



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE TELHADOS NO BRASIL

AMANDA DOS SANTOS GALINDO

Recife, 2015

AMANDA DOS SANTOS GALINDO

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE TELHADOS NO BRASIL.

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos e Sistemas Térmicos.

Linha de pesquisa: Eficiência energética.

Orientador:
Prof. Dr. João Pereira de Brito Filho

Recife, 2015

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

G158e Galindo, Amanda dos Santos.
Eficiência energética de telhados no Brasil / Amanda dos Santos Galindo. – Recife: O Autor, 2015.
135f., il., figs., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. João Pereira de Brito Filho.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2014.
Inclui Referências e Anexo.

1. Engenharia Mecânica. 2. Telhados. 3. Transferência de calor. 4. Conservação de energia. I. Brito Filho, João Pereira (Orientador).
II. Título.

14 de agosto de 2015.

“EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE TELHADOS NO BRASIL”

AMANDA DOS SANTOS GALINDO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSOS E SISTEMAS TÉRMICOS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. JOÃO PEREIRA DE BRITO FILHO
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRÍQUEZ
GUERRERO
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JOÃO PEREIRA DE BRITO FILHO (UFPE)

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRÍQUEZ GUERRERO (UFPE)

Prof. Dr. JOSÉ CLAUDINO DE LIRA JÚNIOR (UFPE)

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, pela força durante esta longa caminhada de vida acadêmica.

Aos meus pais Inês Geruza e Zenivaldo e minhas irmãs Monique e Letícia, pelo apoio incondicional e pela compreensão nas minhas ausências a encontros familiares, devido a compromissos e atividades do curso.

Ao meu amado Ian Victor Leite, por estar sempre ao meu lado, me dando forças para construir este e outros projetos.

Em especial, agradeço pela paciência e dedicação do meu orientador, Professor João Brito Pereira Filho, que me instruiu na elaboração deste trabalho, fornecendo-me apoio material e suporte acadêmico que me engrandeceram piamente ao longo do curso.

Ao Professor Jorge Recarte, pelos conselhos amigos, que tanto me ajudaram no decorrer do mestrado.

Aos funcionários do Programa de pós-graduação em Engenharia mecânica, em especial Luana e Jorge, por serem sempre tão atenciosos e prestativos.

Aos colegas e amigos, mestres e doutores do programa de pós-graduação em engenharia mecânica, que juntos temos o compromisso de contribuir para a evolução da ciência no Brasil.

À Universidade Federal de Pernambuco e ao CNPQ, responsáveis pelo suporte técnico e financeiro deste e de tantos outros projetos desenvolvidos no Centro de Tecnologias.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

(José de Alencar)

RESUMO

O elevado consumo de energia para climatização das edificações tem motivado a realização de muitos trabalhos de pesquisa na área de eficiência energética. Os telhados das construções, em particular, são responsáveis por uma grande parcela do consumo de energia para aquecimento ou refrigeração. Os telhados dos galpões industriais, por serem de grandes extensões, são os principais meios de absorção energética advinda da radiação solar durante os dias, em especial, os dias de verão. Este trabalho apresenta um modelo, desenvolvido em Matlab, que parte do balanço de energia para a superfície do telhado e resolução do mesmo por meio de equações consolidadas da literatura científica, considerando dados de radiação solar incidente e influências da longitude e latitude locais. Com isto, objetiva-se determinar o aquecimento sofrido por cada tipo de telhado analisado e o fluxo de calor que atravessa os mesmos, a fim de que se possa inferir qual telhado possui maior eficiência energética para cada região do país. Foram analisados 4 tipos de telhado, com e sem revestimento reflexivo e isolamento térmico. Constatou-se que tanto as aplicações do isolamento térmico quanto do revestimento reflexivo proporcionam redução do fluxo para o interior dos edifícios, ocasionando melhorias no desempenho térmico dos mesmos.

Palavras-Chave: Telhados. Transferência de Calor. Conservação de energia.

ABSTRACT

The high energy consumption for air conditioning of buildings has motivated the implementation of many research papers in the area of energy efficiency. The roofs of buildings, in particular, account for a large share of energy consumption for heating or cooling. The roofs of industrial buildings, because they are large areas, are the main means of energy absorption arising from solar radiation during the day, especially the summer days. This paper presents a model, developed in Matlab, that part of the energy balance for the roof surface and resolution through consolidated equations of scientific literature, considering data of solar radiation and influences the longitude and latitude locations. With this, the objective is to determine the heating suffered by each type of roof and analyzed the heat flow through them, so that one can infer what roof has greater energy efficiency for each region of the country. 4 roof types were analyzed with and without reflective coating and thermal insulation. It was found that both the thermal insulation applications as reflective coating provide the reduction in flow to the interior of buildings, resulting in improved thermal performance thereof.

Keywords: Roofs. Heat transfer. Energy conservation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Temperaturas mínimas para os meses de verão (Dez Jan Fev Mar).	15
Figura 2 - Temperaturas máximas para os meses de verão (Dez Jan Fev Mar).	16
Figura 3 - Temperaturas mínimas para os meses de outono (Mar Abr Mai Jun).	16
Figura 4 – Temperaturas máximas para os meses de outono (Mar Abr Mai Jun).	17
Figura 5 - Temperaturas mínimas para os meses de inverno (Jun Jul Ago Set).	17
Figura 6 - Temperaturas máximas para os meses de inverno (Jun Jul Ago Set).	18
Figura 7 - Temperaturas mínimas para os meses de primavera (Set Out Nov Dez).	18
Figura 8 -Temperaturas máximas para os meses de primavera (Set Out Nov Dez).	19
Figura 9 – Climas do Brasil, segundo Arthur Strahler.	20
Figura 10 - Ilha de calor.	21
Figura 11 – Consumo típico de energia elétrica de residências brasileiras.	22
Figura 12 - Tipos de água de telhados.	26
Figura 13 - Elementos de uma tesoura e terminologia.	27
Figura 14 - Estimativa de vida útil de aços zincados em diferentes atmosferas.	28
Figura 15 – Telha de aço zincado.	28
Figura 16 – Telha autoportante.	29
Figura 17 – Telha de alumínio.	30
Figura 18 – Telha plástica.	30
Figura 19 – Telha de cerâmica.	31
Figura 20 – Telha de cerâmica.	32
Figura 21 – Telha de amianto.	33
Figura 22 – Telha de fibra vegetal.	33
Figura 23 – Telha de tubo de creme dental.	34
Figura 24 – Telha de concreto.	35
Figura 25 – Telha de policarbonato.	36
Figura 26 - Perfil lateral da telha tipo dânica (aço-aço).	36
Figura 27 - Esquemas das trocas de calor de um telhado.	37
Figura 28 - Espectro da radiação solar.	41
Figura 29 - Fluxo de calor que atravessa telhado, comparado ao seu isômero branco.	43
Figura 30 - Alteração da amostra S-16 ao longo dos 2,5 meses de pesquisa.	45
Figura 31 – Resultados de medições em campo da refletência solar periódica.	45
Figura 32 – Telhado composto por aço zincado e lâ de rocha. Foto do Centro de Energias Renováveis-UFPE, 2015.	46
Figura 33 - Análise comparativa da condutividade dos materiais isolantes.	47
Figura 34. Hotel Fairmount em Vancouver, Canadá.	48
Figura 35 - Variação da taxa de transferência de calor comparativa.	49
Figura 36 – Máxima variação de temperatura para os telhados convencional e verde.	50
Figura 37 - Telhado tipo espelho d'água coberto com ventilação elétrica forçada.	54
Figura 38 - Sistema de pulverizadores simples sobre telhado.	55
Figura 39 - Sistema de pulverizadores com sistema de recuperação e filtragem.	56
Figura 40 - Cobertura pergolada. South China University of Technology.	58
Figura 41 - Cortina feita de pepino e plantas, Japão.	59

Figura 42. Esquema do sombreamento e troca do ar confinado para a dupla fachada.	60
Figura 43 – Cidades representativas para cada domínio climático.....	63
Figura 44 - Representação das quatro variações de coberta analisadas.....	64
Figura 45 – Volume de controle e direcionamento do fluxo térmico.....	66
Figura 46 – Balanço de energia na superfície do telhado (volume de controle).	67
Figura 47 – Calor transferido durante qualquer intervalo de tempo.....	70
Figura 48 – Troca de calor com o ambiente externo por convecção.	71
Figura 49 - Deslocamento e ângulo horário do Sol.	73
Figura 50 - Calor da radiação solar que entra no ambiente.	73
Figura 51 – Calor perdido por radiação para o ambiente externo.	74
Figura 52 – Calor da radiação solar que entra no ambiente.....	75
Figura 53 – Declinação solar.	77
Figura 54 – Inclinação do telhado a partir da superfície horizontal.	78
Figura 55 - Processo de determinação do ângulo de azimuth para superfície simulada.....	79
Figura 56 – Ângulo zenital.	80
Figura 57 – Volume de controle para cálculo de Tsa.	86
Figura 58 – Modelo da resistência para o processo de transferência de calor.....	86
Figura 59 - Interface programa-usuário, com destaque para os campos de dados.	90
Figura 60- Comparativo das temperaturas médias do ambiente externo (To).....	93
Figura 61 - Radiação solar incidente (Hh).....	94
Figura 62 - Radiação solar total incidente (Gtk).....	95
Figura 63 – Análise da temperatura da superfície do telhado (TRC) para Manaus.....	96
Figura 64 – Análise da temperatura da superfície do telhado (TRC) para Cuiabá.	97
Figura 65 – Análise da temperatura da superfície do telhado (TRC) para Teresina.	98
Figura 66 – Análise da temperatura da superfície do telhado (TRC) para Recife.....	99
Figura 67 – Análise da temperatura da superfície do telhado (TRC) para Curitiba.	100
Figura 68 – Análise da temperatura da superfície do telhado (TRC) para B.H.....	101
Figura 69 – Análise da temperatura Sol-ar (Tsa) para Manaus	102
Figura 70 – Análise da temperatura Sol-ar (Tsa) para Cuiabá.	103
Figura 71 – Análise da temperatura Sol-ar (Tsa) para Teresina.	104
Figura 72 – Análise da temperatura Sol-ar (Tsa) para Recife.	105
Figura 73 – Análise da temperatura Sol-ar (Tsa) para Curitiba.....	106
Figura 74 – Análise da temperatura Sol-ar (Tsa) para B.H.	107
Figura 75 – Quadro resumo para Tsa e T_{RC}	108
Figura 76 – Quadro comparativo entre Telhados 1A e 1B.	109
Figura 77 - Fluxo térmico que atravessa os telhados 1A, 1B, 2A e 2B para Manaus.	111
Figura 78 - Comparativo do fluxo térmico que atravessa os telhados 1A, 1B, 2A e 2B..	111
Figura 79 - Fluxo térmico que atravessa os telhados 1A, 1B, 2A e 2B para Cuiabá.....	112
Figura 80 - Comparativo do fluxo térmico que atravessa os telhados 1A, 1B, 2A e 2B..	112
Figura 81 - Fluxo térmico que atravessa os telhados 1A, 1B, 2A e 2B para Teresina.	113
Figura 82 - Comparativo do fluxo térmico que atravessa os telhados 1A, 1B, 2A e 2B..	113
Figura 83 - Fluxo térmico que atravessa os telhados 1A, 1B, 2A e 2B para Recife.....	114
Figura 84 - Comparativo do fluxo térmico que atravessa os telhados 1A, 1B, 2A e 2B..	114
Figura 85 - Fluxo térmico que atravessa os telhados 1A, 1B, 2A e 2B para Curitiba.....	115

Figura 86 - Comparativo do fluxo térmico que atravessa os telhados 1A, 1B, 2A e 2B..	115
Figura 87 - Fluxo térmico que atravessa os telhados 1A, 1B, 2A e 2B para B.H.	116
Figura 88 - Comparativo do fluxo térmico que atravessa os telhados 1A, 1B, 2A e 2B..	116
Figura 89 – Análise gráfica do desempenho térmico dos telhados.....	117
Figura 90 - Análise numérica do desempenho térmico dos telhados.	117
Figura 91 - Mapa de eficiência energética dos telhados no Brasil.	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo de demanda energética entre telhado convencional e telhado verde para as cidades de Atenas, La Rochelle e Estocolmo.	50
Tabela 2 - Propriedades termofísicas dos materiais.	64
Tabela 3 - Formas de obtenção dos termos do balanço de energia.	69
Tabela 4 - Dia típico de cada mês.	82

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIações

Latim	Significado	Unidades
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção	W/m^2K
$\overline{H}_d$	Irradiância média mensal difusa sobre superfície horizontal	$J/m^2 \cdot dia$
$\overline{H}_h$	Radiação solar incidente	$J/m^2 \cdot dia$
$\overline{H}_0$	Irradiação extraterrestre diária em uma superfície horizontal	$J/m^2 \cdot dia$
I_{bn}	Radiação direta no plano normal à direção dos raios solares	W/m^2
I_d	Irradiância horária média mensal difusa no plano horizontal do lugar	W/m^2
I_h	Radiação total no plano horizontal do lugar	W/m^2
I_o	Constante solar	W/m^2
I_{oeff}	Radiação solar extraterrestre na direção normal aos raios solares	W/m^2
k	Condutividade térmica	W/mK
$\overline{K}_t$	Parâmetro de transmitância atmosférica para valores diários	-
L	Espessura	m
n	Dia do ano	-
R	Resistência térmica	m^2K/W
r_d	Fator de conversão da radiação difusa	W/m^2
r_h	Fator de conversão da radiação hemisférica (ou total)	W/m^2
t	Tempo do dia	h

Grego	Significado	Unidades
β	Ângulo de inclinação do telhado	rad
δ	Declinação solar	rad
ε	Emissividade no infravermelho	-
Φ	Azimute da superfície (orientação com relação à linha Norte-Sul)	rad
θ	ângulo de incidência	rad
θ_z	ângulo zenital (medida sobre o círculo vertical da Terra)	rad
λ	Latitude	rad
ρ	Refletividade no espectro da radiação solar	-
σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($= 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$)	W/m^2K^4
ω	Ângulo horário que expressa o instante do dia ($= 2\pi t/\tau_{day}$)	rad
ω_s	Ângulo horário do sol	rad

Índices	Significado
o	Ambiente externo (atmosfera)
i	Ambiente interno (recinto)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
1. 1.	ASPECTOS CLIMÁTICOS BRASILEIROS.....	15
1. 2.	ILHAS DE CALOR URBANAS.....	21
1. 3.	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	22
1. 4.	USO PASSIVO DA ENERGIA SOLAR EM EDIFICAÇÕES.....	23
1. 5.	ENUNCIADO DO PROBLEMA PROPOSTO NA DISSERTAÇÃO.....	25
1. 5. 1.	Objetivos gerais.....	25
1. 5. 2.	Objetivos específicos.....	25
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	26
2. 1.	TELHADOS.....	26
2. 1. 1.	Tecnologias tradicionais de telhamento.....	37
2. 2.	PAPEL DOS TELHADOS NO CONFORTO TÉRMICO.....	38
2. 3.	TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	38
2. 3. 1.	Condução.....	38
2. 3. 2.	Convecção.....	39
2. 3. 3.	Radiação.....	40
2. 4.	RADIAÇÃO SOLAR.....	41
2. 5.	REVISÃO DA LITERATURA.....	42
2. 5. 1.	Eficientização energética de telhados.....	42
3.	MODELO.....	61
3. 1.	MODELAGEM.....	61
3. 2.	SOFTWARES DE MODELAGEM.....	61
3. 2. 1.	O Matlab.....	61
3. 3.	PREMISSAS DO MODELO.....	62
3. 3. 1.	Cidades analisadas.....	62
3. 3. 2.	Geometria e material do telhado.....	63
3. 3. 3.	O balanço de energia.....	65
3. 4.	EQUAÇÕES DO MODELO.....	70
3. 4. 1.	Especificações.....	84
3. 4. 2.	Obtenção da Temperatura Sol-ar.....	85
3. 5.	DESENVOLVIMENTO DO CÓDIGO EM MATLAB.....	89
3. 5. 1.	Entradas.....	90
3. 5. 2.	Saídas.....	91
3. 5. 3.	Fluxograma do Modelo.....	92
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	93

4. 1.	COMPARATIVO DAS TEMPERATURAS MÉDIAS DO AMBIENTE EXTERNO...	93
4. 2.	COMPARATIVO DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE.....	94
4. 3.	COMPARATIVO DAS TEMPERATURAS DOS TELHADOS.....	96
4. 3. 1.	Temperatura da superfície do telhado (T_{RC}).....	96
4. 3. 2.	Temperatura Sol-ar (T_{sa}).....	102
4. 3. 3.	Quadro resumo para os valores de T_{RC} e T_{sa}.....	108
4. 4.	FLUXO DE CALOR QUE ATRAVESSA O TELHADO.....	109
4. 4. 1	Comparativo do fluxo térmico para cada tipo de telhado analisado.....	110
4. 4. 2.	Síntese da análise comparativa de fluxos.....	117
4. 5.	MAPA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DOS TELHADOS NO BRASIL.....	118
5.	CONCLUSÃO.....	119
6.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	121
	REFERÊNCIAS.....	122
	ANEXO I.....	128

1 INTRODUÇÃO

1.1. ASPECTOS CLIMÁTICOS BRASILEIROS

O Brasil é um país de dimensões continentais, apresentando uma grande variedade de zonas climáticas, que diferem em função principalmente de sua latitude e da umidade do local, bem como da distância quanto a regiões florestais ou zonas litorâneas. Como resultado, percebe-se possuírem as diversas regiões do país vegetação e clima bastante característicos, havendo desde áreas com condições climáticas de poucas alterações sazonais até outras com mudanças típicas, constituindo as quatro estações do ano: primavera, verão, outono e inverno.

