a partir da fibra da casca de côco, destinado à cobertura de habitações localizadas em regiões de elevada carga térmica de insolação.



Fig. 12: Composição da embalagem TetraPak. (Fonte: KRÜGER, SUETAKE E ADRIAZOLA, 2005)

De grande relevância são as publicações do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas / SP, em especial de Vittorino, Akutsu e Sato (1999/2003), tratando de desempenho térmico de telhas de alumínio e de isolantes refletivos, resistivos e barreiras radiantes, respectivamente. Esta última esclarece as diferenças entre estes tipos de isolamentos, cujos conceitos e princípios físicos são comumente confundidos no mercado e até mesmo na academia. Apresenta também as conseqüências da aplicação incorreta das barreiras radiantes no desempenho e durabilidade do produto, de acordo com os resultados obtidos em ensaios experimentais.

No nordeste, Marques e Oliveira (1999) analisam o comportamento térmico das coberturas mais usuais da cidade de Natal, cada qual com algumas variações, comparando os resultados obtidos por meio do modelo computacional Arqitrop¹². Concluiu-se que diante das simulações no Arqitrop para as diferentes tipologias de coberturas, a que apresentou melhor desempenho térmico para esta cidade, foi a de telha de barro sobre o madeiramento com um espaço ático intermediário entre a cobertura e a laje de concreto. Apesar da importância da tipologia da cobertura na eficiência energética, outros fatores também foram responsáveis pelas perdas de calor, segundo os autores, sendo apontadas hierarquicamente a ventilação, a coberta e as fachadas, confirmando a importância de se sombrear e ventilar nesta região de estudo.

Entre os autores internacionais, destacam-se Tzempelikos e Athienitis (2006); Jiafang e Hien (2006); Quanjel, Zeiler, Borsboom e Spoorenberg (2006), apresentando estudos que comparam sistemas de coberturas, avaliando as diferenças de comportamento térmico na existência ou não de ventilação, isolamentos e diferentes configurações possíveis para cada solução e, ainda, Alexandri e Jones (2006), e Laar e Grimme (2006), apresentando estudos referentes às estratégias de resfriamento passivo em coberturas, analisadas para climas específicos.

Alguns estudos abordaram a influência da cobertura dos edifícios para o clima urbano, como os de Schiler e Valmont (2006), e Bougiatioti (2006). No entanto, este não é o foco deste trabalho, apesar da

¹² Software desenvolvido pelos arquitetos Maurício Roriz e Admir Basso, em 1988, na UFSCar – Universidade Federal de São Carlos.

importância para a contextualização do assunto.

Contribuições significativas são encontradas nas pesquisas realizadas pelo “*Heat Island Group*, do Lawrence Berkeley Laboratory, na Califórnia/USA¹³, abordando diversos aspectos relacionados ao resfriamento das coberturas, visando o conforto no interior das edificações e, principalmente, a redução no consumo energético. Entre os estudos que desenvolvem, pode-se destacar a questão do albedo dos materiais de coberturas e o desenvolvimento de sistemas de inovação tecnológica, colaborando com as indústrias deste setor. Como exemplo, desenvolveram um sistema de “auto-lavagem” para componentes de cor clara, para que mantenham suas características iniciais de refletância, já que os custos de manutenção das coberturas muitas vezes excedem o custo da energia conservada. Os trabalhos de monitoramento e simulação energética para edificações realizadas por este grupo se estendem a diferentes tipos de edificações, climas e tipologias de coberturas, apresentando soluções para o melhoramento do desempenho térmico dos edifícios, por meio da cobertura, adotando-se estratégias de isolamento, ventilação, refletância e sistemas de resfriamento passivo, conforme as exigências de cada situação climática.

2.3. Modelos matemáticos para avaliação de desempenho térmico de coberturas

Nesta classificação estão os estudos com o objetivo de propor ou testar modelos matemáticos para o cálculo de transferência de calor em coberturas.

De grande contribuição foram os trabalhos desenvolvidos por Lamberts (1983/1988), Sato (1983), Roriz (1996) e Akutsu (1998). Sato (1983) propôs um modelo para cálculo de temperaturas e fluxos de calor em coberturas, baseado no método dos fatores de resposta térmica, comparando os resultados obtidos em protótipo com os resultados do modelo, permitindo a análise do emprego de isolantes térmicos e a influência das variações na taxa de ventilação do ático, para os fluxos de calor através da cobertura.

[...] O modelo é voltado especificamente para a previsão das temperaturas nas superfícies da cobertura e dos fluxos de calor através da mesma, tomando-se como base, as condições climáticas exteriores, as características da cobertura e as condições no interior da edificação. (SATO, 1983).

Os resultados obtidos nos cálculos tiveram valores próximos aos medidos, considerando-se, portanto, o modelo como satisfatório e inovador, já que as avaliações anteriores, no Brasil, eram realizadas de maneira empírica, por meio da observação. O modelo tornou-se uma ferramenta útil, principalmente na escolha de soluções de coberturas visando o atendimento de condições pré-estabelecidas no interior de edifícios, ou mesmo na previsão do comportamento térmico de coberturas em variadas localizações

13 [http://esato\(1983\)etd.lbl.gov/](http://esato(1983)etd.lbl.gov/) / Heat Island

climáticas.

Lamberts (1988), em seu doutoramento, estudou os fenômenos de transferência de calor através da cobertura, propondo modelos matemáticos para a simulação de desempenho térmico em habitações de interesse social no Brasil, dotadas de cobertura com ático ventilado. Assim, diferentes modelos, em regime permanente, foram comparados com medições em protótipos de laboratório, analisando-se os diversos parâmetros como dimensão das aberturas, velocidade do ar, número de superfícies e tipos de materiais empregados. O modelo, cujos resultados mais se aproximaram da situação real, serviu de embasamento para o desenvolvimento de um modelo em regime transitório, que não teve suas hipóteses comprovadas nesse trabalho, que ficou aberto para futuras pesquisas.

Roriz (1996) apresentou um equacionamento e um exemplo de aplicação de um modelo matemático para simulação do comportamento higrotérmico de edificações, tendo em vista avaliar os níveis de conforto proporcionados pelas mesmas. O modelo foi baseado no procedimento da admitância e nas zonas de conforto propostas por Fanger, tendo demonstrado, no final, a reprodução fiel do fenômeno de trocas de calor estudadas, ainda que, segundo o autor, fosse necessário aperfeiçoar alguns processos de cálculos, como por exemplo, o cálculo das temperaturas superficiais externas das coberturas.

Akutsu (1998) desenvolveu um método para avaliação de desempenho térmico nas condições climáticas brasileiras, comprovando a inadequação do método que considera a resistência térmica como parâmetro fixo e a necessidade de se adequar os métodos à realidade brasileira, em se tratando de dados climáticos, dos materiais, do consumo de energia, e outros que influenciam no processo. Com este método proposto, a finalidade foi oferecer um instrumento complementar no processo de elaboração de projetos dentro de um sistema que considere os conhecimentos técnicos integrados a regulamentações e normas de forma prática e funcional. Os principais pontos de destaque foram a caracterização climática e das exigências humanas.

Não se pode deixar de mencionar a mais recente proposta para equacionamento matemático de trocas térmicas em coberturas de Yannas, Erell e Molina (2006). As equações matemáticas foram adotadas no desenvolvimento do software RSPT, que tem como objetivo avaliar o desempenho térmico de sistemas de resfriamento evaporativo, por aspersão ou lâmina d'água; resfriamento radiante, por meio de água ou ar, e o desempenho de coberturas verdes. Apresenta o mapeamento da demanda dos sistemas para as diversas regiões européias e fornece os dados de saída, em forma de economia de consumo de energia devido à climatização, em relação ao mesmo edifício sem o sistema de resfriamento, ou em forma de fluxo de calor que atravessa o componente de cobertura, incluindo também o consumo de água dos sistemas que a utilizam. O programa apresenta limitações para a modelagem, não permitindo a entrada de dados construtivos de novos modelos, restringindo-se a algumas poucas opções, já que o objetivo é a comparação dos resultados obtidos com os sistemas de resfriamento em relação a um sistema convencional de cobertura, não havendo a pretensão de realizar simulações integradas de desempenho térmico do edifício.

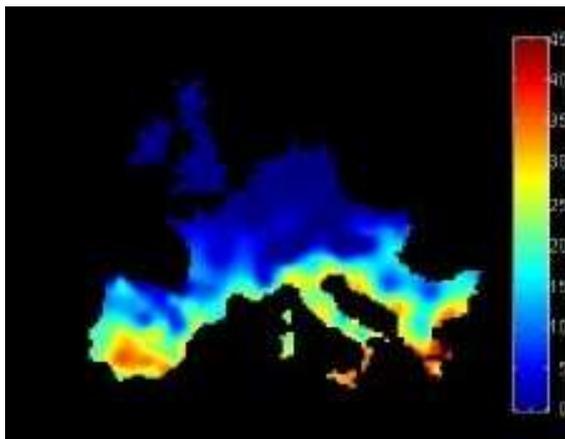


Fig. 13: Gráfico fornecido pelo Software RSPT – Performance of Radiative and Evaporative Cooling Techniques Systems on Roofs, demonstrando a demanda comparativa de resfriamento para diversas regiões da Europa.

(Fonte: YANNAS *et al.*, 2006)

2.4. Panorama atual e considerações finais

Analisando-se a contribuição das diversas pesquisas realizadas ao longo de aproximadamente quatro décadas, pode-se dizer que muito se avançou sobre o assunto. Porém, muito ainda há que se estudar quanto ao comportamento térmico de sistemas de coberturas, diante da diversidade de novos componentes lançados no mercado, sem que haja estudos quanto ao seu desempenho, e diante das possibilidades de se combinar estratégias de resfriamento ao conjunto da cobertura. Em climas tropicais, o melhor desempenho implica em minimizar a carga térmica proveniente deste elemento arquitetônico, contribuindo para o conforto térmico interno da edificação e, conseqüentemente, minimizando o consumo energético devido ao sistema de condicionamento de ar, quando pertinente.

Em resumo, pode-se dizer que já são conhecidos os comportamentos dos principais materiais tradicionais utilizados em coberturas, como a telha cerâmica, a de fibrocimento e a laje de concreto. Também não é novidade o efeito positivo do ático ventilado ou confinado, conforme as características climáticas, e os estudos que divulgam os resultados satisfatórios relacionados ao albedo das coberturas (refletância).

Quanto aos modelos matemáticos, por mérito de alguns pesquisadores que propuseram as primeiras equações, e de outros, que aos poucos foram aprimorando-as, validando-as e informatizando-as, hoje temos ferramentas para realizar avaliações de desempenho com maior facilidade, rapidez e grande confiabilidade nos resultados.

No entanto, o uso de diferentes materiais isolantes térmicos e barreiras radiantes ainda deixam dúvidas quanto à melhor opção na escolha do material e, principalmente, em termos de sua correta aplicação, isto é, a combinação e o posicionamento dos elementos que compõem o conjunto. O que se observa na prática são decisões de projeto que afetam as questões de viabilidade financeira da obra, mas que muitas vezes não correspondem à melhoria desejada, devido à falta de conhecimento quanto ao

comportamento da cobertura em relação às trocas térmicas entre esta e o ambiente.

As estratégias de resfriamento passivo aplicadas em coberturas já vêm sendo abordadas em alguns estudos, com resultados satisfatórios, para alguns tipos de clima, porém não para o clima tropical continental, onde o clima é muito rigoroso e quase nada foi proposto até o momento. Foi realizado um levantamento mais detalhado na região de Cuiabá – MT, onde se faz necessária a inovação quanto aos sistemas de cobertura que possam vir a contribuir para a diminuição do consumo de energia elétrica pela climatização artificial e para o conforto térmico dos usuários, principalmente devido ao rigor climático da região. Percebe-se que na região ainda são adotados, na maioria dos casos, sistemas de coberturas pouco eficientes e pouco satisfatórias em relação aos critérios acima mencionados, o que se explica devido à falta de conhecimento dos novos materiais existentes no mercado e, principalmente, devido à falta de conhecimento quanto às soluções alternativas capazes de minimizar o desconforto térmico no interior das edificações predominantemente horizontais, do setor comercial e de serviços.

O conhecimento do estado da arte é intrínseco à prática da ciência, que tem um caráter coletivo, visando sempre a evolução do conhecimento a partir da integração de pesquisadores e a continuidade dos estudos em busca de soluções para os problemas encontrados. Portanto, toda pesquisa deve partir do ponto em que se encontra o conhecimento da área que se pretende estudar.

Sendo assim, o levantamento bibliográfico de pesquisas realizadas até os dias atuais, a sua organização em ordem cronológica e a sua classificação por conteúdo abordado permitiram uma visão ampla quanto à atual situação do conhecimento científico e da prática profissional referente à utilização dos diferentes tipos de coberturas, e uma maior compreensão quanto às lacunas que ainda devem ser preenchidas neste campo do conhecimento. Desde o início deste estudo, foi possível detectar a carência de pesquisas relacionadas ao desempenho térmico de novas tipologias de coberturas combinadas com estratégias de resfriamento passivo ou de baixo consumo energético, especialmente para o clima tropical continental, onde se localizam muitas das cidades mais quentes do país, como Cuiabá, Corumbá, Diamantino, Teresina, Palmas, Cidade de Goiás, entre outras

3. TIPOLOGIAS DE COBERTURAS: UMA ABORDAGEM HISTÓRICA

3.1. Revisão da arquitetura vernacular

Na história da arquitetura tradicional são encontrados diversos estilos, elementos morfológicos e técnicas construtivas. É interessante observar como os povos nativos de regiões distintas adaptaram suas construções conforme as condições climáticas e a disponibilidade de materiais locais. Estes são os principais fatores determinantes das formas arquitetônicas e, não diferente, das variadas tipologias de coberturas. Assim, por exemplo, os telhados inclinados prevalecem em regiões chuvosas, enquanto que as coberturas planas são mais comuns em climas quentes e secos.

Demonstrações históricas de adaptação ao clima são observadas em todas as regiões do mundo, reforçando a importância deste fator para o desenvolvimento de determinadas técnicas e para a evolução dos processos construtivos. Não é objetivo deste trabalho a revisão histórica detalhada das diferentes tipologias de coberturas ao longo da história, porém, ele visa demonstrar, por meio de exemplos, como nossos ancestrais utilizavam-se dos recursos naturais e de conhecimentos físicos empíricos para a adequação de suas habitações ao local, ainda que não dispusessem das inovações tecnológicas dos dias atuais.

Alguns exemplos tradicionais são apresentados por Yannas, Erell e Molina (2006), como, por exemplo, na Grécia antiga, onde a madeira era abundante (cedro e pinho) e, portanto, largamente utilizada em coberturas planas e inclinadas. Telhas de cerâmica na cor ocre ou vermelha eram usadas nas ilhas e principais regiões da Peloponese, Macedônia, enquanto na região de Pílio e ilhas circundantes era mais comum a ardósia cinza. Entre a cobertura e o forro eram deixadas camadas de ar ou áticos, ventilados ou não.

Materiais isolantes eram utilizados das mais variadas formas, de acordo com a disponibilidade de materiais no local. Em áreas litorâneas utilizava-se para este fim algas marinhas; em regiões continentais, folhas, enquanto que em regiões montanhosas usavam-se galhos pequenos de árvores com folhagens e pêlos de cabra.

Nas ilhas Gregas, a cobertura abobadada prevalecia, cuja estrutura era de madeira, com aplicação de camadas de galhos e cana (de açúcar), cobertos com uma mistura de solo e algas secas para o isolamento térmico. No caso de Santorini, a terra vulcânica era um dos materiais mais utilizados na construção, sendo aplicada na camada exterior da cobertura.

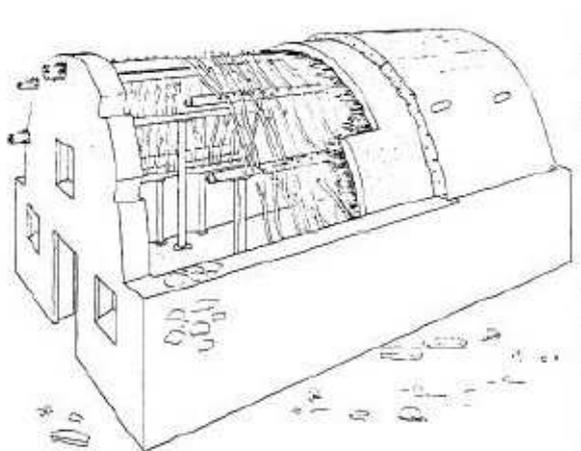


Fig. 14: Construção com cobertura abobadada, composta de terra vulcânica, algas, cana e estrutura de madeira. Fig. 15: Estrutura de madeira com recobrimento de folhas e galhos. (Fonte: YANNAS; ERELL; MOLINA, 2006)

Na Espanha há diferentes aplicações, uma vez que as regiões apresentam variações no clima e na disponibilidade de materiais. No norte e nas regiões de montanhas, a madeira e a pedra são abundantes e, portanto, muito utilizadas nas coberturas. Nas regiões centrais e do sul, onde a madeira é escassa, esta era usada somente para estruturas, adotando-se vegetais, solo e argila para a cobertura superior. A geometria do telhado inclinado é notoriamente definida em função de elementos climáticos, como a chuva e o vento. Observa-se, então, largos beirais em regiões mais chuvosas e ensolaradas, assim como a rotação do telhado, que leva em consideração a direção predominante dos ventos, orientando os cumes para esta direção. Onde há mais de uma predominância na direção dos ventos, eram utilizados telhados recortados e com diferentes inclinações. Em alguns casos de regiões quentes, as telhas são pintadas de branco para aumentar a sua refletância, e com isso, minimizar a absorção de calor pela cobertura. O átrio era muitas vezes utilizado para armazenagem de grãos e alimentos, permitindo, por meio de aberturas para a ventilação, a remoção de calor entre o forro e o telhado. Quando este espaço era utilizado para a ocupação, aplicavam-se materiais isolantes, como vegetais e cascalhos.

As coberturas planas encontradas na Espanha são das regiões costeiras do sul e leste, onde eram construídas com materiais locais e sem ventilação. Geralmente se usava, para a estrutura: palmeiras; para o recobrimento: folhas, algas, vegetais e pequenos galhos; para o isolamento térmico: materiais vegetais e minerais; e para a impermeabilização: solo e argila compactados. O conjunto exigia uma manutenção anual, ocasião em que também se pintava as edificações de branco.



Fig. 16: Diversas manifestações de arquitetura vernacular na África e Ásia.

(Fonte: RUDOFISKY, 1973)

Na Itália têm-se registros de três principais tipos de coberturas. Nas regiões pré-alpinas, os telhados apresentam baixa inclinação, são estruturados com madeira e cobertos por lascas deste mesmo material. Já nos Alpes, a cobertura se dá por telhas de argila, beirais largos, com planos de inclinação elevada para suportar o peso da neve, e grades nas bordas para evitar que esta escorra. Este artifício, muito utilizado nas regiões de inverno rigoroso da Europa, faz com que a neve acumulada na cobertura sirva de isolamento térmico no inverno, dispensando ou reduzindo o aquecimento dos ambientes internos. Em habitações sazonais denominadas *Malghe*, localizadas principalmente na região norte italiana, as coberturas eram feitas de lascas de pedras. Estas construções eram parcialmente enterradas, usufruindo dos desníveis naturais e aproveitando a massa térmica do solo para atingir níveis desejáveis de conforto.

Nas demais regiões, de uma maneira geral, prevalece o princípio básico das coberturas, de proteção do sol e das chuvas, alcançado por meio de coberturas inclinadas e dotadas de largos beirais, quando se trata de clima ameno. Em clima quente e seco, a tipologia tradicional é caracterizada por cobertura plana de pedras, como por exemplo, as *Nuraghi*, na Sardenha.

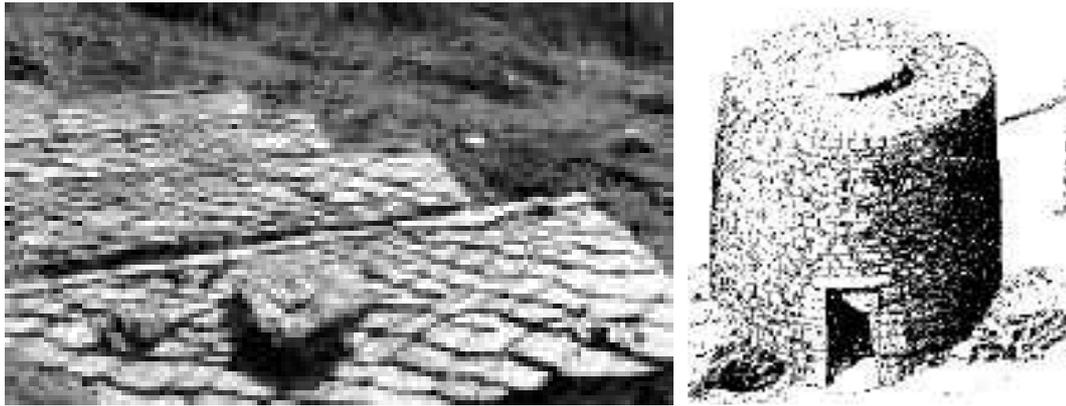


Fig. 17 (esq.) e Fig. 18 (dir.): Lascas de pedra, nas *Malghes*; e arquitetura circular em pedra, os *Nuraghis*. (Fonte: YANNAS;ERELL; MOLINA, 2006)

No Brasil, na arquitetura colonial também eram utilizados materiais regionais e, sobretudo, eram adotadas soluções de adequação ao clima. A telha de barro, moldada nas coxas dos escravos era o principal elemento de cobertura, cujo arranjo, apoiado sobre estrutura de madeira, permitia a entrada de ar para a ventilação do ático, ou do próprio ambiente ocupado.

Características dos casarões coloniais são descritas em um trecho de Freire (1933):

[...] A casa-grande do engenho que o colonizador começou, ainda no século XVI, a levantar no Brasil - grossas paredes de taipa ou de pedra e cal, telhados caídos num máximo de proteção contra o sol forte e as chuvas tropicais - não foi nenhuma reprodução das casas portuguesas, mas expressão nova do imperialismo português. A casa-grande é brasileira da silva.



Fig. 19: Casa de Engenho do séc. XVI (esq.). (Fonte: Freyre, 1973) e Fig. 20: Casarão antigo em São Paulo (dir.). (Fonte: Lemos, 1999)

As habitações indígenas são exemplos marcantes de moradias adaptadas ao clima. Variadas são as técnicas construtivas, o que depende da tradição de cada tribo, concentrando características em comum, como a cobertura de palha, folhas de bananeiras ou outro material similar conforme a

disponibilidade local. A durabilidade não era o principal objetivo, já que muitas tribos eram sazonais.

No alto do Xingu, por exemplo, as casas são cobertas de sapé. Internamente não há divisões, exceto os gabinetes onde ficam os adolescentes em reclusão pubertária. O espaço central é destinado à circulação. Há duas portas, que se abrem no centro do eixo maior das casas, uma voltada para a praça, outra para o exterior. Somente estas aberturas promovem a iluminação, o que torna o espaço interno muito escuro. As aldeias são formadas por casas comunais dispostas em perímetro ovalado, em torno de uma praça de chão batido. (PARQUE INDÍGENA DO XINGU).



Fig. 21 (esq.) e Fig. 22 (dir.): Aldeia e habitação indígena, respectivamente, do alto do Xingu, no nordeste de Mato Grosso. (Fonte: PARQUE INDÍGENA DO XINGU. Disponível em: <<http://socioambiental.org/pib/epi/xingu/aldeias.shtml>>. Acesso em 30 de janeiro de 2008)

Muitas das características da arquitetura vernacular desapareceram com o tempo, prevalecendo soluções universais, desassociadas das peculiaridades locais, restando poucos exemplos de projetos que se baseiam nos princípios “bioclimáticos”, como é o caso do arquiteto Severiano Porto, que se destaca na adoção de um partido arquitetônico caracterizado pelo uso de materiais locais e estratégias de adaptação ao clima da Amazônia, como, por exemplo, o projeto do Centro de Proteção Ambiental de Balbina, de sua autoria (fig. 24). Uma das soluções empregadas para este clima são as palafitas, caracterizadas pela elevação da construção em relação ao solo, protegendo-as do solo permanentemente úmido e das águas de superfície da Amazônia.

Outro destaque é dado ao arquiteto paraense Milton Monte que se dedica em produzir uma arquitetura que tenha relação com o meio ambiente, o clima e com as questões culturais e sócio-econômicas do país. Percebe-se em seus projetos a tentativa em integrar o meio construído ao natural, e a exploração de materiais regionais. Um elemento muito representativo criado por ele é o beiral quebrado, influenciado pelas coberturas curvas indígenas que, em termos funcionais, faz o mesmo papel do *brise-soleil*: proteção da radiação solar e da chuva.



Fig. 23 e Fig. 24: Projetos de Severiano Porto: Sua Casa, em Manaus, 1971 (esq.) e Centro de Proteção Ambiental de Balbina, 1983 (dir). (Fonte: SABBAG, 2003)



Fig. 25 (esq.) e Fig. 26 (dir.): O beiral quebrado: Muito utilizado em climas chuvosos e com radiação solar intensa. (Fonte: MONTE, Milton. Resumo de minha obra. Disponível em: <<http://www.inteligentesite.com.br>>. Acesso em 30 de janeiro de 2008.

Outras inúmeras tipologias construtivas poderiam ser citadas aqui, não somente na Europa e no Brasil, mas também nos demais continentes, cada qual com suas peculiares construtivas, de acordo com o clima, disponibilidade de materiais e a cultura de seu povo. Não se pretende aqui estender as exemplificações, mas acredita-se que estas contribuem na compreensão da evolução histórica das tipologias de coberturas e da estreita relação entre o clima e o edifício, visando sempre reforçar e retomar este princípio intrínseco da arquitetura, tão presente na arquitetura vernacular, e muitas vezes esquecido na prática atual da construção.

3.2. Características da arquitetura vernacular de Cuiabá - MT

[...] Cuiabá é uma cidade do século XVIII, com um desenho barroco de ruas tortuosas e estreitas, topografia movimentada, becos, largos e praças. O espaço produzido reflete, nas curvas e meandros da malha urbana, a ondulação do relevo, a sinuosidade do rio Coxipó e do Cuiabá, os labirintos dos corixos e vazantes do Pantanal próximo. A luminosidade intensa e o calor escaldante se infiltram no desenho da cidade, na sua paisagem de entorno, ajudando a compor o equilíbrio telúrico do ambiente cuiabano. (FREIRE, 1997)

Assim como em outras regiões percebe-se uma preocupação de adaptação ao meio, desde o início da ocupação da cidade, seja pelos costumes locais, pelas construções ou pela configuração do espaço urbano. As ruas estreitas da Cuiabá colonial, sob influência árabe-espanhola-lusitana, servindo de defesa contra o calor, confirmam isso.

Também a arquitetura tipicamente colonial, introduzida pelos portugueses, sofreu algumas alterações, atribuindo-lhe características peculiares. Segundo Freire (1997), as primeiras casas seguem o padrão paulista do século XVIII: casas implantadas sobre o alinhamento das ruas e limites laterais do terreno, umas coladas às outras; fachadas estreitas reproduzindo um único padrão, pé-direito baixo, beirais trabalhados, portas e janelas abrindo-se diretamente sobre as ruas e telhados de duas águas, com caídas para a rua e para o quintal. Já no século XIX, as residências construídas pela classe dominante apresentavam certas características, que devido à regularidade de sua reprodução, configuram o estilo tradicional que iria marcar a casa cuiabana. “Embora conservando em sua fisionomia traços da casa paulista em que se inspirou, a casa cuiabana traz a novidade do pé-direito alto, diferenciando-se das casas do século XVIII [...]” (FREIRE, 1997). O pé-direito alto, de aproximadamente 4 (quatro) metros ou mais e o telhado composto de telhas de barro, geralmente sem forro, permitia a aeração, tornando-a adequada ao clima quente da região. A fachada era encimada pelos beirais que apoiavam as bocas de telhas coloniais que, mais tarde, no século XX, com a influência de italianos, foram substituídos pela “platibanda”. “Os beirais cuiabanos apresentavam vários tipos, havendo os de um recorte, de dois e até de três recortes, sendo que estes últimos são seguramente raríssimos nas demais cidades históricas do Brasil” (PÓVOAS, 1980).

Outra característica considerada marcante na arquitetura das casas cuiabanas é a presença dos “quintais”, muitas vezes transformados em pomares com mangueiras, cajueiros, abacateiros, e outras árvores frutíferas da região, que ajudavam a amenizar o rigor climático.

Quanto aos materiais utilizados, eram, em sua maioria, produzidos e extraídos dos arredores da cidade. Assim, a madeira usada em soleiras, portais, soalhos, portas, janelas e na estrutura das paredes (quando havia) e dos telhados, resultava do aproveitamento de madeiras locais, como a sucupira, aroeira e cedro. A taipa socada foi muito utilizada para a construção das largas paredes,

sendo substituída gradativamente pelo adobe. As telhas de barro, com diferentes tamanhos, desde as mais ricas às mais simples, eram produzidas pelas olarias próximas de Cuiabá. Os menos abastados continuavam a morar em casas de palha. Outros materiais, abundantes na região, eram usados em diferentes aplicações, como a “pedra canga” ou “pedra cristal” nos alicerces, e o “tijolo batido”, passando-se posteriormente ao uso do “mosaico” (ladrilho hidráulico), de diferentes cores e belos desenhos, nos pisos.

A partir da segunda metade do século XX, com a abertura das rodovias e, portanto, o fim do isolamento da capital matogrossense e o conseqüente crescimento econômico desta, houve um violento processo de transformação da velha cidade colonial. Aos poucos foram introduzidos novos padrões, com o uso de novos materiais e técnicas construtivas mais sofisticadas, reproduzindo os modismos dos grandes centros, independentemente da disponibilidade de materiais locais e das características climáticas (FREIRE, 1997).

3.3. O avanço tecnológico das coberturas

A arquitetura contemporânea reflete os avanços tecnológicos da Revolução Industrial. O desenvolvimento crescente da tecnologia trouxe à construção civil muitas inovações relacionadas aos materiais e técnicas, levando a uma mudança significativa do processo da construção, desde a fase de projeto até sua execução. O avanço no segmento de coberturas permitiu vencer desafios construtivos, em se tratando de prazos e facilidades de execução, conforto ambiental, segurança, economia, estética e resistência mecânica. Diversos tipos de edificações, principalmente as comerciais, como shoppings centers que se tornaram referencial de implantação de novos tipos de coberturas, obtêm destaque em suas diferentes formas, que vencem vãos progressivamente maiores e descrevem desenhos e curvas cada vez mais flexíveis.

[...] Não fosse o desenvolvimento tecnológico que vem sendo aplicado ao segmento de coberturas e marquises, muito do que hoje está construído com certeza não teria saído do papel. Às propostas inovadoras do desenho arquitetônico, o mercado responde com soluções tecnicamente viáveis, num movimento crescente de novas possibilidades construtivas. (COBERTURAS..., 2005)

O que se percebe, no entanto, é uma preocupação por parte dos fabricantes, profissionais da construção civil e empreendedores voltada predominantemente às questões de inovação na forma, estética, manutenção e custo, deixando as questões ambientais em segundo plano. Este quadro, porém, vêm mudando há cerca de 15 (quinze) anos, com o crescente investimento em pesquisa direcionada às questões de desempenho térmico e eficiência energética, sendo estes aspectos considerados hoje de grande relevância.



Fig. 27 e Fig. 28: Coberturas dos Shoppings Market Place, em São Paulo (esq.); e Flamboyant, em Goiânia (dir.). (Fonte: DÂNICA. Disponível em: <<http://www.danicacorporation.com>>. Acesso em 26 de julho de 2007)

O surgimento contínuo e a rápida propagação de novos materiais e técnicas, aliado aos paradigmas sócio-culturais do movimento pós-modernista, levou à adoção de um estilo internacional, separando a arquitetura de suas peculiaridades regionais. A consequência disto é notável nas práticas correntes dos escritórios de arquitetura, que se caracterizam pela despreocupação em se buscar estratégias passivas, ou seja, recursos arquitetônicos que se utilizam das propriedades termofísicas dos materiais, assim como dos mecanismos físicos naturais. A facilidade em se controlar o ambiente interno por meio de mecanismos artificiais levou ao uso indiscriminado deste recurso, em substituição aos mecanismos naturais, gerando grandes problemas ambientais nos centros urbanos, devido ao alto consumo de energia e de qualidade do ar no interior dos edifícios, por falta de manutenção adequada.

Diante dos problemas de impacto ambiental, aquecimento global e escassez de recursos naturais, diversos novos materiais e componentes de cobertura e subcobertura foram lançados no mercado buscando-se soluções mais eficientes energeticamente, de menor impacto ambiental e de melhor custo-benefício. Cresce a conscientização quanto a estes problemas nos países desenvolvidos e, em menor proporção, nos países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil e, com ela, surgem diversas ferramentas de controle, por parte dos governos, quanto ao consumo de energia e impacto ambiental em edificações, considerando-se todos as fases construtivas, desde a extração das matérias-primas, a fabricação dos materiais, o transporte destes, a construção, a remoção de entulho, o uso e a demolição do edifício. Desta forma, os fabricantes e projetistas se vêem obrigados a buscar novas alternativas em busca da sustentabilidade, retomando as preocupações de adequação climática do edifício.

4. TROCAS TÉRMICAS EM COBERTURAS

A cobertura sendo o elemento da edificação mais exposto ao meio exterior, com o qual ocorrem as trocas térmicas, torna-se o principal elemento responsável pelo aquecimento ou resfriamento dos ambientes internos. Os fenômenos físicos de trocas térmicas, ou seja, a radiação, evaporação, convecção e condução ocorrem em maior ou menor intensidade de acordo com as propriedades termofísicas dos materiais da envolvente e as condições climáticas do local. Conhecendo-se as propriedades dos materiais e os fenômenos físicos é possível intervir nas trocas térmicas, em busca de um melhor desempenho térmico e condições mais favoráveis de conforto para o interior das edificações, sem recorrer à climatização artificial. Para uma melhor compreensão quanto às possibilidades de intervenção, deve-se recordar a classificação das funções da cobertura adotadas neste trabalho, de acordo com os conceitos de Yannas, Erell e Molina (2006), que fazem distinção entre as funções de proteção e seletividade. Em síntese, entende-se por função de “proteção” como o controle da transferência de calor, enquanto a função de “seletividade” se refere aos mecanismos de resfriamento passivo ou de baixo consumo de energia para a dissipação de calor acumulado na cobertura.

A principal função da cobertura em uma edificação é a proteção contra as intempéries, tais como chuva, sol, vento e as variações de temperatura do ar externo, proporcionando aos usuários privacidade e conforto. Um projeto adequado de cobertura deve controlar a ação destes agentes visando satisfazer as condições de conforto do usuário. Quando os mecanismos de proteção da cobertura não são suficientes para se atingir tais condições, pode-se ainda, antes de recorrer aos equipamentos de refrigeração, buscar os mecanismos de seletividade da cobertura, que consistem em técnicas passivas complementares de resfriamento. A ação combinada de ambas funções pode trazer resultados satisfatórios, diminuindo ou eliminando os custos elevados com a climatização artificial. A seguir serão abordadas mais detalhadamente cada uma destas estratégias.

4.1. Estratégias de proteção

A radiação solar que incide nas coberturas é parcialmente absorvida por suas superfícies externas e parcialmente refletida, retornando ao meio. Quanto maior a absorção, maior será a temperatura superficial da cobertura e, conseqüentemente, a transferência de calor para o interior da edificação, causando o aquecimento do ar interno e, muitas vezes, o desconforto dos usuários. Algumas medidas para o controle de transferência de calor até o ambiente interno serão apresentadas a seguir.

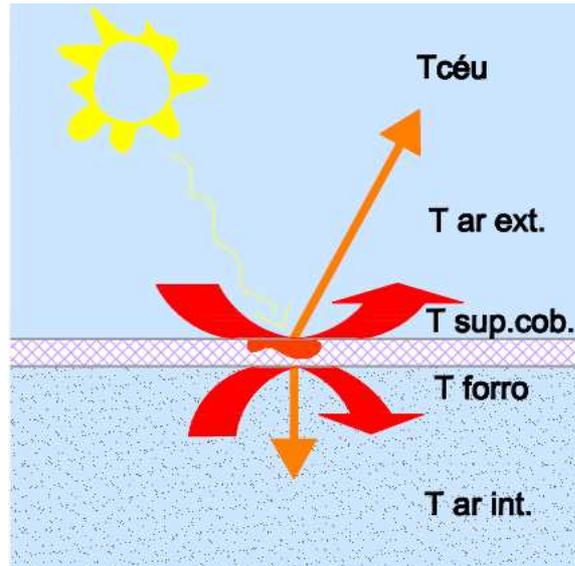


Fig. 29: Processos térmicos na superfície externa e interna de cobertura plana. (BUTTNER, S.)

4.1.1. Controle Solar

O controle solar consiste em medidas nas quais se reduz a incidência da radiação solar direta, implicando em uma menor absorção da radiação pela superfície externa. Seguem alguns exemplos:

- **Definição da orientação, inclinação e área de superfície das coberturas.**

Quanto maior a área de cobertura, maior será a sua exposição e, no caso de coberturas inclinadas, a orientação das águas interfere diretamente na quantidade de radiação incidente. Esta medida apresenta resultados mais notáveis em coberturas inclinadas, tais como de residências, não havendo muita opção no caso das coberturas planas, como é o caso da maioria das coberturas comerciais, que são o foco deste trabalho.

- **Escolha da cor e acabamento das superfícies externas.**

Cores claras e materiais de acabamento polido aumentam a reflexão da radiação, contribuindo também com a redução da absorção de calor pela superfície da cobertura.



Fig. 30 (esq.) e Fig. 31 (dir.): Santorini: Coberturas brancas e em forma de abóbada são características tradicionais na arquitetura grega. (Foto: KRONKA, R.)

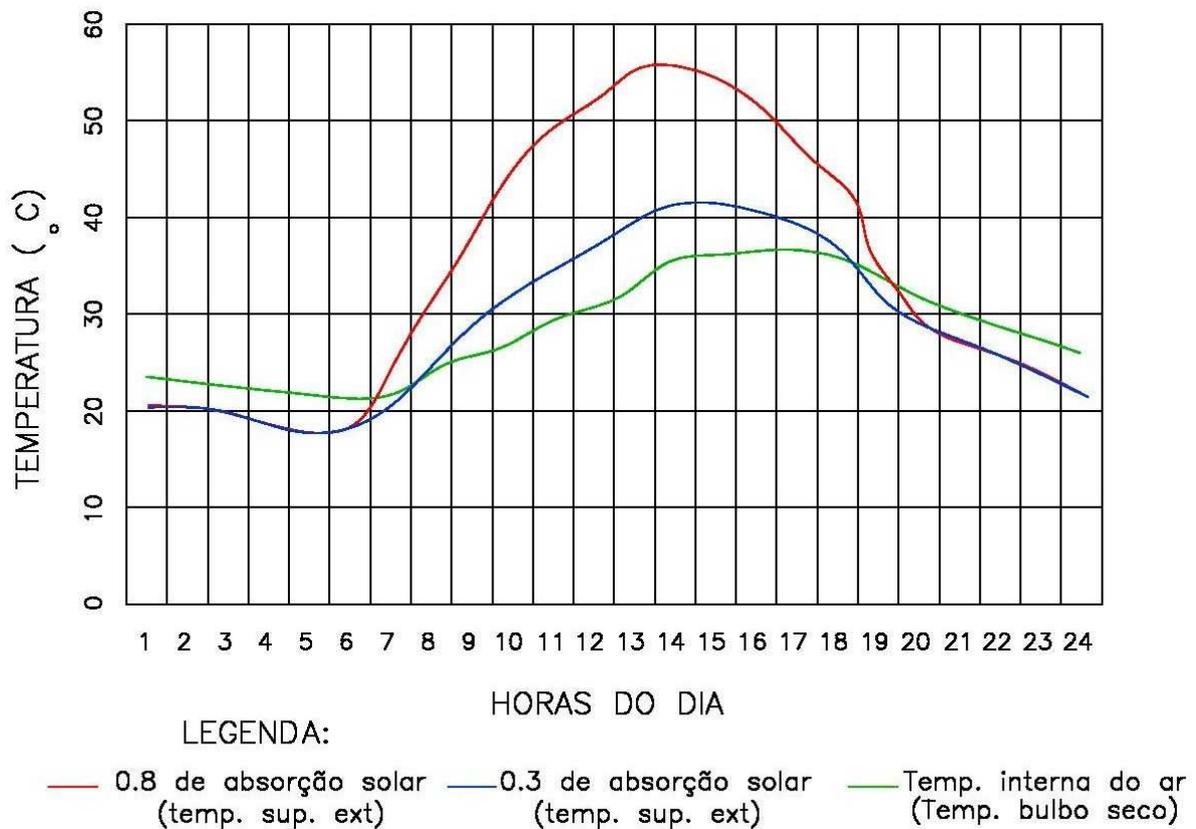


Fig. 32: Gráfico demonstra a influência da absorção solar, durante o dia, nas temperaturas do ar ambiente e das temperaturas superficiais da cobertura de 0,3 e 0,8 de absorção solar, para Atenas / Grécia, no verão. (Fonte: YANNAS, ERELL; MOLINA, 2006)

- **Sombreamento da Cobertura.**

Apresenta grande contribuição ao controle solar, reduzindo a incidência de radiação direta. Pode-se sombrear coberturas por meio de vegetação, elementos vazados, coberturas têxteis e por meio de outro componente de cobertura.



Fig. 33: Cobertura sombreada parcialmente por lâminas de madeira, na Itália. (Fonte: YANNAS;ERELL; MOLINA, 2006)

4.1.2. Isolamento Térmico

As trocas térmicas que ocorrem entre os elementos construtivos e o ambiente externo dependem da diferença entre a temperatura interna e externa, da espessura e das propriedades térmicas dos materiais de vedação. A aplicação de isolamento térmico elimina ou reduz as trocas, favorecendo o conforto interno.

No entanto, algumas aplicações inadequadas costumam ser encontradas na prática devido ao equívoco quanto à definição de isolamento. É fundamental discernir os materiais isolantes convencionais dos novos materiais, também vulgarmente denominados “isolantes” pelo mercado, porém com propriedades diferentes e, com isso, aplicações também distintas daqueles.

Para uma melhor compreensão dos fenômenos físicos envolvidos, vale lembrar que a radiação incidente na superfície da cobertura é transmitida por condução, convecção ou radiação.

[...] Ao projetista da edificação, cabe reduzir esta trocas térmicas atuando sobre os elementos e componentes de vedação. Sua possibilidade de ação sobre as parcelas convectivas, em geral, é limitada, pois esta depende fortemente da incidência de vento, restando como alternativa a atuação sobre as componentes condutiva e radiante. (VITTORINO; SATO; AKUTSU, 2003).

Tradicionalmente o termo “isolamento” se refere à resistência à passagem do fluxo de calor por condução, que pode ser melhor compreendido fazendo-se uma analogia com os conceitos de eletricidade: quanto maior a resistência elétrica, menor será a intensidade da corrente. Na isolação térmica, quanto maior a resistência térmica fornecida pelo sistema isolante, menor será a transmissão de calor. A norma francesa NF P 75-01¹⁴ considera esta definição, enquanto a norma ASTM C 168/01¹⁵, mais abrangente do que a norma francesa, define isolante térmico como “um material ou produto utilizado com a finalidade de fornecer resistência à transferência de calor”. Neste contexto, além dos isolantes resistivos tradicionais, são considerados também isolantes térmicos os materiais ou produtos que diminuem qualquer uma das três formas de troca de calor (condução, convecção e radiação) (VITTORINO; SATO; AKUTSU, 2003). Como não há normas que regulamentam estas questões no Brasil, serão usadas neste trabalho as definições de acordo com a norma ASTM C 168/01, considerando como isolamento toda a forma de redução do fluxo de calor, englobando os materiais isolantes resistivos, refletivos e as barreiras radiantes.

Os materiais isolantes convencionais (resistivos) apresentam a característica de baixa densidade (10 – 30 Kg/m³) e baixa condutividade térmica (geralmente entre 0,025 – 0,040 W/m²K). A aplicação deste mecanismo só é eficiente quando a transferência de calor se dá por condução.



Fig. 34: Fibras Minerais e Fig. 35: Aplicação de espuma para isolamento de cobertura. (Fonte: catálogo impresso - THERMAX / Rockfibras – Isolantes Térmicos e Acústicos)

¹⁴ ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALIZATION. Isolants thermiques destinés au bâtiment – Definition, NF P 75-01. Saint-Denis La Plaine, 1983.

¹⁵ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1997, 200, 2001

Quanto aos sistemas utilizados para reduzir as trocas de calor por radiação, as normas internacionais fazem distinção entre os isolantes refletivos e as barreiras radiantes. Ambos dependem das características superficiais do material, abrangendo as pinturas refletivas e os materiais com baixa emissão de radiação de onda longa. Contudo, as pinturas refletivas não são, normalmente, contempladas em conjunto com os materiais com baixa emissão de radiação por terem características específicas de produtos de revestimento, como “poder de cobertura”, “rendimento na aplicação”, etc.

As pinturas refletivas têm como parâmetro a alta capacidade de refletir a radiação incidente, diminuindo a absorção de calor pelo componente, e conseqüentemente a sua transmissão para o ambiente interno. Os “refletivos” somente atuarão como isolantes resistivos, se associados a um sistema mais elaborado, com câmara de ar parado ou isolante resistivo, adequadamente projetado e aplicado, além de uma adequada manutenção.

Já as barreiras radiantes reduzem a transferência de calor por radiação de onda longa e consistem em materiais de baixa emissividade, posicionados no elemento construtivo de tal forma que estejam voltados para um “ambiente”, que pode ser o espaço do ático, com ou sem ventilação, ou os recintos habitáveis. O desempenho do produto é definido em cada caso, pela interação da barreira com as outras superfícies e depende das características superficiais do material a ser usado como barreira radiante.

Para que um sistema de isolamento por radiação (refletivos e barreiras radiantes) seja eficiente, a superfície deverá sempre permanecer limpa, sem pó, gordura, corrosão ou água de condensação, pois qualquer alteração na superfície original causará um aumento significativo da emissividade, ou diminuição da refletância, diminuindo o poder de isolamento. Danos, tais como rasgos e furos, também resultarão na perda de performance do isolamento refletivo (VITTORINO; SATO; AKUTSU, 2003).



Fig. 36 (esq.) e Fig. 37 (dir.): Residência em Pinheiros -SP: Exemplo de aplicação equivocada da barreira radiante, que deve ser instalada do lado interno da cobertura. (Foto: Büttner, S.)

4.1.3. Capacidade Térmica

A envoltória do edifício armazena calor em sua massa, estabilizando a temperatura interna dos recintos em relação às flutuações da temperatura externa. Esta capacidade do material é denominada capacidade térmica, e está relacionada à densidade (Kg/m^3), ao volume (m^3) e ao calor específico ($\text{J}/\text{Kg}^\circ\text{C}$ ou $\text{Wh}/\text{Kg}^\circ\text{C}$) do mesmo, sendo expressa em $\text{J}/^\circ\text{C}$ ou $\text{Wh}/^\circ\text{C}$.

Esta propriedade está relacionada à inércia térmica de um componente da envoltória que, por sua vez, está associada a dois fenômenos do comportamento térmico do edifício: o amortecimento e o atraso da onda de calor, que são responsáveis por diminuir e retardar, respectivamente, o fluxo de calor que penetra no componente, aquecendo-o internamente antes de atingir o ambiente interno. Portanto, a aplicação de materiais espessos, densos e de alto calor específico, favorecem a inércia térmica da edificação. Regiões de clima quente e seco, com significativa amplitude térmica, como é o caso dos climas áridos e desérticos, adotam este recurso devido às oscilações climáticas externas.

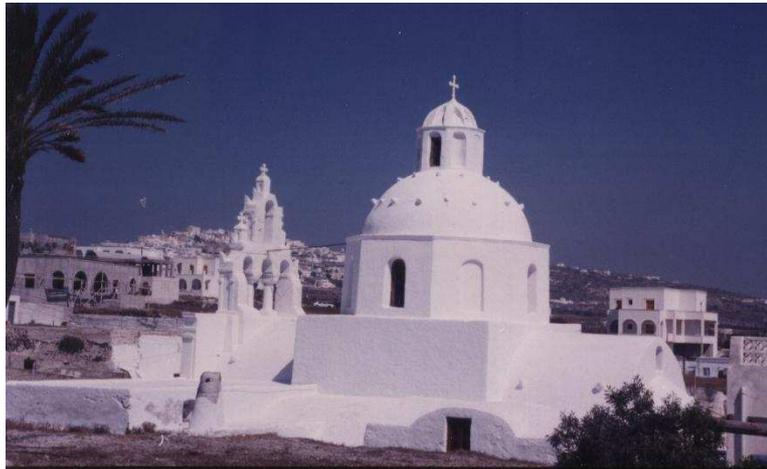


Fig. 38: Edificações com massa térmica, em Santorini (Grécia). (Foto: KRONKA, R.)

4.2. Estratégias de resfriamento complementares (Seletividade)

Conforme mencionado anteriormente, em algumas situações extremas, a proteção da cobertura favorece o conforto do usuário na edificação, porém nem sempre é suficiente para se atingir os níveis desejáveis. Assim, recorre-se a estratégias passivas para a dissipação do calor acumulado no sistema de cobertura, que ocorrem por meio dos mecanismos de trocas térmicas - radiação, evaporação, convecção e evapo-transpiração das plantas, quando existentes.

Técnicas construtivas adequadas, aliadas às propriedades termofísicas dos materiais podem proporcionar a melhoria do desempenho térmico e conforto do ambiente construído e, conseqüentemente, o uso racional da energia para climatização artificial em certas condições climáticas, pois propiciam a menor transferência de calor, proveniente principalmente da radiação solar, para o interior das construções. Estas técnicas podem ser manipuladas através do uso da água, da

emissividade do material empregado ou da otimização da ventilação, a exemplo das pesquisas realizadas em diferentes locais como: Israel, Estados Unidos, México e Japão por Baruch Givoni. (TEIXEIRA; LABAKI; TAVARES, 2005).

A seguir serão mencionadas algumas estratégias passivas, ou de baixo consumo de energia, que atenuam a carga térmica proveniente da cobertura, com exemplos de aplicações nacionais e internacionais nas quais se busca usufruir das propriedades termofísicas dos materiais e componentes, visando apresentar soluções alternativas à climatização artificial, que predomina nas práticas correntes, ou mesmo soluções para maior eficiência energética de ambientes climatizados.

É importante lembrar que as técnicas utilizadas se baseiam nos fenômenos físicos de trocas térmicas de maneira integrada, ou seja, técnicas que aliam trocas por radiação, convecção e evaporação em um único sistema, além de adotar princípios de proteção, como o isolamento, a massa térmica e o sombreamento, por exemplo.

4.2.1. Resfriamento Radiante

A radiação solar direta incide em determinada superfície em forma de ondas curtas; porém, ao refletir-se, é reemitida sob a forma de ondas longas. Durante o dia, a radiação absorvida é significativamente superior à capacidade de emissão de ondas longas, por isso o aquecimento excessivo das superfícies externas. No entanto, ao anoitecer, não mais recebendo a radiação solar, somente radiação de ondas longas da abóbada celeste, as superfícies aquecidas resfriam-se por meio da emissão de radiação de ondas longas. Este resfriamento depende da diferença entre a radiação recebida e emitida e, portanto, das condições climáticas locais, tais como nebulosidade e umidade do ar. Quanto mais desobstruído o céu (sem nuvens), e menor a umidade, maior a facilidade de dissipação das ondas longas, pois o vapor d'água presente no ar absorve a radiação emitida, prejudicando a dissipação destas pelas superfícies. A cobertura é o elemento do edifício que mais se beneficia do resfriamento por radiação, devido à visão que se tem da região zenital, favorecendo por este motivo as coberturas planas, que devem ser revestidas por materiais com alto albedo e baixa emissividade. As paredes também dissipam calor, porém em quantidade menor devido ao ângulo de visão do céu que é menor.

O resfriamento radiante está relacionado à refletância e à emissividade da superfície, ou seja, refere-se à cor e ao acabamento (polido, fosco, etc.) da mesma. Um estudo realizado por Akutsu e Sato (1988) demonstra que, variando-se a cor de uma superfície exposta à radiação solar, altera-se a quantidade de energia solar absorvida por essa superfície: Quanto mais escura uma superfície, maior a quantidade de energia solar absorvida, o que contribui para aumentar a temperatura da envolvente do edifício e, conseqüentemente, a temperatura do ar no ambiente interno.

O resfriamento radiante se dá pelo próprio componente construtivo, com propriedades de alta emissividade, ou por um componente dotado de um fluido, o ar ou a água, que dissipa o calor. Estes são chamados de radiadores, que consistem em painéis instalados na cobertura com a função de emitir

calor para o céu, à noite, por meio da radiação de ondas longas. O resfriamento ocorre, então, pelo processo de radiação, e quando a superfície se encontra mais quente que o ar, pelo processo de convecção também. Durante o dia, a transferência de calor do radiador para o espaço ocupado deve ser inibida, por meio de um material isolante, por exemplo. Em situações onde é necessário o resfriamento no período diurno, deve-se prever um sistema de armazenamento do ar resfriado no período noturno, usando a massa térmica para este fim. O resfriamento do ar interno se dá também por meio do contato direto entre o radiador e o ambiente, porém este procedimento se limita ao período noturno.

Existem diversos tipos de radiadores, podendo-se classificá-los, conforme o fluido, em radiadores à base de água ou à base de ar, e ainda o radiador denominado por seu inventor, o americano Harry Thomason, de “Trickle Roof” (YANNAS; ERELL; MOLINA, 2006). Este último consiste numa cobertura inclinada, umidificada por uma fina camada de água escorrendo na superfície de alta emissividade, que é resfriada pelo contato da água e pela evaporação. A água resfriada é armazenada em tanques providos de isolamento e durante o dia é conduzida através de dutos nos forros ou pisos, resfriando assim o ambiente interno.

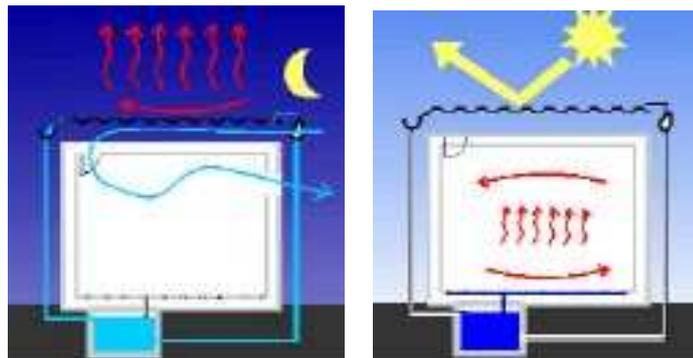


Fig. 39 e Fig. 40: Princípio básico do resfriamento por meio de radiadores, à noite (esq.), e durante o dia (dir.) (Fonte: YANNAS; ERELL; MOLINA, 2006)

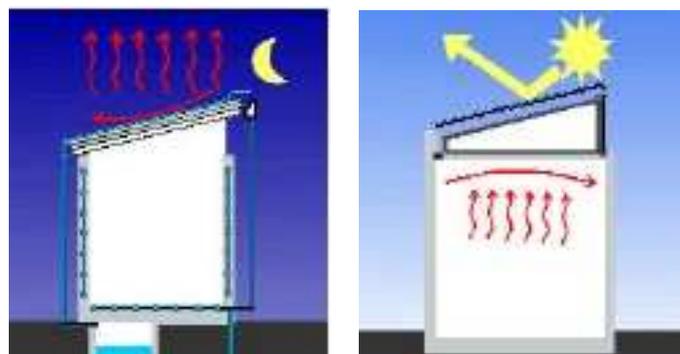


Fig. 41 e Fig. 42: “Trickle Roof”: Água escorre sobre a cobertura, é resfriada a noite e armazenada em tanques (esq.). Durante o dia, a água armazenada circula nas vedações dos ambientes, resfriando as superfícies, e, conseqüentemente, o ambiente interno (dir.). (Fonte: YANNAS; ERELL; MOLINA, 2006)

Quanto aos radiadores à base de ar, Givoni (1994) propôs o seguinte sistema: uma cobertura com pouca massa térmica e um forro composto por painéis isolantes rotacionáveis, ora na posição

horizontal, ora na vertical. Durante o dia, o painel, na posição horizontal, isola o ambiente da carga térmica, enquanto à noite, os painéis, rotacionados na posição vertical, permitem o contato do ambiente com a cobertura que, devido à pouca inércia, resfria-se rapidamente, resfriando também o ambiente por convecção e radiação. As vantagens estão no baixo custo e fácil instalação, porém o resfriamento é modesto, se comparado aos radiadores à base de água.

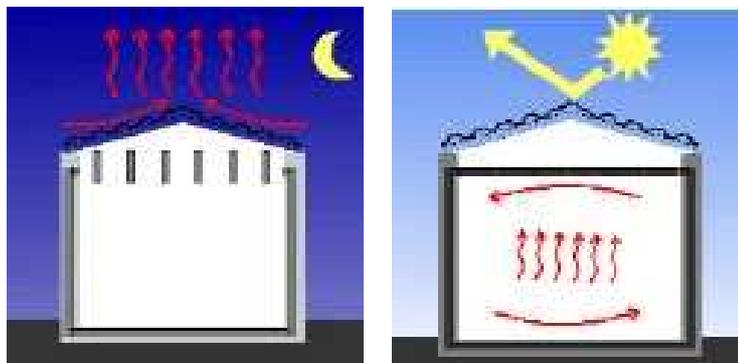


Fig. 43 e Fig. 44: Modelo de radiador à base de ar: à noite painéis isolantes se mantêm na posição vertical, resfriando o ambiente por meio da radiação de ondas longas e convecção (esq.). Durante o dia, refletância e isolamento protegem o ambiente interno da carga térmica (dir.). (Fonte: YANNAS;ERELL; MOLINA, 2006)

Para os radiadores à base de água existem variadas formas de aplicações, podendo integrar as estratégias de radiação com convecção e evaporação, e ainda proporcionar estratégias como o isolamento, a refletância e/ou o sombreamento para a proteção da cobertura. Em geral, estes radiadores funcionam em conjunto com tanques d'água, cujos princípios serão abordados no tópico seguinte deste texto. Como exemplo, pode-se citar um estudo realizado em Israel por Erell e Etzion¹⁶ (1996, *apud* YANNAS, 2006), no qual se testou um sistema de cobertura dotado de um tanque raso de água (100 - 150 mm), sombreado por painéis radiadores fixados acima desta, devidamente isolados termicamente. Um sistema de baixo consumo elétrico bombeia a água do tanque aos painéis, circulando-a por meio de dutos à noite, período em que ocorre o resfriamento da água e a dissipação do excesso de calor do edifício pela radiação de ondas longas e por convecção (ver Fig. 05 no capítulo 02). A água quando chega ao radiador (antes de se resfriar), torna-o relativamente quente, aumentando as perdas radiativas e eliminando os ganhos convectivos. A água do tanque também favorece a massa térmica da edificação e a sua cobertura com material isolante o protege dos ganhos solares provenientes dos painéis radiadores (ver explicação mais adiante). Nota-se a integração de diversos mecanismos (radiação, convecção, isolamento térmico, sombreamento e capacidade térmica) agindo em um único sistema de maneira eficaz.

Os radiadores podem apresentar diferentes variações em se tratando do material utilizado (propriedades radiativas das superfícies), volume do fluxo de água, diâmetro e espaçamento entre os dutos, inclinação dos painéis e parâmetros operacionais de projeto. Estes parâmetros são diferentes

¹⁶ ERELL E.; ETZION, Y. Heating experiments with a radiative cooling system. Building & Environment, 1996.

para radiadores à base de ar e de água e são decisivos para o bom funcionamento dos mecanismos previstos, comprovando, mais numa vez, a importância do conhecimento dos princípios físicos nas decisões de projeto. Um detalhe que pode se tornar um ponto crítico neste tipo de sistema, decorrente de falhas no projeto, é o fato de que o radiador não deva se aquecer mais que qualquer outro componente construtivo, evitando que se torne uma fonte de calor, ao invés de favorecer a sua dissipação. Por outro lado, se a superfície for mais fria que o ar adjacente, haverá ganho de calor por convecção, o que também deve ser evitado.

4.2.2. Resfriamento Evaporativo

A evaporação, processo em que a água passa do estado líquido para o gasoso, dá-se pela absorção de calor do ar circundante, que se torna mais frio e úmido. A energia requerida para este processo é denominada de calor latente de vaporização, e quando ocorre com o ar circundante é conhecida como adiabática. Dependendo das condições climáticas, é possível resfriar significativamente o ar, em especial em climas quentes e secos, pois o aumento excessivo da umidade provoca desconforto, além de que, quanto maior a umidade do ar, menor a capacidade de evaporação.

Kishore (1988), em estudos realizados na Índia nas cidades de New Delhi e Madras, constatou que o resfriamento evaporativo é altamente eficiente em clima quente e seco, onde a umidade relativa é baixa. Contudo, na possibilidade de se obter melhores condições de conforto térmico e redução da carga de ar condicionado, o sistema não deve ser descartado em locais de clima quente e semi-úmido.

Diferentemente do resfriamento radiativo, cujo potencial ocorre durante a noite, o resfriamento evaporativo tem seu pico no período diurno, sob temperaturas do ar mais altas e umidades mais baixas, podendo se estender também ao período noturno, por meio de duas maneiras:

- **Resfriamento Direto**

Consiste no resfriamento da camada de ar mais próxima da aspensão d'água, por meio da evaporação. Quanto menor a gota d'água, maior a superfície de contato entre a gota e o ar e, conseqüentemente, melhor o efeito. Quando aplicado sob coberturas resfria o ar adjacente por evaporação e, conseqüentemente, a superfície, por convecção.



Fig. 45: Resfriamento direto na World Expo, Sevilha – Espanha (esq.) e Fig. 46: Aspersão d'água sob cobertura, em espaços abertos – 1992 World Expo, Sevilha – Espanha (dir.) (Fonte: GUERRA, 1994)



Fig. 47: Resfriamento direto na World Expo, Sevilha - Espanha. (Fonte: GUERRA, 1994)

▪ Resfriamento Indireto

Consiste no resfriamento de superfícies ou elementos construtivos que, estando mais frios, absorverão o calor do ar adjacente, resfriando-o também. O resfriamento indireto de coberturas se dá por meio de tanques ou lâminas d'água, apoiados sobre uma cobertura plana, ou por meio da aspersão d'água sobre a superfície exposta ao clima quente e seco; essa água aspergida, ao se evaporar, resfria tanto o ar quanto a superfície. Esta técnica relaciona-se diretamente às condições de saturação de umidade do ar ambiente.

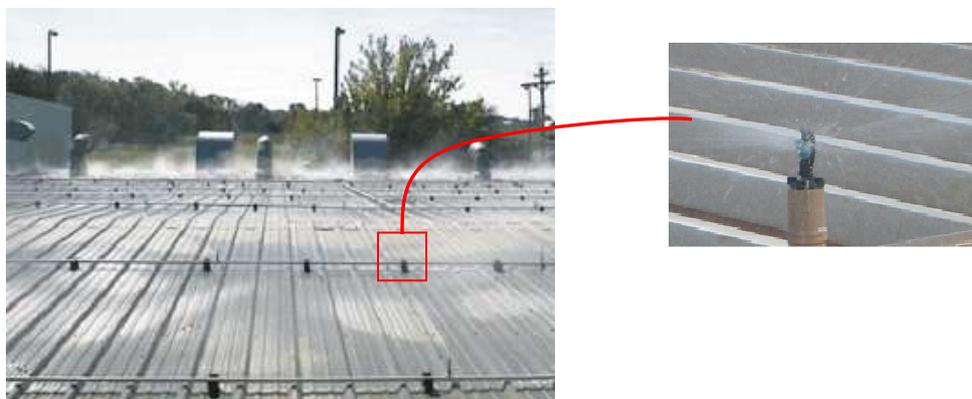


Fig. 48: Resfriamento de superfícies por meio de aspersão d'água. (Fonte:CLIMATIZAÇÃO EVAFRIO. Disponível em:<http://www.adesso.com.br>. Acesso em: 28 de janeiro de 2008)

O sistema de resfriamento com o uso dos tanques d'água demonstra uma grande eficiência para se alcançar estabilidade térmica no interior de edificações, perante as flutuações do clima externo. Seu princípio consiste no aumento da massa térmica da cobertura (o calor específico da água é maior do que o do ar e de muitos materiais, como o concreto, por exemplo), armazenando o calor recebido durante o dia e dissipando-o no período noturno por meio da radiação de ondas longas (ver fig. 49). É importante que a água se mantenha fria, evitando-se que esta seja mais uma fonte de calor; isto é possível com a circulação ou a aspersão da água. A evaporação e a convecção também contribuem para o resfriamento tanto do ar adjacente quanto da própria água. Para resultados mais eficientes, é recomendável que se utilize a base de suporte dos tanques com material de alta condutibilidade, favorecendo a transferência do calor dos espaços habitados para o volume de água, que o armazenará e dissipará por meio da radiação, convecção e evaporação. Do lado externo é desejável o uso de uma cobertura com propriedades isolantes durante o dia, visando a proteção contra a radiação solar, enquanto a noite é preferível a sua remoção para promover a dissipação do calor para o céu.

Os tanques podem ser aplicados tanto em edificações térreas quanto em múltiplos pavimentos, entre as lajes, apresentando a desvantagem quanto à mão-de-obra especializada requerida, manutenção (riscos de contaminação da água) e peso conferido à estrutura do edifício. Não é um sistema convencional, havendo poucos exemplos de aplicação, nenhum deles encontrados no Brasil¹⁷. Porém, o mesmo merece ser mencionado como estratégia alternativa, em que se combinam mecanismos de massa térmica, isolamento, resfriamento evaporativo, convectivo e radiativo, agindo simultaneamente em um único sistema e somando seus efeitos.

Seu funcionamento permite tanto o resfriamento, quanto o aquecimento, dependendo de algumas variáveis de projeto; porém, o foco aqui é voltado ao resfriamento. Os principais parâmetros projetuais estão relacionados à profundidade da camada de água, à absorção da superfície do fundo, às propriedades termofísicas (condutibilidade) da base de apoio, à presença ou ausência de cobertura e suas propriedades (resistência térmica), assim como à flexibilidade que permite cobri-los em determinados períodos e, por último, às características do sistema de circulação ou aspersão, que tem grande influência no funcionamento do sistema como um todo. Por isso, exigem o devido cuidado para a sua correta especificação e instalação.

Nos Estados Unidos estão alguns exemplos de aplicação dos “tanques d'água”, principalmente na Califórnia, no Texas e no Arizona, em especial na forma de “pacotes” fechados de pvc. Também na Espanha se tem alguns registros, como a Universidade Pompeu Fabra, em Barcelona, cuja água é depositada sobre tanques abertos e dotada de sistema para sua circulação, e uma instalação experimental em Almeria, dotada de sistema de aspersão d'água. Todos estes exemplos são de cidades quentes e secas.

¹⁷ Uma possível explicação pode estar no risco de contaminação da água, apresentado por este sistema, já que o país passa por grandes problemas relacionados à saúde pública, ou pela própria dificuldade de manutenção e devido à mão-de-obra precária.

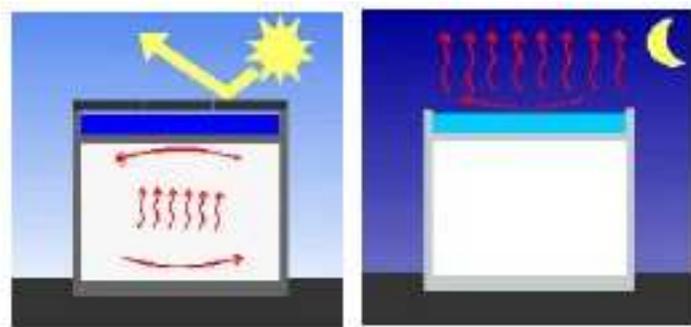


Fig. 49: Resfriamento por meio de tanques d'água em coberturas, período diurno e noturno, respectivamente. (Fonte: YANNAS; ERELL; MOLINA, 2006)



Fig. 50: Etapas da instalação experimental do tanque d'água com sistema de aspersão de água, em Almeria, Espanha. (Fonte: YANNAS; ERELL; MOLINA, 2006)

4.2.3. Resfriamento Convectivo

A ventilação é responsável pela renovação de ar necessária para garantir a saúde e a higiene dos ocupantes em edifícios. Neste processo, que consiste na troca da taxa de ar entre ambiente interno e externo, podem ocorrer perdas ou ganhos de calor para o edifício, dependendo da diferença de temperatura do ar entre os ambientes. Assim, quando a troca de ar ocorre além daquela necessária para a renovação do ar, a ventilação pode servir como estratégia de resfriamento ou aquecimento dos ambientes construídos. Em situações de clima quente, onde o ar externo é mais quente que o interno, deve-se ater para que o suprimento do ar não prejudique as condições de conforto interno. Porém, quando o ar externo é mais ameno em relação ao interno, é desejável que se promova a troca abundante do volume de ar, permitindo o resfriamento da estrutura da edificação, assim como do ar interno. Em climas de verão intenso isto só se torna possível à noite, quando as temperaturas são mais baixas.

A ventilação no edifício se dá por dois processos: a ação dos ventos, resultante da diferença de pressão (positiva ou negativa) formada na superfície das envoltórias; e o efeito chaminé, que ocorre devido à diferença entre a densidade do ar interno e externo ou entre duas zonas internas. Geralmente, a ação dos ventos permite uma maior troca de ar, desde que as aberturas de entrada estejam voltadas para a direção dos ventos (zona de pressão positiva). Já o efeito chaminé é mais eficiente quanto maior a diferença de altura entre a entrada e a saída de ar, e quanto maior a diferença entre as temperaturas interna e externa do ar, o que ocorre mais notoriamente em climas frios, em locais com grandes fontes

de calor interno, ou em climas quentes no período noturno.

A ventilação por meio de aberturas na cobertura pode servir de estratégia de resfriamento, tanto da superfície desta, quanto do ar interno, ao remover a carga térmica. A superfície resfriada minimiza a transferência de calor por radiação e convecção ao ambiente interno, contribuindo indiretamente para a melhoria das condições internas de conforto.

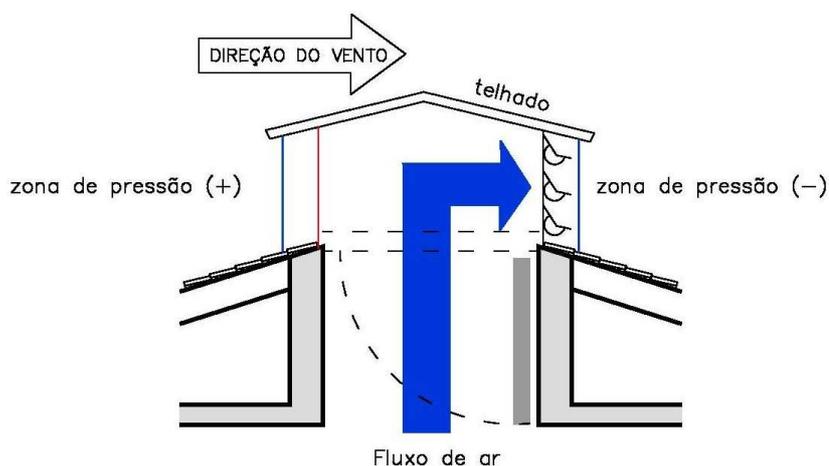


Fig. 51: Diferença de pressão e ventilação por meio de aberturas em coberturas. (BUTTNER, S.)

Em se tratando de ventilação por ação dos ventos, a inclinação da cobertura determina as zonas de pressão. Portanto, coberturas inclinadas devem ter as aberturas corretamente posicionadas para favorecer a renovação do ar. Em coberturas planas normalmente a pressão é negativa, beneficiando a saída de ar, o que é vantajoso para a remoção do ar quente acumulado sob a cobertura.

As principais vantagens das aberturas em coberturas são:

- A velocidade do vento é maior em alturas mais elevadas, portanto aberturas altas permitem maiores taxas de ar em relação às aberturas próximas do solo;
- Aberturas em coberturas estão menos sujeitas a obstruções causadas por edificações vizinhas e vegetação;
- Aberturas em coberturas geralmente proporcionam uma diferença maior de altura entre entrada e saída de ar, contribuindo para o efeito chaminé;
- Em ambientes secos e poluídos, a elevação das aberturas reduz a exposição à poeira;
- Em edificações de planta profunda, as aberturas altas servem de alternativa para a iluminação e ventilação dos espaços centrais;
- A inclinação do telhado oferece a opção da adoção criteriosa da abertura para entrada ou saída de ar, dependendo da orientação da superfície onde se encontra a abertura, evitando que haja sobreposição e anulação dos efeitos do deslocamento do ar.



Fig. 52 e Fig. 53: Edifício com átrio central e aberturas na cobertura. (Fonte: FONTOYNONT, 1999)

Outra maneira de se adotar o princípio de resfriamento convectivo em coberturas é por meio de dutos de ventilação, muito utilizados na Espanha. São câmaras de ar ventiladas, funcionando como um duto para remover o calor por convecção.

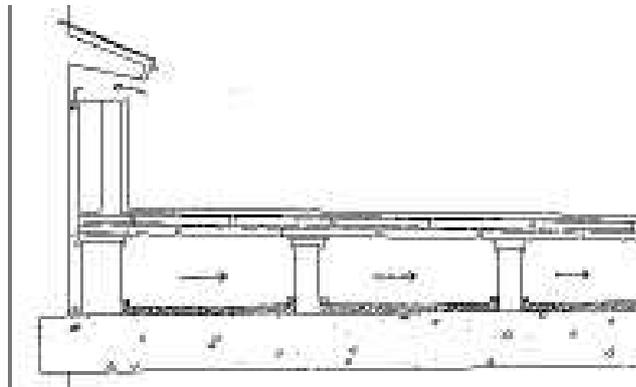


Fig. 54: “A la catalana”: coberturas ventiladas tradicionais na região da Cataluña, Espanha. (Fonte: YANNAS; ERELL; MOLINA, 2006)

Resultados mais notáveis podem ser alcançados quando a este sistema é incluído um ventilador com aspersão d’água na entrada do ar. Este, ao entrar no duto e em contato com as gotículas de água, se resfriará por meio da evaporação, podendo ser insuflado da cobertura para o recinto, ou, simplesmente resfriar a superfície da cobertura por convecção, minimizando assim a carga térmica proveniente desta. Outros mecanismos podem ser adicionados ao sistema para aumentar o desempenho térmico do mesmo, tais como isolamento resistivo e refletivo, barreiras radiantes, resfriamento evaporativo e convectivo funcionando em conjunto. Por exemplo, pode-se manter o duto com o ar confinado, servindo de isolamento. E ainda, se o componente externo tiver uma superfície de alta refletância, funcionará como isolamento refletivo, enquanto que, se a superfície interna (voltada para a câmara de ar) for

polida, com propriedade de baixa emissividade, contribuirá como barreira radiante. Percebe-se que há várias formas de agir em um projeto de cobertura visando aplicar estratégias combinadas de atenuação da carga térmica, sendo o projeto mencionado apenas uma possibilidade.

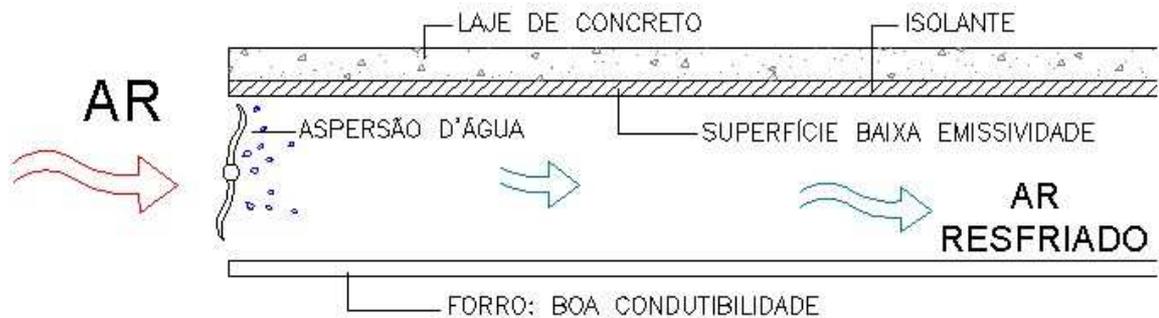


Fig. 55: Duto de ar, com resfriamento evaporativo, convectivo, isolamento e barreira radiante. (BÜTTNER, S.)

No Brasil, o arquiteto João Filgueiras Lima, o Lelé, criador de um sistema construtivo que utiliza componentes industrializados de aço, plástico e argamassa armada, produzidos no Centro de Tecnologia da Rede Sarah, em Salvador, destacou-se também na aplicação de estratégias de condicionamento natural, com a criação de sistemas de ventilação e iluminação natural por meio de sheds e dutos de insuflamento de ar. Em suas diversas obras espalhadas pelo país, observa-se a preocupação em adaptar o partido arquitetônico pré-estabelecido às condições locais, adotando soluções semelhantes ao duto citado acima, onde há várias estratégias combinadas, em busca de conforto térmico e menor consumo de energia. Em Cuiabá e Teresina, os tribunais de conta da União são climatizados artificialmente, devido ao rigor do clima, porém observa-se a preocupação por parte do arquiteto em adotar estratégias de projeto que minimizam o consumo de energia destinado à climatização.



Fig. 56: Hospital Sarah Kubitschek - RJ (Foto: Celso Brando, *apud* Revista AU, ed175, out.2008)

4.2.4. Plantio (Tetos verdes)

A presença da vegetação nas coberturas não é uma invenção atual, havendo uma longa história desde os lendários jardins suspensos da Babilônia, passando pelos tradicionais telhados gramados nórdicos e chegando aos terraços-jardins modernistas. Porém, os cuidados necessários para a manutenção deste tipo de cobertura se tornaram uma barreira para a sua utilização, que só foi derrubada com a evolução nas tecnologias de impermeabilização, anteriormente feita com metal fundido e reservada a apenas algumas construções ocasionais. Assim, o agora chamado “teto verde” renasceu não só como uma opção arquitetônica, mas como uma arma empregada no mundo todo para combater inconvenientes inerentes às grandes concentrações urbanas (MENDES, 2007).