Em geral, nota-se que, quanto mais ao norte do país, isto é, mais próximo à linha do equador, menos significativa será a variação climática ao longo do ano. Assim, as temperaturas das regiões norte e nordeste, em média, variam entre 23°C e 35°C. Por outro lado, áreas mais afastadas em relação à linha do equador, como as regiões sul e sudeste, exibem intervalos maiores de variação na temperatura, com médias que podem oscilar entre 10°C e 30°C. Essas informações podem ser visualizadas nas Figuras de 1 a 8, que representam as temperaturas máximas e mínimas para todo o território brasileiro no decorrer do ano.



Figura 1 - Temperaturas mínimas para os meses de verão (Dez | Jan | Fev | Mar).
Fonte: Adaptado pela Autora, de INPE (2015).

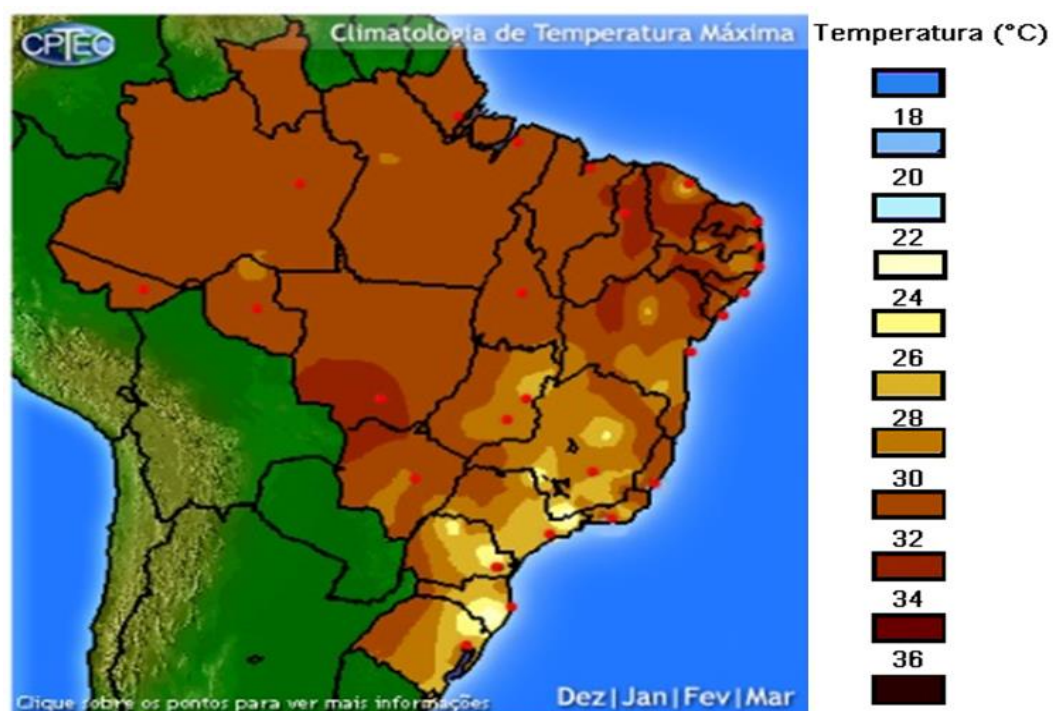


Figura 2 - Temperaturas máximas para os meses de verão (Dez | Jan | Fev | Mar).
Fonte: Adaptado pela Autora, de INPE (2015).

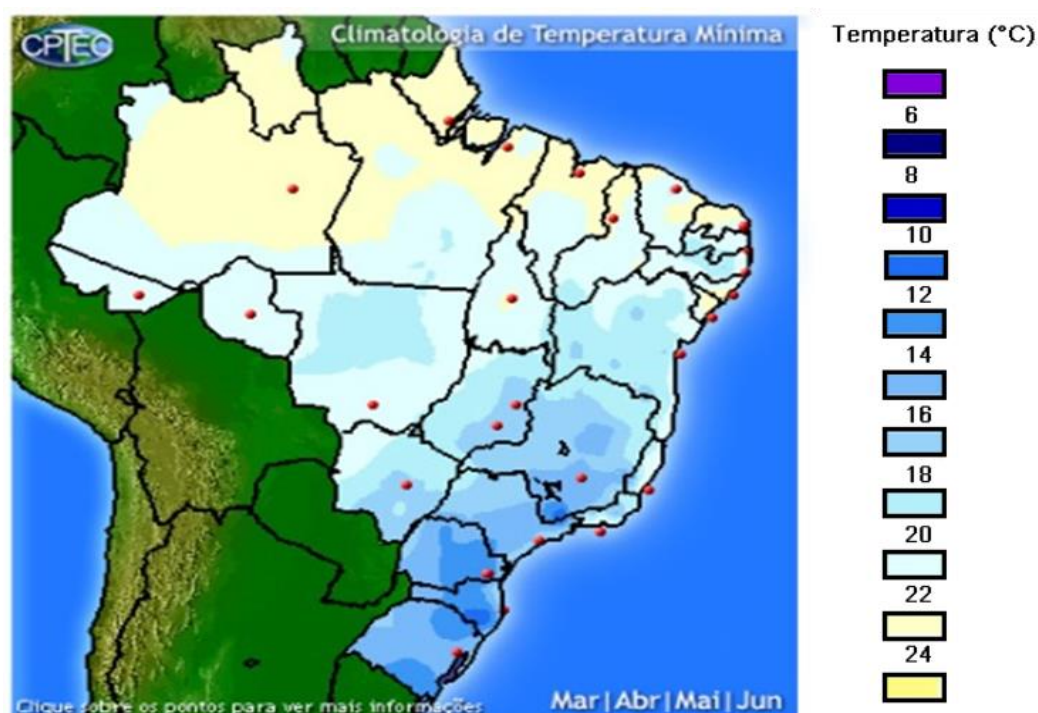


Figura 3 - Temperaturas mínimas para os meses de outono (Mar | Abr | Mai | Jun).
Fonte: Adaptado pela Autora, de INPE (2015).

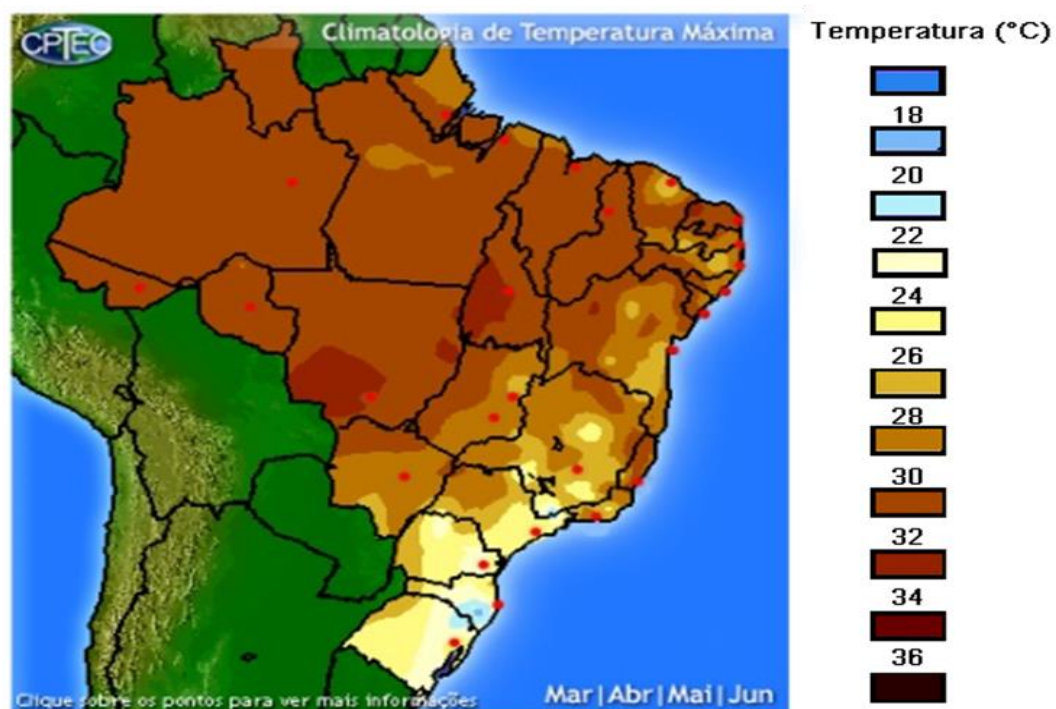


Figura 4 – Temperaturas máximas para os meses de outono (Mar |Abr| Mai| Jun).
Fonte: Adaptado pela Autora, de INPE (2015).

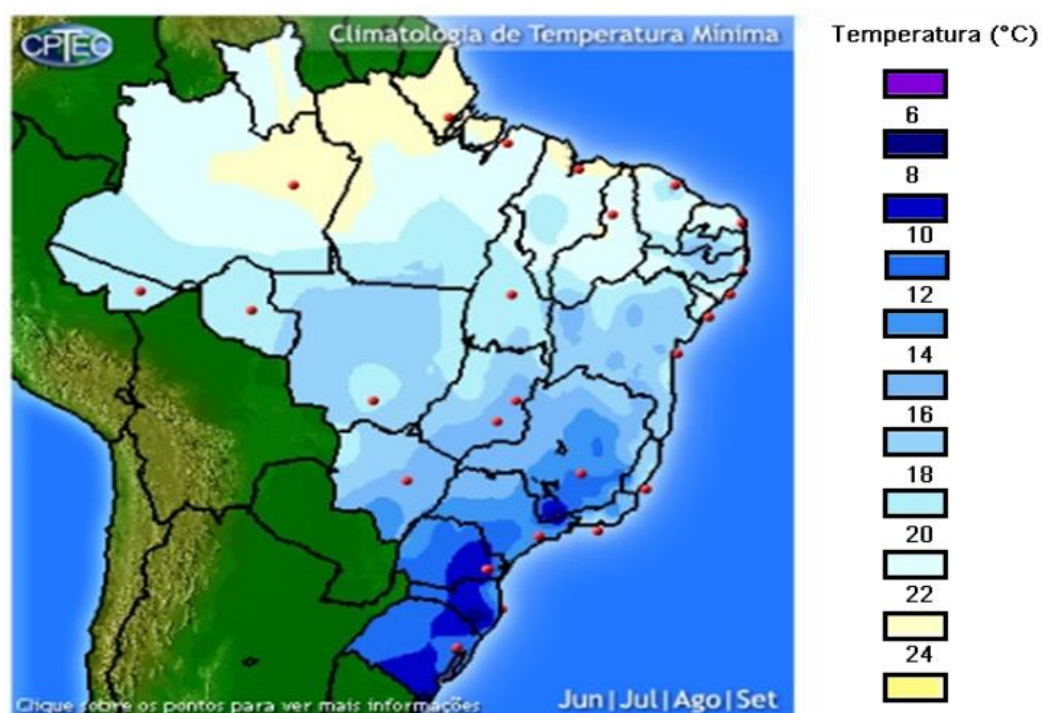


Figura 5 - Temperaturas mínimas para os meses de inverno (Jun |Jul| Ago| Set).
Fonte: Adaptado pela Autora, de INPE (2015).

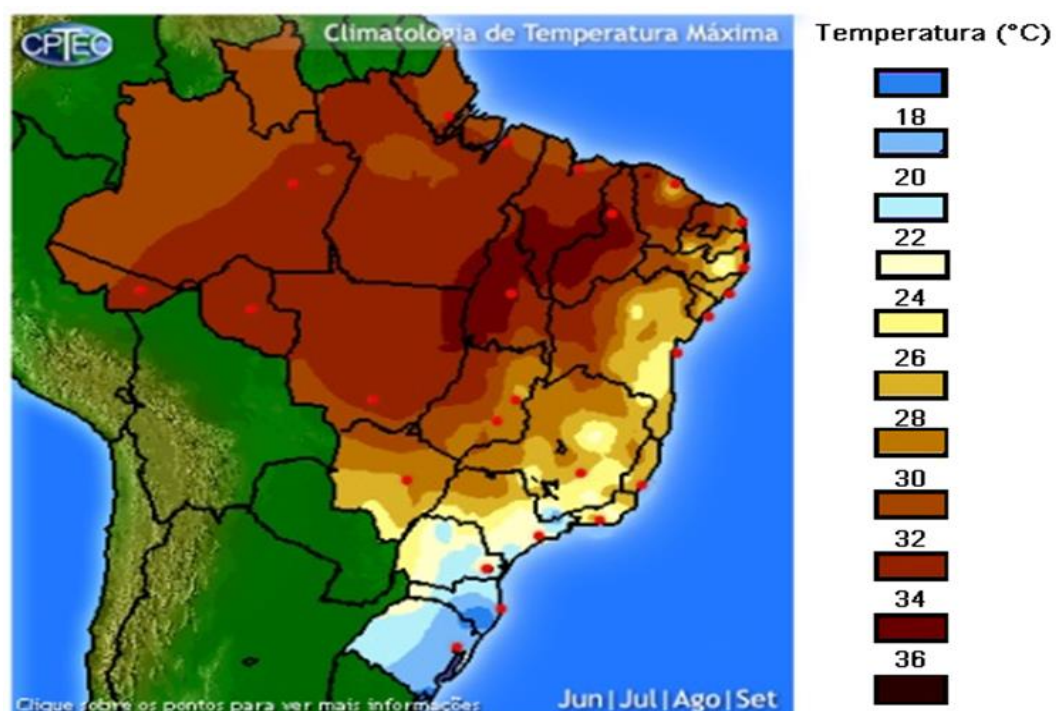


Figura 6 - Temperaturas máximas para os meses de inverno (Jun | Jul | Ago | Set).
Fonte: Adaptado pela Autora, de INPE (2015).