Tetos verdes são compostos por três principais componentes: um suporte estrutural, incluindo uma camada impermeabilizante, o solo e a cobertura vegetal. Para que o plantio em coberturas alcance resultados satisfatórios, visando melhores condições internas de conforto, é fundamental a compreensão da interação entre estes componentes com a cobertura e o meio. A fim de se obter o máximo efeito no interior do edifício, a estrutura de suporte deve apresentar um pouco de inércia térmica, controlando assim, juntamente com o solo, a transferência de calor através da cobertura. Dependendo das condições climáticas locais, é necessário implantar uma camada espessa de isolamento térmico para melhorar o comportamento térmico do edifício.

O solo contém uma matriz sólida (minerais e material orgânico), líquida (água) e gasosa (ar e vapor d'água). Em solo insaturado, o calor é transferido por condução nos componentes sólidos e líquidos; por convecção nos líquidos e gasosos, e pela difusão de vapor nos poros. A transferência de calor do solo e do ar adjacente é afetada pela umidade e temperatura do mesmo.



Fig. 57: Residência com cobertura verde. (Fonte: [s.n.] *apud* MENDES, 2007)

Algumas decisões devem ser tomadas durante o processo projetual de um teto verde, incluindo:

- Tipo de solo e profundidade: baseado na capacidade de controlar as oscilações térmicas diárias (em função da capacidade e condutividade térmica), no peso e nas condições adequadas para atender às necessidades da planta;
- Seleção das espécies: em função da geometria e densidade das folhas, assim como da quantidade de água requerida em cada época do ano, estrutura da raiz, etc.;
- Esboço do sistema de irrigação, quando necessário;
- Método de drenagem das águas pluviais.

Entre os diversos benefícios que os tetos verdes proporcionam aos edifícios estão o isolamento térmico e acústico; a proteção da laje, aumentando a sua durabilidade; o aproveitamento do espaço, tornando-o útil para outras atividades, como a permacultura, por exemplo, e os benefícios relacionados ao bem estar psico-físico dos usuários, já que o contato com a vegetação tem fins terapêuticos (MENDES, 2007), além das vantagens destes tetos para o micro-clima urbano circundante, que é afetado das seguintes maneiras:

- Fluxos de calor radiativo, latente e sensível variam na camada de vegetação conforme:
 - a penetração da radiação solar direta (ondas curtas) é reduzida;
 - a radiação de ondas longas das superfícies para o meio ambiente é interceptada;
 - a velocidade dos ventos é reduzida, evitando ganhos de calor por convecção;
 - o aumento das superfícies permeáveis.
- O armazenamento de energia se dá pelos seguintes mecanismos:
 - O calor sensível é armazenado na estrutura da cobertura, no solo e nas plantas;
 - A energia bio-química é armazenada nas plantas
- Trocas de calor latente ocorrem abundantemente devido à evapo-transpiração das folhas das plantas.

De maneira resumida, os tetos verdes resfriam e purificam o ar adjacente, contribuindo para a melhoria do micro-clima urbano no seu entorno imediato. Apesar de inibir a dissipação por ondas longas, proporciona o resfriamento do substrato, por meio do sombreamento e da evapo-transpiração, que devido à sua capacidade térmica armazena o calor, reduzindo os efeitos da radiação solar e da temperatura externa.

No Brasil são poucas as aplicações encontradas, resumindo-se a guaritas ou edículas, ou seja, áreas

reduzidas em relação ao montante de coberturas em uma cidade, além de que a escolha por este tipo de cobertura, na maioria dos casos, se dá por questões estéticas e não de conforto. Esta limitação se justifica devido à manutenção que este tipo de cobertura exige, além do peso que acarreta em custos na estrutura. A falta de tecnologia e de consciência dos benefícios ecológicos e energéticos dos tetos verdes gera uma grande resistência por parte de engenheiros, arquitetos e empreendedores, que superestimam suas exigências construtivas e de manutenção. Um dos exemplos é o edifício sede da Prefeitura de São Paulo, onde uma densa área verde foi implantada na cobertura do edifício, servindo de exemplo para outras edificações, principalmente as que se situam em área urbanas densas, como é o caso de centro da cidade de São Paulo.



Fig. 58 e Fig. 59: Cobertura “verde” do Edifício Sede da Prefeitura do Município de São Paulo, no centro da cidade.

(Foto: Büttner, S.)

No exterior, os benefícios conhecidos com o aumento de área verde para os centros urbanos e para o conforto das edificações faz com que coberturas verdes sejam adotadas, principalmente nos países desenvolvidos, onde a consciência ambiental está mais avançada em relação aos países em desenvolvimento.

A Alemanha se destaca atualmente como o maior centro tecnológico de tetos verdes, seguido de outros países, como a Suíça, Suécia, Noruega e a Austrália, onde existem incentivos governamentais, estaduais e municipais. Nos EUA e no Canadá há uma crescente consciência sobre a importância dos tetos verdes, apesar de não ser tão avançada como na Europa. Muitos projetos experimentais estão sendo feitos em Chicago, Portland, Winnipeg, Ottawa e Quebec, com enfoque na economia de energia, controle de enchentes e redução do aquecimento urbano. No Japão e Cingapura já existe legislação que obriga grandes empreendimentos a recuperarem parte das áreas verdes, o que encoraja a adoção de coberturas ajardinadas.



Fig. 60 (esq.): Hotel Fairmont Waterfront, em Vancouver: Cobertura utilizada para plantar flores e alimentos, reduziu custos da alimentação em torno de \$30,0/ano. (Fonte: DESIGN ROOFING. Disponível em: <www.designroofing.ca>. Acesso em: 11 de setembro de 2007)



Fig. 61 (dir): Cobertura ajardinada de edifício em Toronto. (Fonte: DESIGN ROOFING. Disponível em: <www.designroofing.ca>. Acesso em: 11 de setembro de 2007)

5. A RELAÇÃO DAS COBERTURAS COM O AMBIENTE URBANO

As funções da cobertura geralmente estão relacionadas à proteção do edifício; porém, se for levado em consideração o papel das coberturas no contexto da cidade, percebemos a importância destas também para a qualidade dos microclimas urbanos.

Nos grandes centros urbanos, onde há uma maior densidade populacional e conseqüentemente uma maior concentração de edificações, a paisagem urbana vista de cima é marcada pela predominância de superfícies horizontais e pavimentação. Tomando-se como ponto de partida a maior cidade do país, São Paulo, a vista aérea que se tem é de uma infinidade de coberturas, de diferentes dimensões, alturas, cores (principalmente escuras) e tipos, conforme se observa nas figuras 62 e 63. São poucas as áreas verdes ou áreas permeáveis avistadas de cima, o que nos faz refletir sobre a importância da cobertura no contexto urbano. O crescimento desordenado das cidades ocasionou uma alta densidade urbana, caracterizando a paisagem pela predominância de edifícios, em que as coberturas se tornam o principal elemento exposto à abóbada celeste. A substituição dos ecossistemas naturais por estruturas artificiais ocasiona impactos ambientais em vários níveis e gera o chamado clima urbano, cuja principal evidência é o aumento da temperatura do ar.



Fig. 62 e Fig. 63: Vista da área central de São Paulo, abrangendo os bairros Cerqueira César, Bexiga e Bela Vista.

(Foto: Büttner, S.)

Em São Paulo, as coberturas constituem cerca de 40-50% da área impermeável urbana que, na maioria das vezes, são espaços destinados ao abrigo de antenas, caixas d'água, equipamentos de ar condicionado etc.; ou simplesmente se tornam áreas completamente áridas, que além de serem superfícies subutilizadas, refletem a radiação solar, contribuindo para o aquecimento urbano (MENDES, 2007).



Fig. 64: Vista da região Central de São Paulo (esq.) e Fig. 65: Bairro da Bexiga e Bela Vista: região mais densa da cidade (dir.). (Foto: Büttner, S.)

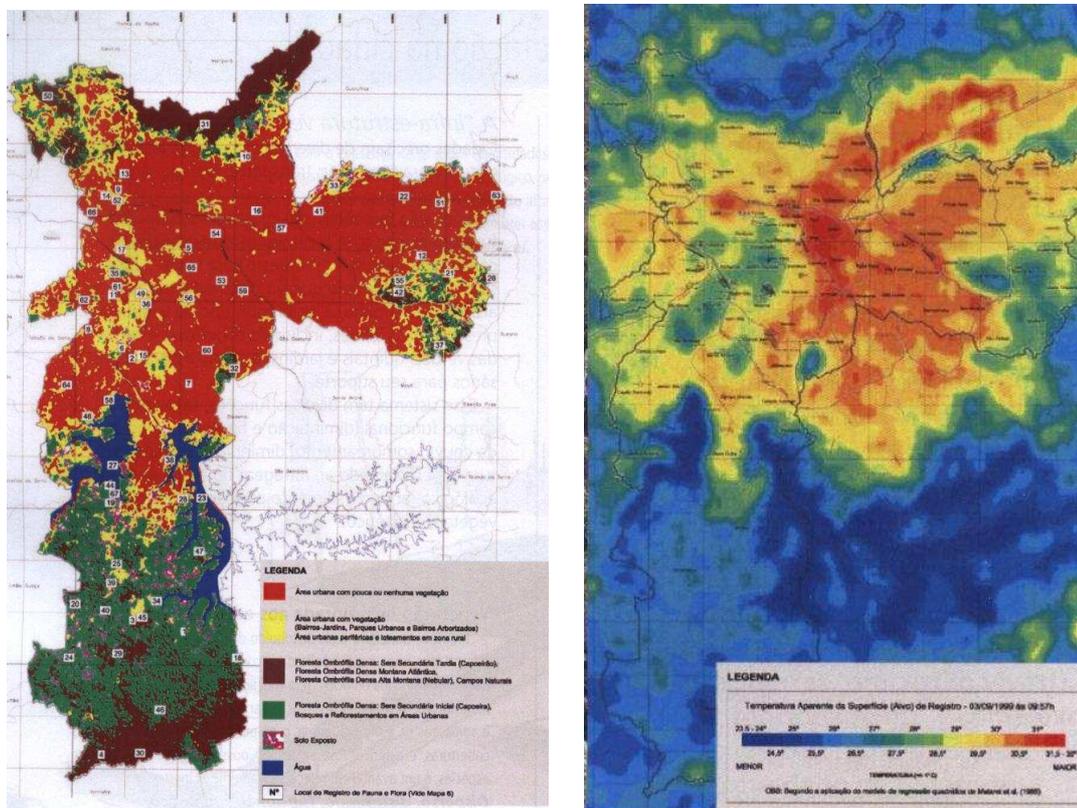


Fig. 66 (esq.): Ocupação do solo no município de São Paulo: mancha vermelha indica falta de vegetação. Área amarela são bairros-jardins, com boa arborização. Fig. 67 (dir.): Mapa das temperaturas superficiais de SP: Região central e leste apresentam temperaturas mais elevadas (mancha vermelha), em contraste com a zona oeste, com seus bairros jardins (manchas verdes e amarelas). (Fonte: Atlas Ambiental do Município de São Paulo. Disponível em: <http://atlasambiental.prefeitura.sp.gov.br/>. Acesso em: 11 de dezembro de 2007)

A alta densidade urbana é inevitável, e até desejável no paradigma atual de cidade sustentável. O problema é a desproporção entre elementos naturais e construídos. A maior densidade reduz o impacto ambiental causado pelas construções de novos edifícios, vias e redes de infra-estrutura urbana, pois

atende a uma maior quantidade de pessoas em menores extensões territoriais, reduzindo áreas de desmatamentos, de impermeabilizações do solo, reduzindo assim muitos dos problemas ambientais típicos de uma megalópole. Porém, deve-se buscar alternativas para que o adensamento não provoque mudanças bruscas no clima urbano, introduzindo de maneira equilibrada elementos naturais entre os edifícios, como por exemplo a adoção de tetos verdes.

Neste sentido, não importam somente as coberturas de edificações predominantemente horizontais, e sim o conjunto formado por todos os tipos de coberturas, lembrando que, por menor que sejam as áreas das coberturas dos edifícios verticais ou construções pequenas, quando somadas, em especial nas áreas densas, formam uma grande área de cobertura sobre a cidade, interferindo nas trocas térmicas entre o céu e o solo. O exemplo de São Paulo demonstra este efeito e reforça a necessidade de novas soluções e tipologias de coberturas que, além de interferir no conforto térmico no interior do edifício, também melhoram as condições microclimáticas dos centros urbanos. Acredita-se que a situação das cidades seria muito diferente, se muitas coberturas fossem verdes, ainda que a densidade urbana se mantivesse elevada. A figura 69 ilustra uma simulação de como poderia ser o centro de São Paulo com a aplicação de tetos verdes.



Fig. 68: Vista aérea do centro de São Paulo como está hoje (esq.) e Fig. 69: uma simulação de como poderia ser diferente aplicando-se vegetação em suas superfícies (dir.). (Fonte: MENDES, 2007)

Isto não significa que devemos introduzir tetos verdes em todas as edificações, ou na maior parte delas, e que esta atitude irá solucionar todos os problemas de impacto ambiental e desconforto das cidades. Mas a discussão tem o papel de buscar e incentivar novas soluções que amenizem estes problemas gerados com o efeito do aquecimento urbano. Entre algumas medidas, além do teto verde, está o aumento do albedo urbano, que segundo simulações executadas por Taha (1997), podem alcançar uma diminuição significativa na temperatura do ar, dependendo das condições climáticas do local.

Para Stuart Gaffin, cientista do Earth Institute na Universidade de Columbia, os tetos brancos eram, de início, considerados a grande estratégia para diminuir as temperaturas das áreas urbanas. Porém, realizando pesquisas, passou a defender a utilização dos tetos verdes, que apresentam a vantagem de resolver o problema do escoamento de água, do sombreamento e ainda diminuem a temperatura superficial e do ar (plantas armazenam menor quantidade de calor que os tetos brancos). Stuart lembra

que as superfícies brancas tendem a escurecer com o tempo e comprovou por meio de estudos que tetos cobertos com vegetação ficavam 30 (trinta) graus mais frios que coberturas normais de betume, para as condições climáticas da cidade de Nova York. (SCOTT, 2006)

Alexandri e Jones (2006) realizaram uma avaliação comparativa entre tetos verdes, brancos, com lâminas d'água (resfriamento evaporativo) e pérgolas (sombreamento) e concluíram que, em qualquer um dos climas investigados (quente e árido, quente e seco, quente e úmido), as 4 (quatro) técnicas acima mencionadas são capazes de reduzir a temperatura superficial e do ar acima da cobertura. Porém, as superfícies com alta refletância apresentaram reduções menores em relação às coberturas verdes ou com sistema de resfriamento evaporativo. Por último, concluíram, resumidamente, que a escolha do sistema vai depender do local e do tipo de edificação, principalmente dos horários de ocupação, seja ela no período diurno, noturno ou ambos. Isto porque alguns sistemas permitem uma maior redução das temperaturas, porém apresentam instabilidade ao longo do dia, enquanto outros propiciam temperaturas mais estáveis sem atingir, no entanto, as temperaturas mais baixas.

Independentemente de qual seja a melhor solução, o importante é introduzir uma reflexão quanto aos diversos tipos de coberturas e a vantagem de se buscar novas soluções no que diz respeito ao desempenho térmico dos edifícios e a sua influência no microclima urbano.



Fig. 70 e Fig. 71: Uso predominante de telhas metálicas, cimento-amianto e laje de concreto, em São Paulo (SP).

(Foto: Büttner, S.)

PARTE 02

*Levantamento de dados
primários e secundários*

6. CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA

6.1. O Clima Brasileiro

O Brasil possui uma diversidade climática bem ampla devido às suas dimensões continentais, sendo influenciada pela sua configuração geográfica, sua significativa extensão costeira, seu relevo e a dinâmica das massas de ar sobre seu território. Esse último fator, relacionado à movimentação de massas de ar, assume grande importância, pois atua diretamente sobre as temperaturas e os índices pluviométricos nas diferentes regiões do país.

Em especial, as massas de ar que interferem mais diretamente no Brasil, proporcionando as diferenciações climáticas, segundo o Anuário Estatístico do Brasil, do IBGE (2004), são:

- Massa Equatorial Atlântica – quente e úmida;
- Massa Equatorial Continental – quente e muito úmida;
- Massa Tropical Continental – quente e seca;
- Massa Tropical Atlântica – quente e úmida;
- Massa Polar Atlântica – fria e úmida.

Desta forma, são verificados no país desde climas muito úmidos e quentes, provenientes das massas Equatoriais, como é o caso de grande parte da região Amazônica, até climas semi-áridos muito extremos, próprios do sertão nordestino. O clima de uma dada região é condicionado pela temperatura, regime de chuvas, umidade do ar, ventos e pressão atmosférica, os quais, por sua vez, são condicionados por fatores como altitude, latitude, condições de relevo, vegetação e continentalidade.

A localização da maior parte do país em zona intertropical e o predomínio de baixas altitudes são responsáveis pelas variedades climáticas quentes (médias superiores a 20 °C), controladas por algumas massas de ar e frentes frias.

Existem diversas classificações climáticas baseadas no estudo da dinâmica das massas de ar, dos elementos e dos fatores do clima, entre elas a de Köppen (1918) e Strahler (1951). A classificação climática de Wilhelm Köppen estuda separadamente os elementos do clima. Ela baseia-se, predominantemente, na temperatura, nas precipitações e na distribuição dos valores destes dois

elementos do clima durante as estações do ano. Entre as mais utilizadas, está a classificação de Arthur Strahler, pertencente a uma escola de climatologia chamada Dinâmica, pois se baseia na dinâmica geral da atmosfera, através das massas de ar, ou seja, nas áreas da superfície terrestre dominadas ou controladas pelas massas de ar. De acordo com esta última classificação, predominam no Brasil cinco grandes climas, a saber:

- **Clima equatorial úmido:** Da convergência dos alísios, que engloba a Amazônia;
- **Clima tropical alternadamente úmido e seco:** Englobando grande parte da área central do país e litoral do meio-norte;
- **Clima tropical tendendo a ser seco pela irregularidade da ação das massas de ar:** englobando o sertão nordestino e vale médio do rio São Francisco;
- **Clima litorâneo úmido:** Exposto às massas tropicais marítimas, englobando estreita faixa do litoral leste e nordeste;
- **Clima subtropical úmido das costas orientais e subtropicais:** Dominado largamente por massa tropical marítima, englobando a Região Sul do Brasil.

Quanto aos aspectos térmicos também ocorrem grandes variações. A Região Norte e parte do interior da Região Nordeste apresentam temperaturas médias anuais superiores a 25°C, enquanto na Região Sul do país e parte do Sudeste as temperaturas médias anuais ficam abaixo de 20°C. De acordo com dados do IBGE (2004), temperaturas máximas absolutas, acima de 40°C, são observadas em terras baixas interioranas da Região Nordeste; nas depressões, vales e baixadas do Sudeste; no Pantanal e áreas rebaixadas do Centro-Oeste; e nas depressões centrais e no vale do rio Uruguai, na Região Sul. Já as temperaturas mínimas absolutas, com freqüentes valores negativos, são observadas nos cumes serranos do sudeste e em grande parte da Região Sul, onde são acompanhadas de geadas e neve.

A tabela 1 apresenta as temperaturas do ar, máximas (em ordem decrescente) e mínimas absolutas, das capitais estaduais brasileiras. Conforme se observa, entre as cidades mais quentes estão Teresina (PI) e Cuiabá (MT).

Tabela 1 - Temperaturas máximas e mínimas absolutas das capitais brasileiras

UF	CAPITAIS	MÁXIMA ABS. (°C)	MÍNIMA ABS. (°C)
PI	Teresina	36.5	20.5
MT	Cuiabá	34.0	17.0
AM.	Manaus	33.0	22.7
RO (CONTINUA)	Porto Velho	33.0	18.0

(CONTINUAÇÃO)			
AC	Rio Branco	32.8	18.5
AP	Macapá	32.4	22.9
PA	Belém	32.3	21.7
RS	Porto Alegre	30.5	10.5
PB	João Pessoa	31.9	19.0
GO	Goiânia	31.8	13.5
ES	Vitória	31.6	19.0
MS	Campo Grande	30.7	14.0
PE	Recife	30.6	20.5
RN	Natal	30.5	21.3
CE	Fortaleza	30.5	21.8
AL	Maceió	30.3	20.2
RJ	Rio de Janeiro	30.3	18.4
BA	Salvador	30.0	21.3
SE	Aracaju	29.8	21.5
MG	Belo Horizonte	28.9	15.0
DF	Brasília	28.3	13.0
SC	Florianópolis	28.3	13.2
SP	São Paulo	28.0	12.0
PR	Curitiba	26.6	8.0

Fonte: INMET. Normais Climatológicas, período de 1961 a 1990. Obs. Não há, nesta fonte, dados disponíveis para as cidades de Palmas (TO) e Boa Vista (RO).

6.2. Características do Clima Tropical Continental

O clima tropical alternadamente úmido e seco, de acordo com a classificação de Strahler (1951), é também conhecido como clima tropical continental, dominando as extensas áreas do planalto Central. As diversas formações do relevo e a grande extensão latitudinal conferem à região uma grande diversificação térmica, só superada pela região sudeste. Já o mecanismo atmosférico, que determina um ritmo sazonal de precipitação, com máximas no verão e mínimas no inverno, garante homogeneidade à (NIEMER, 1979).

Segundo o IBGE (1995), a região centro-oeste é caracterizada pelo clima quente, cuja principal característica é a frequência quase que diária de temperaturas altas, sobretudo em Mato Grosso e Goiás, onde as temperaturas podem ultrapassar os 40°C. A maior parte da região não tem sequer um

mês com temperatura média inferior a 20°C, e as temperaturas médias anuais são, em geral, elevadas.

Outra característica importante é o ritmo sazonal de precipitação bastante marcado, com duas estações bem definidas: o inverno seco e o verão úmido. As temperaturas são constantemente altas, com pequenas diferenças durante o ano, não havendo distinção significativa entre inverno e verão no que diz respeito a este parâmetro. O mês mais quente (setembro ou outubro) pode anteceder o período chuvoso (outubro a março), no qual há uma tendência de temperaturas mais baixas devido às nuvens e precipitações mais pesadas. Geralmente se pode identificar três períodos distintos em função da temperatura:

- Estação seca e mais fresca, no inverno;
- Estação mais quente do ano e também seca, no período anterior às chuvas;
- Estação úmida e quente, durante as chuvas, no verão.

Segundo o IBGE (1995), é comum a ocorrência de calor intenso na primavera, principalmente no norte de Goiás e Mato Grosso. No começo das chuvas as temperaturas assemelham-se às do clima tropical chuvoso, que predominam no norte de Mato Grosso e na Amazônia. A amplitude térmica diária diminui e, apesar de a temperatura ser mais baixa em relação à estação quente e seca, as altas taxas de umidade do ar fazem com que o ambiente pareça mais abafado, aumentando a sensação de desconforto.

Logo após o período chuvoso, o céu se torna mais claro e a atmosfera mais seca, com a temperatura tendendo a subir durante o dia. Porém, as noites ficam um pouco mais agradáveis devido à maior perda de calor para a atmosfera, nesse período. No período denominado de inverno a temperatura continua alta; no entanto, como a umidade do ar é baixa, o calor não é tão opressivo, deixando as noites mais amenas.

A precipitação é o elemento fundamental para diferenciar os tipos climáticos nas baixas latitudes, uma vez que a temperatura não varia muito. O regime de chuvas, em toda a região centro-oeste deve-se, quase que exclusivamente, aos sistemas regionais de circulação atmosférica. De maneira geral, as precipitações máximas ocorrem durante o verão e as mínimas, durante o inverno, com baixos índices durante os meses de junho, julho e agosto. No período que vai de novembro a março ocorrem mais de 70% do total das chuvas que se acumulam o ano inteiro, sendo o trimestre mais chuvoso em janeiro - fevereiro - março, ao norte; dezembro - janeiro - fevereiro, no centro e novembro - dezembro - janeiro, no sul. A estação chuvosa é marcada por fortes tempestades, provocando inundações, intercaladas por períodos de transição sob o calor do sol intenso.

O inverno é seco, mas apesar dos baixos índices de umidade do ar, torna-se bem-vindo após o período úmido e abafado das chuvas. O trimestre mais seco é junho - julho - agosto, sendo que o mês que o antecede, maio, e que o sucede, setembro, também são pouco chuvosos. No período entre estes dois meses ocorrem temperaturas mais baixas, porém em poucos dias, e não muito inferiores a 20°C.

6.3. A escolha do local

Para a escolha do local de referência a ser adotado na pesquisa em questão, diante da grande variedade climática presente no território brasileiro, foram identificados, dentro da faixa de clima tropical continental, possíveis locais de estudo que atendessem às condições de rigor climático, ao potencial das estratégias de resfriamento passivo e ativo de baixo consumo de energia, e às condições de clima composto, com pelo menos duas estações (quente-seca e quente-úmida) bem definidas, para que as simulações pudessem ser realizadas para a mesma localidade, atendendo condições diferentes de umidade e altas temperaturas. Além disso, a disponibilidade de dados climáticos é um fator importante, já que são poucas as cidades na região centro-oeste que dispõem de dados climáticos. Analisando estas condições e as características climáticas de Cuiabá, somadas à vantagem do conhecimento prévio por parte das pesquisadoras envolvidas, considerou-se esta cidade como a mais apropriada para o estudo, já que atende a todos estes critérios.

6.4. Características geográficas de Cuiabá

O município de Cuiabá está situado na porção centro-sul do Estado de Mato Grosso, entre as coordenadas geográficas de 15° 10' e 15° 50' de latitude sul e 54° 50' e 58° 10' de longitude oeste, ocupando uma extensão territorial de 2.730 km². A região, denominada depressão cuiabana, é parte integrante da depressão do rio Paraguai, compreendendo uma área rebaixada situada entre o Planalto dos Guimarães e a província Serrana. Limita-se ao sul com o Pantanal Matogrossense, a oeste, noroeste e norte com a Província Serrana (MAITELLI, 1994).



Fig. 72: Mapa do Brasil e imagem da cidade de Cuiabá-MT. (Fonte: Disponível em: <<http://www.brasil-turismo.com/geografia.htm>>. Acesso em 05 de setembro de 2008

Segundo o perfil Sócio-Econômico de Cuiabá traçado pelo Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Urbano (IPDU) da Prefeitura Municipal da cidade, tem-se a seguinte descrição do clima local: o clima é essencialmente Tropical Continental, mas com algumas variantes típicas do lugar, apresentando dois períodos distintos: o chuvoso e o seco, com duração de oito e de quatro meses, respectivamente. No período chuvoso, caracterizado como Tropical Continental úmido, principalmente nos primeiros meses, a temperatura é mais elevada. Geralmente este período começa e termina por ventanias violentas acompanhadas de trovões. Nessa época do ano, a pressão atmosférica, mantendo-se alta, permite suportar as temperaturas elevadas. O período seco estende-se de junho a setembro, havendo alguns anos com períodos mais pronunciados. A umidade do ar em certos dias desce a uma percentagem mínima que varia de 18 a 40%, caracterizando o clima como Tropical Continental Seco, durante esses meses.



Fig. 73 e Fig. 74: Vistas da cidade de Cuiabá – MT. (Fonte: Disponível em: <<http://www.guiacuiaba.com.br>>. Acesso em: 05 de setembro de 2008)

De acordo com o IBGE (1988), frentes frias podem chegar até a região no período que de inverno¹⁸, provocando o fenômeno conhecido como friagem, que é caracterizada por uma queda brusca e rápida da temperatura, devido à penetração da massa polar atlântica, que avança pela vertente leste dos Andes argentinos e bolivianos e atinge o centro-oeste do Brasil. Esta é trazida pelos ventos frios que encaam no corredor formado pela planície do Pantanal, entre as barreiras do Planalto Brasileiro de um lado e os contrafortes dos Andes, de outro (PÓVOAS, 1983). A frequência mensal da friagem em abril é muito rara, tornando-se presente em maio e atingindo seu máximo normalmente em julho. Já a frequência média anual é em torno de três, podendo variar de nenhuma até cinco ou mais invasões.

O frio geralmente é acompanhado por garoas e neblinas; porém, as alterações climáticas ocorridas com a urbanização, segundo Póvoas (1983), contribuíram para modificar isso. A permanência do frio é de, no máximo, oito dias e reaparece a intervalos mais ou menos prolongados. É intercalado por dias não muito quentes e noites frescas, alternando o frio das madrugadas e das manhãs com o calor do meio-dia e da tarde.

¹⁸ A denominação de inverno, neste caso, não significa período frio, e sim, seco.

As características do clima local descritas acima puderam ser confirmadas a partir de um diagnóstico climático da cidade, com o auxílio do software *Climáticus 1.0 (2003)*¹⁹, observando-se os dados de precipitação, umidade, temperaturas, de acordo com os gráficos apresentados a seguir:

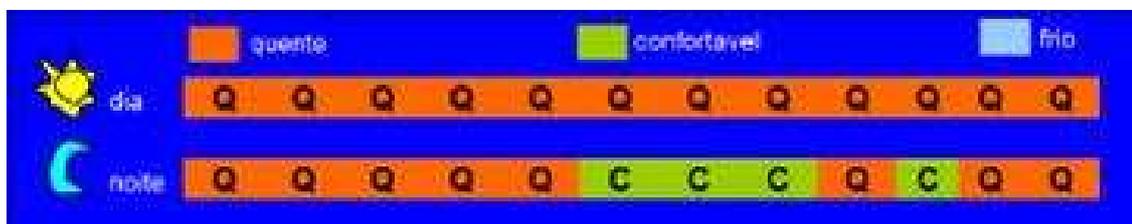


Fig. 75: Classificação climática para Cuiabá – MT, segundo Mahoney. (Fonte: CLIMATICUS, 2003)

O gráfico acima apresenta a distribuição de dias quentes, confortáveis e frios ao longo do ano, demonstrando que, segundo esta classificação, não há dias e nem sequer uma noite considerada fria. Nem mesmo dias confortáveis aparecem, somente noites e estas em poucos períodos do ano.

A pequena variação de temperatura ao longo do ano, com uma constante e excessiva entrada de radiação solar pode se confirmar com os dados de temperatura do gráfico abaixo:

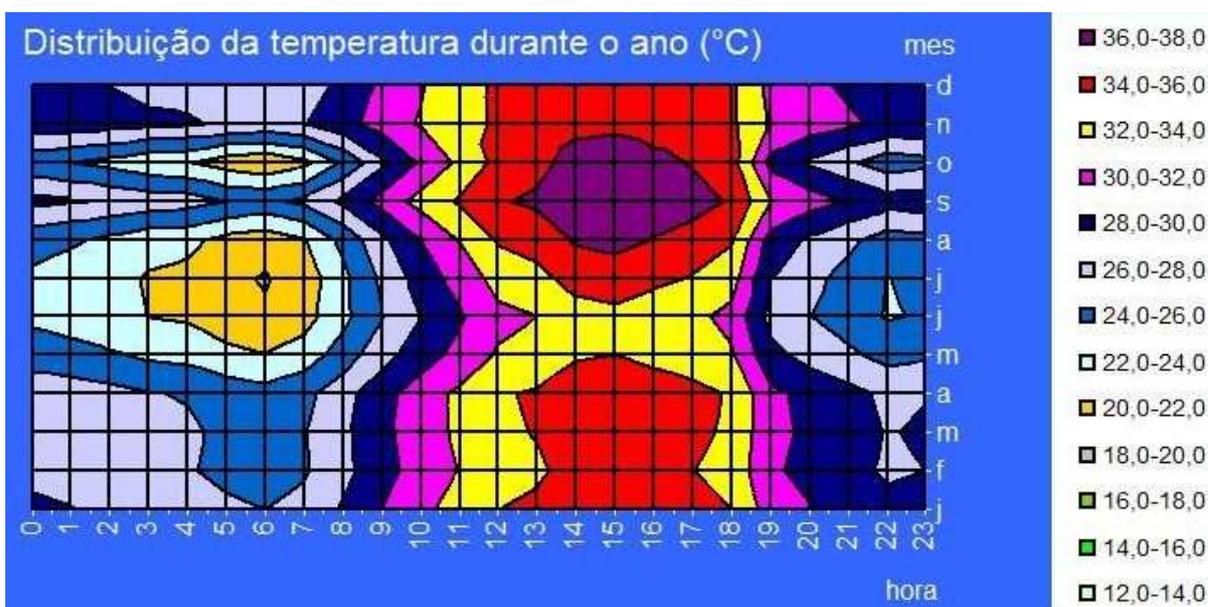


Fig. 76: Distribuição da temperatura ao longo do ano. (Fonte: CLIMATICUS, 2003)

¹⁹ Software desenvolvido pela aluna de iniciação científica FAPESP Gabriela Audi, sob orientação da Prof. Dra. Márcia Alucci, em 2003. Disponível em: < http://www.usp.br/fau/ cursos/ graduacao/ arq_urbanismo/disciplinas/index.html>.



Fig. 77: Variação da temp. (esq.) e umidade (dir.) para setembro (mês mais quente/linha vermelha) e para julho (mês mais frio/linha verde). (Fonte: CLIMATICUS, 2003)

Os gráficos seguintes apresentam a distribuição total mensal e máxima diária de precipitação, e somente a total mensal de insolação e nebulosidade:

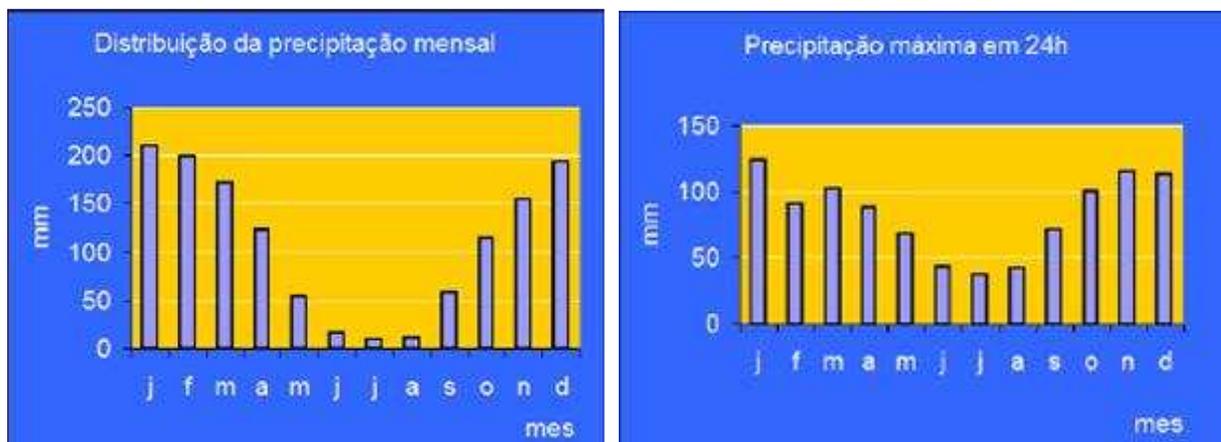


Fig. 78: Distribuição mensal e em 24 h de precipitação em Cuiabá. (Fonte: CLIMATICUS, 2003)

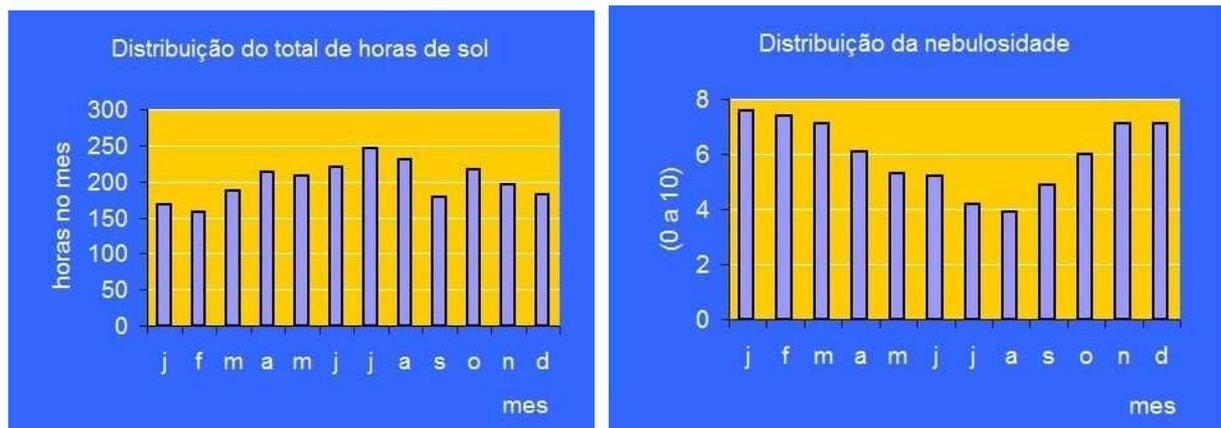


Fig. 79: Distribuição mensal de insolação e nebulosidade em Cuiabá. (Fonte: CLIMATICUS, 2003)

Plotando todas as variáveis do clima na carta bioclimática, as estratégias de projeto que visam ao conforto aparecem da seguinte maneira:

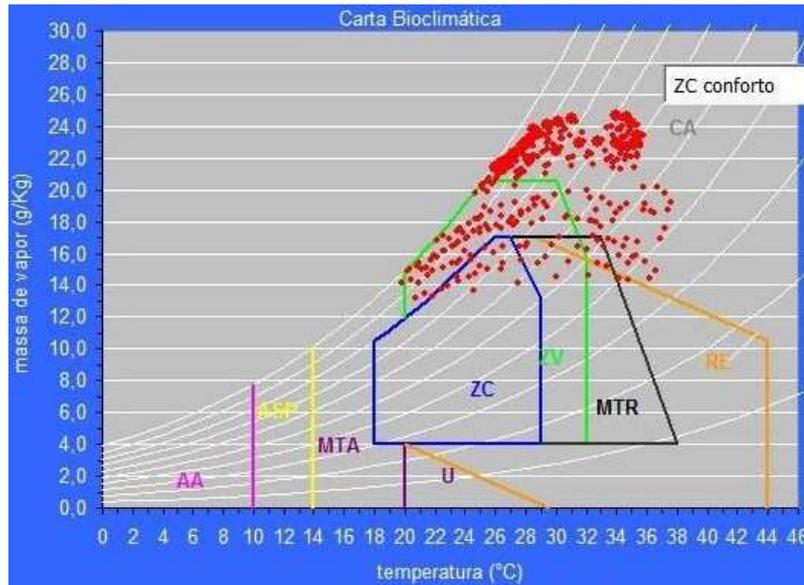


Fig. 80: Carta bioclimática demonstrando a necessidade de cada estratégia para obtenção do conforto.

(Fonte: CLIMATICUS, 2003)

A partir do diagrama da figura 80, o mesmo software apresenta o quadro que permite uma visão mais clara da distribuição das estratégias de conforto necessárias para se obter o conforto ao longo do ano:



Fig. 81: Quadro de estratégias de conforto para Cuiabá, adaptada para as condições brasileiras, segundo Givoni.

(Fonte: CLIMATICUS, 2003)

Analisando esse quadro nota-se que a zona de conforto (cor vermelha) se encontra em pequena quantidade de horas, em oposição à zona de condicionamento artificial (cor cinza), que aparece em 55,9% do tempo total de um ano, tornando-se esta a estratégia predominante, seguida da ventilação (cor verde), em 30% e do resfriamento evaporativo (cor azul), em 10,8% das horas totais de um ano.

A partir da análise nota-se o rigor do clima e a necessidade do uso de condicionamento artificial, assim como o potencial para a adoção de estratégias de resfriamento evaporativo.

6.5. Registro de dados climáticos

Na capital mato-grossense as observações meteorológicas iniciaram-se no Observatório meteorológico Dom Bosco, ligado à Missão Salesiana de Mato Grosso.

Idealizado e fundado, no início do século passado, pelo Salesiano Prof. Sílvio Melanese, consolidou-se como posto de observação com os trabalhos do Padre Ricardo Remeter. Após a morte deste, em 1965, assumiu o observatório o mestre Jorge Bombled, que já fazia parte da equipe comandada pelo Padre Remeter.

Desde 1911 o observatório Meteorológico Dom Bosco integra a Rede Nacional de Meteorologia do Ministério da Agricultura, que funcionou até 1966, quando a responsabilidade pela coleta de dados ficou a cargo do 4º Distrito Meteorológico, hoje 9º Distrito, ligado ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), do Ministério da Agricultura e do Abastecimento. Foram encontradas outras estações na região, cujas características foram levantadas e comparadas entre si, visando analisar as alternativas possíveis a fim de se adotar a base de dados mais adequada para a simulação de desempenho térmico proposta. Dentre as opções de estações meteorológicas disponíveis, foram verificadas as seguintes bases de dados:

Tabela 2 - Estações meteorológicas e bases de dados

Estação	Período medido	disponibilidade	base	localização	Parâmetros medidos
Aeroporto Marechal Rondon (SBCY)	1912 a 2007	METAR/IAG*1 (11/98-10/04)	horária	Várzea Grande – MT (aeroporto)	tbs tbu pressão atmosférica direção de vento velocidade de vento

(CONTINUA)



Fig. 82: Estação do Aeroporto Marechal Rondon (Foto: BUTTNER, S.)

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) Estação convencional	1912 a 2007	Meteonorm Normais climatológicas	3 / dia	Av. da Feb., Várzea Grande - MT	tbs tbu umidade do ar (UR) pressão atmosférica nebulosidade velocidade de vento direção de vento precipitação insolação
Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) Estação automática*2	2002 a 2007	Meteonorm Normais climatológicas	horário	Av. da Feb., Várzea Grande - MT	tbs tbu umidade do ar (UR) pressão atmosférica nebulosidade velocidade de vento direção de vento precipitação insolação



Fig. 83: 9º Distrito de Meteorologia (Inmet). (Foto: BUTTNER, S.)

UFMT *3	2006 2007	a	Não fornecida em tempo	horária	Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Av. Fernando Correa da Costa, Cuiabá – MT	tbs umidade do ar (UR) pressão atmosférica nebulosidade velocidade de vento direção de vento
----------------	--------------	---	------------------------	---------	---	---



Fig. 84: Estação da UFMT. (Foto: BUTTNER, S.)

Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA)	1973 2002	a	ENERGY PLUS*4 (epw) SWERA*5	horária	Várzea Grande – MT (Aeroporto Marechal Rondon)	tbs tbu umidade relativa do ar pressão atmosférica nebulosidade velocidade de vento direção de vento ponto de orvalho radiação
--	--------------	---	-----------------------------------	---------	---	--

Obs. *1: IAG USP - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP. Disponível em: <<http://www.iag.usp.br>>. Acesso em: 27 de agosto de 2007

*2: Estação temporariamente desativada desde julho / 2007, devido a furto de equipamento.

*3: Estação temporariamente desativada desde 2006, por motivo desconhecido.

*4: ENERGY PLUS. Disponível em: <<http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus>>. Acesso em 03 dez. de 2007.

*5: SWERA - Solar and Wind Energy Resource Assessment. Disponível em: <<http://swera.unep.net>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2008.

A escolha da base de dados adotada para a pesquisa seguiu alguns critérios, conforme mencionado no capítulo 9, referente à *Ferramentas computacionais de simulação térmica e energética*.

7. COMPONENTES DE COBERTURA E SUBCOBERTURA

7.1. Materiais utilizados em coberturas

Uma vasta gama de materiais e componentes de coberturas é encontrada atualmente na construção civil. Em especial o setor comercial usufrui das vantagens oferecidas por novos materiais para reduzir custos na construção e manutenção dos edifícios, buscando também representar uma imagem corporativa. Por este motivo, entre outros já mencionados, as coberturas de edificações deste setor serão estudadas neste trabalho.

Os materiais mais comuns aplicados em componentes de coberturas são: pedras naturais, cerâmicas, metais (diversos), plásticos, cimentos (variadas composições), fibras vegetais e minerais e vidros. As indústrias destes componentes têm buscado novas alternativas no que diz respeito à matéria-prima utilizada, visando obter qualidades essenciais para a cobertura, como impermeabilidade, resistência a esforços mecânicos, inalterabilidade de forma e dimensões, leveza, secagem rápida após as chuvas, facilidade de execução e manutenção. Aqui serão apresentados os materiais e componentes mais utilizados em obras comerciais e predominantemente horizontais, com foco no desempenho térmico das mesmas.

A laje é uma das coberturas mais adotadas, principalmente no Brasil, onde a cultura do concreto armado prevalece sobre as demais técnicas. As diferentes composições, técnicas e componentes que têm sido aplicados, na busca de alternativas mais econômicas e leves, conferem a este material grande aplicabilidade. Um bom exemplo em inovação tecnológica do concreto é o concreto celular, que garante mais leveza e maior isolamento térmico ao material. Em coberturas expostas às intempéries devem ser impermeabilizados, e com isso, deve-se ater para a cor do produto utilizado, já que muitas vezes são utilizadas mantas escuras, que aumentam a absorção da radiação solar e, portanto, a transmissão de calor para o interior do edifício.

Em busca de componentes mais leves e práticos de aplicabilidade surgiram, a partir da revolução industrial no século XIX, as chapas metálicas (aço, alumínio, zinco e cobre) que foram adotadas em diversas aplicações para a construção civil, entre elas, na fabricação de telhas. Com inclinações menores, em relação às tradicionais telhas cerâmicas, continuam sendo utilizadas em grande escala, principalmente em edifícios industriais e comerciais de grande porte, em diversas opções de modelos e cores. Porém, as chapas simples foram substituídas pelas chamadas “telhas sanduíche”, caracterizada por um preenchimento de material isolante revestido por uma ou duas chapas metálicas (internas e externas ou somente externas). Em edificações situadas em climas quentes estes materiais têm apresentado resultados satisfatórios quanto ao controle na transmissão de fluxo de calor através da envoltória superior. Atualmente, o mercado oferece telhas sanduíches com núcleos isolantes de

plásticos (espumas de poliuretano e poliestireno expandido ou extrudado) ou de lãs (de vidro e de rocha), de perfil ondulado ou trapezoidal, geralmente pré-pintadas. Esses produtos já estão sendo produzidos largamente no Brasil, principalmente na região sudeste. (CONFORTO..., 2007)



Fig. 85: Telha tipo sanduíche, com lâmina externa de aço pré-pintado na cor branca, núcleo em poliestireno expandido, e revestimento inferior em alumínio fosco, (Fonte: ISOESTE. Disponível em: <<http://www.isoeste.com.br>>. Acesso em 20.12.2007)

O setor de coberturas metálicas trabalha hoje basicamente com bobinas de aço revestido por zinco, ou a liga deste produto com o alumínio, o que assegura mais durabilidade, grande resistência mecânica e custos inferiores. Outro procedimento inovador está ligado às pinturas das chapas que também conferem maior resistência e durabilidade ao material, como as chapas pré-pintadas, que já saem da fabricação com a pintura desejada pelo cliente, mais moderna e elaborada. A fabricação deve obedecer à padronização da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).²⁰ (ARQUITETURA..., 2001)

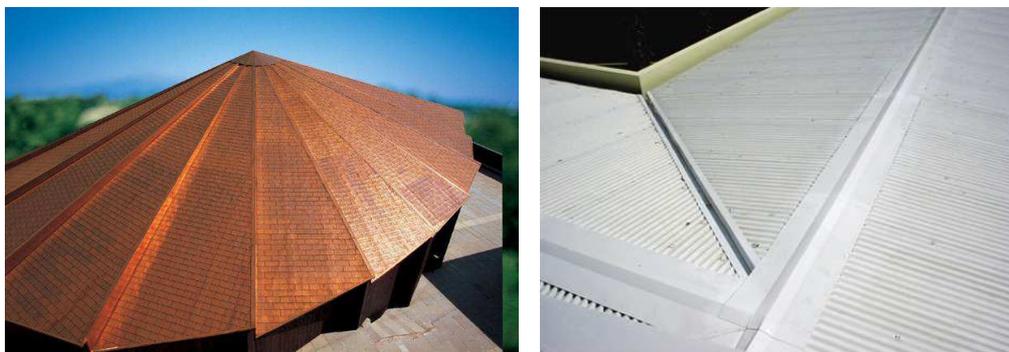


Fig. 86 e Fig. 87: Cobertura de cobre (esq.) e aço galvanizado (dir). (Fonte: DÂNICA. Disponível em: <http://www.danicacorporation.com> e TCSHINGLE. Disponível em: <www.tcshingle.com.br>)

No final do século XIX foi criado um novo material, o cimento amianto, que é a associação do amianto, uma fibra mineral natural sedosa, à pasta de cimento. Em primeiro momento, substituiu, com vantagens em termos de durabilidade e facilidade de aplicação, as chapas de madeira e placas de pedra e, mais tarde, com o desenvolvimento da chapa ondulada, deu lugar, em grande parte, às chapas metálicas, que requeriam custoso tratamento superficial e constante manutenção. Em 1940, a indústria que patenteou o processo foi instalada no Brasil, dando início à utilização desta telha em grande escala pela arquitetura moderna, em especial em edificações industriais (O FIBROCIMENTO..., 1990).

²⁰ ABNT NBR 14513:2002 - FABRICAÇÃO DE TELHAS DE AÇO REVESTIDO DE SEÇÃO ONDULADA e ABNT NBR 14514: 2002 - FABRICAÇÃO DE TELHAS DE AÇO REVESTIDO DE SEÇÃO TRAPEZOIDAL.

O amianto, segundo a ABREA-Associação Brasileira dos Expostos ao Amianto é caracterizado por suas propriedades físico-químicas (alta resistência mecânica e às altas temperaturas, incombustibilidade, boa qualidade isolante, durabilidade, flexibilidade, resistente ao ataque de ácidos, álcalis e bactérias, indestrutibilidade, facilidade de ser tecido etc.), abundância na natureza e principalmente baixo custo, sendo por este motivo largamente utilizado na indústria. No entanto, a descoberta de seus efeitos nocivos à saúde, sendo o amianto uma fibra comprovadamente cancerígena, levou à proibição do mesmo nos países desenvolvidos. No Brasil, é proibida em alguns Estados; porém, na maioria deles não há uma regulamentação contrária ao seu uso. Ainda assim, devido às polêmicas causadas com a divulgação de seus males, tornou-se um material em desuso, ainda que comercializado e utilizado até hoje.

Com a redução no uso das telhas de fibrocimento, novos materiais foram desenvolvidos com intuito de substituí-las, surgindo então novos produtos fabricados a partir de outras matérias-primas, como as fibras vegetais. A composição destas telhas pode variar conforme o fabricante; em geral são formadas por uma camada de fibras vegetais e, em alguns casos, também fibras minerais, que são impregnadas de betume, pigmentadas para se obter diferentes cores e protegidas por uma resina especial. Esta tem a finalidade de oferecer proteção contra os raios UV, preservando a cor do produto e impedindo a escamação da superfície, tão comum nas telhas multicamadas. Alguns exemplos de aplicação deste tipo de telhas estão nas figuras 89 e 90.



Fig. 88 e Fig. 89: Sedes industriais com coberturas em telhas de fibra vegetal, na Turquia (dir) e Espanha. (Fonte: ONDULINE. Disponível em: <www.onduline.com.br>. Acesso em 26 Julho de 2007)

Outro material comercializado atualmente é a telha asfáltica, que consiste em uma manta asfáltica composta por camadas a base de asfalto, fibra de vidro e acabamentos superficiais que variam desde grânulos ceramizados, minerais, lâminas de cobre ou de titânio-zinco. Cada componente é responsável por uma utilidade no conjunto do material, diferenciando-se em termos de quantidade e tipo, de acordo com cada fabricante. Assim, o asfalto tem o papel de garantir a maleabilidade e adaptabilidade a qualquer tipo de superfície, seja ela curva, arredondada ou recortada. Além disso, garante ao sistema do telhado a impermeabilidade que mantêm o ambiente interno livre de infiltrações ou goteiras. A fibra de vidro proporciona resistência mecânica e estabilidade dimensional ao produto quando submetido a

variações térmicas extremas. Quanto maior a gramatura, maior esta resistência. Por fim, a composição asfalto e fibra de vidro vêm protegidas por uma camada de grânulos ceramizados cuja propriedade possibilita a proteção dos raios ultravioletas, além de proporcionar o acabamento final em variadas cores. Os grânulos são fundamentais já que protegem toda a composição do produto. São encontrados no mercado a partir da rocha natural vulcânica, que é dura e livre de porosidades, impedindo a criação de microorganismos vivos, ou grânulos sintéticos, extremamente porosos, que acumulam sujeira e criam fungos indesejáveis, comprometendo sua propriedade protetora e diminuindo consideravelmente a durabilidade da telha. Alguns fabricantes utilizam pigmentação inorgânica, implementada pelo processo cerâmico, que torna as cores indefinidas, mais resistentes ao desbotamento e à criação de algas, fungos ou outros microorganismos vivos, enquanto outros utilizam a pigmentação orgânica e oferecem tratamento químico antifungo ao produto. Por meio do segundo processo, o produto tem vida útil pré-definida e deve passar por reaplicação de tempos em tempos, gerando ônus de manutenção a este tipo de sistema de cobertura.

As diversas composições encontradas atualmente no mercado nem sempre permitem uma classificação quanto à matéria-prima utilizada, já que geralmente são compostas de várias camadas, contendo diferentes substâncias, que resultam em aparências semelhantes, porém com qualidades distintas. Os produtos mais recentes, de maneira geral, proporcionam melhores resultados quanto à transmissão de calor e ruído, peso, versatilidade em formas e cores, durabilidade e impacto ambiental. Contudo deve-se tomar cuidado com as informações contidas nos catálogos de fabricantes. Apesar do aumento, por parte das indústrias, em pesquisas e ensaios para atender às normas cabíveis e padrões desejáveis, ainda há muitos fabricantes que não divulgam em seus catálogos dados importantes do produto. Muitos proclamam seus produtos como sendo “ecologicamente corretos”, no entanto, sem explicações claras quanto à origem da matéria-prima e ao procedimento industrial adotado. Também é comum encontrar telhas denominadas “térmicas”, sem que tenham sido avaliadas especificamente quanto ao desempenho térmico. Com a falta de conhecimento do público consumidor, e até mesmo dos profissionais, em alguns casos, existe uma tendência em se confiar nas informações fornecidas pelos fabricantes.

Outros tipos de cobertura têm sido empregados das mais diversas maneiras, como, por exemplo, as coberturas têxteis. Segundo Alucci *et al* (2005):

[...] As coberturas tensionadas ou coberturas têxteis ou, ainda, simplesmente “tensionados” vem sendo utilizados por praticamente todos os povos, há muitos séculos. Com o avanço da tecnologia, particularmente de perfis e cabos metálicos, os tensionados passaram a ser um elemento importante da arquitetura, particularmente para espaços que demandam apenas sombreamento.

Este componente evita que a radiação solar atinja os usuários, principalmente em espaços abertos, como estacionamentos. Trata-se de um material não opaco, que transmite também radiação luminosa, variável de acordo com o tipo de membrana adotada. Em edificações, é usada sobre outro componente de cobertura, servindo de sombreamento, e com isso, amenizando a carga térmica proveniente da radiação solar. A ventilação que ocorre no espaço de ar entre ambos os componentes permite a remoção de calor, o que também favorece o conforto interno da edificação.



Fig. 90 e Fig. 91: Coberturas Têxteis no aeroporto de Recife (PE) e na Universidade de Caxias do Sul (RS), respectivamente. (Fonte: ARQUITETURA TÊXTIL. Disponível em: <www.arquiteturatextil.com.br>. Acesso em 11 de setembro de 2007)



Fig. 92: Canteiro experimental *Domingos Bataglia* da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAU USP). (Fonte: BÜTTNER, S.)

Em se tratando de materiais alternativos, principalmente de baixo custo e impacto ambiental, pode-se citar as telhas ecológicas “tetra pak”, um material reciclado, que utiliza resíduos de embalagens do tipo “tetra pak”, compostas de papel (75%), polietileno (20%) e alumínio (5%). Trata-se de um produto ainda em fase de pesquisa, com poucas aplicações. Apesar dos produtos ecológicos voltados para a construção sustentável representarem uma área de grande potencial para o Brasil, esta ainda é pouco explorada (PERALTA; SCHIERI; FERREIRA, 2003).

Grande destaque é dado aos materiais transparentes e translúcidos, em que relevantes avanços

tecnológicos ocorridos nos últimos anos permitiram diversas aplicações ao vidro e plásticos translúcidos, em coberturas e marquises, assim como se observa nos aeroportos de Recife (fig. 94), Maceió (fig. 95) e Rio de Janeiro (Santos Dummont), por exemplo. Uma variedade de vidros especiais é encontrada hoje no mercado para suprir às limitações deste material, devido à suas características gerais de baixa resistência ao impacto e alta transmissão térmica. Questões relacionadas à segurança, resistência mecânica, transmissão luminosa e térmica foram aprimoradas, garantindo melhores resultados em relação ao vidro comum disponível no mercado até alguns anos. Contudo, é importante lembrar que continua sendo um material transparente ou translúcido, com grande transmissão luminosa e térmica, mesmo com as inovações. Portanto, em países de clima quente deve ser usado criteriosamente, com o devido conhecimento de suas propriedades físicas.



Fig. 93: Cobertura de vidro do Aeroporto de Recife – PE. (Fonte: MORETI... 2005)



Fig. 94: Aeroporto de Maceió – AL. (Fonte: ARQUITETURA..., 2001)

Entre os plásticos translúcidos mais utilizados na arquitetura estão o acrílico e o policarbonato: materiais orgânicos que, sob aplicação de calor e pressão, podem mudar de forma, mantendo-a quando o calor e a pressão forem retirados (termoplásticos). São constituídos por combinações de polímeros e outros materiais, como pigmentos e materiais de enchimento, atribuindo a esses plásticos características de transparência ou translucidez, baixo peso, maleabilidade, baixa condutividade térmica, elevado calor específico, apresentando a desvantagem de se decompor sob altas

temperaturas e da baixa resistência mecânica. O policarbonato é muito utilizado em coberturas nas quais se deseja obter iluminação natural, comercializado sob forma de chapa plana ou telhas de variados tamanhos, espessuras e texturas.

Com o desafio da indústria deste setor em buscar materiais transparentes e translúcidos, capazes de reduzir a transmissão de calor e maximizar a transmissão luminosa, destaca-se um produto inovador: o Etileno Tetrafluoretileno (ETFE). Trata-se de um material resistente, transparente e leve. Comparando-se este material com o vidro, apresenta as seguintes vantagens: mais leve (1% do peso do vidro com mesmo volume), melhor isolante, tem custo de instalação 70% menor, é auto-limpante e reciclável (EDEN PROJECT)²¹.

O material já está sendo aplicado em diversos países, dos quais se destacam a Inglaterra, Alemanha e China. A Inglaterra é considerada a pioneira²² na utilização deste material, com a construção do Eden Garden, em Cornwall. A estrutura acabada é uma realização sem precedentes, uma enorme estufa, composta de muitas cúpulas, contendo plantas do mundo todo. O local já se tornou um ponto turístico popular, atraindo milhares de visitantes todos os dias.

[...] Os projetistas do projeto Éden moldaram o material de ETFE em almofadas, extremamente fortes, cada uma feita de três folhas de filme ETFE soldadas juntas nas laterais, uma em cima da outra, com camadas de ar bombeadas entre elas. As camadas de ar fornecem isolamento sem diminuir a quantidade de luz solar que passa através delas. O mais legal destas almofadas é que elas são ajustáveis: em dias mais frios, pode-se bombear mais ar para fornecer maior isolamento; em dias mais quentes, elas podem ser parcialmente esvaziadas para permitir maior resfriamento (EDEN PROJECT. Disponível em: <www.edenproject.com>. Acesso em 04 de setembro de 2007).



Fig. 95: O Projeto Éden, em Cornwall, Inglaterra. (Fonte: EDEN PROJECT. Disponível em: <www.edenproject.com>. Acesso em 04 de setembro de 2007).

²¹ (EDEN PROJECT)²¹. Disponível em: <www.edenproject.com>. Acesso em 04 de setembro de 2007).

²² Não foram encontrados registros anteriores pela autora

Arrojados projetos de edifícios esportivos também utilizaram este produto, como os estádios Allianz Arena, em Munique e o AWD Arena em Hamburgo, construídos e reformados, respectivamente, para a copa do mundo de 2006, na Alemanha. No total, o revestimento da fachada e cobertura do Allianz Arena é composto por 2.874 painéis de membranas de ETFE infladas, formando uma espécie de colchão de ar. Cada membrana tem 0,2 mm de espessura e é resistente às mudanças climáticas. A pressão interna de cada painel é controlada por computador, evitando patologias que, caso apareçam, podem ser solucionadas com a remoção individual dos painéis, o que também pode ser feito para melhorar a ventilação. O aspecto visual mais marcante do estádio está na mudança de cores da fachada resultantes da instalação de lâmpadas com lentes coloridas entre as membranas (TECNOLOGIA..., 2006)



Fig. 96: Estádio Allianz Arena, em Munique – Alemanha: Jogo de luzes mudam o aspecto visual da fachada. Custo da obra: € 280 milhões. (Fonte: TECNOLOGIA..., 2006)

Também para as instalações das Olimpíadas de Pequim, realizadas em julho de 2008, foi utilizada esta tecnologia. É o caso do Centro Nacional de Natação, o *Water Cube* (Fig. 98), construído para este evento. Premiado internacionalmente, o edifício foi inspirado em conceitos da cultura oriental e, rapidamente, tornou-se referência entre edifícios de metrópole ecologicamente corretas. Assim, como no Projeto  den, foi desenhado para funcionar como uma estufa, ao absorver a radia o solar e evitar a perda de calor. As fachadas claras e translúcidas permitem altos níveis de luz diurna, o que evita o uso de ilumina o artificial durante o dia. Um dispositivo de abertura e fechamento da estrutura, formado pelo aço e pelas bolhas de ETFE, controla a luminosidade, de modo a criar efeitos de sombra e condi es ótimas de ilumina o para as câmeras de televisão. Até o momento, não se conhece no Brasil, nenhuma obra onde tenha sido aplicado este material.

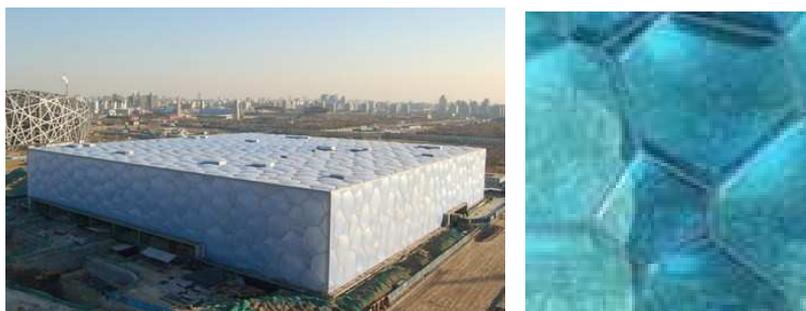


Fig. 97: O "Water Cube", em Pequim e a malha tridimensional das bolhas de ETFE. (Fonte: BEIJING 2008. Disponível em: <<http://en.beijing2008.cn>>. Acesso em 04 de setembro de 2007)

Apesar de ser uma tecnologia inovadora e com custos relativamente elevados, há registros de sua aplicação em edificações de porte pequeno, como é o caso da escola *Classroom of the Future*, em Londres, demonstrando ser um sistema viável.



Fig. 98: Escola *Classroom of the Future*, Londres. (Foto: Duarte, D.)

Não cabe a este trabalho entrar em detalhes quanto às diversas telhas destinadas às coberturas inclinadas (telhados), em substituição à telha cerâmica, como as de concreto, plástico (inclusive translúcida) e de materiais fibrosos (fibras vegetais e minerais) que, apesar de apresentarem inúmeras vantagens, principalmente quanto ao peso (aliviando a estrutura e, portanto, reduzindo custos) e manutenção, não fazem parte do escopo. Cabe lembrar ainda que a telha cerâmica continua sendo largamente utilizada, principalmente em residências, devido à abundância da argila em muitas regiões e ao bom desempenho térmico para climas quentes. Atualmente o processo de fabricação (cozimento da cerâmica) desta telha tem se modificado a fim de se reduzir o impacto ambiental gerado por este procedimento.

O registro aqui apresentado do mercado da construção civil demonstra o crescimento de obras de coberturas e marquises que expressam a tecnologia aplicada aos materiais utilizados. Edifícios comerciais, industriais, institucionais, hospitalares e também construções residenciais exibem projetos cada vez mais sofisticados, utilizando telhas metálicas termo-acústicas, vidros especiais de elevado desempenho, estruturas espaciais e chapas de policarbonato. Também os materiais não convencionais abrem uma nova possibilidade de aplicações, visando o menor impacto ambiental e edifícios mais eficientes.

7.2. Materiais utilizados em subcoberturas

As subcoberturas são componentes aplicados ao sistema de cobertura com a função de reduzir o ganho de calor através desta envoltória, servindo como medida de correção ambiental nos climas tropicais. Nos últimos anos, tem crescido rapidamente o uso de subcoberturas nas edificações brasileiras, cuja tecnologia, largamente utilizada no exterior, ainda não está totalmente dominada e nem

corretamente aplicada em nosso país em uma significativa parcela do mercado. Portanto, é fundamental o conhecimento dos mecanismos de trocas térmicas que ocorrem entre o meio externo e interno, visando a correta distinção entre cada tipo de subcobertura existente no mercado e seus princípios de funcionamento. Assim, vale lembrar que são considerados materiais isolantes neste trabalho, de acordo com a norma ASTM C 168/01, todos os materiais capazes de reduzir a transferência de calor, a partir das seguintes alternativas: o uso de materiais isolantes (isolantes resistivos), atuando sobre a componente condutiva; o uso de materiais de alta refletância na sua face externa (isolantes refletivos), diminuindo a absorção da energia solar, e o emprego de materiais de baixa emissividade (barreiras radiantes), reduzindo a quantidade de energia térmica de onda longa irradiada para o interior dos recintos. Então, são três mecanismos diferentes, que só funcionam quando aplicados adequadamente, o que justifica a importância de se compreender cada um dos fenômenos físicos. A seguir serão apresentados os principais componentes de cada grupo.

7.2.1. Isolantes Resistivos

Entre os isolantes resistivos tradicionais encontram-se as mantas e painéis constituídos de fibras minerais ou fibras orgânicas flexíveis, as espumas plásticas rígidas de poliuretano, poliestireno expandido ou extrudado, a vermiculita expandida ou perlita em grânulos, usadas para fabricação de blocos e chapas, principalmente, e os flocos de lãs minerais. A resistência térmica destes materiais é devida principalmente à grande quantidade de ar presente entre as fibras ou confinado nas pequenas células formadas no processo de expansão das espumas e dos isolantes granulares. Algumas espumas podem conter ainda nos seus poros outros gases, com condutividade menor que a do ar, como o freon, por exemplo (VITTORINO; SATO; AKUTSU, 2003). A seguir serão apresentados os principais materiais isolantes resistivos e suas características gerais.

O Poliuretano é uma espuma rígida predominantemente utilizada na técnica da isolação térmica, resultado da reação química de um poli-isocianato que, juntamente com o gás expensor, são responsáveis pelo alto fator de isolamento térmico, principalmente para superfícies operando a baixas temperaturas, conseqüência de sua baixa massa específica aparente (densidade) e baixo coeficiente de condutibilidade térmica. É utilizado em forma de placas e calhas, e pelos processos de injeção e pulverização.

O Poliestireno expandido, conhecido popularmente pelo nome de um de seus fabricantes, o *isopor* (marca registrada), é um polímero de estireno minúsculo resultante de pérolas, que submetidas à expansão de vapor d' água aumentam em até 50 (cinquentna) vezes seu tamanho original, fundindo-se e moldando-se em um material de excelente poder de isolamento, devido à grande quantidade de células fechadas e cheias de ar em seu interior. Apresenta maior resistência ao fogo se comparado ao poliuretano e é largamente utilizado para isolamentos de coberturas, principalmente devido custo, que é menor em relação à maioria dos materiais de isolamento. O produto não mofa, porém é deteriorado rapidamente pela ação fotoquímica gerada pelos raios solares e pela umidade. O poliestrieno é

encontrado também na forma de Poliestireno extrudado, que consiste em um termoplástico com estrutura de células fechadas, obtido por processo contínuo de extrusão do estireno polimerizado.



Fig. 99: Poliestireno extrudado (Fonte:catálogo do fabricante DOW - Roofmate SL)

A lã de vidro é outro isolante largamente utilizado em sistemas de coberturas. A diversidade de densidades, formas e espessuras oferecidas pela lã de vidro possibilitam o atendimento das mais diferenciadas gamas de necessidades de isolamento na construção civil. Já a lã de rocha é fabricada a partir de rochas basálticas especiais e outros minerais que aquecidos à cerca de 1500°C são transformados em filamentos que, aglomerados com soluções de resinas orgânicas, permitem a fabricação de produtos leves e flexíveis até muito rígidos, dependendo do grau de compactação. Devido às suas características, semelhantes às da lã de vidro, atende os mercados da construção civil, industrial, automotivos e eletrodomésticos, entre outros.



Fig. 100: Diferentes tipos de materiais isolantes. (Fonte: ROCKFIBRAS. Disponível em: < <http://www.rockfibras.com> >.

Acesso em: 28 de janeiro de 2008).

A Vermiculita é um mineral formado pela superposição de finíssimas lamínulas que, submetida a altas temperaturas (cerca de 1000 °C), sofre uma grande expansão de até quinze vezes do seu volume original, constituindo-se no produto industrializado que possui múltiplas utilizações em vários setores da construção civil. Os espaços vazios originados desta expansão volumétrica são preenchidos por ar, que conferem à vermiculita expandida certas características como baixa densidade (varia no intervalo de

80 até 120 kg/m³) e baixa condutibilidade térmica (aproximadamente 0,055 W/m°C), cerca de 30 a 40% menor que o bloco de concreto celular, permitindo sua utilização para a produção de refratários em isolamentos térmicos. Para isolamento de coberturas é aplicado em lajes de concreto leve de vermiculita expandida, em que o mineral é o principal agregado, ou aplicando-se uma camada de argamassa de vermiculita sobre a laje convencional impermeabilizada.



Fig. 101: Vermiculita em várias classificações, conforme granulometria. (Fonte: ISAR. Disponível em: <www.isar.com.br>. Acesso em: 06 de Setembro de 2007).

As fibras cerâmicas não costumam ser utilizadas para isolamento térmico de coberturas, sendo sua aplicação voltada predominantemente para isolamento térmico de fornos; na indústria de metais ferrosos e não ferrosos; na indústria naval e em proteção passiva contra incêndio de plataformas, navios e edifícios, cabos elétricos, etc. Portanto, não serão abordadas neste trabalho, sendo mencionadas por fazerem parte da gama de isolantes térmicos, porém não é um isolante próprio para coberturas de edifícios.

Como material alternativo podemos citar um isolante térmico fabricado a partir da fibra da casa de côco, que segundo Oliveira *et al* (2003), apresenta coeficiente de condutibilidade térmica de 0,041 W/m.K, valor equivalente ao dos isolantes térmicos sintéticos disponíveis no mercado. Os produtos apresentados podem ser aplicados de várias maneiras, podendo ser usados entre componentes (cobertura principal e forro) ou apenas no lado interno, dependendo do acabamento estético visado.

A espuma elastomérica é um isolante térmico produzido a partir de borracha sintética de alta densidade com baixo coeficiente de condutividade térmica (0,029 W/m°C). É fornecida em forma de mantas, tubos e fitas auto-adesivas, não sendo muito utilizada em coberturas, e sim em equipamentos. Trata-se de um material flexível e de fácil aplicação, podendo ser facilmente cortado segundo as necessidades de aplicação. Apresenta baixíssima permeabilidade ao vapor d' água e elevada resistência à difusão do vapor d' água garantindo longa vida útil.

Os materiais isolantes podem ser instalados no local da obra, quando adquiridos separadamente do componente de cobertura, ou ser preparados no processo industrial junto à telha, quando se adquire o sistema de cobertura pronto, como é o caso das telhas zipadas tipo sanduíche. Estas devem ter um rigoroso controle das emendas, evitando a entrada de umidade, o que pode inutilizar o material isolante.



Fig. 102: As telhas sanduíches recebem lã de rocha, de vidro ou ainda espumas plásticas no miolo entre duas lâminas.

(Foto: BIANCHINI/CONFORTO, 2007)

Quanto à escolha do material isolante a ser adotado no projeto, não existe uma recomendação única ou um produto considerado melhor. Todos têm suas características e propriedades, que devem ser analisadas para cada caso e decididos ainda na fase de planejamento, de maneira integrada aos demais projetos da obra. O ponto de partida para a escolha está em conhecer o clima onde será instalado o material e as fontes de calor internas da edificação, visando a correta especificação do material, espessura etc. Definindo isto, deve-se ater para os aspectos relacionados à resistência ao fogo, cuidados com a instalação, proteção contra umidade e outras características de desempenho do produto, além da disponibilidade do material na região de aplicação.

De uma maneira geral, os materiais plásticos, como o poliuretano e poliestireno, são indicados para temperaturas mais baixas (até 90 °C), pois são suscetíveis à deterioração pela ação do calor. No caso de altas temperaturas, é melhor optar pelos materiais a base de lãs, das quais se destacam as cerâmicas, seguidas da lã de rocha e depois da lã de vidro, em ordem decrescente de resistência ao calor. Em relação à umidade, as placas de poliestireno extrudado (quase não absorvem água) e poliuretano com células fechadas têm uma maior resistência em relação às lãs. Já em se tratando da propagação de chamas, todos os plásticos são inflamáveis, alguns mais ou menos, o que pode ser melhorado com a aplicação de aditivos para uma maior resistência ao fogo e retardamento na propagação deste (CONFORTO..., 2007).

7.2.2. Isolantes Refletivos e Barreiras Radiantes

O material comumente empregado em barreiras radiantes é o alumínio polido, na forma de lâminas ou folhas muito finas, com espessura da ordem de 6 a 8 μm , cuja emissividade é menor que 0,1. Os principais produtos oferecidos no mercado nacional como barreiras radiantes são constituídos de:

- folha de alumínio aderida a uma ou ambas as faces de um substrato que pode ser de diversos materiais como, por exemplo, malha polimérica, papel kraft, etc.

- folha de alumínio em uma ou em ambas as faces de “plástico bolha”, com espessura de 3 a 5mm;
- camada metálica entre filmes de polietileno aderidos a espuma plástica também de polietileno, com espessura de 2 a 5 mm;
- filme plástico com camada metálica aderida por deposição a vácuo.

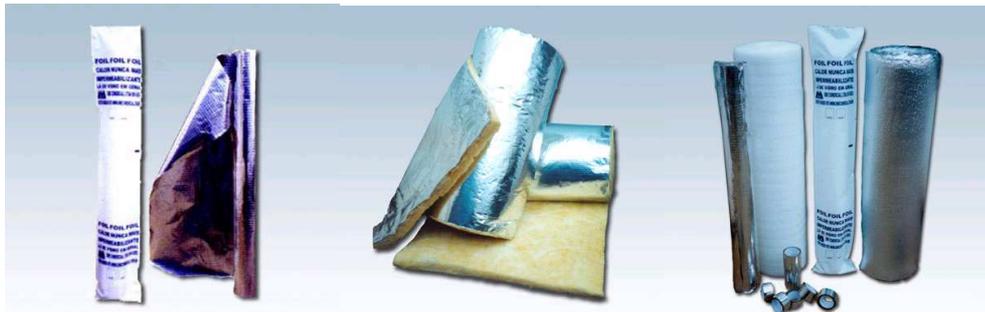


Fig. 103: Diferentes composições das barreiras radiantes, conhecidas como “foil de alumínio”. (Fonte: HEME ISOLANTES. Disponível em: <www.hemeisolantes.com.br>. Acesso em: 26 de julho de 2007)

Os substratos nos quais a folha de alumínio é aplicada servem para proporcionar resistência mecânica ao produto. O “plástico bolha” e as espumas plásticas podem conferir um isolamento térmico adicional, por reduzir também as transferências de calor por condução.

A aplicação inapropriada de uma barreira radiante pode reduzir o seu desempenho e comprometer a sua durabilidade, pois as características superficiais destes materiais são alteradas quando ocorre o acúmulo de poeiras, a presença, por muito tempo, de umidade e de poluentes aéreos que possam reagir com o metal da superfície. Desta forma, a fim de se manter um bom isolamento térmico por períodos longos, é recomendável colocar a face com baixa emissividade voltada para baixo, condição que minimiza a ação da poeira, da umidade e demais elementos indesejáveis. No entanto, o que se observa na prática é a instalação da superfície de baixa emissividade direcionada para o telhado, tendo em vista tirar proveito da sua alta refletância ao infravermelho. Enquanto novo, o desempenho do produto será semelhante ao obtido com a superfície de baixa emissividade voltada para o ambiente interno. Porém, com o tempo, aumentará sua emissividade, devido ao acúmulo de poeira que penetra pelas frestas entre as telhas, na superfície superior deste elemento, reduzindo a sua eficiência (VITTORINO, SATO, AKUTSU, 2003). Não são raras as vezes em que estas subcoberturas estão posicionadas do lado externo da cobertura, voltadas diretamente para as intempéries. Os resultados são a pouca durabilidade do material e a pouca eficiência, já que a propriedade de baixa emissividade é referente às ondas longas e não às ondas curtas provenientes da radiação solar direta, e que corresponde à principal fonte de calor durante o dia, que só é reduzida com o uso de materiais com propriedade de isolamento resistivo.



Fig. 104: Demonstração de como as barreiras radiantes são aplicadas equivocadamente do lado externo da cobertura, em São Paulo. (Foto: Büttner, S.)

7.3. Coberturas e subcoberturas mais usuais na região de estudo

Na região de estudo, mais especificamente, na cidade de Cuiabá, foi realizado um levantamento quanto aos tipos de coberturas mais utilizados em edificações comerciais, industriais, institucionais, hospitalares e educacionais, visando uma análise quanto aos materiais mais adotados e quanto ao desempenho térmico destes no clima local. Alguns pólos foram identificados, nos quais se concentram uma maior quantidade de edificações do tipo galpão, situadas ao longo de algumas das principais avenidas da cidade. Entre elas pode-se destacar as seguintes avenidas ladeadas por galpões destinados a atividades comerciais:

- Avenida Miguel Sutil (linha azul)
- Avenida Fernando Correia da Costa (linha cor de rosa)
- Avenida Rubens de Mendonça (linha vermelha)
- Avenida Tenente Coronel Duarte (linha verde)
- Avenida Carmindo de Campos (linha laranja)

Olhando-se de cima, percebe-se o impacto das coberturas na paisagem urbana, conforme as ilustrações abaixo:

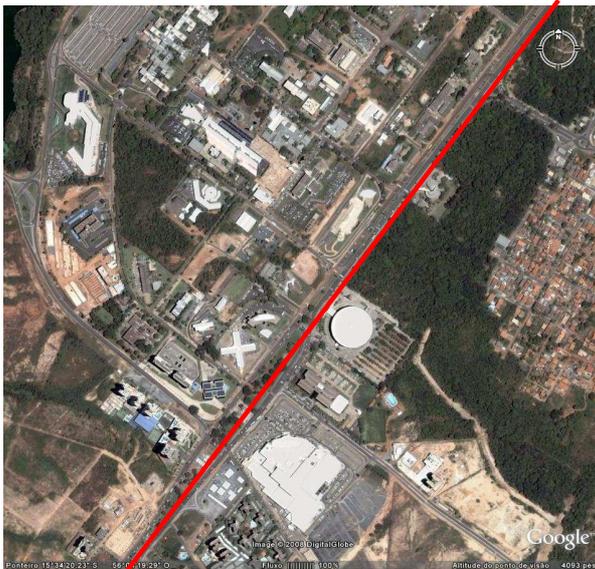


Fig. 105 (esq.): Vista aérea da avenida Rubens de Mendonça: trecho situado em área de expansão, onde se encontram edificações mais recentes, como o Shopping Pantanal e edificações do governo no Centro Político Administrativo (CPA). Fig. 106 (dir.): Cruzamento das Av. Rubens de Mendonça (linha vermelha) e Miguel Sutil (linha azul) (Fonte: GOOGLE EARTH. Disponível em: < <http://earth.google.com/>>. Acesso em: 21 de janeiro de 2008)



Fig. 107 (esq.): Trecho da Av. Tenente Coronel Duarte (linha verde). Fig. 108 (dir.): Trecho da Av. Miguel Sutil (linha azul): Supermercados, Hospital e galpões comerciais. (Fonte: GOOGLE EARTH. Disponível em: < <http://earth.google.com/>>. Acesso em: 21 de janeiro de 2008)



Fig. 109: Vista aérea de um trecho da Av. Carmindo de Campos, ladeada por galpões comerciais (linha amarela). (Fonte: GOOGLE EARTH. Disponível em: <<http://earth.google.com/>>. Acesso em: 21 de janeiro de 2008

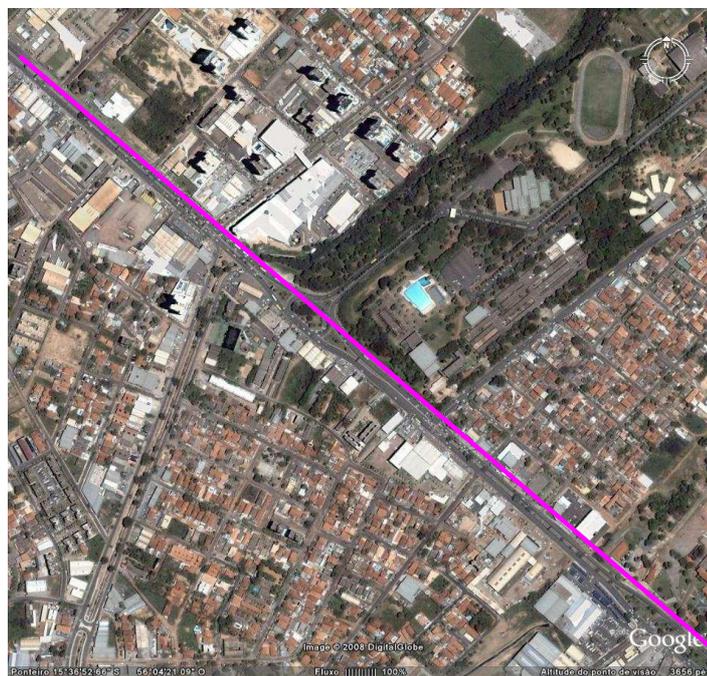


Fig. 110: Avenida Fernando Correia da Costa. (Fonte: GOOGLE EARTH. Disponível em: <<http://earth.google.com/>>. Acesso em: 21 de janeiro de 2008)

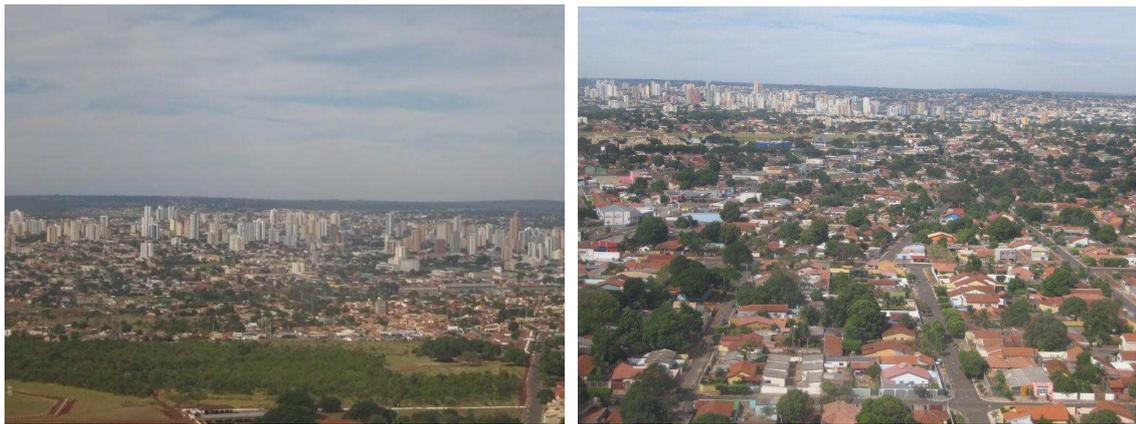


Fig. 111 e Fig. 112: Vistas aéreas de Cuiabá - MT, em julho de 2007. (Foto:DUARTE, D.)



Fig. 113: Vista aérea de Várzea Grande, cidade vizinha de Cuiabá, em setembro de 2007: predominância de edificações horizontais. Fig. 114: Vista aérea das cidades de Cuiabá e Várzea Grande (MT), separadas pelo rio Cuiabá, em dezembro de 2007. (Fotos: DUARTE. D.)

Nos principais pontos comerciais da cidade, observa-se uma tipologia marcante de galpões comerciais e industriais, destinados às atividades de mercenaria, serralheria e lojas de diversos segmentos. Em visita à avenida Carmindo de Campos, uma das mais movimentadas e caracterizada pela presença de galpões desta tipologia, é perceptível a semelhança arquitetônica entre estas construções: plantas retangulares e coberturas de pouca inclinação, com telhas metálicas (chapas simples) ou de cimento-amianto. Estes dois tipos de telhas predominam nas edificações desta categoria, em sua maioria instaladas sem a presença de um forro. É comum a instalação de exaustores nas coberturas, com a intenção de minimizar o superaquecimento destes ambientes. Apesar de facilitar a remoção do ar quente, essa alternativa não soluciona o problema térmico, pois na maioria das vezes não permite uma renovação eficiente do ar interno com remoção da carga térmica acumulada e também não reduz o efeito do calor radiante.

Alguns galpões apresentam aberturas superiores, como lanternins, ou mesmo espaços livres entre a estrutura do edifício e a cobertura, favorecendo a ventilação por efeito chaminé. No entanto, não são poucos os galpões desprovidos de qualquer tipo de abertura para a ventilação, além daquela destinada à entrada principal de acesso ao estabelecimento, na parte frontal, tornando estes ambientes de trabalho insalubres e extremamente desconfortáveis.



Fig. 115: Cobertura metálica convencional, com exaustores, no Shopping popular – camelódromo, localizado na av. Carmindo de Campos. (Foto: Büttner, S.)

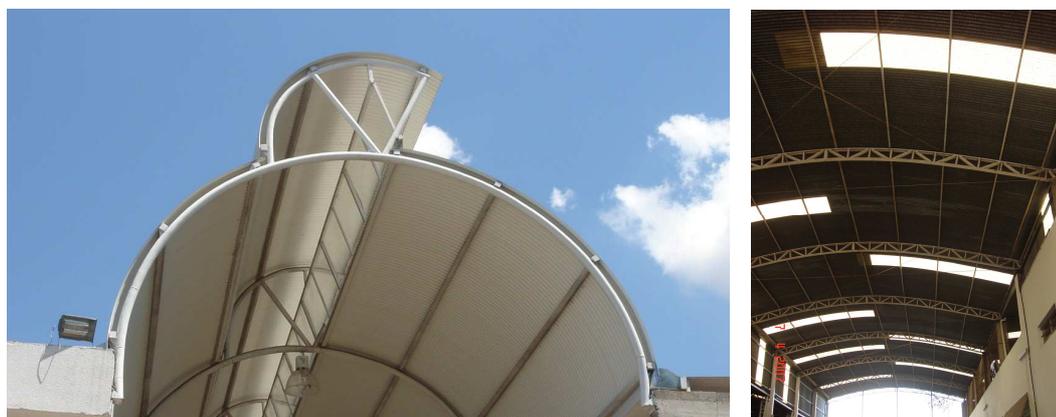


Fig. 116 (esq.): Cobertura metálica projetada para a saída de ar quente e iluminação natural, em galeria comercial. Fig. 117 (dir): Cobertura metálica intercalada com chapas translúcidas, em galpão comercial. Ambas na av. Carmindo de Campos. (Fotos: Büttner, S.)

Consistem, na maior parte, em empresas comerciais de pequeno e médio porte, instaladas há mais de 15 anos, que passaram por reformas neste período, porém, com raras exceções, sem um investimento na troca de cobertura. Por falta de conhecimento da influência deste componente no conforto térmico dos usuários e no consumo de energia com a climatização, empresários, arquitetos e engenheiros optam por investir nos equipamentos de ar condicionado. A consequência é o alto consumo de energia e, em situações críticas de verão, a incapacidade do sistema em promover o conforto do ambiente interno, por causa, principalmente, da inadequação do sistema de cobertura. Esta situação se repete em outros pontos comerciais, sem dúvida com variações na configuração espacial da cobertura, no tipo de material empregado, assim como na presença ou não de forro ou aberturas altas, porém com predominância das características mencionadas.



Fig. 118: Galpões na Av. Miguel Sutil - Coberturas metálicas com exaustores.(Foto: Büttner, S.)

As maiores lojas de materiais de construção da região dispõem somente das telhas convencionais, metálicas e de cimento-amianto (sem contar as cerâmicas e cimentícias), que apesar dos prejuízos conhecidos, continuam sendo usadas. Até pouco tempo, o consumidor em busca de telhas mais avançadas tecnologicamente tinha que importá-las. Recentemente, duas grandes indústrias líderes do mercado nacional se instalaram na região, ambas fabricantes de painéis isolantes térmicos. Outro tipo de telha, não convencional, comercializada na região, é a telha asfáltica.

Com a facilidade proporcionada por estas novas empresas, e a divulgação no meio profissional da construção civil, o mercado de coberturas na região tende a se modificar, principalmente em obras de grande porte. Entre as construções mais recentes, já é possível encontrar telhas térmicas e forros isolantes. Entre elas estão algumas obras do governo, supermercados e o shopping center mais recente da cidade. Não se pode afirmar que não há obras comerciais de pequeno porte, cujas coberturas são de telhas térmicas, mas sim, que estas são minoria, em se tratando de uma região de grande potencial para o uso de materiais isolantes, devido ao rigor climático.

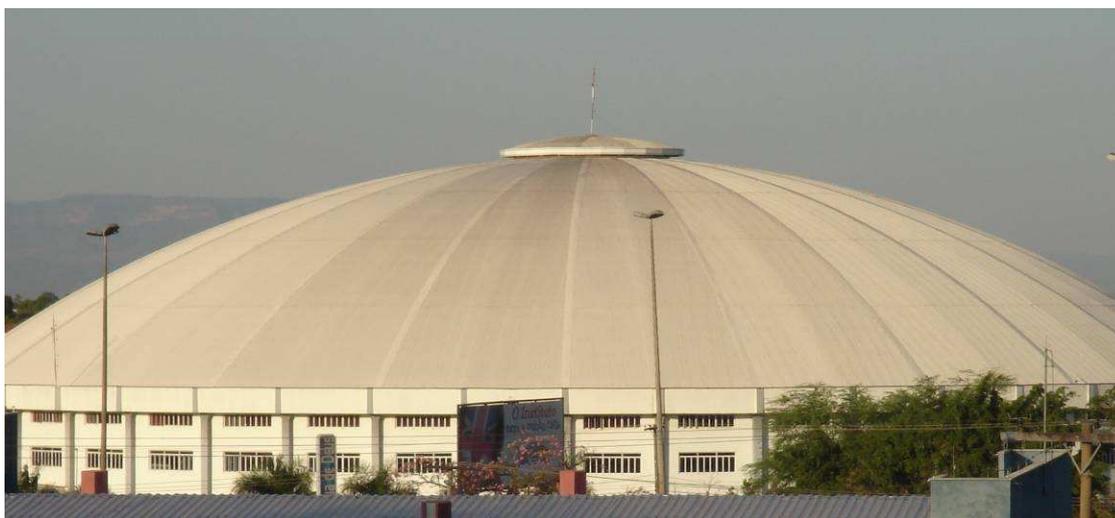


Fig. 119: Edificação religiosa, com cúpula metálica. (Foto: Büttner, S.)



Fig. 120: Cobertura metálica (com forro) do hospital Santa Rosa (dir.) e Fig. 121: Telhas metálicas com forro isolante, intercaladas com telhas translúcidas, no supermercado MAKRO (esq.). (Foto: Büttner, S.)

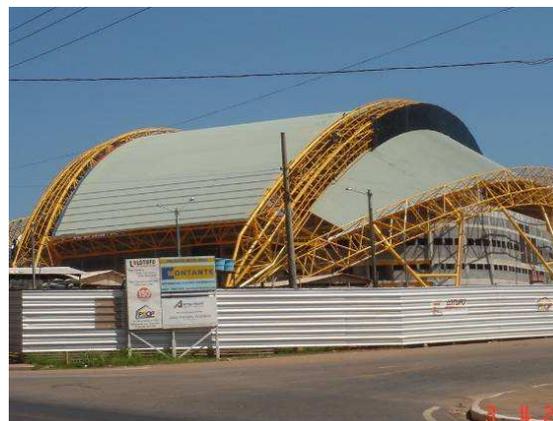


Fig. 122: Cobertura de telha metálica isolante com enchimento em poliestireno expandido, em galpão comercial na av. Barão de Melgaço. Fig. 123: Ginásio poliesportivo, no bairro Verdão, com cobertura curva de telha metálica tipo sanduíche e enchimento em poliuretano expandido. (Foto: Büttner, S.)

Além da pouca utilização de materiais mais eficientes, é comum a adoção de soluções equivocadas na tentativa de melhorar as condições internas de conforto térmico. Dentre essas aplicações inadequadas, pode-se citar a utilização das lâminas refletivas de alumínio, cujas superfícies refletoras são colocadas equivocadamente do lado externo da cobertura. O material, cujas propriedades servem de barreira radiante devido à sua baixa emissividade, é eficaz quando inserido sob, ou entre, componentes da cobertura, com a superfície polida (de baixa emissividade) voltada para baixo, e não tem um desempenho adequado nem duradouro quando aplicado do lado externo. Isso sem falar na capacidade refletiva desses materiais que prejudicam ainda mais as condições térmicas exteriores nas áreas próximas à sua instalação.



Fig. 124: Secretaria de Fazenda do Estado de Mato Grosso, exemplo de aplicação incorreta da barreira radiante.

(Foto: Büttner, S.)

Quanto às subcoberturas, há ainda os materiais isolantes, entre as telhas e o forro. Estas podem ser consideradas como um exemplo apropriado e bastante usado, uma vez que proporciona melhores efeitos ambientais, aproveitando-se o componente existente, ou seja, sem que haja a necessidade da troca total do sistema de cobertura. Entre os materiais mais usados para este fim estão a lã de vidro e de rocha e as espumas plásticas poliestireno e poliuretano, que são facilmente encontrados nas lojas do ramo.

As próximas imagens ilustram os tipos de coberturas mais usados em diversas tipologias de edificações predominantemente horizontais de Cuiabá.

Edificações educacionais:



Fig. 125: Edifício novo do Instituto de Educação da UFMT – Cobertura com telha metálica simples e forro. (Foto: Büttner, S.)



Fig. 126: Universidade de Cuiabá - UNIC e Fig. 127: Faculdade de Tecnologia e Engenharias da Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT, respectivamente. Ambas cobertas por telhas de cimento amianto, forradas internamente.

(Foto: Büttner, S.)

Edificações Institucionais / governamentais:



Fig. 128: Tribunal de Contas da União: Cobertura metálica ondulada, com sistemas de aberturas, projeto do arq. Lelé.

(Foto: Büttner, S.)



Fig. 129: SEMA - Secretaria do Meio Ambiente, cobertura metálica sextavada, com sistema de ventilação. (Foto: Büttner, S.)



Fig. 130 e Fig. 131: Assembléia Legislativa e Moitará Sebrae Center, respectivamente: telhas metálicas. (Foto: Büttner, S.)



Fig. 132: Parte das instalações do Detran – cobertura com telha metálica simples . (Foto: Büttner, S.)



Fig. 133: Cobertura do Fórum de Cuiabá: Vista de cima e do pátio interno, respectivamente. (Fonte: EDIFÍCIO..., 2005)



Fig. 134: Fórum de Cuiabá: Cobertura atirantada, ora metálica ora translúcida, com largo espaço entre esta e a laje, permitindo a ventilação e a manutenção técnica. (Foto: Büttner, S.)



Fig. 135: Vistas internas da cobertura metálica do Fórum de Cuiabá. (Foto: Büttner, S.)



Fig. 136: Cobertura com grama sintética para circulação vertical, no CPA – Centro Político Administrativo. (Foto: Büttner, S.)

Centros Comerciais:



Fig. 137: Shopping Goiabeiras: Cobertura metálica sem isolante e alto consumo de energia elétrica com o sistema de ar condicionado. (Foto: Büttner, S.)



Fig. 138: Shopping Três Américas: telhas metálicas simples. (Foto: Büttner, S.)

Fig. 139: Shopping Pantanal: O mais recente shopping da cidade - uso de telhas metálicas com isolamento térmico. (Fonte: SHOPPING PANTANAL. Disponível em: <www.pantanalshopping.com.br>. Acesso em: 19 de setembro de 2007)

8. MEDIÇÕES DE CAMPO

O método experimental de avaliação adotado nesta pesquisa é o de simulação computacional. Porém, antes de se iniciar o procedimento foi preciso definir a ferramenta a ser adotada e também se considerou importante a realização de uma série de testes, visando o aprendizado da ferramenta por parte da pesquisadora e a obtenção de parâmetros quanto ao comportamento térmico de diferentes tipos de coberturas no clima estudado. Para isto foram realizadas medições de campo, em edificações de mesma tipologia daquelas a serem analisadas, com os seguintes objetivos:

- Obter parâmetros gerais quanto ao comportamento térmico de 3 (três) tipos diferentes de coberturas no clima estudado, por meio da análise dos resultados obtidos de temperatura do ar interno, temperatura radiante, temperatura superficial externa e interna e umidade do ar.
- Adquirir maior experiência prática na realização de medições das variáveis ambientais, o que é fundamental para o pesquisador na área de conforto ambiental, familiarizando-se com o manuseio dos equipamentos de medição. Para este processo estudou-se manuais e normas relacionadas ao assunto, além da troca de informações com pesquisadores mais experientes do LABAUT. A execução da medição, incluindo as decisões a serem tomadas perante possíveis imprevistos e a análise dos resultados obtidos atribui ao pesquisador uma maior compreensão quanto aos fenômenos térmicos envolvidos e mais segurança quanto aos fatores condicionantes que interferem no comportamento térmico de determinado edifício. Por este motivo, torna-se uma etapa indispensável para auxiliar a etapa posterior da pesquisa, a de simulações computacionais, cuja análise dos resultados se torna mais difícil quando não se tem referências anteriores.
- Obter resultados de medição que possam servir de parâmetro aos resultados de simulação, e assim permitir uma avaliação do programa investigado. Ou seja, obter dados de uma situação real para a realização de uma simulação computacional com o intuito de auxiliar no aprendizado do programa, na avaliação prévia quanto ao seu funcionamento, e assim, obter critérios para a escolha definitiva da ferramenta computacional a ser adotada.

8.1. Método

As medições realizadas seguiram as recomendações da norma INTERNATIONAL STANDART ISO 7726 – Ergonomics of the Thermal Environment – Instruments for Measuring Physical Quantities, adaptando-as, sempre que necessário, às condições do estabelecimento, de maneira que não interferisse em seu funcionamento e preocupando-se com a questão da segurança dos equipamentos.

8.2. Equipamentos utilizados

Para a realização das medições foram utilizados os equipamentos do Labaut / FAU/USP e um equipamento (termômetro infravermelho para temperatura superficial) gentilmente cedido pelo proprietário do galpão:

Tabela 3 - Equipamentos utilizados na medição

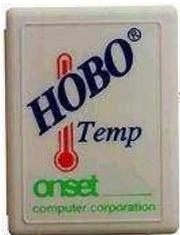
EQUIPAMENTO	MARCA / MODELO	FUNÇÃO
HOBO 	Marca: Tracom Modelo: Hobo H8	Mede: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperatura do ar (°C) (Bulbo seco) ▪ Umidade relativa do ar (%) ▪ Umidade absoluta do ar (gm/m³) ▪ Ponto de orvalho ▪ Temperatura radiante (°C)

Fig. 140: Hobo (Fonte: TRACOM. Disponível em: <<http://www.tracom.com.br>>. Acesso em: 11 janeiro de 2008)

GLOBO CINZA 	Produzido pelo pesquisador do LABAUT Leonardo Monteiro ²³ .	Simula as condições de um corpo humano para receber radiação dos demais objetos circundantes
--	--	--

Fig. 141: Globo pintado de cinza (Foto: BUTTNER, S.)

ANEMÔMETRO (de ventoinha) 	Marca: Homis	Mede: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Velocidade do ar (m/s)
--	--------------	--

Fig. 142: Anemômetro. (Foto: BUTTNER, S.)

²³ A cor é cinza, pois tem uma absorção equivalente ao valor médio do conjunto pele-vestimenta das pessoas em geral (INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION, 1998)

<p>BÚSSULA</p> 	<p>Marca: Lensatic Compass</p>	<p>Indica orientação N-S-L-W</p>
--	--------------------------------	----------------------------------

Fig. 143: Bússula. (Foto: BUTTNER, S.)

<p>CABO CONECTOR</p>		<p>Conecta equipamento ao computador para transmissão dos dados</p>
----------------------	--	---

<p>TERMÔMETRO A LASER*</p> 	<p>Marca DELLT Modelo DT-FS</p>	<p>Mede:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperatura superficial (°C)
---	-------------------------------------	---

Fig. 144: termômetro infravermelho. (Fonte: DELLT. Disponível em: <<http://www.dellt.com.br>. Acesso em 11 janeiro de 2008.)

<p>CD DE INSTALAÇÃO DO SOFTWARE BOXCAR</p>		<p>Permite configuração de dados (intervalo de tempo, variáveis a medir) e leitura dos dados.</p>
--	--	---

*Equipamento gentilmente cedido pelo proprietário do galpão. Os demais são do LABAUT

8.3. Períodos de medição

Foram realizadas medições no inverno de 2007 e no verão de 2008, com a finalidade de se buscar referências representativas de uma situação típica de inverno e outra de verão. A medição de inverno ocorreu no período entre 16 de junho (a partir de 00:00h) e 03 de julho (até às 9:00 h), enquanto a medição de verão no período correspondente ao intervalo entre os dias 20 de dezembro de 2007 (partir de 00:00h) e 12 de janeiro de 2008 (até às 12:00h) . As datas foram definidas segundo a disponibilidade da aluna em viajar até a cidade, à disponibilidade dos equipamentos do LABAUT para empréstimo, buscando atender ao requisito principal de realizar as medições em um período estável.

Ou seja, a condição ideal era que não houvesse quedas bruscas de temperatura, chuvas ou demais fenômenos meteorológicos que pudessem interferir na avaliação. Quanto maior o tempo de medição, melhor seria a coleta de dados, pois um período maior amplia as possibilidades de ajustes em caso de intervenções externas causadas por dias atípicos, seja devido à ocupação por pessoas no edifício ou ao clima. Durante o processo, as condições climáticas eram observadas pela aluna, a fim de se caracterizá-las e definir um dia para avaliação, compreendido entre um período de 3 (três) dias consecutivos, anteriores e posteriores, de relativa estabilidade climática. Desta forma, estabeleceu-se dois dias que pudessem representar um dia de referência para o período de inverno: 22 e 28 de junho de 2007; e um dia para o período de verão: 10 de janeiro de 2008.

A medição de verão teve a finalidade de oferecer mais parâmetros de comparação, confirmar alguns dados duvidosos da medição anterior e de permitir uma avaliação também para esta estação, aumentando a possibilidade de se avaliar outra situação, caso fosse necessário. Ambas foram importantes para a aquisição de experiência prática por parte da pesquisadora, no entanto somente a medição no inverno é que serviu de referência para a etapa posterior de simulação, já que foi mais estável e seus dados mostraram-se suficientes para alcançar o objetivo proposto. Além do mais, o período de verão não apresentou a estabilidade das condições climáticas, como se observou no inverno, devido à frequência das chuvas características desta estação. Por isso, somente a medição de inverno será abordada neste trabalho.

8.4. Galpões estudados

Foram realizadas medições em 2 (dois) galpões comerciais situados na cidade de Cuiabá-MT, um deles com 2 (dois) pontos de medição, formando no total 3 (três) pontos, cada um com diferentes características construtivas.

8.4.1. Galpão 01

a. Características Gerais do galpão 01

USO: Comercial

EMPRESA: Casa da Cozinha (loja de utensílios para casa)

LOCALIZAÇÃO: Avenida Carmindo de Campos, 3219, Cuiabá-MT.

NÚMERO DE PAVIMENTOS: 02 - Térreo (loja) e Mezanino (Almoxarifado).

ENTORNO: a NE: Caixa viária (calçada+via+calçada) de aprox. 19m, e campo de futebol (areia), arborizado no perímetro;

- a SE: Galpão comercial coberto por telhas de alumínio, de aproximadamente 5 m de altura
- a SW: Área não edificada: terra e grama;
- a NW: Galpão comercial, coberto por telhas cerâmicas, de aproximadamente 5 m de altura.

VIZINHANÇA: Predominância de galpões comerciais de até 2 (dois) pavimentos, justapostos.

SOMBREAMENTO NA COBERTURA: não

CLIMATIZAÇÃO: Possui sistema de ar condicionado, porém somente é acionado em situações de extremo calor.



Fig. 145: Fachada frontal (NE) do galpão 01, com edifícios adjacentes, na av. Carmindo de Campos. (Foto: BUTTNER, S.)



Fig. 146: Imagem Aérea do entorno do galpão 01. (Fonte: GOOGLE EARTH. Disponível em: <<http://www.googleearth.com>>.

Acesso em: 21.jan.2008)

b. Características Construtivas do galpão

Tabela 4 - Dimensões do galpão 01

PAVIMENTO TÉRREO – ÁREA FRONTAL:	
Área de piso e cobertura	236 m ²
Pé-direito	4,0 m
Volume	944 m ³
Área envidraçada	34,2 m ² (52% da fachada)
PAVIMENTO TÉRREO – ÁREA POSTERIOR:	
Área de piso e cobertura	120 m ²
Pé-direito	5,0 m
Volume	600 m ³
MEZANINO:	
Área de piso e cobertura	75m ²
Pé-direito	1,4 m (min.) e 3,0 m (máx.)
Volume	165 m ³ (valor aproximado)

Tabela 5 - Materiais de construção do galpão 01

COMPONENTE	MATERIAL	ESPESSURA (cm)
Piso - Loja (Térreo)	Laje	10
	granilite	1,0
Piso - Ático	Laje	10
	Contra-piso	1,5
Paredes	Tijolo cerâmico – 8 furos	9,5
	reboco de argamassa interno e externo e pintura branca	1,5 + 1,5
Cobertura – Área frontal (duas águas)	Telha cerâmica	1,5
	Camada de ar (confinada)	± 200
	Forro de pvc	0,5
Cobertura – Área posterior (duas águas)	Telha de fibrocimento	0,4
	Camada de ar (confinada)	100
	Forro de pvc	0,5
Cobertura – Mezanino (duas águas)	Telha cerâmica sem forro	1,5
Janelas	não tem	-
Vidros (fachada frontal)	Vidro simples transparente	0,3

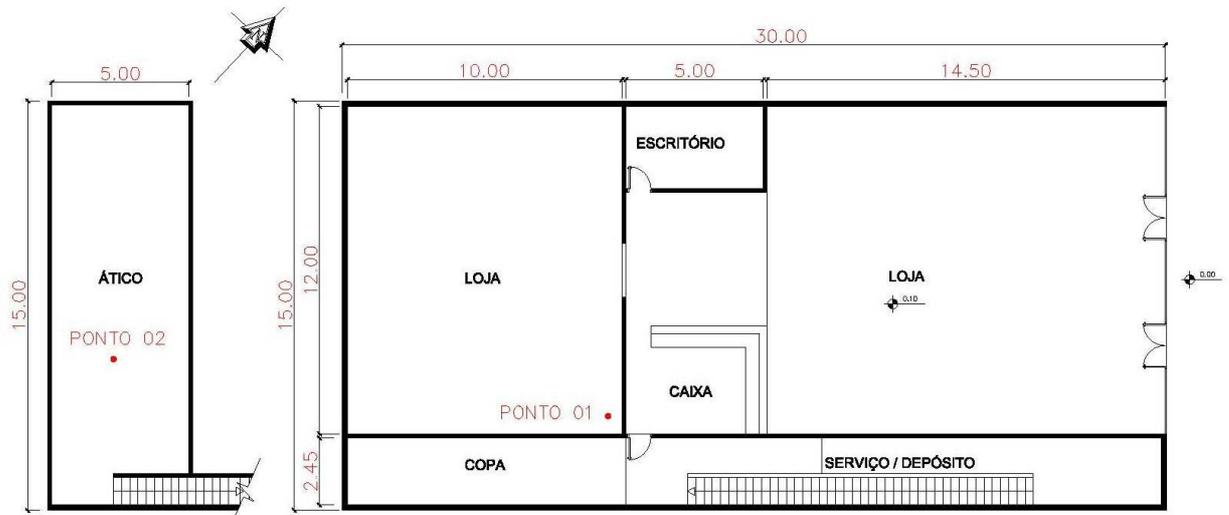


Fig. 147: Planta Baixa do Galpão 01 – Térreo e Mezanino (BUTTNER, S.)

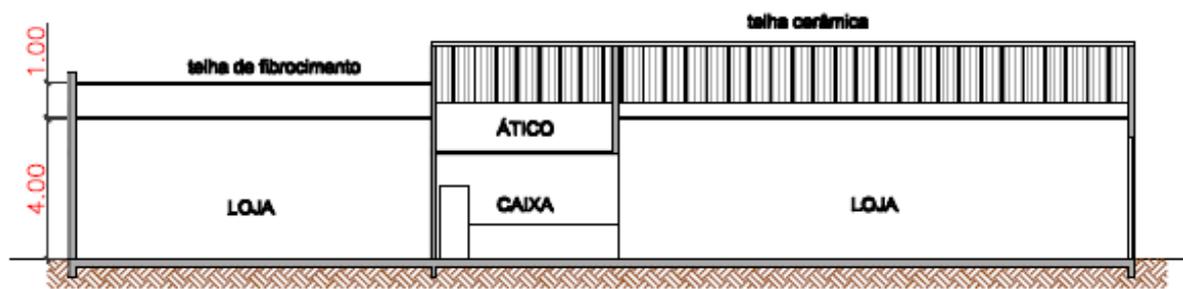


Fig. 148: Corte do Galpão (BUTTNER, S.)



Fig. 149: Imagens internas do estabelecimento (Fotos: UMAKOSHI, E.)

c. Pontos de medição

▪ Ponto 01: Localizado no térreo, na área posterior

SISTEMA DE COBERTURA:

H HOBO: (a partir do forro)

H GLOBO: (a partir do forro)

Telha de fibrocimento + camada de ar confinada + forro de pvc

110 cm

190 cm



Fig. 150: Ponto 01 de medição (térreo) do galpão 01. (Foto: BUTTNER, S.)

OBSERVAÇÕES:

- Ponto situado próximo à parede sudeste, sem contato com meio exterior (galpão vizinho), e próximo a prateleiras de vidro com mercadorias expostas;
- Paredes noroeste e sudoeste em contato com o exterior, expostas ao sol da tarde.
- Cobertura totalmente desobstruída

▪ Ponto 02: Localizado no mezanino

SISTEMA DE COBERTURA:

H HOBO: (a partir da telha)

H GLOBO: (a partir da telha)

Telha cerâmica sem forro

40 cm

190 cm



Fig. 151: Ponto 02 de medição (mezanino) do galpão 01. (Foto: BUTTNER, S.)

OBSERVAÇÕES:

- Ponto situado na região central do ambiente;
- Paredes com pouca exposição ao meio exterior
- Cobertura totalmente desobstruída

d. Carga Interna: Ocupação

Tabela 6 - Carga térmica – Ocupação do galpão 01

AMBIENTE	FUNÇÃO	ATIVIDADE	CALOR METABÓLICO	CALOR SENSÍVEL	CALOR LATENTE
Loja / térreo (PONTO 01)	01 Gerente / proprietária	sentado, digitando	117	65	52
	02 Clientes	Em pé, andando	180 (x2)	100 (x2)	80 (x2)
	02 Vendedores	Em pé, andando	180(x2)	100 (x2)	80 (x2)
TOTAL			837	465	372
Mezanino (PONTO 02)	Sem ocupação				
TOTAL			0,0		

(Fonte: ASHRAE Handbook of Fundamentals)

e. Carga Interna: Equipamentos

Alguns equipamentos de escritório estão localizados em uma sala fechada e outros na área frontal, não interferindo na carga térmica dos ambientes medidos. Na área posterior, correspondente ao ambiente do ponto 01, e no mezanino, correspondente ao ambiente do ponto 02, não há equipamentos.

f. Carga Interna: Iluminação

Tabela 7 - Carga térmica – Iluminação do galpão 01

Lâmpada	Potência (W)	Quant.	FATOR REATOR	SUBTOTAL (W)	AMBIENTE
FLUORESCENTE TUBULAR	2 X 32	14	1.1	986	Loja / térreo (área posterior)
-	-	0	-	0	Mezanino

8.4.2. Galpão 02

a. Características Gerais do galpão

USO: Comercial

EMPRESA: E-bone Climatizadores (Escritório, estoque e venda)

LOCALIZAÇÃO: Avenida Barão de Melgaço, 2330, Cuiabá-MT.

NÚMERO DE PAVIMENTOS: 2 – Térreo (loja) e Subsolo (Estacionamento)

ENTORNO:

- a NE: Edifício de escritórios de 4 pavimentos;
- a SE: Estacionamento, parcialmente coberto por telhas metálicas simples;
- a SW: terreno baldio
- a NW: caixa viária (calçada+via+calçada) de 19m, e galpão comercial de 5m de altura, distante a 28 m do galpão E-bone (valores aproximados).

VIZINHANÇA: Predominância de galpões comerciais e edificações térreas.

SOMBREAMENTO NA COBERTURA: Somente no período matutino.

CLIMATIZAÇÃO: Não possui sistema de ar condicionado, porém ventiladores com aspersão de água, acionados para demonstração do produto ou em situações de extremo calor.



Fig. 152: Vistas da fachada frontal do galpão 02 com entorno. (Foto: BUTTNER, S.)

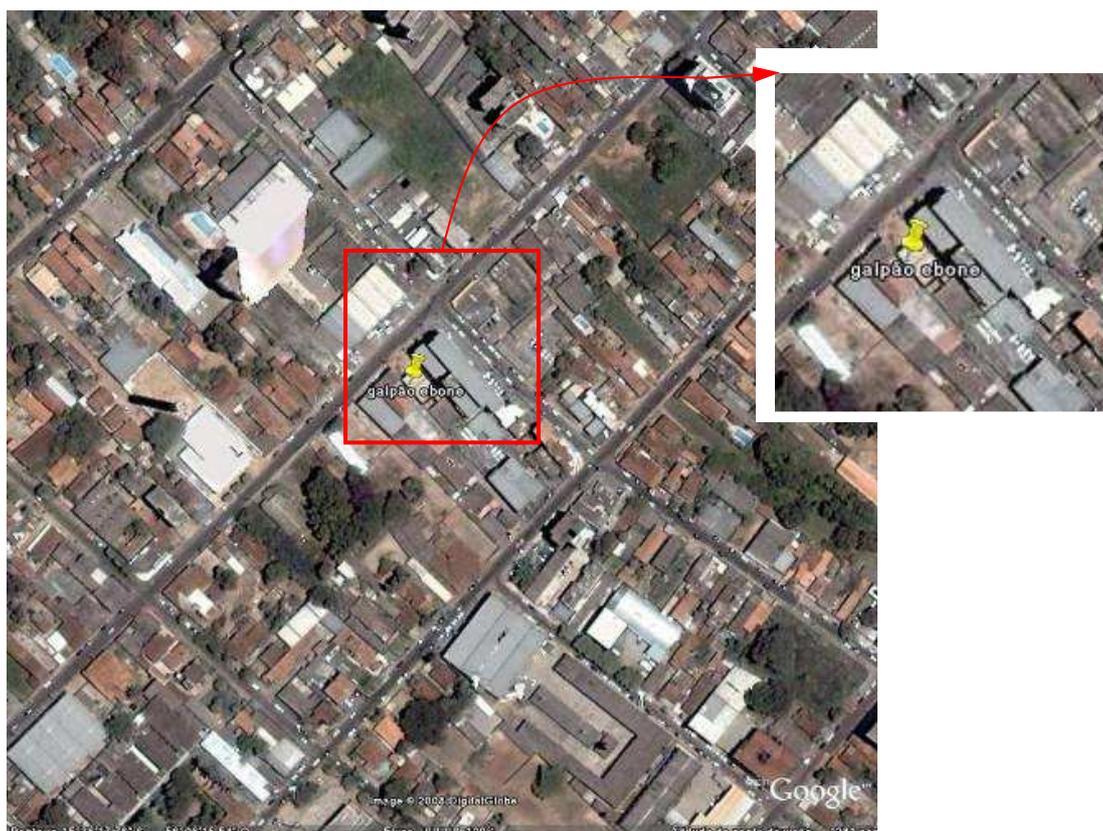


Fig. 153: Imagem aérea do entorno do galpão 02 e vista aproximada (canto superior dir.).(Fonte: GOOGLE EARTH. Disponível em: <<http://www.googleearth.com>>. Acesso em: 21.jan.2008)

b. Características Construtivas do galpão

Tabela 8 – Dimensões do Galpão 02

Área de piso e cobertura	21,75 x 10,75 = 233 m ²
Pé-direito	4,4 m (mín) / 5,0 m (máx.)
Volume	1049 m ³

Tabela 9 – Materiais e componentes do Galpão 02

COMPONENTE	MATERIAL	ESPESSURA (cm)
Piso	Laje	10
	cimentado	3
Paredes	Tijolo cerâmico – 8 furos	9,5
	reboco de argamassa interno e externo	1,5 + 1,5
Cobertura	Telha metálica com preenchimento de poliuretano *	5
Divisória	Compensado / madeira	5
Janelas	Vidro simples transparente	0,8
Portão	alumínio	1

- Especificação da telha: Isotelha EPS, Revestimento superior: Aço pré-pintado (0,43mm / cor branca); revestimento inferior: filme de alumínio fosco (0,04 mm); núcleo em EPS - Poliestireno expandido de fabricação própria com densidade média $D = 14,5\text{kg/m}^3$ classe F (auto-extinguível), na espessuras de 50mm, livre de CFC, conforme NBR 11984 (ABNT).



Fig. 154: Telha com isolamento térmico do fabricante ISOESTE (Fonte: ISOESTE. Disponível em: <<http://www.isoeste.com.br>>. Acesso em 20.12.2007).



Fig. 155: Subsolo/garagem. Fig. 156: Piso cimentado. Fig. 157: Janela no térreo com folhas de correr de vidro comum transparente. (Foto: BÜTTNER, S.)

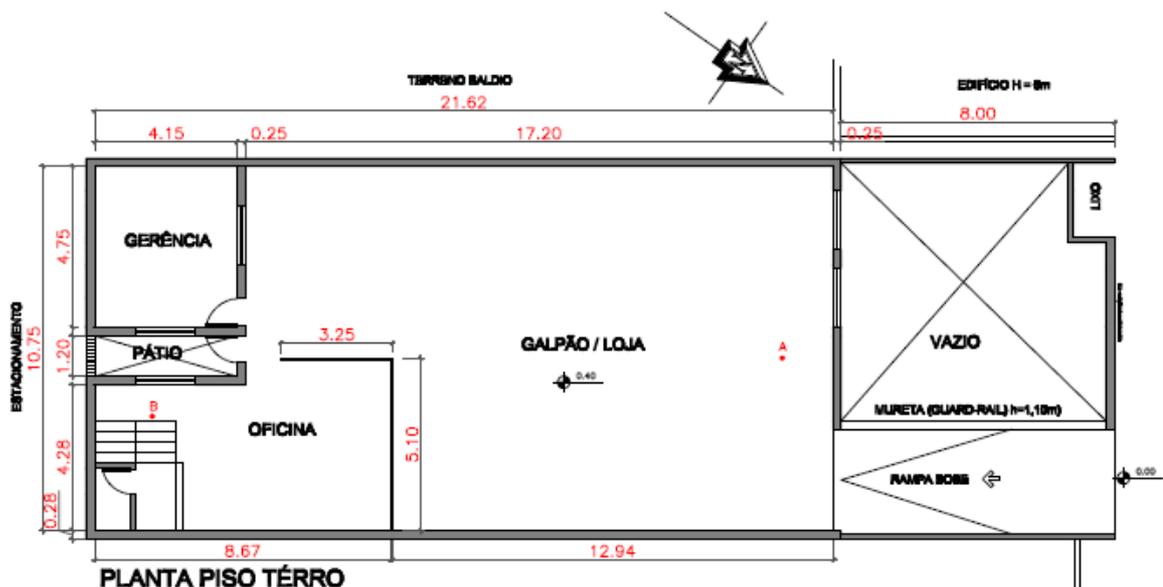


Fig. 158: Planta Baixa do Galpão 02. (BÜTTNER, S.)

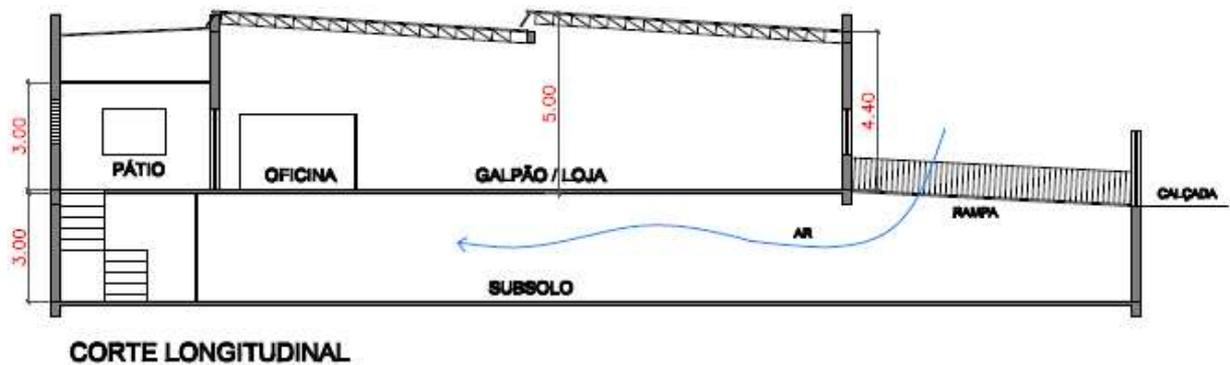


Fig. 159: Corte do Galpão 02. (BÜTTNER, S.)

c. Ponto de medição

No galpão 02, os equipamentos foram instalados em apenas 1 (um) ponto, denominado de ponto A:

▪ Ponto A: Localizado no térreo.

SISTEMA DE COBERTURA:

Telha sanduíche: Revestimento superior (aço pré-pintado – 0,43 mm / cor branca); revestimento inferior (filme de alumínio estuado fosco - 0,04 mm; núcleo em EPS - Poliestireno expandido.

Sem forro adicional

H HOBO: (a partir do forro)

60 cm

H GLOBO: (a partir do forro)

190 cm



Fig. 160: Ponto de medição do galpão 02. (Foto: BUTTNER, S.)

OBSERVAÇÕES:

- ponto próximo à parede noroeste, exposta ao meio externo, sem sombreamento e dotada de aberturas;
- As janelas e portas permanecem abertas durante o dia e fechadas durante a noite
- As paredes correspondentes aos demais fechamentos do ambiente também estão expostas ao meio externo, sendo que a parede nordeste está protegida por obstáculo (edifício vizinho)

d. Carga Interna: Ocupação

O galpão é destinado a um escritório comercial de revenda de climatizadores com aspersão de água, não havendo muito fluxo de pessoas além dos funcionários, pois as vendas são feitas por pedido, muitas delas com vendedores externos. Segue a ocupação de pessoas durante o horário de funcionamento, que é das 8:00h às 18:00h, conforme a tabela a seguir:

Tabela 10 - Carga térmica – Ocupação do Galpão 02

FUNÇÃO	ATIVIDADE	AMBIENTE	CALOR METABÓLICO	CALOR SENSÍVEL	CALOR LATENTE
Gerente ou proprietário	Em pé, trabalho leve	Galpão / loja (ambiente medido)	126	70	56
Assistente técnico	Sentado, com movimentos pesados dos membros	Galpão / loja (ambiente medido)	234	130	104
Vendedor	Em pé, andando	Galpão / loja (ambiente medido)	180	100	80
Cliente	Em pé, andando	Galpão / loja (ambiente medido)	180	100	80
TOTAL		Galpão / loja	720	400	320
secretária	Sentado, digitando	Sala gerência	117	65	52
gerente	Sentado, digitando	Sala gerência	117	65	52
TOTAL		Sala gerência	234	130	104

(Fonte: ASHRAE Handbook of Fundamentals)

e. Carga Interna: Equipamentos

Tabela 11 – Carga térmica – Equipamentos do Galpão 02

Equipamento	QUANTIDADE	Potência (W)	Tempo de uso (DIÁRIO)	AMBIENTE
Som	1	12	8	Gerência
ventilador	1	160	8	Gerência
computador	2	100	8	
TOTAL		272		Gerência
Geladeira	1	300	8	Galpão
ventilador	2	100	8	Galpão
Equip. oficina	1	100	3	Galpão
TOTAL		600		Galpão



Fig. 161: Sala de gerência e Fig. 162: Interligação da sala de gerência com o espaço do galpão: janela e porta constantemente abertas. (Foto: BÜTTNER, S.)

f. Carga Interna: Iluminação

Tabela 12 – Carga térmica – Iluminação do Galpão 02 / Loja

Lâmpada	Pot. (w)	Quant. (un)	FATOR REATOR (W)	SUBTOTAL (W)	AMBIENTE
FLUORESCENTE TUBULAR	32	8	1.2	307	Galpão / loja
FLUORESCENTE COMPACTA	20	1	1.1	22	Galpão / loja
TOTAL				329	Galpão / loja
FLUORESCENTE COMPACTA	20	2	1.1	44	Sala gerência
TOTAL				44	Sala gerência



Fig. 163: Vista do forro com luminárias. (Foto: BÜTTNER, S.)

8.5. Considerações quanto ao procedimento de medição:

É importante reforçar o objetivo desta medição, que tem um caráter exploratório, e por isso não seguiu com rigor os procedimentos exigidos na norma citada, o que é necessário em pesquisas científicas de avaliação de desempenho térmico. Ainda assim, foi de extrema importância, já que serviu de referência para a etapa posterior de avaliação (3ª parte da dissertação), esta sim com a finalidade de uma avaliação completa e precisa. Algumas observações importantes devem ser mencionadas, decorrentes das dificuldades encontradas e demais justificativas quanto às decisões tomadas no decorrer das medições.

Há de se lembrar que, por se tratar de edificações comerciais em funcionamento, alguns fatores como a rotina do estabelecimento e a disponibilidade de ajudantes interferiram na execução desta tarefa.

8.5.1. Quanto à disposição dos equipamentos

Em ambos os galpões procurou-se instalar os equipamentos da mesma maneira, ou o mais semelhante possível. O *Hobo* foi suspenso a uma distância de 60 cm da cobertura, enquanto que o termômetro de globo cinza ficou aproximadamente a 1,9m da mesma. Foi deixada uma distância mínima entre ambos para evitar interferências por radiação do globo na medição da temperatura do ar. No galpão 02 não foi possível abaixar a altura do *Hobo* próximo à do usuário devido à circulação de pessoas e carros, o que poderia danificá-lo ou movê-lo de maneira indesejada durante a medição. Por não se tratar de uma avaliação das condições de conforto do usuário e sim do desempenho térmico da cobertura, considerou-se adequada esta altura próxima à cobertura.



Fig. 164: Ponto interno de medição no galpão 02: próximo à fachada NW. (Foto: BUTTNER, S.)

8.5.2. Quanto à medição do vento

Em situações comuns, a cidade de Cuiabá não apresenta velocidades médias muito elevadas devido às características do seu relevo, pois está localizada em uma depressão geográfica, o que dificulta a penetração do vento na área urbana. Os dados obtidos do aeroporto Marechal Rondon apresentam velocidades superiores às encontradas no centro urbano, devido às condições de campo aberto e à altitude um pouco mais elevada da estação. Ainda há de se considerar que a velocidade, direção e o fluxo do ar, de uma maneira geral, sofrem alterações devido ao conjunto de construções existentes na cidade. Para a utilização do dado de vento em uma avaliação de desempenho térmico da edificação seria necessária a obtenção do dado exato de velocidade e direção de vento no local de estudo, preferencialmente de hora em hora. No entanto, apenas com a finalidade de se ter uma referência da velocidade do ar no local e compará-la com o dado da estação meteorológica do aeroporto, mediu-se este parâmetro com a utilização do anemômetro de ventoinha, sem que houvesse a exatidão desejada. Não foi possível montar uma estação meteorológica fixa no local, devido às dificuldades encontradas, como questões de segurança e falta de voluntários para auxiliar, o que se explica também com a distância do local de estudo em relação à instituição de ensino, onde se encontram os equipamentos e pesquisadores com experiência em medições que poderiam auxiliar na realização dos trabalhos. Trata-se, então, de uma medição exploratória, em dias alternados, apenas 3 (três) vezes ao dia, sem o rigor e a quantidade de informações necessárias para a utilização do dado em cálculos de avaliação de conforto, porém suficientes para obter um parâmetro em relação ao dado horário de vento disponível, e a partir de então, ter critérios para uma provável correção ao utilizar os dados do aeroporto para avaliações de desempenho térmico.

No inverno, as velocidades realmente foram menores em relação às do aeroporto, na maioria das vezes, em torno de 0,2 m/s, variando até aproximadamente 1,0 m/s, do lado externo da edificação (válido para os instantes de medição apenas), apresentando certa estabilidade. Já no verão, alguns picos de velocidade mais alta foram identificados, devido aos temporais que estavam ocorrendo no período, chegando a 4,0 m/s em determinados instantes. Internamente, em todas as medições realizadas a velocidade do ar registrada foi de 0,0 m/s a 0,5 m/s, próximo ao ponto de medição e às aberturas.

8.5.3. Quanto à medição da temperatura superficial

As medições das temperaturas superficiais da cobertura foram realizadas 03 (três) vezes ao dia (8:00h/14:00h/18:00h), com algumas lacunas no período. A principal dificuldade na medição da temperatura superficial externa foi a acessibilidade do local, já que exige determinada altura e proximidade ao ponto de medição e à falta de pessoas para auxiliar na medição nos horários previstos. Outro problema encontrado está na exatidão do termômetro infra-vermelho, que, segundo informações

obtidas no IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo²⁴, não mede superfícies de aço com precisão. Por estes motivos, as temperaturas superficiais encontradas não são confiáveis, servindo apenas como um parâmetro de comparação entre os 3 (três) tipos de telhas e os diferentes horários. Referindo-se a uma medição cuja finalidade é o aprendizado e a obtenção de parâmetros gerais, considerou-se o procedimento aceitável, ainda que sem exatidão.



Fig. 165: Vista da cobertura, do local de onde se teve acesso. (Foto: BÜTTNER, S.)

8.6. Resultados obtidos e análise geral

Os resultados de temperatura interna do ar (°C); umidade relativa do ar (%) e temperatura radiante (°C), obtidos por meio do equipamento *Hobo* durante o período de medição foram plotados em gráficos para uma melhor visualização. Já as temperaturas superficiais, medidas pontualmente com o uso do termômetro a laser seguem em tabelas e em gráfico somente para o dia de referência adotado. Para uma melhor compreensão do comportamento do edifício em relação à temperatura externa, montou-se um gráfico contendo esta variável comparada às temperaturas internas do ar e radiantes para cada um dos períodos representativos, ou seja, os dias de referência²⁵ e os dias que os antecederam e sucederam.

De uma maneira geral, os resultados obtidos nesta experiência apresentaram valores esperados e uma seqüência lógica, de acordo com as condições do clima durante o período experimental, não havendo uma discordância significativa, permitindo assim a comparação entre os 03 (três) pontos medidos e a análise do comportamento dos diferentes sistemas de coberturas.

²⁴ Informação verbal obtida no dia 28 de maio de 2008 (posteriormente à medição), do engenheiro Fúlvio Vittorino, no IPT.

²⁵ As análises se referem aos dias 22 e 28 de junho de 2007, considerados os dias pertencentes aos períodos mais estáveis.

8.6.1. Resultados – galpão 01 / ponto 01

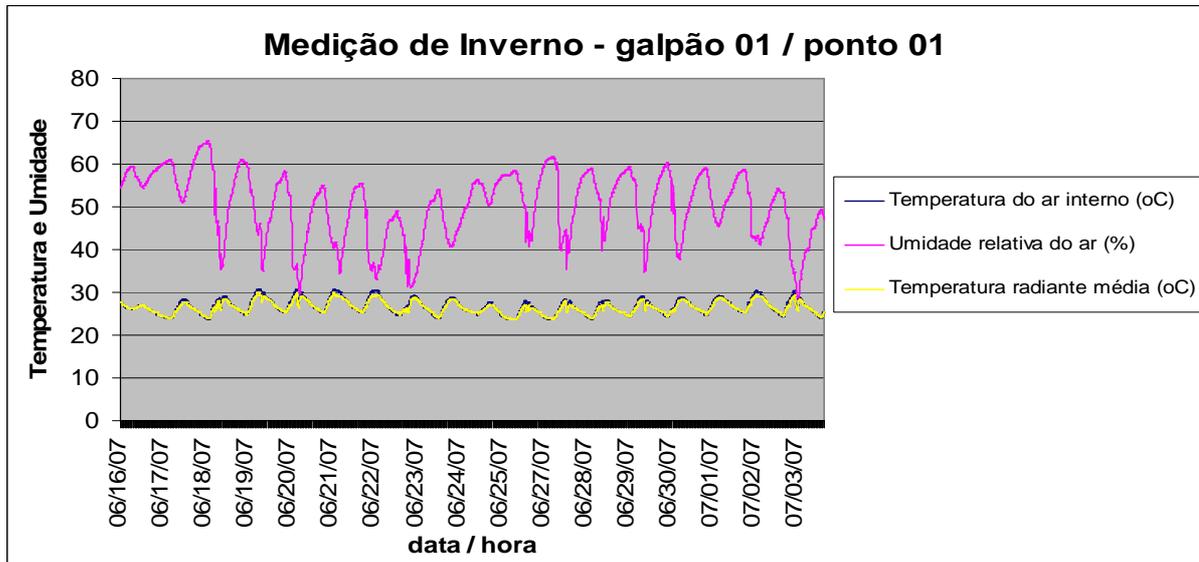


Gráfico 1-Resultado da medição de inverno (período completo) no galpão 01/Ponto 01

Tabela 13 - Temperaturas obtidas - Galpão 01 / Ponto 01, dias 22 e 28.06.2007

Dia	Hora	T. sup. Int. (°C)	T. sup. Ext. (°C)	T ar Int. (°C)	T ar Ext. (°C)	T radiante Int. (°C)
22/jun	08:00	26,5	30,0	25,1	23	25,1
	14:00	34,4	46,3	29,9	33	29,1
	18:00	29,7	28,6	29,9	29	29,5
28/jun	08:00	25,3	27,0	24,0	18	24,0
	14:00	31,0	40,0	25,5	28	25,5
	17:50	27,5	23,5	27,9	27	27,5

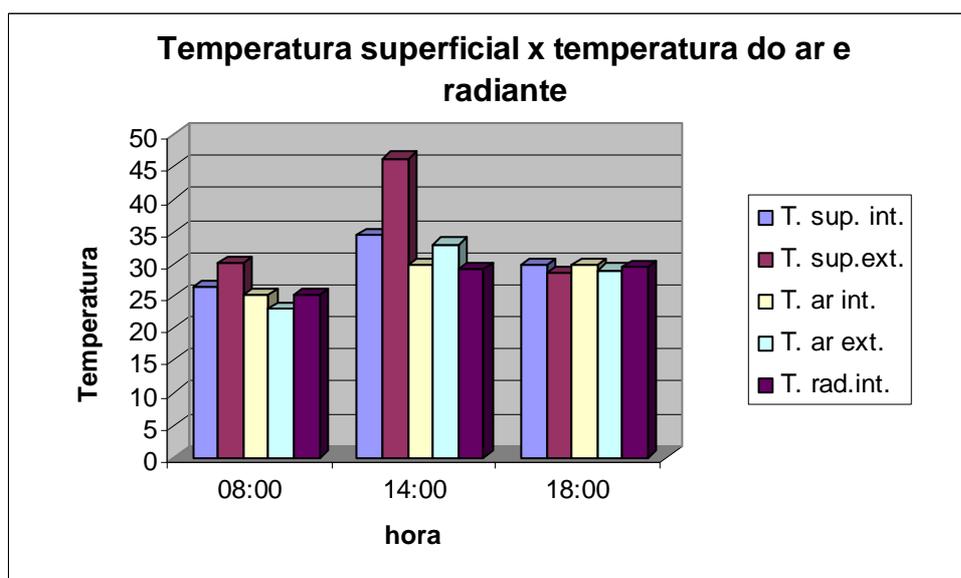


Gráfico 2 – Temperaturas internas e externas em °C, do galpão 01/Ponto 01, dia 22.06.2007

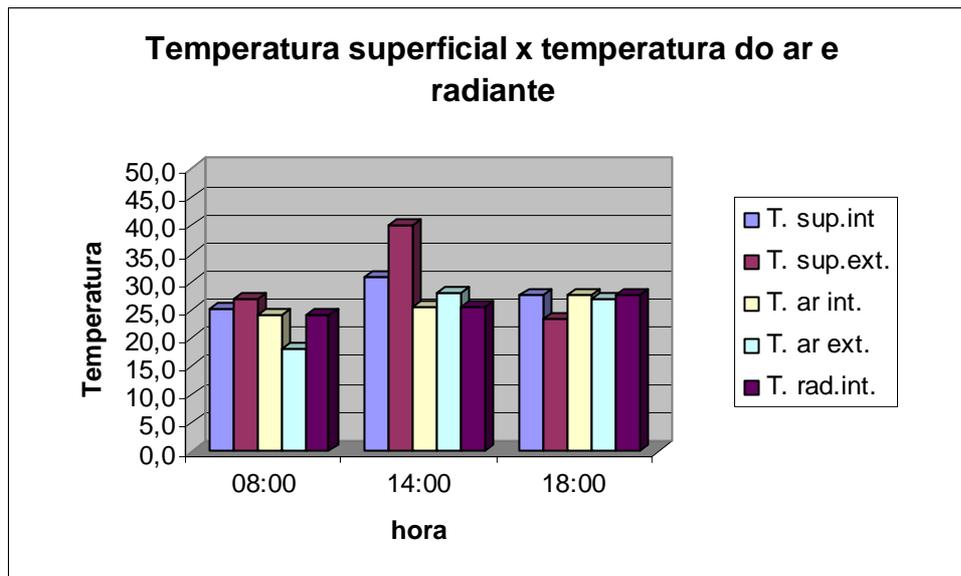


Gráfico 3 - Temperaturas internas e externas em °C, do galpão 01/Ponto 01, 28.06.2007

Vale lembrar que as temperaturas superficiais externas são valores aproximados, medidos em cobertura semelhante de outra edificação próxima ao galpão 01, pois não houve a possibilidade de acesso à cobertura deste galpão. O entorno e as condições de manutenção da telha podem ter interferido nos resultados.

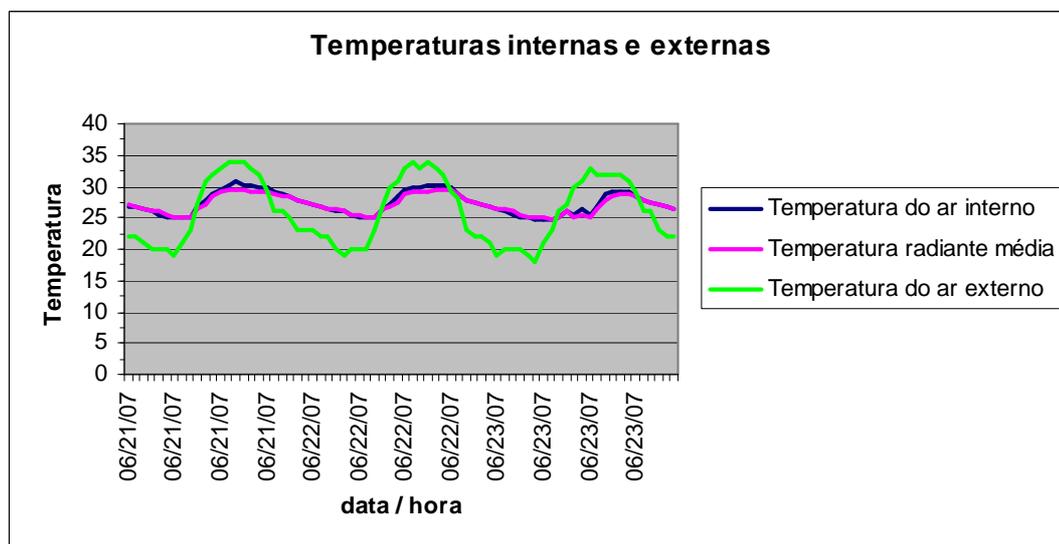


Gráfico 4 - Temperatura do ar interno, temperatura radiante e temperatura do ar externo, em °C, Galpão 01/Ponto01, dias 21, 22 e 23.06.2007

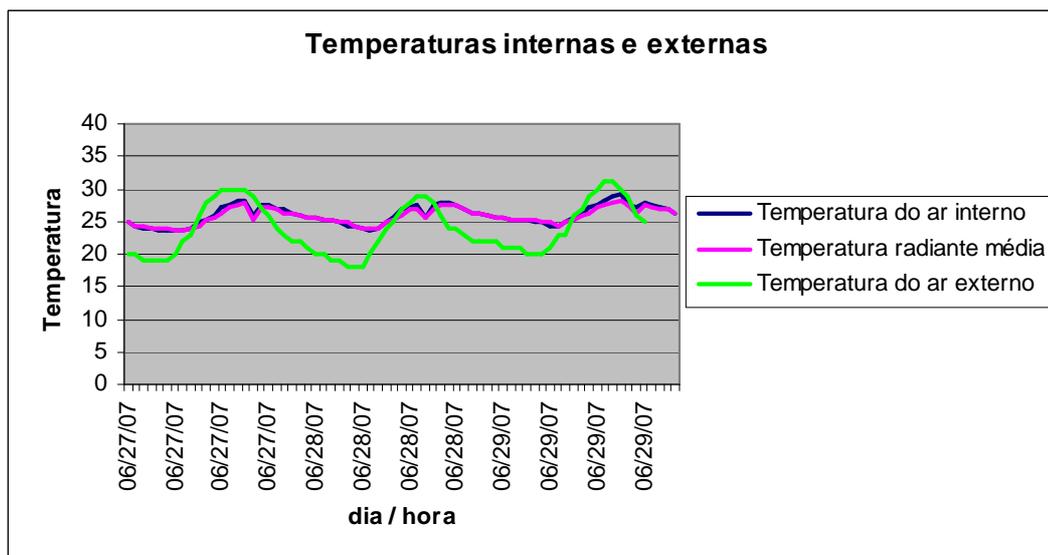


Gráfico 5 - Temperatura do ar interno, temperatura radiante e temperatura do ar externo, em °C, Galpão 01/Ponto01, dias 27, 28 e 29.06.2007

Análise:

- O período mais quente foi de 19.06 a 22.06, atingindo novamente temperaturas mais elevadas no dia 02.07. O dia mais quente foi o dia 19.06, com temperatura máxima do ar interno de 30,7 °C, e valores próximos, entre 12:20 h e 16:00 h.
- As máximas externas e internas ocorrem aproximadamente no mesmo horário, ou seja, não ocorreu atraso térmico. Porém, observa-se um amortecimento aproximadamente entre 1,5 e 3,5 °C no horário de temperaturas máximas e entre 4,5 e 5,5 °C no horário de temperaturas mínimas
- De uma maneira geral, as temperaturas máximas diárias ocorreram entre 11:40 h e 18:00 h, porém apresentando temperaturas elevadas desde 10:30 h até às 20:00 aproximadamente.
- O período correspondente às temperaturas mais baixas foi do dia 26.06 a 28.06, sendo a mínima de 23,6 °C, ocorrida nos dias 18, 26 e 27.06, sendo este último considerado o dia mais ameno, com temperaturas máximas de 27,9 °C. As mínimas ocorreram, de uma maneira geral, no mesmo intervalo de horário que vai de 00:30h às 8:40h.
- As temperaturas do ar interno e radiantes médias apresentaram valores muito semelhantes, o que é esperado.
- A umidade relativa do ar variou em média de 37% a 59%, com máxima de 65,2% no dia 18.06 por volta de 6:30 h, e mínima de 28,7%, às 17:00h no dia 03.07. A baixa taxa de umidade é comum para esta estação que é caracterizada como seca. As condições climáticas internas demonstram uma estabilidade das temperaturas do período medido, mesmo apresentando dias mais quentes e mais frios, porém com pequenas diferenças entre as máximas e mínimas

diárias. A amplitude interna diária ficou em torno de 5 a 6 °C, enquanto a externa em torno de 11 a 15 °C.

- Percebe-se uma atenuação das amplitudes térmicas externas, mantendo no ambiente interno temperaturas máximas mais baixas e mínimas mais elevadas, devido ao isolamento do edifício (neste ambiente).

8.6.2. Resultados – galpão 01 / ponto 02

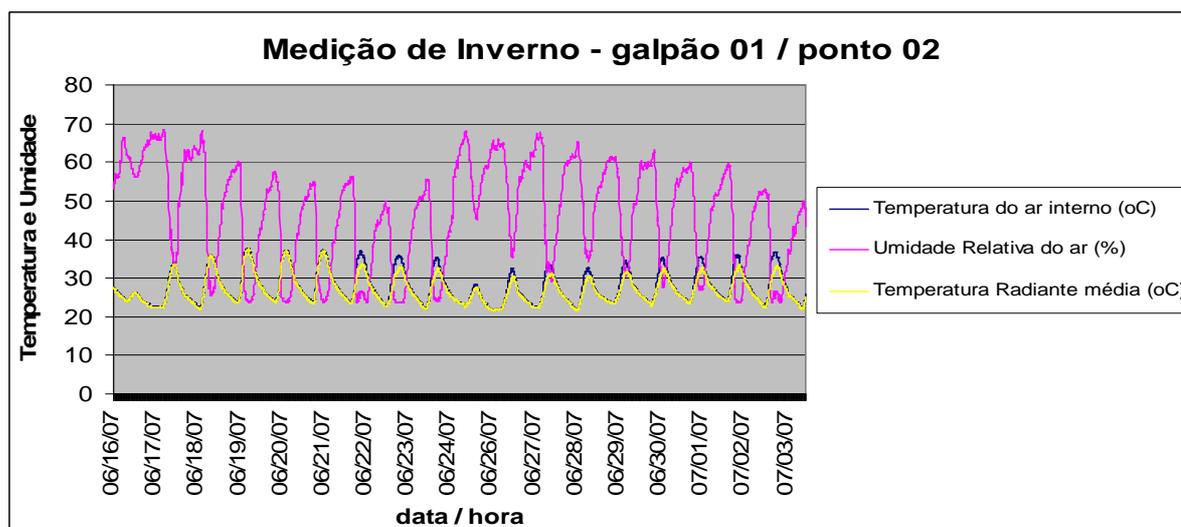


Gráfico 6-Resultado da medição de inverno (período completo) no galpão 01/Ponto 02

Tabela 14 – Temperaturas obtidas - Galpão 01 / Ponto 02, dias 22 e 28.06.2007

Dia	hora	T. sup. Int. (°C)	T ar Int. (°C)	T ar Ext. (°C)	T radiante Ext. (°C)
22/jun	08:00	28,0	24,4	23	24,0
	14:00	41,0	36,5	33	33,6
	18:00	28,5	30,7	29	29,9
28/jun	08:00	24,3	22,5	18	22,1
	14:00	37,0	32,3	28	29,9
	17:50	26,2	27,9	27	27,9

Obs. 1. Não foi possível medir a temperatura superficial externa, pois não houve acesso para a parte externa da cobertura deste ponto.

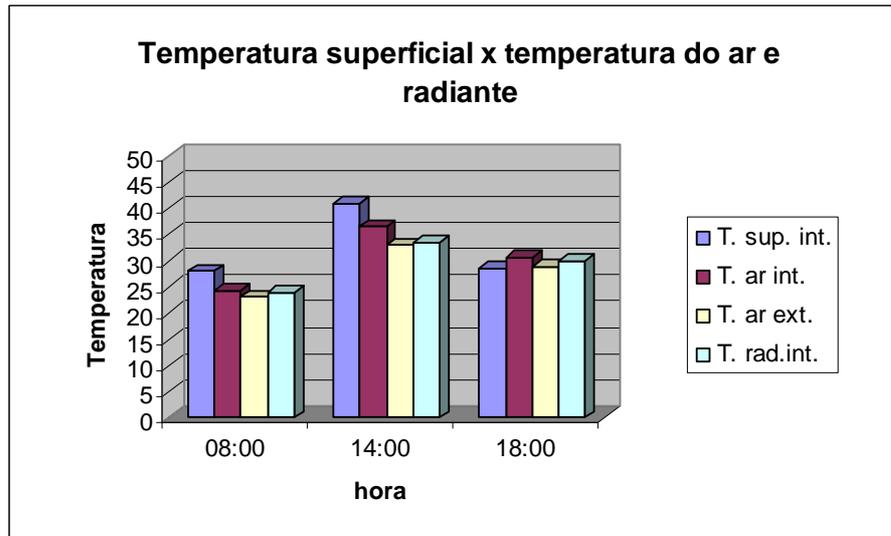


Gráfico 7-Temperatura do ar interno, temperatura radiante e temperatura do ar externo em °C, galpão 01/Ponto 02, dia 22.06.2007

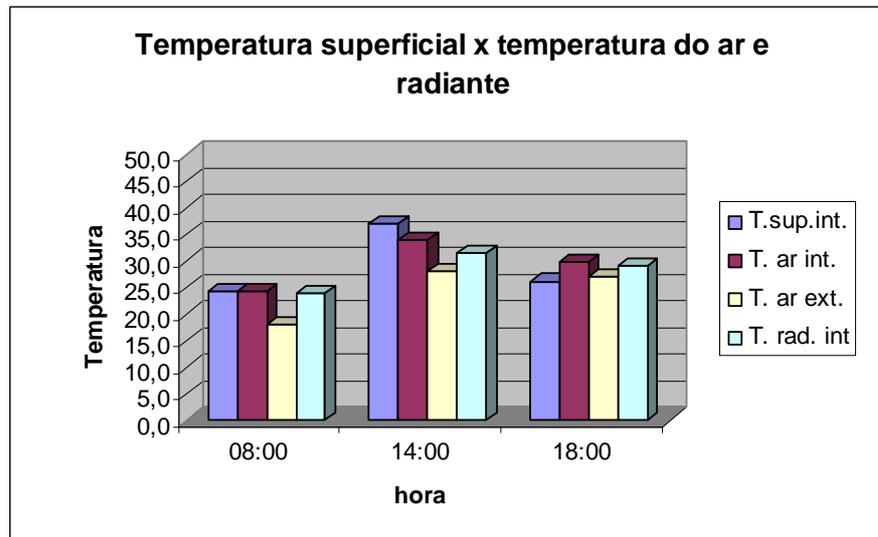


Gráfico 8 - Temperatura do ar interno, temperatura radiante e temperatura do ar externo em °C, galpão 01/ponto02, dia 28.06.2007

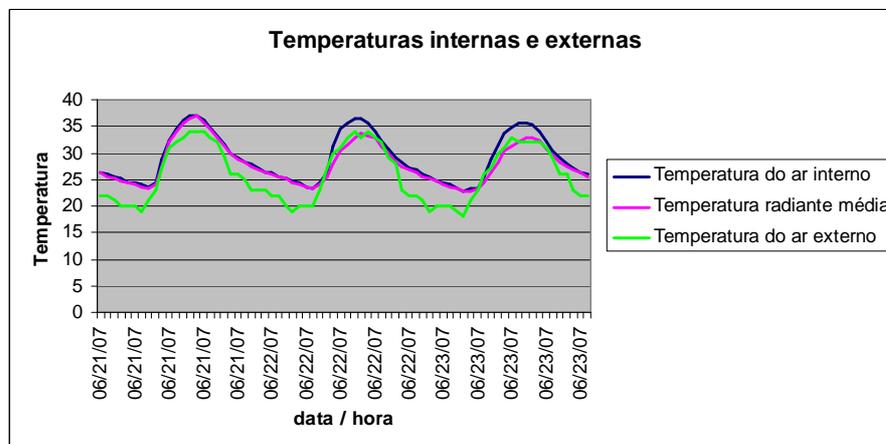


Gráfico 9 - Temperatura do ar interno, temperatura radiante e temperatura do ar externo, em °C, galpão 01/Ponto 02, Dias 21, 22 e 23.06.2007

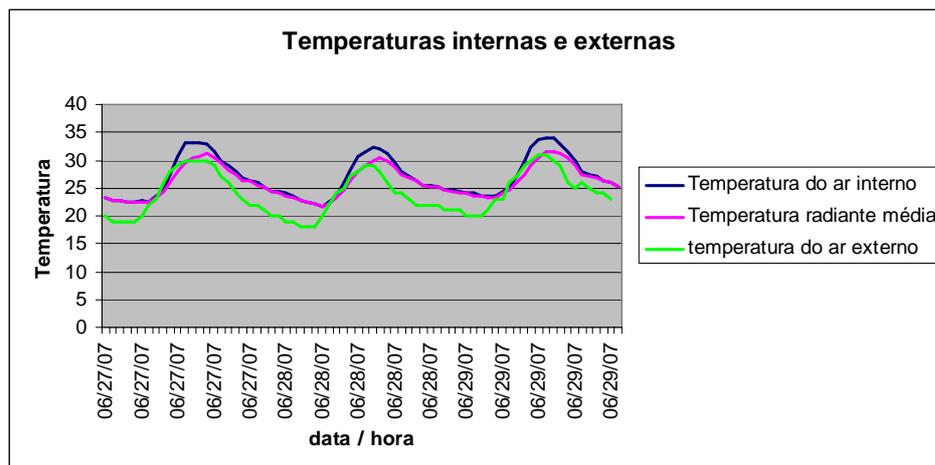


Gráfico 10 - Temperatura do ar interno, temperatura radiante e temperatura do ar externo, em °C ,galpão 01/Ponto 02, Dias 27, 28 e 29.06.2007

Análise:

- A temperatura do ar máxima ocorreu no dia 19.06, atingindo 37,9 °C e valores aproximados entre as 12:10 h e as 14:20 h. As temperaturas máximas diárias ocorreram, de maneira geral, entre 11:40 h e 15:40 h, porém apresentando temperaturas elevadas desde às 10:00 h e até 18:00 aproximadamente.
- As máximas externas e internas ocorrem aproximadamente no mesmo horário, ou seja, não ocorreu atraso térmico. Porém, observa-se um amortecimento aproximadamente entre 3,0 e 4,0 °C.
- A temperatura do ar mínima ocorreu no dia 26.06.2007, atingindo 21,3°C, e valores aproximados entre 2:10 h e 3:50 h, repetindo-se por várias vezes, sempre às madrugadas, até às 7:00 h, aproximadamente. As mínimas ocorreram em geral no mesmo intervalo que vai de 5:40 h às 8:00 h.
- As temperaturas do ar e radiantes apresentaram valores muito semelhantes, o que é esperado.
- A umidade relativa do ar variou em média de 25% a 60%, com máxima de 68,3% no dia 17.06, entre 7:00 h e 8:00 h, e mínima de 23,7%, ocorrendo com frequência, durante 11:00 h e 16:40 h aproximadamente, o que é esperado para esta estação que é caracterizada como seca. O período apresentou-se bastante estável, com dois dias mais amenos: 16.06.2007, com a temperatura máxima diária mais baixa do período, de 26,3 °C, apesar de não apresentar a mínima das temperaturas mínimas, e dia 25.06.2007, cuja máxima não passou de 28,3 °C. Este dia foi caracterizado como o mais frio, apresentando a temperatura mínima do período na madrugada seguinte. A amplitude diária, tanto interna quanto externa, esteve acima de 10 °C, chegando até 16 °C, com exceção dos dois dias mais amenos.
- Em relação ao ponto 01, observa-se um menor amortecimento, ou seja, as temperaturas

internas obtidas são muito próximas às externas, devido à baixa inércia do sistema de cobertura. Na maior parte do tempo, atinge-se valores mais elevados internamente que externamente.