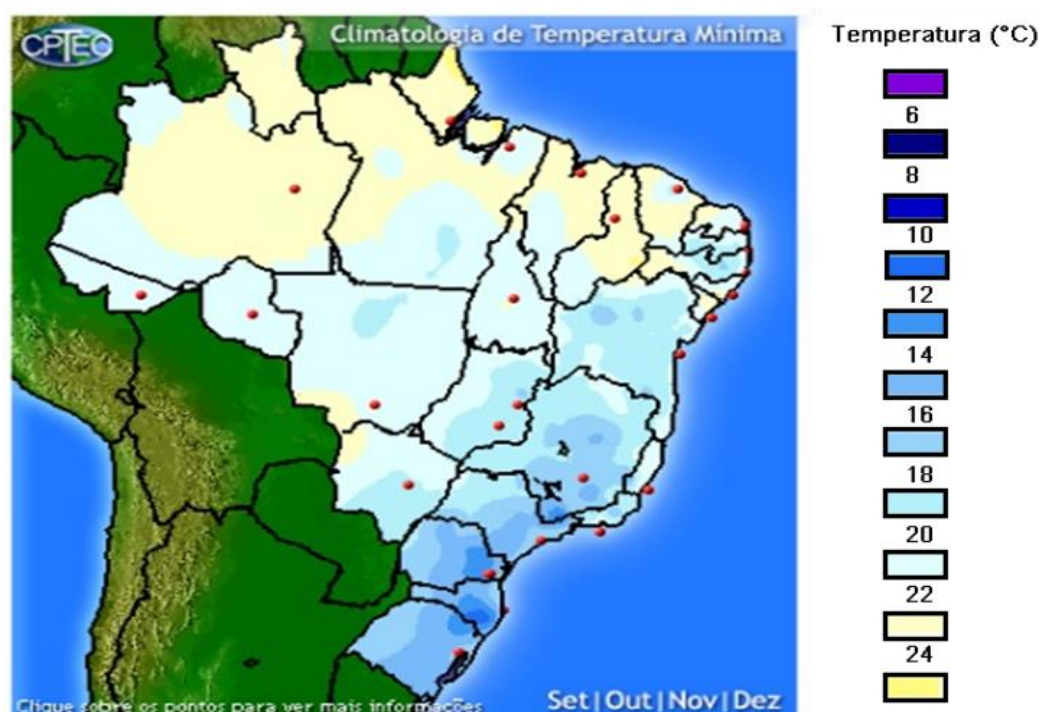


Figura 7 - Temperaturas mínimas para os meses de primavera (Set | Out | Nov | Dez).
Fonte: Adaptado pela Autora, de INPE (2015).

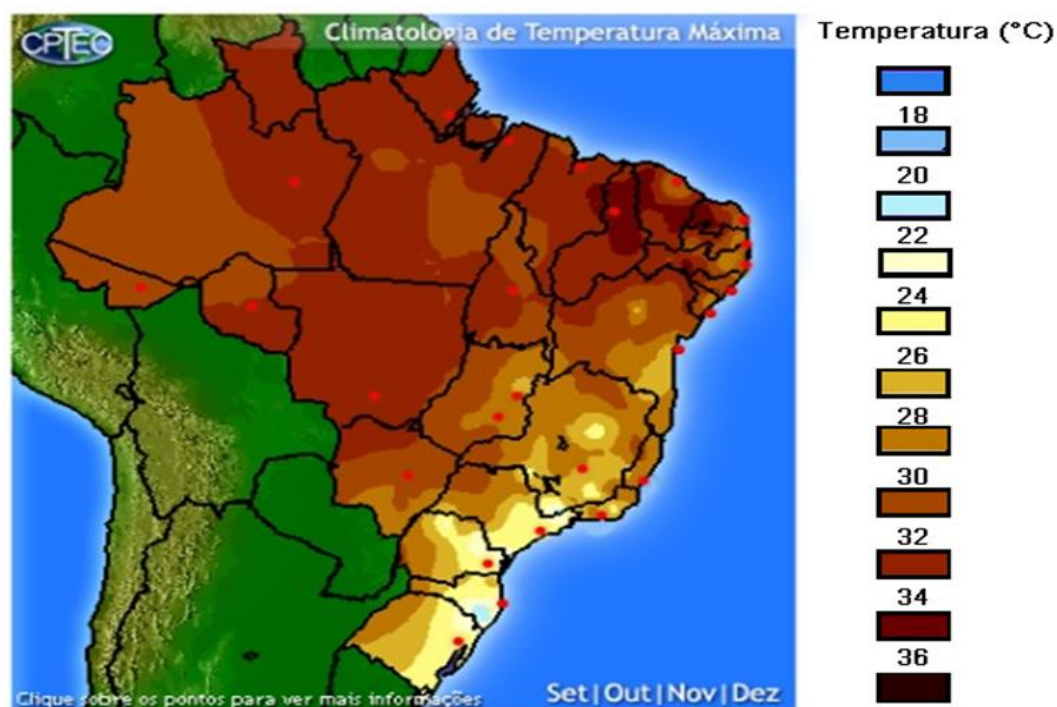


Figura 8 -Temperaturas máximas para os meses de primavera (Set |Out| Nov| Dez).
Fonte: Adaptado pela Autora, de INPE (2015).

Com o propósito de modelar as diferentes características climáticas de cada região brasileira, diversas classificações para os tipos de clima do Brasil foram propostas. Dentre essas, a mais utilizada se baseia nos trabalhos do geógrafo Arthur Strahler, que considera a circulação das massas de ar como o fator mais importante para a caracterização climática. Por essa classificação, apresentada na Figura 9, entende-se que o Brasil possui seis domínios climáticos, sendo eles:

1. **Equatorial:** Determinado pela massa de ar equatorial continental. Possui elevadas taxas de umidade, sendo o índice pluviométrico anual superior a 2500 mm, altas temperaturas e baixa amplitude térmica anual;
2. **Tropical:** Apresenta amplitudes térmicas elevadas ao longo do ano, com duas estações bem definidas: verão chuvoso e inverno seco;
3. **Semi-árido:** É o clima brasileiro com menor índice pluviométrico anual (por vezes, inferior a 500 mm). Possui temperaturas médias elevadas;

4. **Litorâneo:** Abrange a faixa da costa tropical atlântica. Apresenta chuvas concentradas no inverno e médias térmicas elevadas;
5. **Sub-Tropical:** Representativo do sul do país, apresenta o segundo maior índice pluviométrico anual (cerca de 2500 mm) e estações do ano bem definidas;
6. **Tropical de altitude:** É encontrado nas áreas de maior altitude, sendo mais frio e úmido que o Tropical típico tanto no verão quanto para o inverno.

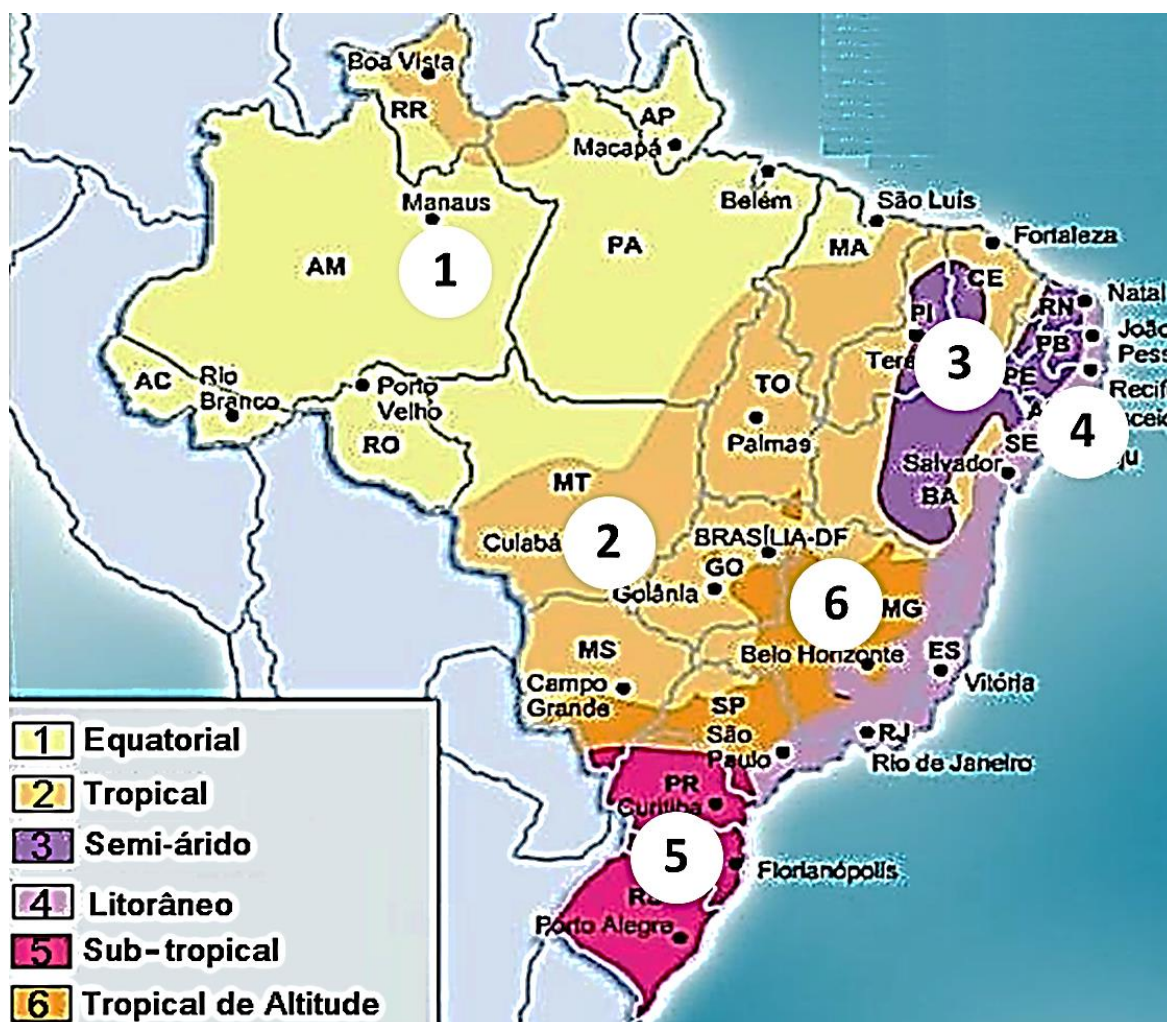


Figura 9 – Climas do Brasil, segundo Arthur Strahler.

Fonte: Adaptado pela Autora, de www.aboutbrasil.com.

1.2. ILHAS DE CALOR URBANAS

A temperatura do ar ambiente nas cidades é mais quente do que numa área rural. Estas diferenças de temperaturas são ainda maiores durante a noite. Situação esta que se agrava para superfícies de cores escuras.

As denominadas “Ilhas de calor” se formam quando a paisagem natural é substituída por ruas asphaltadas, estacionamentos pavimentados e construção de edificações. Isso se deve ao fato das superfícies presentes no meio urbano reduzirem a evapotranspiração, além de possuírem diferentes capacidades caloríficas, condutividades térmicas e emissividades, absorvendo energia solar durante o dia e liberando o calor a noite, fazendo a temperatura ambiente aumentar.

Segundo Oliveira (2013), dentre os principais impactos causados pelo fenômeno das ilhas de calor estão o aumento da temperatura do ar, o desconforto térmico, o aumento do número de casos de problemas de saúde, além da diminuição da eficiência energética dos edifícios. A Figura 10 mostra o impacto das ilhas de calor no meio urbano, com temperaturas aumentadas em até 4°C nos centros urbanos, se comparado às áreas rurais.

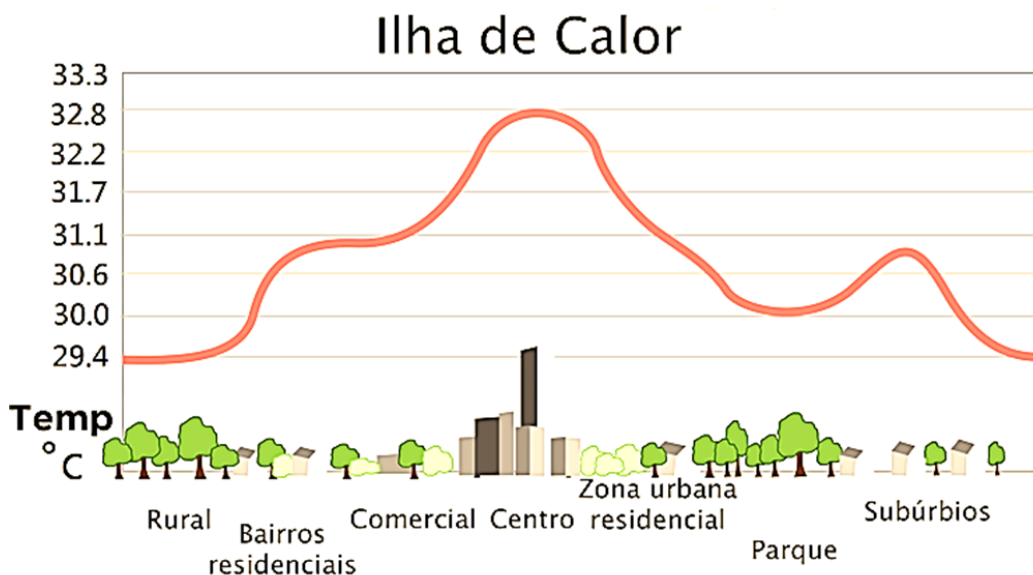


Figura 10 - Ilha de calor.

Fonte: reurb.blogspot.com.br

1.3. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

De maneira geral, altas temperaturas estimulam a necessidade de refrigeração dos ambientes. Com o aumento do consumo energético e por outro lado, das tarifas brasileiras, além da possibilidade de crise energética em caso de falta de água, pois 65,2% da geração de energia elétrica do país são advindos das hidrelétricas, tem-se buscado formas de minimizar os gastos com a energia elétrica.

Para a Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), “a *eficiência energética* consiste em obter o melhor desempenho na produção de um serviço com o menor gasto de energia. Como exemplo de ação, está a modernização de equipamentos e processos no sentido de reduzi-los seu consumo. Os programas voltados para o consumo consciente também contribuem para a economia”.

Um estudo feito pelo departamento de energia dos Estados Unidos estima que o consumo de energia em edifícios em 2006 representou 38% do total da energia utilizada no país. A maior parte dessa energia (42,3%) é empregada no aquecimento e refrigeração dos edifícios. Isso representa 16,45% do consumo total a um custo anual de U\$ 134 bilhões, (U.S. Department of Energy, 2008).

Seguindo esta mesma análise, dados do consumo típico de energia elétrica residencial no Brasil, disponíveis na Figura 11, apontam a refrigeração como maior responsável pelo consumo energético residencial, cerca de 32%.

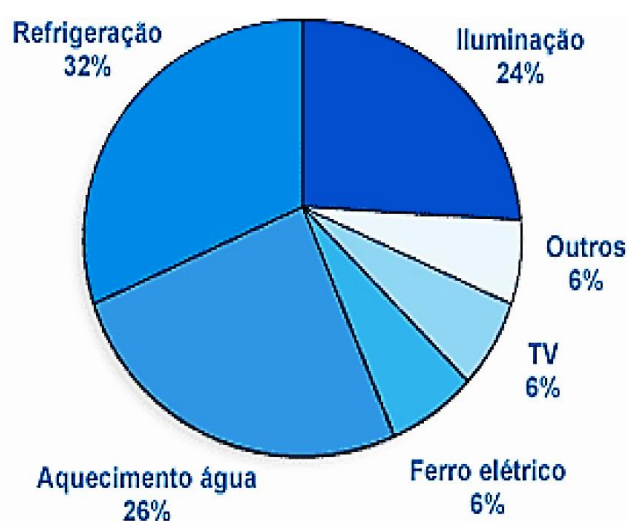


Figura 11 – Consumo típico de energia elétrica de residências brasileiras.

Fonte: www.celpe.com.br

1.4. USO PASSIVO DA ENERGIA SOLAR EM EDIFICAÇÕES

Além da busca de alternativas energéticas, como a eólica e solar, acima de tudo, a efficientização do uso faz-se necessária tanto para evitar gastos quanto para preservar investimentos e recursos e alocá-los para usos mais efetivos. Por esta razão, tem-se buscado soluções com vistas a reduzir a perda de energia nos telhados dos edifícios.

Avanços significativos foram feitos na área de conservação de energia nos últimos anos. No passado, não foi dada muita importância para a construção de edifícios energeticamente eficientes devido a grande oferta de combustível e ao seu baixo preço. De fato, muitas construções são pouco isoladas ou não têm isolamento térmico. Estima-se que para uma única família a carga térmica demandada pelo telhado seja três vezes maior do que a das paredes (ASHRAE,1997).

A troca de calor entre o telhado e o meio ambiente externo se processa por meio de três mecanismos: convecção, evaporação e radiação. A transferência de calor por convecção é diretamente proporcional à diferença de temperatura entre a superfície exposta e o ar ambiente. A constante de proporcionalidade depende principalmente da velocidade do vento. O sentido do fluxo de calor é sempre a partir da mais alta temperatura para a mais baixa. Assim, o ar ambiente pode aquecer ou esfriar um telhado. A evaporação é um mecanismo usado para remover calor de um telhado previamente molhado durante os meses de verão.