Análise comparativa entre pontos 01 e 02

Comparando-se os dois resultados, é possível observar algumas diferenças entre o comportamento do galpão com a telha de barro sem forro com a telha de cimento amianto e forro de PVC. Antes, porém, é importante lembrar que não se trata de uma comparação entre as telhas somente, se sim de todo o sistema de cobertura e do edifício como um todo. É de se esperar uma diferença entre os resultados, já que existe uma camada considerável de ar entre a telha e o forro do ponto 01, além de o sistema de cobertura não ter sido isolado das demais variáveis que interferem nos resultados. Seguem as seguintes observações:

- As temperaturas máximas foram consideravelmente menores no ponto 01, cuja cobertura é de cimento amianto com forro de PVC, em relação ao ponto 02, coberto por telhas cerâmicas, sem forro, com uma diferença de 6,2 °C, devido, principalmente, ao isolamento da camada de ar existente entre a telha e o forro do ponto 01.
- Já as temperaturas mínimas são mais altas no ponto 01, com uma diferença de 2,3°C em relação ao ponto 02.
- As temperaturas máximas se iniciam aproximadamente às 11:40 h nos dois pontos, diminuindo antes no ponto 02, por volta de 15:40 e mais tarde no ponto 01, por volta de 18:00 h, o que se justifica devido à inércia térmica no sistema de cobertura deste ponto, responsável pelo fenômeno de atraso térmico.
- O isolamento da cobertura (e do edifício como um todo) no ponto 01 é responsável pela menor amplitude térmica diária neste ponto ($\Delta t \cong 5^\circ\text{C}$), em relação ao ponto 02 ($\Delta t \cong 12^\circ\text{C}$). Em outras palavras, a cobertura somente com telha cerâmica é mais sensível às flutuações do ambiente externo, ganhando e perdendo calor mais aceleradamente que a cobertura com telha de cimento amianto, forro de PVC e camada de ar entre ambos, que é mais isolante que a primeira.
- Quanto à umidade relativa do ar, também existe uma menor amplitude no ponto 01, em relação ao ponto 02, cujos valores máximos e mínimos são mais extremos.

É importante lembrar que não se trata de protótipos, e sim de uma avaliação de caráter meramente experimental em edificações existentes. As demais variáveis do edifício não são idênticas, o que é necessário para a avaliação do sistema de cobertura isoladamente, Por isso não se pode afirmar que os resultados obtidos são consequência somente do sistema de cobertura, ainda que este seja um aspecto importante para o desempenho do edifício como um todo.

8.6.3. Resultados – galpão 02

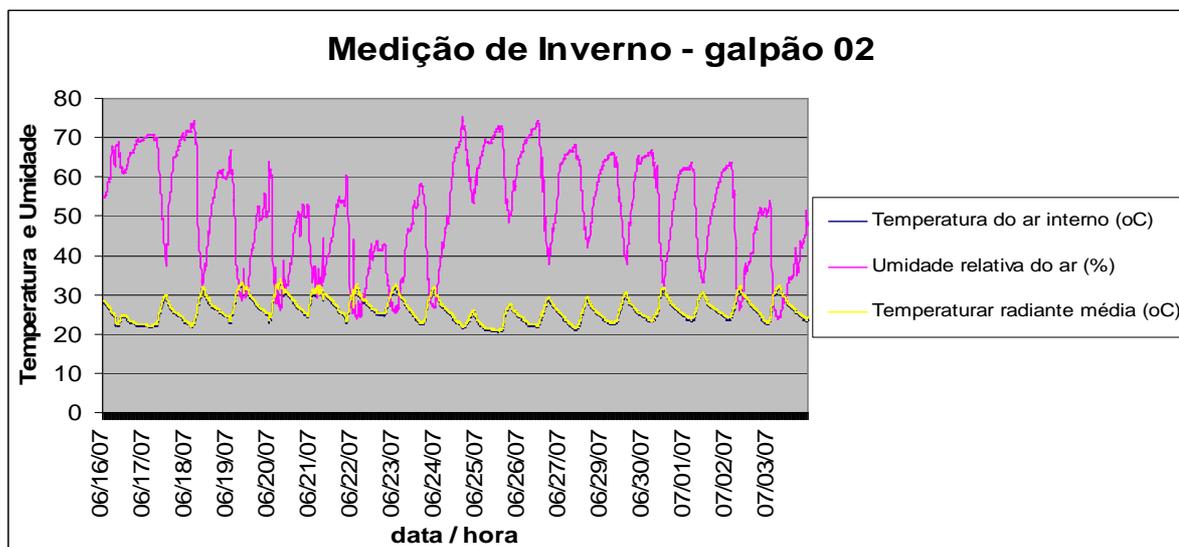


Gráfico 11 - Resultado da medição de inverno (período completo) no galpão 02

Tabela 15 – Temperaturas obtidas - Galpão 02

Dia	hora	T.sup. Int. (°C)	T.sup. Ext. (°C)	T.ar. Int. (°C)	T.ar. Ext. (°C)	T.rad. media Int. (°C)
18/jun	08:30	23,3	19,4	22,5	22	22,8
	11:30	28,5	38,4	27,5	32	27,9
	17:00	31,3	30,1	28,7	32	29,5
19/jun	08:00	24,5	22,5	23,6	23	24,0
	14:10	33,8	38,5	31,9	35	32,7
	18:00	31,5	24,5	31,1	31	31,5
20/jun	08:00	*	*	*	25	*
	14:30	33,3	49,4	32,7	35	33,2
	17:50	30,9	25,8	30,7	30	31,1
21/jun	08:15	24,9	22,0	24,4	23	24,6
	14:00	33,2	50,2	31,1	34	31,5
	18:20	*	25,0	30,31	29	30,3
22/jun	08:00	24,0	18,0	22,8	23	23,2
	14:00	33,2	35,0	30,7	33	31,1
	18:00	29,3	19,7	29,1	29	29,1
25/jun	08:45	23,0	23,0	21,3	19	21,7
	14:00	27,5	40,2	24,4	22	25,2
	17:00	24,2	20,4	24,0	24	24,4
26/jun	09:00	22,5	22,5	20,6	19	20,9
	14:15	28,7	43,8	27,1	28	27,3
	18:00	26,0	21,7	25,5	24	25,5
27/jun	08:30	22,2	22,5	22,1	22	22,5
	13:30	26,8	46,3	27,9	30	28,3
	17:50	27,0	21,5	27,1	27	27,5
(CONTINUA)	08:00	22,8	21,6	21,3	18	21,7

(CONTINUAÇÃO) 28/jun	14:00	30,5	43,8	27,5	28	27,5
	17:30	26,5	23,7	27,1	27	27,1
30/jun	08:00	23,8	21,2	23,2	22	23,6
	14:00	31,5	48,7	31,1	32	31,5
	18:00	*	*	28,7	28	28,7
02/jul	08:00	24,6	21,6	23,6	23	24,0
	14:00	33,0	48,6	31,1	34	31,5
	18:00	29,1	24,1	29,5	28	29,9

Obs. * Valores não registrados

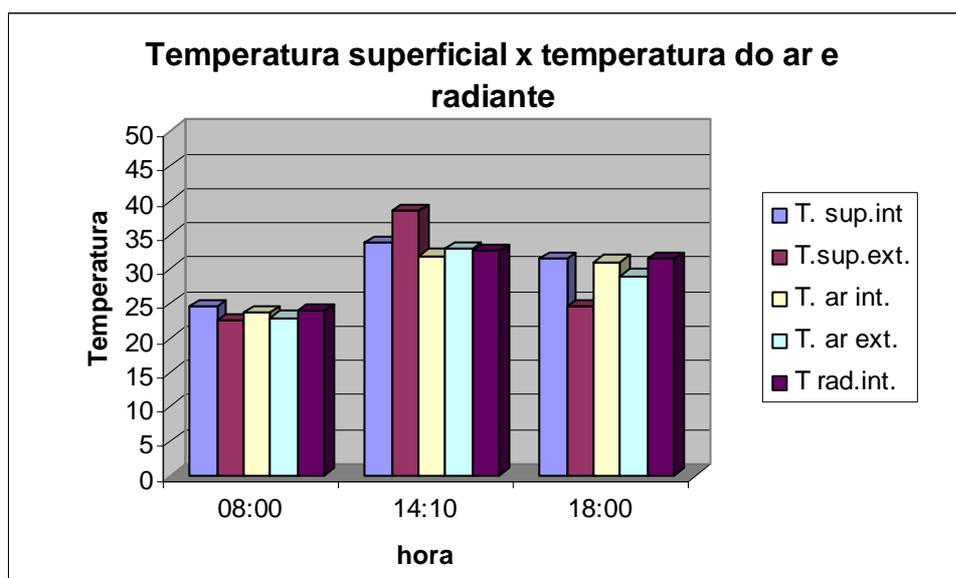


Gráfico 12 – Temperaturas superficiais internas e externas, temperaturas do ar internas e externas e temperatura radiante média, galpão 02, dia 22.06.2007

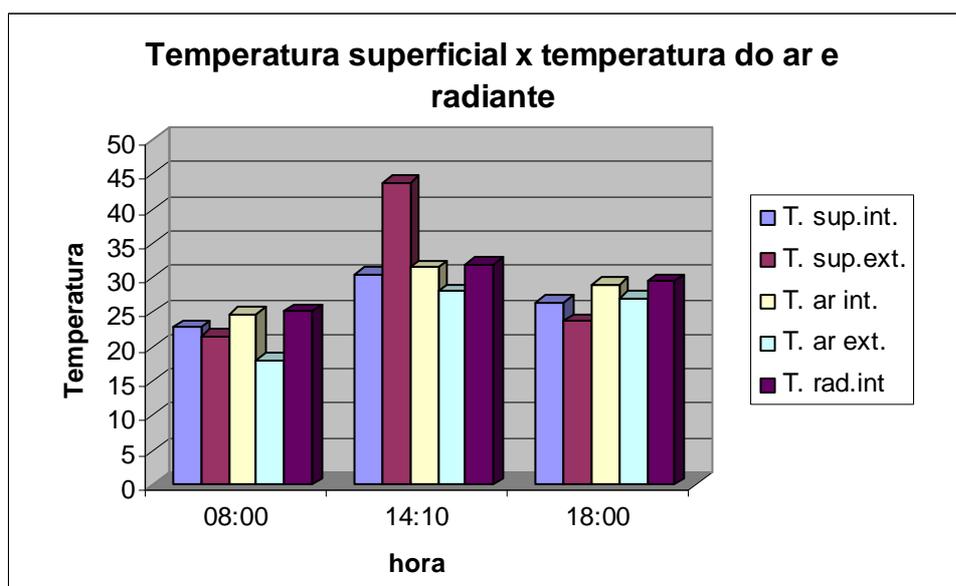


Gráfico 13 - Temperaturas superficiais internas e externas, temperaturas do ar internas e externas e temperatura radiante média, galpão 02, dia 28.06.2007

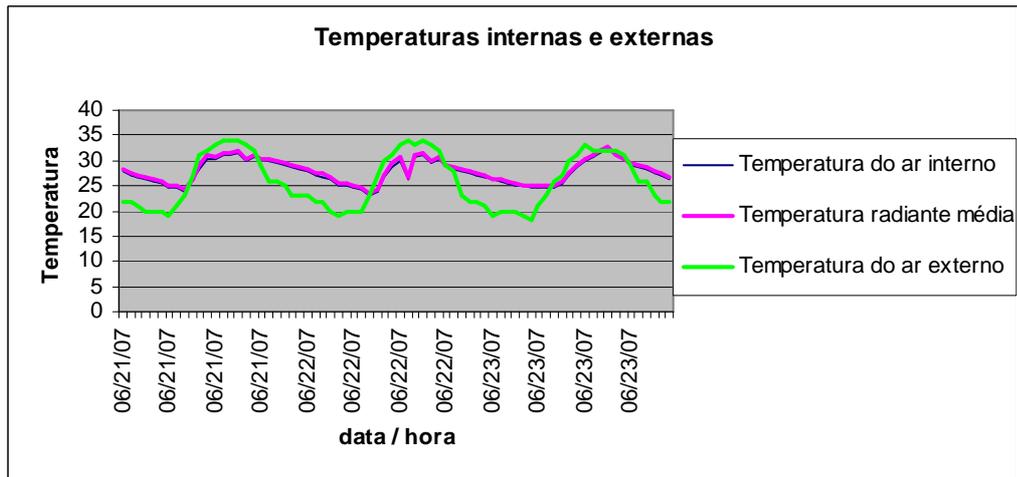


Gráfico 14 - Temperaturas internas do ar, radiantes e externas do ar, em °C, Galpão 02, dias 21, 22 e 23.06.2007

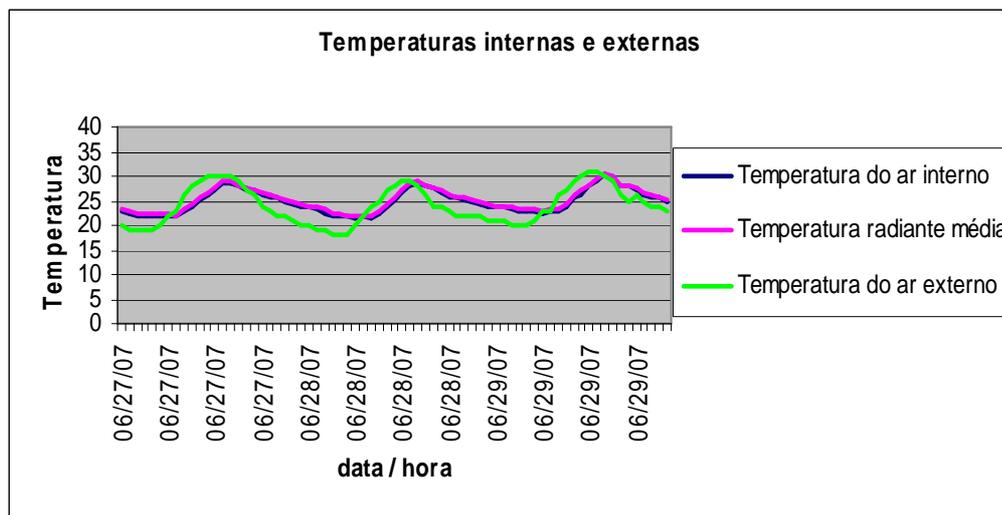


Gráfico 15 - temperaturas internas do ar, radiantes e externas do ar, em °C, Galpão 02, dias 27, 28 e 29.06.2007

Análise

- O período mais quente vai de 19.06 a 23.06, atingindo a temperatura máxima de 33,6 °C às 14:40h, e valores próximos, entre 12:20h e 16:00h do dia 20.06.
- As máximas externas e internas ocorrem aproximadamente no mesmo horário, ou seja, não ocorreu atraso térmico. Porém, observa-se um amortecimento aproximadamente entre 0,5 e 3,0°C nas temperaturas mais elevadas, chegando até 6 °C nas temperaturas mais baixas.
- De uma maneira geral, as temperaturas máximas diárias ocorreram entre 13:00 até 16:40h, porém apresentando temperaturas elevadas desde 11:00h e até 19:30 aproximadamente.
- O período correspondente às temperaturas mais baixas foi de 25.06 a 28.06, sendo a mínima de 20,2 °C, ocorrida no dia 26.06, considerado o dia mais ameno, juntamente com o dia que o

antecedeu: 25.06, cuja temperatura máxima não passou de 25,5 °C. As mínimas ocorreram, de uma maneira geral, no mesmo intervalo de tempo de 4:00h às 9:00h.

- As temperaturas do ar e raiantes médias apresentaram valores muito semelhantes, o que é esperado.
- Quanto à umidade relativa do ar, as mínimas foram de 23,8% às 14:00 h do dia 03.07, e de 25,1% às 12:30 h do dia 22.06. A baixa taxa de umidade é comum para esta estação que é caracterizada como seca. As condições climáticas internas demonstram uma estabilidade nas temperaturas do período medido, mesmo apresentando dias mais quentes e mais frios, porém com pequenas diferenças entre as máximas e mínimas diárias. A amplitude térmica interna diária ficou em torno de 7°C nos dias mais amenos e de 8 a 10 °C nos dias mais quentes. Já a externa esteve acima de 10 °C, chegando até 16 °C, com exceção dos dois dias mais amenos.
- Apesar das temperaturas quase sempre muito elevadas, observa-se uma atenuação significativa em relação às temperaturas externas, com máximas mais reduzidas e mínimas mais elevadas, porém com um amortecimento menor que o do ponto 01 do galpão 01.

Análise comparativa entre pontos do galpão 01 e 02

Comparando-se os 3 (três) resultados obtidos nas medições de inverno, é possível observar algumas diferenças entre o comportamento dos diferentes sistemas de coberturas. A tabela abaixo apresenta as principais variáveis que servem de parâmetro para a comparação:

Tabela 16 - Principais variáveis nos 3 pontos medidos no inverno

VARIÁVEIS	PONTO 01 (GALPÃO 01)	PONTO 02 (GALPÃO 01)	PONTO A (GALPÃO 02)
T máx (°C)	31,71	37,9	33,59
T mín (°C)	23,63	21,30	20,19
Δt (°C)	5 / 6	10 a 14	7 a 10
UR máx (%)	65,2	68,3	74
UR mín (%)	28,7	23,7	23,8
Tmáx do dia mais frio (°C)	27,52	28,31	25,55

- As temperaturas máximas foram consideravelmente maiores no ponto 02, seguido do ponto A e por último o ponto 01. Isto se justifica com o isolamento do sistema de cobertura deste ponto, cuja cobertura é dotada de telha, forro e camada espessa de ar entre os componentes. Se fossem comparadas somente as telhas, sem o uso de forro em nenhuma delas, certamente a telha do ponto A apresentaria maior isolamento, porém esta medição não foi realizada.
- Já as temperaturas mínimas são mais altas no ponto 01, seguidas do ponto 02 e depois do ponto A. isto significa que o ponto 01 recebe menor quantidade de calor, porém também perde menos. Ao contrário, o ponto 02, com menor isolamento, apresenta os extremos: as

temperaturas máximas e mínimas, o que significa ganhar e perder com mais facilidade o calor externo.

- O período das temperaturas máximas é mais prolongado no ponto 01, seguido do ponto A e por último do ponto 02, também devido à inércia térmica no sistema de cobertura deste ponto, responsável também pelo fenômeno de atraso térmico.
- O isolamento da cobertura no ponto 01 é responsável pela menor amplitude térmica diária neste ponto ($\Delta t = 5$ a 6 °C), seguido do ponto A ($\Delta t = 7$ a 9 °C), e por último do ponto 02 ($\Delta t = 10$ a 14 °C). Em outras palavras, a cobertura com telha cerâmica é mais sensível às flutuações do ambiente externo, ganhando e perdendo calor mais aceleradamente do que a cobertura com telha isolante do tipo sanduíche, e ainda mais em relação à telha de cimento amianto, forro de PVC e camada de ar entre ambos.
- Quanto à umidade relativa do ar, também existe uma menor amplitude no ponto 01, em relação ao ponto 02 e ponto A, cujos valores máximos e mínimos são mais extremos. No entanto, o resultado da taxa de umidade máxima para o ponto A (74%) pode ter sido alterada devido aos aparelhos climatizadores e umidificadores presentes no galpão 02; sendo assim, este dado não foi considerado confiável.
- Deve-se reforçar que os resultados podem ter sofrido alterações devido a interferências de variáveis quaisquer, decorrentes da ocupação, iluminação e equipamentos que são diferentes nos três ambientes usados para o experimento.

9. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS DE SIMULAÇÃO TÉRMICA E ENERGÉTICA

9.1. Introdução e escolha da ferramenta

Hoje existe uma diversidade de ferramentas de simulação utilizadas e divulgadas por estudiosos na área de desempenho térmico e energético de edificações. No entanto, diante da variedade de opções, é importante conhecer suas características, propósitos e modelagens matemáticas para que seja feita uma escolha criteriosa daquela que melhor atende às necessidades de cada projeto. Deve-se levar em consideração aspectos que podem ser decisivos para a escolha da ferramenta, tais como a facilidade ou limitação de modelagem quanto à forma, dimensão e número de ambientes; interação com outros programas computacionais de desenho técnico; facilidade de visualização de possíveis erros; dados de entrada exigidos; o grau de detalhamento e o formato dos dados de saída, permitindo o entendimento e a interpretação dos resultados.

Apesar da quantidade de programas disponíveis hoje, existe a dificuldade de acesso a informações sobre eles, principalmente devido à falta de padronização dos materiais de divulgação, quanto à linguagem internacional que permita uma comparação técnica, ou por não utilizarem uma linguagem comum com os jargões mais usados pela comunidade mundial de simulação. (DE BENEDETTO, 2006)

Segue uma lista contendo vários programas de simulação computacional utilizados em várias partes do mundo:

- | | |
|--------------|--------------|
| ▪ BLAST | ▪ esp-R |
| ▪ Bsim | ▪ HAP |
| ▪ DeST | ▪ HEED |
| ▪ DOE-2.1E | ▪ IDA ICE |
| ▪ ECOTECH | ▪ IES <VE> |
| ▪ Ener-Win | ▪ PowerDomus |
| ▪ Energy-10 | ▪ TAS |
| ▪ EnergyPlus | ▪ TRACE |
| ▪ eQUEST | ▪ TRNSYS |

Fonte: (DE BENEDETTO, 2006)

Destes, destacam-se o *Energy Plus* e o TAS, como os mais utilizados em estudos analíticos sobre desempenho ambiental de edifícios, em instituições de ensino e pesquisa no Brasil, tais como do LABAUT – Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética da Faculdade de Arquitetura e

Urbanismo da Universidade de São Paulo (*Energy Plus* e *TAS*), o IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (*Energy Plus*), o LABEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina (*Energy Plus*), e na Europa, tais como a *AA Architectural Association Graduate School* (*TAS*), o *Martin Centre* da *University of Cambridge* (*TAS*) e outras. Nos EUA é notável o uso predominante do *Energy Plus*, enquanto na Europa o *TAS* tem se destacado nas principais instituições de ensino, pesquisa e consultoria. O *TAS* tem sido uma importante ferramenta em grandes escritórios internacionais, tais como *Ove Arup Partnership International*, *Battle McCarthy*, *BDSP Partnership*, *Foster and Partners*, (*Nicolas*) *Grimshaw Architects*, e outros, além de ter sido testado e aprovado pelo CIBSE Technical Memorandum 33 – testes para a avaliação e certificação de softwares, 2006 e para os *European Building Codes / Part L*, que trata de desempenho térmico. Já o *Energy Plus* se destaca pelos diversos prêmios já concedidos, como o *R&D 100 Award*, em que foi considerado um dos 100 produtos tecnologicamente mais significativos de 2003; o *Award for Excellence in Technology Transfer* (17.nov.2004); o *Award for Excellence in Technology Transfer* (8.Mai.2002) e o *IT Quality Award for Technical Excellence* (18.mar.2002); e pelas inúmeras pesquisas e testes, como o *IEA SHC - International Energy Agency Solar Heating and Cooling Programme Task 34 Furnace BESTest results*, o *ASHRAE Research Project 1052* e o *ANSI/ASHRAE Standard 140-2004*. Este último contém uma série de testes analíticos e resultados comparativos de 7 (sete) programas completos de simulação, participantes de um projeto da IEA (*International Energy Agency*), para avaliar o processo de modelagem de análises do desempenho de equipamentos de ar condicionado. Ambos têm sido utilizados para avaliações de desempenho térmico de alguns dos mais importantes projetos de arquitetura de reconhecido desempenho energético, tais como a sede do *Commerzbank*, em Frankfurt, a *Assembleia Nacional do País de Gales* e o edifício da *Swiss Re* em Londres. São aprovados por agências e departamentos governamentais que tratam da questão de eficiência energética, como a *International Energy Agency* (IEA) e o *Department for Communities and Local Government* (DCLG), na Inglaterra e País de Gales e o Departamento de Energia dos EUA (DOE/USA).

Na escolha da ferramenta para a realização deste trabalho foram avaliados ambos os programas computacionais, adotando-se, no entanto, o *Energy Plus*, por uma questão de acessibilidade, já que o *TAS* exige uma licença para sua utilização, enquanto que o *Energy Plus* é de utilidade pública, ou seja, de aquisição gratuita. Apesar do LABAUT dispor atualmente da licença do *TAS*, a aluna visava voltar à sua cidade e instituição de origem, onde não existe a licença, o que foi um ponto importante para a adoção do *Energy Plus* como ferramenta de simulação térmica e energética do trabalho, já que a impossibilidade de se usar o programa computacional poderia comprometer o andamento da pesquisa e de futuros trabalhos de simulação térmica. Ainda assim, a decisão definitiva quanto à adoção deste programa somente se deu após uma simulação cuja finalidade foi de treinamento, permitindo o aprofundamento quanto aos procedimentos requeridos para o processo de simulação. Assim, após a realização de um curso específico²⁶ e com o auxílio de manuais e arquivos de exemplos, disponíveis

²⁶ Curso básico: *Energy Plus*, ministrado pelo professor Drury Crawley nos dias 31 de março e 1º de abril de 2008, na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, organizado pelo Prof. Dr. Alberto Hernandez

no site do DOE²⁷, partiu-se para esta etapa de experimentação. Adotando-se uma situação real como referência, obtida a partir do levantamento de campo na cidade de estudo, testaram-se diferentes parâmetros a fim de se conhecer as limitações e o grau de sensibilidade do programa em relação a determinadas variáveis. Embora alguns dados de referência obtidos com a medição possam não ser exatos, o levantamento serviu de parâmetro para auxiliar na compreensão do comportamento térmico da edificação, tratando-se de uma primeira etapa que serviu de embasamento para as simulações seguintes previstas na pesquisa.

9.2. O Programa Computacional Energy Plus

O *Energy Plus* é um programa computacional de simulação térmica e energética do edifício para modelar aquecimento, refrigeração, iluminação, ventilação e outros fluxos de calor. Foi desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE / EUA), com a cooperação da *U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory, University of Illinois, Oklahoma State University, Department of Energy's Lawrence Berkeley National Laboratory, Florida Solar Energy Center e GARD Analytics*. Foi baseado nas características de outros dois programas: o BLAST e o DOE-2, associando-se as potencialidades de cada um para dar origem ao novo software, que incluiu muitas inovações em sua capacidade de simulação, como frações de tempo menores de uma hora, sistemas modulares e integrados de balanço térmico, baseado em uma zona e no fluxo de calor em zonas múltiplas, conforto térmico e sistemas fotovoltaicos. O programa permite a identificação das parcelas de carga térmica referente a envoltentes transparentes e opacas e a quantificação da carga térmica a ser removida do ambiente pelo sistema de ar condicionado (PIRRÓ, 2005).

O *Energy Plus* tem sido muito utilizado por pesquisadores da área de conforto ambiental e eficiência energética, apresentando a vantagem da disponibilidade gratuita, na página eletrônica de Eficiência Energética e Energia Renovável (EERE) do DOE/USA²⁸. Apesar disso, apresenta a desvantagem de não haver uma interface gráfica de fácil utilização e visualização, de forma que seus dados de entrada e saída são todos carregados e descarregados por meio de arquivos de texto.

Entre os principais conceitos do programa podem-se destacar os seguintes:

- Cálculo de carga térmica por meio do balanço térmico (recomendado pela ASHRAE);
- Cálculo do balanço de umidade;
- Solução simultânea: edificação e sistemas de ar condicionado;
- Passo de tempo sub-horário: o *Energy Plus* simula a cada 10 minutos (time step);

²⁷ DOE/USA. Disponível em: <<http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus>>. Acesso em 03 dez. de 2007.

²⁸ ENERGY PLUS. (Disponível em: <<http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus>>. Acesso em 03 dez. 2007).

- Simulação modular do ar condicionado;
- Metodologia *Window 5* (diferentes tipos de janelas);
- Estrutura simples para arquivos de entrada e saída;
- Sem limites de quantidade de superfícies, zonas e sistemas [default: 50 serpentinas (coils) por loop de ar condicionado, e que podem ser ampliadas];
- Links para outros programas – COMIS 2 (fluxo de ar – infiltração e ventilação, é necessário disponibilizar dados de vento horários) e TRNSYS (painéis fotovoltaicos);
- Garante a simulação integrada de cargas e sistemas, permitindo uma modelagem mais realista das capacidades dos sistemas. (DE BENEDETTO, 2006).

Quanto à modelagem:

- Oferece descrição geométrica completa, ou seja, distinção entre parede, piso, teto, janela, porta, abertura zenital, e elementos de sombreamento externo (brises);
- Não apresenta limitações quanto à dimensão do modelo e ao número de pavimentos, permitindo a simulação de um edifício inteiro;
- Não permite a modelagem de curvas, sendo necessário o fracionamento em segmentos de retas;
- Permite a modelagem do entorno para estudo de insolação.
- A entrada de dados é feita em formato de arquivo de texto, onde o modelo é montado a partir de coordenadas (x, y, z) de cada vértice das superfícies que formam cada zona (ambiente) (DE BENEDETTO, 2006).

Quanto aos relatórios de saída, no *Energy Plus* estes também são emitidos em formato de arquivo de texto, que podem ser configurados pelo usuário, conforme as variáveis que se deseja obter, e o intervalo destas.

Os modelos matemáticos nos quais o programa se baseia não serão aprofundados neste trabalho, já que esse não é o objetivo. As referências encontradas, de órgãos que o aprovam, de pesquisas que o adotam e demais profissionais e escritórios que o utilizam foram consideradas como argumentos suficientes para a escolha desta ferramenta computacional de simulação de desempenho térmico e energético.

9.3. Simulação para treinamento do programa

A simulação que serviu de treinamento foi baseada em uma situação real, adotando-se as características do Galpão 02, de acordo com o levantamento realizado no período de inverno (quente e seco)²⁹. A escolha deste galpão para servir de referência se deu por três motivos principais: maior acessibilidade ao local e aos dados construtivos; maior facilidade quanto à modelagem geométrica no programa computacional e, por se tratar de um ambiente condicionado naturalmente, diferente do Galpão 01, que é dotado de sistema de ar condicionado, o que influencia os dados medidos e a análise dos resultados. Optou-se pela medição ocorrida no período seco (inverno), pois este apresentou maior estabilidade das condições climáticas em relação ao período úmido (verão), devido à frequência das chuvas características desse período. Além disto, os dados da medição no inverno foram obtidos primeiro (5 meses antes da medição no verão), permitindo o adiantamento da avaliação por meio do tratamento dos dados antes mesmo da realização da segunda medição.

O processo de aprendizado do programa será descrito nesta etapa da dissertação, visando auxiliar os próximos pesquisadores que pretendem utilizar esta ferramenta de avaliação. Trata-se de alguns procedimentos preliminares que facilitam a modelagem e um passo-a-passo desde a criação do arquivo de entrada no programa computacional até o processamento da simulação e obtenção dos resultados, contendo as principais etapas. É importante lembrar que não se trata de um manual detalhado sobre o uso do programa, já que não é este o objetivo, e sim uma descrição resumida das etapas que foram percorridas e a definição das variáveis para a obtenção dos resultados. Para maiores detalhes sobre o manuseio e a modelagem matemática do *Energy Plus*, deve-se recorrer ao *GettingStarted* e *InputOutputReference*, ambos documentos que acompanham o programa, no processo de sua instalação. Todo o material, assim como o programa estão em inglês, não havendo versão em português. Por este motivo as imagens que contém os dados de entrada, obtidas da tela do *Energy Plus*, também aparecerão nesta língua.

9.3.1. Simplificações do modelo

O modelo adotado na simulação seguiu as mesmas características geométricas e construtivas do modelo real (Galpão 02), com pequenas simplificações que não comprometem o comportamento térmico e energético do edifício, adotadas para simplificar o processo, reduzindo o tempo gasto com a modelagem e o processamento dos dados por parte do programa. Porém, deve-se tomar cuidado ao inserir os dados de entrada para se evitar alterações relevantes que comprometam a fidelidade da simulação. Assim, considerou-se a cobertura plana, que na situação real é dotada de sheds, mantendo-se o mesmo volume da zona. Foram desconsideradas as divisórias internas e o volume construtivo do sanitário e da escada, permanecendo iguais todas as demais características das envoltórias³⁰.

²⁹ Ver descrição do clima no capítulo 06 – Caracterização do Clima

³⁰ Ver planta na página 146 (Capítulo 08)

9.3.2. Zoneamento do edifício

O *Energy Plus* efetua suas operações em zonas que podem ou não estar interligadas, ou seja, trocam ou não calor entre as mesmas. As diferentes zonas consistem em volumes de ar a uma temperatura uniforme, decorrente de todo o processo de trocas térmicas que ocorrem entre as superfícies que envolvem este espaço. Trata-se de um conceito “térmico” e não geométrico (DOE/USA)³¹. Baseando-se neste conceito, o programa calcula o balanço térmico e energético para cada zona. O número delas deve ser criteriosamente definido, de acordo com as características do projeto, buscando-se o menor número possível de zonas, a fim de facilitar o processamento computacional, sem comprometer a integridade da representação do edifício. Assim, o critério para o zoneamento pode ser a temperatura requerida em ambientes distintos, no caso de ambientes climatizados artificialmente; fontes internas de calor diferenciadas, como equipamentos ou pessoas; ambientes ou áreas com superfícies expostas à maior ou menor incidência da radiação solar, ou outros fatores que interferem na temperatura do ambiente e, portanto, devem ser informadas ao programa. Este processo é muito importante, pois uma definição incorreta das zonas pode acarretar em erro nos resultados finais.

Ao calcular as variáveis climáticas internas, o *Energy Plus* considera um ponto geométrico da zona. Este pode apresentar resultados semelhantes ou diferentes de outros pontos próximos a ele, dependendo de elementos ou fatores que influenciaram nas trocas térmicas e, conseqüentemente, nas condições internas dos diversos pontos de uma zona. No caso do galpão estudado, o ponto medido não coincide com o ponto central da área do galpão, por isso foram testadas duas opções de zoneamento, uma contendo uma zona única para a área da loja do galpão (com exceção da sala de gerência) e outra dividindo-a em 4 (quatro) zonas, de maneira que o ponto A e o ponto geométrico da zona que o contém estejam o mais próximo possível um do outro. O resultado apresentou diferenças significativas e, portanto, foi adotada a opção mais detalhada com 06 (seis) zonas no total: 4 (quatro) delas situadas no ambiente geral do galpão, inclusive uma delas contendo os equipamentos de medição e para qual se pretende avaliar as variáveis climáticas; outra correspondente à sala de gerência e por último a zona destinada à garagem localizada no subsolo, conforme indicado na planta.



Fig. 166: Primeira opção de zoneamento do térreo. (BUTTNER, S.)

³¹ DOE/USA - Departamento de Energia dos Estados. Energy Plus Documentation: Gettingstarted. Disponível em: <<http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus>>. Acesso em 11 set. de 2006.

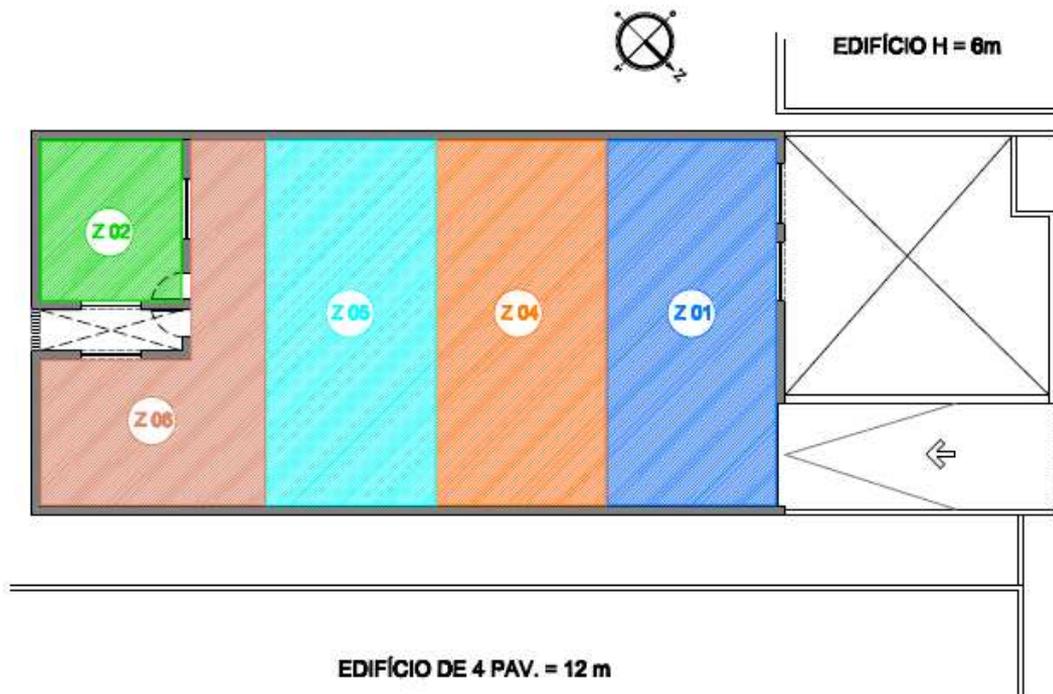


Fig. 167: Zoneamento definitivo do galpão: zonas 01, 02, 04, 05 e 06 - térreo. (BÜTTNER, S.)

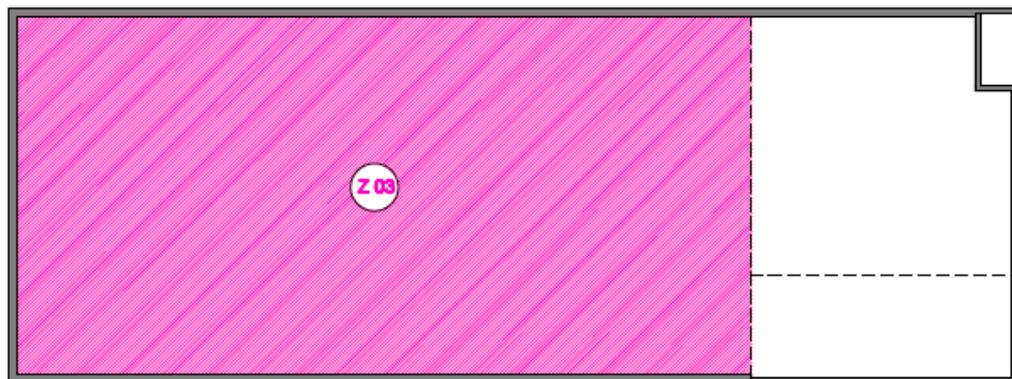
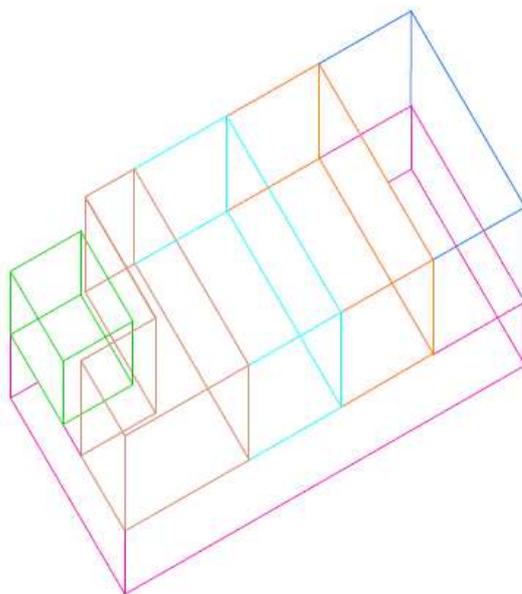


Fig. 168: Planta do Galpão com zona 03 – subsolo. (BÜTTNER, S.)



Fig. 169: Corte esquemático indicando as 06 (seis) zonas. (BÜTTNER, S.)



LEGENDA: ZONA 01 – AZUL / ZONA 02 – VERDE / ZONA 03 – ROSA / ZONA 04 – LARANJA / ZONA 05 – CIAN / ZONA 06 - MARROM

Fig. 170: Imagem tridimensional das zonas no galpão (BÜTTNER, S.)

9.3.3. Classificação das superfícies

O principal parâmetro para a modelagem da edificação, no *Energy Plus*, é a classificação das superfícies:

- Superfícies que transferem calor
- Superfícies que armazenam calor

Todas as superfícies que envolvem as zonas devem ser classificadas, podendo ser de transferência ou de armazenamento de calor. Quando uma superfície divide ambientes com diferenças significativas de temperatura, ela é considerada de transferência; já as superfícies que dividem ambientes com a mesma temperatura (aproximadamente), são consideradas de armazenamento. Assim, as paredes externas, por exemplo, transferem calor, enquanto as paredes internas o armazenam. Porém, não é uma regra geral, uma vez que paredes externas também podem armazenar calor e as internas transferir, o que vai definir a classificação é a diferença de temperatura entre os ambientes. A próxima ilustração demonstra a classificação das superfícies do galpão estudado, que para este caso são todas de transferência. As linhas tracejadas indicam as superfícies imaginárias que dividem zonas sem haver paredes físicas. Neste caso, o *Energy Plus* considera uma superfície de ar com resistência desprezível, que não deixa de ser uma superfície de transferência de calor, já que existe uma pequena diferença de temperatura entre as zonas adjacentes.

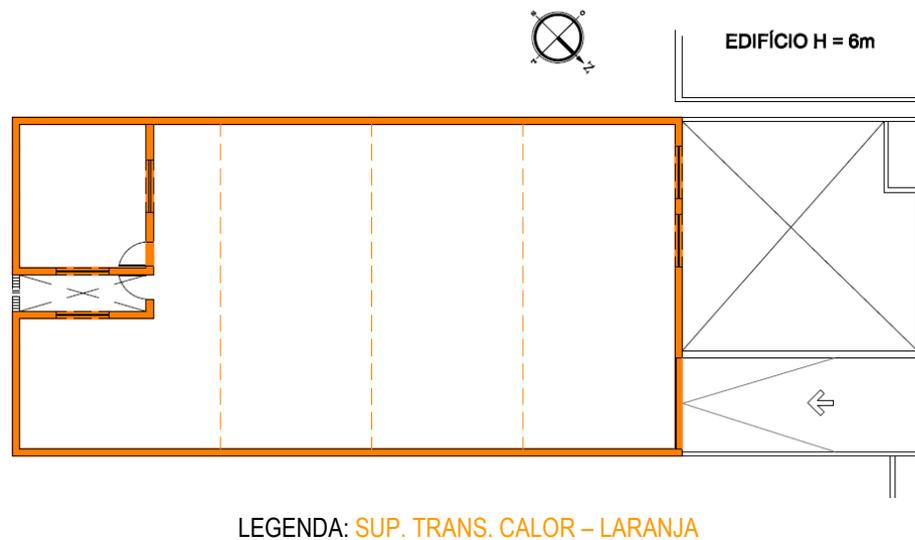


Fig. 171: Superfícies de transferência de calor, do galpão 02. (BUTTNER, S.)

Uma vez determinado o tipo de superfícies, devem-se definir as superfícies equivalentes, ou seja, todas as superfícies idênticas (compostas pelos mesmos materiais) e sujeitas às mesmas condições de exposição à radiação. É uma simplificação opcional, que facilita muito o procedimento da modelagem, principalmente em edificações grandes, pois as áreas de todas as superfícies equivalentes são somadas como se formassem uma única superfície. Assim, por exemplo, todas as janelas (com mesmas características) de uma determinada parede têm suas áreas somadas, formando um grande rasgo. É importante lembrar que as simplificações adotadas devem ser avaliadas para não comprometer questões de sombreamento e ganhos solares, por exemplo. O ideal é fornecer um nível de detalhamento suficiente das envoltórias do edifício, sem perder muito tempo com descrições detalhadas desnecessárias.

O zoneamento e a classificação das superfícies são procedimentos indicados para anteceder o processo de simulação. Em seguida dá-se início à criação do arquivo de base de dados.

9.3.4. Base de Dados

Os dados de entrada são reunidos em um arquivo que pode ser editado no *DOS Command*, ou pode ser montado no módulo de edição do *Energy Plus* denominado *IDF Editor*. Trata-se de um componente opcional, disponível com a instalação do programa, que facilita a edição dos dados relacionados à modelagem, configuração de materiais, condições de ocupação, até a simulação e obtenção de resultados. O *IDF* é composto por uma lista de itens (*Class List*), cada qual representando um grupo de informações a serem fornecidas ao programa³²:

³² Os termos seguem em inglês, de acordo com a denominação usada no *Energy Plus*.

- Simulations parameters
- Location – climate – weather file access
- Surface construction elements
- Thermal zone description/geometry
- Advanced surface concepts
- Room air models
- Schedules
- Internal gains - people, lights, equipments
- Daylighting
- Exterior energy use equipment
- Air flow
- Design objects
- Performance curves
- Node-branch management
- Plant condenser control
- Plant condenser flow control
- Air distribution
- Air distribution system
- System availability manager
- Set point manager
- Controllers
- Zone equipment
- Zone forced air units
- Refrigeration
- Unitary equipment
- Air distribution equipment
- Radiative/convective units
- Zone controls and thermostats
- Air path
- Non-zone equipment

- Solar collectors
- Plant equipment
- Water heaters

Dependendo da complexidade da simulação que se pretende fazer, alguns itens não precisam ser preenchidos. O *Energy Plus* foi desenvolvido em princípio para cálculo de carga térmica para ar condicionado, por isso disponibiliza diversas ferramentas destinadas ao dimensionamento de sistemas completos de climatização artificial. No entanto, para edifícios não climatizados basta deixar estes campos em aberto que o programa simula o balanço térmico e energético das zonas não climatizadas, considerando somente os parâmetros fornecidos.

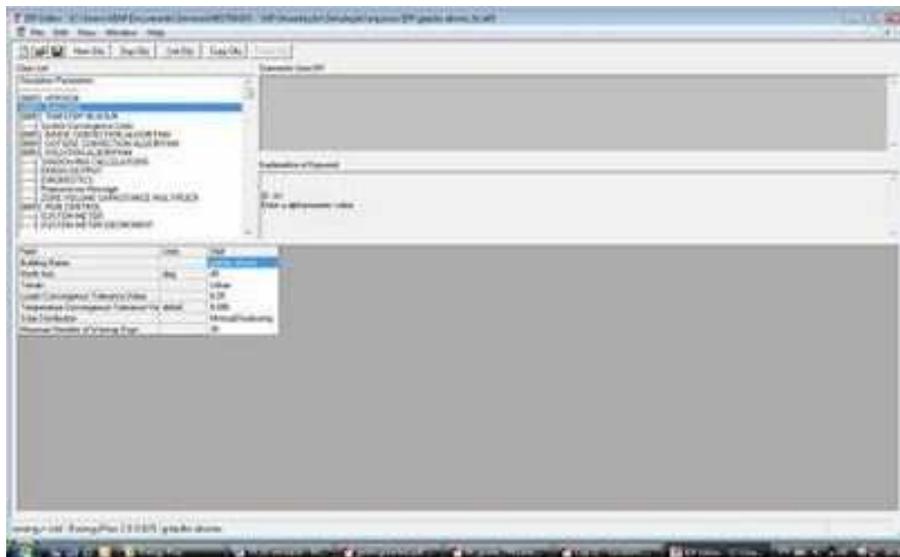


Fig. 172: Tela do *IDF editor*, contendo a lista dos itens a serem fornecidos ao programa. (Fonte: *Energy Plus* - versão 2.0/*IDF Editor*).

9.3.5. Parâmetros de simulação (Simulation Parameters)

Neste campo são definidos alguns parâmetros referentes à implantação do edifício, tais como o ângulo entre o norte e o eixo do edifício; o tipo de terreno (urbano, suburbano, campo, oceano); dados de tolerância dos valores; dados de sombreamento em função do entorno; intervalo de tempo que será considerado na simulação; tipo de algoritmo interno e externo e opções de algoritmos de balanço térmico, entre outros parâmetros que caracterizam o projeto e as condições desejadas para a simulação.

Field	Units	Obj1
Building Name		galpão ebone
North Axis	deg	45
Terrain		Urban
Loads Convergence Tolerance Value		0,05
Temperature Convergence Tolerance Va	deltaC	0,005
Solar Distribution		FullExterior
Maximum Number of Warmup Days		25

Fig. 173: Dados no campo Simulation parameters / Building, do IDF Editor (Energy Plus).

9.3.6. Clima e Localização geográfica (Location/Climate/Weather File Access)

Este grupo de objetos descreve as condições ambientais do local estudado, entre elas a latitude, longitude, altitude, fuso horário, período para qual se deseja simular e condições climáticas de um dia de referência.

Field	Units	Obj1
LocationName		Cuiabá
Latitude	deg	-15,65
Longitude	deg	-56,1
TimeZone	hr	-4
Elevation	m	182

Fig. 174: Dados do local, no campo Location - Climate - Weather File Access / Location, do IDF Editor, contendo dados de latitude, longitude, fuso horário e altitude (Energy Plus).

Existem duas opções para indicar o clima: ou se adota um arquivo climático, contendo um ano padrão compatível ao *Energy Plus* (formato epw), ou se inserem os dados de um dia de projeto. De uma maneira geral, para simulações simples adota-se o dia de projeto, desde que se conheçam os dados climáticos necessários do dia de projeto. Já para simulações mais complexas e detalhadas é aconselhável utilizar o arquivo climático. Apenas 01 (um) local pode ser especificado e em caso de se adotar o arquivo climático anual (epw), não é necessário preencher os dados do dia de projeto, pois este será substituído pelos dados daquele. O arquivo climático é selecionado em etapa posterior, diferente do dia de projeto, cujos dados são inseridos neste campo do *IDF editor*. O dia de referência adotado nesta simulação foi o dia 28 de junho de 2007, para o qual foram feitas as medições de campo e cujos dados foram obtidos do aeroporto Marechal Rondon, cedidos pelo IAG³³. Deve-se lembrar que não há dado medido de radiação solar, neste caso o programa calcula valores aproximados a partir da latitude. Por isso, esta simulação não poderia ser adotada para validar o programa, baseando-se somente na comparação dos resultados. Também os dados de vento são referentes ao aeroporto e não ao local do galpão, o que também prejudica a exatidão dos dados em relação à situação real.

³³ IAG USP - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP. Disponível em: <<http://www.iag.usp.br>>. Acesso em: 27 de agosto de 2007

Field	Units	Obj1
DesignDayName		inverno
Maximum Dry-Bulb Temperature	C	29
Daily Temperature Range	deltaC	11
Humidity Indicating Conditions at Max Dry-Bulb		15
Barometric Pressure	Pa	101900
Wind Speed	m/s	2.5
Wind Direction	deg	200
Sky Clearness		1
Rain Indicator		0
Snow Indicator		0
Day Of Month		28
Month		6
Day Type		Thursday
Daylight Saving Time Indicator		0
Humidity Indicating Type		Wet-Bulb
Relative Humidity Day Schedule		
Dry-Bulb Temperature Range Modifier Type		
Dry-Bulb Temperature Range Modifier Schedule		

Fig. 175: Dados do dia de projeto com as características climáticas do dia 28.06.2007 - *Climate - Weather File Access / DesignDay*, do *IDF Editor*. (*Energy Plus*).

9.3.7. Dados construtivos (Surface Construction Elements)

Em princípio são listados todos os materiais, com suas propriedades térmicas, espessura, etc. e posteriormente estes são vinculados aos componentes construtivos do modelo (parede, piso, cobertura etc.). Para cada tipo de material, o *Energy Plus* disponibiliza um campo próprio, diferenciando os materiais opacos dos translúcidos e demais materiais específicos. Para os opacos, por exemplo, existem 3 (três) opções que podem ser usadas para descrevê-los:

- **Material: regular**

Para esta opção é necessário fornecer diversos dados que caracterizam o material, como aspereza, espessura (m), condutibilidade (W/m.K), densidade (kg/m³), calor específico (J/kg.K) e absorvância térmica, solar e visível. A vantagem em se adotar esta opção, com todos estes dados, é que isso permite a avaliação da condução em regime transitório.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		laje concreto	telha isolante	tijolo barro	reboco argamassa int
Roughness		VeryRough	Smooth	MediumRough	Rough
Thickness	m	0,1	0,05	0,22	0,015
Conductivity	W/m-K	1,75	0,033	0,78	0,65
Density	kg/m3	2400	200	1760	1600
Specific Heat	J/kg-K	1005	800	790	754
Absorptance:Thermal				0,9	0,9
Absorptance:Solar		0,7	0,5	0,7	0,5
Absorptance:Visible					0,3

Field	Units	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9
Name		metal	cimentado	reboco argamassa ext	telha fibrocimento	pvc
Roughness		Smooth	Rough	Rough	MediumRough	VerySmooth
Thickness	m	0,002	0,03	0,015	0,03	0,0015
Conductivity	W/m-K	45,28	0,85	0,65	0,65	0,2
Density	kg/m3	7824	1800	1600	1600	1350
Specific Heat	J/kg-K	500	754	754	1600	1350
Absorptance:Thermal			0,9	0,9		
Absorptance:Solar			0,7	0,5		0,3
Absorptance:Visible				0,3		

Fig. 176: Dados no Surface Construction Elements/Material:Regular, IDF Editor (Energy Plus).

- **Material: regular-r**

Nesta opção o único dado requerido é a resistência térmica do material, porém ela só permite a avaliação da condução em regime permanente. Para esta simulação um único material foi definido neste campo: o ar, referente à superfície imaginária que separa as zonas 01, 04, 05 e 06. Neste caso considera-se a resistência desprezível do ar.

Field	Units	Obj1
Name		superfície ar
Roughness		Smooth
Thermal Resistance	m ² ·K/W	0,0001
Absorptance:Thermal		
Absorptance:Solar		
Absorptance:Visible		

Fig. 177: Dados no Surface Construction Elements/Material:Reg.-R, IDF Editor (Energy Plus).

- **Material: Air**

Usado para especificar camadas de ar entre outros materiais construtivos. Neste caso, assume-se que o ar é suficientemente leve e por isso também só se exige a resistência térmica. Desde que a superfície não esteja exposta ao meio exterior, não é necessário informar as propriedades superficiais, como a absorptância. Para o Galpão 02, há somente uma camada de ar a ser especificada, entre a cobertura e o forro da sala de gerência.

Field	Units	Obj1
Name		Camada de ar forro
Thermal Resistance	m ² -K/W	0,18

Fig. 178: Surface Construction Elements / Material:Air, do IDF Editor (Energy Plus).

Também existem opções para os diferentes tipos de vidros e materiais translúcidos, cada qual informando suas características em campos específicos da lista, podendo ser simples, duplos, com gás entre as camadas e demais tipos. Os elementos de obstrução, tais como brises também são definidos no item *Surface Construction Elements* (sub-item *Material: WindowShade*). Nesta simulação, apenas o sub-item material: *windowglass* foi adotado para especificar os materiais translúcidos simples existentes no galpão. O vidro simples está presente em todas as janelas e portas externas e internas e o policarbonato nos *sheds*.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		vidro laminado	policarbonato
Optical Data Type		SpectralAverage	SpectralAverage
Name of Window Glass Spectral Data Set			
Thickness	m	0,008	0,001
Solar Transmittance at Normal Incidence		0,073	0,089
Solar Reflectance at Normal Incidence: Front Side		0,069	0,8
Solar Reflectance at Normal Incidence: Back Side		0,069	0,8
Visible Transmittance at Normal Incidence		0,0875	0,05
Visible Reflectance at Normal Incidence: Front Side		0,079	0,05
Visible Reflectance at Normal Incidence: Back Side		0,079	0,05
IR Transmittance at Normal Incidence		0	
IR Hemispherical Emissivity: Front Side		0,84	0,84
IR Hemispherical Emissivity: Back Side		0,84	0,84
Conductivity	W/m-K	0,9	0,2
Dirt Correction Factor for Solar and Visible Transmittance		1	1
Solar Diffusing		No	Yes

Fig. 179: Dados no Surface Construction Elements / Material:WindowGlass, do IDF Editor (Energy Plus).

Após a definição dos materiais, cada componente construtivo é montado no sub-item *Construction*, onde são indicadas as camadas de materiais que o compõe, na seqüência de fora para dentro das zonas térmicas. Os componentes podem ser: paredes, teto, piso, janelas, portas, divisórias etc., devendo ser diferenciados e nomeados de acordo com a composição de materiais.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		parede	cobertura galpão	piso
Outside Layer		reboco argamassa ext	telha isolante	cimentado
Layer #2		tijolo barro		laje concreto
Layer #3		reboco argamassa int		cimentado
Layer #4				
Layer #5				

Field	Units	Obj4	Obj5	Obj6
Name		portão	janela	cobertura gerência
Outside Layer		metal	vidro laminado	telha fibrocimento
Layer #2				Camada de ar forro
Layer #3				pvc

Field	Units	Obj7	Obj8	Obj9
Name		porta vidro	shed telha	parede ar
Outside Layer		vidro laminado	policarbonato	superfície ar
Layer #2				
Layer #3				

Fig. 180: Dados no Surface Construction Elements / Construction, do IDF Editor (Energy Plus).

Até este ponto foram especificados todos os materiais que compõem cada um dos componentes construtivos existentes no modelo, já com suas especificações e propriedades térmicas. Daqui para frente se inicia o processo de modelagem, a partir da qual se informa a geometria do modelo.

9.3.8. Modelagem (Thermal Zone Description / Geometry)

O modelo geométrico é definido a partir das zonas térmicas. Estas, já definidas anteriormente, são listadas agora no item “zone”, onde devem ser informadas algumas referências como o nome da zona, a altura, o volume de ar e as coordenadas de origem, a partir da qual serão definidas as superfícies. Sem as zonas térmicas e as superfícies o edifício não poder ser simulado.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Zone Name		zona galpão_01	zona gerência_02	zona subsolo_03
Relative North (to building)	deg	45	45	45
X Origin	m	16,62	0	0
Y Origin	m	10,75	10,75	10,75
Z Origin	m	3	3	0
Type		1	1	1
Multiplier		1	1	1
Ceiling Height	m	4,7	3	3
Volume	m3	266,73	59,4	700
Zone Inside Convection Algorithm		Detailed	Detailed	Detailed
Zone Outside Convection Algorithm		Detailed	Detailed	Detailed
Part of Total Floor Area		Yes	Yes	No

Fig. 181: Dados no Thermal Zone Description / Geometry / Zone, do IDF Editor (Energy Plus).

Field	Units	Obj4	Obj5	Obj6
Zone Name		zona galpão_04	zona galpão_05	zona galpão_06
Relative North (to building)	deg	45	45	45
X Origin	m	11,62	6,62	4,42
Y Origin	m	10,75	10,75	10,75
Z Origin	m	3	3	3
Type		1	1	1
Multiplier		1	1	1
Ceiling Height	m	4,7	4,7	4,7
Volume	m3	266,73	266,73	266,73
Zone Inside Convection Algorithm		Detailed	Detailed	Detailed
Zone Outside Convection Algorithm		Detailed	Detailed	Detailed
Part of Total Floor Area		Yes	Yes	Yes

Fig. 182: Dados no Thermal Zone Description / Geometry / Zone, do IDF Editor (Energy Plus).

A modelagem no *Energy Plus* é toda feita por meio de coordenadas, ou seja, para cada vértice do modelo devem ser informados os valores x,y,z seguindo uma direção e sentido pré-determinados. A geometria do modelo e a divisão das zonas só podem ser visualizadas por meio da interface com programas gráficos, como o *Auto Cad*.

[...] O modelo no *Energy Plus*, nada mais é que uma grande planilha de coordenadas. Não é possível visualizar o modelo em 3D conforme ele vai sendo montado. A melhor maneira de se começar o modelo, é seguindo um desenho esquemático auxiliar, onde aparecem os vértices e suas coordenadas, de maneira que a entrada de dados no *Energy Plus*, seja apenas o equivalente a montar uma tabela (DE BENEDETTO, 2006).

Para a correta descrição dos vértices, é importante a definição do sistema de coordenadas, a origem e o sentido da seqüência dos vértices, o que definirá a modelagem. Assim, o sistema de coordenadas cartesianas usado no *Energy Plus* é tridimensional e considera o eixo x direcionado para leste, o eixo y para norte, enquanto o eixo z, para cima. Este pode ser definido de duas maneiras: coordenadas absolutas ou relativas. Adotando-se coordenadas absolutas, a origem das zonas será sempre 0,0,0, com exceção de alguns casos, como na definição da iluminação natural, para qual são usados referências do norte e do eixo do edifício. Já para as coordenadas relativas, a origem das zonas se baseia sempre na posição do edifício em relação ao norte, permitindo uma maior flexibilidade para alterações rápidas decorrentes da mudança na orientação do edifício. Para esta simulação foi adotado o sistema de coordenadas relativas.

As superfícies são especificadas considerando que sejam vistas do lado externo das zonas. Deve-se informar ao programa o vértice tomado como ponto de partida de dada superfície, podendo ser o canto superior esquerdo ou direito, ou ainda o inferior esquerdo ou direito. Também a direção é um importante parâmetro, podendo seguir o sentido horário ou anti-horário. A decisão entre um e outro não interfere no resultado, é só uma questão de padronização, melhorando a interface entre o usuário e o programa. O sub-item *Surface Geometry* é responsável por estas definições, conforme a fig. 183:

Field	Units	Obj
SurfaceStartingPosition		UpperLeftCorner
VertexEntry		CounterClockWise
CoordinateSystem		relative

Fig. 183: Dados no *Thermal Zone Description / Geometry / SurfaceGeometry*, do *IDF Editor (Energy Plus)*, indicam o ponto de partida da superfície (canto superior esquerdo), o sentido de seus vértices (anti-horário) e o sistema de coordenadas adotado (relativo).

Antes de se especificar a posição e o tipo de componente de cada superfície, é importante diferenciar os tipos de superfícies consideradas no *Energy Plus*, pois são definidas em campos próprios, conforme a tabela abaixo:

Tabela 17 - Tipos de superfícies

TIPO DE SUPERFÍCIES	APLICAÇÃO	LEG.
Surface: Heat Transfer	Parede, cobertura, forro, piso	Amarelo
Surface: Heat Transfer: Sub	Janelas, portas, portões, vidraças	Verde
Surface: Heat Transfer: Internal Mass	Superfícies internas de uma zona	Azul
Surface: Shading: Detached	Elementos de obstrução, separados do edifício (Ex. Edifício vizinho, muro)	Vermelho
Surface: Shading: Attached	Elementos de obstrução, ligados ao edifício (Ex. beirais, brise)	Magenta

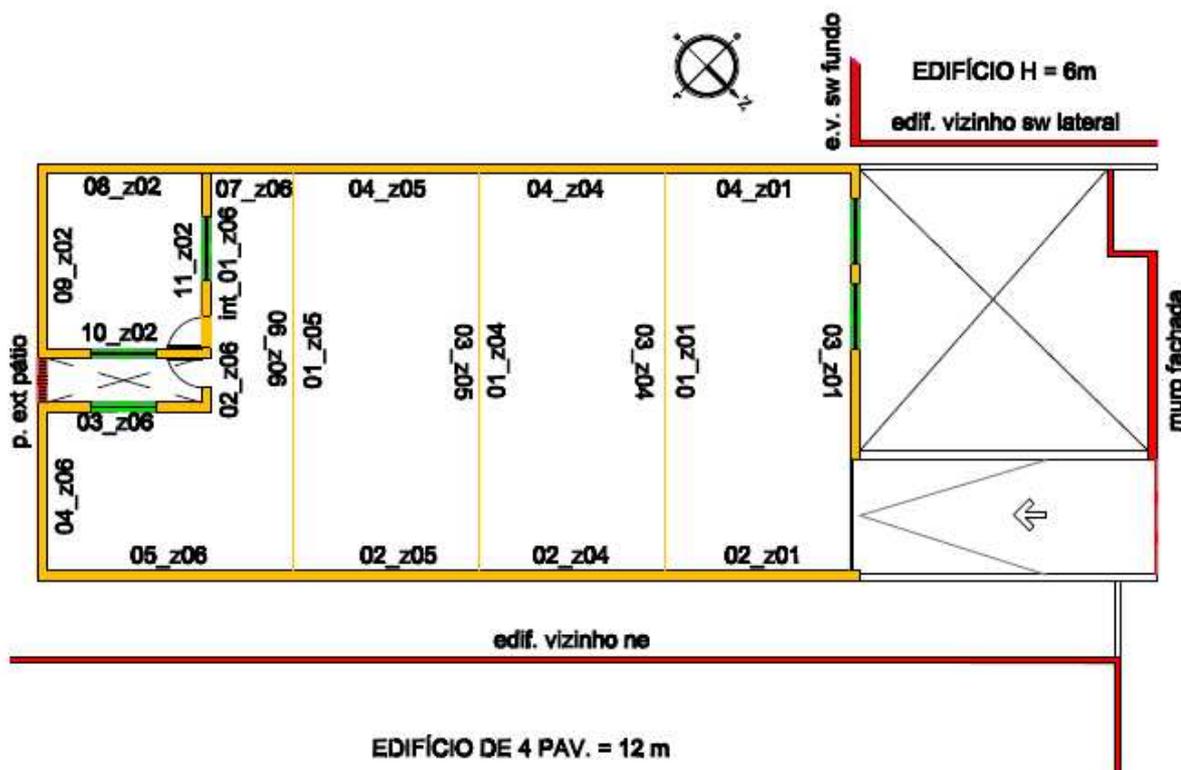


Fig. 184: Planta do galpão, com a classificação dos tipos de superfícies. (BÜTTNER, S.)

As envolventes do galpão são superfícies de transferência de calor (*Surface: Heat Transfer*), assim como as paredes internas que dividem as zonas. O que as diferencia é a indicação de exposição ao sol e ao vento, a especificação da zona a qual pertence e o ambiente externo para qual a superfície está exposta, podendo ser uma outra zona ou o meio exterior. Superfícies que dividem duas zonas devem ser definidas duas vezes, alterando-se a ordem dos vértices e a zona a qual pertence. Ou seja, cada zona deve possuir sempre, no mínimo 6 (seis) faces, ainda que estas já tenham sido definidas em outras zonas. Outro fato importante é que superfícies não simétricas que dividem zonas devem ser definidas duas vezes no sub-item *Construction (Surface Construction Elements)*, pois a ordem das camadas é diferente. No caso das superfícies de ar, como já mencionado, devem ser compostas pelo material ar, definido no campo *Surface Construction Elements / Material; Regular-R*, com uma resistência desprezível. Cada superfície deve ser nomeada, classificada conforme o tipo de componente, a composição de materiais e, por último, são descritas as coordenadas de cada vértice, que geralmente são 4 (quatro). Não há, neste caso, nenhuma superfície interna e nem elementos de obstrução ligados ao edifício. A divisória interna existente no galpão é uma superfície interna; porém, foi desconsiderada para esta simulação. Os seguintes dados devem ser informados ao programa, para a descrição das superfícies:

- **Nome da superfície** (o usuário define)
- **Tipo de superfície** (aparece uma lista para selecionar entre parede, cobertura, piso, forro)
- **Nome do Componente da superfície** (definido no item *Construction*, onde é definida a composição de cada componente)
- **Nome da Zona a qual pertence** (selecionar da lista de zonas, do item *Zone*)
- **Ambiente externo à superfície** (selecionar entre: ambiente externo, outra zona, solo, entre outras opções que não foram adotadas nesta simulação)
- **Objeto externo adjacente à superfície** (somente para superfícies adjacentes a outras, como é o caso daquelas que dividem zonas, ou em casos específicos em que uma superfície está em contato com outro elemento)
- **Exposição ao sol** (definir se a superfície está exposta à radiação solar)
- **Exposição ao vento** (definir se a superfície está exposta ao vento ou não)
- **Fator de visão do solo** (Em situação normal, sem obstruções: piso = 1,0; coberturas = 0,0 e paredes verticais = 0,5. O *Energy Plus* oferece a opção de se calcular esse fator).
- **Número de vértices nesta superfície** (A quantidade de vértices (x,y,z), dependendo da geometria da superfície)
- **Vértices X, Y, Z** (descrição de cada vértice na ordem definida no item *Thermal Zone Description / Geometry / Surface Geometry*)

É importante lembrar que o *Energy Plus* calcula o balanço térmico para cada zona de ar, e para cada uma de suas superfícies. Para isto, não é necessário que haja o fechamento geométrico exato das zonas, ou seja, que todas as superfícies estejam conectadas, pois para o programa basta saber para qual zona cada superfície transfere calor para então calcular corretamente o balanço térmico. Este modelo, por apresentar geometria simples, foi modelado com todas as superfícies conectadas.

9.3.9. Configuração de horários (Schedules)

Os “schedules” permitem configurar os horários em que determinadas variáveis (das condições internas) se modificam ao longo de determinados períodos, podendo ser uma variável climática ou relacionada ao uso, como por exemplo, a carga interna, aberturas e fechamentos de janelas ou sombreamentos. Geralmente estão relacionados com o horário de funcionamento do estabelecimento, podendo-se definir o período em que há geração de cargas internas (pessoas, equipamentos e iluminação). A descrição pode ser diária, especificando-se um coeficiente referente ao valor de pico da carga para cada hora do dia; semanal, diferenciando-se os dias da semana, em especial os fins de semana e anual, para qual são especificadas situações de inverno e verão, períodos de férias, ou ainda outras situações específicas que interferem no cálculo da carga térmica e por isso devem ser informadas.

O primeiro dado a ser informado é o tipo de *schedule* (*Schedule type*), em que se estabelece como se comporta determinado aspecto que varia no decorrer do dia, podendo ser do tipo: ligado/desligado (on/off); fracionado (fraction); um número específico, entre outras tipologias que podem ser criadas pelo usuário, como um meio de informar ao programa quando estas variáveis devem ser consideradas e em que proporção. Ou seja, para as variáveis que podem estar ligadas ou desligadas, adota-se o primeiro tipo, assim como a iluminação, por exemplo, que no período de funcionamento está acesa (ligada), e desligada nos períodos de fechamento do estabelecimento. Já para variáveis que se modificam ao longo do dia, adota-se o tipo “fração” (fraction), para qual são definidos números fracionais entre 0.0 e 1.0 que indicam a proporção em relação ao todo, em que aquela variável acontece para cada hora (ou período) do dia. Outra possibilidade é a definição de um valor específico estabelecido para uma determinada variável como, por exemplo, a carga térmica devido às pessoas, ou valores de velocidade do ar.

No caso do modelo simulado, ficou estabelecido o horário de funcionamento do galpão comercial, das 8 às 18 horas nos dias de semana e das 8 às 12:00 horas aos sábados. Nesses períodos o programa considera a carga interna devido às pessoas, equipamentos e iluminação, além da abertura das janelas, portas e portão. Nos demais horários (noites e fins de semana), estas fontes são desconsideradas. Para a ocupação de pessoas foi considerado um período do dia com maior ocupação para simular a entrada e saída de visitantes e a maior permanência destes em determinadas horas do

dia. Outra configuração estabelecida foi a velocidade do ar para cada hora do dia, conforme os dados fornecidos pelo Aeroporto Marechal Rondon³⁴ do dia de projeto considerado, visando assim representar da melhor maneira possível as condições reais do edifício para o dia específico de referência.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
ScheduleType Name		On/Off	Any Number	Fraction
range		0:1		0.0 : 1.0
Numeric Type		DISCRETE		CONTINUOUS

Fig. 185 : Dados do Schedules / Schedule Type, do IDF Editor (Energy Plus).

O *Energy Plus* dispõe de uma opção para configurar estas variações de maneira resumida, estabelecendo o período do ano, da semana e do dia, em que as variáveis se modificam e em qual quantidade: trata-se do *Schedule Compact*. As expressões em inglês “through” (do começo ao fim), “For” (para), e “Until” (até), fornecem as informações de tempo, indicando o período anual, semanal e diário, respectivamente. Já os valores numéricos indicam a quantidade ou a proporção do valor, conforme estabelecido no sub-item *Schedule Type*. Cada “schedule” é nomeado e, posteriormente, é relacionado à variável da qual trata.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		horário funcionamer	atividade galpão	atividade gerência	iluminação
ScheduleType		Fraction	Any Number	Any Number	Fraction
Complex Field #1		Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31
Complex Field #2		For: Weekdays	For: AllDays	For: AllDays	For: Weekdays
Complex Field #3		Until: 8:00	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 08:00
Complex Field #4		0.0	180	117	0.0
Complex Field #5		Until 18:00			Until 18:00
Complex Field #6		1.0			1.0
Complex Field #7		Until: 24:00			Until: 24:00
Complex Field #8		0.0			0.0
Complex Field #9		For: Saturday			For: Saturday
Complex Field #10		Until: 8:00			Until: 9:00
Complex Field #11		0.0			0.0
Complex Field #12		Until: 12:00			Until: 12:00
Complex Field #13		1.0			1.0
Complex Field #14		Until: 24:00			Until: 24:00
Complex Field #15		0.0			0.0
Complex Field #16		For: Sunday			For: Sunday
Complex Field #17		Until: 24:00			Until: 24:00
Complex Field #18		0.0			0.0
Complex Field #19		For: AllOtherDays			For: AllOtherDays
Complex Field #20		Until: 24:00			Until: 24:00
Complex Field #21		0.0			0.0

Fig. 186: Configuração dos Schedules / Schedule Compact, do IDF Editor (Energy Plus).

³⁴ Dados cedidos gentilmente pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP (IAG) / Laboratório Master – Meteorologia Aplicada aos Sistemas de Tempo Regionais

Obj5	Obj6	Obj7	Obj8
geladeira	vão subsolo e shed	peessoas	velocidade do ar
Fraction	On/Off	Fraction	Any Number
Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31
For: AllDays	For: AllDays	For: Weekdays	For: AllDays
Until: 16:00	Until: 24:00	Until: 8:00	Until: 1:00
1.0	1.0	0.0	3.0
Until 24:00		Until 16:00	Until: 2:00
0.0		0.5	2.5
		Until: 18:00	Until: 3:00
		1.0	3.0
		Until: 24:00	Until: 4:00
		0.0	2.5
		For: Saturday	Until: 5:00
		Until: 8:00	2.0
		0.0	Until: 6:00
		Until: 12:00	2.5
		0.5	Until: 7:00
		Until: 24:00	2.0
		0.0	Until: 8:00
		For: Sunday	2.0
		Until: 24:00	Until: 9:00
		0.0	1.5
		For: AllOtherDays	Until: 10:00

Fig. 187: Continuação da Configuração dos Schedules / Schedule Compact (*Energy Plus*).

9.3.10. Carga Interna (Internal Gains)

No *Energy Plus* os dados de carga interna (Ocupação, iluminação e equipamentos) devem ser informados para cada zona, conforme demonstram as próximas tabelas. A variação da quantidade de pessoas no ambiente e a carga da atividade (em W) é definida no item anterior, *Schedule Compact*.

Field	Unit:	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		ocupação_z02	ocupação_z01	ocupação_z04	ocupação_z06
Zone Name		zona gerência_02	zona galpão_01	zona galpão_04	zona galpão_06
Number of People		2	1	2	3
Number of People SCHEDULE Name		peessoas	peessoas	peessoas	peessoas
Fraction Radiant		0,6	0,6	0,6	0,6
Activity level SCHEDULE Name		atividade gerência	atividade galpão	atividade galpão	atividade galpão
MRT Calculation Type		ZoneAveraged	ZoneAveraged	ZoneAveraged	ZoneAveraged
Surface Name/Angle Factor List Name					
Work Efficiency SCHEDULE Name					
Clothing Insulation SCHEDULE Name					
Air Velocity SCHEDULE Name		velocidade do ar	velocidade do ar	velocidade do ar	velocidade do ar
Thermal Comfort Report Type #1					
Thermal Comfort Report Type #2					
Thermal Comfort Report Type #3					
user specified sensible fraction		autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Enable ASHRAE 55 comfort warnings		No	No	No	No

Fig. 188: Dados de ocupação, no item Internal Gains/People, do *IDF Editor* (Fonte: *Energy plus*)

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		iluminação_z02	iluminação_z01	iluminação_z04
Zone Name		zona gerência_02	zona galpão_01	zona galpão_04
SCHEDULE Name		horário funcionamer	horário funcionamer	horário funcionamer
Design Level	W	40	82	82
Return Air Fraction		0	0,2	0,2
Fraction Radiant		0,72	0,59	0,59
Fraction Visible		0,18	0,2	0,2
Fraction Replaceable		0	0	0
End-Use Subcategory		General	General	General
Return Air Fraction Is Calculated from Plenum		No	No	No

Field	Units	Obj3	Obj4	Obj5
Name		iluminação_z04	iluminação_z05	iluminação_z06
Zone Name		zona galpão_04	zona galpão_05	zona galpão_06
SCHEDULE Name		horário funcionamer	horário funcionamer	horário funcionamer
Design Level	W	82	82	82
Return Air Fraction		0,2	0,2	0,2
Fraction Radiant		0,59	0,59	0,59
Fraction Visible		0,2	0,2	0,2
Fraction Replaceable		0	0	0
End-Use Subcategory		General	General	General
Return Air Fraction Is Calculated from Plenum Temperature		No	No	No
Coefficient #1 of Equation for Return Air Fraction vs. Plenum Tem				
Coefficient #2 of Equation for Return Air Fraction vs. Plenum Tem	1/K			

Fig. 189: Dados de iluminação - item Internal Gains / Lights, do IDF Editor (Fonte: Energy plus / IDF Editor)

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		equipamentos_02	equipamentos_06	equipamentos_01
Zone Name		zona gerência_02	zona galpão_06	zona galpão_01
SCHEDULE Name		horário funcionamento	geladeira	horário funcionamento
Design Level	W	372	300	50
Fraction Latent				
Fraction Radiant				
Fraction Lost				
End-Use Subcategory		General	General	General

Field	Units	Obj4	Obj5
Name		equipamentos_04	equipamentos_05
Zone Name		zona galpão_04	zona galpão_05
SCHEDULE Name		horário funcionamento	horário funcionamei
Design Level	W	50	100
Fraction Latent			
Fraction Radiant			
Fraction Lost			
End-Use Subcategory		General	General

Fig. 190: Carga de equipamentos editadas no item Internal Gains / Eletric Equipment, do IDF Editor. (Fonte: Energy plus / IDF Editor)

Não serão descritos todos os itens da *class list* disponíveis no *Energy Plus*, tais como ferramentas para o dimensionamento de sistemas de ar condicionado, iluminação, sistema fotovoltaico, e demais opções do programa, pois trata-se aqui da simulação de um modelo simples não condicionado artificialmente.