Um terceiro mecanismo importante para a transferência de calor é a radiação. Este modo de troca de energia ocorre durante dias e noites e é responsável por uma percentagem significativa do total de calor transferido. Três propriedades de superfície são importantes na transferência de calor por radiação: a absortividade (α), a refletividade (ρ) e a emissividade (ε). Todas elas têm valores que variam de zero a um. Uma superfície com $\alpha = 1$ absorve toda a energia da radiação incidente. Por outro lado, uma superfície com $\rho = 1$ reflete toda radiação incidente. A emissividade descreve quão bem uma superfície emite energia por radiação. Para materiais opacos, a absortividade e a refletividade são relacionadas pela seguinte expressão:

$$\alpha + \rho = 1. \quad (1.1)$$

Assim, um bom absorvedor é inerentemente um refletor ruim e vice-versa. Uma lei da radiação relevante é a de Kirchhoff que estabelece o seguinte:

$$\varepsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda}. \quad (1.2)$$

Assim, um bom absorvedor num comprimento de onda particular (λ) é também é um bom emissor de calor neste mesmo comprimento de onda. Como será visto no capítulo de radiação solar, objetos terrestres absorvem e emitem energia do espectro solar de longo comprimento de onda, da ordem de metros. Este fato desempenha um papel importante na procura de soluções ótimas para conservação de energia em telhados.

A radiação é tão importante à noite como é durante os dias ensolarados. A radiação noturna ocorre entre uma superfície e o céu. Como a temperatura do céu a noite é muito baixa, o calor é sempre transferido do telhado para o céu. Isto ocorre independentemente da temperatura do ar ambiente, tanto durante as noites de verão, como nas noites de inverno. Compreender esse fenômeno da perda de calor por radiação a noite é crucial para o projeto de telhados energeticamente eficientes.

Para Frota (1995), especialmente em se tratando de lugares de clima quente, deve-se evitar que a radiação solar direta atinja as construções e penetre excessivamente nos ambientes, a fim de prevenir-se ganhos excessivos de calor. Partindo desse princípio as coberturas industriais tem papel fundamental na diminuição do ganho energético interno devido à radiação solar e conseqüentemente, podem proporcionar maior ou menor conforto térmico aos trabalhadores que atuam no interior dessas construções.

No exercício das atividades laborais, diferentes atividades de leve, moderada e intensa movimentação são executadas ao longo do dia pelos trabalhadores. O ambiente no qual os mesmos se encontram e o conforto térmico ao qual são submetidos é de extrema importância para o bem estar físico e psicológico dos mesmos.

Os principais materiais utilizados para cobrimento ou telhamento de coberturas incluem a Chapa de aço zincado, telhas autoportantes, telhas de alumínio, além de plásticas, cerâmicas e fibrocimento. A escolha do material mais adequado a um projeto depende de diversos fatores, dentre eles o custo, que impacta diretamente na qualidade final do conjunto (Metálica,2015).

1.5. ENUNCIADO DO PROBLEMA PROPOSTO NA DISSERTAÇÃO

1.5.1. Objetivos Gerais

O trabalho aqui desenvolvido consiste em se testar, por meio de simulações, diferentes tipos de cobertas, com e sem isolamento e revestimentos reflexivos. Não se objetiva a obtenção de dados quantitativos, por isso não houve validação por meio de dados empíricos, mas sim, deseja-se uma análise qualitativa do fluxo para cada tipo de telhado, a fim de que se possa comparar o desempenho térmico dos mesmos em relação a sua eficiência energética e a mitigação dos efeitos das ilhas urbanas de calor.

Para tanto, elaborou-se um modelo matemático que permite prever o aquecimento dos telhados para cada cidade representativa da região climática brasileira, sendo um total de seis regiões. Ainda, serão avaliados quatro diferentes tipos de telhado, que representam os tipos mais utilizados atualmente no Brasil.

1.5.2. Objetivos específicos

- Obtenção das temperaturas dos telhados (T_R) e temperatura Sol-ar (T_{sa}) para cada material analisado, em cada cidade, sendo um total de seis cidades representativas, para avaliação da contribuição dos mesmos na formação de ilhas de calor;
- Cálculo do fluxo de calor (Q) que atravessa cada coberta e seu efeito na efficientização do uso energético;
- Análise das configurações adequadas para cada região para fins de redução da demanda energética de aclimação do ambiente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. TELHADOS

O telhado é a parte exterior da cobertura de um edifício (Ferreira, 2001). Desempenha o papel de proteção ao ambiente interno, além de poder ser utilizado para captação de água, base para telhados verdes para produção de alimentos, heliportos, entre outros fins de utilização secundária.

A construção do telhado envolve a elaboração da estrutura de suporte adequada à extensão do mesmo, bem como as possíveis utilizações secundárias, que em geral, exigem reforços na estrutura.

Dentre as especificações do projeto arquitetônico estão a análise da inclinação necessária ao telhado, a característica da 'água' do telhado, como mostra a Figura 12, que pode ser de uma água (ou meia água - superfície plana e pequena, com declividade), duas águas (duas superfícies unidas por uma linha central ou cumeeira), ou até três ou mais águas. Neste último caso, sendo incluídas as cobertas poligonais e circulares.

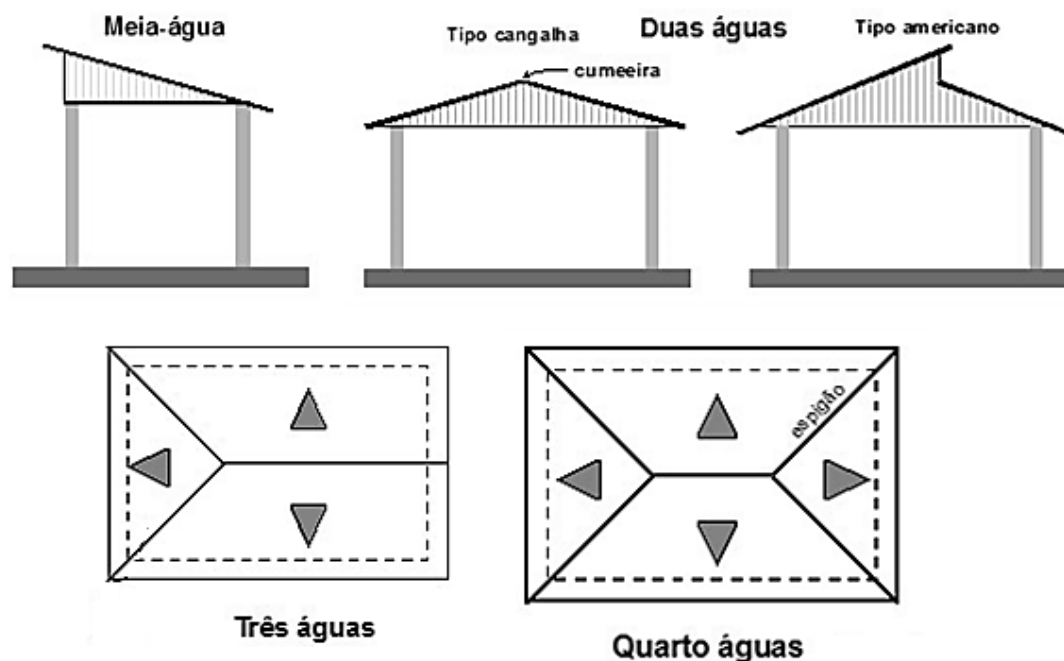


Figura 12 - Tipos de água de telhados.

Fonte: Adaptado pela Autora, de Metálica (2015).

As estruturas, por sua vez, são caracterizadas por armações tipo tesoura, constituídas por treliças, ou seja, estruturas triangulares de barras rígidas conectadas por nós. A Figura 4 mostra os componentes da estrutura de um telhado comum.

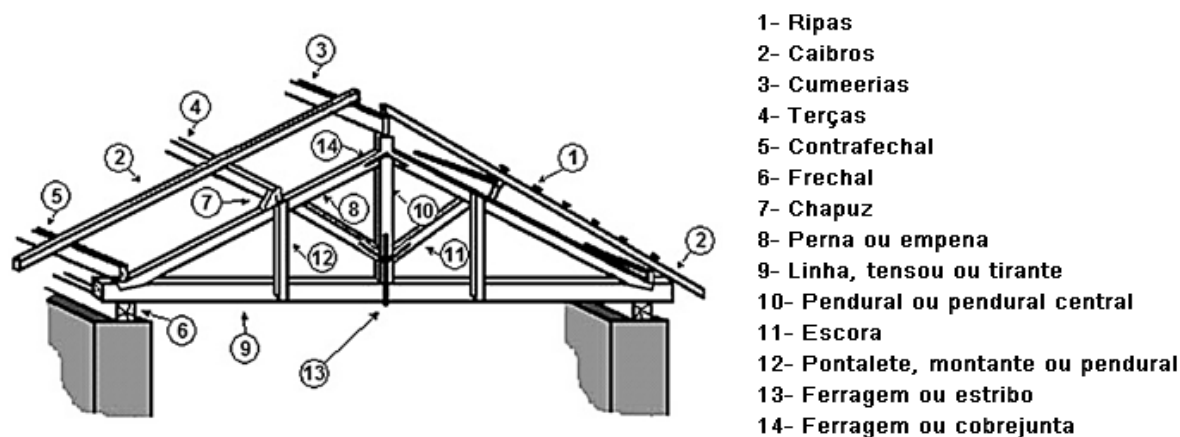


Figura 13 - Elementos de uma tesoura e terminologia.

Fonte: Adaptado pela Autora, de Metálica (2015).

Já o cobrimento, ou telhamento, das coberturas pode ser realizado com uma vasta gama de materiais como cerâmica, alumínio, amianto, fibrocimento e aço galvanizado. Suas variantes ainda incluem a geometria nas quais são formuladas.

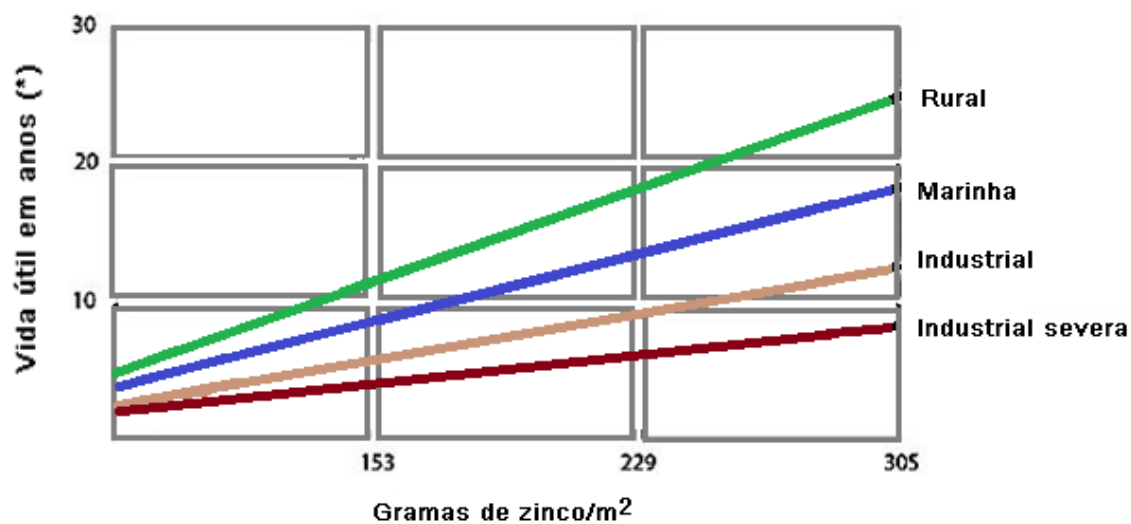
2.1.1 Tecnologias Tradicionais de telhamento

Chapas de Aço Zincado

Pode ser Zincado por imersão à quente em zinco puro ou em liga zinco-ferro, sendo este tipo mais econômico. Alternativamente, a chapa pode ser pintada com tintas protetivas, ou revestida por uma liga de alumínio, zinco e silício (Aluzinc), que apresenta resistência à corrosão duas vezes superior ao aço zincado simples, além de proporcionar maior conforto térmico, por possuir maior refletividade. Outra formulação do aço consiste no aço inoxidável, material de altíssima resistência, porém de alto custo de implementação (ABCEM, 2009).

As coberturas em aço são, em geral, bastante resistentes, possíveis de ser recicladas e de fácil manuseio e instalação. A durabilidade em diversos tipos de ambiente pode ser visualizada na Figura 14, onde observa-se que, em ambientes industriais, a vida útil das telhas é de em torno de 10 anos, contra 25 anos de vida útil em ambientes rurais, devido ao maior potencial de degradação do metal, provocando perda da proteção de zinco e

consequentemente, corrosão do material. A figura 15 apresenta um exemplo de telha de aço zincado.



(*) Máximo de 5% de corrosão vermelha na superfície da chapa

Figura 14 - Estimativa de vida útil de aços zincados em diferentes atmosferas.

Fonte: Adaptado pela Autora, de ABCEM (2009).

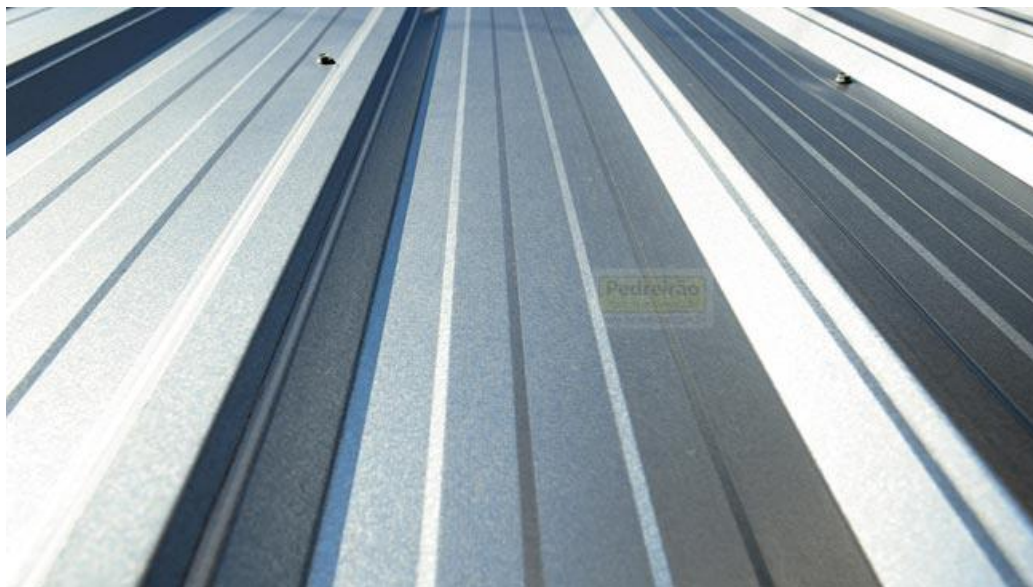


Figura 15 – Telha de aço zincado.

Fonte: www.pedreira.com.br.

Telhas autoportantes

Consistem em chapas metálicas ou de concreto, estendidas sobre grandes vãos e sem apoio intermediário, ou seja, suportam seu próprio peso, apenas apoiando-se nas extremidades, como mostra a Figura 16. É muito usada em construções de galpões industriais, agrícolas e esportivos, em vãos de 10 a 30 metros (Metálica 2015).



Figura 16 – Telha autoportante.

Fonte: www.arquiteturaemateriais.wordpress.

Telhas de Alumínio

O Alumínio é o metal não ferroso mais consumido em todo o mundo, com consumo anual de 24 milhões de toneladas, segundo Totten (2003). Sendo aproximadamente 75% deste consumo, isto é, 18 milhões de toneladas correspondentes a alumínio primário e o restante advindo da reciclagem.

As telhas constituídas deste material são as mais leves, porém, as de maior custo atualmente no mercado. Assim como as de Aço, podem ser conformadas em diversos perfis ondulados e trapezoidais, um exemplo dessa telha pode ser visto na Figura 17. Dentre as suas vantagens, além da leveza, estão a resistência, durabilidade e alta capacidade de reflexão (Metálica, 2015).



Figura 17 – Telha de alumínio.

Fonte: www.br.vazlon.com.

Telhas Plásticas

Os materiais poliméricos são de fácil conformação, baratos e por isso são utilizados em substituição a diversos tipos de materiais, incluindo madeiras, vidro e metais. Os polímeros sintéticos, ou plásticos, como são chamados, mais conhecidos são o PVC (Poli cloreto de Vinila), PET (Politereftalato de Elineno), além do Nylon e o Acrílico.

As telhas elaboradas com PVC, tendo como exemplo a Figura 18, são leves, de fácil colocação e vedação, não absorvem água, além de serem laváveis e possíveis de reciclagem (Construindo, 2015).



Figura 18 – Telha plástica.

Fonte: www.sacolaecologica.wordpress.com

Telhas de Cerâmica

Telhas tradicionais mais amplamente utilizadas em todo o mundo. São confeccionadas em argila que é, em seguida, cozida a altas temperaturas, sofrendo um processo de cristalização e formando a cerâmica, material de alta dureza, com diversas aplicações. Entre seus tipos principais estão a telha francesa, colonial, plana e germânica.

Os telhados deste tipo, de acordo com FEMP (2004), apresentam vida útil em torno de 20 a 30 anos, não necessitando de altos gastos de manutenção, além disso, possuem a característica de manter a superfície interna da cobertura a uma baixa temperatura, mesmo com sua face externa exposta à radiação solar. Segundo Michels (2007), isto se deve ao fato das telhas cerâmicas absorverem água durante a noite (advinda do ar frio e úmido noturno) e, ao serem expostas às altas temperaturas durante o dia, perdem a água por evaporação e permanecem, portanto mais frias que o ambiente externo. Um exemplo desta telha pode ser visto na Figura 19.



Figura 19 – Telha de cerâmica.

Fonte: www.atelhanova.com.br

Telhas de Vidro

Telhas de vidro, como a da Figura 20, são geralmente utilizadas em conjunto com as cerâmicas, possuem formatos similares às mesmas e tem função de permitir a passagem da luz para o ambiente interno (Metálica, 2015).



Figura 20 – Telha de cerâmica.

Fonte: www.info.abril.com.br.

Telhas de Fibrocimento

O fibrocimento é constituído por cimento, minerais e fibras, que reforçam a estrutura. As fibras empregadas podem ser de origem mineral, vegetal, ou sintética (entre elas o Polipropileno). A telha constituída com fibra de amianto (ou asbesto), muito utilizada até a década de 90, é proibida atualmente em muitos países por causa das propriedades cancerígenas do amianto. Apresenta dentre as suas características, alta resistência mecânica, incombustibilidade, durabilidade, flexibilidade, além de abundância na natureza (Artigas, 2015).

Embora seu uso ainda seja bastante significativo no Brasil devido ao baixo custo, ações para a proibição definitiva do asbesto vem sendo tomadas de forma vagarosa. Em substituição a essas fibras minerais, vários estudos de emprego de fibras vegetais têm sido desenvolvidos, ainda em fase de testes. As figuras 21 e 22 apresentam respectivamente exemplos de telhas de fibras de amianto e vegetal.



Figura 21 – Telha de amianto.
Fonte: www.brasile scola.com



Figura 22 – Telha de fibra vegetal.
Fonte: www.leroymerlin.com.br

Telhas de materiais reciclados

Também chamadas de Telhas ecológicas, podem ser fabricadas através da reciclagem de diversos materiais, tais como embalagens longa vida, tubos de creme dental e fibras de vegetal mineral.

As telhas fabricadas de embalagens longa vida são flexíveis e acartolinadas, trituradas e resinadas, podendo ser revestidas ou não. Apresentam boa resistência e isolamento térmico e acústico, além de ser leve e não propagar chamas.

As telhas fabricadas com tubos de creme dental (Figura 23), são constituídas por alumínio e plástico, sendo altamente resistentes à umidade e agentes químicos, além de ser um bom isolante térmico, leve, inodora, não propagadora de chamas e com suporte de peso de até 150 Kg por metro quadrado.

Telhas de veeto mineral são produzidas com fibras de veeto mineral e impermeabilizadas com betume. São flexíveis, excelentes redutores sonoros, duram em média 15 anos e possuem absorção mínima de água (Massafera, 2015).



Figura 23 – Telha de tubo de creme dental.

Fonte: www.metalica.com.br

Telhas de concreto

O concreto é um compósito agregado formado por cimento tipo Portland, água e agregados (areia fina, e brita), a ele podem ser adicionados ainda aditivos para dar mais resistência ou reduzir a abrasão, aumentar a trabalhabilidade, entre outros fins. Esse é um dos materiais mais usados em todo o mundo, sendo seu peso consumido anualmente maior que o de todos os metais juntos (Massafera, 2015).

As telhas produzidas com concreto, como as da Figura 24, possuem peso aproximado de 50Kg por metro quadrado, porém, as peças suportam cargas superiores a 300Kg. Assim como as telhas de cerâmica, as de concreto podem ser formuladas em perfis variados, além de texturas e cores diferentes, obtidas pela aplicação de camada de verniz especial de base polimérica ou acrílica (Metálica, 2015).



Figura 24 – Telha de concreto.

Fonte: www.metalica.com.br

Chapas de Policarbonato

Policarbonato é um polímero de alta resistência a impactos, sendo esta resistência 250 vezes superior ao vidro, possui baixa densidade, além de ser flexível. As chapas de policarbonato utilizadas para coberturas podem ser compactas (tipo vidro), como na Figura 25, ou alveolares, transparentes ou translúcidas, em diversas cores e formas.

A aplicação das chapas pode ser feita em qualquer tipo de perfil (aço, alumínio, madeira), desde que haja folga para dilatação térmica. Em geral, sua aplicação é bastante proveitosa para coberturas, blindagens, janelas e vitrines, já que pode ser produzido em diferentes espessuras (Metálica, 2015).



Figura 25 – Telha de polycarbonato.
Fonte: www.clearcoberturas.com.br

Telhas Dânicas

Consistem em um dos tipos de telhas sanduiche, especificamente, as telhas dânicas, possuem núcleo isolante de poliuretano (PUR), podendo ser ou não pintadas. São leves e de fácil montagem, além de dispensarem o uso de forro, por possuírem acabamento interno tipo painel, pré-pintado, conforme Figura 26.

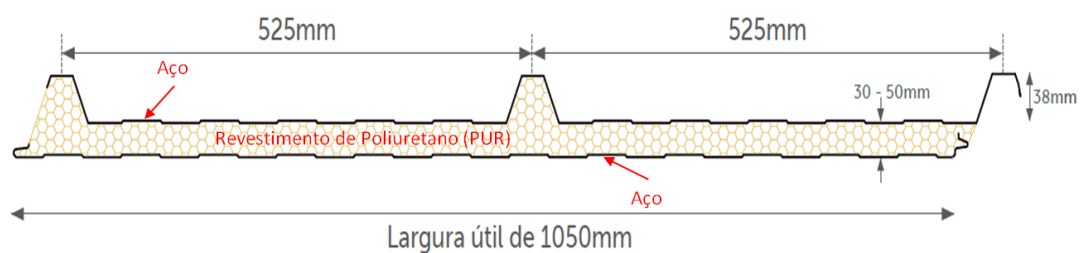


Figura 26 - Perfil lateral da telha tipo dânica (aço-aço).
Fonte: Adaptado pela Autora, de TermoRoof (2015)

2.2. PAPEL DOS TELHADOS NO CONFORTO TÉRMICO

Segundo a ASHRAE Standard 55 (2010), O conforto térmico caracteriza-se como “*A condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico*”. Para Ruas (1999), conforto térmico é a sensação de bem estar experimentada por um indivíduo, como resultado da combinação de quatro fatores: umidade relativa (UR), temperatura radiante média (trm), temperatura do ambiente (ta) e velocidade relativa do ar.

Os telhados e coberturas horizontais de maneira geral constituem a primeira barreira ao aquecimento advindo da radiação solar nos edifícios e construções. Particularmente, em se tratando de galpões de grande extensão, os telhados são a superfície com maior área de exposição solar, dado que o fluxo energético que atravessa as paredes verticais nestes casos é de menor relevância, devido à menor área de exposição das mesmas.

Conforme será exposto no tópico de Radiação solar, é a região do espectro infravermelho a responsável pela troca de energia térmica entre os corpos. Conforme mecanismo da Figura 27, a radiação solar que atinge a coberta diretamente (radiação solar direta) é em parte devolvida por reflexão, sendo esta de maior ou menor intensidade, a depender das características do material constituinte. O restante dessa radiação leva ao aquecimento do telhado. Ainda, o telhado aquecido pode realizar trocas térmicas com os ambientes interno e externo por convecção e radiação.

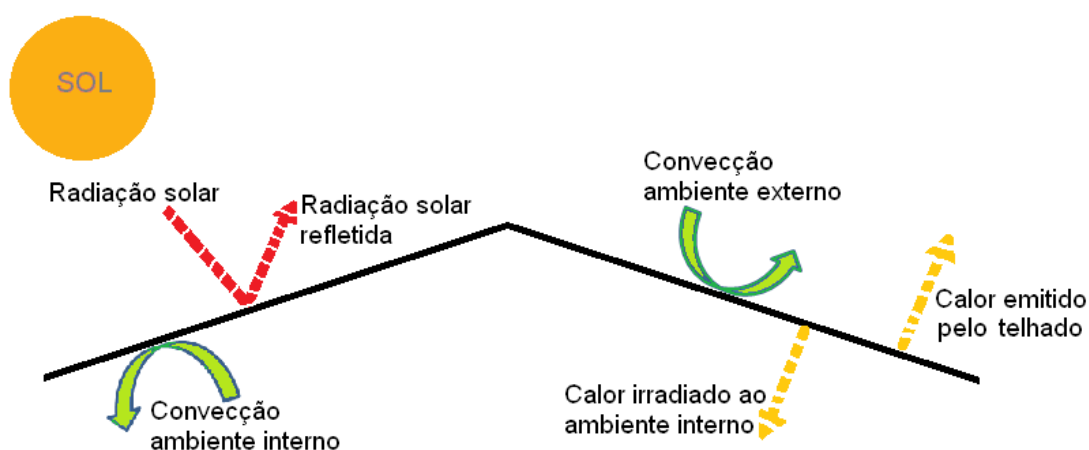


Figura 27 - Esquemas das trocas de calor de um telhado.

Diversos estudos envolvendo a análise de materiais mostram telhados frios que utilizam tintas térmicas, isolamentos e materiais metálicos em sua constituição como excelentes barreiras radiantes, impedindo a entrada de grandes fluxos térmicos para o interior das construções.

O barramento do fluxo térmico tem fundamental papel no conforto do ambiente interno, visto que, especialmente para regiões onde a incidência solar é bastante significativa e a temperatura normal ambiente é alta, como no Nordeste brasileiro, para que se mantenha uma temperatura de conforto (entre 18°C e 28°C), faz-se necessário o arrefecimento local. Para tanto, quanto maior o fluxo de calor que entra no ambiente, maior serão os custos energéticos necessários para retirar o calor excedente.

Em virtude de o clima quente ser predominante em todo o Brasil, é de extrema importância a análise da influência do desconforto térmico associado à disposição para execução do trabalho, ressaltando que, para estas análises, devem ser levados em consideração, além do clima, fatores como a geração térmica pelos equipamentos, geração metabólica de calor pelos organismos humanos e animais que estejam no ambiente de trabalho, além de características relacionadas ao layout e materiais de construção do ambiente (Ruas, 1999).

2.3. TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Para entender como ocorre o aquecimento do ambiente interno, faz-se necessária a compreensão do fenômeno de transferência de calor. A transferência de calor está relacionada ao diferencial de temperatura no espaço. Há três principais modos de trânsito energético, sendo eles a *condução*, que ocorre entre pontos distintos de um meio material, a *convecção*, caracterizada pela transferência de calor entre uma superfície e um fluido em movimento e a *radiação térmica*, que não necessita de meios materiais ou fluidos para propagar energia, já que a dispersão ocorre por simples emissão (Incropera, 2008).

2.3.1 Condução

A transferência de energia por condução é estabelecida através do mecanismo de interação molecular, no qual a molécula que possui maior nível de energia passa energia através de vibração para a molécula adjacente de menor nível energético. Este tipo ocorre em todos os sistemas nos quais existe gradiente de temperatura. Os processos de

transferência de calor podem ser quantificados em termos de equações de taxas apropriados, que são usadas para quantificar a quantidade de energia transferida por unidade de tempo.

Para distribuição de temperaturas $T(x)$ em parede plana unidimensional, a equação da taxa é descrita pela *lei de Fourier*:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Onde q_x'' (W/m^2) é a taxa de transferência de calor na direção x , proporcional ao gradiente de temperatura $\frac{dT}{dx}$.

A condução de calor nos materiais envolve dois mecanismos principais: a condução por elétrons livres e a vibração mecânica. Em função da estrutura molecular, cada material possui determinada capacidade de conduzir calor. Os metais possuem moléculas compactas e, para maioria, alta capacidade de conduzir energia. A presença de elétrons livres (condutores) pode fornecer uma condução térmica muito eficiente.

Para condutores elétricos ruins, como cerâmicas e polímeros a energia térmica é transportada principalmente por vibração atômica, porém o aumento da vibração da rede cristalina em consequência do aumento da temperatura geralmente resulta em uma diminuição da condutividade térmica (Shackelford, 2008).

Por sua vez, materiais orgânicos e fibrosos têm grande dificuldade de conduzir calor, sendo considerados isolantes térmicos.

2.3.2 Convecção

A convecção é o fenômeno de troca térmica que ocorre entre um fluido e uma superfície sólida. Na ocorrência deste fenômeno, o fluido em contato com a superfície quente aquece e transmite a energia recebida para as moléculas ao seu entorno. O fluxo convectivo ocorre de duas principais formas: convecção natural e convecção forçada.

A primeira dá-se pelo movimento do fluido devido ao empuxo ocasionado por um gradiente de massa específica (densidade), de cunho gravitacional. A segunda ocorre quando a taxa de transferência de calor é aumentada por adição de um agente externo como, por exemplo, um ventilador (Incropera, 2008 e Coutinho, 1998).

A equação apropriada para a taxa de transferência de calor por convecção é a lei do resfriamento de Newton, sendo descrita da seguinte forma:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

Onde q'' (W/m²) é o fluxo de calor por convecção, proporcional às diferenças de temperatura entre a superfície (T_s) e o fluido (T_∞).

O estudo da convecção de um sistema parte da determinação do coeficiente convectivo (h), cuja obtenção envolve análise de uma série de parâmetros como velocidade de escoamento, propriedades dos fluidos envolvidos, geometria e orientação do objeto, entre outros fatores que influenciam a transmissão de calor por este meio, sendo esta a etapa mais complexa da análise. Após a obtenção do coeficiente, para dadas temperaturas, obtém-se facilmente o fluxo de calor requerido.

2.3.3 Radiação

A radiação térmica consiste na energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura não nula, tendo esta advinda de sólidos, gases ou líquidos. Todos os corpos emitem energia térmica sob a forma de radiações, independentemente da presença de outros corpos em seu entorno. A emissão está associada às constantes mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos constituintes da matéria, sendo esta emissão realizada por meio de ondas eletromagnéticas e, portanto, propagando-se sem a necessidade de um meio material (Incropera, 2008).

A quantidade de radiação emitida pelo corpo está associada à temperatura que o mesmo se encontra. O poder emissivo, por sua vez, consiste na taxa de energia liberada por unidade de área. Para um corpo negro, a emissividade é máxima e o poder emissivo pode ser descrito pela *Lei de Stefan-Boltzmann*

$$E_n = \sigma T_s^4 \quad (2.3)$$

Em que T_s é a temperatura absoluta (K) da superfície e σ é a constante de *Stefan-Boltzmann*, dada por:

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4\text{)}$$

Para superfícies reais, o poder emissivo é limitado pela capacidade emissiva do material. Para tanto, a equação se adequa ao material sendo multiplicada pela emissividade

(ϵ) correspondente. Esta consiste na propriedade radiante específica do corpo e possui valores variáveis entre 0 e 1 (Incropera, 2008).