9.3.11. Fluxo de ar (Airflow)

Neste item são definidos parâmetros de ventilação e demais aspectos relacionados ao fluxo de ar no edifício. No caso do modelo simulado, somente a ventilação natural foi estabelecida, indicando o volume (m³/s) de ar introduzido pelas aberturas de cada zona. Também são ligados a algum *schedule*, no caso aquele que define o horário em que as aberturas permanecem abertas. Para se estabelecer o volume de ar, foram feitos alguns testes, estimando-se uma renovação de ar conforme a velocidade do ar naquele dia, as dimensões das aberturas e a direção do vento em relação às mesmas, avaliando as diferenças resultantes com a alteração do parâmetro, até se obter um resultado considerado adequado. O valor adotado no final, para a zona 01, corresponde a 3 (três) renovações por hora. Os campos “*Minimum Indoor Temperature*” e “*Delta Temperature*” correspondem aos valores, a partir dos quais não é necessário considerar a ventilação. No entanto, como se trata de uma ventilação natural, ou seja, sem controle, são inseridos valores extremos, pois a ventilação deve ser considerada a todo instante, enquanto há aberturas. Para ventilação mecânica existem outros parâmetros mais detalhados que não são necessários para este caso.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		aberturas gerais_z01	abertura fixa_z03
Zone Name		zona galpão_01	zona subsolo_03
SCHEDULE Name		horário funcionamento	vão subsolo e shed
Design Volume Flow Rate	m3/s	0,3	0,8
Minimum Indoor Temperature	C	0	0
Delta Temperature	deltaC	-100	-100
Ventilation Type		NATURAL	NATURAL

Fig. 191: Dados da ventilação no item *AirFlow / Ventilation* do *IDF Editor*. (Fonte: *Energy plus / IDF Editor*)

Field	Units	Obj3	Obj4	Obj5
Name		shed_z04	shed_z06	aberturas fundos_z0
Zone Name		zona galpão_04	zona galpão_06	zona galpão_01
SCHEDULE Name		vão subsolo e shed	vão subsolo e shed	horário funcionamer
Design Volume Flow Rate	m3/s	0,15	0,15	0,2
Minimum Indoor Temperature	C	0	0	0
Delta Temperature	deltaC	-100	-100	-100
Ventilation Type		NATURAL	NATURAL	NATURAL

Fig. 192: Dados da ventilação no item *AirFlow / Ventilation* do *IDF Editor*. (Fonte: *Energy Plus / IDF Editor*)

9.3.12. Configuração dos dados de saída (Report)

Após inserir todos os dados do modelo referentes ao local, clima, construção, uso e ocupação, o último item da “*class list*” é o “*Report*”. Nesse item é que o usuário especifica que tipo de resultado precisa,

para depois salvar o arquivo *IDF*. Portanto são definidas as variáveis que se deseja obter nos resultados, os intervalos das mesmas e ainda solicitar dados em função de um *schedule*, podendo-se selecionar vários parâmetros por fonte ou por uso final. O usuário pode pedir o relatório para todas as zonas ou especificar as zonas para as quais se deseja obter os resultados.

Field	Units	Obj1	Obj2
Key_Value		*	*
Variable_Name		outdoor dry bulb	Zone Mean Air Temperature
Reporting_Frequency		hourly	hourly
Schedule_Name			

Field	Units	Obj3	Obj4
Key_Value		*	*
Variable_Name		Zone Mean Radiant Temperature	Surface Inside Temperature
Reporting_Frequency		hourly	hourly
Schedule_Name			

Field	Units	Obj5
Key_Value		*
Variable_Name		Surface Outside Temperature
Reporting_Frequency		hourly
Schedule_Name		

Fig. 193: Configuração dos dados de saída no *IDF Editor*. (Fonte: *Energy Plus / IDF Editor*)

As variáveis solicitadas são as seguintes, do objeto 01 (um) ao 06 (seis): temperatura externa - tbs (°C); temperatura interna do ar - tbs (°C); temperatura radiante (°C); temperatura superficial interna (°C) e temperatura superficial externa (°C). Quando se pede temperatura superficial, estas são obtidas para todas as superfícies da zona à qual pertencem. Já quanto à zona que se pretende avaliar, deve-se definir no campo “*key_Value*” o nome da zona a ser avaliada. O asterisco neste campo indica que para todas as zonas devem ser obtidas as variáveis especificadas. Apesar de ser avaliada neste trabalho somente a zona 01 (um), foram solicitadas as variáveis climáticas para todas as zonas, apenas por uma questão experimental. Para modelos complexos, devem-se solicitar somente as variáveis desejadas para reduzir o tempo de simulação.

9.3.13. Relatório de saída / Processamento da simulação

Após a criação do arquivo de texto, contendo os dados de entrada, segue-se para a etapa final de processamento da simulação. Assim como o arquivo de entrada, este pode ser editado no *DOS Command*; porém, o *Energy Plus* também disponibiliza um módulo responsável por selecionar os arquivos de entrada e processar a simulação de uma maneira mais simples. É o *EPLaunch* que se encontra no diretório no qual o programa foi instalado.

Na tela inicial do *EPLaunch*, o usuário deve selecionar o arquivo de dados de entrada editado no *IDF*

Editor, o arquivo de clima, que pode ser obtido no site do *Energy Plus* ou montado pelo próprio usuário, no caso de não haver a cidade desejada disponibilizada no site e, por fim, solicitar o processamento da simulação. No caso de se adotar um dia de projeto, deve-se selecionar a opção de “*no weather file*” (sem arquivo climático).

Ao clicar em “*Simulate*”, o *Energy Plus* irá conferir se existem erros no modelo que impeçam a simulação. São dois tipos de erros: “*warnings*” e “*severe errors*”. Os “*warnings*” são apenas avisos que devem ser conferidos, sem impedir a simulação, enquanto que os “*severe errors*” devem ser corrigidos. A única maneira de se checar o modelo e de se identificar erros é rodando uma simulação. A simulação pode levar alguns minutos, dependendo da complexidade do modelo, quantidade de zonas térmicas, e tipo de resultados solicitados. Enquanto o software processa as informações, aparece uma tela do DOS, que mostra o progresso da simulação e que se fecha quando finaliza o processo ou quando são encontrados erros (*severe errors*).

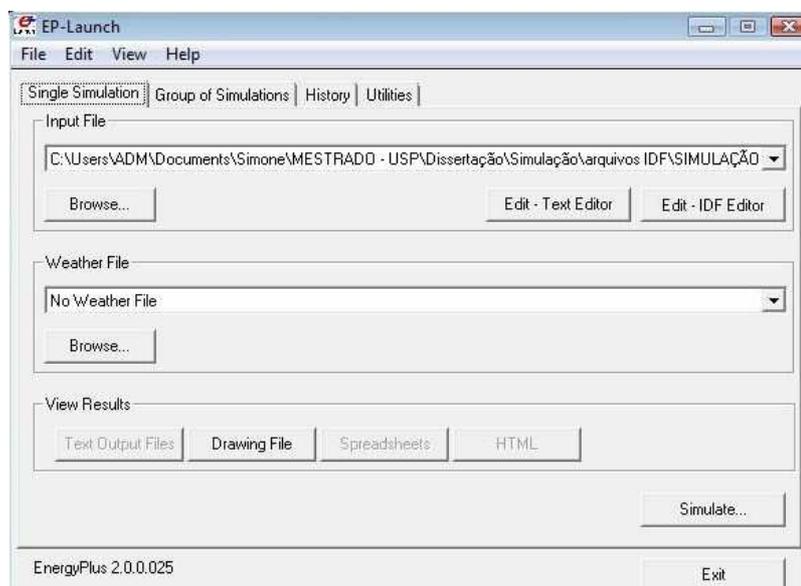


Fig. 194: Tela do *EP-Launch*, onde são selecionados os arquivos de entrada e de clima. (Fonte: *Energy Plus / IDF Editor*)

Após o programa rodar a simulação, uma tela disponibiliza vários tipos de arquivos, entre eles:

- BND – dados de entrada, e para simulações detalhadas de ar condicionado ou ventilação, esse arquivo mostra detalhes dos nós e branches (componentes do sistema).
- DXF – modelo simulado – é possível visualizar o modelo no formato de autocad para conferir.
- EIO – resultados adicionais gerados pelo Energy Plus.
- ERR – mensagens de descrição dos erros: warnings e severe errors.
- RDD – lista das variáveis resultantes disponíveis para a simulação.
- SHD – resultados relacionados ao sombreamento.
- SVG – Diagrama do sistema de ar condicionado

Dentre as opções acima, é possível verificar os resultados em arquivo de texto (audit, bnd, mtd, eio, rdd e eso), de desenho (dxf) e em planilhas (CSV). Para visualização em forma de gráficos é preciso configurar os arquivos em forma de tabelas e então gerá-los.

9.3.14. Resultados obtidos e análise

As variáveis ambientais solicitadas ao programa foram:

- Temperatura do ar externo(°C)
- Temperatura radiante média(°C)
- Temperatura superficial interna e externa (°C)
- Temperatura do ar externo(°C)

Foi feita uma análise comparativa destes resultados com aqueles obtidos em medição, porém sem considerar este como um critério de avaliação do programa, já que os dados disponíveis são insuficientes e/ou imprecisos para esta finalidade. Os dados que faltam para esta comparação são os de radiação solar global (medidos); velocidade dos ventos e temperatura externa exata para o local de estudo, já que os dados do aeroporto podem sofrer alterações devido às construções urbanas e diferenças topográficas. O mais importante foi o processo de treinamento para a próxima etapa de simulação, conhecendo-se com mais aprofundamento as questões que envolvem a simulação no *Energy Plus*, e permitindo uma análise geral do comportamento do edifício no clima considerado. Embora não se tenha todos os dados e nem a precisão daqueles disponíveis, acredita-se que a comparação dos resultados permite uma visualização de como o programa avalia o comportamento do edifício, em relação à situação real.

Não foi levada em consideração nesta análise a avaliação do conforto térmico no interior da edificação. Também a umidade relativa do ar, apesar de ter sido medida, não foi considerada como parâmetro de comparação entre os dois métodos. Os gráficos e tabelas a seguir apresentam os resultados obtidos, medidos e simulados, para o dia 28 de junho de 2007.

a. Temperatura interna do ar (°C)

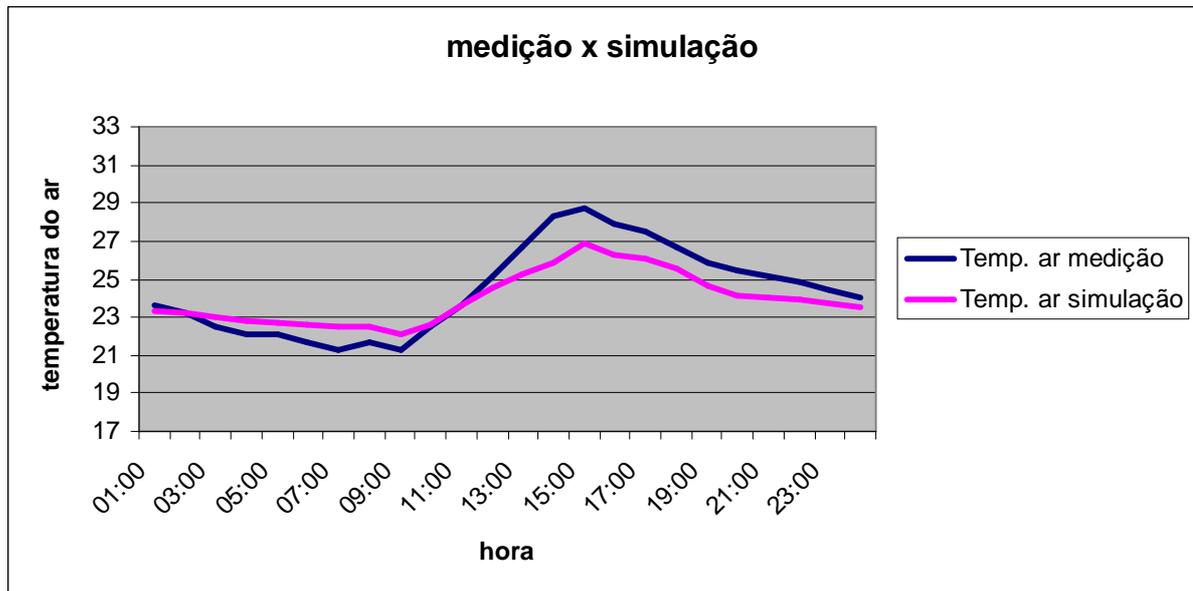


Gráfico 16 – Temperaturas do ar interno, em °C: medidas e simuladas

Tabela 18 - Temperaturas do ar interno: medidas e simuladas

Hora	Temp. ar medição	Temp. ar simulação
01:00	23,6	23,3
02:00	23,2	23,2
03:00	22,5	23,0
04:00	22,1	22,8
05:00	22,1	22,7
06:00	21,7	22,6
07:00	21,3	22,5
08:00	21,7	22,5
09:00	21,3	22,1
10:00	22,5	22,6
11:00	23,6	23,6
12:00	25,2	24,5
13:00	26,7	25,3
14:00	28,3	25,9
15:00	28,7	26,9
16:00	27,9	26,3
17:00	27,5	26,1
18:00	26,7	25,6
19:00	25,9	24,6
20:00	25,5	24,1
21:00	25,1	24,0
22:00	24,8	23,9
23:00	24,4	23,7
24:00	24,0	23,5

Observações:

- As curvas do gráfico estão próximas, indicando que a variação da temperatura do ar ao longo do dia ocorreu de maneira semelhante nas duas situações, apresentando as seguintes variações:
- As temperaturas máximas ocorreram no mesmo horário para os dois procedimentos, às 15:00 h, com uma diferença de 1,8°C entre ambos, sendo a temperatura de medição mais elevada. Este horário corresponde à máxima diferença registrada entre as temperaturas do ar;
- As temperaturas mínimas também ocorreram no mesmo horário, às 9:00 h, com uma diferença de 0,8°C entre ambas, sendo a temperatura de medição mais baixa;
- As temperaturas médias obtidas são 24,4°C na medição e 23,9°C na simulação, apresentando uma diferença de 0,5°C, o que pode ser considerado pequena.

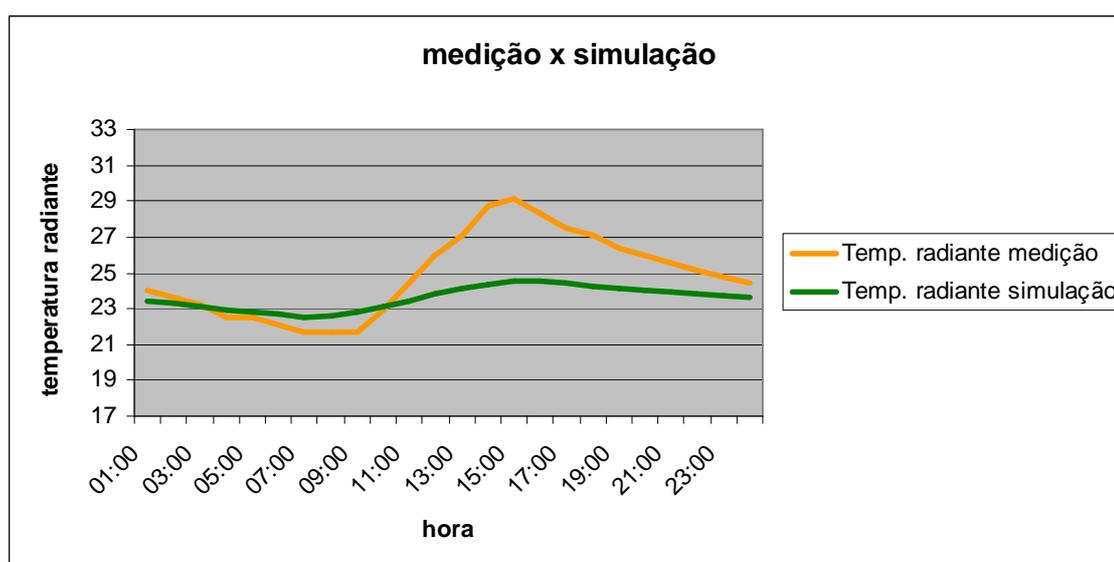
b. Temperatura Radiante

Gráfico 17 – Temperaturas radiantes, em °C: medidas e simuladas

Tabela 19 - Temperaturas radiantes: medidas e simuladas

Hora	Temp, radiante medição	Temp. radiante simulação
01:00	24,0	23,4
02:00	23,6	23,3
03:00	23,2	23,1
04:00	22,5	22,9
05:00	22,5	22,8
06:00	22,0	22,7
07:00	21,7	22,5
(CONTINUA)		

(CONTINUAÇÃO)		
08:00	21,7	22,6
09:00	21,7	22,8
10:00	22,8	23,1
11:00	24,4	23,4
12:00	25,9	23,8
13:00	27,1	24,1
14:00	28,7	24,3
15:00	29,1	24,5
16:00	28,3	24,5
17:00	27,5	24,4
18:00	27,1	24,2
19:00	26,3	24,1
20:00	25,9	24,0
21:00	25,5	23,9
22:00	25,2	23,8
23:00	24,8	23,7
24:00	24,4	23,6

Observações:

- As curvas do gráfico apresentam comportamentos semelhantes às curvas da temperatura do ar, porém com diferenças maiores. A média das temperaturas de medição é mais elevada que a de simulação, principalmente para o período de 11:00h às 20:00h, no qual as temperaturas são mais elevadas;
- No período matutino, de 1:00h às 11:00h, as diferenças podem ser consideradas irrelevantes, inferiores ou igual a 1°C. Nas primeiras horas do dia, as temperaturas de medição são mais elevadas, invertendo-se por volta das 3:00h. A partir de 11:00h ocorre uma nova inversão, com um maior afastamento entre ambas, aproximando-se novamente no fim do dia;
- As temperaturas máximas ocorreram no mesmo horário para os dois procedimentos, às 15:00h, com uma diferença significativa de 4,6°C entre ambos, sendo a temperatura de medição mais elevada. Este horário corresponde à máxima diferença registrada entre as temperaturas radiantes;
- As temperaturas mínimas também ocorreram no mesmo horário, às 7:00h, com uma diferença de 0,8°C entre ambas, sendo a temperatura de medição mais elevada;
- A temperatura média obtida foi 23,8°C na medição e 23,6°C na simulação, apresentando uma diferença irrelevante de 0,2°C e demonstrando que, apesar das diferenças de até 4,6°C nas horas mais quentes do dia, há uma concordância nas temperaturas médias.

c. Temperatura Superficial

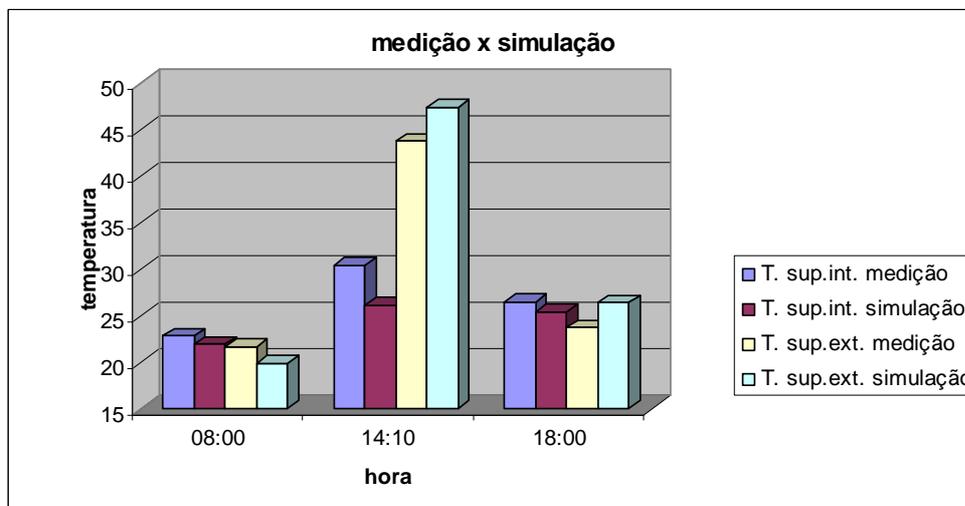


Gráfico 18 – Temperaturas superficiais internas e externas, em °C: medidas e simuladas

Tabela 20 - Temperaturas superficiais internas e externas: medidas e simuladas

Hora	T. sup.int. medição	T.sup.int sim.	T. sup. ext. medição	T. sup. ext.sim.
08:00	22,8	21,9	21,6	19,9
14:00	30,5	26,1	43,8	47,5
18:00	26,5	25,4	23,7	26,4

Observação: As temperaturas superficiais apresentaram divergências mais significativas em relação às demais variáveis. Isto se explica devido à imprecisão do termômetro infra-vermelho em superfícies de aço, agravado com a questão da dificuldade de acesso à superfície externa da cobertura do galpão, o que somente possibilitou a medição a certa distância.

d. Temperatura externa do ar

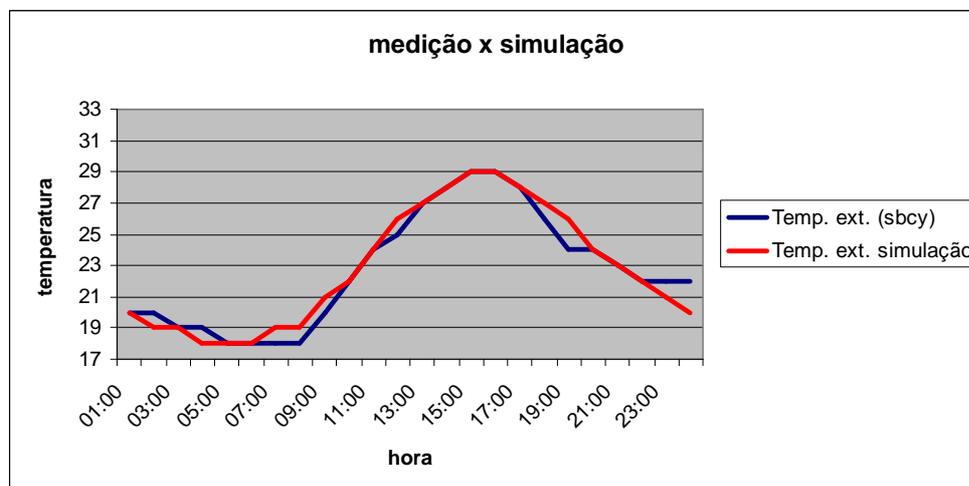


Gráfico 19 - Temperaturas do ar externo, em °C: medidas e simuladas

Tabela 21 - Temperaturas externas do ar: medidas e simuladas

Hora	temp. ext (sbcy)	temp. ext simulação
01:00	20	20
02:00	20	19
03:00	19	19
04:00	19	18
05:00	18	18
06:00	18	18
07:00	18	19
08:00	18	19
09:00	20	21
10:00	22	22
11:00	24	24
12:00	25	26
13:00	27	27
14:00	28	28
15:00	29	29
16:00	29	29
17:00	28	28
18:00	26	27
19:00	24	26
20:00	24	24
21:00	23	23
22:00	22	22
23:00	22	21
24:00	22	20

Observações:

- A temperatura externa não é o principal parâmetro de avaliação, porém auxilia na compreensão do comportamento das demais variáveis internas obtidas.
- As curvas coincidiram, apresentando diferenças insignificantes.

9.4. Considerações finais

- Quanto ao treinamento no programa de simulação térmica e energética:

O processo de aprendizagem e treinamento permitiu um primeiro contato da pesquisadora com a ferramenta, auxiliando também aos futuros pesquisadores que pretendem utilizá-la. Foi de extrema importância para a compreensão do funcionamento do programa e serviu de parâmetro para as simulações realizadas na 3ª (terceira) parte desta dissertação.

- Quanto ao programa *Energy Plus*

Quando se levantou os principais programas computacionais utilizados por profissionais e pesquisadores na área de simulação térmica e energética, o programa *Energy Plus* se destacou pelos diversos reconhecimentos e prêmios por parte de órgãos relacionados à eficiência energética, e a sua utilização em diversos trabalhos no mundo todo, sendo por isto selecionado para ser adotado na pesquisa em questão, além do fato de ser gratuito. Em relação à modelagem geométrica da edificação, o programa exige maior tempo e trabalho por não dispor de uma interface gráfica, o que facilitaria a visualização e, conseqüentemente, todo o processo. No entanto, para modelos geométricos simples, como é o caso dos galpões avaliados nesta pesquisa, pode ser modelado de maneira simples e rápida. O processo de treinamento serviu para comprovar que esta ferramenta atende aos requisitos desta pesquisa.

Para um melhor aproveitamento do programa, é recomendável um maior aprofundamento das ferramentas disponíveis, das equações matemáticas e dos parâmetros solicitados, a fim de se conhecer as possibilidades de avaliação e identificar as possíveis causas de divergências nos resultados, quando ocorrem, já que o programa dispõe de uma modelagem matemática complexa e de algoritmos que consideram diferentes fenômenos físicos simultaneamente, além de outros sistemas completos que não foram considerados nesta simulação.

- Quanto aos resultados obtidos

A verificação entre os resultados simulados e medidos apresentou divergências devido às imprecisões dos dados disponíveis. Ainda assim, estas são aceitáveis, principalmente as temperaturas do ar interno apresentaram curvas muito similares, apesar de atingir valores inferiores para as temperaturas máximas.

PARTE 03

*Simulações computacionais
e Conclusões*

10. MÉTODO EXPERIMENTAL PARA AS SIMULAÇÕES

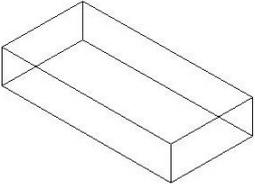
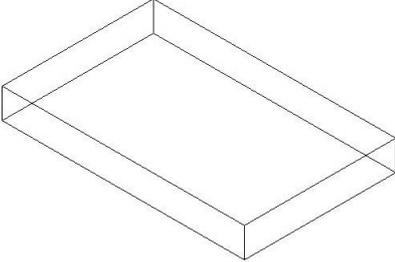
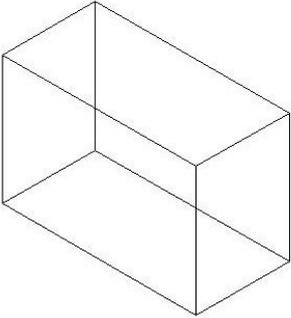
A simulação consiste na etapa experimental da pesquisa, permitindo a avaliação do objeto de estudo, a partir da qual são obtidos os resultados pretendidos. Antes de se iniciar o processo de simulação foram definidos os modelos, as combinações de componentes de coberturas, as etapas de simulação e os parâmetros de avaliação. As decisões foram baseadas nos levantamentos de dados primários e secundários realizados ao longo da pesquisa, adotando-se critérios com o objetivo de representar uma condição real e buscar novas soluções para os problemas encontrados. No caso desta pesquisa a finalidade é representar uma tipologia de edifícios comerciais encontrados em larga escala na cidade de Cuiabá – MT, cuja cobertura é a maior fonte de calor para o ambiente interno, tornando-o desconfortável e energeticamente ineficiente. Em relação aos componentes selecionados, o critério de escolha foi limitado aos componentes mais atuais e/ou usuais no mercado, dotados de propriedades térmicas isolantes ou radiantes. O objetivo é buscar novas soluções para sistemas de cobertura que apresentem um melhor desempenho térmico e energético para o clima local, considerando-se as diversas combinações de possíveis e o efeito de técnicas complementares de atenuação da carga térmica proveniente da cobertura, como o resfriamento evaporativo e o sombreamento.

10.1. Definição dos modelos

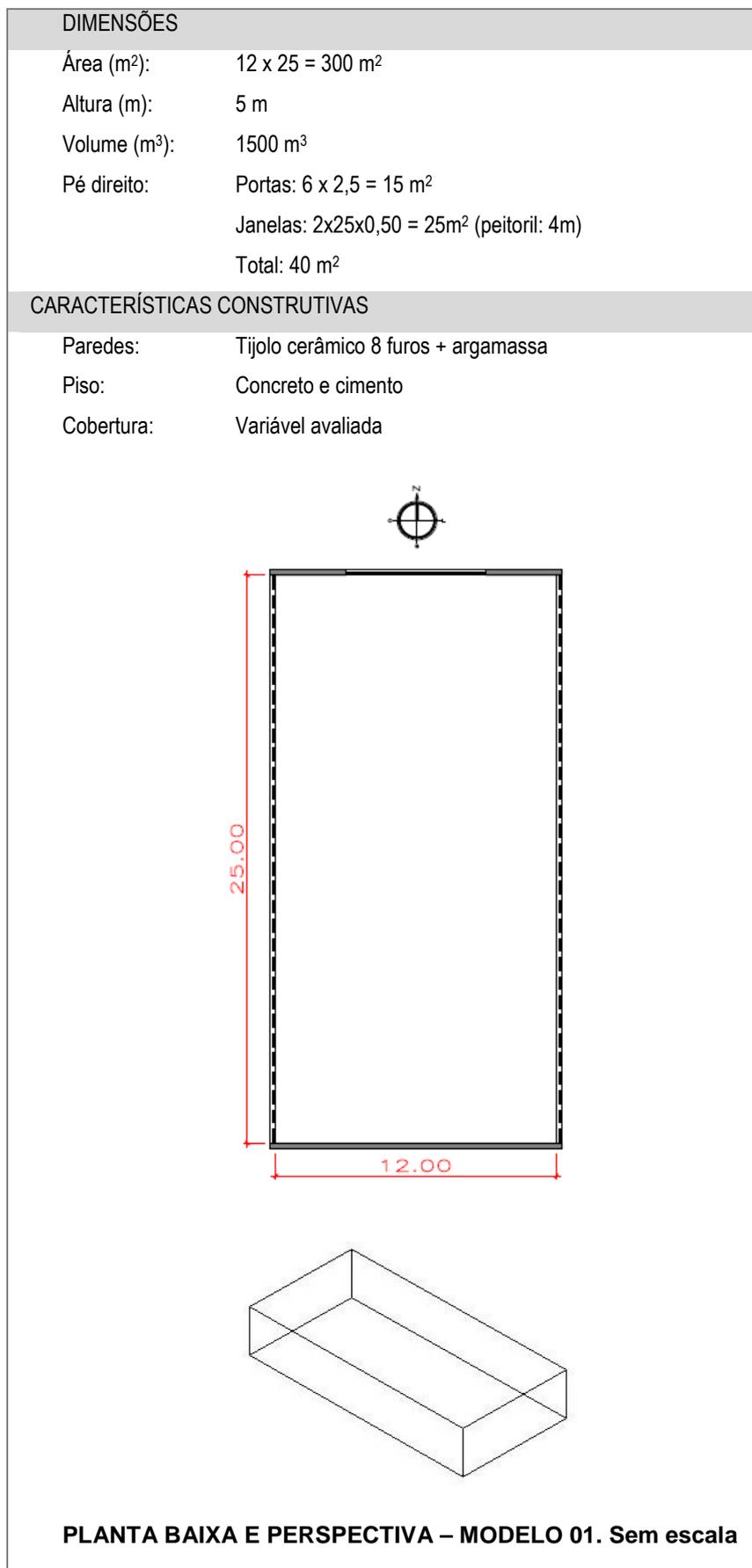
Para a definição de um modelo de referência, buscou-se representar à situação real encontrada, ou seja, a tipologia de galpões mais usual na cidade de Cuiabá - MT, em se tratando de forma e dimensão. Foi observada uma tipologia mais representativa, caracterizada pela planta retangular, porém com dimensões e proporções variadas. Com o objetivo de se avaliar a influência do fator de forma foram realizados testes com diferentes proporções entre a largura e o comprimento do galpão. Quatro modelos geométricos de 300m² foram comparados para efeito de teste. Estes foram denominados: MT01, MT02, MT03 e MT04, cujas proporções entre largura e comprimento são de 1:1; 1:1,5; 1:2 e 1:3, respectivamente. Foi feita uma simulação com incidência de radiação solar e outra sem. Os gráficos no Anexo B apresentam os resultados obtidos de temperatura interna do ar, que demonstram a influência insignificante desta variável para a temperatura interna e para a carga térmica de resfriamento do ambiente. Então, uma vez que o fator de forma não interferiu no resultado, considerando-se as proporções estudadas, optou-se por um modelo geométrico com dimensões de largura e comprimento definidas de acordo com o que se considerou representativo no local. Para se avaliar o quanto a cobertura interfere na carga térmica interna de galpões, em relação às demais vedações, foram definidos, para uma etapa posterior de avaliação, outros dois modelos com dimensões diferentes. Então, estabeleceu-se o modelo anterior como referência (M1) e os outros dois para efeito comparativo. Estes apresentam volumes maiores que o modelo referencial: um deles, aumentando-se somente a área e mantendo-se a mesma proporção geométrica, pé-direito e características

construtivas (M02). Já o outro modelo (M03) apresenta a mesma área do modelo referencial, porém com pé-direito mais alto (volume M03 = volume M02), alterando assim a proporção entre as vedações verticais e a horizontal.

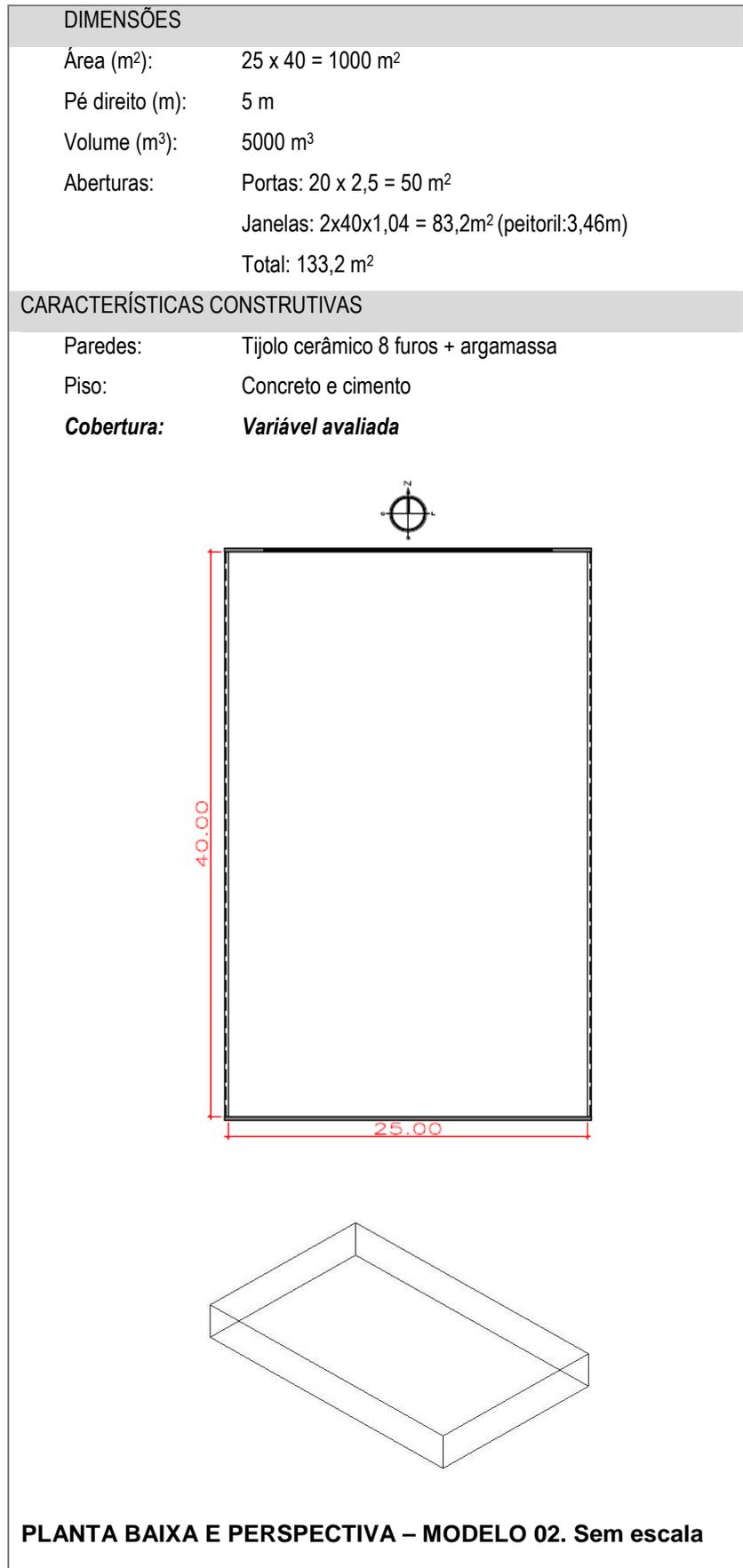
Tabela 22 - Característica dos modelos

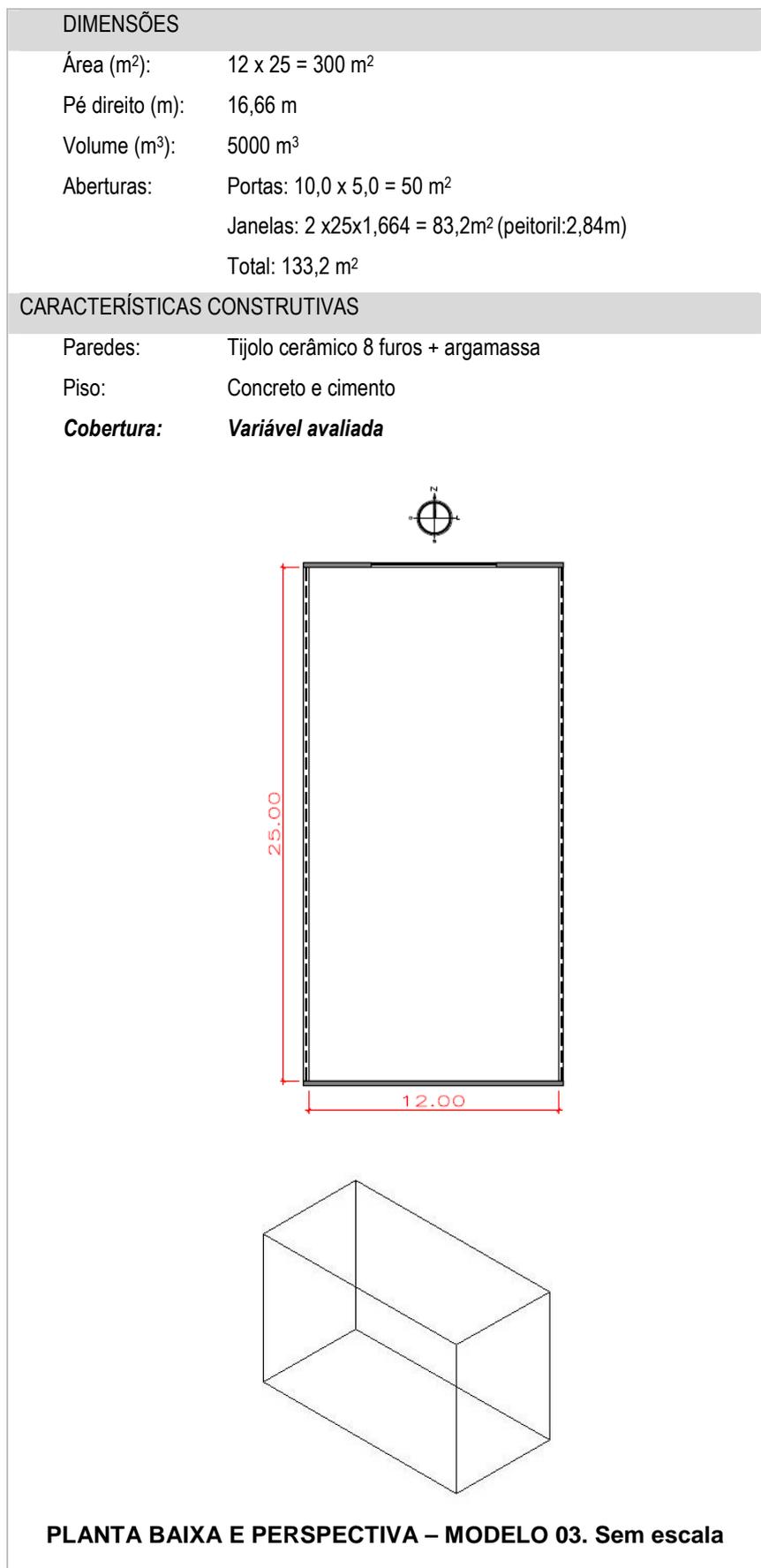
MODELO 01 – M01	MODELO 02 – M02	MODELO 03 – M03
<p>Área = x</p> <p>Volume = y</p> <p>Pé-direito = z</p>	<p>Área = $3,33 x$</p> <p>Volume = $3,33 y$</p> <p>Pé-direito = z</p>	<p>Área = x</p> <p>Volume = $3,33 y$</p> <p>Pé-direito = $3,33 z$</p>
		

Assim, os modelos ficaram estabelecidos de acordo com a descrição a seguir.

▪ **MODELO 01 (REFERÊNCIA)**

▪ **MODELO 02**



▪ **MODELO 03**

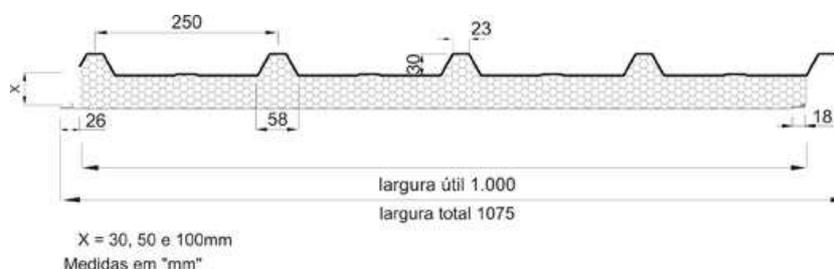
10.2. Seleção dos componentes de cobertura e subcobertura

Diante dos diversos tipos de componentes encontrados no mercado durante a pesquisa, foi feita uma seleção de alguns componentes para a avaliação (abreviados aqui com a letra “C” seguido do número que os referenciam, conforme segue na tabela a seguir:

10.2.1. Telha isolante tipo sanduíche (C01)

Composição

- Núcleo de EPS com Densidade Classe F auto extingüível, revestida com chapas de aço pré-pintadas.
- EPS (poliestireno expandido) com densidade média $D = 14,5\text{kg/m}^3$ classe F (auto-extingüível), livre de CFC, conforme NBR 11984 (ABNT).



Características

- Coeficiente Global de Transmissão térmica: $0,63\text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

Gerais

- Espessura isolante: 50 mm
- Espessura revestimento: 43 mm
- Condutibilidade térmica EPS: $0,033\text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$
- Densidade: 200 kg/m^3 (Peso próprio = 10 kg/m^2)
- Cor externa: branco

Aplicação geral

- Projetos Agro-Industriais
- Obras esportivas
- Projetos educacionais e turísticos
- Instalações comerciais

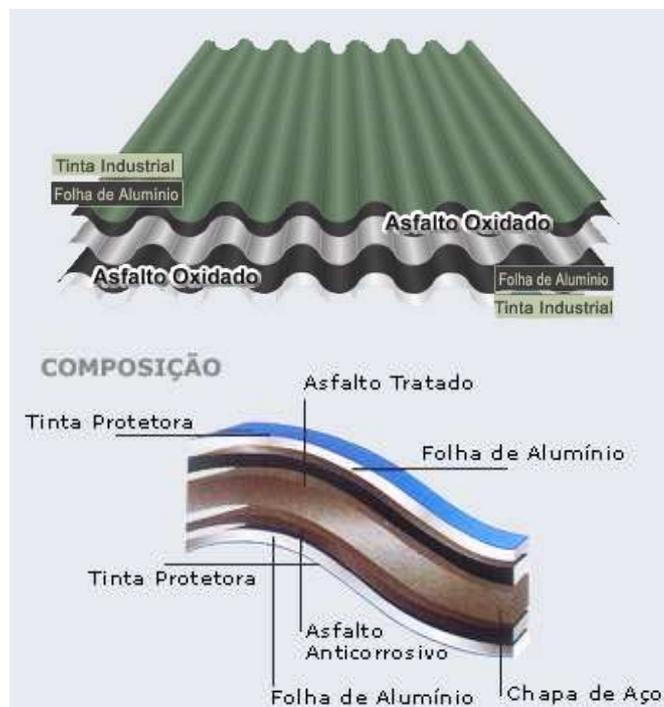
Imagem



10.2.2. Telha Asfáltica (C02)

Composição

- De fora para dentro: Pintura de proteção, folha de alumínio gofrado, asfalto tratado, lâmina de aço, asfalto anticorrosivo e folha de alumínio



Características

- Coefficiente Global de Transmissão térmica: ASTM C236-54T $K=0,25 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

Gerais

- Espessura: 2 mm
- Densidade: 2075 kg / m^3 (Peso próprio: $4,15 \text{ kg / m}^2$)
- Condutibilidade térmica: $0,21 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (até 80°C)
- Cor externa: branco e marrom

Aplicação geral

- Projetos Agro-Industriais
- Obras esportivas
- Projetos educacionais e turísticos
- Instalações comerciais

Imagem



10.2.3. Telha de fibras orgânicas vegetais (C03)

Composição	<ul style="list-style-type: none">▪ Monocamada de fibras orgânicas vegetais (impregnada de asfalto) e resina (resistente aos raios UV)
Características	<ul style="list-style-type: none">▪ Coeficiente Global de Transmissão térmica: dado não obtido
Gerais	<ul style="list-style-type: none">▪ Espessura: 3 mm▪ Densidade: 2133 kg/m³ (Peso próprio: 6,4 kg/m²)▪ Condutibilidade térmica: 0,99 W/m°C▪ Cor externa: vermelho (de fábrica) e branca (pintura)
Aplicação geral	<ul style="list-style-type: none">▪ Prédios comerciais e industriais▪ Galpões / Hangares▪ Quiosques▪ Abrigos para veículos urbanos ou rurais

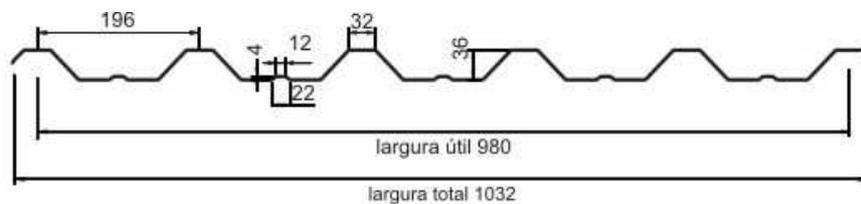
Imagem



10.2.4. Telha metálica simples com forro de PVC (C04)

Composição

- Chapa simples de aço pré-pintado



Medidas em "mm"

- Camada de ar de 25 cm
- Forro de pvc

Características

- Espessura: 0,43 mm

Gerais - aço

- Densidade: 960 Kg / m³ (Peso próprio: 4,13 Kg / m²)
- Condutibilidade térmica: 52 W/m°C
- Cor externa: metálico e branco

Características

- Espessura: 10mm

Gerais - pvc

- Densidade: 1350 Kg/ m³ (Peso próprio: 13,5 Kg / m²)
- Condutibilidade térmica: 0,20 W/m°C
- Cor: branco

Aplicação geral

- Projetos Agro-Industriais
- Obras esportivas
- Projetos educacionais e turísticos
- Instalações comerciais

Imagem



10.2.5. Componente de subcobertura

- Composição
- Barreira radiante: Lâmina refletiva composta de foil de alumínio em ambas as faces e uma trama de reforço entre as faces
- Características Gerais
- Resistência Térmica: 2,42 m² °C /W
 - Emissividade da superfície: 0,1
 - Certificado de qualidade: IPT nº 858326
- Aplicação geral
- Sob telhas de edificações comerciais, residenciais, rurais e industriais

Imagem



Obs. A fonte das imagens é dos fabricantes, disponíveis nos respectivos endereços eletrônicos (ver bibliografia)

10.3. Estratégias adotadas para atenuar a carga térmica

Foram avaliadas duas estratégias passivas ou de baixo consumo de energia para a atenuação da carga térmica proveniente da cobertura: o sombreamento que representa a função de proteção da cobertura e o resfriamento evaporativo indireto, representando a função de seletividade da mesma, de acordo com as definições do capítulo 2 (item 2.4. Funções das Coberturas).

10.3.1. Sombreamento

O sombreamento na cobertura é uma maneira de se controlar a radiação solar, reduzindo a carga térmica que chega ao ambiente interno através deste componente. Para a avaliação desta estratégia foi aplicada uma membrana têxtil sobre a cobertura, com as seguintes características:

- Material: Tela termoplástica produzida em monofilamentos (redondo) de polietileno de alta densidade, na cor branca;
- Propriedades: Espessura - 2mm / Condutibilidade térmica - 0,4 W/m°C / Emissividade - 0,9;
- 80% de proteção contra radiação solar direta (Transmissão de 20% da radiação solar);
- Espaço de ventilação de 50 cm entre a telha e a tela;



Fig. 195: Exemplo de aplicação da tela de proteção solar e a variedade de telas disponíveis no mercado.

10.3.2. Resfriamento Evaporativo

Conforme foi mencionado no item 4.2.2 do capítulo 4, referente às estratégias complementares de resfriamento, existem várias maneiras de se resfriar por meio da evaporação. O sistema pode ser de resfriamento evaporativo direto e indireto, e este, por sua vez, também apresenta uma variedade de aplicações, podendo ser por meio de tanques ou de aspersão de gotas de água. Os tanques apresentam a desvantagem da necessidade de maior manutenção, propiciando a contaminação da água e, por isso, não serão abordados nesta pesquisa. Já o sistema de aspersão de água sobre a cobertura foi pesquisado no mercado a fim de se conhecer as aplicações existentes atualmente no Brasil. Somente uma empresa foi encontrada³⁵, esta se encontra em São Paulo, porém atende a várias cidades do Brasil, em especial nas regiões mais quentes e secas. O sistema adotado consiste em um equipamento automático e sensível à radiação solar. À medida que a temperatura superficial da cobertura atinge determinado limite pré-estabelecido, o sistema é acionado, passando a pulverizar gotículas de água sobre a cobertura, em intervalos que variam com a temperatura e a intensidade de radiação solar. A água pulverizada resfria a cobertura e, ao absorver o calor, evapora totalmente, evitando o acúmulo e desperdício de água. O sistema age tanto na redução da carga térmica solar quanto na dissipação da carga gerada internamente por pessoas, iluminação e equipamentos, reduzindo as temperaturas internas do ar e radiante para edifícios não climatizados e diminuindo o consumo de energia em edifícios climatizados artificialmente.

O consumo de energia do sistema é desprezível, enquanto o consumo de água é, em média, de 0,4 litros por m² por hora, podendo variar conforme a radiação solar e a umidade relativa do ar. Para reduzir as despesas com o consumo de água, as empresas têm optado em utilizar água de poço ou reutilizar a água servida, principalmente as indústrias que utilizam uma grande quantidade de água, o que torna o sistema mais viável em termos de custo inicial e despesas com manutenção e consumo de

³⁵ CLIMATIZAÇÃO EVAFRIO. Disponível em: <<http://www.evafrio.com.br>>. Acesso em: 12 de agosto de 2008.

energia e/ou água. Segundo a empresa³⁶, o sistema de aspersão reduz o investimento inicial em 20%, se comparado ao investimento em um sistema de ar condicionado, e proporciona uma redução de até 25% nas despesas com energia e manutenção durante o período de utilização. O sistema pode ser encontrado em diversas tipologias construtivas, climatizadas artificialmente ou não, em especial, fábricas, centros de distribuição, estoques e laboratórios e variam de 200m² a 20.000 m² de área de cobertura. Quanto maior a área de cobertura, maior a redução da carga térmica por insolação alcançada com o sistema.

No estado de Mato Grosso não foi localizada nenhuma obra com o sistema de resfriamento evaporativo, apesar do potencial identificado, devido ao rigor do clima e à abundância de galpões agro-industriais, com grandes áreas de cobertura. Faz parte do objetivo desta pesquisa avaliar o potencial para a aplicação deste sistema em coberturas de edificações situadas na região de Cuiabá – MT. Para isto considerou-se o sistema idêntico ao comercializado pela empresa de resfriamento citada, por se tratar de um sistema existente e viável de ser aplicado.



Fig. 196: Sistema de dutos e aspersores instalados na cobertura, com detalhe do sprinkler



Fig. 197: Painel de comando e vista do Reservatório, bomba, filtro e registros

³⁶ Administrada pelo e engenheiro Marcus Vinícius Ciocci, engenheiro especialista em Conforto ambiental e conservação de energia, pela FAU USP.

10.4. Etapas de simulação

Foram estabelecidas 3 (três) etapas para a simulação, cada qual com um objetivo específico:

10.4.1. Etapa 01: Avaliação de componentes de cobertura e subcobertura

A primeira etapa visa avaliar o desempenho térmico de componentes de cobertura isoladamente ou combinados com componentes de subcobertura, em diversas alternativas de arranjos, somente para o modelo de referência (modelo 01). Para esta etapa, todas as demais variáveis são fixas, isolando somente o componente de cobertura e desconsiderando demais aspectos, como as cargas internas e a ventilação natural. Portanto, trata-se de uma avaliação paramétrica.

Os parâmetros de avaliação adotados para a comparação entre os sistemas foram: temperatura do ar interno – t_{bs} (°C); temperaturas superficiais internas e externas (°C) e a carga térmica diária de resfriamento do ambiente (W). Esta última variável, disponível no relatório de saída do *Energy Plus*, denomina-se *Purchased Air* e consiste na demanda do sistema de ar condicionado para manter o ambiente a determinada temperatura e umidade relativa do ar, pré-estabelecidos. Neste caso, ficaram estabelecidas as seguintes condições ambientais: temperatura do ar interno de 22 °C e 60% de umidade relativa do ar. Sempre que as condições ambientais internas estejam a uma temperatura superior a esta, o software calcula a carga térmica necessária para removê-la do ambiente visando atender à condição estabelecida. A tabela seguinte apresenta as combinações de componentes selecionadas, compondo um total de 13 (treze) simulações:

Tabela 23 - Combinações de componentes para a etapa 01

CÓDIGO DO COMPONENTE	MATERIAL	COR ACABAMENTO /	OPÇÃO COM OU SEM BARREIRA	Nº SIMULAÇÃO
C01	TELHA TÉRMICA TIPO SANDUÍCHE	Branco	01
C02	TELHA DE AÇO E ASFÁLTO	Branco	s/ barreira radiante	02
			c/ barreira radiante	03
		Marrom	s/ barreira radiante	04
			c/ barreira radiante	05
C03	TELHA DE FIBRAS ORGÂNICAS VEGETAIS	Branco	s/ barreira radiante	06
			c/ barreira radiante	07
		Vermelho	s/ barreira radiante	08
			c/ barreira radiante	09
C04	TELHA METÁLICA SIMPLES COM FORRO DE PVC	Branco	s/ barreira radiante	10
			c/ barreira radiante	11
		Metálico	s/ barreira radiante	12
			c/ barreira radiante	13

10.4.2. Etapa 02: Avaliação da influência da carga térmica interna, da ventilação natural e das dimensões do modelo

Tomando-se como referência os resultados obtidos na etapa anterior, seguiu-se para a segunda etapa, cujo objetivo foi avaliar a interferência das fontes internas de calor (ocupação de pessoas, iluminação e equipamentos), da ventilação natural e das dimensões do galpão no desempenho do sistema de cobertura, permitindo assim avaliar os modelos para uma situação mais próxima da realidade. Para isto, foram reavaliados os componentes cujos resultados apresentaram o melhor e pior desempenho, comparando-os com a mesma situação, porém variando a carga interna, a proporção geométrica entre as vedações externas e a possibilidade de ventilação natural. Nesta etapa somente a temperatura do ar interno – tbs (°C) serviu de parâmetro de comparação entre as diferentes situações avaliadas.

Quanto à ventilação, comparou-se o resultado do modelo 01 avaliado na etapa anterior, sem abertura das janelas, com o resultado do mesmo modelo, agora com a abertura das janelas e portas durante o dia. O fluxo de ar introduzido no ambiente representa uma taxa média considerando-se somente o efeito chaminé, já que a velocidade do ar é muito reduzida e as aberturas, assim como ocorre na maioria dos galpões da cidade, não são planejadas para otimizar o efeito da ação dos ventos. Se houvesse diferenças significativas na temperatura do ar interno - tbs (°C) em função da abertura ou não das janelas e portas, todas as combinações propostas para esta etapa seriam avaliadas, caso contrário, dar-se-ia continuidade às simulações, sem considerar a ventilação natural, já que a análise é comparativa, independente da condição de conforto obtida. Vale lembrar que a ventilação não é o foco do estudo, no entanto não poderia deixar de ser avaliada para uma melhor compreensão da influência desta estratégia no desempenho do edifício, principalmente da cobertura.

Em relação à geometria dos modelos, foram comparados os resultados do modelo 01 com os outros dois modelos definidos anteriormente, ambos apresentando o mesmo volume, porém, com áreas diferentes, ou seja, proporções entre paredes e cobertura diferentes também. A comparação visa à avaliação de quanto a cobertura influencia na carga térmica interna, em relação à vedação vertical e o quanto esta contribuição é mais ou menos significativa dependendo das dimensões do edifício.

Já para a avaliação da carga interna foi definida uma carga menor e outra mais elevada, considerando-se situações comuns de atividade comercial, em termos de iluminação, equipamentos e ocupação. Primeiramente, comparou-se o modelo 01 sem carga com as duas opções de cargas internas consideradas. Em caso de haver diferenças na temperatura do ar interno (°C) em função da carga interna, todas as combinações consideradas nesta etapa seriam simuladas com e sem carga interna, visando uma melhor compreensão da contribuição de cada fonte de calor.

Acredita-se que as soluções para um adequado sistema de cobertura podem ser diferentes para edificações com cargas internas e dimensões variadas, por isso a importância desta etapa. É importante identificar até que ponto a cobertura é o elemento mais significativo no aquecimento do ambiente interno; como se comporta o edifício quando submetido a diferentes situações e em quais circunstâncias se deve priorizar o projeto da cobertura em relação às demais variáveis envolvidas. As

respostas encontradas devem auxiliar na formulação de recomendações de projeto, permitindo que medidas preventivas e corretivas sejam implantadas no devido ponto, ou seja, no aspecto responsável pelo mau desempenho do edifício como um todo, evitando-se assim soluções inviáveis em termos de custo-benefício.

O número de simulações desta etapa foi estabelecida em função dos resultados parciais encontrados em cada aspecto avaliado: ventilação, carga térmica interna e dimensões dos galpões. Para tanto foram previstas entre 09 e 24 simulações (2 - componentes: pior e melhor resultado x 2 - cargas internas x 2 - com e sem ventilação x 3 - modelos = 24).

Tabela 24 - Combinações para a etapa 02

COMPONENTE	MODELO GEOMÉTRICO	CARGA TÉRMICA INTERNA	OPÇÃO COM OU SEM VENTILAÇÃO	Nº SIMULAÇÃO
Cobertura com melhor desempenho na etapa 01	Modelo 01	Carga interna 01 (270,5 W/m ²)	S/ ventilação	01
			C/ ventilação	02
		Carga interna 02 (161,0 W/m ²)	S/ ventilação	03
			C/ ventilação	04
	Modelo 02	Carga interna 01 (270,5 W/m ²)	S/ ventilação	05
			C/ ventilação	06
		Carga interna 02 (161,0 W/m ²)	S/ ventilação	07
			C/ ventilação	08
	Modelo 03	Carga interna 01 (270,5 W/m ²)	S/ ventilação	09
			C/ ventilação	10
		Carga interna 02 (161,0 W/m ²)	S/ ventilação	11
			C/ ventilação	12
Cobertura com pior desempenho na etapa 01	Modelo 01	Carga interna 01 (270,5 W/m ²)	S/ ventilação	13
			C/ ventilação	14
		Carga interna 02 (161,0 W/m ²)	S/ ventilação	15
			C/ ventilação	16
	Modelo 02	Carga interna 01 (270,5 W/m ²)	S/ ventilação	17
			C/ ventilação	18
		Carga interna 02 (161,0 W/m ²)	S/ ventilação	19
			C/ ventilação	20
	Modelo 03	Carga interna 01 (270,5 W/m ²)	S/ ventilação	21
			C/ ventilação	22
		Carga interna 02 (161,0 W/m ²)	S/ ventilação	23
			C/ ventilação	24

As opções em hachura somente serão simuladas se houvesse necessidade, dependendo do resultado obtido. Não havendo diferença entre as cargas internas no modelo 01, não seria necessário simular para os demais modelos. Do mesmo modo ocorre com a ventilação.

10.4.3. Etapa 03: Avaliação das estratégias de atenuação da carga térmica

Esta etapa tem como objetivo avaliar duas técnicas passivas de atenuação da carga térmica proveniente da cobertura: O resfriamento evaporativo por meio de aspersão d'água sobre a cobertura e o controle solar por meio de sombreamento desta. A quantidade de simulações a serem realizadas nesta etapa foi condicionada aos resultados obtidos na etapa anterior. Portanto, se não houvesse diferenças significativas entre os dois modelos adotados (modelo 02 e 03) e entre as duas cargas térmicas internas estabelecidas (avaliados na última etapa), apenas um modelo e um valor de carga térmica seriam selecionados para esta etapa. Independente da quantidade de alternativas, estes serão combinados às duas técnicas acima mencionadas, formando, no máximo, um total de 32 (trinta e duas) simulações. Trata-se de uma avaliação exploratória, comparando-se as cargas térmicas diárias de resfriamento (W) e as temperaturas do ar interno – tbs (°C) obtidas nas etapas anteriores, primeiro sem as estratégias de resfriamento e, depois, com a aplicação das mesmas.

As tabelas 25 e 26 apresentam as simulações de sombreamento e resfriamento evaporativo, respectivamente, previstas para esta terceira etapa:

Tabela 25 - Combinações para a etapa 03 - Sombreamento

COMPONENTE	MODELO GEOMÉTRICO	CARGA TÉRMICA INTERNA	OPÇÃO COM OU SEM VENTILAÇÃO	Nº SIMULAÇÃO
Cobertura com melhor desempenho na etapa 01	Modelo 02	Carga interna 01 (270,5 W/m ²)	S/ ventilação	01
			C/ ventilação	02
		Carga interna 02 (161,0 W/m ²)	S/ ventilação	03
			C/ ventilação	04
	Modelo 03	Carga interna 01 (270,5 W/m ²)	S/ ventilação	05
			C/ ventilação	06
		Carga interna 02 (161,0 W/m ²)	S/ ventilação	07
			C/ ventilação	08
Cobertura com pior desempenho na etapa 01	Modelo 02	Carga interna 01 (270,5 W/m ²)	S/ ventilação	09
			C/ ventilação	10
		Carga interna 02 (161,0 W/m ²)	S/ ventilação	11
			C/ ventilação	12
	Modelo 03	Carga interna 01 (270,5 W/m ²)	S/ ventilação	13
			C/ ventilação	14
		Carga interna 02 (161,0 W/m ²)	S/ ventilação	15
			C/ ventilação	16

Tabela 26 - Combinações para a etapa 03 – Resfriamento Evaporativo

COMPONENTE	MODELO GEOMÉTRICO	CARGA TÉRMICA INTERNA	OPÇÃO COM OU SEM VENTILAÇÃO	Nº SIMULAÇÃO
Cobertura com melhor desempenho na etapa 01	Modelo 02	Carga interna 01 (270,5 W/m ²)	S/ ventilação	17
			C/ ventilação	18
		Carga interna 02 (161,0 W/m ²)	S/ ventilação	19
			C/ ventilação	20
	Modelo 03	Carga interna 01 (270,5 W/m ²)	S/ ventilação	21
			C/ ventilação	22
		Carga interna 02 (161,0 W/m ²)	S/ ventilação	23
			C/ ventilação	24
Cobertura com pior desempenho na etapa 01	Modelo 02	Carga interna 01 (270,5 W/m ²)	S/ ventilação	25
			C/ ventilação	26
		Carga interna 02 (161,0 W/m ²)	S/ ventilação	27
			C/ ventilação	28
	Modelo 03	Carga interna 01 (270,5 W/m ²)	S/ ventilação	29
			C/ ventilação	30
		Carga interna 02 (161,0 W/m ²)	S/ ventilação	31
			C/ ventilação	32

Obs. As opções em hachura serão simuladas somente se houver necessidade, dependendo do resultado obtido

10.5. Procedimento de simulação

O procedimento de simulação seguiu os passos descritos no capítulo 9 / item 9.3, referente à simulação realizada para teste e aprendizado do programa computacional, com as devidas adaptações de dados para as avaliações propostas nesta pesquisa. Todos os dados foram coletados previamente, inseridos no aplicativo do *Energy Plus*, o *IDFEditor*, e processados no *EP-Launch*. Conforme as combinações de componentes foram avançando, suas variáveis foram sendo substituídas. Segue no anexo A, a título de demonstração, um arquivo *AUDIT* do *Energy Plus*, no qual aparece toda a seqüência de dados inseridos no *IDFEditor*. Devido à extensão dos arquivos e ao número de simulações, apenas o arquivo correspondente à primeira simulação da pesquisa (etapa 01/ componente 01 / modelo 01) é que será apresentado, considerando que os demais arquivos foram baseados neste, modificando somente as variáveis avaliadas em cada simulação. Os resultados obtidos foram plotados em gráficos e seguem na seqüência³⁷.

Um aspecto importante da simulação computacional é que diferentes situações devem ser sempre

³⁷ O arquivo *AUDIT*, fornecido pelo *Energy Plus*, contém todos os dados inseridos no programa. Segue no anexo A o arquivo da primeira simulação, na qual se avaliou a telha isolante térmica, servindo de referência para as outras simulações, para quais apenas as variáveis avaliadas foram alteradas.

adaptadas conforme a disponibilidade de ferramentas oferecidas pelo programa. Determinadas situações, em especial aquelas menos usuais, precisam passar por simplificações para que sejam corretamente informadas ao programa, no entanto não podem deixar de representar a situação real. Por isso a importância de se conhecer o princípio de funcionamento e a modelagem matemática do mesmo, evitando que informações inseridas sejam interpretadas de maneira equivocada, interferindo na veracidade dos resultados. Por exemplo, para a avaliação do sombreamento da cobertura na terceira etapa houve algumas adaptações. O *Energy Plus* disponibiliza uma opção específica para os elementos de proteção, desde que acoplados a uma janela. Como no caso do modelo avaliado a tela de proteção está posicionada sobre a telha e não junto a janelas, foi necessário criar uma superfície idêntica à cobertura existente e nesta adicionar uma janela (elemento envidraçado) em 100% (cem por cento) de sua área, que por sua vez se mantém aberta por todo o tempo. Ou seja, ainda que se tenha criado uma superfície, esta pode ser considerada inexistente, já que permanece aberta. É só uma maneira encontrada de se introduzir um elemento de proteção para esta situação.

Na terceira etapa da simulação ainda houve uma dificuldade para a avaliação do resfriamento evaporativo por aspersão de água, tendo sido elaborada uma metodologia específica para esta avaliação, conforme a explicação adiante.

10.5.1. Metodologia adotada para avaliação do resfriamento evaporativo no Energy Plus

O *Energy plus* foi escolhido como ferramenta de simulação para esta pesquisa por se tratar de um programa sofisticado em termos de modelagem matemática, por ser reconhecido nas diversas entidades de ensino e pesquisas relacionadas à eficiência energética, pela facilidade de acesso e por ter atendido às necessidades da pesquisa em sua fase inicial. No entanto, o programa não avalia o resfriamento evaporativo por aspersão de água. Outras ferramentas foram investigadas, porém nenhuma capaz de atender a este requisito foi encontrada. Então, recorreu-se a outras possibilidades de se calcular a redução da temperatura interna, por meio da aspersão de água sobre a cobertura. Com a valiosa participação e ajuda do professor Alberto Hernandez Neto³⁸, foi definida uma metodologia visando uma simplificação para o cálculo da redução da temperatura do ar interno - tbs (°C) e/ou carga térmica de resfriamento (W) por meio do resfriamento evaporativo, utilizando-se o *Energy plus*. Contudo, os dados de entrada fornecidos ao programa tiveram que ser previamente calculados pelo processo manual, utilizando-se equações matemáticas conhecidas da Termodinâmica (SONNTAG; BORGNAKKE e WYLEN, 2003). Segue na próxima pa descrição da metodologia de cálculo empregada.

³⁸ NETO, Alberto Hernandez: Professor Doutor do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP, e consultor do programa *Energy Plus* no Brasil.

Considerando-se a seguinte equação:

$$Q_{\text{rad}} - Q_{\text{vap}} = Q_{\text{liq}} \quad (\text{Eq. 01})$$

Onde:

Q_{rad} = a radiação solar global no plano horizontal (dado fornecido no arquivo climático da cidade), em W/m^2

Q_{vap} = calor perdido devido à vaporização da água (a ser calculado), em W/m^2

Q_{liq} = calor que atinge a superfície da cobertura (dado que se pretende encontrar), em W/m^2

Baseando-se nos conhecimentos da Termodinâmica, têm-se que Q_{vap} :

$$Q_{\text{vap}} = m_{\text{H}_2\text{O}} \times h_{\text{lv}} \quad (\text{Eq. 02})$$

Onde:

$m_{\text{H}_2\text{O}}$ = fluxo de água por unidade de tempo, em kg/s

h_{lv} = entalpia de vaporização, em função da temperatura do ar, em kJ/kg (dado obtido na tabela termodinâmica, em: SONNTAG; BORGNAKKE e WYLEN, 2003)

O valor aproximado de fluxo de água em $\text{litros/m}^2/\text{hora}$ foi fornecido pela empresa de resfriamento evaporativo contatada e investigada, consiste em $0,4 \text{ litros/m}^2/\text{hora}$. É preciso converter volume (m^3) em massa (kg):

Eq. 03:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} (\text{kg/s}) = Q / (\text{m}^3/\text{h}) \times 1/3600\text{s} \times \rho_{\text{H}_2\text{O}} \quad (\text{Eq. 03})$$

Onde:

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1 / \text{volume específico}_{\text{H}_2\text{O}}$$

Utilizando-se estas equações e convertendo-se as variáveis necessárias, é possível encontrar o valor de Q_{liq} , ou seja, do calor que atinge a superfície da cobertura. A partir do valor encontrado de Q_{liq} , encontra-se um coeficiente proporcional ao valor de radiação global incidente no plano horizontal (Q_{rad}). Ou seja, a radiação global (Q_{rad}) representa a radiação que incidiria na cobertura sem a estratégia de aspersão de água, enquanto a radiação “líquida” (Q_{liq}) representa a radiação resultante após o processo de evaporação da água aspergida. O dado de radiação (Q_{rad}) é fornecido ao programa *Energy Plus* por meio do arquivo climático e ajustado no arquivo de entrada por meio da opção *skyclearness*, que representa um fator de ajuste das condições do céu, variando de 0 (zero), para céu totalmente nublado, a 1 (um), para céu totalmente aberto. Ora, se é possível ajustar a

intensidade de radiação solar em função do tipo de céu, também é possível ajustá-la para informar a redução de radiação solar devido a outros fatores, como a aspersão de água, por exemplo. Desta forma, utiliza-se o coeficiente encontrado na relação entre Q_{rad} e Q_{liq} no campo de *skyclearness*, sendo esta uma maneira de informar ao programa um valor ajustado, relacionado proporcionalmente ao dado fornecido pelo arquivo climático. É importante lembrar que se trata de uma simplificação e não de um modelo preciso, pois se sabe que não é a radiação solar global que é reduzida e sim a carga térmica proveniente da cobertura. Contudo, este método permite uma aproximação para se alcançar o resultado visado dentro das possibilidades oferecidas pelo programa. No entanto, esta alteração implica em reduzir todos os parâmetros ambientais, já que reduz a radiação global incidente não somente na cobertura, mas também nas demais envoltórias. Portanto, as temperaturas internas resultantes não condizem com a situação real de um sistema de resfriamento evaporativo, sendo este aplicado somente na envoltória superior. Então, considera-se somente os dados de temperatura superficial externa da cobertura como sendo um valor aproximado adequado para a estimativa deste parâmetro. O passo seguinte é rodar uma outra simulação, agora com o valor de *skyclearness* reajustado conforme a situação inicial, e utilizar a opção de *othersidecoefficient* para a superfície da cobertura. Explicando melhor: O *Energy Plus* solicita na descrição de cada uma das superfícies existentes a definição da face oposta, podendo ser o ambiente externo, uma outra zona e/ou a opção de *othersidecoefficient* (entre outras). Por meio desta opção é possível definir uma condição pré-estabelecida da face oposta e é exatamente neste ponto em que se utiliza os dados de temperatura superficial externa encontrados na simulação anterior, cujo *skyclearness* estava ajustado em função do coeficiente de redução devido ao calor de vaporização. Definindo-se a variação da temperatura superficial externa ao longo do dia, pode-se agora avaliar as temperaturas do ar interno ou radiantes média, assim como as cargas térmicas de resfriamento, que devem representar uma estimativa aproximada das condições ambientais resultantes após a aplicação da estratégia de resfriamento evaporativo. É de se esperar um superdimensionamento do efeito do resfriamento evaporativo, e por isso deve-se analisar o resultado e possivelmente ajustá-lo com um fator de correção, visando aproximar o resultado do efeito real.

As planilhas de cálculo e conversões seguem no Apêndice A.

11. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

11.1. Etapa 01

Na primeira etapa serão apresentados os gráficos contendo os resultados de cada componente isoladamente, com variação na cor e na composição do conjunto. As variáveis climáticas avaliadas foram: carga térmica de resfriamento (W); temperatura do ar interno – t_{bs} (°C); temperatura superficial interna e externa (°C).

a) Telha isolante tipo sanduíche (C01)

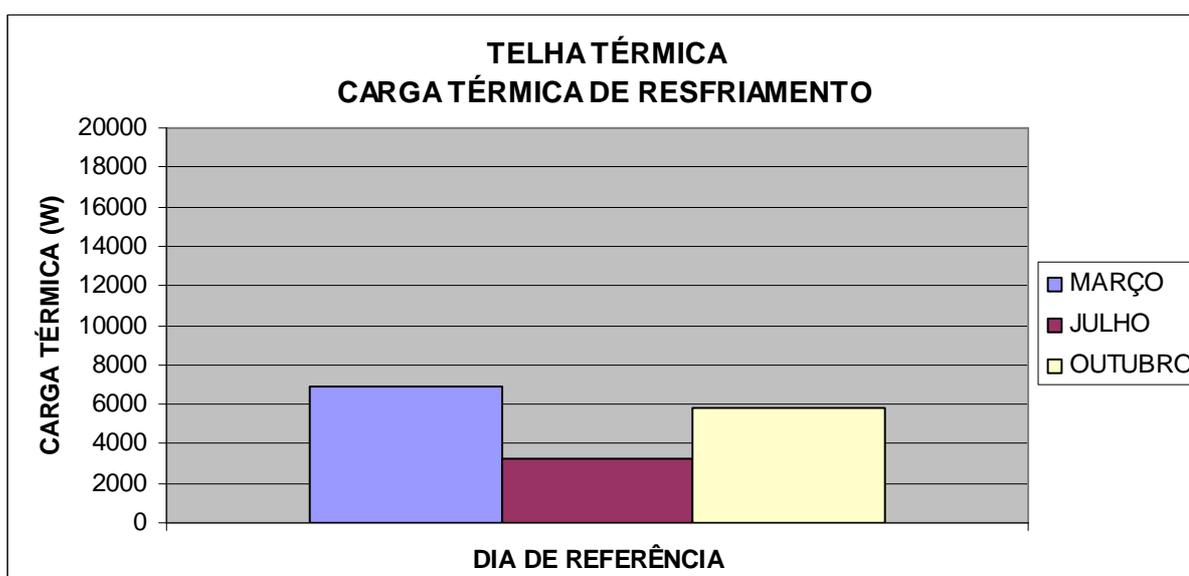


Gráfico 20: Carga Térmica de resfriamento para a telha isolante tipo sanduíche, para os 03 dias de referência avaliados

Como é de se esperar, a carga térmica é menor em julho, cujas temperaturas são mais amenas e a radiação solar é menor. Em outubro, apesar de ser o período mais quente do ano, a carga térmica de resfriamento é menor do que em março. Isto se explica devido à maior amplitude térmica diária e à umidade relativa do ar, que nesta época é mais baixa, propiciando com isto maiores perdas de calor e, conseqüentemente, noites mais amenas.

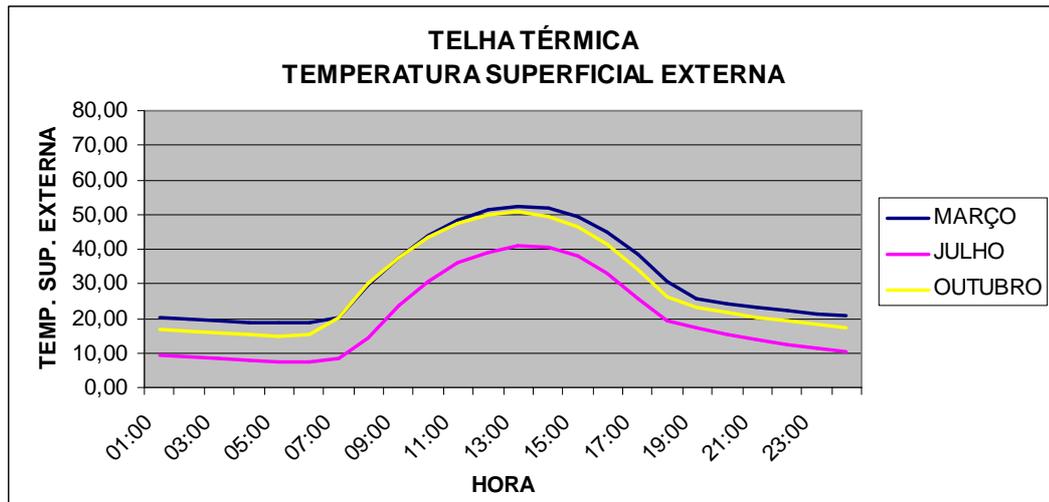


Gráfico 21 - Temperatura superficial externa em °C, para a telha Isolante tipo sanduíche, para os 03 dias de referência avaliados.