2.4. RADIAÇÃO SOLAR

O estudo da radiação solar é fundamental para a análise do desempenho térmico das edificações, já que, dependendo dos materiais da superfície atingida, diferentes processos de transferência de calor podem ser observados (Ikematsu, 2007).

O fluxo médio anual da radiação solar que chega à Terra, sobre uma superfície horizontal é denominado constante solar ($I_{o,n}$), sendo seu valor de 1367 W/m^2 fora da atmosfera (Dufie e Beckman, 1991).

A respeito da troca de energia entre a Terra e o Sol, a mesma ocorre por meio da radiação eletromagnética, que emite energia capaz de ser absorvida em maior ou menor intensidade pelos diversos materiais constituintes terrestres. A Figura 28 mostra o espectro da radiação solar, sendo este, em grande parte (cerca de 46%), correspondente ao comprimento de onda visível, isto é, produz ao olho humano a sensação de luminosidade.

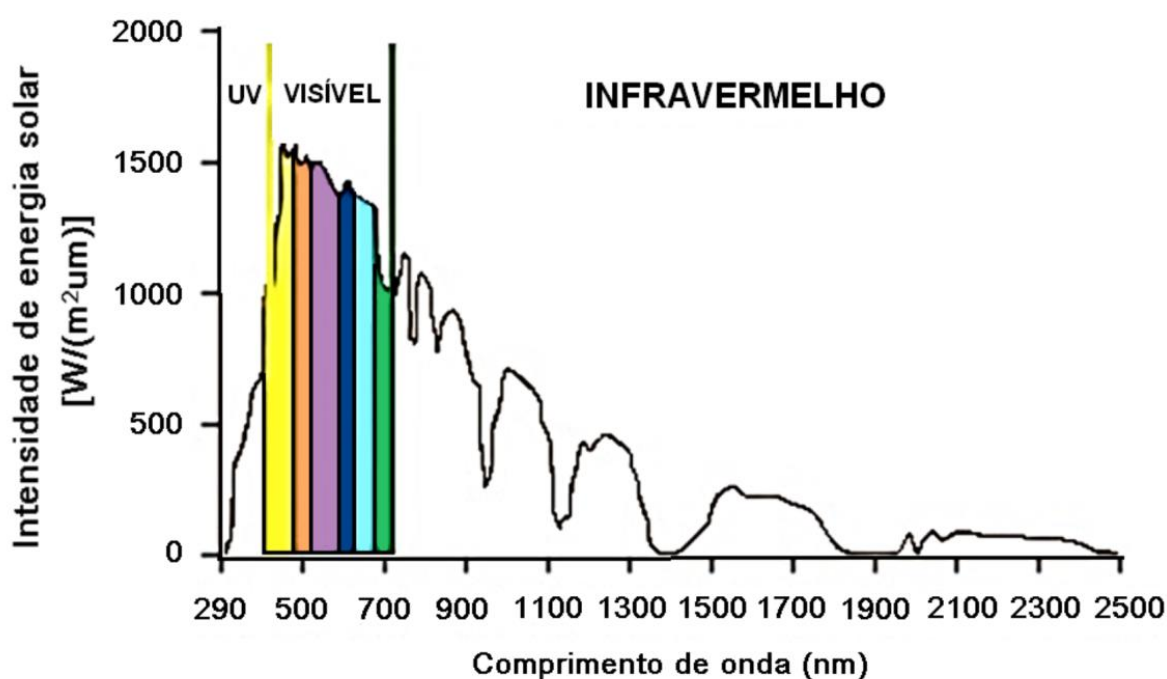


Figura 28 - Espectro da radiação solar.

Fonte: Adaptado pela Autora, de Ikematsu (2007).

2.5. REVISÃO DA LITERATURA

2.5.1 Eficientização energética de telhados

Diversas tecnologias têm sido estudadas ao longo dos anos para garantir um melhor desempenho energético dos telhados. Por serem de grande extensão em relação às paredes de construções comuns e por estarem diretamente expostos às radiações solares, são os principais responsáveis pela absorção energética para o interior dos edifícios além de também aquecer o ambiente ao seu entorno, provocando o fenômeno das ilhas térmicas urbanas ou ilhas de calor, fenômeno este, referido no tópico introdutório.

Um dos mecanismos criados para diminuir o efeito das ilhas de calor é a utilização de telhados frios que refletem a radiação solar (Brito et al., 2011). Os telhados frios também surgem como uma alternativa para diminuir essa absorção energética e reduzir os gastos com a refrigeração. Alguns exemplos de melhorias para efficientização energética são:

Tintas reflexivas

Cobrir a superfície do telhado com uma tinta ou um revestimento especial é uma opção de telhado energeticamente eficiente. Além dos diversos formatos e materiais de telhados, a aplicação de revestimentos e tintas especiais constitui uma vertente bastante pesquisada para garantir o melhoramento da eficiência energética. Materiais como cerâmica, alumínio, amianto, fibrocimento e aço galvanizado constituem alguns dos tipos mais comuns de telhas. Suas variantes ainda incluem a geometria nas quais são formuladas.

A análise termográfica realizada por Abreu *et al.*(2011), na cidade de Campina Grande, Paraíba, revela que a forma ondulada ou plana não influencia os valores de temperatura das telhas quando as mesmas são expostas ao sol, mas materiais e cores proporcionam alterações significativas. Segundo Synnefa *et al.*(2006), a presença de superfícies de cores escuras, especialmente em telhados e pavimentos é a grande responsável pela absorção da energia durante o dia e radiação do calor absorvido durante a noite, o que é agravado pela diminuição de solo natural e vegetação, responsáveis pela evapotranspiração. Synnefa *et al.*(2006) defendem ainda que as superfícies refletoras

podem reduzir este acúmulo energético. Dentre os materiais de alta refletividade utilizados, estão os elastômeros, acrílicos, algumas membranas e telhas refletoras, como as metálicas.

A capacidade de isolamento térmico dos telhados, segundo Brito *et al.*(2011), é aumentada significativamente se o mesmo possuir coloração branca. Isto ocorre devido à diminuição da temperatura externa da superfície. A Figura 29 permite a comparação do fluxo de calor que ultrapassa o telhado de aço galvanizado (refletividade $\rho_{e,s}=0.3$) com o mesmo telhado após aplicação de tinta branca de alta refletividade (refletividade $\rho_{e,s}=0.9$) em sua superfície externa, podendo-se observar significativa diminuição do fluxo para o segundo caso.

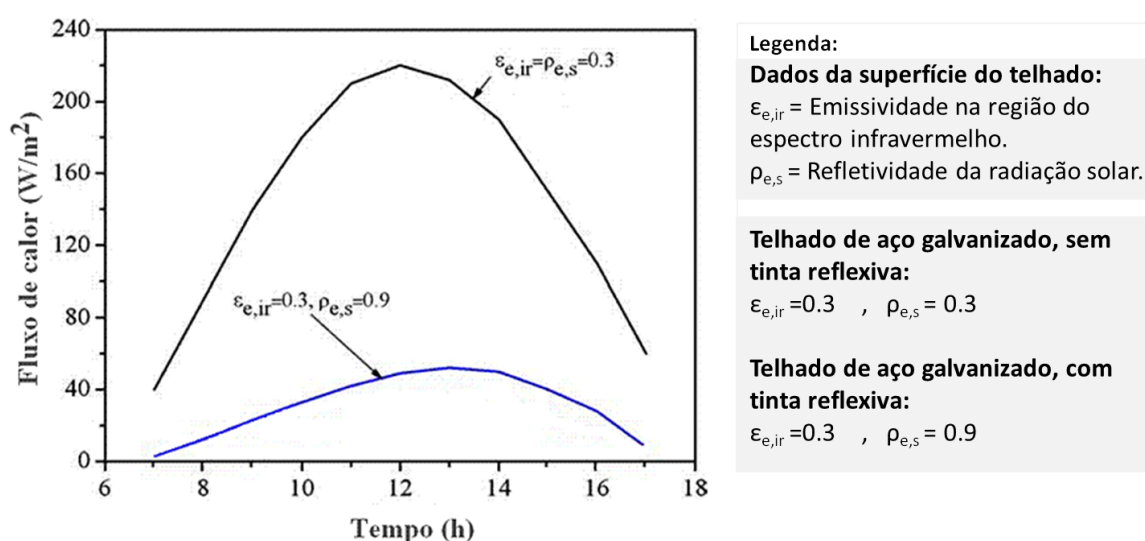


Figura 29 - Fluxo de calor que atravessa telhado, comparado ao seu isômero branco.

Fonte: Adaptado pela Autora, de Brito *et al.*(2011).

Vários estudos demonstram a eficiência da aplicação de tintas de cor branca para maximização da refletividade, que proporciona, por sua vez, a diminuição do fluxo de calor que ultrapassa o telhado e do aquecimento interno. Estudos realizados em Israel demonstram que casas pintadas de branco apresentam temperatura interna 3°C a menos que casas idênticas pintadas de cinza. Já as pintadas de preto apresentam até 7°C a mais do que as brancas, no horário do pico solar máximo. Estas constatações reforçam o princípio de que cores claras são mais refletivas e cores escuras tendem a absorver a luz solar incidente. Além disso, a análise comparativa entre pigmentos brancos e metálicos, como o alumínio, mostra que, por possuírem melhor emissividade, os primeiros irradiam o calor durante a noite com mais facilidade, permanecendo mais frios durante o dia, ao contrário dos pigmentos de alumínio (Synnefa *et al.*, 2006).

Apesar da aparente praticidade, pintar os telhados de branco ou de qualquer outra cor, com tintas comuns pode provocar o desenvolvimento de biofilmes compostos por algas, fungos e cianobactérias, responsáveis pela degradação da tinta. O crescimento dos micro-organismos, por sua vez, leva ao escurecimento da superfície devido à melanina presente nos mesmos. Breitbach *et al.*(2011), ainda afirmam que tintas à base de água são ainda mais susceptíveis à proliferação microbiana comparativamente às que possuem bases oleosas.

O uso de biocidas tem o importante papel em evitar a contaminação microbiana. Esses biocidas, apesar de serem eficientes, na maioria das tintas, inclusive nas acrílicas, são facilmente lixiviados durante os períodos de chuva, o que, além de expor a tinta, agrava os problemas de poluição ambiental, pois, sendo levados pelas águas pluviais, acabam por contaminar solos e penetrar nos lençóis aquáticos (Breitbach *et al.*,2011).

Em se comparando tintas convencionais e tintas reflexivas, constata-se que as reflexivas são mais eficientes quanto ao barramento do fluxo solar. Segundo Ikematsu (2007), isto se deve ao fato das tintas reflexivas serem constituídas por copolímeros ou polímeros acrílicos, que possuem maior resistência à radiação solar se comparados aos demais polímeros de mesmo custo.

Estudos comprovam ainda que para que a tinta reflexiva mantenha-se eficiente, são necessárias limpezas periódicas para manutenção da coloração original. Ainda, tintas de coloração branca, apesar de apresentarem melhor desempenho quando recém-pintadas, sofrem deterioração ao longo do tempo, diminuindo sua refletividade, que se iguala às demais colorações escuras.

Um estudo realizado em Atenas (Grécia) mostra a influencia da degradação da tinta no aumento do fluxo de calor que atravessa o telhado ao longo dos meses de exposição. No estudo em questão, tintas de vários pigmentos e bases foram aplicadas em telhas brancas de pavimento de concreto e seu comportamento foi observado durante 3 meses. A Figura 30 apresenta o estado inicial e final da amostra e o gráfico que descreve a crescente variação no delta da temperatura neste mesmo período, que após 2,5 meses, apresentou-se enegrecida (Synnefa *et al.*, 2006).

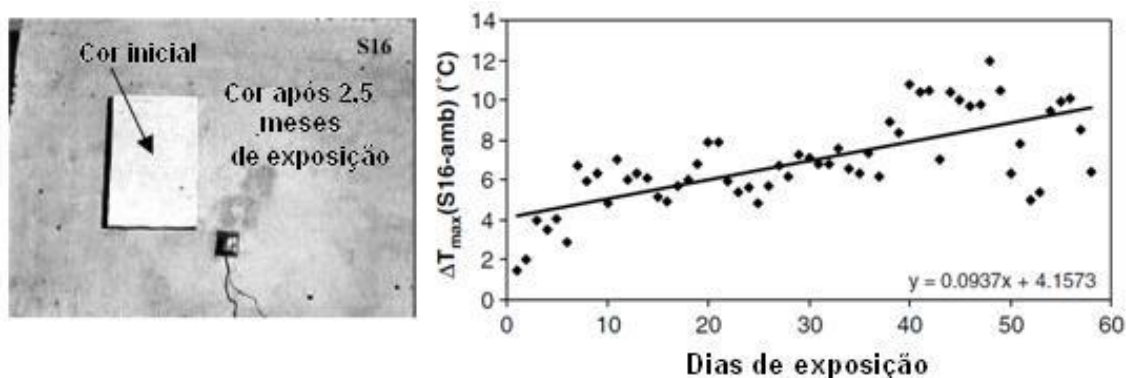


Figura 30 - Alteração da amostra S-16 ao longo dos 2,5 meses de pesquisa.

Fonte: Adaptado pela Autora, de Synnefa et al.(2006).

Segundo Synnefa *et al.*(2006), as tintas acrílicas, em sua maioria, apresentaram melhor comportamento em refletir a luz solar e manter a superfície mais fria que as demais. A tinta de pigmento branco e base acrílica elastomérica (denominada S-16), apesar de apresentar os melhores resultados no primeiro mês, em relação às demais, teve seu comportamento alterado ao longo do tempo, devido à degradação

Outro estudo, realizado por Takebayashi et. al. (2015), na Kobe University e na fábrica Kaneka Osaka factory revela a diminuição da capacidade reflexiva das tintas ao longo do tempo, seja por motivos de sujeira, como poeira e depósitos de compostos carbônicos ou por processos degradativos. A Figura 31 mostra dois tipos de tintas, sendo a primeira denominada de tinta de auto-limpeza, sobre a qual se adere menos sujeiras que a tinta comum.

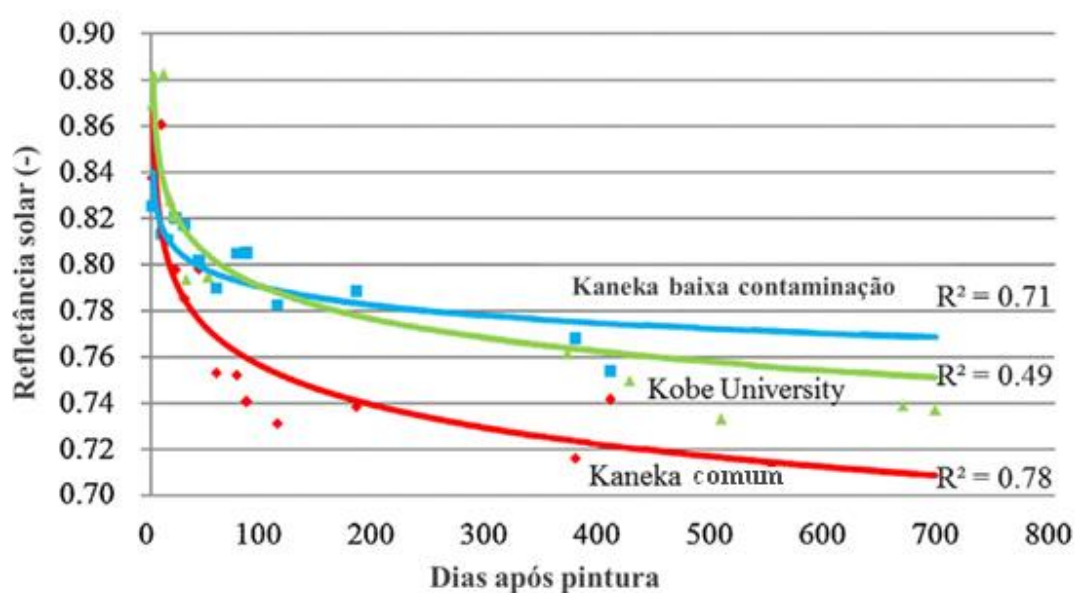


Figura 31 – Resultados de medições em campo da refletância solar periódica.

Fonte: Adaptado pela Autora, de Takebayashi et. al. (2015).

Após os 700 dias de pesquisa, a capacidade de refletência solar caiu de 0,88 para 0,75 na Kobe University. Para tinta de baixa contaminação na fábrica Kaneka, caiu de 0,84 para 0,77. Para o segundo caso em Kaneka (tinta normal), a refletância foi reduzida de 0,86 para 0,71, sendo o primeiro decaimento especialmente por degradação e o segundo por degradação e acúmulo de sujeiras.

Soluções para o aumento da durabilidade das tintas, ainda em fase de pesquisas, consistem, entre outras, na adição às tintas, de bactérias produtoras de carbonato de cálcio (CaCO_3), a fim de proteger a superfície das mesmas de ataques externos, reduzindo assim o escurecimento e a degradação.

Isolantes térmicos

Também são ideais para deter o aquecimento, entretanto alguns deles são inflamáveis, o que aumenta também o risco de acidentes. Ainda assim, isolantes não inflamáveis, como a fibra de vidro e a lã de rocha (Figura 32), podem ser aplicados sem apresentarem maiores riscos. Sua aplicação tem como objetivo dificultar a transferência de calor entre dois sistemas que se encontrem a temperaturas diferentes. Podem ser colocados entre telhas (tipo sanduíche), acima ou abaixo da cobertura.

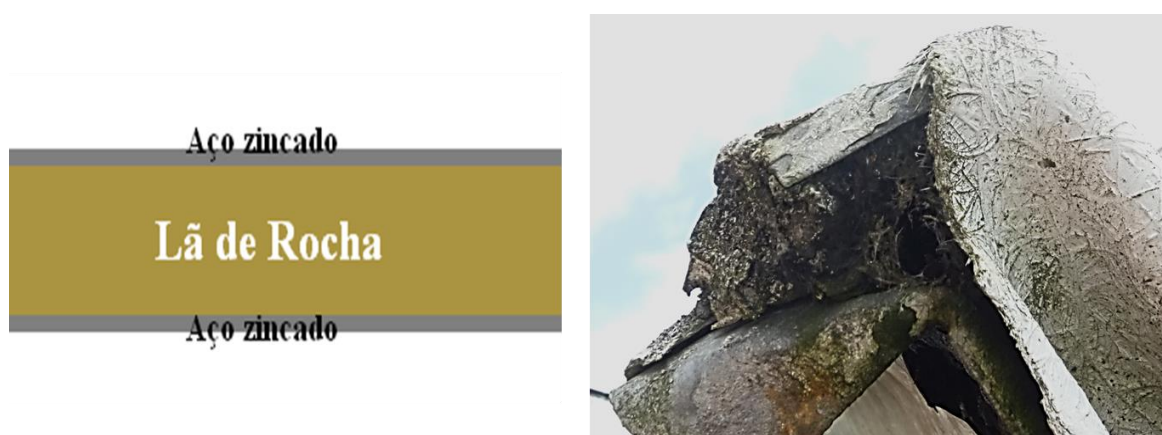


Figura 32 – Telhado composto por aço zincado e lã de rocha. Foto do Centro de Energias Renováveis-UFPE, 2015.

Existem dois principais tipos de isolantes: isolantes de baixa condutividade térmica, que agem dificultando a troca de calor por condução e os isolantes de baixa radiação, ou

alta reflexão, que refletem boa parte do calor recebido, dificultando o aquecimento (Michels, 2007).

A Figura 33 faz uma análise comparativa entre 7 tipos de revestimento, onde pode ser verificada a alta eficiência do poliuretano como isolante térmico comparativamente aos demais analisados, já que é o material que menos permite a passagem do fluxo térmico (U) para o interior do ambiente.

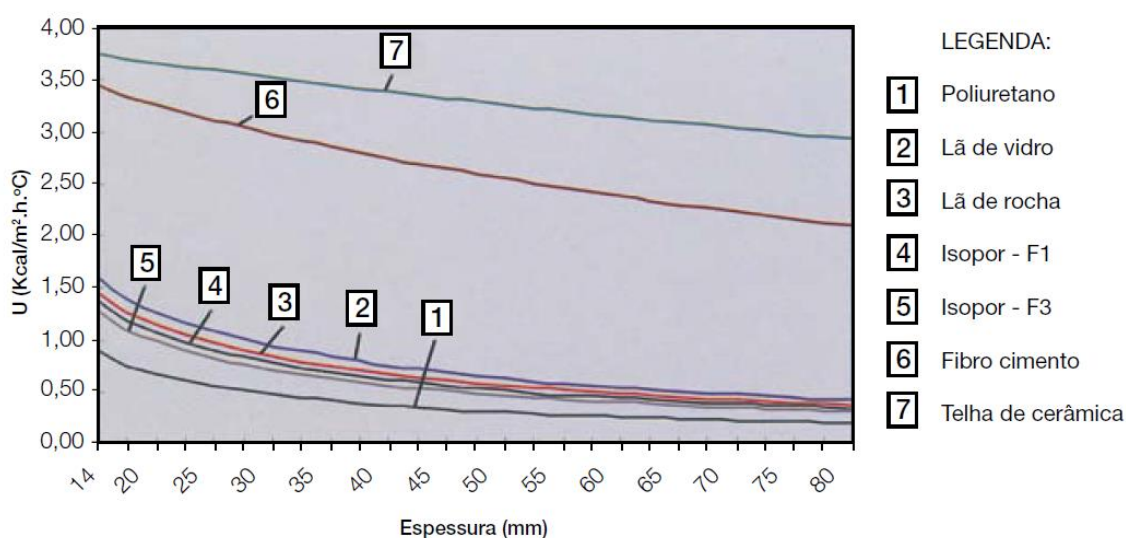


Figura 33 - Análise comparativa da condutividade dos materiais isolantes.

Fonte: ABCEM, 2009.

Telhados verdes

Telhados verdes são assim chamados por possuírem sobre eles uma camada de vegetação. Constituem sistemas tecnológicos complexos que, se bem projetados, proporcionam benefícios energéticos e ambientais tanto aos edifícios nos quais foram instalados, quanto ao meio ambiente ao seu entorno. São capazes de climatizar o interior dos edifícios, além de reduzir as ilhas de calor urbanas, melhorar a qualidade do ar ambiente e facilitar o gerenciamento das águas pluviais, já que armazenam grande quantidade de água (Ascione, 2013; Bevilacqua et. al., 2015).

Quanto à classificação geral, estruturam-se em três tipos: intensivo, semi-intensivo e extensivo. O telhado verde tipo intensivo tem uma larga camada de solo (de 15 a 40 cm), sendo aplicado em cobertas planas e requerendo uma forte estrutura para suportá-lo, pois possui uma carga prevista entre 180 kg/m^2 e 500 kg/m^2 . Apresenta desde vegetação rasteira

a arbustos e árvores pequenas. Enquanto o tipo extensivo requer uma camada mais fina de solo (de 5 a 15 cm) e é composto por vegetação tipo rasteira e carga prevista entre 60 kg/m² e 150 kg/m². O tipo semi-intensivo reúne características de ambos, sendo muito utilizado para confecção de hortas urbanas, como por exemplo a do Hotel Fairmount em Vancouver (Canadá), apresentada na Figura 34, que economiza cerca de 30 mil dólares por ano com a plantação em seu telhado de centenas de temperos, verduras e ervas. (U.S. Department of Energy, 2004 e Silva, 2011).



Figura 34. Hotel Fairmount em Vancouver, Canadá.
Fonte: Silva, 2011.

As espécies vegetais utilizadas para composição do telhado verde dependem do clima da região em que o mesmo será instalado, pois espécies típicas, já adaptadas ao clima, exigem menor cuidado e são mais resistentes. As plantas mais largamente utilizadas, porém, são as de espécies tipo suculentas de forração, como a *Sedum acre* e a *Sedum sp1*, já que são resistentes tanto a climas secos, quanto úmidos e não necessitam de manutenções tão frequentes (Silva, 2011).

Os telhados verdes caracterizam-se por serem capazes de manter a temperatura do ambiente interno mais amena, tanto no inverno quanto no verão e, portanto, consistem em uma alternativa para a redução de gastos energéticos tanto para arrefecimento quanto para aquecimento necessário para atingir temperatura de conforto (U.S. Department of Energy, 2004).

No estudo realizado pelo Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá e apresentado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, mostra-se a taxa de transferência de calor através da superfície do telhado verde tipo extensivo comparado a um telhado cascalho-lastro comum. A Figura 35 apresenta as variações das taxas de transferência de calor médias, encontradas nos meses de novembro de 2000 a setembro de 2002. Nela, observa-se uma redução bastante expressiva da taxa que atravessa o telhado verde.

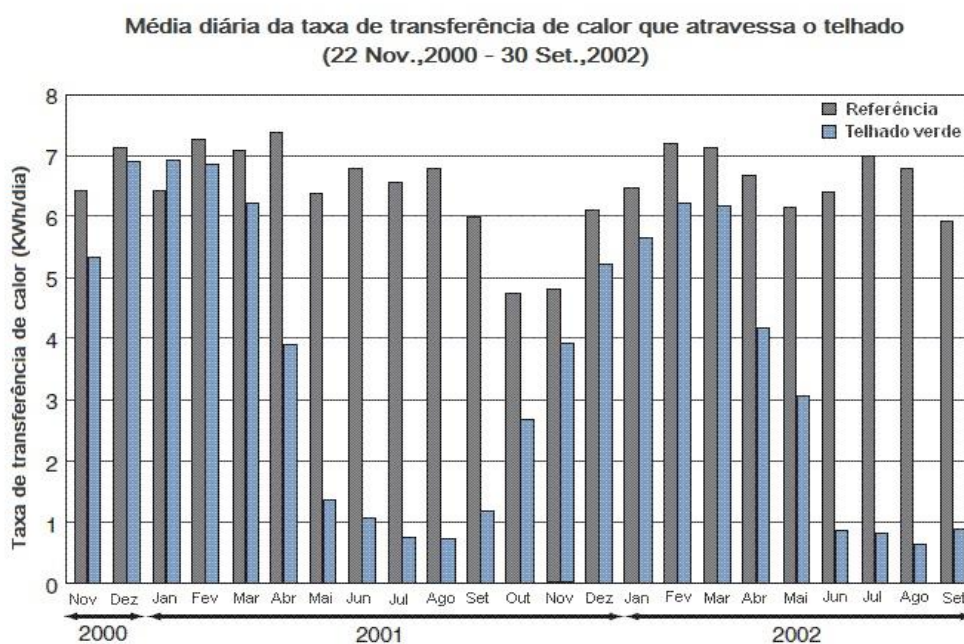


Figura 35 - Variação da taxa de transferência de calor comparativa.

Fonte: Adaptado de U.S. Department of Energy, 2004.

Durante os 660 dias de pesquisa, a temperatura do telhado verde excedeu os 30°C em apenas 18 dias, contra 52 dias para o telhado comum. O estudo ainda revela que a flutuação anual de temperatura para o telhado comum chega a 100°C, enquanto que para o telhado verde, essa amplitude reduz-se para 35°C o que, segundo o Departamento de Energia pode ser explicado pela alta capacidade de retenção energética proporcionada pelo telhado verde, como pode ser visto na Figura 36 (U.S. Department of Energy, 2004).

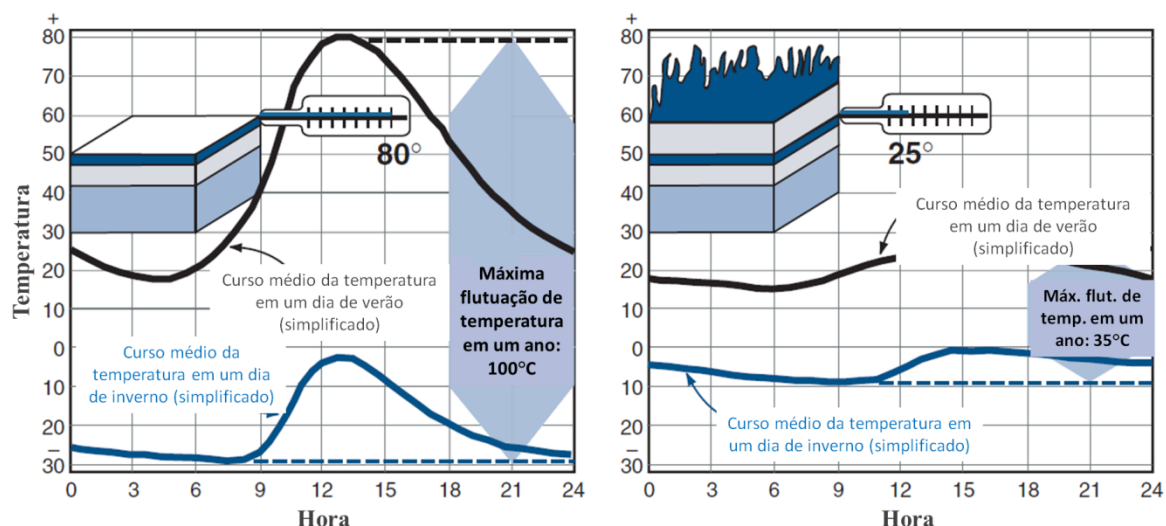


Figura 36 – Máxima variação de temperatura para os telhados convencional e verde.

Fonte: Adaptado de U.S. Department of Energy, 2004.

Outra pesquisa realizada na Universidade de La Rochelle, França, onde o clima é considerado temperado oceânico, mostra a elevação da temperatura do ambiente interno em 5,6°C comparativamente ao externo durante o inverno, devido ao fato das plantas e do solo limitarem as trocas térmicas entre o telhado e o exterior. Durante a alta estação do verão, esta cobertura passa a manter o ambiente interno cerca de 2,9°C mais frio que o exterior, devido a evapotranspiração ocorrida na folhagem. Ainda durante o verão, a perda total de calor calculada foi de 5,5 kWh.dia⁻¹ para o telhado convencional contra 15,2 kWh.dia⁻¹ para o telhado verde, o que possibilita uma diminuição da demanda energética por arrefecimento (Jaffal et al., 2012). A Tabela 1 apresenta as temperaturas médias e máximas observadas, bem como as demandas energéticas apresentadas em pesquisas realizadas nas cidades de Atenas (Grécia), La Rochelle (França) e Estocolmo (Suécia), onde se observa uma redução da demanda energética de até 12,8 kWh.m⁻² por ano.

Tabela 1 - Comparativo de demanda energética entre telhado convencional e telhado verde para as cidades de Atenas, La Rochelle e Estocolmo.

Fonte: Adaptado de Jaffal et al. (2012).

Cidade	Temperatura média do ar interno (°C)		Máxima temperatura do ar interno (°C)		Demanda de aquecimento (kWh m ⁻² ano ⁻¹)		Demanda de arrefecimento (kWh m ⁻² ano ⁻¹)		Demanda total de energia (kWh m ⁻² ano ⁻¹)	
	Telhado convencional	Telhado verde	Telhado convencional	Telhado verde	Telhado convencional	Telhado verde	Telhado convencional	Telhado verde	Telhado convencional	Telhado verde
Atenas	33,9	31,3	35,4	32,7	14,1	15,2	26,4	12,5	40,5	27,7
La Rochelle	28,4	26,4	30,1	28,0	36,0	36,1	2,5	0,1	38,5	36,2
Estocolmo	25,6	24,2	27,2	25,8	131,0	120,3	0,0	0,0	131,0	120,3

Os benefícios dos telhados verdes ainda podem ser estendidos aos ambientes externos, próximos de onde foram implementados. Em áreas urbanas, esses benefícios incluem desde tornar o ambiente mais agradável visualmente à redução da sensação térmica relativa às ilhas de calor formadas pelo excesso de superfícies impermeáveis e refletoras presentes nos centros urbanos, além de proporcionar um maior controle de vazão das águas pluviais, com absorção parcial das mesmas, o que reduz o risco de enchentes. Outro benefício é a melhoria da qualidade do ar, devido ao aumento da conversão de dióxido de carbono em oxigênio, proporcionado pela fotossíntese exercida pelos espécimes vegetais. Além disso, a durabilidade do telhado verde chega a ser até três vezes maior que a de um telhado comum, cuja expectativa é de 20 a 30 anos (Clark *et al.*, 2008; Jaffal *et al.*, 2012 e U.S. Department of Energy, 2004).