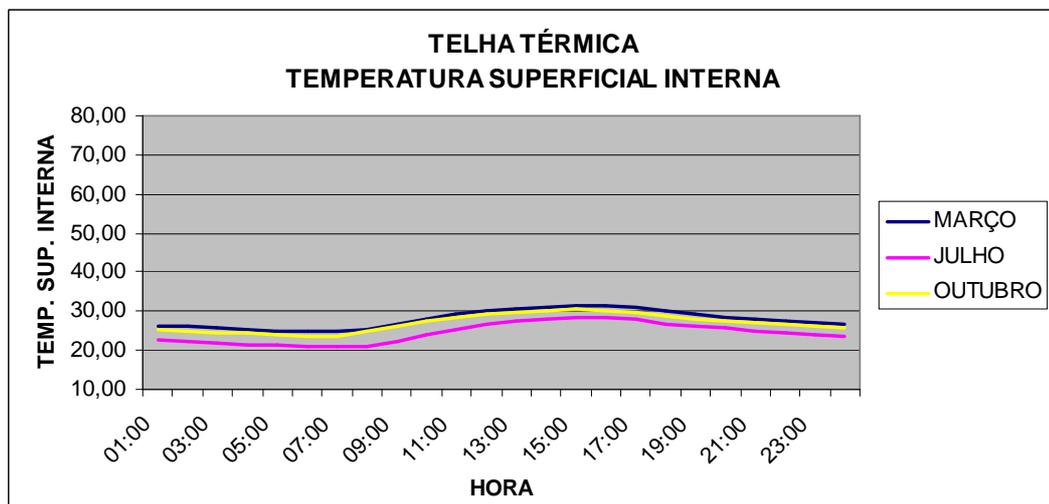


Gráfico 22 - Temperatura superficial interna em °C, para a telha Isolante tipo sanduíche, para os 03 dias de referência avaliados.

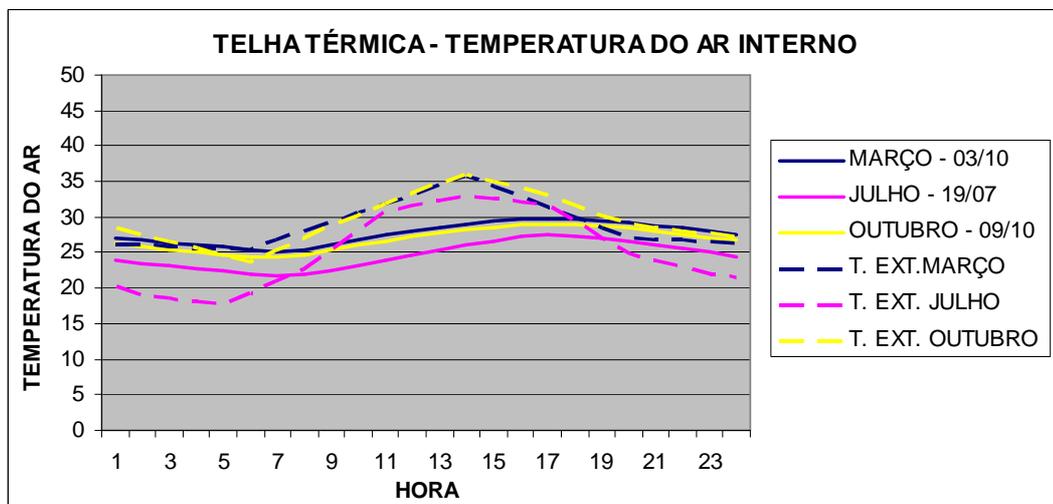


Gráfico 23 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha Isolante tipo sanduíche, para os 03 dias de referência avaliados.

A temperatura superficial externa atinge valores elevados no horário de pico da radiação solar, reduzindo-se significativamente até atingir a superfície interna devido ao isolamento da telha. Os valores da temperatura do ar interno assemelham-se ao da temperatura superficial interna da telha.

b) Telha Asfáltica (C02)

Para a telha asfáltica foram simuladas 04 (quatro) variações: na cor branca, com e sem barreira radiante, e na cor marrom, também nas opções com e sem barreira radiante.

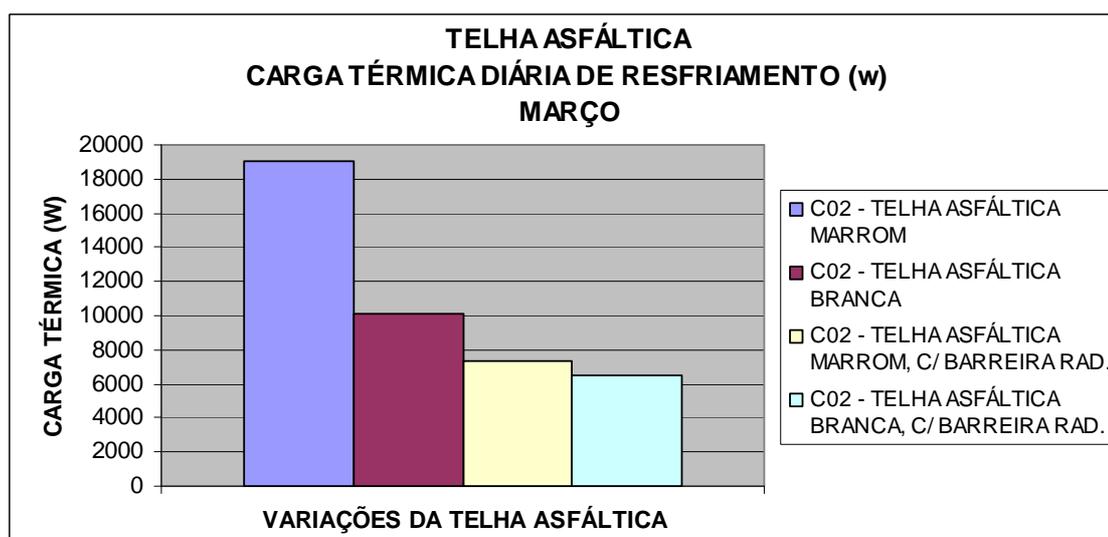


Gráfico 24 - Carga térmica de resfriamento para a telha asfáltica, nas 04 variações, em março (período úmido)

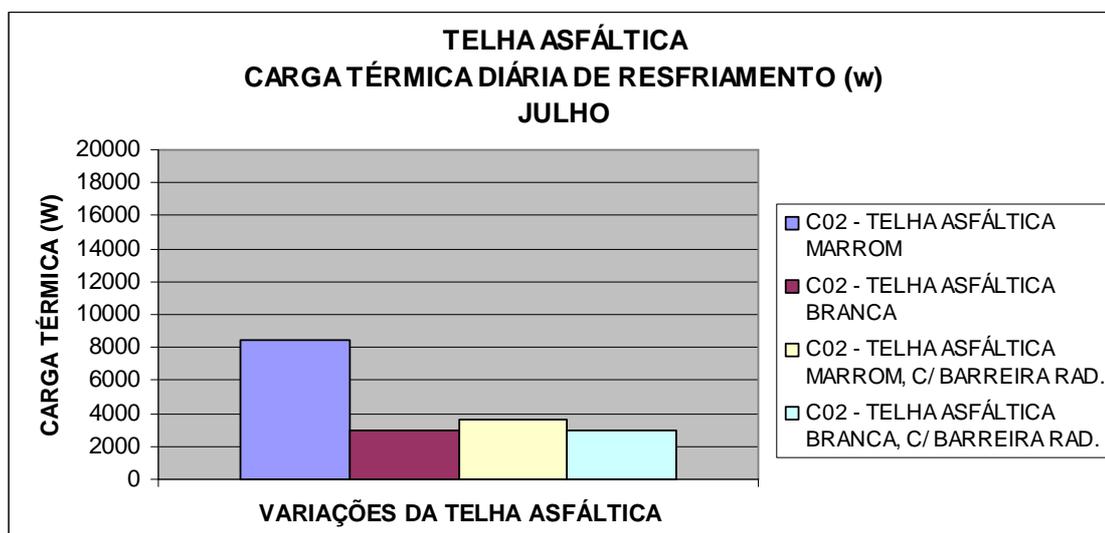


Gráfico 25 - Carga Térmica de resfriamento para a telha asfáltica, nas 04 variações, em julho (período seco)

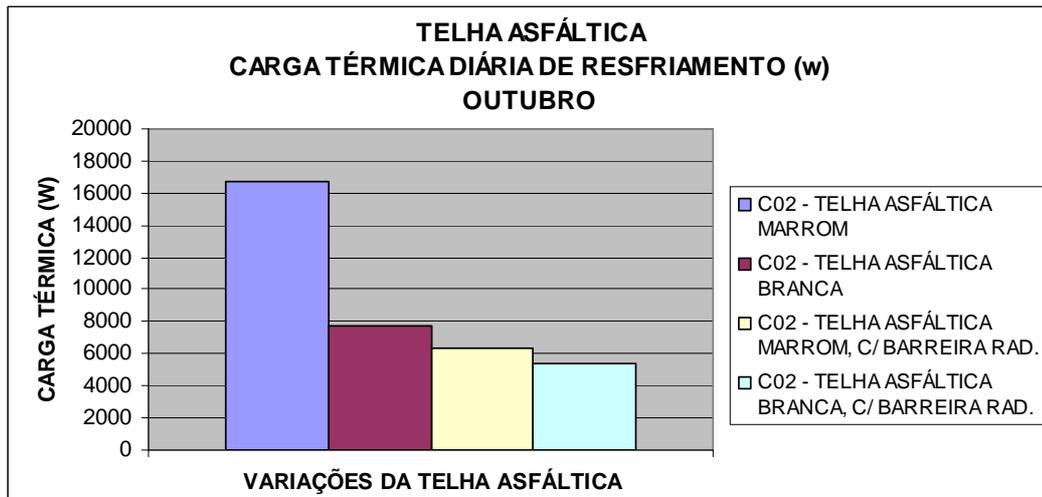


Gráfico 26 - Carga térmica de resfriamento para a telha asfáltica, nas 04 variações, em outubro (período mais quente)

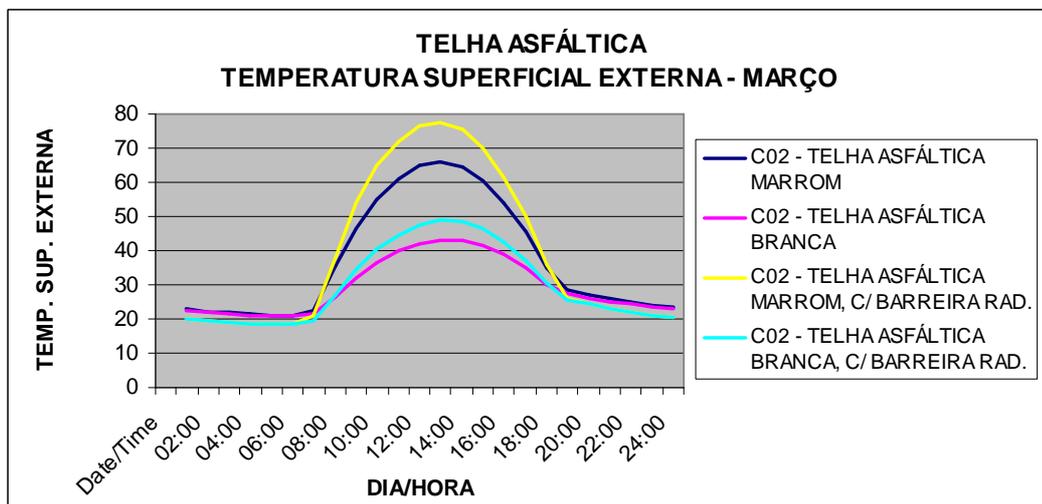


Gráfico 27 - Temperatura superficial externa em °C ,para a telha asfáltica, nas 04 variações, em março (período úmido)

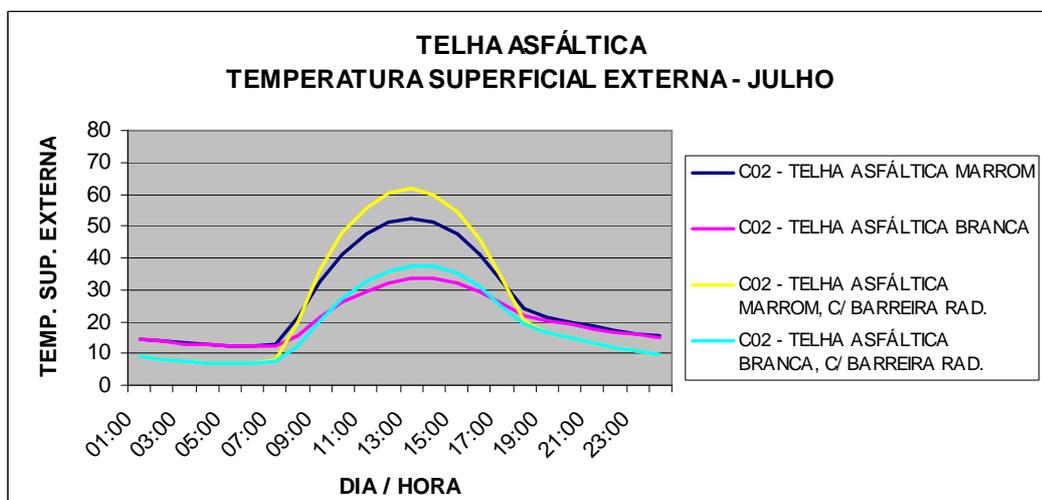


Gráfico 28 - Temperatura superficial externa em °C ,para a telha asfáltica, nas 04 variações, em julho (período seco)

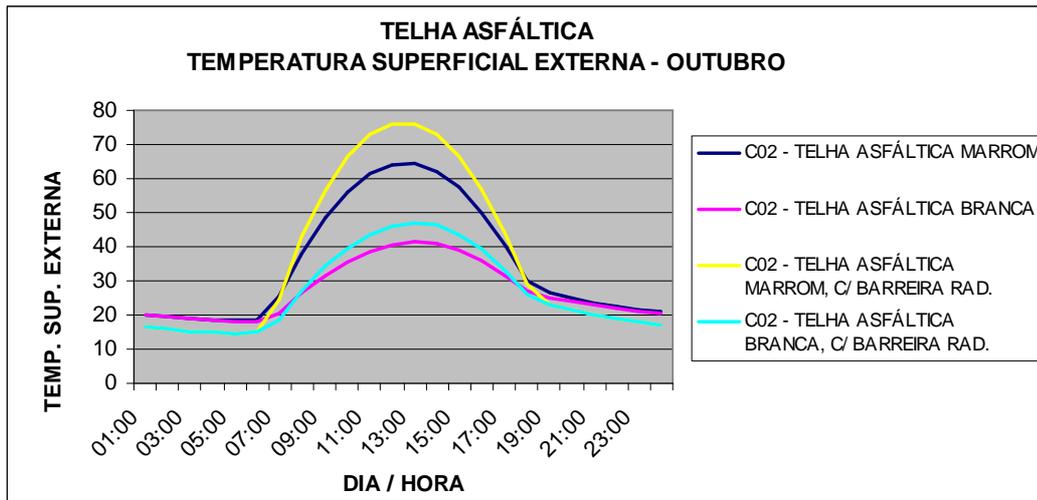


Gráfico 29 - Temperatura superficial externa em °C para a telha asfáltica, nas 04 variações, em outubro (período mais quente)

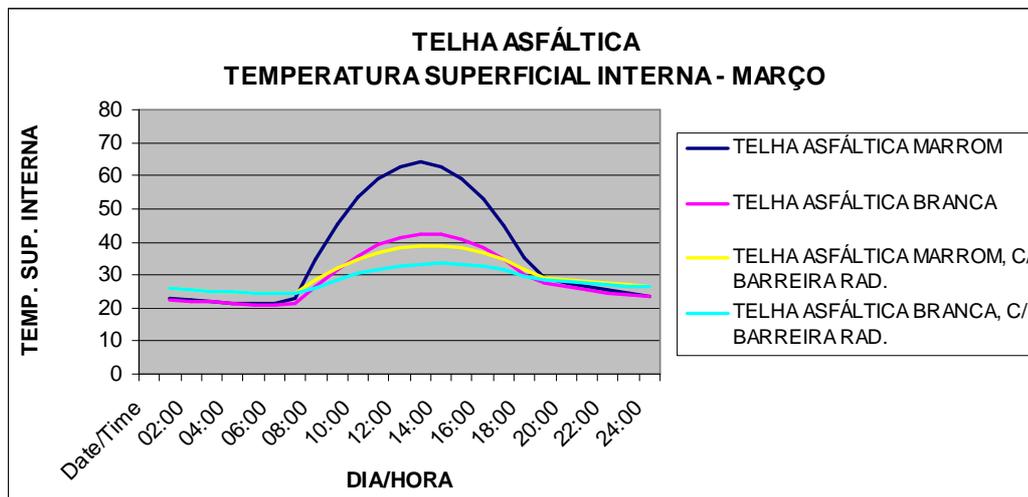


Gráfico 30 - Temperatura superficial interna em °C , para a telha asfáltica, nas 04 variações, em março (período seco)

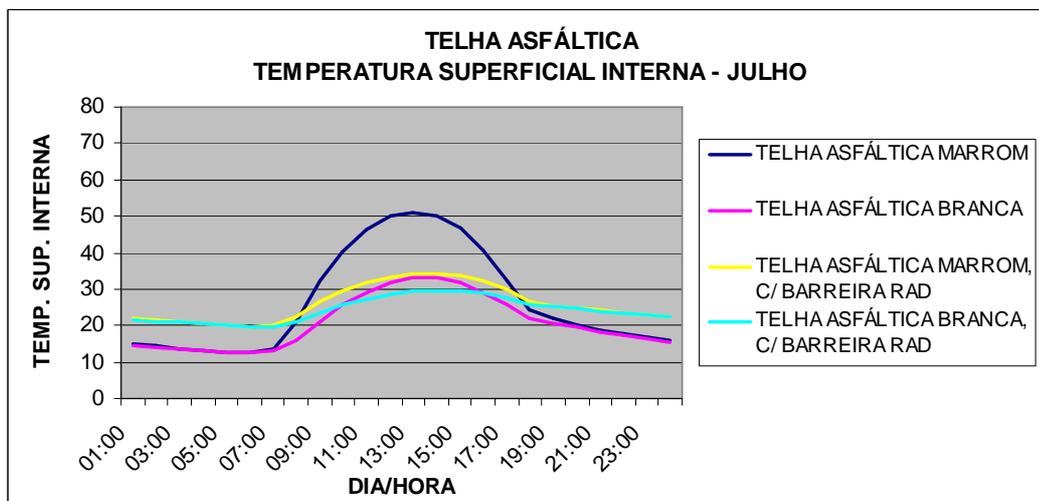


Gráfico 31 - Temperatura superficial interna em °C, para a telha asfáltica, nas 04 variações, em julho (período seco)

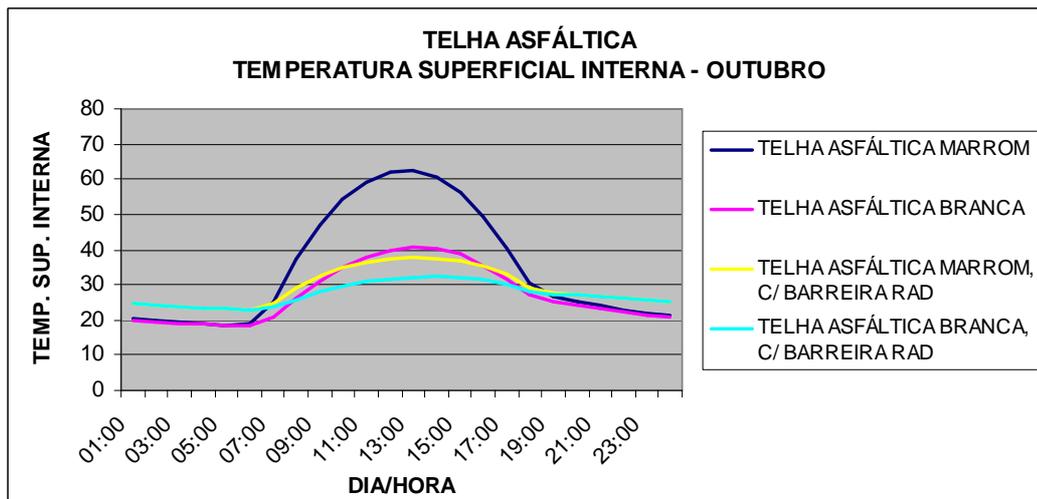


Gráfico 32 - Temperatura superficial interna em °C, para a telha asfáltica, nas 04 variações, em outubro (período mais quente)

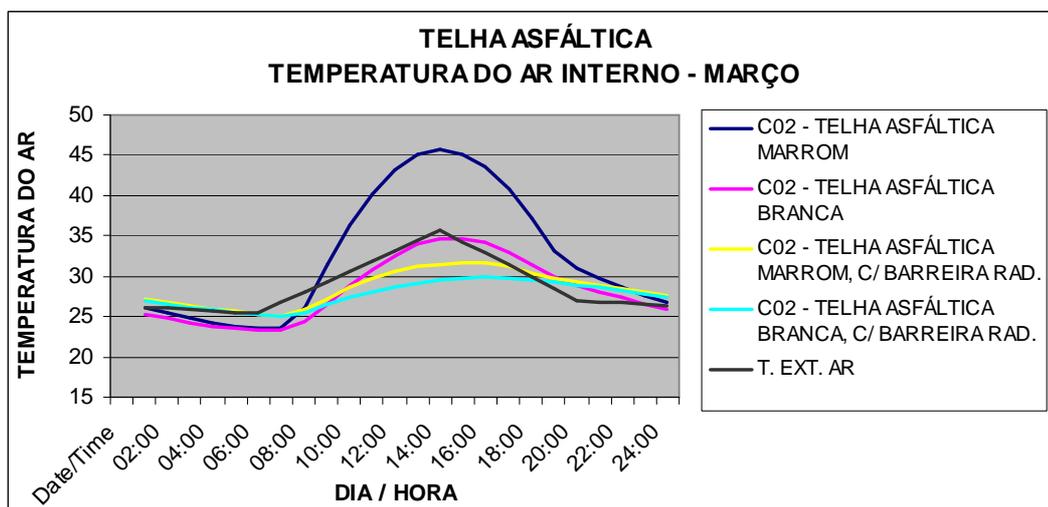


Gráfico 33 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha asfáltica, nas 04 variações, em março (período úmido)

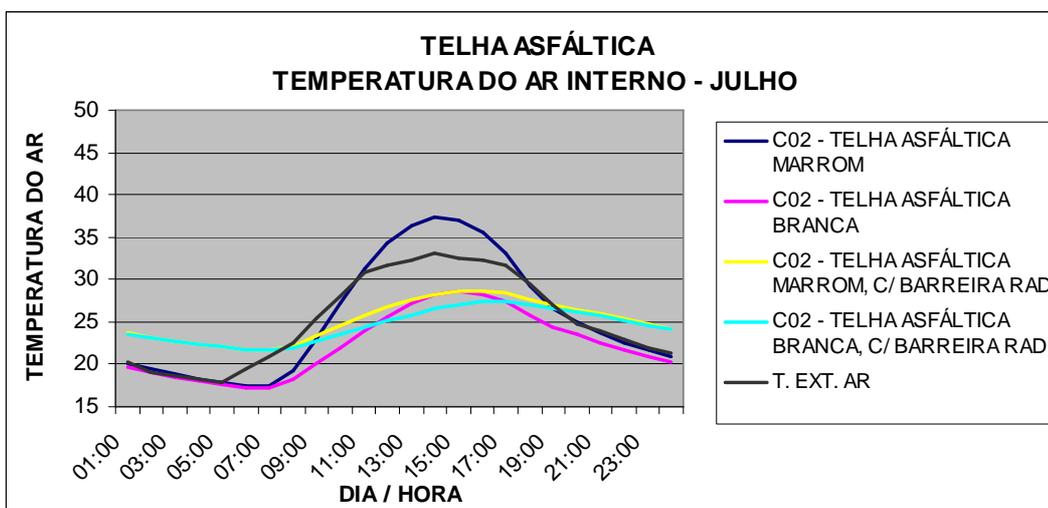


Gráfico 34 – Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha asfáltica, nas 04 variações, em julho (período seco)

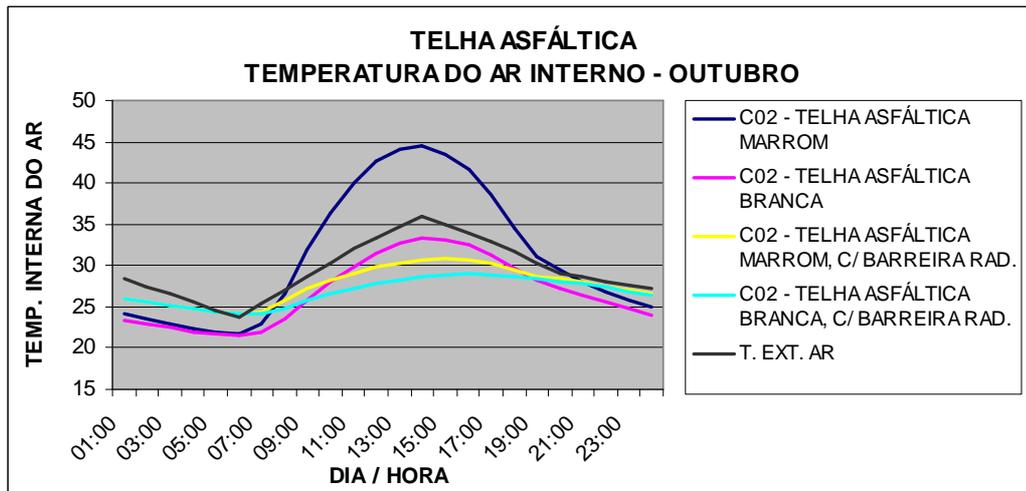


Gráfico 35 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha asfáltica, nas 04 variações, em outubro (período mais quente)

c) Telha de fibras orgânicas vegetais (C03)

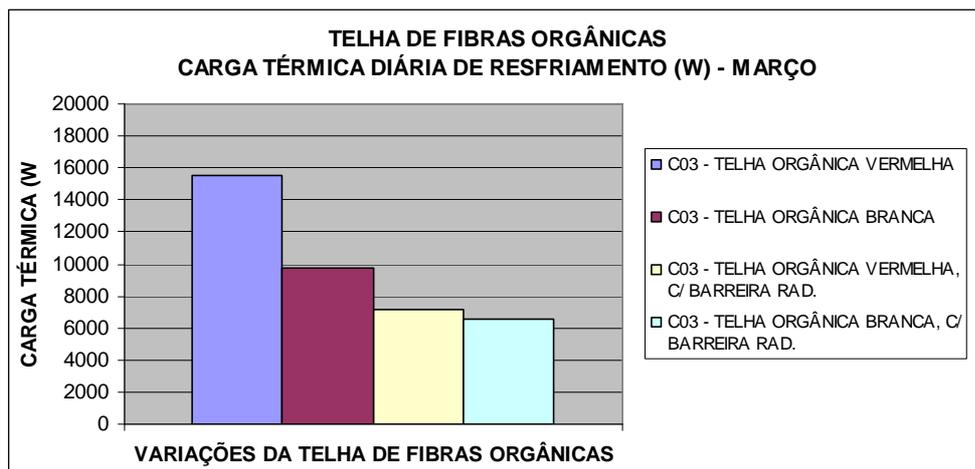


Gráfico 36 - Carga térmica de resfriamento para a telha orgânica, nas 04 variações, em março (período úmido)

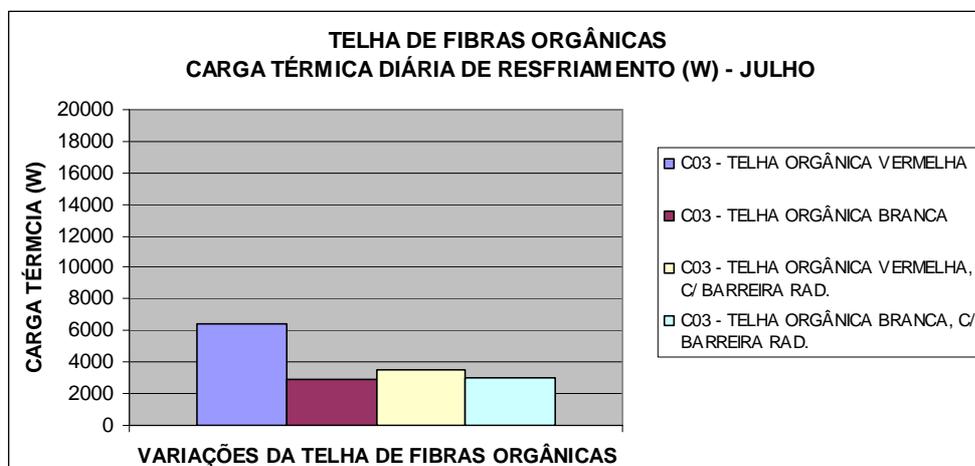


Gráfico 37 - Carga térmica de resfriamento para a telha orgânica, nas 04 variações, em julho (período seco)

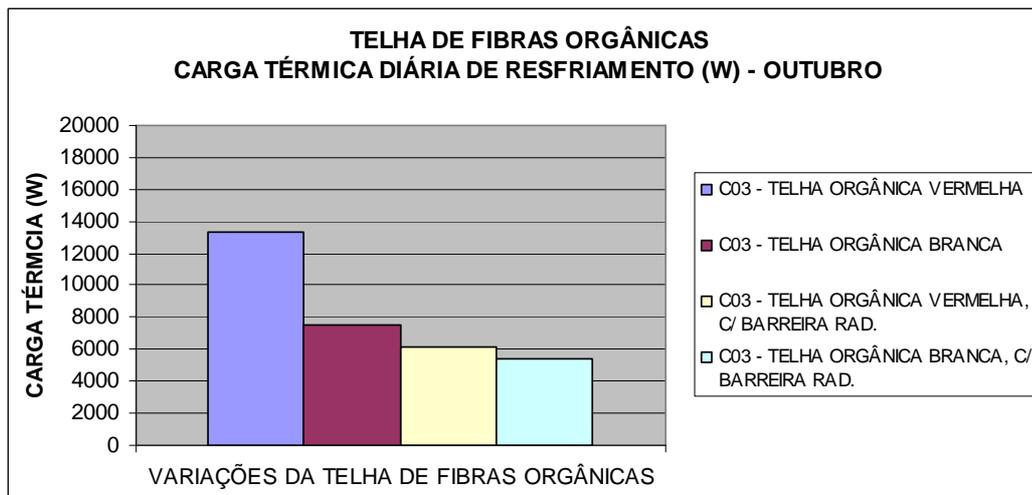


Gráfico 38 - Carga térmica de resfriamento para a telha orgânica, nas 04 variações, em outubro (período mais quente)

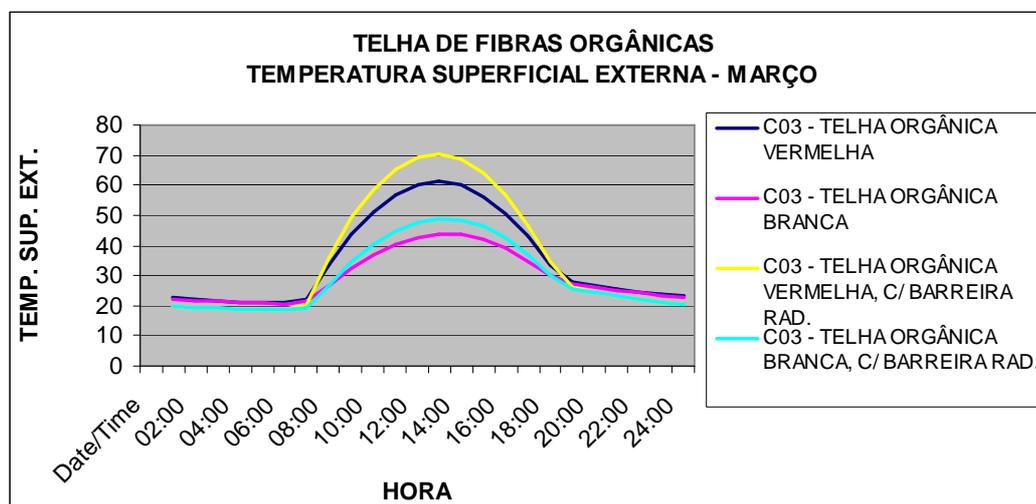


Gráfico 39 - Temperatura superficial externa em °C, para a Telha Orgânica, nas 04 variações, em março (período úmido)

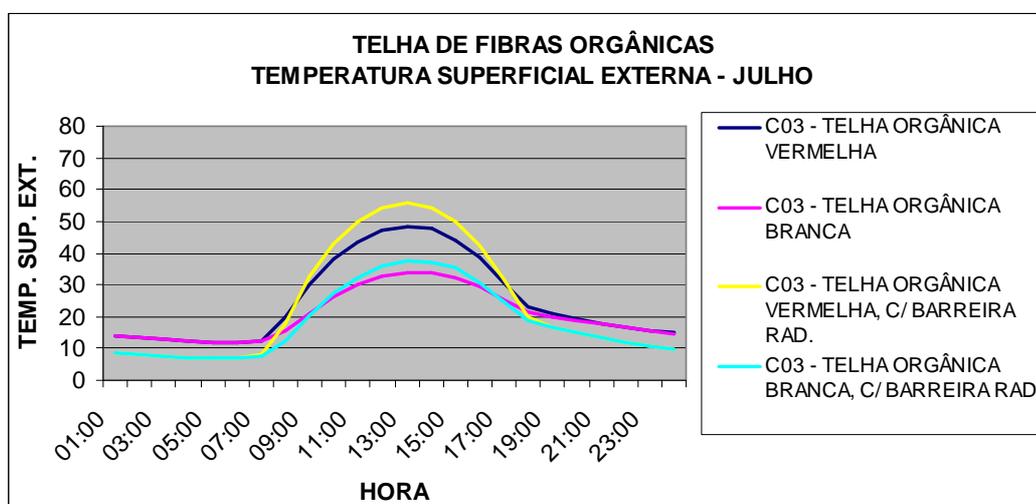


Gráfico 40 - Temperatura superficial externa em °C, para a telha orgânica, nas 04 variações, em julho (período seco)

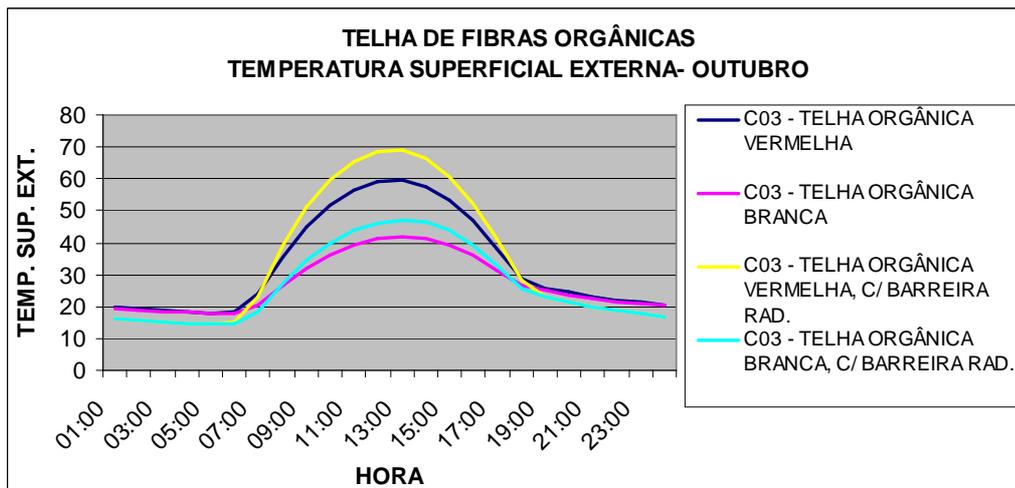


Gráfico 41 - Temperatura superficial externa em °C, para a telha orgânica, nas 04 variações, em outubro (período mais quente)

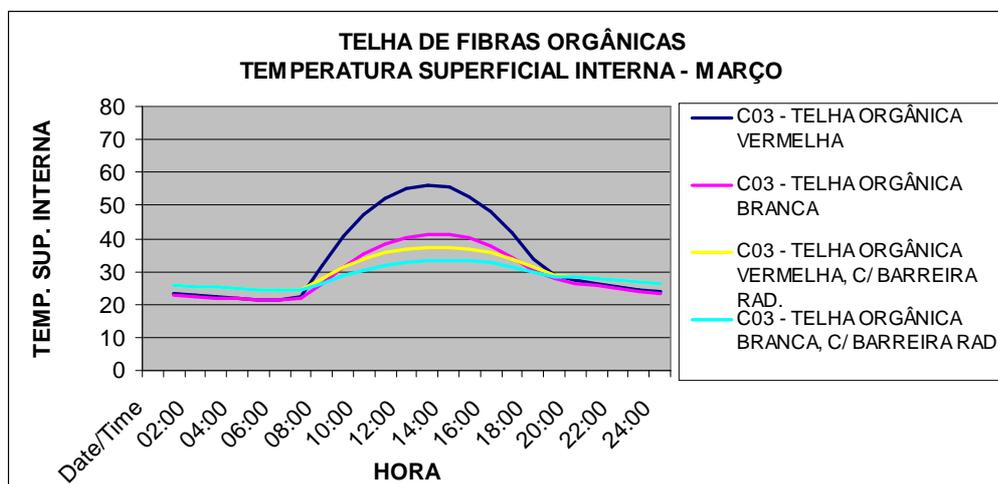


Gráfico 42 - Temperatura superficial interna em °C, para a telha orgânica, nas 04 variações, em março (período seco)

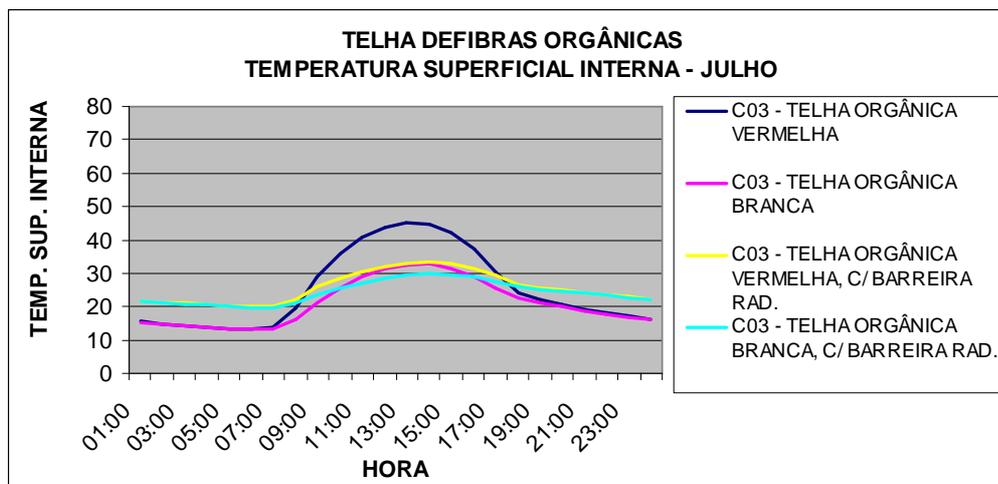


Gráfico 43 - Temperatura superficial interna em °C, para a telha orgânica, nas 04 variações, em julho (período seco)

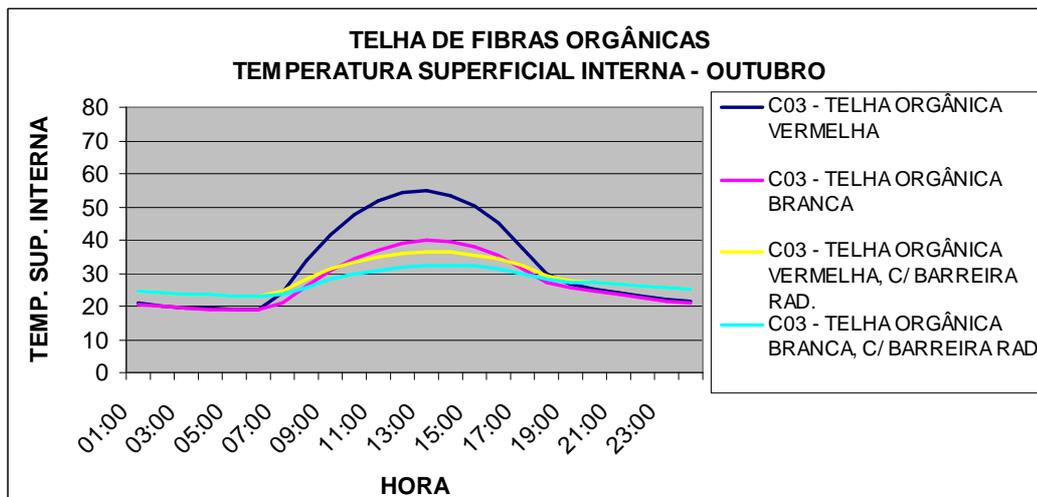


Gráfico 44 - Temperatura superficial interna em °C, para a telha orgânica, nas 04 variações, em outubro (período mais quente)

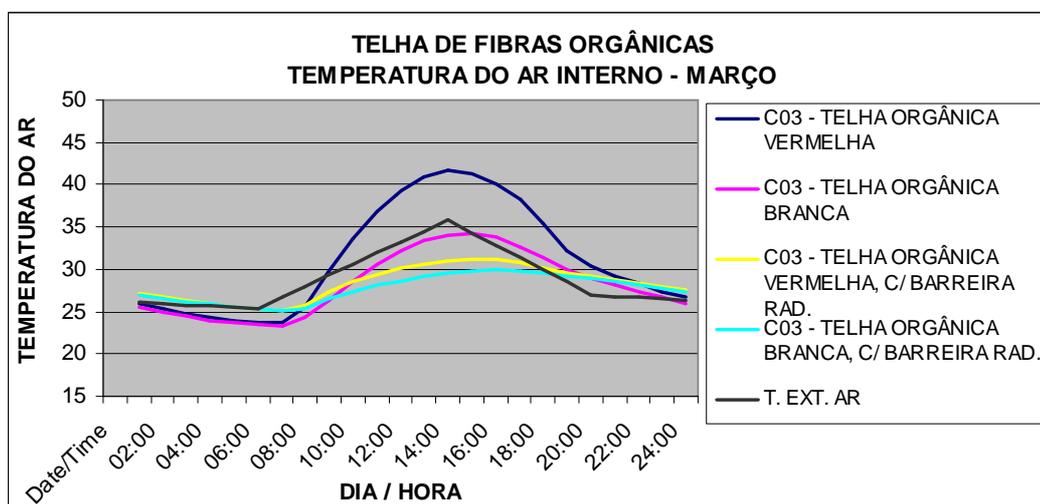


Gráfico 45 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha orgânica, nas 04 variações, em março (período úmido)

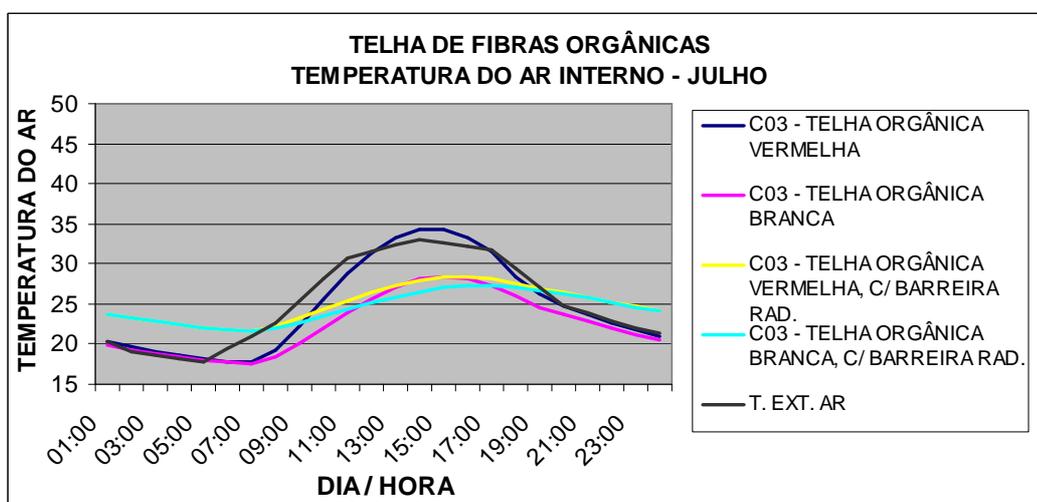


Gráfico 46 - Temperatura do ar interno - tbs em °C, para a telha orgânica, nas 04 variações, em julho (período seco)

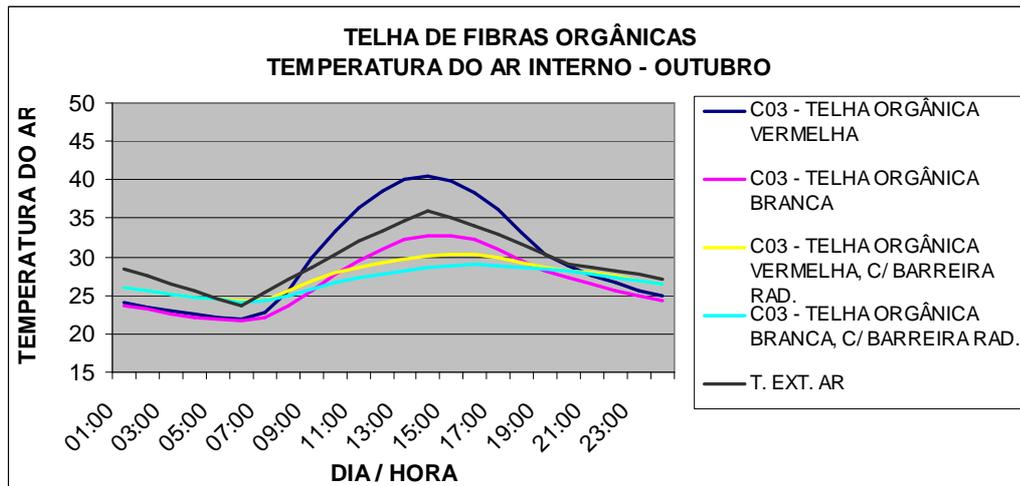


Gráfico 47 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha orgânica, nas 04 variações, em outubro (período mais quente)

d) Telha metálica simples com forro de PVC (C04)

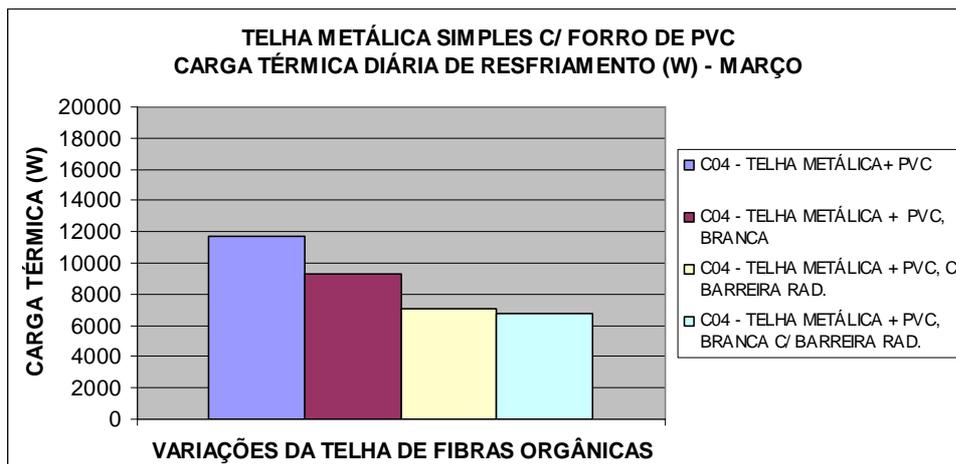


Gráfico 48 - Carga térmica de resfriamento para a telha metálica simples com forro de pvc, nas 04 variações, em março (período úmido)

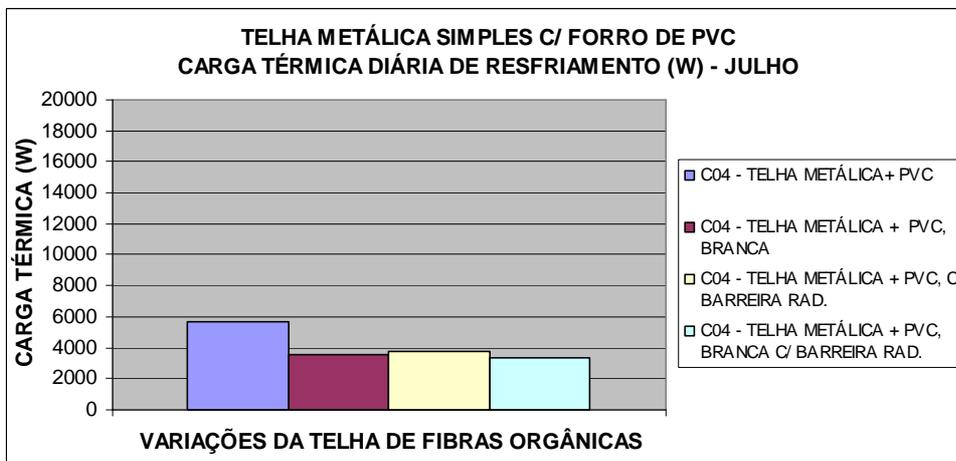


Gráfico 49 - Carga Térmica de resfriamento para a Telha metálica simples com forro de pvc, nas 04 variações, em julho (período seco)

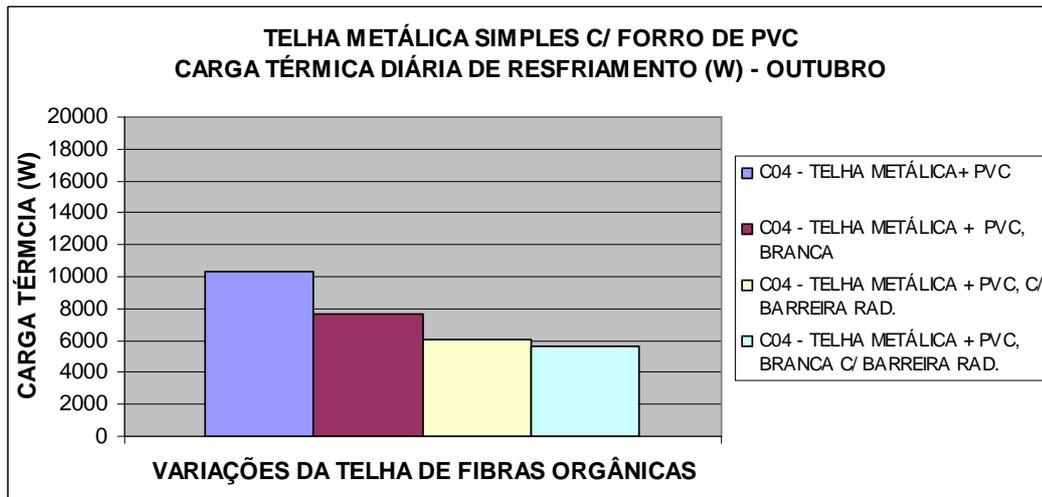


Gráfico 50 - Carga térmica de resfriamento para a telha metálica simples com forro de pvc, nas 04 variações, em outubro (período mais quente)

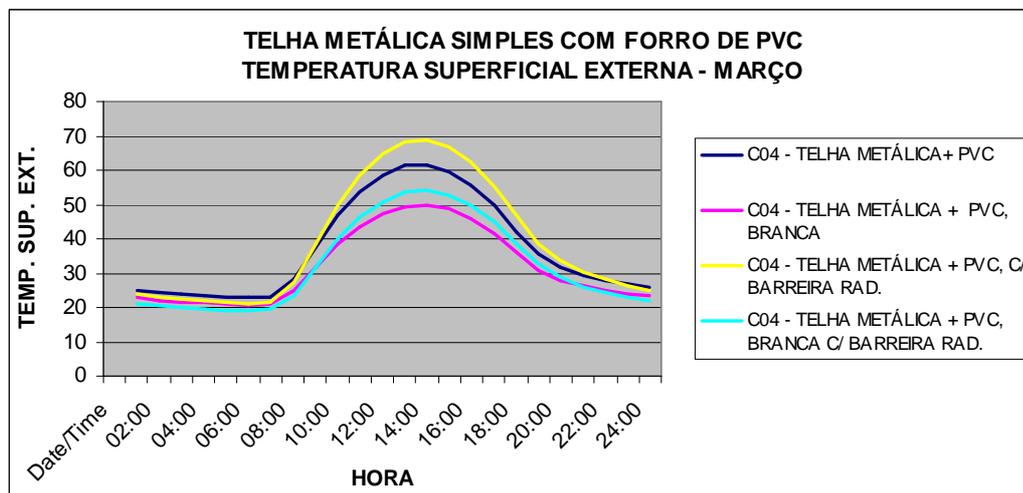


Gráfico 51 - Temperatura superficial externa em °C, para a telha metálica simples com forro de pvc, nas 04 variações, em março (período úmido)

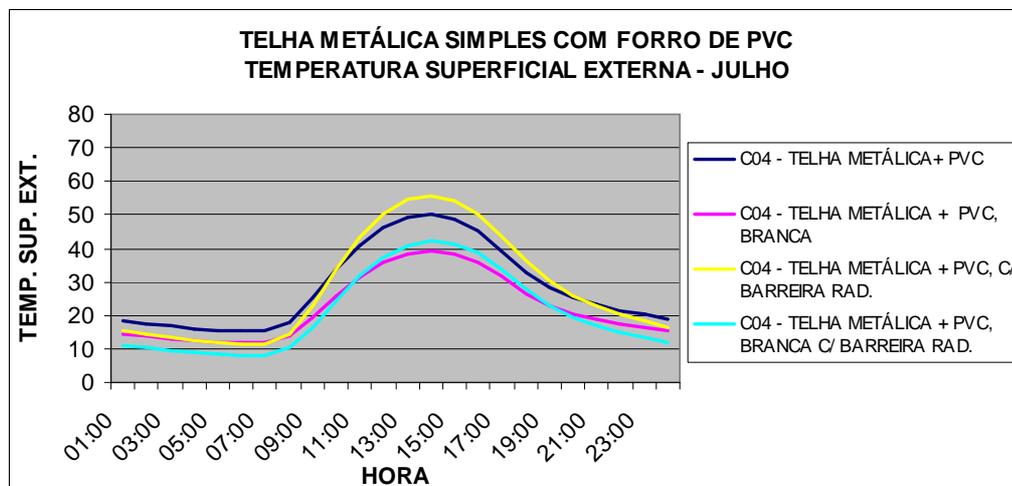


Gráfico 52 - Temperatura superficial externa em °C, para a telha metálica simples com forro de pvc, nas 04 variações, em julho (período seco)

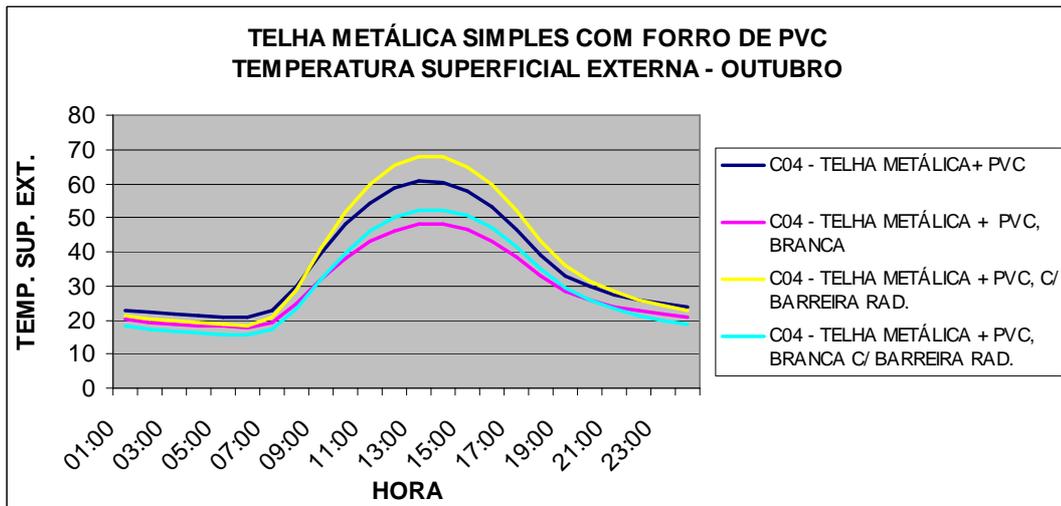


Gráfico 53 - Temperatura superficial externa em °C, para a telha metálica simples com forro de pvc, nas 04 variações, em outubro (período mais quente)

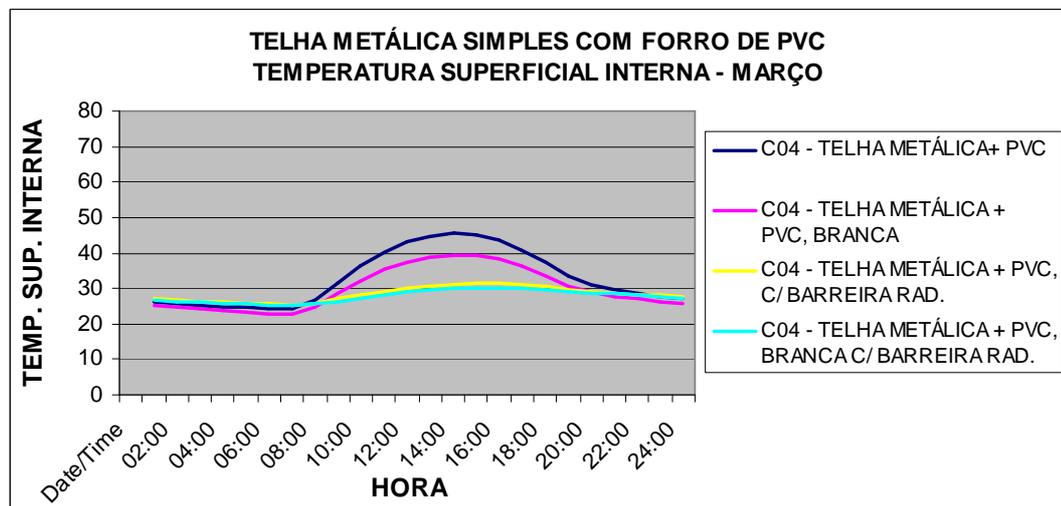


Gráfico 54 - Temperatura superficial interna em °C, para a telha metálica simples com forro de pvc, nas 04 variações, em março (período seco)

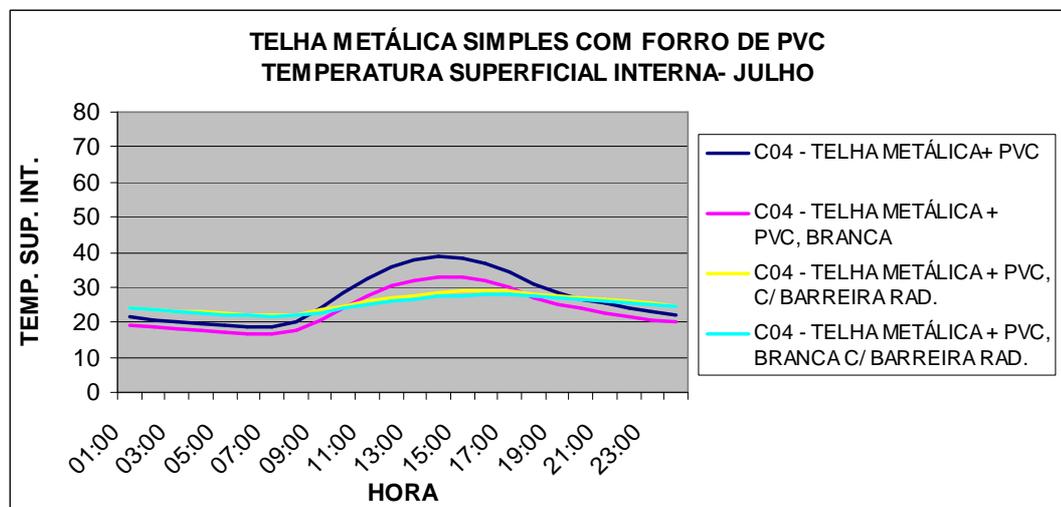


Gráfico 55 - Temperatura superficial interna em °C, para a telha metálica simples com forro de pvc, nas 04 variações, em julho (período seco)

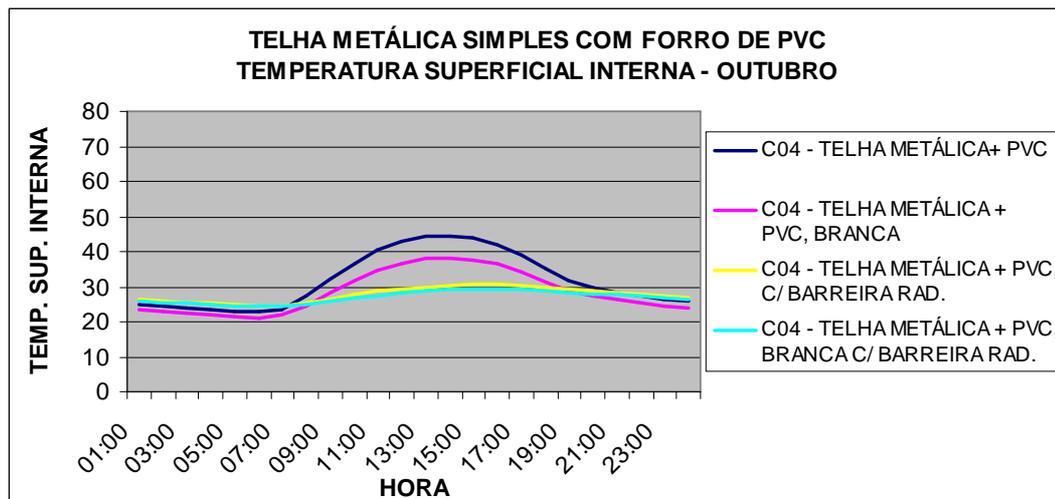


Gráfico 56 - Temperatura superficial interna em °C, para a telha metálica simples com forro de pvc, nas 04 variações, em outubro (período mais quente)

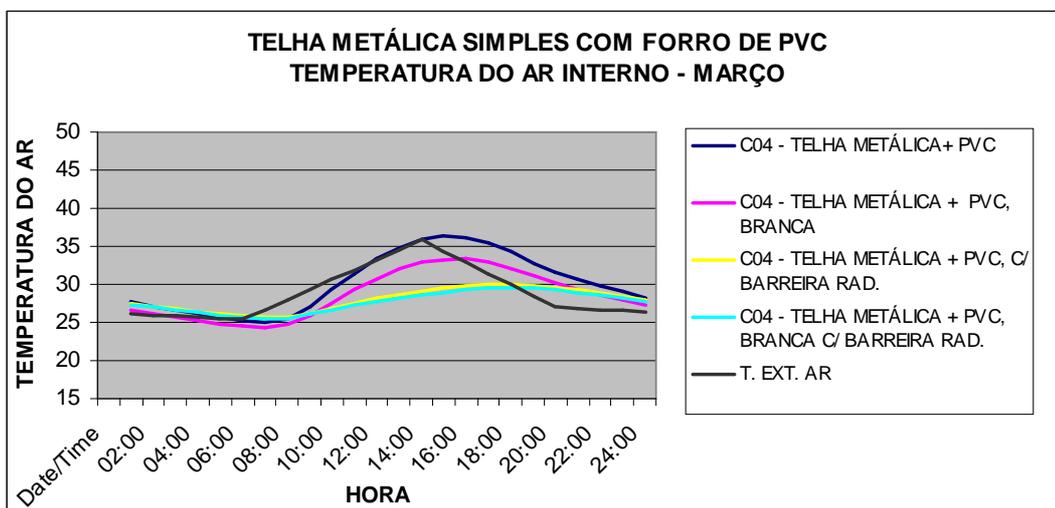


Gráfico 57 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha metálica simples com forro de pvc, nas 04 variações, em março (período úmido)

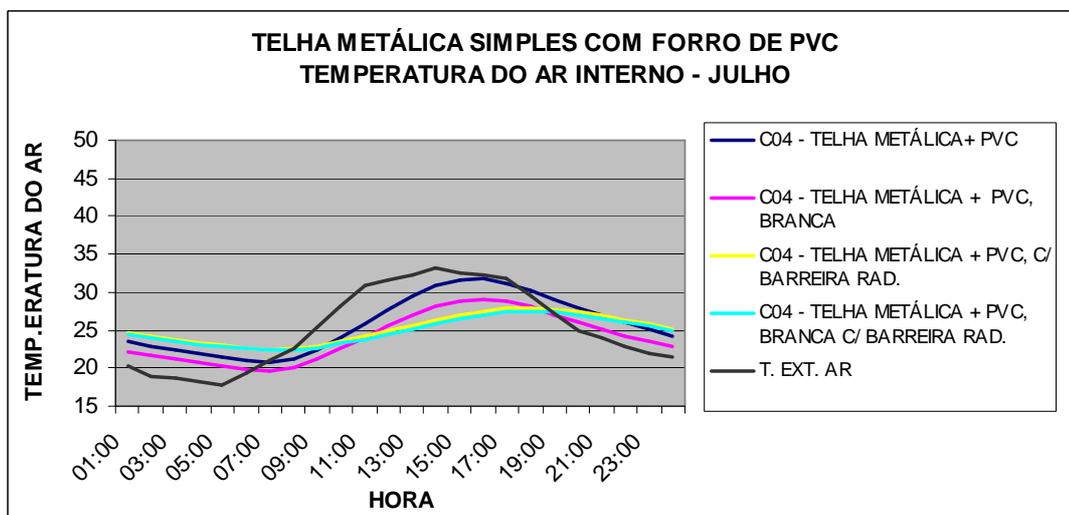


Gráfico 58 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha metálica simples com forro de pvc, nas 04 variações, em julho (período seco)

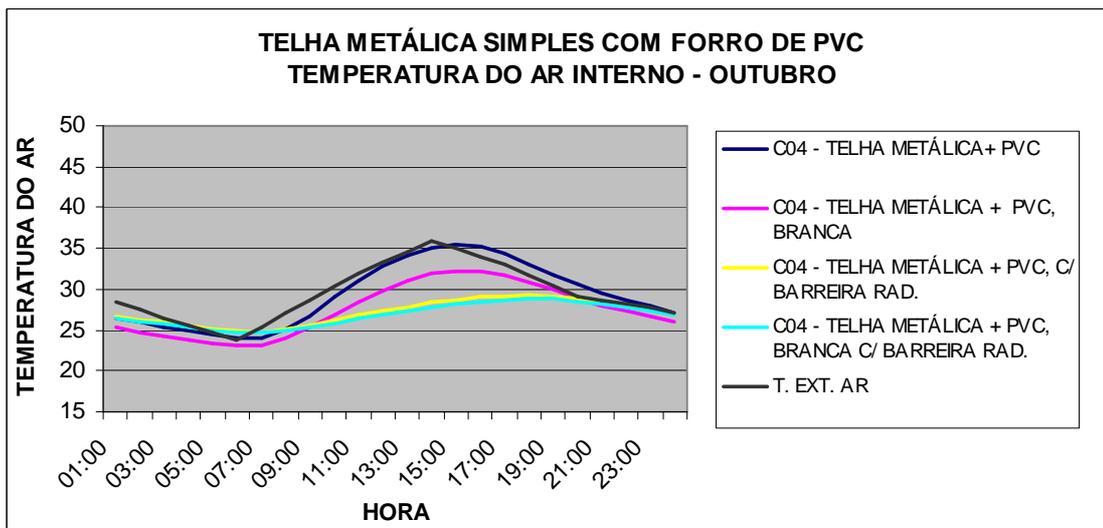


Gráfico 59 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a Telha metálica simples com forro de pvc, nas 04 variações, em outubro (período mais quente)

▪ **Comparação entre todas as tipologias de telhas e suas variações**

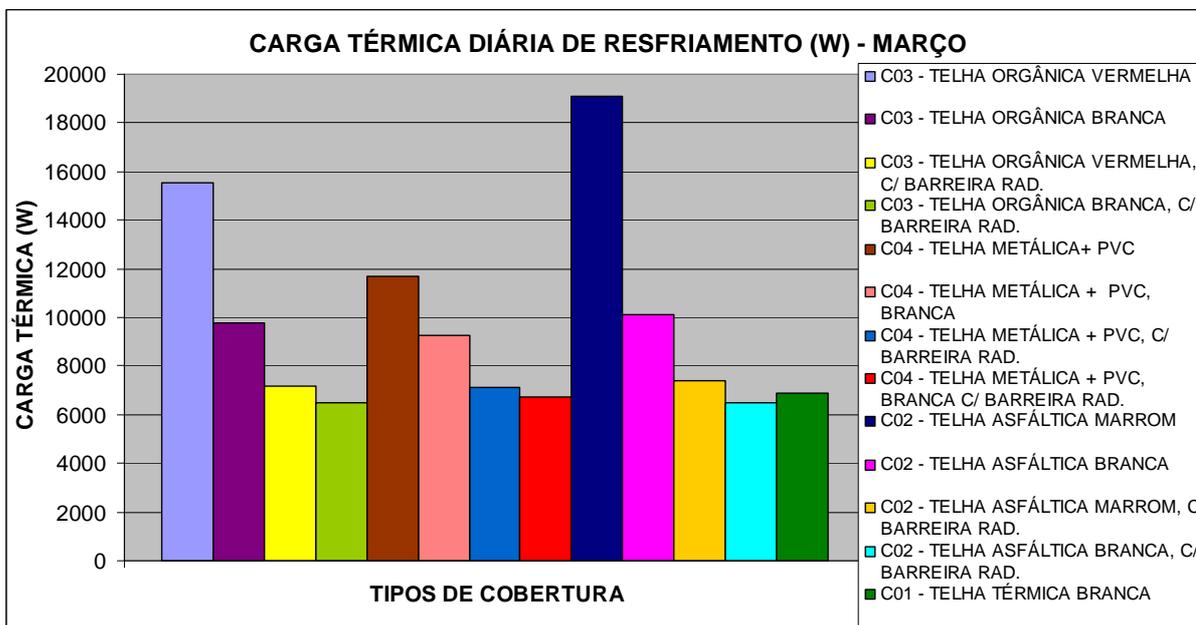


Gráfico 60 - Carga Térmica de resfriamento para todas as tipologias de telhas avaliadas, em março (período úmido)

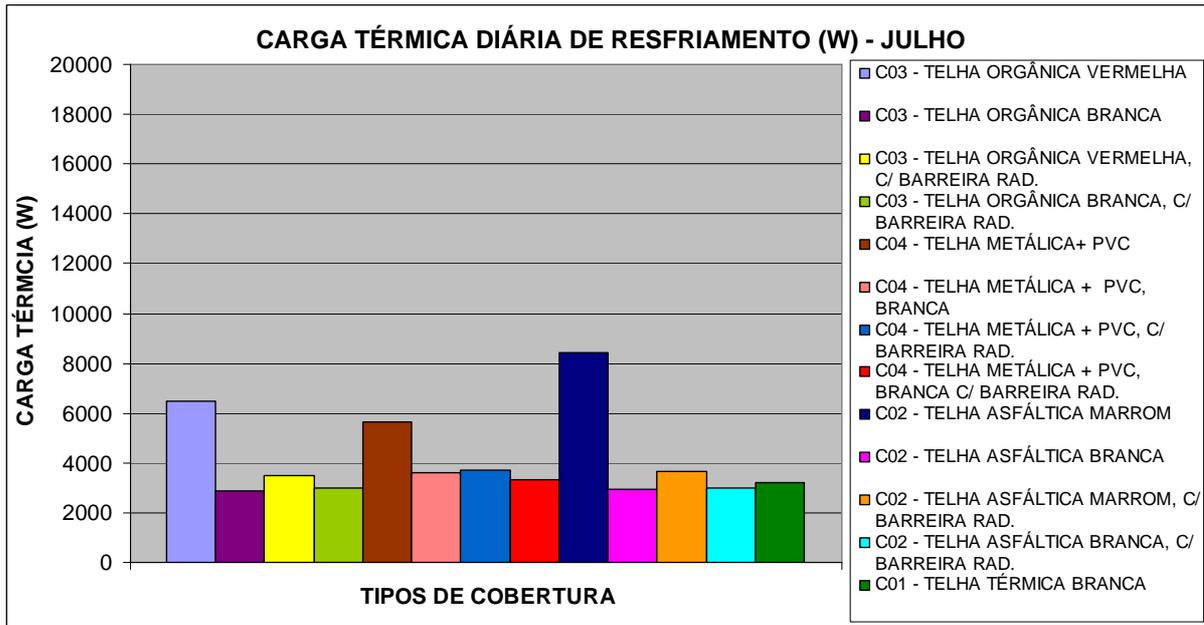


Gráfico 61 - Carga Térmica de resfriamento para todas as tipologias de telhas avaliadas, em julho (período seco)

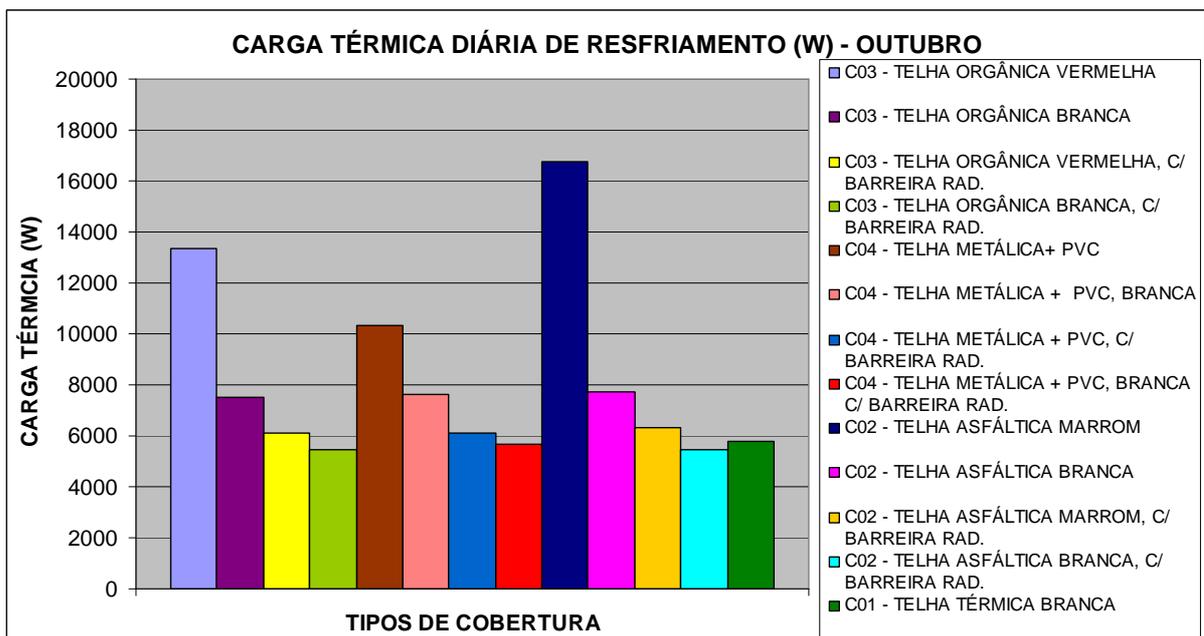


Gráfico 62 - Carga Térmica de resfriamento para todas as tipologias de telhas avaliadas, em outubro (período mais quente)

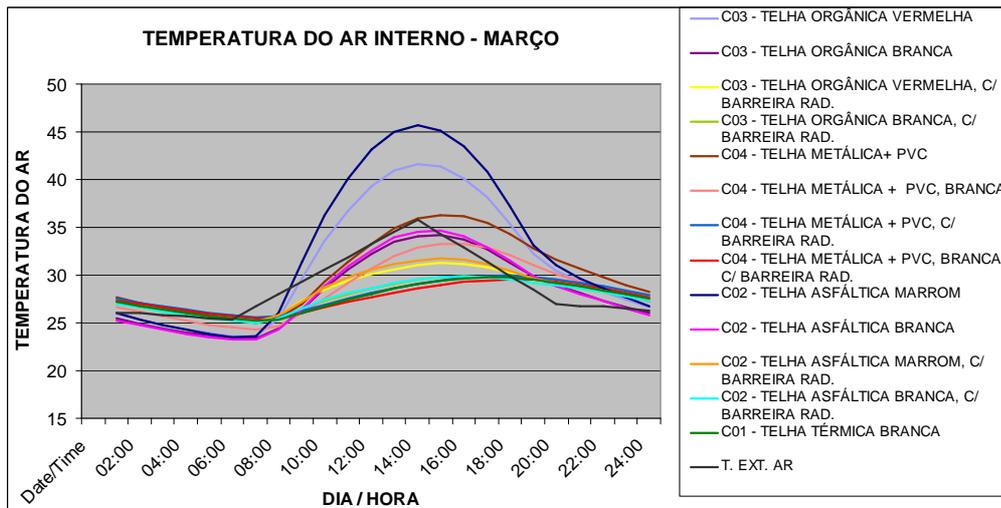


Gráfico 63 - Temperatura do ar interno - tbs em °C, para todas as tipologias de telhas avaliadas, em março (período úmido)

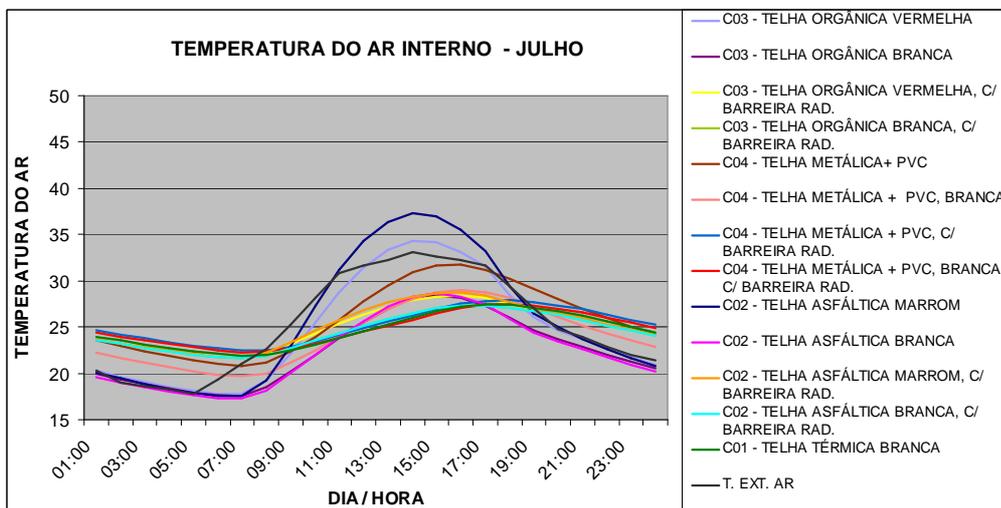


Gráfico 64 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para todas as tipologias de telhas avaliadas, em julho (período seco)

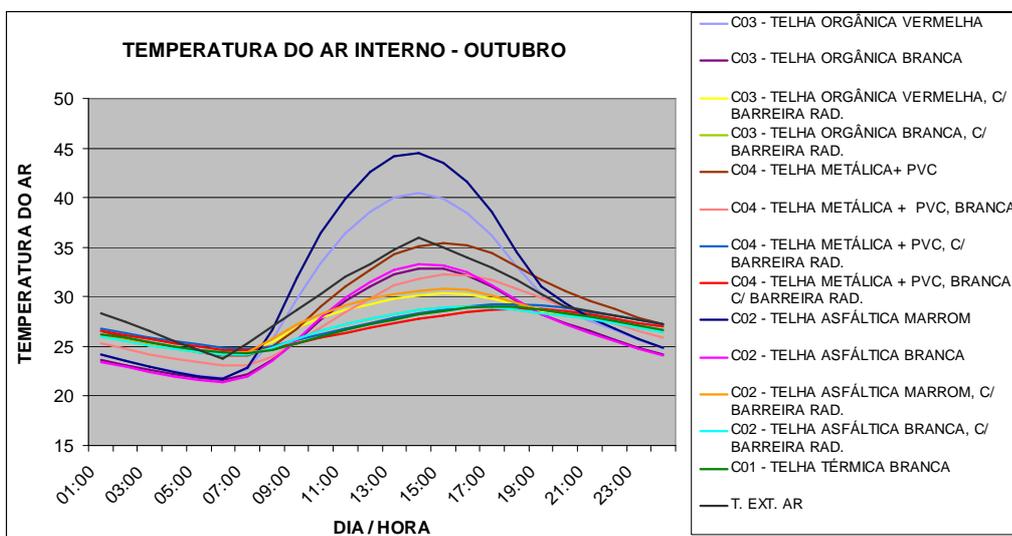


Gráfico 65: Temperatura do ar interno – tbs em °C, para todas as tipologias de telhas avaliadas, em outubro (período mais quente)

Análise da etapa 01

Com base nos resultados apresentados na primeira etapa, conclui-se, conforme esperado, que a cor e o acabamento da superfície exposta são fatores determinantes para o desempenho térmico da envoltória. Percebe-se que em todos os tipos de telhas avaliados, aqueles cuja cor é branca resultaram em menores cargas térmicas de resfriamento e temperaturas internas mais baixas. Quanto mais escura, pior o desempenho da telha. Outro aspecto fundamental relacionado à superfície dos materiais é o tipo de acabamento: as coberturas dotadas de barreira radiante em seu sistema, ou seja, superfícies de alumínio polido (baixa emissividade), também demonstraram melhor desempenho térmico. Porém, o aspecto da emissividade, diferentemente da cor, não diz respeito à superfície externa da cobertura e sim à uma superfície interna protegida das intempéries e do acúmulo de poeira, capaz de reduzir a emissão de ondas longas.

Comparando-se a mesma telha, ora pintada de branco, ora com aplicação da barreira radiante, pode-se afirmar que esta última estratégia apresenta resultados mais satisfatórios, em se tratando da redução da temperatura interna do ar, principalmente para o período de março (quente e úmido) e outubro (mais quente). Em julho, para as telhas escuras, a pintura branca e a aplicação da barreira radiante apresentam resultados semelhantes na redução da temperatura interna. Quando se aplica as duas estratégias combinadas percebe-se ainda uma melhora, porém discreta. Tomando-se o mês de março como referência por apresentar as cargas térmicas mais elevadas, obteve-se os seguintes valores de redução de carga térmica:

- A telha asfáltica marrom, a telha orgânica vermelha e telha metálica com forro de pvc, ao serem pintadas de branco, atingem reduções na carga térmica de 47%, 37% e 21%, respectivamente.
- As mesmas telhas ao receber barreira radiante, permanecendo com a cor escura, atingem reduções mais significativas, de 62%, 54% e 39%, na mesma seqüência.
- Aplicando-se ambas as estratégias, pintura branca e barreira radiante, a melhoria é sutil, obtendo-se um decréscimo a mais na carga térmica de resfriamento, de 4%, 3% e 1% para as telhas asfáltica, orgânica e metálica com forro de pvc, respectivamente. A soma total representa uma redução na temperatura interna do ar de 5 a 10 °C, o que é bastante significativo.
- As melhorias obtidas no desempenho térmico das telhas, por meio da pintura branca e aplicação de barreira radiante, proporcionaram resultados similares ao desempenho alcançado por uma telha isolante do tipo sanduíche na cor branca.
- Quanto ao tipo de telha, analisando-se o comportamento das 04 (quatro) tipologias isoladamente, conclui-se que o sistema composto por uma telha metálica de chapa simples, com forro de PVC e camada de ar entre ambos, apresenta o melhor desempenho, seguido da telha isolante (com valores bastante aproximados à anterior) e por último a telha de fibras

vegetais orgânicas e a telha asfáltica, que também apresentaram resultados semelhantes (quando na mesma cor). Conforme a opção de cor e o uso de barreira radiante, melhora-se o desempenho térmico proporcionalmente.

Para uma melhor compreensão, foi feita uma avaliação quanto ao custo-benefício de cada sistema, comparando-se o custo inicial com a melhoria no desempenho térmico. Assim, foi considerada separadamente a viabilidade de soluções para coberturas existentes e soluções para projetos novos, considerando-se que:

- A tipologia de edificação estudada representa ambientes não climatizados, por isso não se pretende aqui comparar a viabilidade das estratégias passivas de redução da carga térmica em coberturas em relação à climatização artificial, e sim ter parâmetros de custo e de benefício que contribuem para as decisões de projeto. Ainda há de se mencionar que o benefício não compreende somente a viabilidade financeira, mas também benefícios quanto ao conforto e sem falar nas questões energéticas e de impacto ambiental.
- Apesar de se tratar de galpões não climatizados, considerou-se como parâmetro de referência a carga térmica de resfriamento que um sistema de ar condicionado removeria para atingir condições internas de conforto. Para cada um dos sistemas de cobertura, comparou-se o sistema sem nenhum tipo de estratégia com as soluções de pintura branca e/ou aplicação de barreira radiante, relacionando o custo do investimento inicial com a redução (em porcentagem) da carga térmica que a estratégia proporciona. Desta forma, é possível avaliar a viabilidade das estratégias, visando facilitar as decisões de projeto.
- O custo inicial se refere ao material e à mão-de-obra para implantação de cada uma das coberturas, baseados em valores obtidos no mercado local de Cuiabá (MT), em outubro de 2008. O custo da energia se refere à taxa cobrada no estado de Mato Grosso no mesmo período, para instalações comerciais (R\$=0,59/kW).
- A redução da carga térmica se refere ao mês de março. Valores próximos foram obtidos no mês de outubro, enquanto que no mês de julho se obteve reduções mais discretas.

As tabelas seguintes (27 a 29) apresentam o custo inicial e a redução de carga térmica dos sistemas (em porcentagem), considerando-se as medidas corretivas em edificações existentes:

Tabela 27 – Custo-benefício para a Telha asfáltica marrom (M01 – 300m²)

ESTRATÉGIAS DE MELHORIA	CUSTO INICIAL (R\$)	CARGA TÉRMICA MENSAL (kW)	CUSTO MENSAL COM CLIMAT. (R\$)	ECONOMIA (R\$)	RETORNO (meses)	REDUÇÃO CARGA TÉRMICA (%)
COBERTURA REFERÊNCIA	-	418,00	246,62	-	-	-
PINTURA BRANCA	3940,00	220,00	129,80	116,82	34	47
BARREIRA RADIANTE	3300,00	158,40	93,46	153,16	22	62
PINTURA BRANCA E BARREIRA RADIANTE	7240,00	143,00	84,37	162,25	45	66

Tabela 28 – Custo-benefício de intervenções na Telha orgânica vermelha (M01 – 300m²)

ESTRATÉGIAS DE MELHORIA	CUSTO INICIAL (R\$)	CARGA TÉRMICA MENSAL (kW)	CUSTO MENSAL COM CLIMAT. (R\$)	ECONOMIA (R\$)	RETORNO (meses)	REDUÇÃO CARGA TÉRMICA (%)
COBERTURA REFERÊNCIA	-	341,00	201,19	-	-	-
PINTURA BRANCA	3940,00	213,40	125,91	75,28	52	37
BARREIRA RADIANTE	3300,00	158,40	93,46	107,73	31	54
PINTURA BRANCA E BARREIRA RADIANTE	7240,00	147,00	86,73	114,46	63	56

Tabela 29 - Custo-benefício de intervenções na Telha metálica com forro de pvc (M01 – 300m²)

ESTRATÉGIAS DE MELHORIA	CUSTO INICIAL (R\$)	CARGA TÉRMICA MENSAL (kW)	CUSTO MENSAL COM CLIMAT. (R\$)	ECONOMIA (R\$)	RETORNO (meses)	REDUÇÃO CARGA TÉRMICA (%)
COBERTURA REFERÊNCIA	-	255,20	150,57	-	-	-
PINTURA BRANCA	3940,00	200,20	118,12	32,45	121	21
BARREIRA RADIANTE	3300,00	156,20	92,16	58,41	56	39
PINTURA BRANCA E BARREIRA RADIANTE	7240,00	154,00	90,86	59,71	121	40

Percebe-se que a aplicação de barreira radiante, quando aplicada da maneira correta, em todos os tipos de telhas é mais eficiente para a redução da carga térmica e ainda apresenta custos menores em relação à pintura branca. As tabelas demonstram claramente que não há viabilidade financeira em se aplicar as duas técnicas combinadas, pois o custo duplica e o resultado não oferece as melhorias na mesma proporção.

Quanto à manutenção e durabilidade dos materiais, acredita-se que a barreira radiante apresenta ainda

a vantagem de estar protegida das intempéries, diferentemente da pintura branca, que tende a ser deteriorada mais rapidamente.

Considerando-se agora a escolha de um sistema de cobertura para um projeto novo, comparou-se os quatro melhores resultados de desempenho térmico obtidos, relacionando a carga térmica de resfriamento (W) com o custo inicial de cada um:

Tabela 30 - Custo dos materiais e mão-de-obra, para outubro/2008

TIPOS DE COBERTURA		MATERIAL (R\$/m ²)	MÃO-DE-OBRA (R\$/m ²)	QUANT. (m ²)	SUB-TOTAL (R\$)
TELHA TÉRMICA BRANCA		103,95	5,00	300,00	32685,00
TELHA ASFÁLTICA BRANCA C/ BARREIRA RADIANTE	telha (branca de fábrica)	36,66	5,00	300,00	12498,00
	barreira radiante	6,00	5,00	300,00	3300,00
	TOTAL:				15798,00
TELHA ORGÂNICA BRANCA C/ BARREIRA RADIANTE	telha (não tem branca de fábrica)	22,00	5,00	300,00	8100,00
	pintura branca*	1610,00	7,00	300,00	3710,00
	barreira radiante	6,00	5,00	300,00	3300,00
	TOTAL:				15110,00
TELHA METÁLICA + PVC, BRANCA C/ BARREIRA RADIANTE	Telha (branca de fábrica)	43,00	5,00	300,00	14400,00
	forro	30,00	5,00	300,00	10500,00
	barreira radiante	6,00	5,00	300,00	3300,00
	TOTAL:				28200,00

*Considerando: 02 demãos de tinta / 7 Galões de 18l, R\$230,00 cada. Rendimento de 80m² /galão

Tabela 31 – Custo x benefício dos sistemas de cobertura

TIPOS DE COBERTURA	CUSTO INICIAL (R\$)	CARGA TÉRMICA MENSAL (kW)
TELHA TÉRMICA BRANCA	32.685,00	154,00
TELHA ASFÁLTICA BRANCA C/ BARREIRA RADIANTE	15.798,00	154,00
TELHA ORGÂNICA BRANCA C/ BARREIRA RADIANTE	15.110,00	150,70
TELHA METÁLICA + PVC, BRANCA COM BARREIRA RADIANTE	28.200,00	150,70

Obs. O custo inicial foi baseado nos valores da tabela 30

A tabela acima permite uma visualização quanto à carga térmica de resfriamento (W) e a estimativa³⁹ do investimento financeiro necessário para a execução de cada um dos sistemas de cobertura. Considerando que as quatro soluções apresentam desempenhos semelhantes, pode-se afirmar que a telha orgânica na cor branca, com barreira radiante é a opção mais viável, pois apresenta o menor custo de implantação. A telha térmica isolante, apesar de resultar em bom desempenho apresenta custos elevados, assim como a combinação de telha metálica simples com forro de pvc. Contudo, deve ser esclarecido que não foi levada em consideração a durabilidade, manutenção e demais aspectos que podem atribuir valor ao produto, limitando-se somente ao custo-benefício em termos de desempenho térmico.

11.2. Etapa 02

Nesta etapa, avaliaram-se os componentes cujos resultados apresentaram o melhor e pior desempenho na etapa anterior, ou seja, a telha metálica branca (simples) com forro de pvc e a telha asfáltica marrom, respectivamente. O objetivo agora foi avaliar a interferência das fontes internas de calor (ocupação de pessoas, iluminação e equipamentos), da ventilação natural e das dimensões do galpão no desempenho do sistema de cobertura. Somente a temperatura do ar interno – tbs (°C) serviu de parâmetro de comparação entre as diferentes situações avaliadas.

11.2.1. Influência da geometria do edifício

Para avaliar a influência da geometria do edifício, foram simulados outros 02 (dois) modelos, de volume maior, e comparados ao primeiro modelo simulado anteriormente. O objetivo foi avaliar a influência das dimensões do galpão para o desempenho da cobertura e, principalmente, a influência de sua geometria, ou seja, das proporções entre envoltórias verticais e a horizontal. Os dois modelos adicionais apresentam o mesmo volume e demais variáveis idênticas, diferenciando-se somente na geometria, sendo que em um deles a cobertura a superfície de maior exposição, enquanto no outro, as paredes somadas representam a maior parcela de exposição ao meio externo.

³⁹ Estimativa, pois não foi feita uma pesquisa aprofundada de preços e sim um levantamento expedito.

a) Telha asfáltica marrom (piores resultados obtidos)

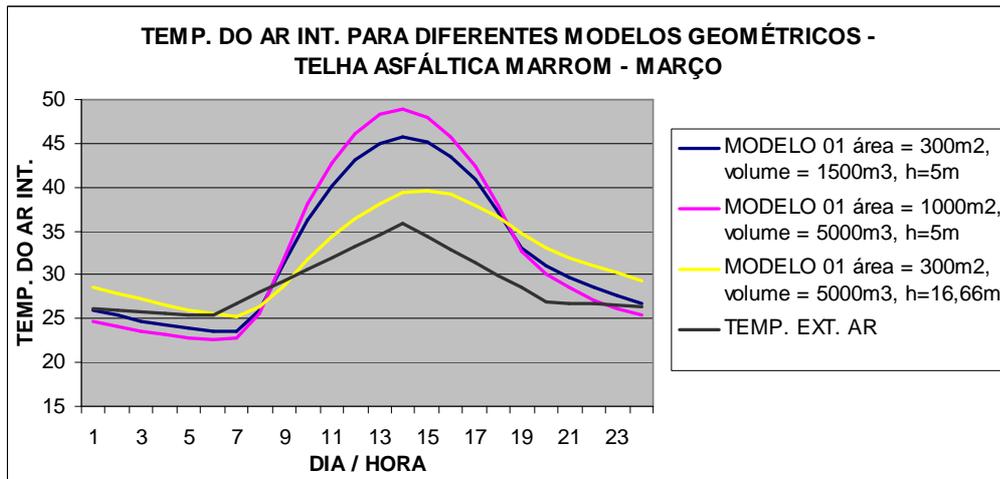


Gráfico 66 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha asfáltica marrom, nos 03 modelos, em março (período úmido)

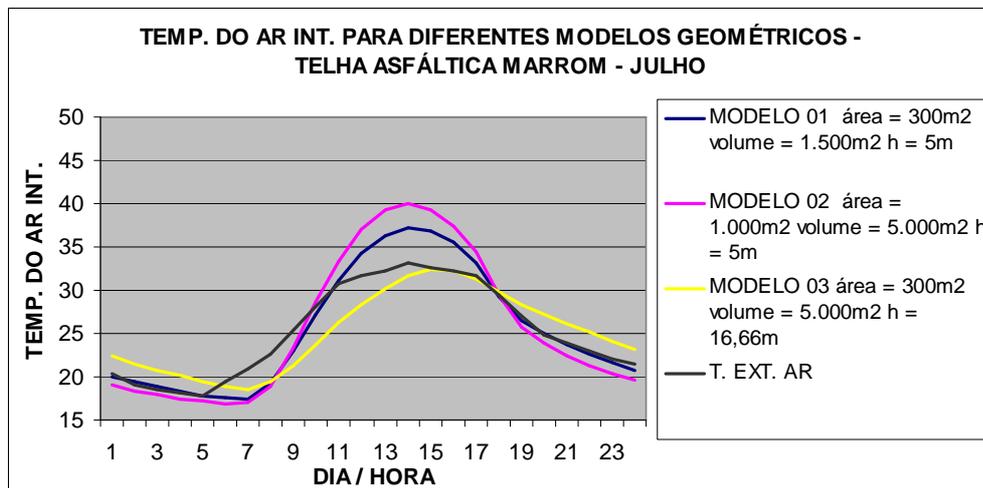


Gráfico 67 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha asfáltica marrom, nos 03 modelos, em julho (período seco)

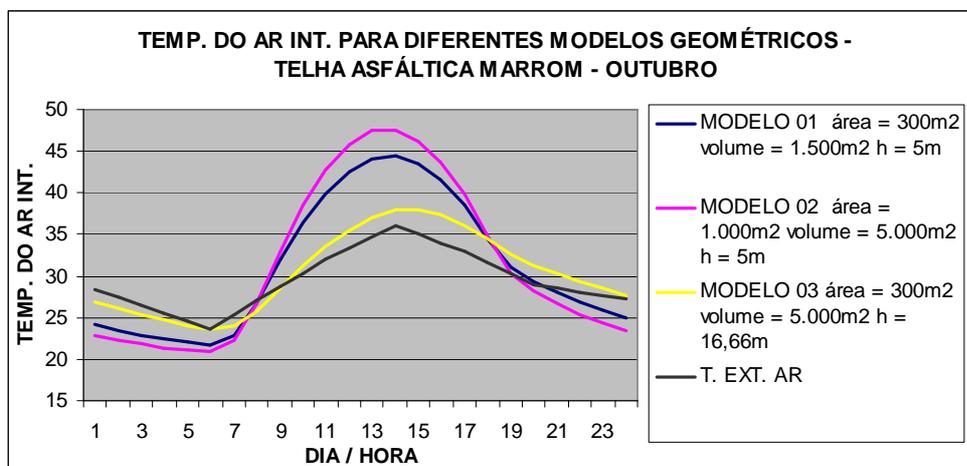


Gráfico 68 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha asfáltica marrom, nos 03 modelos, em outubro (período mais quente)

b) Telha metálica branca com forro de pvc (melhor resultado obtido)

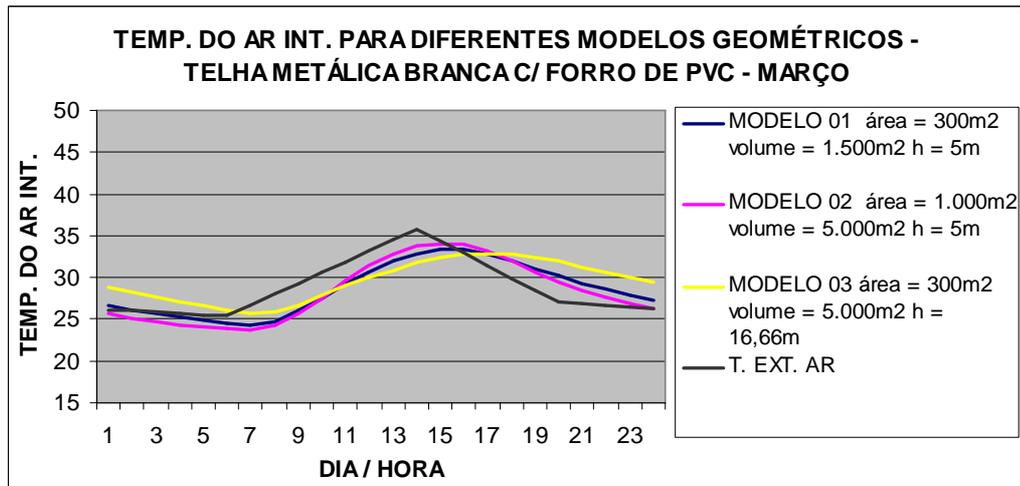


Gráfico 69 - Temperatura do a interno – tbs em °C, para a telha metálica branca com forro de pvc, nos 03 modelos, em março (período úmido)

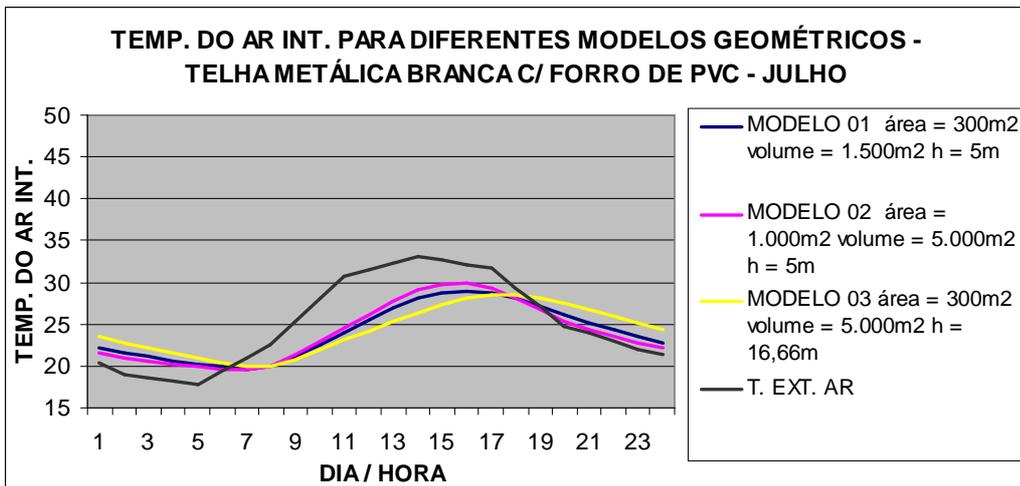


Gráfico 70 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha metálica branca com forro de pvc, nos 03 modelos, em julho (período seco)

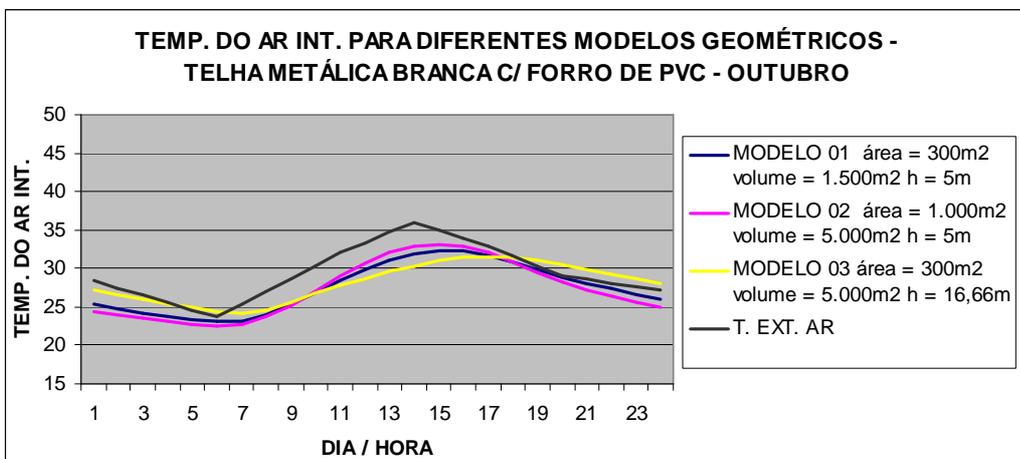


Gráfico 71 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha metálica branca com forro de pvc, nos 03 modelos, em outubro (período mais quente)

▪ Análise quanto à geometria

As simulações acima demonstraram que o modelo 02, cuja área de cobertura é significativamente maior que a do modelo 03, em todos os casos avaliados apresentou temperaturas do ar interno mais elevadas, comprovando o quanto a cobertura é responsável pelo desempenho térmico do edifício. As diferenças são mais notórias para a telha asfáltica marrom que apresenta um menor isolamento térmico e maior absorção de calor em relação à cobertura dotada de telha metálica, camada de ar e forro de pvc. Conclui-se, então, que a geometria do modelo é determinante para o desempenho térmico dos galpões, assim como a dimensão também, porém, em menor proporção. Em outras palavras, pode-se afirmar que modelos que apresentam a mesma proporção geométrica (fator de forma), porém, com dimensões proporcionalmente diferentes, assim como os modelos 01 e 02, apresentam desempenhos diferentes, sendo maior a temperatura naqueles cuja área de cobertura é maior. Contudo, quando se têm proporções diferentes, em volumes iguais, maior ainda é a diferença das temperaturas internas obtidas, sendo maior quanto maior a área de cobertura em relação às demais vedações.

11.2.2. Influência da carga interna

Com o intuito de se avaliar a influência da carga interna de pessoas, equipamentos e iluminação na temperatura interna do ambiente, simulou-se o modelo 01, variando as opções de carga interna: uma sendo consideravelmente elevada ($270,5 \text{ W/m}^2$) e a outra mais baixa (161 W/m^2), ambas definidas a partir de referências de cargas internas de escritórios.

a) Telha asfáltica marrom (piores resultados obtidos)

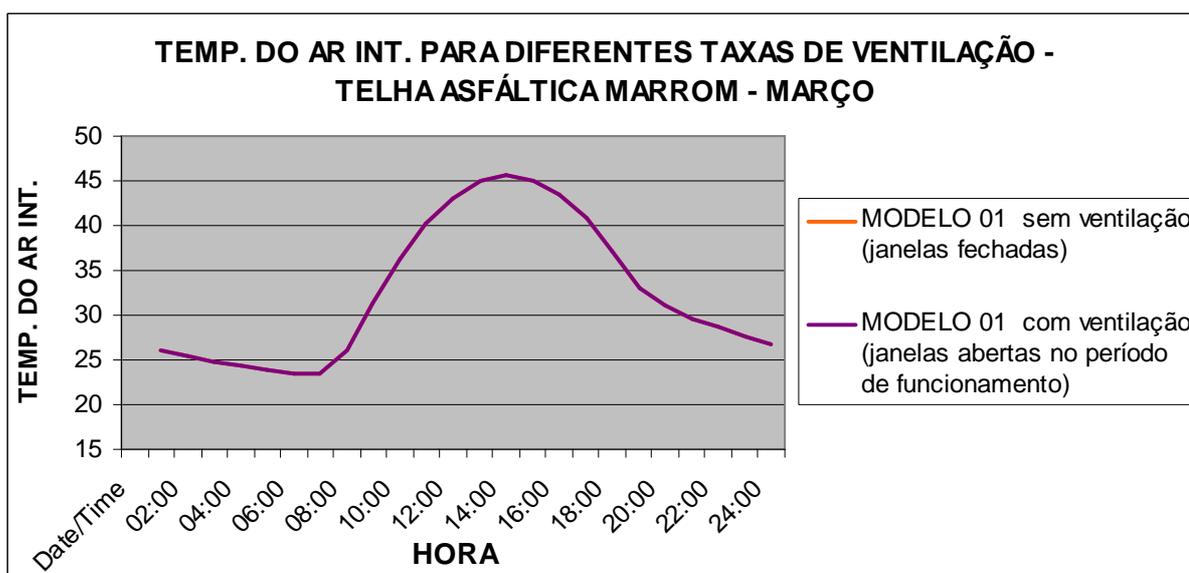


Gráfico 72 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha asfáltica marrom, no modelo 01, em março (período úmido)

b) Telha metálica branca com forro de pvc (melhor resultado obtido)

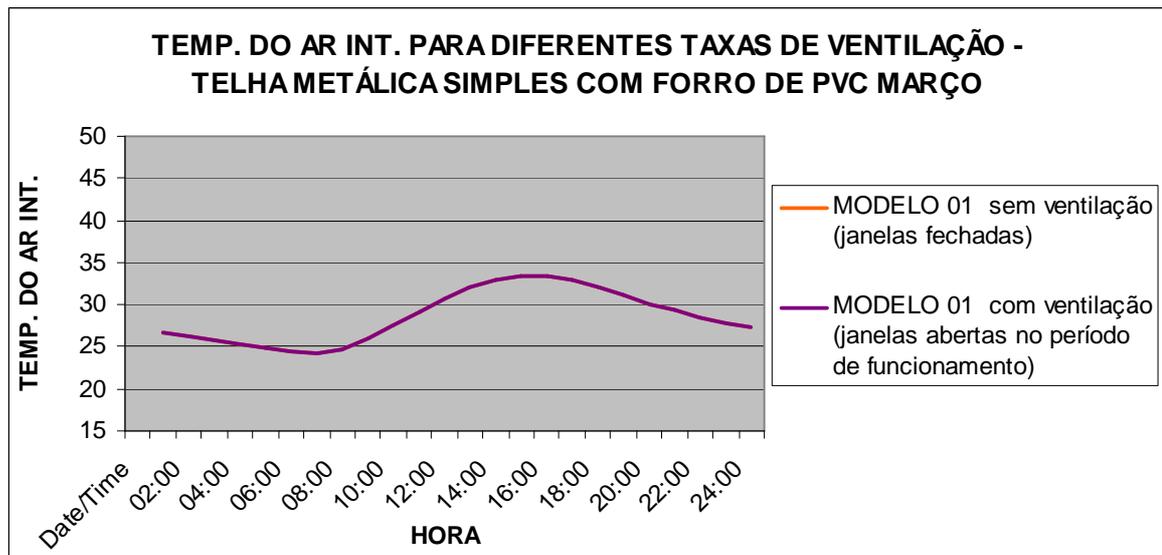


Gráfico 73 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha metálica branca com forro de pvc, no modelo 01, em março (período úmido)

Para ambas as telhas as curvas de temperatura do ar interno apresentaram o mesmo comportamento também em julho e outubro, sem variações entre as cargas internas.

▪ **Análise quanto à carga interna**

Nos dois casos acima a carga interna não influenciou na temperatura interna obtida, demonstrando que a carga térmica proveniente da cobertura é significativamente maior que as cargas produzidas internamente por pessoas, equipamentos e iluminação. Esta avaliação é importante, pois deve-se conhecer a principal fonte de calor do ambiente para que soluções adequadas sejam buscadas como medidas corretivas ou preventivas. Em determinadas situações, a carga interna pode ser superior à carga proveniente da cobertura, ainda que esta seja uma grande fonte de calor. Neste caso, o isolamento ou demais estratégias de atenuação da carga térmica proveniente da cobertura não resolvem o problema de desconforto do ambiente, e ainda podem prejudicá-lo, pois dificultam a dissipação do calor interno.

11.2.3. Influência da ventilação natural

No caso dos modelos avaliados não houve um planejamento voltado para a otimização da ventilação natural. As aberturas foram dispostas aleatoriamente, conforme se identificou nos galpões mais representativos da cidade estudada e, de uma maneira geral, são inadequadas e insuficientes para proporcionar condições aceitáveis de conforto. Nesta parte da experiência, simulou-se o modelo 01 (um) para as duas telhas acima mencionadas, a de melhor e a de pior desempenho, variando a opção de ventilação natural, ora com a abertura das portas e janelas no horário de funcionamento do galpão comercial, ora sem aberturas.

a) Telha asfáltica marrom (piores resultados obtidos)

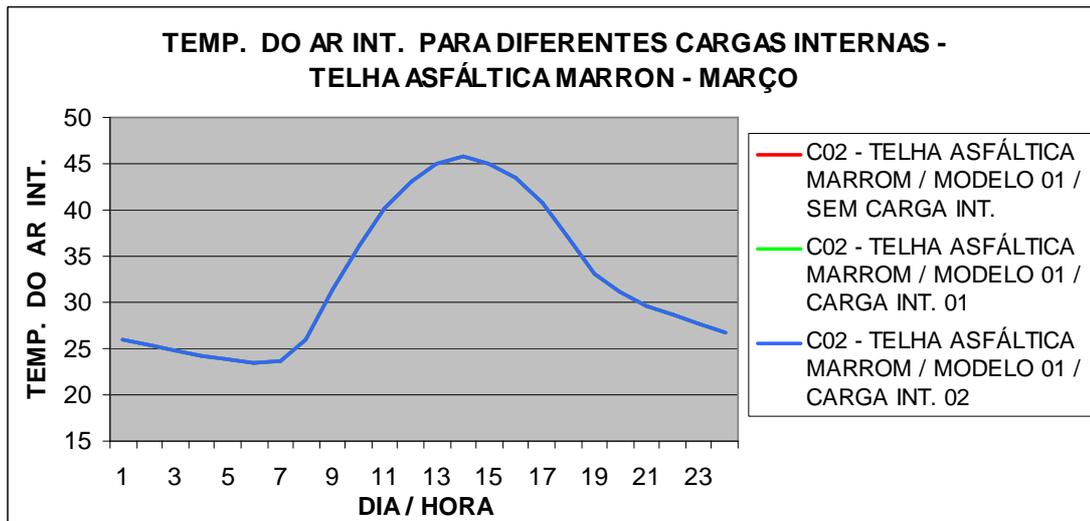


Gráfico 74 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha asfáltica marrom, no modelo 01, em março (período úmido)

b) Telha metálica branca com forro de pvc (melhores resultados obtidos)

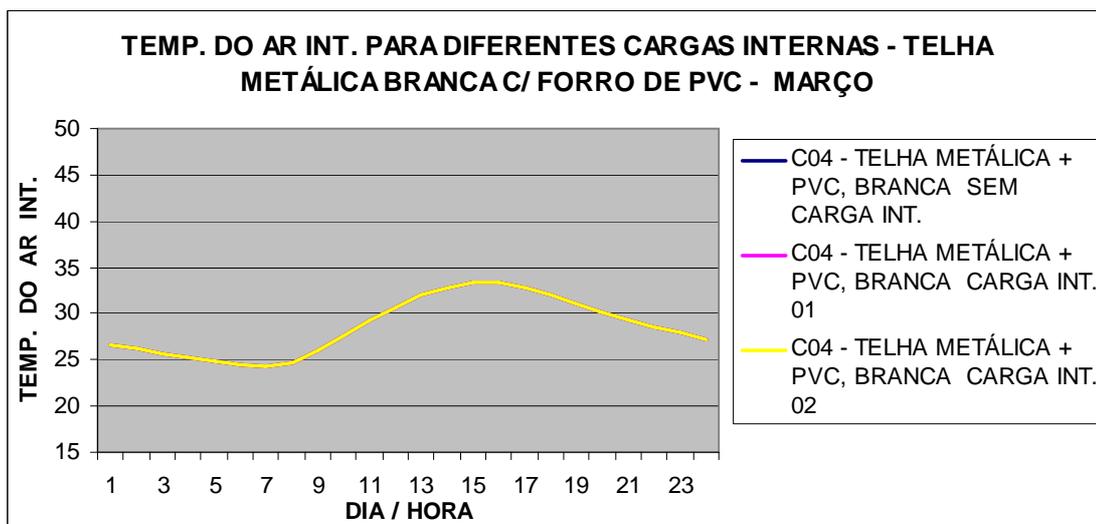


Gráfico 75 - Temperatura do ar interno – tbs em °C, para a telha metálica branca com forro de pvc, no modelo 01, em março (período úmido)

Para ambas as telhas as curvas de temperatura do ar interno apresentaram o mesmo comportamento também em julho e outubro.

- **Análise quanto à ventilação natural**

A ventilação natural também não influenciou o resultado da temperatura do ar interno. Apesar de ser esta uma importante estratégia de conforto, dependendo do rigor do clima pode ser insuficiente, ou até mesmo, um fator agravante das condições de conforto, dependendo das condições externas. Para que

seja eficiente, as aberturas devem ser criteriosamente posicionadas e dimensionadas, porém isto não ocorre na maioria dos galpões encontrados na cidade, sendo por isso, simulada a situação mais próxima da realidade encontrada. A velocidade praticamente nula do ar também não contribui para a ventilação natural por ação dos ventos, ocorrendo somente o efeito chaminé.

11.3. Etapa 03

Nesta etapa, a telha metálica branca (simples) com forro de pvc e a telha asfáltica marrom foram avaliadas, combinadas com uma das estratégias de atenuação da carga térmica, ora o sombreamento, ora o resfriamento evaporativo. Os parâmetros para comparação foram a temperatura do ar interno – tbs (°C) e a carga térmica diária de resfriamento (W). Como a carga térmica e a ventilação não influenciaram nos resultados, foi considerada somente a carga térmica 01 (mais elevada) e sem ventilação, para os modelos 02 e 03, já que estes apresentaram resultados de temperatura interna do ar significativamente diferentes entre si.

11.3.1. Resfriamento Evaporativo

a) Telha asfáltica marrom (pior resultado obtido)

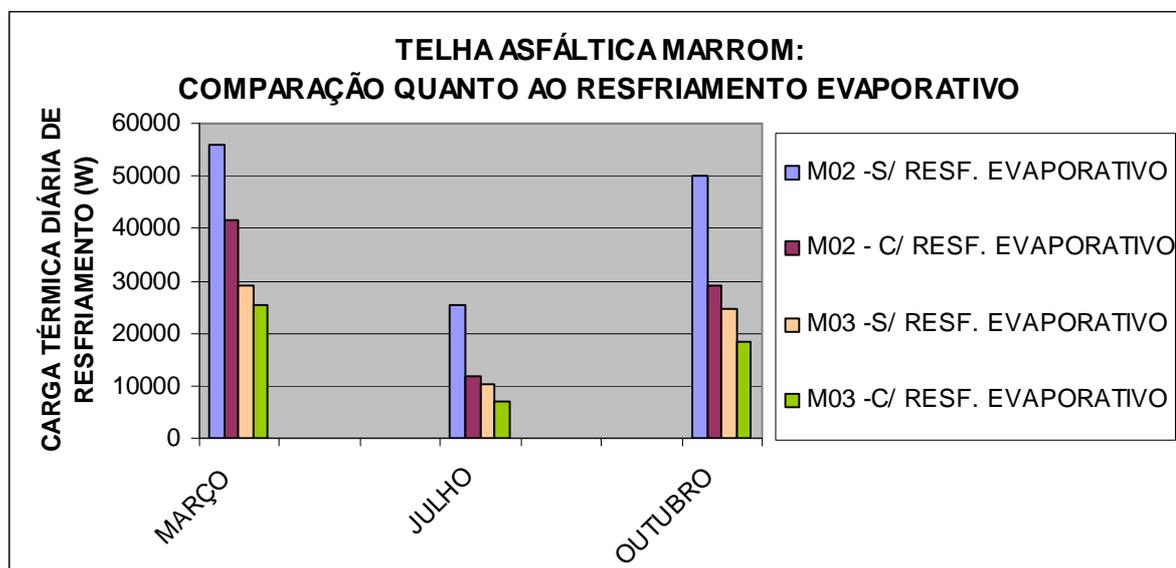


Gráfico 76 - Carga térmica diária de resfriamento (W) para a telha asfáltica marrom, nos modelos 02 e 03, em março, julho e outubro

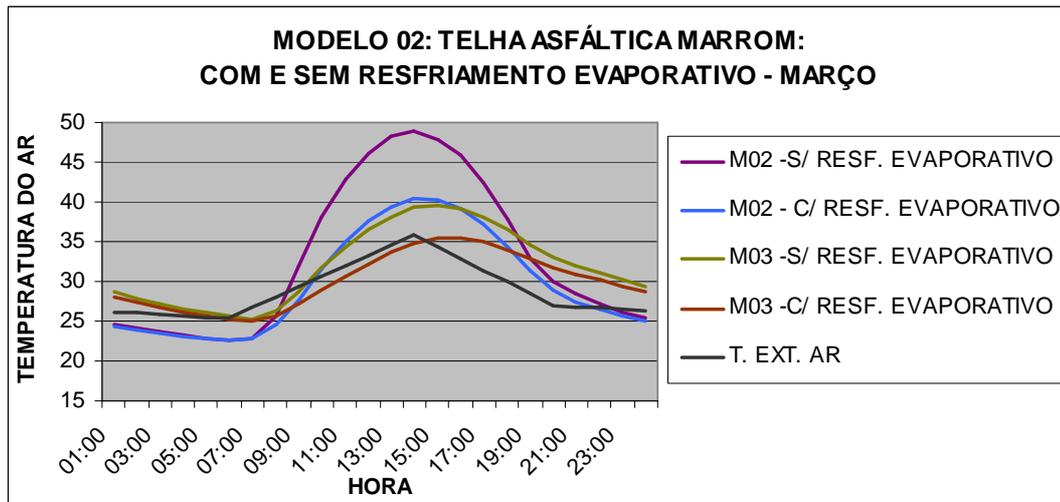


Gráfico 77 - Temperatura do ar interno – tbs (°C), para a telha asfáltica marrom, nos modelos 02 e 03, em março (período úmido)

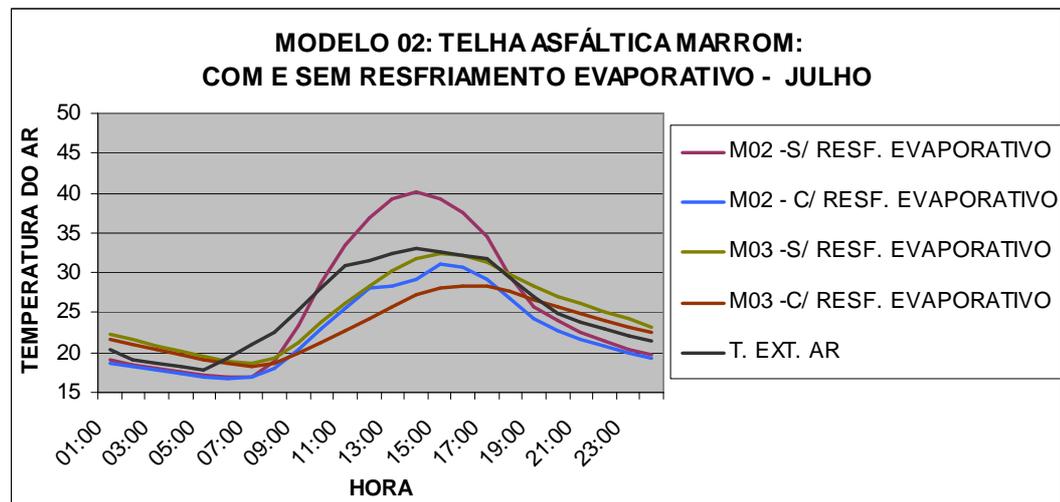


Gráfico 78 - Temperatura do ar interno – tbs (°C), para a telha asfáltica marrom, nos modelos 02 e 03, em julho (período seco)

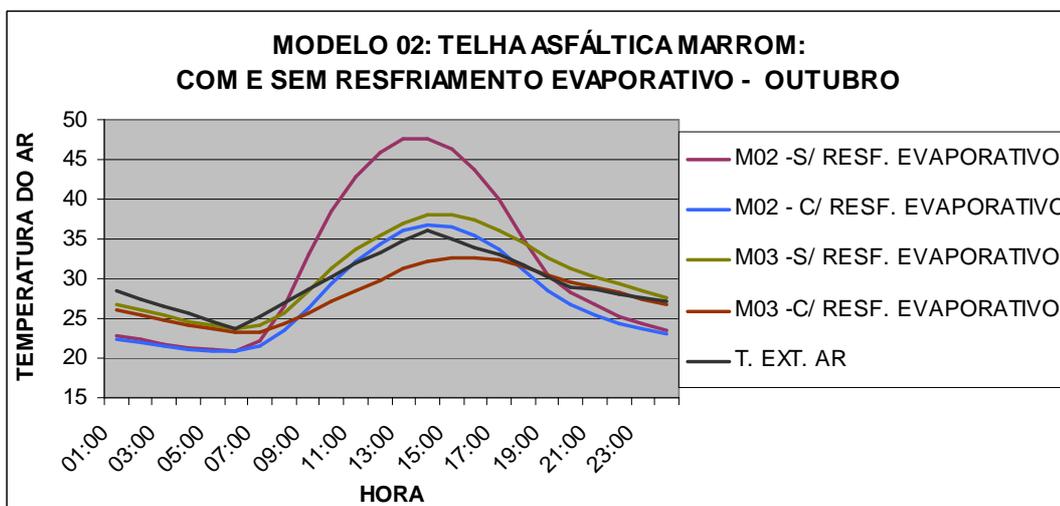


Gráfico 79 - Temperatura do ar interno - tbs (°C), para a telha asfáltica marrom, nos modelos 02 e 03, em outubro (período mais quente)

b) Telha metálica branca com forro de pvc (melhor resultado obtido)

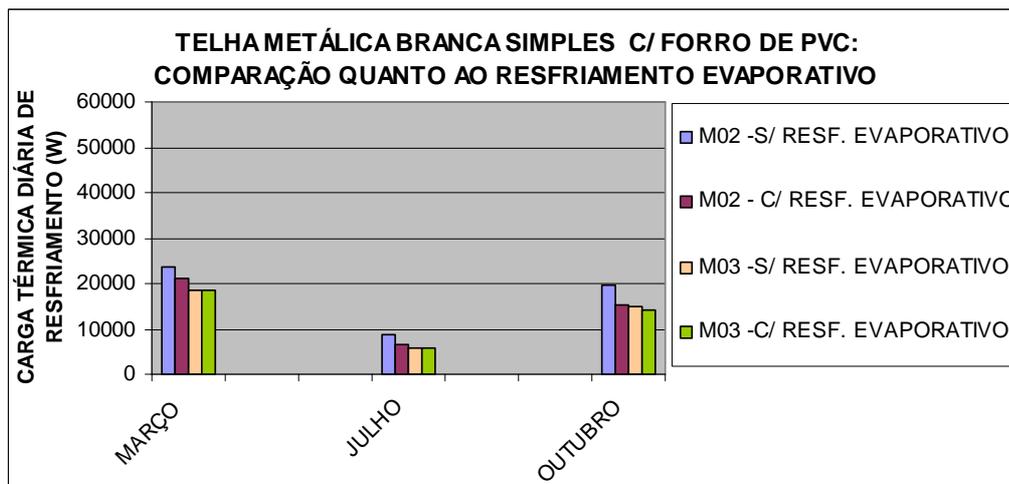


Gráfico 80 - Carga térmica diária de resfriamento (W) para a telha metálica branca com forro de pvc, nos modelos 02 e 03, em março, julho e outubro

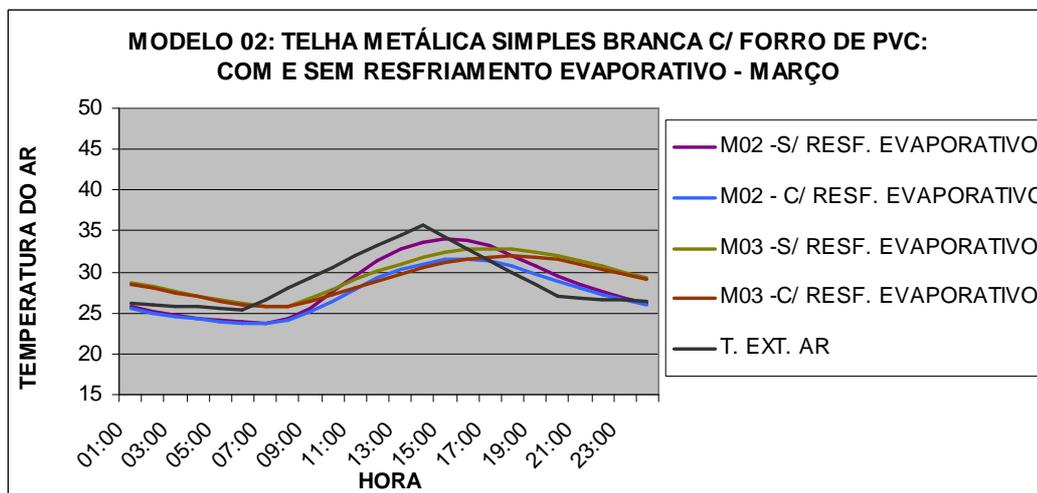


Gráfico 81 - Temperatura do ar interno - (°C), para a telha metálica branca com forro de pvc, nos modelos 02 e 03, em março (período úmido)

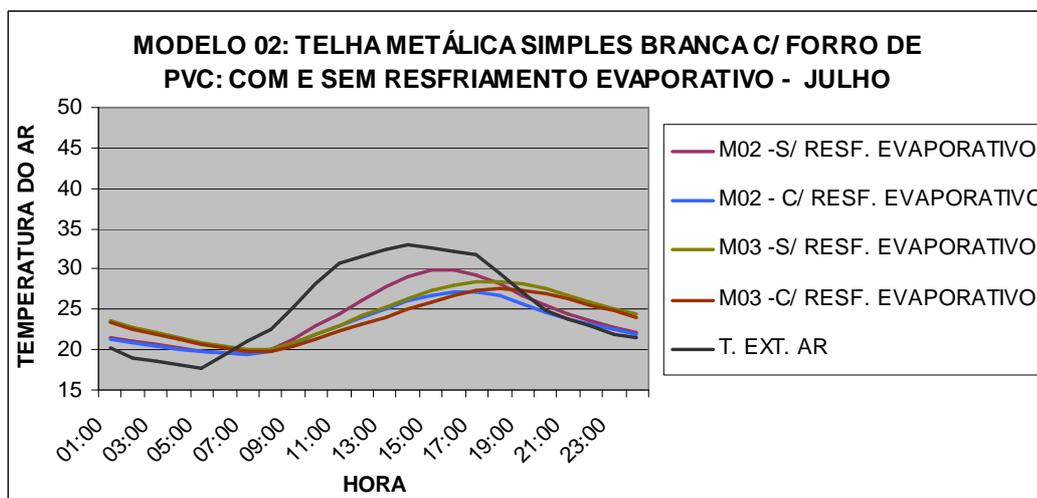


Gráfico 82 - Temperatura do ar interno – tbs (°C), para a telha metálica branca com forro de pvc, nos modelos 02 e 03, em julho (período seco)

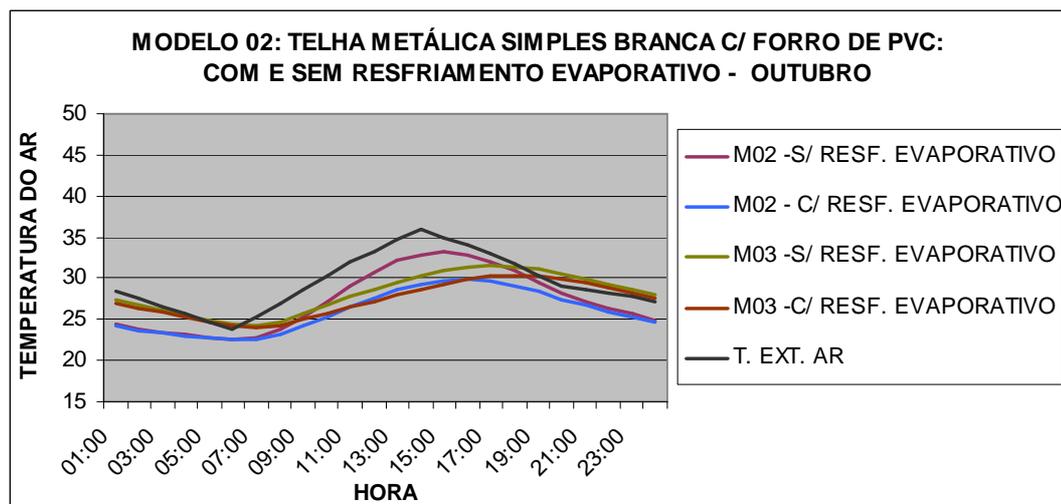


Gráfico 83 - Temperatura do ar interno – tbs (°C), para a telha metálica branca com forro de pvc, nos modelos 02 e 03, em outubro (período mais quente)

▪ Análise quanto ao resfriamento evaporativo

Percebe-se que a estratégia de resfriamento evaporativo é capaz de reduzir significativamente a carga térmica. Cabem as seguintes observações:

- Quanto maior a cobertura, maior o efeito de redução da carga térmica. Para áreas pequenas o efeito é menor, podendo se tornar inviável a aplicação do sistema.
- Quanto pior o desempenho da cobertura, maior será a melhoria alcançada, por isto, nota-se diferenças menores no sistema de cobertura composto pela telha metálica, camada de ar e forro de pvc, já que este, por si só, alcança resultados mais satisfatórios de desempenho térmico, se comparado ao sistema de telha asfáltica marrom.
- Quanto menor a umidade relativa do ar e quanto mais elevada a temperatura do ar, maior a redução da carga térmica. As reduções inferiores alcançadas para o período úmido (março) comprovam isto.

11.3.2. Sombreamento

a) Telha asfáltica marrom (pior resultado obtido)

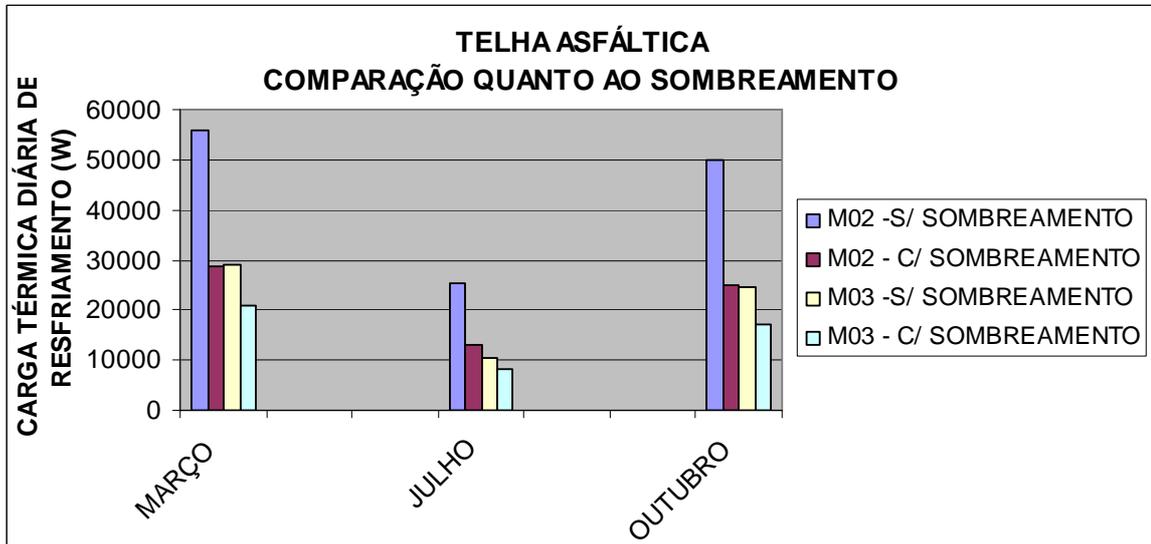


Gráfico 84 - Carga térmica diária de resfriamento (W) para a telha asfáltica marrom, nos modelos 02 e 03, em março, julho e outubro

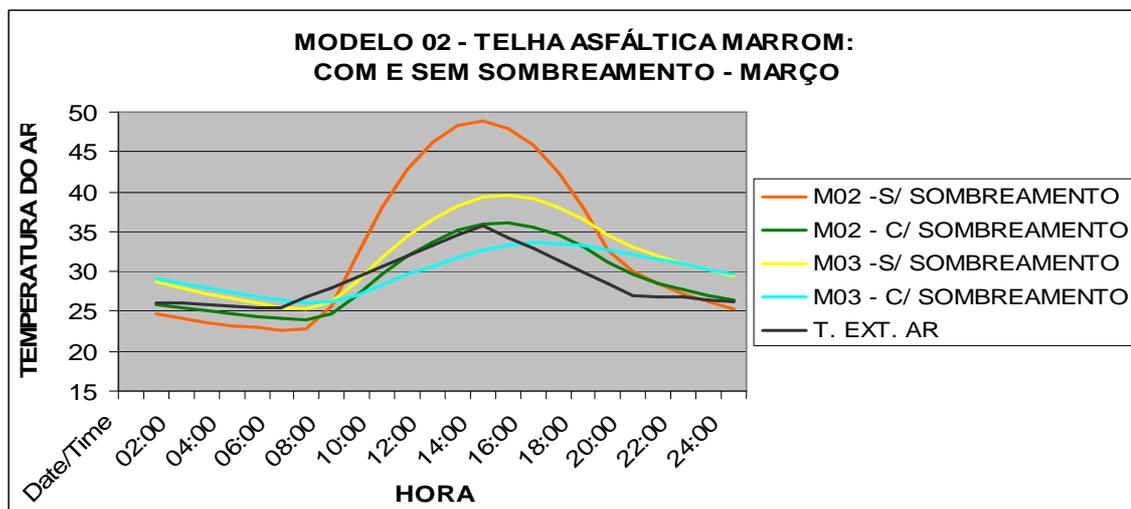


Gráfico 85 - Temperatura do ar interno – tbs (°C), para a telha asfáltica marrom, nos modelos 02 e 03, em março (período úmido)

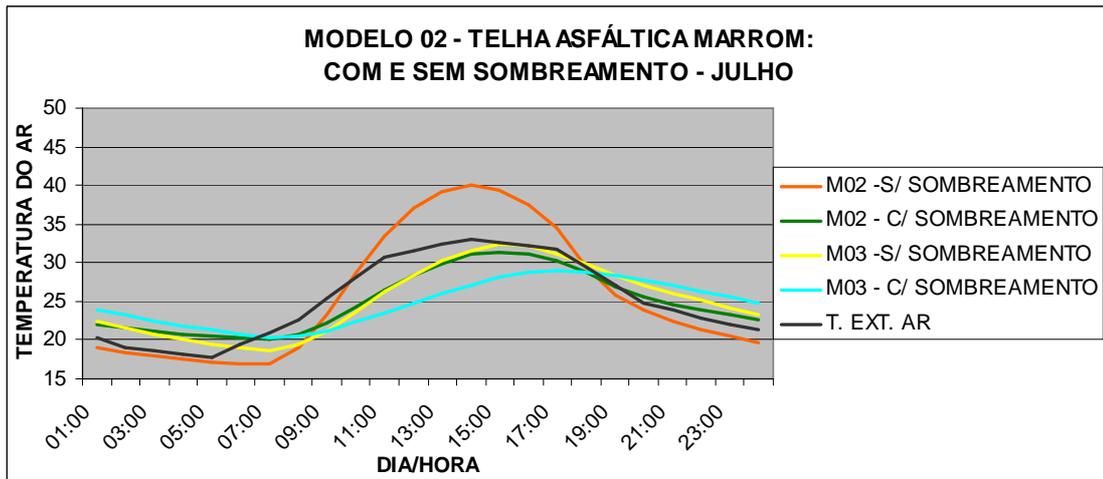


Gráfico 86 - Temperatura do ar interno – tbs (°C), para a telha asfáltica marrom, nos modelos 02 e 03, em julho (período seco)

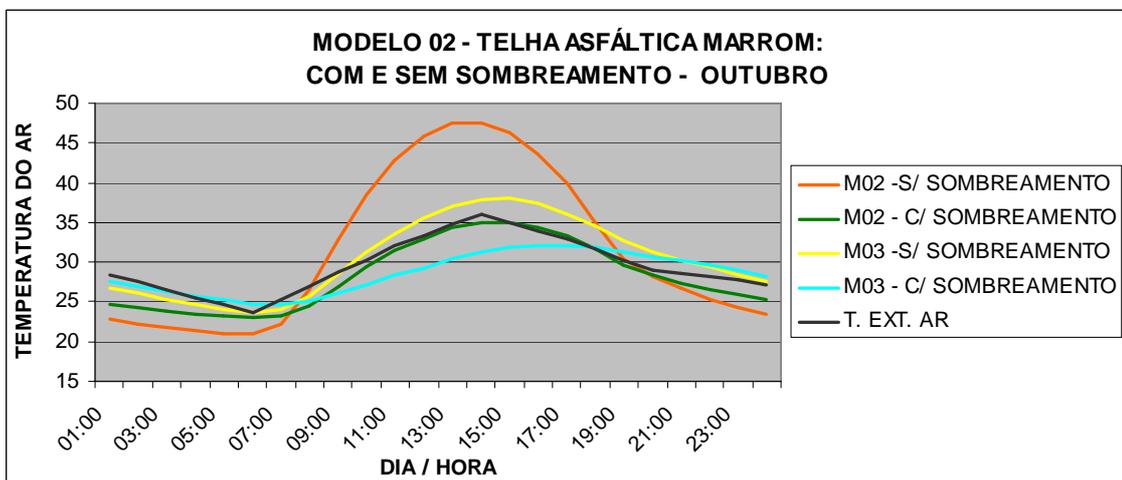


Gráfico 87 - Temperatura do ar interno – tbs (°C), para a telha asfáltica marrom, nos modelos 02 e 03, em outubro (período mais quente)

- **Análise quanto ao sombreamento, comparado ao resfriamento evaporativo, para a telha asfáltica marrom**

Percebe-se que o sombreamento da cobertura é uma estratégia eficiente para a redução da carga térmica e da temperatura do ar interno. Comparando-se com os resultados obtidos com o resfriamento evaporativo, nota-se que o sombreamento é capaz de reduzir ainda mais a carga térmica, porém depende das condições climáticas, principalmente da radiação solar e da umidade do ar. No período seco (julho), por exemplo, o resfriamento evaporativo demonstrou ser mais eficiente, ainda que sutilmente. Já no período quente e úmido (março), o sombreamento reduz significativamente mais a temperatura do ar interno. Fazendo-se uma média dos 03 (três) dias representativos do ano, o sombreamento alcança resultados melhores de desempenho para o M02, e iguais para o M03, conforme os dados da tabela seguinte:

Tabela 32 - Comparação entre o resfriamento evaporativo e o sombreamento, para a Telha asfáltica marrom, baseando-se na redução da tbs (°C)

Período	REDUÇÃO DA tbs (%) - M02		REDUÇÃO DA tbs (%) - M03	
	RESF. EVAPORATIVO	SOMBREAMENTO	RESF. EVAPORATIVO	SOMBREAMENTO
Março	16%	25%	12,5%	17,5%
Julho	22,5%	21%	13,8%	11%
outubro	24%	26%	14,5%	14,5%
média	20%	24%	14%	14%

Sendo o M02 o modelo mais representativo das tipologias de galpões estudados nesta pesquisa, ou seja, edificações cuja cobertura é a principal fonte de calor, pode-se dizer, que para esta tipologia, o sombreamento demonstrou ser mais eficaz na redução da temperatura. Analisando agora como parâmetro a carga térmica de resfriamento têm-se:

Tabela 33 - Comparação entre o resfriamento evaporativo e o sombreamento, para a Telha asfáltica marrom, baseando-se na redução da carga térmica (W)

Período	REDUÇÃO DA CARGA TÉRMICA (%) - M02		REDUÇÃO DA CARGA TÉRMICA (%) - M03	
	RESF. EVAPORATIVO	SOMBREAMENTO	RESF. EVAPORATIVO	SOMBREAMENTO
Março	25%	48%	15%	26%
Julho	56%	48%	33%	33%
outubro	40%	50%	25%	29%
média	41%	49%	24%	29%

Percebe-se que para os dois modelos o sombreamento apresentou reduções mais significativas, sendo maior a redução quanto maior a área de cobertura. Quando se fala em carga térmica de resfriamento (W), logo se associa à climatização artificial e, conseqüentemente ao custo da energia elétrica do sistema. Por isto foi feita uma avaliação da despesa mensal que se teria com a energia elétrica, caso o galpão fosse climatizado com ar condicionado e da economia que ambas as estratégias proporcionam, tanto o resfriamento evaporativo quanto o sombreamento. A tabela 34 apresenta esta relação, cabendo as seguintes observações:

- Quantificações para o M02, considerado o mais representativo, com área de cobertura = 1.000 m² e volume de 5.000m³
- Custo da energia baseado no mês de setembro de 2008 (R\$0,59), para instalações comerciais, na cidade de Cuiabá (MT)
- O custo anual se refere ao consumo em horário comercial de dias úteis, considerando somente a energia despendida para a climatização, não incluindo outros consumos, como iluminação e equipamentos

Tabela 34 - Relação custo-benefício das estratégias avaliadas

	Estratégia de atenuação da carga térmica	Carga Térmica de resfriamento (kW)	Custo da energia/Wh (R\$)	Custo com energia elétrica (R\$)	Economia (R\$)
MARÇO	Sem estratégia	1.210	0,59	713,9	--
	Resfriamento Evap.	902	0,59	532,18	181,72
	Sombreamento	627	0,59	369,93	343,97
JULHO	Sem estratégia	550	0,59	324,5	--
	Resfriamento Evap.	242	0,59	142,78	181,72
	Sombreamento	286	0,59	168,74	155,76
OUTUBRO	Sem estratégia	1.100	0,59	649	--
	Resfriamento Evap.	649	0,59	382,91	266,09
	Sombreamento	546	0,59	322,14	326,86
ANO*	Sem estratégia	12.210,00	0,59	7203,9	0
	Resfriamento Evap.	8.085,00	0,59	4770,15	2433,75
	Sombreamento	6.258,00	0,59	3692,22	3511,68

***Observação:** O cálculo foi realizado a partir de estimativas médias, pois o efeito, tanto do sombreamento quanto do resfriamento evaporativo, depende das condições climáticas, consideradas aqui somente para 03 dias de referência do ano. Então, foram considerados 06 meses idênticos ao mês de março, 03 meses idênticos ao mês de julho e outros 03 meses baseados nos dados de outubro, pois os períodos não têm a mesma duração. Acredita-se que a distribuição homogênea ao longo do ano não representaria com fidelidade as características do clima do local. Por isso foi dado um peso maior para o mês de março, já que julho e outubro representam situações extremas. Ainda assim, há de se mencionar que não é um cálculo exato.

Portanto, em termos de custo-benefício, avaliando-se o custo inicial de implantação de cada um dos sistemas e o retorno com a economia de energia elétrica que se gastaria em caso de climatização artificial, têm-se:

Tabela 35 - Retorno financeiro do investimento

Estratégia de atenuação da carga térmica	Custo inicial de implantação (R\$)	Economia Anual (R\$)	Retorno financeiro (anos)
Resfriamento Evaporativo	30.000,00 (30,00/m ²)	2433,75	12,3
Sombreamento	20.000,00 (20,00/ m ²)	3511,68	5,7

O sombreamento demonstrou ser mais viável que o resfriamento evaporativo, pois apresenta um investimento inicial mais baixo e economias mensais mais significativas. Os resultados podem variar dependendo do clima: quanto mais seco, melhor será o efeito alcançado pelo resfriamento evaporativo. Mesmo com o sombreamento, o retorno aparece após 5,7 anos, o que pode parecer muito, no entanto, deve-se lembrar que não somente o retorno financeiro deve ser levado em consideração, mas também a melhoria em termos de conforto térmico, o que influencia também na produtividade da empresa, e sem falar nas questões de impacto ambiental devido ao grande consumo de energia elétrica.

Outro aspecto importante diz respeito à tipologia construtiva, já que se trata de galpões cujo partido arquitetônico não prevê a instalação de ar condicionado. Deve-se, nestes casos, buscar soluções alternativas para melhorar o conforto térmico dos usuários da edificação, seja esta de uso industrial ou comercial. A comparação baseada na carga térmica de resfriamento (W) foi uma maneira de se obter uma referência e demonstrar a viabilidade de cada técnica.

Ainda deve-se lembrar que o procedimento adotado para a simulação do resfriamento evaporativo não é exato e que tende a ser superdimensionado, o que pode tornar o sistema menos viável.

b) Telha metálica branca com forro de pvc (melhor resultado obtido)

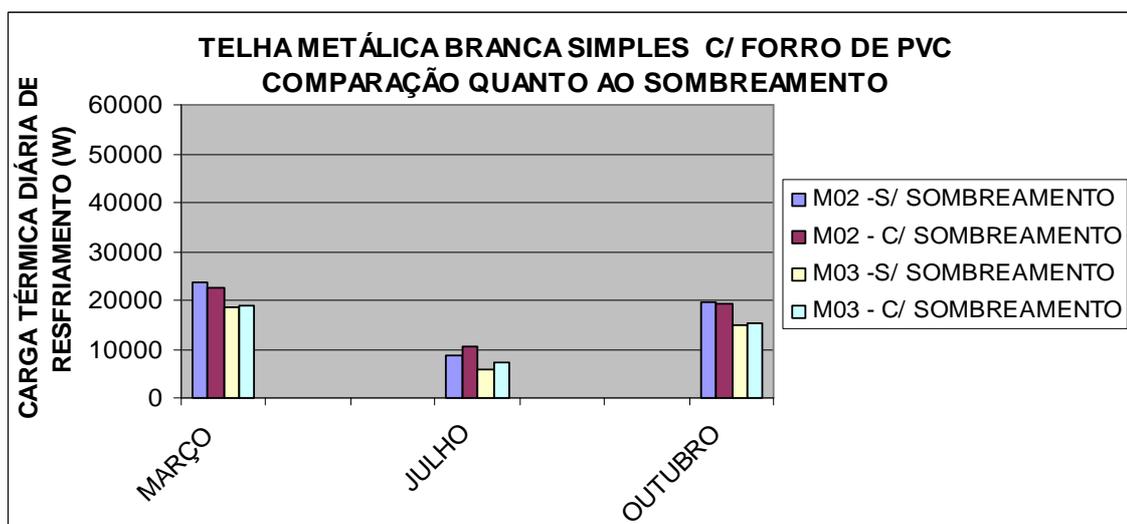


Gráfico 88 - Carga térmica diária de resfriamento (W) para a telha metálica branca com forro de pvc, nos modelos 02 e 03, em março, julho e outubro

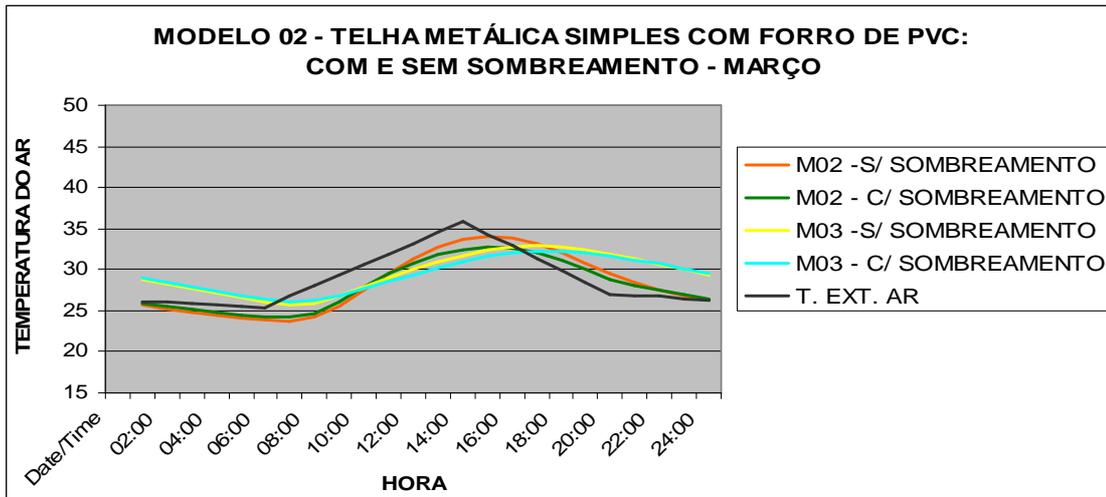


Gráfico 89 - Temperatura do ar interno – tbs (°C), para a telha metálica branca com forro de pvc, nos modelos 02 e 03, em março (período úmido)

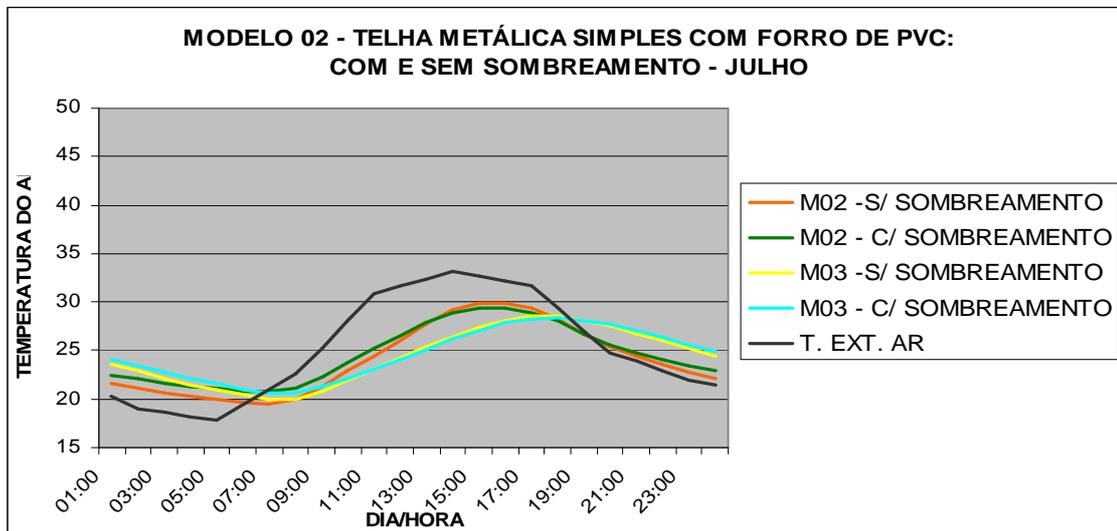


Gráfico 90 - Temperatura do ar interno – tbs (°C), para a telha metálica branca com forro de pvc, nos modelos 02 e 03, em julho (período seco)

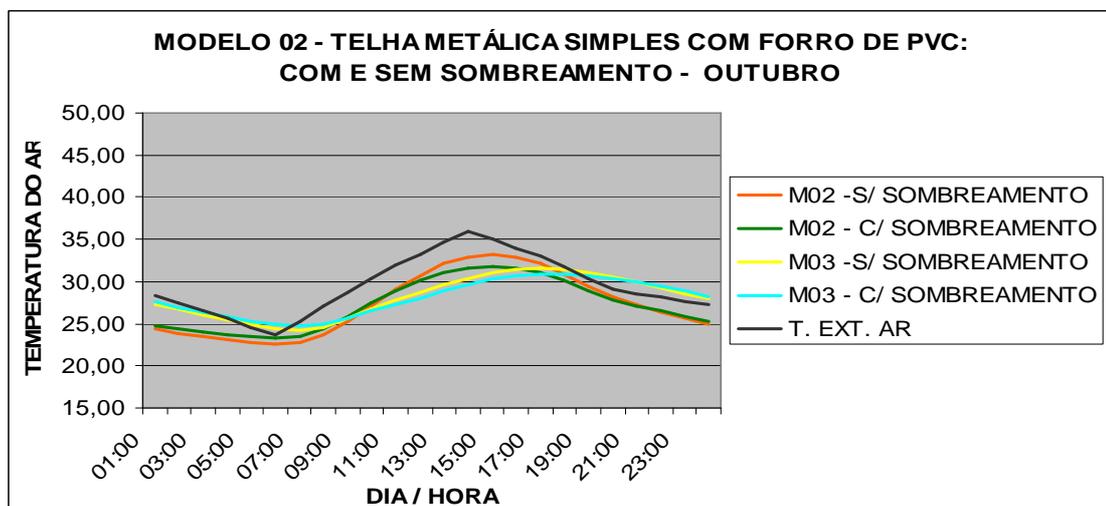


Gráfico 91 - Temperatura do ar interno – tbs (°C), para a telha metálica branca com forro de pvc, nos modelos 02 e 03, em outubro (período mais quente)

- **Análise quanto ao sombreamento, comparado ao resfriamento evaporativo, para a telha metálica simples com forro de pvc**

Para esta cobertura, nota-se um decréscimo muito discreto na temperatura interna do ambiente e na carga térmica de resfriamento. Assim como se observou nos resultados na primeira etapa da experiência, o sistema já é considerado de bom desempenho devido à cor branca da superfície e à camada de ar isolante entre a telha e o forro, havendo poucas possibilidades de melhorias. Para o M03 a redução é quase imperceptível.

Ao contrário do resultado obtido para a telha asfáltica marrom, o resfriamento evaporativo alcançou resultados mais satisfatórios que o sombreamento, o que é de se esperar, já que a superfície externa é branca e, por isso, absorve menor quantidade de radiação solar que a telha marrom.

Um fato interessante foi o resultado obtido para julho, pois a carga térmica diária de resfriamento foi maior quando se aplicou o sombreamento. Observando-se a curva do gráfico de temperatura interna do ar, nota-se que as temperaturas no início e no final do dia são maiores na opção com sombreamento que na opção sem o mesmo. Uma hipótese é de que a tela de proteção prejudica a dissipação de calor nas horas mais amenas, principalmente por não haver velocidade de ar suficiente para a remoção do calor entre a telha e a tela de proteção. Nos 03 (três) dias de referência alcançou-se uma redução na temperatura interna do ar de aproximadamente 3% (para o horário de pico), o que representa cerca de 1°C. Quanto à carga térmica de resfriamento, em março e outubro o M02 apresentou reduções de 6% e 2%, respectivamente.

Os resultados comprovam que as melhorias podem ser “somadas” com a aplicação de mais de uma estratégia, porém, até certo ponto. Depois de alcançar determinado desempenho térmico, outras soluções adicionais de atenuação da carga térmica se tornam inviáveis.

Tabela 36 - Comparação entre o resfriamento evaporativo e o sombreamento, para a Telha metálica simples branca com forro de pvc, baseando-se na redução da tbs (°C)

Período	REDUÇÃO DA TBS (%) - M02		REDUÇÃO DA TBS (%) - M03	
	RESF. EVAPORATIVO	SOMBREAMENTO	RESF. EVAPORATIVO	SOMBREAMENTO
Março	6%	3%	3%	2%
Julho	10%	3%	3,5%	0%
outubro	9%	3%	5%	4%
média	8,3%	3%	3,8%	2%

Analisando como parâmetro a carga térmica de resfriamento têm-se:

Tabela 37 - Comparação entre o resfriamento evaporativo e o sombreamento, para a Telha metálica simples branca com forro de pvc, baseando-se na redução da carga térmica (W)

Período	REDUÇÃO DA CARGA TÉRMICA (%) - M02		REDUÇÃO DA CARGA TÉRMICA (%) - M03	
	RESF. EVAPORATIVO	SOMBREAMENTO	RESF. EVAPORATIVO	SOMBREAMENTO
Março	14%	6%	0%	+ 2%
Julho	18%	+ 17%	5%	+ 17%
outubro	14%	2%	3%	+ 3%
média	15,33%	+3%	2,66%	+7,33%

Nesta terceira etapa, a finalidade foi comparar o sistema de resfriamento evaporativo como o sombreamento, visando encontrar o sistema mais eficiente na redução da carga térmica interna. Após as simulações, concluiu-se que para telhas escuras o sombreamento apresenta reduções maiores e custos iniciais menores, tornando este sistema mais viável em termos de custo-benefício. Já para telhas brancas, o resfriamento evaporativo atingiu resultados mais notórios na redução da carga térmica, ainda que o custo de implantação seja maior. Portanto, a escolha da solução a ser adotada depende do tipo de telha existente e do investimento inicial que se pretende aplicar. Em situações com desempenho ruim da cobertura, o sombreamento demonstrou ser mais viável.

Retomando os resultados obtidos na primeira etapa das simulações, é importante lembrar que a aplicação de barreira radiante obteve resultados muito satisfatórios na redução da carga térmica. Então, para finalizar a análise das estratégias passivas de atenuação da carga térmica em coberturas, foram comparadas as duas soluções que obtiveram melhorias mais significativas, na primeira e na terceira etapa: a aplicação de barreira radiante sob a telha e o sombreamento, comparando-se o custo inicial e a redução (em porcentagem) da carga térmica de resfriamento. Para esta análise adotou-se somente a telha asfáltica marrom, para qual se atingem melhorias mais significativas:

Tabela 38 - Comparação entre os resultados de carga térmica (kW) obtidos com o sombreamento e a aplicação de barreira radiante, para a Telha Asfáltica marrom.

ESTRATÉGIA	REDUÇÃO DA CARGA TÉRMICA (%) -				CUSTO INICIAL (R\$/m ²)
	março	julho	outubro	média	
BARREIRA RADIANTE 1ª. etapa (M01)	62%	58%	64%	61%	11,00
SOMBREAMENTO 2ª. etapa (M02)	48%	48%	50%	49%	20,00

Observações: A barreira radiante foi simulada para o M01 – modelo 01, enquanto que o sombreamento para o M02 – modelo 02. Deve-se considerar que no M02, conforme se confirmou na segunda etapa, se atinge reduções ainda maiores que no M01, por este apresentar área de cobertura maior. Ou seja, a barreira radiante, se simulada no M02, atingirá ainda maiores reduções. Assim, conclui-se que a aplicação da barreira radiante, quando corretamente utilizada, apresenta resultados mais notórios na redução da carga térmica e investimentos iniciais significativamente menores, o que torna este sistema mais viável em termos de custo-benefício.

12. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante a pesquisa foram levantadas as tipologias de coberturas mais empregadas em edificações comerciais predominantemente horizontais, na região de Mato Grosso, em especial na cidade de Cuiabá. Os galpões do tipo industriais e comerciais, encontrados em abundância na cidade serviram de referência para a pesquisa.

O objetivo foi avaliar o desempenho térmico e energético de alguns sistemas de cobertura, sejam eles compostos por um único componente ou pela combinação de mais de um componente de cobertura ou subcobertura, dentre os mais usuais no mercado, cujas características pouco ou nada foram estudadas para o clima rigoroso em questão, e ainda carecem de pesquisas e maior divulgação quanto ao comportamento térmico. Além da avaliação dos componentes de cobertura foram levantadas as possibilidades de se adotar estratégias passivas de resfriamento ou de atenuação da carga térmica proveniente da cobertura.

Foi contextualizado historicamente o uso de vários tipos de coberturas e técnicas passivas de atenuação da carga térmica, em diferentes regiões do mundo, servindo de referência para o procedimento da pesquisa, assim como a revisão quanto aos princípios de trocas térmicas entre a cobertura e o exterior, que também serviu de embasamento teórico.

O método empregado para a avaliação foi o de simulação computacional, adotando-se como ferramenta o programa *Energy Plus*, cuja escolha foi baseada no levantamento das capacidades e limitações de alguns dos programas de simulação térmica e energética mais utilizados pela comunidade científica, em nível internacional. O programa demonstrou ser uma ferramenta adequada para a avaliação de desempenho térmico e energético, apesar de algumas limitações.

Quanto à metodologia, a pesquisa foi dividida em 03 (três) partes, sendo a primeira responsável pela avaliação de quatro componentes isoladamente e com algumas variações e combinações: Telha térmica isolante (chapa metálica com preenchimento em poliuretano); telha metálica com asfalto e alumínio em sua composição; telha de fibras orgânicas vegetais e telha metálica simples com forro de pvc e camada de 25 cm de ar entre ambos. As três primeiras consistem em materiais atuais no mercado da construção civil, cada vez mais utilizados, ainda que em menor quantidade na região de estudo. Já a quarta opção consiste numa combinação de componentes tradicionais, porém largamente utilizados, por isso incluída na amostra da pesquisa. Quanto às variações, foram comparadas as telhas escuras com as brancas e as opções com e sem barreira radiante (Lâminas refletivas de baixa emissividade). Os resultados apontaram as telhas escuras com o pior desempenho térmico, ao contrário das brancas e daquelas dotadas de barreira radiante. A telha isolante e a metálica com forro de pvc apresentaram as menores cargas térmicas e temperaturas do ar interno.

Concluiu-se que quanto pior o desempenho térmico da telha, maior o efeito de redução da carga térmica por meio de barreira radiante, e que esta subcobertura é capaz de reduzir mais a temperatura do ar interno que a pintura branca. Conclui-se ainda que todas as melhorias alcançadas nas telhas de baixo desempenho térmico as tornam semelhantes ao desempenho da telha térmica isolante e da telha metálica com forro de pvc.

A segunda etapa teve como objetivo avaliar o quanto as dimensões e a geometria, a carga interna e a ventilação natural influenciam nos resultados da primeira etapa. Ou seja, a importância desta etapa estava em confirmar se a cobertura do modelo estudado realmente era a principal fonte de calor e demonstrar as possíveis situações em que os resultados se modificam. No caso estudado comprovou-se que há influências significativas na temperatura do ar interno e na carga térmica de resfriamento, dependendo das dimensões e da geometria dos galpões. Já a carga térmica interna e a ventilação natural, neste caso, não apresentaram interferências no resultado da temperatura interna do ar, pelos seguintes motivos: a carga interna para esse tipo de uso é baixa (seria diferente em edifícios industriais, por exemplo) e a ventilação natural também é muito discreta (faria diferença se houvesse mais vento)

Na terceira etapa foi avaliada a possibilidade de se adotar duas estratégias passivas de atenuação da carga térmica proveniente da cobertura: o sombreamento e o resfriamento evaporativo. Ambos apresentaram resultados satisfatórios na redução da carga térmica, dependendo do tipo de telha e da época do ano, destacando-se o sombreamento, com reduções mais significativas no caso da cobertura de pior desempenho térmico.

A pesquisa não se limitou em avaliar somente o desempenho térmico e energético dos sistemas de cobertura, mas se estendeu à avaliação do custo-benefício de cada um deles. Acredita-se que as devidas decisões de projeto devem ser baseadas em critérios de custo-benefício. Portanto, após o levantamento do custo inicial de implantação das técnicas, concluiu-se que o sombreamento, além de ser mais eficiente na redução da carga térmica de resfriamento e na temperatura interna do ar, apresenta custos menores de implantação.

Também na primeira etapa de avaliação, levantou-se o custo-benefício dos sistemas de cobertura, concluindo-se que a barreira radiante representa uma solução de baixo custo e de alta eficiência para o desempenho térmico e energético. A telha isolante, apesar de apresentar excelente resultado em termos de desempenho térmico, obteve o custo mais elevado de todos, seguida da telha com forro de pvc, que é a mais isolante de todas. As telhas de asfalto e fibras orgânicas vegetais apresentam custos significativamente inferiores e, quando combinadas com uma barreira radiante, cujo custo é baixo, igualam-se em termos de desempenho térmico e energético com as outras mencionadas, porém com um investimento inicial menor.

A principal dificuldade encontrada durante a pesquisa foi quanto à avaliação do resfriamento evaporativo, já que o programa *Energy Plus*, assim como outros programas investigados, não simula este mecanismo. Para isto, foi desenvolvida uma metodologia, na qual se complementou a simulação

computacional com cálculos manuais a partir de equações da termodinâmica, resultando numa simplificação para a simulação da temperatura do ar interno e carga térmica de resfriamento. Os resultados apresentaram coerência, de acordo com o que era esperado, apesar de um certo superdimensionamento, sendo esta uma questão que merece ser discutida em trabalhos futuros, explorando, inclusive, ferramentas computacionais.

Para comprovar os resultados das simulações computacionais do sombreamento e do resfriamento evaporativo seria interessante comparar com dados de medição, porém esta pesquisa apresentou limitação de tempo e custo para a realização desta experiência. Contudo, de acordo com diversos testes já realizados pelo DOE (Departamento de Energia dos EUA), acredita-se na confiabilidade do *Energy Plus* para simulações de desempenho térmico e energético.

Vale ressaltar que a questão do custo-benefício poderá ser mais detalhada em um próximo trabalho, incluindo questões de manutenção e uma pesquisa de mercado mais aprofundada. Também seria útil aumentar as variações de componentes e as combinações entre eles.

Outro aspecto relevante que merece ser tratado é quanto ao conforto térmico e ao nível de satisfação do usuário, analisada a partir da temperatura do ar interno, umidade do ar, temperatura radiante média do ambiente, velocidade do ar e de questionários aplicados aos usuários. Esta pesquisa, porém, limitou-se em avaliar o desempenho térmico dos diversos sistemas de cobertura, sem aprofundar-se nas questões do conforto térmico.

Em resumo, os resultados permitem afirmar que determinadas soluções de coberturas apresentam melhor desempenho térmico para o clima quente da região, em relação a outras, e que as boas soluções não são necessariamente as mais onerosas. As vantagens em se adotar estratégias adequadas estão na melhoria das condições de conforto térmico dos usuários, na economia de energia com climatização artificial e nas questões de impacto ambiental relacionadas ao consumo energético.

Contudo, é importante mencionar que não existe uma regra única de projeto, ou apenas uma cobertura que seja considerada adequada ao clima local. É fundamental, porém, considerar a tipologia do edifício (função, partido, dimensões, fator de forma), a disponibilidade de material na região e as questões de custo-benefício, buscando sempre que possível privilegiar as estratégias passivas de conforto.

Acredita-se que este trabalho possa contribuir para o processo de decisão de projeto, apresentando alternativas de coberturas, entre as mais atuais e utilizadas no mercado da construção civil e comparando-as quanto ao desempenho e custo-benefício de cada uma delas. A contribuição não se limita somente aos projetos novos, mas busca intervenções em coberturas existentes, por meio de estratégias passivas ou de baixo consumo de energia, que, ao final desta pesquisa, puderam ter sua eficácia comprovada. Em edificações predominantemente horizontais, onde a cobertura é o principal elemento de exposição à radiação solar, esta decisão é determinante para a melhoria das condições de conforto térmico no interior e/ou para a redução no consumo de energia, em caso de edificações climatizadas artificialmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABREA. Disponível em: <www.abrea.org.br>. Acesso em: 29 de Agosto de 2007
2. AHMAD, A.M. **Thermal Performance of Concrete Roofs and Reed Shading Panels under Arid Summer Conditions**. Garston: BRE, 1975
3. AKUTSU, Maria. **Método para Avaliação do desempenho térmico de edificação no Brasil**. São Paulo: FAUUSP, 1998. 156 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
4. AKUTSU, Maria; VITTORINO, Fúlvio. Desempenho Térmico de telhas de alumínio. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5 e ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2, 1999, Fortaleza - CE. **Anais ...** Fortaleza: ANTAC, 1999.
5. AKUTSU, M.; SATO, N. M. N. **Propriedades termofísicas de materiais e componentes de construção**. Coletânea de trabalhos da divisão de edificações do IPT. São Paulo: Pini, 1988.
6. ALEXANDRI, Eleftheria JONES, Phill. Ponds, Green, Roofs, Pergolas and High Albedo Materials; Witch Cooling Technique for Urban Spaces? In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE (PLEA), 23, 2006, Geneva - Suíça.
7. ALUCCI, et all. Coberturas Têxteis e Conforto Térmico e Luminoso. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC, 8, 2005, Maceió. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2005.
8. ALUCCI, Márcia Peinado. **Conforto térmico, conforto luminoso e conservação de energia**. São Paulo: FAUUSP, 1993. 225 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
9. ALUCCI, Márcia Peinado. **Recomendações para adequação de uma edificação ao clima no estado de São Paulo**: FAUUSP, 1981. 2 v. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.
10. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Practice for use of reflective insulation in building constructions**, ASTM C 727. West Conshohocken
11. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Practice for Installation and Use of Radiant Barrier Systems (RBS) in Building Construction**, ASTM C 1158. West Conshohocken, 1997.
12. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Specification for Sheet Radiant Barriers for Building Construction Applications**, ASTM C 1313. West Conshohocken, 2000.
13. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Specification for Reflective Insulation for Building Applications**, ASTM C 1224. West Conshohocken, 2001.

14. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE handbook: fundamentals**. Atlanta, GA: ASHRAE, 2005.
15. AMORIM, CLÁUDIA N. D. **Desempenho Térmico de Edificações e Simulação Computacional no contexto da arquitetura bioclimática**: estudo de casos na região de Brasília. Brasília: UNB, 1997. Dissertação (Mestrado). Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília - Brasil, 1997.
16. APOLÔNIO, Raquel M. **Desempenho Térmico de Ambientes de Trabalho do tipo Galpões Comerciais e Industriais**. (em andamento/ início: 2007). Iniciação científica (Graduando em ARQUITETURA E URBANISMO) - Faculdade de Arquitetura Engenharia e Tecnologia – FAET, da Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT. (Orientador: Luciane Cleonice Durante).
17. ARAÚJO, Soraya Delma Oliveira. **Análise do desempenho térmico de fibras vegetais em sistemas de resfriamento evaporativo**. Recife: UFPE, 2006. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Pernambuco, 2006
18. AROZTEGUI, J. Miguel. **Análise Experimental do Desempenho Térmico de Verão de 10 Alternativas de telhado com Ático, em Telhas Cerâmicas tipo Marselha e em Cimento-amianto tipo Ondulado**. Porto Alegre: UFRGS. 1984. Dissertação (Mestrado) - Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1984.
19. ARQUITETURA TÊXTIL. Disponível em: <www.arquiteturatextil.com.br>. Acesso em: 11 de Setembro de 2007.
20. ARQUITETURA com Aço: Leveza, rapidez e precisão. **Projeto Design**, São Paulo, ed. 260, out. 2001.
21. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 15220. **Desempenho Térmico de Edificações**. Parte 3 – Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. 2005.
22. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 14513. **Fabricação de telhas de aço revestido de seção ondulada**. 2002.
23. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 14514. **Fabricação de telhas de aço revestido de seção trapezoidal**. 2002.
24. ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALIZATION. **Isolants thermiques destines au bâtiment – Definition**, NF P 75-01. Saint-Denis La Plaine, 1983
25. ATHIENITIS, A. K.; SANTAMOURIS, M. **Thermal Analysis and Design of Passive Solar Buildings**. London: James & James, 2000.
26. BAKER, Nick; STEEMERS, Koen. **Energy and Environment in Architecture: A Technical Design Guide**. London: E & FN SPON, 2000.
27. BASSO, A.; DUARTE, D. H. S. A Simulação Computacional como Ferramenta de Apoio ao Estudo

- da Adequação Climática de Habitações. In: ENCONTRO NACIONAL DE MODELOS DE SIMULAÇÃO DE AMBIENTES, 1995, SÃO PAULO. ENCONTRO NACIONAL DE MODELOS DE SIMULAÇÃO DE AMBIENTES. São Paulo: NUTAU/FAUUSP, 1995. p. 81-87.
28. BASSO, Admir; LUCINI, Hugo Camilo; RORIZ, Maurício. Desempenho Térmico de Coberturas para Edifícios Habitacionais. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC, 1, Porto Alegre, 1991. **Anais...** Gramado: ANTAC, 1990. P. 15-20.
29. BASSO, Admir. **Patologia por ação térmica em coberturas de edificações habitacionais**. São Paulo: EPEC, 1992. 45 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação da Escola Politécnica de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992
30. BEN – Balanço Energético Nacional. Disponível em: <ben.epe.gov.br>. Acesso em: 10 de Novembro de 2008.
31. BOUGIATIOTI, Flora. Effect of urban geometry on surface temperatures of “skim” materials in Greek cities. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE (PLEA), 23, 2006, Geneva - Suíça.
32. BUENO, André D. **Transferência de calor e Umidade em Telhas: Simulação e Análise Experimental**. Florianópolis: UFSC, 1994. 115 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1994.
33. BEIJING 2008. Disponível em: <<http://en.beijing2008.cn>>. Acesso em: 04 de Setembro de 2007
34. CAVALCANTI, J. Roberto de Souza. **Estudo Experimental entre resfriamento evaporativo e radiativo em ambientes cobertos com telhas de fibrocimento em região de clima quente e úmido**. São Paulo: EPEC, 2001. 154 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação da Escola Politécnica de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
35. CLIMAS. Disponível em: <<http://climas.zip.net/>>. Acesso em 18 de junho de 2007
36. COOL ROOFS. Disponível em: <<http://www.coolroofs.org>>. Acesso em: 23 de maio de 2007
37. CRAWLEY, Drury B.; HAND, Jon W.; KUMMERT, Michael; GRIFFITH, Brent T. **CONTRASTING THE CAPABILITIES OF BUILDING ENERGY PERFORMANCE SIMULATION PROGRAMS**. US Department of Energy, University of Strathclyde, University of Wisconsin-Madison and National Renewable Energy Laboratory, Version 1.0. Julho, 2005. (disponível em http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/). Acesso em: janeiro de 2006)
38. COBERTURAS e Marquises: Soluções Construtivas para Projetos Inovadores. Edição Especial 10 anos. **Finestra**: 2005.
39. CONFORTO Ambiental. **Coberturas: Desempenho Térmico**. Palestra proferida no curso de “Desempenho de Coberturas na Construção Civil”. São Paulo, 1977.
40. CONFORTO Ambiental. **Téchne**, São Paulo, ed. 127, ano 15, out., 2007.
41. CUNHA, Paulo W. Soares. **Desempenho térmico de coberturas em países de clima quente**. São Paulo: EPEC, 1978. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação da Escola

- Politécnica de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1978.
42. DÂNICA. Disponível em: <www.danicacorporation.com>. Acesso em: 26 de Julho de 2007
 43. DE BENEDETTO, Gisele Saveriano. **Avaliação da aplicação de modo misto na redução da carga térmica em edifícios de escritórios nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro.** São Paulo: FAUUSP, 2007. 203 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
 44. DE BENEDETTO, Gisele Saveriano. **Definição, comparação e escolha de ferramenta de simulação computacional de desempenho térmico e energético:** O caso dos programas computacionais TAS e Energy Plus.. São Paulo: FAUUSP, 2006. Trabalho programado (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
 45. DERIZANS, Abel. **Conservação de energia: superfícies refletiva, proteção contra a insolação e ventilação.** Rio de Janeiro: UFRJ, 1989. Dissertação (Mestrado).
 46. DESIGN ROOFING. Disponível em: <www.designroofing.ca>. Acesso em: 11 de Setembro de 2007.
 47. DESJARLAIS, Andre O.; TYE, Ron P. Experimental Methods for Determining the Thermal performance of Cellular Plastic Insulation Materials used in Roofs. In: 8th CONFERENCE ON ROOFING TECHNOLOGY. 1. Maryland: National Roofing Contractors Association, 1987.
 48. DOE / USA - Departamento de Energia dos Estados: Energy Plus. Disponível em: <<http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus>>. Acesso em 11 set. de 2006.
 49. DUARTE, Denise Helena Silva. **O Clima como parâmetro de projeto para a região de Cuiabá.** São Carlos: FAUUSP, 1995. 214 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.
 50. DUARTE, Denise Helena Silva. **Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental.** São Paulo: FAUUSP, 2000. 278 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
 51. DUARTE, D. H. S.. Recomendações de Projeto visando Condicionamento Térmico Natural em Climas Compostos: o caso de Cuiabá. In: VI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENTAC 95, 1995, Rio de Janeiro. Qualidade e Tecnologia na Habitação. Rio de Janeiro: ANTAC, 1995. p. 611-616.
 52. DUARTE, D. H. S.; BASSO, Admir. Considerações sobre o Estudo de Conforto Térmico para a Implantação de Conjunto Habitacional em Madeira na Cidade de Cuiabá - MT.. In: V ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA - EBRAMEM, 1995, Belo Horizonte. V Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira - EBRAMEM. Belo Horizonte: CEFETMG/ EEUFMG / IBRAMEM, 1995. v. 1. p. 387-394.
 53. DURANTE, Luciane C. **Conforto ambiental de escolas estaduais de Cuiabá - MT.** Cuiabá:

- FTEN/UFMT, 2000. Dissertação (Mestrado). Curso de Mestrado em Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2000.
54. EDEN PROJECT. Disponível em: <www.edenproject.com>. Acesso em: 04 de Setembro de 2007.
55. EDSL/Environmental Design Solutions Limited: TAS. Disponível em: <<http://www.edsl.net>> Acesso em: 17 nov. de 2007.
56. EURACTIVE ROOFER. Disponível em: <<http://www.euractiveroofers.org>>. Acesso em: 25 de Maio de 2007
57. FERREIRA, Fabiana. **Medição e Análise da influência térmica do albedo de coberturas em edifícios**. São Paulo: EPEC, 2002. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação da Escola Politécnica de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
58. FREIRE, Júlio De Lamônica. **Cuiabá Nosso Bem Coletivo**. Cuiabá: UFMT, 1992.
59. FREIRE, Júlio De Lamônica. **Por uma Poética Popular da Arquitetura**. São Paulo: ECAUSP, 1988. Dissertação (Mestrado em Artes). Escola de Comunicação e Artes, Universidade de São Paulo, 1988.
60. FREYRE, Gilberto. **Casa-Grande & Senzala: formação da família brasileira sob o regime patriarcal**. Rio de Janeiro: Jose Olympio, 1973.
61. FROTA, Anésia de Barros; SHIFFER, Sueli Ramos. **Manual de Conforto Térmico**. 6. ed.. São Paulo: Studio Nobel, 2003.
62. GIVONI, Baruch. **Climate Considerations in Building and Urban Design**. New York - USA: Van Nostrand Reinhold, 1998.
63. GIVONI, B. **Man, Climate and Architecture**. London: Applied Science Publishers, 1976.
64. GIVONI, Baruch. **Passive and low energy cooling of buildings**. New York - USA: John Wiley, 1994.
65. GIVONI, Baruch. **Solar Heating and Night Radiation Cooling by a Roof Radiation Trap**. Energy and Buildings, 1977.
66. GIVONI, Baruch. **The effect of roof construction upon indoor temperatures**. Oxford: Pergamon, 1962.
67. GOMES, Ruy José. **Coberturas em terraço**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC, 1968.
68. GOMES, Ruy José. **Condicionamentos Climáticos da Envolvente dos Edifícios para Habitação: Ensaio de Aplicação ao caso da Região de Lisboa**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC, 1962.
69. GOMES, Ruy José. **Problema do conforto térmico em climas tropicais e subtropicais**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC, 1967.
70. GUERRA, Macho José J. **Control Climático en espacios abiertos: Evaluación del Proyecto**

- EXPO'92. Sevilla: CIEMAT/Universidad de Sevilla, 1994.
71. HARRIS, Ana Lúcia N. de C. O desenvolvimento de mantas térmicas a partir de lixo reciclável. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC, 8, 2005, Maceió. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2005.
72. HEAT ISLAND GROUP: COOL ROOFS. Disponível em: <<http://eetd.lbl.gov/HeatIsland/>>. Acesso em: 02/08/2007.
73. HEME ISOLANTES. Disponível em: <<http://www.hemeisolantes.com.br>>. Acesso em 26 de Julho de 2007.
74. IAG USP - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP. Disponível em: <<http://www.iag.usp.br>>. Acesso em: 27 de agosto de 2007
75. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Anuário Estatístico do Brasil**. 1995.
76. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Anuário Estatístico do Brasil**. 2004.
77. INCROPERA, Frank P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 5 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2003.
78. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Disponível em: <<http://www.iea.org/index.asp>>. Acesso em: 05 dez de 2007.
79. INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION. ISO 7726. Ergonomics of the thermal environment: instruments for measuring physical quantities. Genève: ISO, 1998
80. IPDU – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Urbano; Prefeitura Municipal de Cuiabá. **Perfil Sócio-Econômico de Cuiabá**. Cuiabá, 2004.
81. IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS / GRUPO DE CONFORTO
82. ISAR. Disponível em: <<http://www.isar.com.br>>. Acesso em: 06 de Setembro de 2007.
83. ISOESTE – CONSTRUTIVOS ISOTÉRMICOS. Disponível em: <<http://www.isoeste.com.br>>. Acesso em 20 de dezembro de 2007.
84. JIAFANG, Song; HIEN, Wong Nyuk. Influence of building design on thermal comfort of Hawkers center in Singapura. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE (PLEA), 23, 2006, Geneva - Suíça.
85. KISHORE, V. V. N. Assessment of Natural Cooling Potential for buildings in different climatic conditions. **Building and environmental**, v. 23, n. 3, p. 215 – 23, 1988.
86. KOURY, Raphael. Desempenho Térmico de Coberturas para Cuiabá/MT. (em andamento/início: 2007). Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em ARQUITETURA E URBANISMO) - Faculdade de Arquitetura Engenharia e Tecnologia – FAET, da Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT.
87. KRAUZE, Cláudia M. de L. B. **Coberturas, conforto higrotérmico, edificações: Ponderações e propostas para clima tropical**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1989. Dissertação (Mestrado) – Curso de

- Pós-graduação: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1989.
88. KREBS, Lisandra F. **Coberturas vivas extensivas**: análise da utilização em projetos na região metropolitana de Porto Alegre e serra gaúcha. Porto Alegre: UFRGS. 2005. 182 p. Trabalho de Conclusão (Mestrado Profissional) – Curso de Mestrado profissional em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.
 89. KRÜGER, Eduardo L.; SUETAKE, Graziela Y.; ADRIAZOLA, Márcia K.O. Avaliação do Desempenho Térmico de Coberturas constituídas de Embalagem “Tetra Park”. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC, 4, 2005, Maceió. **Anais... Maceió - AL**, 2005.
 90. LAAR, Michael; GRIMME, Friederich, Wilhelm. Thermal comfort and reduced flood risk through green roof in the tropics. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE (PLEA), 23, 2006, Geneva - Suíça.
 91. LABAKI, Lucila C.; OLIVEIRA, Mariela C. A.; CIOCHI, Fábio A. A reutilização de embalagens tipo “longa vida” como isolante térmico para coberturas de fibrocimento sem forro. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 2003, São Carlos - SP. **Anais.... São Carlos: ANTAC**, 2003. 11P.
 92. LAMBERTS, S. R. **Desempenho térmico de coberturas com ático: bancada de testes e modelo matemático**. Porto Alegre: UFRGS. 1983. 96p. Dissertação (Mestrado) - Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1983.
 93. LAMBERTS, S. R. **Heat Transfer Through Roof of Low Cost Brazilian Houses**. Leeds: The University of Leeds, 1988. 145 p. Tese (Doutorado) – Department of Civil Engineering, The University of Leeds, 1988.
 94. LAMBERTS, S. R. Influência do Desempenho Térmico de Coberturas leves com Ático no Conforto Térmico de Casas Populares. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC, 1, 1991, Porto Alegre. **Anais... Gramado - RS**, 1990.
 95. LAVIGNE, Pierre; FERNANDEZ, Pierre (col.); BREJON, (col.). **Arquitetura Climática: Una Contribución al Desarrollo Sustentable**. Tradução por Arturo Kunstmann. Talca: Editorial Universidad de Talca, 2003. Tomo 1: Bases Físicas.
 96. LAVIGNE, Pierre; FERNANDEZ, Pierre; CHATELET, Alain. **Arquitetura Climática: Una Contribución al Desarrollo Sustentable**. Tradução por Arturo Kunstmann. Talca: Editoria Universidad de Talca, 2003. Tomo 2: Conceptos y Dispositivos.
 97. LEAL, Ledy. Técnica e Arte a serviço da cura. **Arquitetura-urbanismo**, Rio de Janeiro, Ed. 175, outubro, 2008.
 98. LEÃO, Marlon. **Desempenho Térmico em habitações populares para regiões de clima tropical**: Estudo de caso em Cuiabá. Cuiabá: FTEN/UFMT, 2006. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2006.

99. LEMOS, Carlos. **Casa Paulista**. São Paulo: Edusp, 1999.
100. LOPES, Edmar Maria Lima. **Avaliação do Desempenho Térmico de Paredes e Coberturas em Belém-PA / Brasil**. São Carlos: EESC, 1993. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.
101. LOTERSZTAIN, I.; MURATURA, E. A. **Habitabilidade Higrotérmica**. Buenos Aires: Sociedade Central de Arquitetos, 1974.
102. MAITELLI, Gilda. **Uma Abordagem Tridimensional de Clima Urbano em Área Tropical Continental: o exemplo de Cuiabá – MT**. São Paulo FFLCH – USP, 1994. Tese (Doutorado em Geografia). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 1994.
103. MALLICK, Fuard H.; ALI, Zainab F. Comfort in high density housing: The case of corrugated iron walls and roofs. In: CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 2, 2003, Santiago – Chile
104. MARCELO Suzuki: Edifício institucional, Cuiabá-MT. **Projeto Design**, São Paulo, ed. 307, set. 2005.
105. MARQUES, R. S.; OLIVEIRA, M. M. F. Simulação Computacional do Desempenho Térmico das Coberturas mais usadas na cidade do Natal. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC, 5, 1999, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ANTAC, 1999.
106. MASCARÓ, J. **Uso Racional de energia em edificações: Isolamento térmico**. São Paulo: Agência Nacional para aplicação de energia, s/d.
107. MASCARÓ, L. R. Energia na Edificação: **Estratégia para minimizar seu consumo**. São Paulo: Ed. Parma, 1985.
108. M. D’Orazio et all. Effects of roof tile permeability on the thermal performance of ventilated roofs: Analysis of annual performance. **Energy and Buildings**. Elsevier, v. 40, Issue 5, 2008, Pg 911-916.
109. EDIFÍCIO Institucional, Cuiabá-MT. **Projeto Design**, São Paulo, ed. 307, set. 2005.
110. METAR. **Dados climáticos do Aeroporto Marechal Rondon**. Laboratório Master - Meteorologia Aplicada a Sistemas de Tempo Regionais, do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. São Paulo.
111. MICHELS, Caren. **Análise da transferência de calor em coberturas com barreiras radiantes**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis.
112. MORAES, Mariane Lima. **Desempenho térmico e lumínico de escritórios em Cuiabá/MT**. 2003. Iniciação Científica. (Graduando em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura Engenharia e Tecnologia – FAET , da Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT. (Orientador: Luciane Cleonice Durante).

113. MORAIS, Caroline Santana de; RORIZ, Maurício. Comparação entre os desempenhos térmicos de cobertura ajardinada de laje comum em guaritas. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7, 2003, Curitiba - PR. **Anais...**Curitiba: ANTAC, 2003.
114. MORETTI Arquitetura: Terminal do Aeroporto Internacional Guararapes. **Projeto Design**, São Paulo, ed. 299, jan. 2005.
115. NASCIMENTO, Gustavo R. **Refrigeração evaporativa de telhados por meio de gotejamento de água**: Experimento em bancada de testes. São Carlos, EESC, 2005. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
116. O FIBROCIMENTO na arquitetura brasileira. **Projeto Design**, São Paulo, ed. 136, nov. 1990.
117. OLGYAY. **Design with climate**: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1973.
118. OLIVEIRA, A. M. **Análise de Desempenho Térmico de Verão do Telhado em Cimento-amianto, com Atiço**. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre: UFRGS, 1984.
119. OLIVEIRA, Ângela Santana de. **Análise de Desempenho Térmico e Consumo de Energia em Residências na cidade de Cuiabá-MT: Estudo de Caso**. 2007. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Mato Grosso. Orientador: Marta Cristina de Jesus Albuquerque Nogueira.
120. OLIVEIRA, M. M. F de et all. Isolamento Térmico de Coberturas através de Fibra Vegetal. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC, 7, 2003, Curitiba - PR. **Anais...** Curitiba: ANTAC, 2003.
121. ONDULINE. Disponível em: www.onduline.com.br. Acesso em: 26 de Julho de 2006
122. PANTANAL SHOPPING. Disponível em:<www.pantanalshopping.com.br>. Acesso em: 18 de Setembro de 2007
123. PERALTA, Gizela. **Desempenho térmico de telhas: análise de monitoramento e normalização específica**. São Carlos, EESC, 2006. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
124. PERALTA, Gizela; SCHIERI, Eduvaldo; FERREIRA, Osny P. Análise do Comportamento Térmico de Telha de Material reciclado e Telha de Aço em Episódio Climático. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC, 7, 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ANTAC, 2003.
125. PERES, Márcia B. **Desempenho Térmico de Ambientes de Trabalho do tipo Galpões Comerciais e Industriais**. 2007. Iniciação Científica. (Graduando em ARQUITETURA E URBANISMO) - Faculdade de Arquitetura Engenharia e Tecnologia – FAET, da Universidade

- Federal de Mato Grosso - UFMT. Orientador: Luciane Cleonice Durante.
126. PIRONDI, Zeno. **Manual prático da impermeabilização e de isolamento térmica**: contribuição à execução do projeto de impermeabilização, conforme norma da "ABNT-NBR 9575". 2 ed. São Paulo: Pini, 1988.
 127. PIRRÓ, Lúcia F. **O impacto das envoltentes verticais do desempenho energético de edifícios de escritórios**. São Paulo: FAUUSP, 2005. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
 128. POPPER, Karl. **A lógica da pesquisa científica**. São Paulo, Cultrix (EDUSP), 1996.
 129. POUHEY, Maria T. F.; SATTLER, Miguel A.; SCHNEIDER, Paulo S. Coberturas Verdes: Análise de desempenho térmico. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7, 1998, Florianópolis – SC. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 1998. p. 473-481.
 130. PÓVOAS, Lenine C. **Sobrados e Casas Senhorais de Cuiabá**. Cuiabá: Fundação Cultural de Mato Grosso, 1980.
 131. PÓVOAS, Lenine C. **Cuiabanidade**. Cuiabá: [s. n.], 1987
 132. PROCEL. **Manual de Conservação de Energia Elétrica em Edifícios Comerciais e Públicos**. Eletrobrás: Rio de Janeiro, 1998.
 133. QUANJEL, Emile; ZEILER, Wim; BORSBOOM, Wouter; SPOORENBERG, Huib. Integral Design Methodology for Collaborative Design of Sustainable Roof. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE (PLEA), 23, 2006, Geneva - Suíça.
 134. ROCK FIBRAS. Disponível em: <<http://www.rockfibras.com.br/convrefl.htm>>. Acesso em: 11 de Setembro.
 135. ROMERO, Marta. **Arquitectura Bioclimática de los Espacios Públicos**. Catalunya: UPC, 1993. Tese (Doutorado) - Doutorado em Arquitetura, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya – Espanha, 1993.
 136. ROMERO, Marta. **Princípios Bioclimáticos para o Desenho Urbano**. Brasília: UNB, 1985. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Planejamento Urbano, Universidade de Brasília, Brasília - Brasil, 1985.
 137. ROMERO, Marta et al. Sustainable Recommendations for the Faculty of technology of the University of Brasília - Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE (PLEA), 23, 2006, Geneva - Suíça.
 138. RORIZ, Maurício. **Conforto Térmico em Edificações**: Um modelo matemático e aplicação. São Paulo: FAUUSP, 1996. 185 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.
 139. RORIZ, V. F.; RORIZ, Maurício. Sistemas Evaporativos de Resfriamento de Coberturas: Estudo de caso em São Carlos, SP, Brasil. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE

- CONSTRUÍDO - ENCAC, 8, 2005, Maceió. **Anais...** Maceió - AL, 2005.
140. RUDOFSKI, Bernard. **Architectur without Architects**. Londres: Academy Editions, 1973.
141. SABBAG, Haifa Yazigi. Severiano Porto e a Arquitetura Regional. **Portal Vitruvius**, ac 012, set. 2003.
142. SAIZ, Jabardo J. Maria. **Dinâmica de evaporadores resfriadores de ar**. São Paulo: EPEC, 1976. 124 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação da Escola Politécnica de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1976.
143. SAIZ, Jabardo J. Maria. Efeito de coberturas sobre o desempenho térmico de residências. IN: SIMPOSIO BRASILEIRO DE TRANSFERENCIA DE CALOR E MASSA, 1, 1987, Campinas - SP. **Anais...** Campinas: Unicamp, 1987.
144. SAMPAIO, Mariza de Mello Arruda S. **Análise do Desempenho Térmico e Lumínico de Habitações Populares em Cuiabá-MT**. 2006. 109 f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Mato Grosso, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso. Orientador: Marta Cristina de Jesus Albuquerque Nogueira.
145. SANTAMOURIS, M.(ed). **Advances in Building Energy Research**. v.1. London: James & James, 2007 (no prelo).
146. SANTAMOURIS, M.(ed). **Advances in Passive Cooling**. London: James & James, 2007 (no prelo).
147. SANTAMOURIS, M.(ed). **Environmental Design of Urban Buildings**. An Integrated Approach. London: James & James, 2006.
148. SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D.. **Passive Cooling of Building**. London: James & James, 1995.
149. SANTOS, Jorge Luiz Pizzutti. **Análise de Soluções Técnicas de Proteção contra Insolação de Coberturas**. Porto Alegre: UFRGS, 1979. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1979.
150. SATO, Neide Matiko Nakata. **Modelo para cálculo de temperaturas e fluxos de calor em coberturas**. São Paulo: EPEC, 1983. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação da Escola Politécnica de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983.
151. SCHILER, Marc; VALMONT, Elisabeth. Urban Environmental Glare: the secondary consequence of highly reflective materials. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE (PLEA), 23, 2006, Geneva - Suíça.
152. SCHRADER, Fernanda T. **Desempenho Térmico e Lumínico de Ambientes de trabalho do tipo Comerciais e Industriais**. Iniciação Científica. (Graduando em ARQUITETURA E URBANISMO) - Faculdade de Arquitetura Engenharia e Tecnologia – FAET, da Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT. Orientador: Luciane Cleonice Durante.
153. SCOTT, Michon. **Beating the heat in the world's big cities**. Disponível em: <http://

- earthobservatory.nasa.gov/study/greenroof. Agosto, 2006. acesso em: 30 de janeiro de 2008.
154. SHUKUYA, Masanori; HAMMACHE, Abdelaziz. **Introduction to the Concept of Exergy - for a Better Understanding of Low-Temperature-Heating and High-Temperature-Cooling Systems**. Research Notes 2158. VTT, 2002. Disponível em: <<http://www.lowex.net/english/inside/material.html>>. Acesso em: 01 out. 2006.
155. SILVEIRA, ANA LÚCIA R. C. DA. **Parâmetros bioclimática para avaliação de conjuntos habitacionais multifamiliares na região tropical subúmida do Brasil**. Brasília: UNB, 1985. Tese (Doutorado). Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília - Brasil, 2007.
156. SILVEIRA, ANA LÚCIA R. C. DA. **Diretrizes de projeto para construção de prédios escolares em Teresina/PI**. Brasília: UNB, 1999. Dissertação (Mestrado). Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília - Brasil, 1999.
157. SIMIONI, Wagner I.; CLEZAR, Carlos A. Desempenho térmico de coberturas: Uma análise utilizando diferenças finitas. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7 e CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA SOBRE CONFORTO E DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES, 3, 2003, Curitiba. **Anais Curitiba**. Curitiba: ENCAC, 2003. p. 1098-1104
158. SMITH, C. Robert. **Arquitetura Colonial**. Salvador: Livraria Progresso Editora, 1955.
159. SONNTAG, Richard E.; BORGNAKKE, Claus; WYLEN, Gordon J. van. **Fundamentos da Termodinâmica**. Tradução Euryale de Jesus Zerbini. 6ª. Ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2003.
160. SOUZA, Henor Arthur de *et al.* Avaliação do desempenho térmico de coberturas em habitações populares feitas em estruturas metálicas. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO-ENCAC, 6, e ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 3, 2001, São Pedro. **Anais São Pedro**. São Pedro: ANTAC, 2001. 8p.
161. SOUZA, Hertz Rebelo de. **Estudo das coberturas dos hotéis de selva do estado do Amazonas**. São Carlos, EESC, 1996. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.
162. SOUZA, Léa Cristina Lucas de. **Desempenho térmico de coberturas leves**. São Carlos: EESC, 1990. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.
163. SWERA - Solar and Wind Energy Resource Assessment. Disponível em: <<http://swera.unep.net>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2008
164. TAHA, H. **Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat**. Energy and Buildings, v.25, n.2, p.99-103, 1997.

165. TC SHINGLE DO BRASIL. Disponível em: <www.tcshingle.com.br>. Acesso em: 26 de Julho de 2007.
166. TECNOLOGIA em campo. **Téchne**, São Paulo, ed. 110, ano 14, maio, 2006.
167. TEIXEIRA, Carla. **Comportamento Térmico de Coberturas de Fibrocimento em Campinas – SP: Aplicação de Técnicas Passivas**. Campinas: FEC, 2006. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Campinas (UNICAMP), 2006.
168. TEIXEIRA, C.; LABAKI, L.; TAVARES, S. Desempenho Térmico de Técnicas passivas em Coberturas – Resfriamento Evaporativo e Radiante. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8 e CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA SOBRE CONFORTO E DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES, 4, 2005, Maceió - AL. **Anais ... Maceió: ENCAC, 2005.**
169. TRADE REGULATION RULE. Labelling and Advertising of Home Insulation. 16 CFR Part 460, Federal Register, Volume44, 167, August/1979
170. TZEMPELIKOS, Athanassios; ATHIENITIS, Andreas K. Shading as an Active Component for Solar Control: an Integrated Approach at the Early Design Stage. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE (PLEA), 23, 2006, Geneva - Suíça.
171. UK. Building Regulations 2000 (SI 2000/2531) / Building (Amendment) Regulations 2001 (SI 2001/3335). **Part L - Building Regulations and the Energy Performance of Buildings Directive**. London.
172. VECCHIA, Francisco; CARLETTO, Consuelo. Comportamento Térmico de Sistemas de Coberturas. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL: DEMANDAS SOCIAIS, INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS E A CIDADE. São Paulo: NUTAU/USP – NÚCLEO DE PESQUISA EM TECNOLOGIA DA ARQUITETURA E URBANISMO DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2004.
173. VENCOR DO BRASIL - Telhas Termo Acústicas. Disponível em: <<http://www.vencordobrasil.com.br>>. Acesso em: 11 de fevereiro de 2008.
174. VIANNA, Nelson Solano. **O Estado da Arte em Ensino e Pesquisa na área de Conforto Ambiental no Brasil**. São Paulo: FAUUSP, 2001. 309 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.
175. VITTORINO, Fúlvio; SATO, N. M. N.; AKUTSU, Maria. Desempenho Térmico de Isolantes Refletivos e Barreiras Radiantes aplicados em Coberturas. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7 e CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA SOBRE CONFORTO E DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES, 3, 2003, Curitiba - PR. **Anais... Curitiba: ANTAC, 2003. p. 1277-1284.**
176. YANNAS, Simos; ERELL, Evyater; MOLINA, José L. **Roof Cooling Techniques: A Design Handbook**. London: Earthscan, 2006. 164 p.

Apêndice e Anexos

APÊNDICE A: PLANILHA DE CÁLCULO PARA O RESFRIAMENTO EVAPORATIVO

A partir do cálculo apresentado nesse apêndice encontrou-se o coeficiente que relaciona a radiação global no plano horizontal, sem a técnica de aspersão de água sobre a cobertura, e a mesma com a técnica, baseando-se no consumo de água do sistema e no calor de vaporização, segundo conceitos conhecidos da termodinâmica. O coeficiente encontrado foi inserido no arquivo *IDF* do *Energy Plus*, na opção de *Sky Clearness*.

PARA DIA 09.10 (DIA TÍPICO QUENTE)

data/hora	Q rad (w/m2)	temp. do ar (°C)	entalpia h _{lv} (kJ/kg)	densidade H ₂ O - (1/v _l)	MH ₂ O (m ³ /h/m ²)	mH ₂ O (kg/s)	Q vap (kJ/s) = m(kg/s) x h _{lv}	Q vap (kcal/h/m ²)	Q vap (w/m ²)	Q liq = Q _{rad} - Q _{vap}
1	0	28.4								0
2	0	27.5								0
3	0	26.5								0
4	0	25.6								0
5	0	24.6								0
6	18	23.7	2445	997,0	0	0,000000	0,0000	0,00	0	18,000
7	77	25.3	2441,5	997,0	0,0001	0,000028	0,0676	58,14	67,613	9,387
8	265	27.0	2437,6	997,0	0,0003	0,000083	0,2025	174,13	202,52	62,484
9	550	28.7	2433	996,0	0,0004	0,000111	0,2693	231,51	269,24	280,757
10	393	30.3	2430	996,0	0,0004	0,000111	0,2689	231,22	268,91	124,089
11	464	32.0	2425,8	995,0	0,0004	0,000111	0,2682	230,59	268,18	195,820
12	756	33.3	2422,5	995,0	0,0005	0,000138	0,3348	287,85	334,77	421,232
13	616	34.7	2419,3	994,0	0,0004	0,000110	0,2672	229,75	267,2	348,805
14	723	36.0	2415,2	994,0	0,0005	0,000138	0,3334	286,70	333,43	389,572
15	467	35.0	2418,6	994,0	0,0004	0,000110	0,2671	229,68	267,12	199,882
16	388	34.0	2420,8	994,0	0,0004	0,000110	0,2674	229,89	267,36	120,639
17	128	33.0	2423,2	995,0	0,0002	0,000055	0,1340	115,17	133,95	-5,946
18	20	31.7	2426,5	996,0	0	0,000000	0,0000	0,00	0	20,000
19	0	30.3								0
20	0	29.0								0
21	0	28.6								0
22	0	28.1								0
23	0	27.7								0
24	0	27.2								0
	4865									2184,720

Considerando-se:

- Consumo médio de água: 0,4 l / h / m² (evafrio) – ver padronização adotada*
- $Q \text{ vap} = m \text{ (kg/s)} \times h_{lv} \text{ (kJ/kg)}$
- Conversão de m³/h para kg/s: $Q \times m^3/h \times h/3600s \times \text{densidade H}_2\text{O}$
- $Q \text{ liq} = Q_{rad} - Q_{vap}$

Q rad TOTAL	4865
Q vap TOTAL	2184,720
coeficiente Q _{liq}	0,45

***PADRONIZAÇÃO ADOTADA PARA CONSUMO DE ÁGUA**

▪ P/ DIA DE REFERÊNCIA SECO E QUENTE

RAD (W/m ²)	CONSUMO (l)
25<RAD<100	0
100<RAD<200	0,0001
200<RAD<300	0,0003
300<RAD<700	0,0004
700<RAD<1000	0,0005
RAD>1000	0,0006

▪ P/ DIA DE REFERÊNCIA ÚMIDO

RAD (W/m ²)	CONSUMO (l)
25<RAD<100	0
100<RAD<200	0,0001
200<RAD<300	0,0003
300<RAD<900	0,0004
RAD>9000	0,0005



ANEXO A: ARQUIVO *AUDIT* FORNECIDO PELO *ENERGY PLUS*, DA SIMULAÇÃO DO COMPONENTE C01 (TELHA ISOLANTE), DA PRIMEIRA ETAPA DAS SIMULAÇÕES

Este anexo é uma demonstração de como os dados de entrada são informados ao programa Energy Plus. Todas as demais simulações foram baseadas neste arquivo, alterando-se as seguintes variáveis: Componentes de cobertura, na primeira etapa; dimensões dos modelos, taxas de carga térmica interna e ventilação natural, na segunda etapa e por fim, as variáveis relacionadas ao sombreamento e ao resfriamento evaporativo, na terceira etapa. Também no campo *REPORT* houve alterações, já que determinadas simulações solicitaram a carga térmica de resfriamento, denominada *PURCHASED AIR*.

```

Processing Data Dictionary (Energy+.idd) File -- Complete
Maximum number of Alpha Args=          4500
Maximum number of Numeric Args=        1800
Number of Object Definitions=           436
Number of Section Definitions=           3
Processing Input Data File (in.idf) -- Start
  1 !-Generator IDFEditor 1.31
  2 !-Option SortedOrder
  3
  4 !-NOTE: All comments with '!-' are ignored by the IDFEditor and are
generated automatically.
  5 !-      Use '!' comments if they need to be retained when using the
IDFEditor.
  6
  7
  8 !-      ===== ALL OBJECTS IN CLASS: VERSION =====
  9
10 VERSION,
11     2.2;                                !- Version Identifier
12
13
14 !-      ===== ALL OBJECTS IN CLASS: BUILDING =====
15
16 BUILDING,
17     MODELO 01_COB.01,                    !- Building Name
18     0,                                   !- North Axis {deg}
19     City,                                !- Terrain
20     0.05,                                 !- Loads Convergence Tolerance Value
21     0.005,                               !- Temperature Convergence Tolerance
Value {deltaC}
22     FullExterior,                       !- Solar Distribution
23     25;                                  !- Maximum Number of Warmup Days
24
25
26 !-      ===== ALL OBJECTS IN CLASS: TIMESTEP IN HOUR
=====
27
28 TIMESTEP IN HOUR,
29     6;                                    !- Time Step in Hour
30
31
32 !-      ===== ALL OBJECTS IN CLASS: INSIDE CONVECTION ALGORITHM
=====
33
34 INSIDE CONVECTION ALGORITHM,

```



```

    91    10.4,                !- Daily Temperature Range {deltaC}
    92    25.7,                !- Humidity Indicating Conditions at
Max Dry-Bulb
    93    99158,              !- Barometric Pressure {Pa}
    94    1.33,               !- Wind Speed {m/s}
    95    0,                  !- Wind Direction {deg}
    96    0.8,                !- Sky Clearness
    97    ,                   !- Rain Indicator
    98    ,                   !- Snow Indicator
    99    10,                 !- Day Of Month
100    3,                    !- Month
101    SummerDesignDay,     !- Day Type
102    ,                     !- Daylight Saving Time Indicator
103    Wet-Bulb;            !- Humidity Indicating Type
104
105 DesignDay,
106    dia referência seco,  !- DesignDayName
107    33.1,                 !- Maximum Dry-Bulb Temperature {C}
108    15.3,                 !- Daily Temperature Range {deltaC}
109    12.8,                 !- Humidity Indicating Conditions at
Max Dry-Bulb
110    99158,              !- Barometric Pressure {Pa}
111    0.67,               !- Wind Speed {m/s}
112    0,                  !- Wind Direction {deg}
113    0.8,                !- Sky Clearness
114    ,                   !- Rain Indicator
115    ,                   !- Snow Indicator
116    19,                 !- Day Of Month
117    7,                  !- Month
118    WinterDesignDay,    !- Day Type
119    ,                     !- Daylight Saving Time Indicator
120    Wet-Bulb;            !- Humidity Indicating Type
121
122 DesignDay,
123    dia referência quente, !- DesignDayName
124    36,                  !- Maximum Dry-Bulb Temperature {C}
125    12.3,                !- Daily Temperature Range {deltaC}
126    18,                  !- Humidity Indicating Conditions at
Max Dry-Bulb
127    99158,              !- Barometric Pressure {Pa}
128    0.77,               !- Wind Speed {m/s}
129    0,                  !- Wind Direction {deg}
130    0.8,                !- Sky Clearness
131    ,                   !- Rain Indicator
132    ,                   !- Snow Indicator
133    9,                   !- Day Of Month
134    10,                  !- Month
135    CustomDay1,         !- Day Type
136    ,                     !- Daylight Saving Time Indicator
137    Wet-Bulb;            !- Humidity Indicating Type
138
139
140 !- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: GROUNDTEMPERATURES
=====
141
142 GroundTemperatures,
143    25,                   !- January Ground Temperature {C}
144    25,                   !- February Ground Temperature {C}
145    25,                   !- March Ground Temperature {C}
146    25,                   !- April Ground Temperature {C}
147    25,                   !- May Ground Temperature {C}

```



```

208      0.3,                                !- Absorptance:Solar
209      0.3;                                !- Absorptance:Visible
210
211 MATERIAL:REGULAR,
212     portão metálico,                       !- Name
213     Smooth,                               !- Roughness
214     0.01,                                 !- Thickness {m}
215     45.28,                                !- Conductivity {W/m-K}
216     7824,                                 !- Density {kg/m3}
217     500,                                  !- Specific Heat {J/kg-K}
218     0.7,                                  !- Absorptance:Thermal
219     0.3;                                  !- Absorptance:Solar
220
221 MATERIAL:REGULAR,
222     telha isolante,                       !- Name
223     MediumSmooth,                        !- Roughness
224     0.05,                                 !- Thickness {m}
225     0.033,                               !- Conductivity {W/m-K}
226     200,                                  !- Density {kg/m3}
227     800,                                  !- Specific Heat {J/kg-K}
228     0.7,                                  !- Absorptance:Thermal
229     0.3;                                  !- Absorptance:Solar
230
231
232 !- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: MATERIAL:WINDOWGLASS
=====
233
234 MATERIAL:WINDOWGLASS,
235     vidro simples transp.,               !- Name
236     SpectralAverage,                   !- Optical Data Type
237     ,                                   !- Name of Window Glass Spectral Data
Set
238     0.003,                               !- Thickness {m}
239     0.837,                               !- Solar Transmittance at Normal
Incidence
240     0.075,                               !- Solar Reflectance at Normal
Incidence: Front Side
241     0.075,                               !- Solar Reflectance at Normal
Incidence: Back Side
242     0.898,                               !- Visible Transmittance at Normal
Incidence
243     0.081,                               !- Visible Reflectance at Normal
Incidence: Front Side
244     0.081,                               !- Visible Reflectance at Normal
Incidence: Back Side
245     0.0,                                 !- IR Transmittance at Normal
Incidence
246     0.84,                               !- IR Hemispherical Emissivity: Front
Side
247     0.84,                               !- IR Hemispherical Emissivity: Back
Side
248     0.9;                                 !- Conductivity {W/m-K}
249
250
251 !- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: CONSTRUCTION =====
252
253 CONSTRUCTION,
254     parede,                               !- Name
255     reboco argamassa ext,                !- Outside Layer
256     tijolo barro,                       !- Layer #2
257     reboco argamassa int;               !- Layer #3

```



```

318     SunExposed,           !- Sun Exposure
319     WindExposed,         !- Wind Exposure
320     0.5,                 !- View Factor to Ground
321     4,                   !- Number of Surface Vertex Groups --
Number of (X,Y,Z) groups in this surface
322     0,                   !- Vertex 1 X-coordinate {m}
323     0,                   !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
324     5,                   !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
325     0,                   !- Vertex 2 X-coordinate {m}
326     0,                   !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
327     0,                   !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
328     25,                  !- Vertex 3 X-coordinate {m}
329     0,                   !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
330     0,                   !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
331     25,                  !- Vertex 4 X-coordinate {m}
332     0,                   !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
333     5;                   !- Vertex 4 Z-coordinate {m}
334
335 Surface:HeatTransfer,
336     parede N,            !- User Supplied Surface Name
337     WALL,                !- Surface Type
338     parede,              !- Construction Name of the Surface
339     zona única,          !- Zone Name
340     ExteriorEnvironment, !- OutsideFaceEnvironment
341     ,                    !- OutsideFaceEnvironment Object
342     SunExposed,          !- Sun Exposure
343     WindExposed,         !- Wind Exposure
344     0.5,                 !- View Factor to Ground
345     4,                   !- Number of Surface Vertex Groups --
Number of (X,Y,Z) groups in this surface
346     25,                  !- Vertex 1 X-coordinate {m}
347     0,                   !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
348     5,                   !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
349     25,                  !- Vertex 2 X-coordinate {m}
350     0,                   !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
351     0,                   !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
352     25,                  !- Vertex 3 X-coordinate {m}
353     12,                  !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
354     0,                   !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
355     25,                  !- Vertex 4 X-coordinate {m}
356     12,                  !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
357     5;                   !- Vertex 4 Z-coordinate {m}
358
359 Surface:HeatTransfer,
360     parede W,            !- User Supplied Surface Name
361     WALL,                !- Surface Type
362     parede,              !- Construction Name of the Surface
363     zona única,          !- Zone Name
364     ExteriorEnvironment, !- OutsideFaceEnvironment
365     ,                    !- OutsideFaceEnvironment Object
366     SunExposed,          !- Sun Exposure
367     WindExposed,         !- Wind Exposure
368     0.5,                 !- View Factor to Ground
369     4,                   !- Number of Surface Vertex Groups --
Number of (X,Y,Z) groups in this surface
370     25,                  !- Vertex 1 X-coordinate {m}
371     12,                  !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
372     5,                   !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
373     25,                  !- Vertex 2 X-coordinate {m}
374     12,                  !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
375     0,                   !- Vertex 2 Z-coordinate {m}

```

```

376     0,                !- Vertex 3 X-coordinate {m}
377    12,                !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
378     0,                !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
379     0,                !- Vertex 4 X-coordinate {m}
380    12,                !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
381     5;                !- Vertex 4 Z-coordinate {m}
382
383 Surface:HeatTransfer,
384     parede S,          !- User Supplied Surface Name
385     WALL,              !- Surface Type
386     parede,           !- Construction Name of the Surface
387     zona única,       !- Zone Name
388     ExteriorEnvironment, !- OutsideFaceEnvironment
389     ,                  !- OutsideFaceEnvironment Object
390     SunExposed,        !- Sun Exposure
391     WindExposed,       !- Wind Exposure
392     0.5,               !- View Factor to Ground
393     4,                 !- Number of Surface Vertex Groups --
Number of (X,Y,Z) groups in this surface
394     0,                !- Vertex 1 X-coordinate {m}
395    12,                !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
396     5,                !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
397     0,                !- Vertex 2 X-coordinate {m}
398    12,                !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
399     0,                !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
400     0,                !- Vertex 3 X-coordinate {m}
401     0,                !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
402     0,                !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
403     0,                !- Vertex 4 X-coordinate {m}
404     0,                !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
405     5;                !- Vertex 4 Z-coordinate {m}
406
407 Surface:HeatTransfer,
408     cobertura,         !- User Supplied Surface Name
409     ROOF,              !- Surface Type
410     cobertura galpão, !- Construction Name of the Surface
411     zona única,       !- Zone Name
412     ExteriorEnvironment, !- OutsideFaceEnvironment
413     ,                  !- OutsideFaceEnvironment Object
414     SunExposed,        !- Sun Exposure
415     WindExposed,       !- Wind Exposure
416     autocalculate,    !- View Factor to Ground
417     4,                 !- Number of Surface Vertex Groups --
Number of (X,Y,Z) groups in this surface
418     0,                !- Vertex 1 X-coordinate {m}
419    12,                !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
420     5,                !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
421     0,                !- Vertex 2 X-coordinate {m}
422     0,                !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
423     5,                !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
424    25,                !- Vertex 3 X-coordinate {m}
425     0,                !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
426     5,                !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
427    25,                !- Vertex 4 X-coordinate {m}
428    12,                !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
429     5;                !- Vertex 4 Z-coordinate {m}
430
431 Surface:HeatTransfer,
432     piso,              !- User Supplied Surface Name
433     FLOOR,            !- Surface Type
434     piso,             !- Construction Name of the Surface

```

```

435     zona única,                !- Zone Name
436     Ground,                    !- OutsideFaceEnvironment
437     ,                            !- OutsideFaceEnvironment Object
438     NoSun,                      !- Sun Exposure
439     NoWind,                     !- Wind Exposure
440     autocalculate,             !- View Factor to Ground
441     4,                          !- Number of Surface Vertex Groups --
Number of (X,Y,Z) groups in this surface
442     0,                          !- Vertex 1 X-coordinate {m}
443     12,                        !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
444     0,                          !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
445     25,                        !- Vertex 2 X-coordinate {m}
446     12,                        !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
447     0,                          !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
448     25,                        !- Vertex 3 X-coordinate {m}
449     0,                          !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
450     0,                          !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
451     0,                          !- Vertex 4 X-coordinate {m}
452     0,                          !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
453     0;                          !- Vertex 4 Z-coordinate {m}
454
455
456 !-  ===== ALL OBJECTS IN CLASS: SURFACE:HEATTRANSFER:SUB
=====
457
458 Surface:HeatTransfer:Sub,
459     janela lateral W,           !- User Supplied Surface Name
460     WINDOW,                    !- Surface Type
461     janela,                    !- Construction Name of the Surface
462     parede W,                  !- Base Surface Name
463     ,                            !- OutsideFaceEnvironment Object
464     0.5,                       !- View Factor to Ground
465     ,                            !- Name of shading control
466     ,                            !- WindowFrameAndDivider Name
467     1,                          !- Multiplier
468     4,                          !- Number of Surface Vertex Groups --
Number of (X,Y,Z) groups in this surface
469     25,                        !- Vertex 1 X-coordinate {m}
470     12,                        !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
471     4.5,                       !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
472     25,                        !- Vertex 2 X-coordinate {m}
473     12,                        !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
474     4,                          !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
475     0,                          !- Vertex 3 X-coordinate {m}
476     12,                        !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
477     4,                          !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
478     0,                          !- Vertex 4 X-coordinate {m}
479     12,                        !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
480     4.5;                       !- Vertex 4 Z-coordinate {m}
481
482 Surface:HeatTransfer:Sub,
483     janela lateral E,           !- User Supplied Surface Name
484     WINDOW,                    !- Surface Type
485     janela,                    !- Construction Name of the Surface
486     parede E,                  !- Base Surface Name
487     ,                            !- OutsideFaceEnvironment Object
488     0.5,                       !- View Factor to Ground
489     ,                            !- Name of shading control
490     ,                            !- WindowFrameAndDivider Name
491     1,                          !- Multiplier

```

```

492      4,                                !- Number of Surface Vertex Groups --
Number of (X,Y,Z) groups in this surface
493      0,                                !- Vertex 1 X-coordinate {m}
494      0,                                !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
495      4.5,                              !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
496      0,                                !- Vertex 2 X-coordinate {m}
497      0,                                !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
498      4,                                !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
499      25,                               !- Vertex 3 X-coordinate {m}
500      0,                                !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
501      4,                                !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
502      25,                               !- Vertex 4 X-coordinate {m}
503      0,                                !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
504      4.5;                              !- Vertex 4 Z-coordinate {m}
505
506 Surface:HeatTransfer:Sub,
507     portão metálico,                    !- User Supplied Surface Name
508     DOOR,                              !- Surface Type
509     portão,                             !- Construction Name of the Surface
510     parede N,                          !- Base Surface Name
511     ,                                    !- OutsideFaceEnvironment Object
512     0.5,                                !- View Factor to Ground
513     ,                                    !- Name of shading control
514     ,                                    !- WindowFrameAndDivider Name
515     1,                                   !- Multiplier
516     4,                                   !- Number of Surface Vertex Groups --
Number of (X,Y,Z) groups in this surface
517     25,                                !- Vertex 1 X-coordinate {m}
518     3,                                  !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
519     2.5,                                !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
520     25,                                !- Vertex 2 X-coordinate {m}
521     3,                                  !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
522     0,                                  !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
523     25,                                !- Vertex 3 X-coordinate {m}
524     9,                                  !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
525     0,                                  !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
526     25,                                !- Vertex 4 X-coordinate {m}
527     9,                                  !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
528     2.5;                               !- Vertex 4 Z-coordinate {m}
529
530
531 !- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: REPORT VARIABLE =====
532
533 Report Variable,
534     *,                                   !- Key_Value
535     Zone Mean Air Temperature ,         !- Variable_Name
536     hourly;                             !- Reporting_Frequency
537
538 Report Variable,
539     *,                                   !- Key_Value
540     Outdoor Dry Bulb ,                  !- Variable_Name
541     hourly;                             !- Reporting_Frequency
542
543 Report Variable,
544     *,                                   !- Key_Value
545     Surface Inside Temperature,         !- Variable_Name
546     hourly;                             !- Reporting_Frequency
547
548 Report Variable,
549     *,                                   !- Key_Value
550     Surface outside Temperature,        !- Variable_Name

```

```

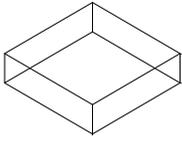
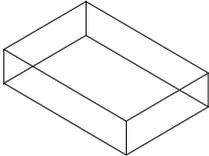
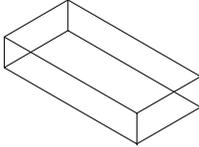
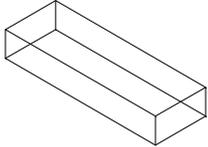
551     hourly;                                !- Reporting_Frequency
552
553 Report Variable,
554     *,                                       !- Key_Value
555     Zone Mean Radiant Temperature, !- Variable_Name
556     hourly;                                !- Reporting_Frequency
557
559 !- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: REPORT =====
560
561 Report,
562     variable dictionary;                    !- Type_of_Report
563
564 Report,
565     construction,                          !- Type_of_Report
566     hourly;                                !- Name_of_Report
Processing Input Data File (in.idf) -- Complete
Number of IDF "Lines"=                      45
Maximum number of Alpha IDF Args=           8
Maximum number of Numeric IDF Args=         15
Getting object=TIMESTEP IN HOUR
Getting object=VERSION
Getting object=RUN CONTROL
Getting object=DESIGNDAY
Getting object=RUNPERIOD
Getting object=LOCATION
Getting object=GROUNDTEMPERATURES
Getting object=REPORT VARIABLE
Getting object=REPORT
Getting object=BUILDING
Getting object=INSIDE CONVECTION ALGORITHM
Getting object=OUTSIDE CONVECTION ALGORITHM
Getting object=SOLUTION ALGORITHM
Getting object=MATERIAL:REGULAR
Getting object=MATERIAL:WINDOWGLASS
Getting object=REPORT
Getting object=CONSTRUCTION
Getting object=ZONE
Getting object=ZONE LIST
Getting object=SURFACEGEOMETRY
Getting object=SURFACE:HEATTRANSFER
Getting object=SURFACE:HEATTRANSFER:SUB
Processing Schedule Input -- Start
Processing Schedule Input -- Complete
MaxRVariable=                               1000
MaxIVariable=                               20
NumEnergyMeters=                             9
NumVarMeterArrays=                           5

```


ANEXO B: TESTE FATOR DE FORMA

Os gráficos abaixo apresentam os resultados de temperatura do ar interno - tbs, simulados para 4 (quatro) modelos de área igual, porém fatores de forma diferentes, para cada dia de referência. Foi realizada uma simulação com e outra sem incidência solar para se avaliar a influência da proporção geométrica, no comportamento térmico da edificação.

CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS TESTADOS

MODELO 01 MT01	MODELO 02 MT02	MODELO 03 MT03	MODELO 04 MT04
Área = 300m ² fator de forma = 1:1 (17,3m x 17,3m)	Área = 300m ² fator de forma = 1:1,5 (14,2 x 21,2)	Área = 300m ² fator de forma = 1:2 (12m x 25m)	Área = 300m ² fator de forma = 1:3 (10m x 30m)
			

GRÁFICOS:

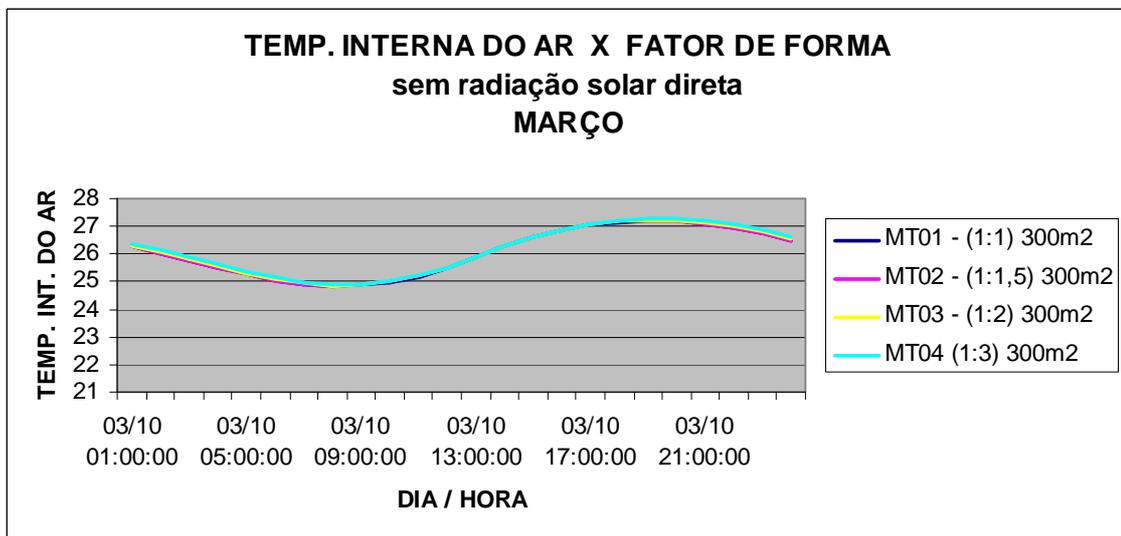


Gráfico A: Temperatura interna do ar sem radiação solar direta - Março

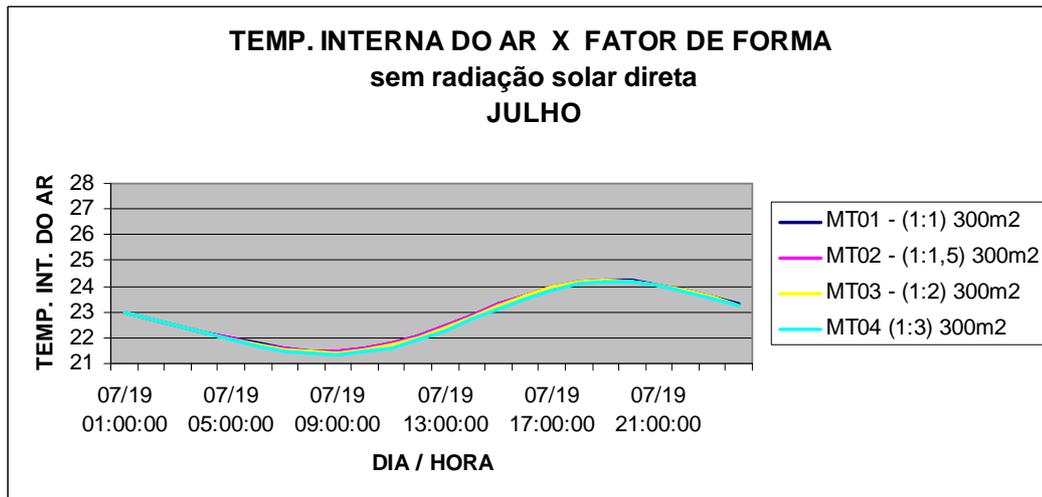


Gráfico B: Temperatura interna do ar sem radiação solar direta - Julho

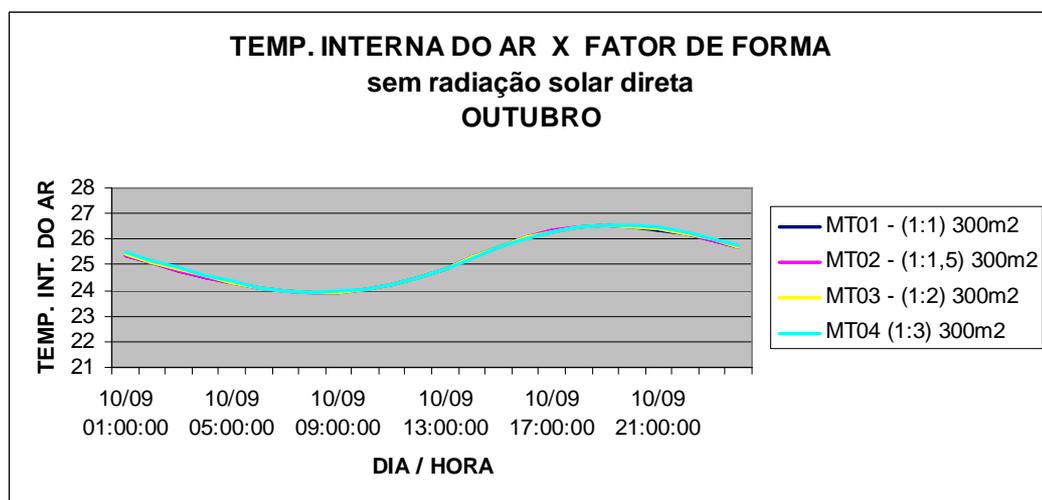


Gráfico C: Temperatura interna do ar sem radiação solar direta - Outubro

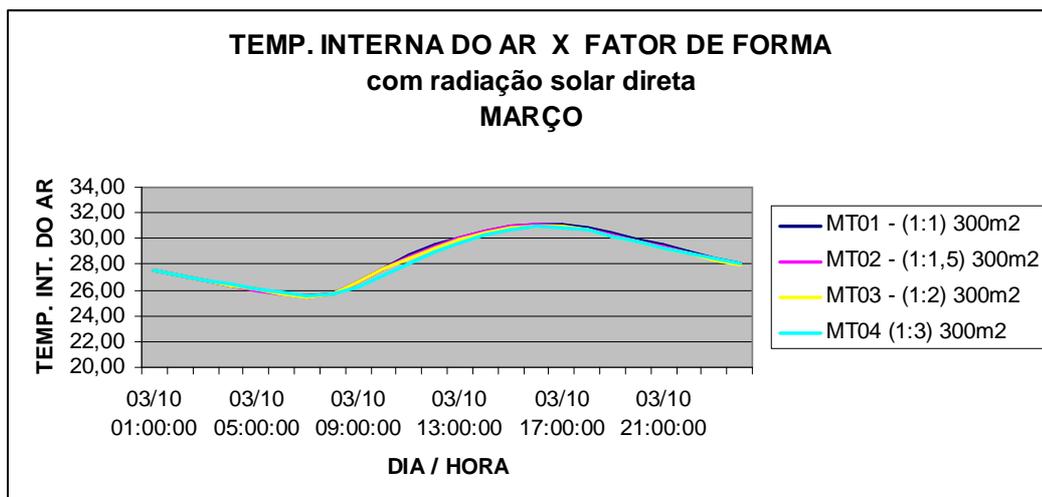


Gráfico D: Temperatura interna do ar com radiação solar direta - Março

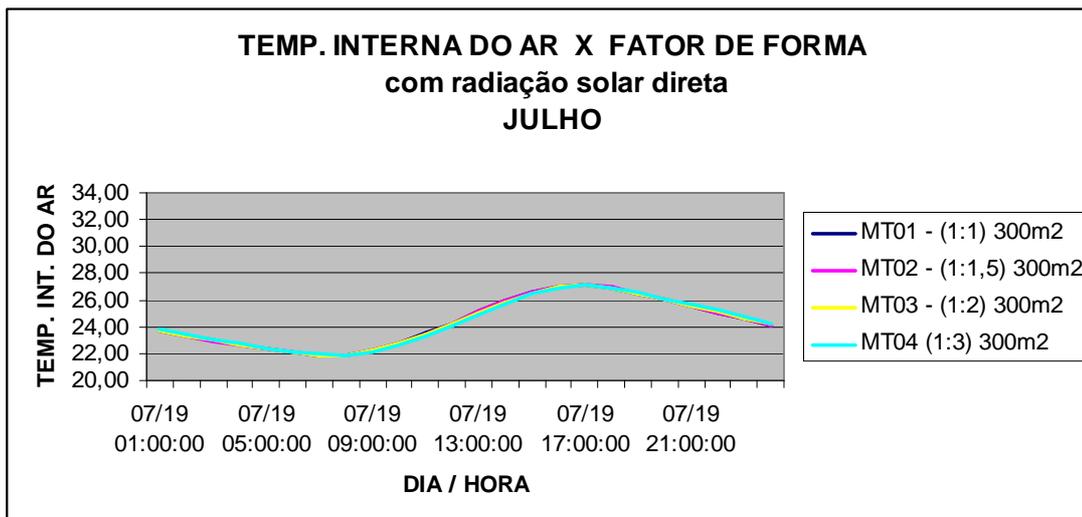


Gráfico E: Temperatura interna do ar com radiação solar direta - Julho

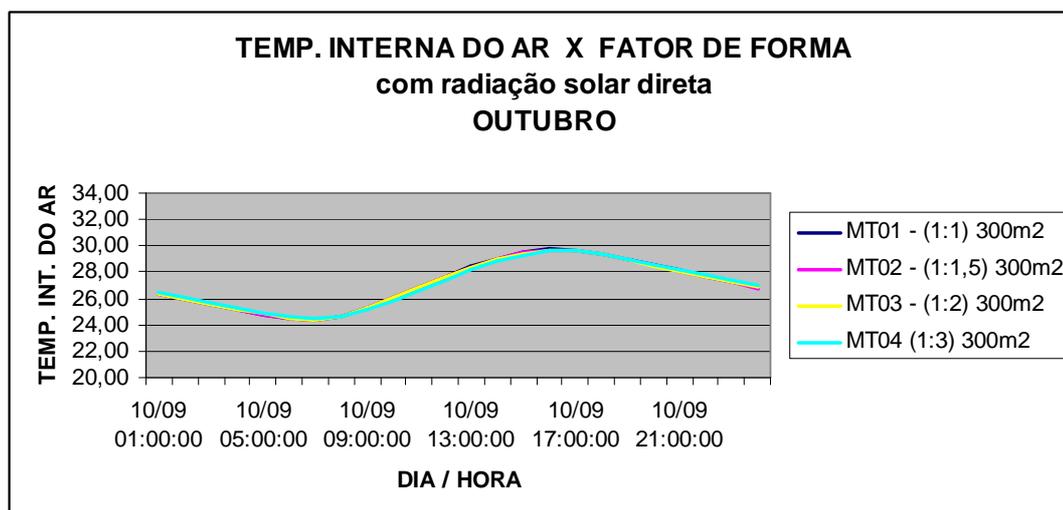


Gráfico F: Temperatura interna do ar com radiação solar direta - Outubro

Percebe-se que não há diferenças significativas entre as temperaturas internas obtidas em cada um dos modelos testados, independentemente do dia de referência ou da incidência de radiação solar. Portanto, considerou-se para servir como modelo de referência para a pesquisa o modelo 03, cujas dimensões de largura e comprimento são 12m e 25m, respectivamente. Estas medidas estão mais próximas à situação real identificada no local, em relação às outras.