Entretanto, os custos iniciais de implementação, além das manutenções periódicas necessárias nos dois primeiros anos de uso (período de adaptação e crescimento das plantas), são o principal empecilho para utilização deste modelo. Entre outras desvantagens estão a sua vulnerabilidade ao vento, já que não está mecanicamente preso ao telhado, além da dificuldade de localização de vazamentos no material a prova d'água sobre o qual o substrato se encontra e o fato de não ser viável sua instalação em telhados íngremes. As raízes das plantas também causam problemas se seu crescimento não for detido, especialmente para plantas de maior porte, o que ainda inviabiliza a manutenção de telhados verdes tipo intensivo, já que neste caso, os esforços necessários para a detenção das raízes das plantas de maior porte tornam-se bastante dispendiosos (U.S. Department of Energy, 2004).

A análise do custo-benefício da implementação de telhados verdes ainda mostra um favorecimento ao custo do telhado comum pois, de acordo com Clark *et al.* (2008), a implementação levaria 40 anos para ter seu custo superado pelo telhado convencional, considerando o comparativo entre as frequências de troca de ambos. Carter e Keeler (Apud Jaffal *et al.*, 2012), ainda sugerem que telhados verdes tornar-se-iam mais econômicos que os telhados tradicionais apenas se seus custos sofressem 20% de redução em relação ao seu valor atual.

Pesquisas realizadas na Monash University, Austrália e Tel Aviv University, em Israel, demonstram que a irrigação na maior parte do ano torna-se necessária para manutenção da vegetação, podendo ocorrer a morte das espécies caso contrário. Além disso, a falta de irrigação também afeta a evapotranspiração que ocorre no verão para que assim haja o arrefecimento do ambiente interno. Apesar do resfriamento proporcionado

pelas plantas ser experimentalmente provado, questões como a dimensão mínima do telhado e a espécie de planta a ser utilizada para que haja viabilidade financeira devem ser analisadas, pois cada espécie vegetal requer um consumo determinado de água. Sugere-se ainda a inviabilidade deste sistema em climas muito secos como o mediterrâneo ou em climas quentes sazonais, pois os gastos com irrigação podem superar a economia energética nestes casos (Schweitzer *et al.*, 2014 e Coutts *et al.*, 2013).

Além do cuidado com a irrigação, Silva (2011) afirma que a manutenção das plantas exige controle de ervas daninhas e fungos e, apesar do surgimento de insetos ser inerente à aplicação das plantas sobre o telhado, aranhas e escorpiões podem também se desenvolver e por vezes representar riscos às pessoas ou animais.

Espelhos D'água

Existem muitas variações deste tipo de sistema, as quais devem ser implementadas dependendo das condições de estrutura e do meio em que será instalado. Podem ser construídos de forma mais econômica pelo enclausuramento de água em tanques de plástico, metal ou fibra de vidro, alternadas por placas de alumínio, suportados em um telhado de concreto, ou metal ondulado, para aumento da eficiência (Spanakia *et al.*, 2011).

O espelho d'água pode ser do tipo coberto ou simples, onde não há cobertura da película, ainda pode ou não possuir sprays, que auxiliam no resfriamento da água e ventiladores, que forçam a passagem do ar ambiente acima da película de água presente no telhado, facilitando a troca térmica. Consiste em um sistema passivo, onde a evaporação da água contribui para o resfriamento do edifício no verão e sua contenção favorece aquecimento no inverno. (Spanakia *et al.*, 2011; Kharrufa *et al.*, 2008 e Tang *et al.*, 2005).

Cada variante apresenta suas vantagens e desvantagens, necessitando de adequada estrutura para desempenhar suas características operacionais. De acordo com Givoni (Apud Spanakia *et al.*, 2011), o pré-requisito para obter sucesso na aplicação do espelho d'água é que a temperatura do bulbo úmido não ultrapasse os 20°C. Isto garantirá o resfriamento gerado, pois caso contrário, a umidade gerada pela evaporação da água advinda do espelho não será capaz de resfriar, mas sim tornará o ambiente mais quente e úmido.

A forma mais simples desta instalação consiste no telhado descoberto e sem *sprays*, que, possuindo profundidade da película de água com 5 ou 15 cm, chega a reduzir a temperatura inicial do telhado de 65,6°C para 42,2°C e 39,4°C respectivamente, por meio

da simples evaporação da água. Os que possuem *sprays* são ainda mais eficientes quanto ao resfriamento, mas o gasto de água é bem mais elevado e, portanto, recomenda-se o uso dos *sprays* apenas durante a noite, para auxílio no resfriamento do próprio espelho d'água (Spanakia *et al.*, 2011).

As variantes com cobertura móvel, ainda segundo Spanakia *et al.* (2011), são mais eficientes, pois permitem um controle mais eficiente da troca térmica entre o telhado e o meio ambiente, tanto para o verão, quanto para o inverno. No primeiro caso, a tampa é removida durante a noite, permitindo o resfriamento da água por evaporação e radiação para o céu. A água resfriada é usada durante o dia para absorver o calor do ambiente interno transferido através do telhado. No inverno, o processo se inverte. A cobertura é removida durante o dia para permitir o aquecimento da água pela radiação solar. Assim, o calor é transferido por condução para o ambiente interno através do telhado. À noite, o espelho d'água é coberto para reduzir a transferência de calor por radiação para o céu, permitindo a utilização do calor armazenado para aquecimento do ambiente interno.

Um estudo realizado por Kharrufa *et al.* (2008), em Bagdá, Iraque, utilizando o espelho d'água com cobertura fixa e ventilação forçada, mostrou que a variação de temperatura no interior do ambiente após a instalação do sistema foi bastante significativa, já que enquanto a temperatura ambiente variou de 32°C a 44°C, a temperatura interna, sem o sistema variava 39,5°C a 43,5°C e com a sua implementação, a variação de temperatura do ambiente interno passou a ser de 34°C a 37°C, uma redução significativa de 7°C em relação à temperatura ambiente máxima observada.

Esta tecnologia é ideal para ser utilizada em conjunto com ar condicionados, pois permite aos mesmos a exigência de uma menor demanda energética. A Figura 37 esquematiza o tipo de espelho d'água coberto e com ventilação forçada. Este sistema é bastante eficaz para climas quentes e secos, com propósito de arrefecer o ambiente interno e umidificar o ambiente externo ao seu entorno.

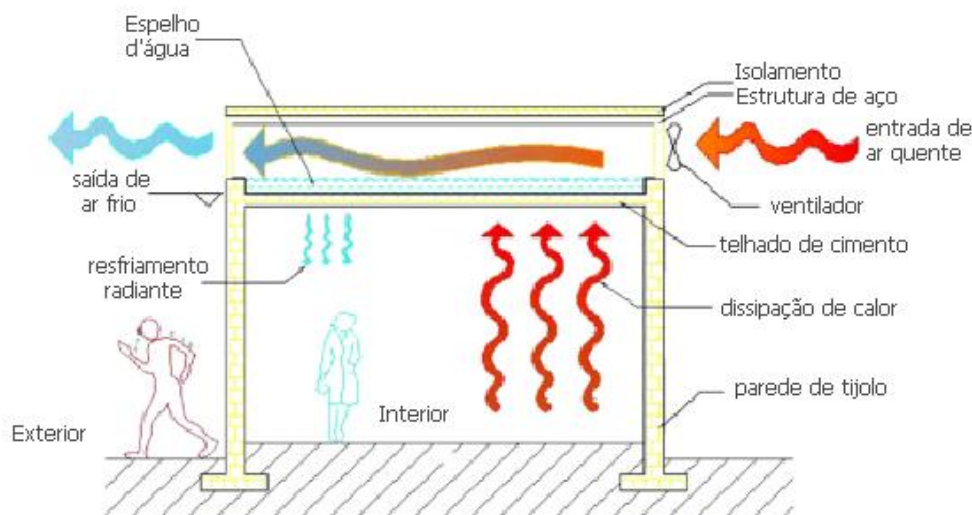


Figura 37 - Telhado tipo espelho d'água coberto com ventilação elétrica forçada.
Fonte: Adaptado de Kharrufa et al. (2008).

Entre as desvantagens destas aplicações, estão a falta de experiência da indústria de construção na elaboração destes telhados, além da alta carga extra que deve ser suportada pelos telhados (cerca de 200 a 400 kg/m²). Além disso, os processos de cobrir e descobrir o telhado diariamente, seja em modo manual ou automático, tem como desvantagens respectivamente as dificuldades técnicas na efetuação e os gastos energéticos extras, com uso de motores. Problemas de saúde pública relacionados à água parada, como o favorecimento da reprodução de mosquitos, ainda agravam o quadro de desvantagens deste sistema (Yannas *et al.*, 2006).

Pulverizadores

Pulverizadores de água nos telhados são usados para reduzir a carga do ar-condicionamento. A superfície do telhado é aquecida pelo calor ambiente e, ao entrar em contato com as gotículas de água, promove a transferência de calor e consequente evaporação das mesmas. Calcula-se que um telhado de 10.000 m² é capaz de dispersar mais de 3.700 litros de água em um período de 8 horas (Smith *et al.*, 1985 e Buker, 2015).

Existem diversos tipos de pulverizadores, desde os mais simples, semelhantes a sistemas de irrigação, com controle manual, até sistemas com recuperação de água, filtragem e resfriamento automatizados. Exemplos destes sistemas podem ser vistos respectivamente nas Figuras 38 e 39.

O sistema de pulverização simples consiste na aspersão da água sob o telhado durante os dias de verão, promovendo assim um abaixamento da temperatura de superfície do telhado. É um sistema de fácil colocação e remoção, pois pode ser acoplado por meio de blocos ou grampos de encaixe, que por sua vez, são afixados à superfície do telhado por adesivos inorgânicos. Várias fontes de água podem ser utilizadas, desde águas de rejeito, das chuvas ou fornecida pelo encanamento comum, que neste caso, pode não ser necessário o uso de bombas, já que a pressão requerida para telhados de casas tradicionais é de 50 psi, facilmente alcançada pela última fonte (Smith *et al.*, 1985).

Esta tecnologia é ideal para ser utilizada em grandes telhados, por possuírem área de exposição solar maior comparada às paredes. Desta forma, a sensibilidade em relação à perda de calor é mais bem observada. Além disso, um sistema bem projetado deve aspergir a exata quantidade de água necessária para o processo de evaporação.

Abernethy (1985) defende que quanto mais uniforme o formato da lâmina de água sobre o telhado, mais eficiente o sistema será, além de evitar o desperdício de água. Para tanto, o controle manual é ineficiente, devendo utilizar-se controle automático de fluxo.



Figura 38 - Sistema de pulverizadores simples sobre telhado.
Fonte: Homeexpo (2014).

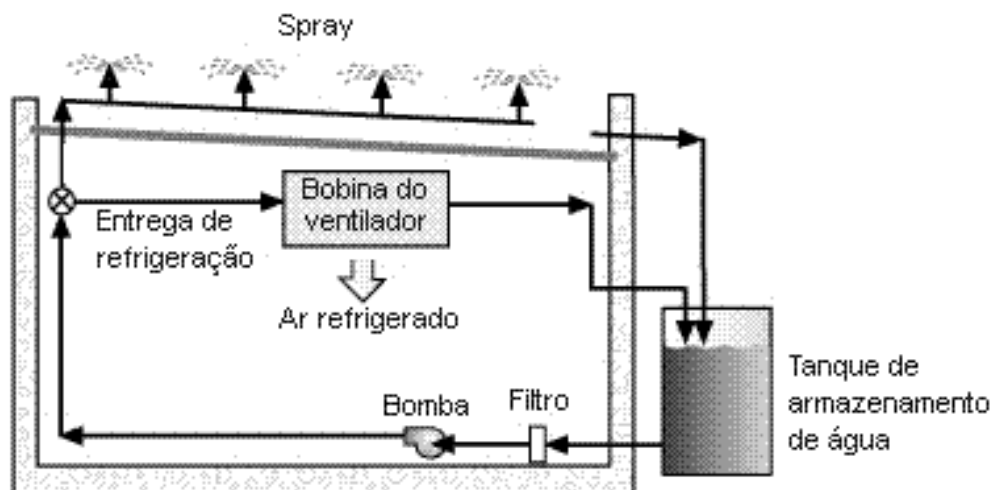


Figura 39 - Sistema de pulverizadores com sistema de recuperação e filtragem.
Fonte: Adaptado de Builditsolar (2014).

Pesquisas realizadas em Phoenix (Estados Unidos) e Rio Piedras (Brasil), mostraram a eficácia do sistema de pulverização simples para o abaixamento da temperatura do telhado. No primeiro caso, observou-se o telhado de uma plataforma, onde a temperatura da superfície do telhado variou de 80,5°C para 43,8°C, com a colocação do sistema de pulverização. Em Rio Piedras, para uma temperatura ambiente de 30°C, a superfície do telhado inicialmente à 42°C, reduziu-se para 28,7°C (Smith *et al.*, 1985).

Quanto à redução da temperatura interna, Smith *et al.* (1985) apresentam mais um estudo em Jodhpur (Índia), onde foi analisado o comportamento da temperatura no interior de um dormitório de estudantes, sendo esta reduzida de 37,2°C para 33,7°C após aplicação dos pulverizadores.

Apesar de serem mais comumente utilizados durante o dia, diversos estudos mostram que uma maior eficácia na utilização de pulverizadores pode ser atingida durante a noite. Neste caso, objetiva-se não apenas o resfriamento da superfície do telhado, mas principalmente a promoção do resfriamento da água aspergida. São utilizados, portanto, como promotores da troca térmica entre a água e o ar ambiente noturno, que possui temperatura mais baixa. Dessa forma, a água pulverizada é resfriada por evaporação e em seguida por convecção, retornando ao sistema através das calhas, onde é guiada para um coletor e filtrada, sendo então disponibilizada para o uso interno ou para o resfriamento da própria estrutura do edifício, incluindo paredes, piso e o próprio telhado (U.S. Department of Energy, 1998).

Os pulverizadores noturnos providos de um adequado sistema de armazenamento térmico são capazes de atingir taxas de rejeição térmica superiores a 950 W/m^2 por noite. Resfriamento suficiente para suprir de 30 a 60% da demanda de prédios comerciais simples da Califórnia (Estados Unidos), desde que acoplados a sistemas de refrigeração. Este sistema é adequado para climas quentes e secos, pois a troca térmica entre a água e o ar ambiente neste caso é mais eficiente, dado que a temperatura noturna cai consideravelmente.

Dentre as exigências para este tipo de sistema, estão bombas, filtros, drenagem, válvulas guiadas por um sistema de controle automatizado, além de um tanque de armazenamento bem projetado, capaz de conservar a baixa temperatura da água. A área ocupada pelo tanque pode dificultar a implementação deste sistema em centros urbanos, pois, para cada 93m^2 de área pulverizada, são necessários, em média, 3m^2 de área do tanque de armazenamento. Este sistema é ideal, portanto, para armazéns, prédios comerciais com grandes áreas de telhado e como complementar de sistema de refrigeração, proporcionando grande economia nestes casos (U.S. Department of Energy, 1998).

Estudos recentes combinam aplicações do uso de pulverizadores e placas geradoras de energia solar, pois os pulverizadores consistem em excelentes arrefecedores das placas solares, que aquecem demasiadamente a superfície do telhado. Estes sistemas, ainda acoplados a chillers de absorção, formam sistemas de cogeração, isto sistemas capazes de gerar energia elétrica e refrigerar o ambiente interno ao mesmo tempo (Buker, 2015).

Sombreamento

Este é um dos métodos mais simples de redução do aquecimento solar. Consiste em se usar obstáculos aos raios solares, tais como árvores, pergolados e persianas para cobrir a superfície do telhado, evitando que esta seja diretamente exposta à incidência dos raios solares. Além de promover o sombreamento, o tipo composto por vegetação pode possuir espécies comestíveis (Silva, 2011).

Um projeto desenvolvido em Guangzhou (China), pela South China University of Technology, estudou a eficiência da aplicação de uma cobertura tipo pergolada, constituída de placas de concreto, ligeiramente inclinadas, de forma a garantir melhor aproveitamento solar durante o inverno e minimizar a exposição solar durante verão. A Figura 40 apresenta

a estrutura montada com destaque para inclinação presente nas placas de concreto (Meng *et al.*, 2006).

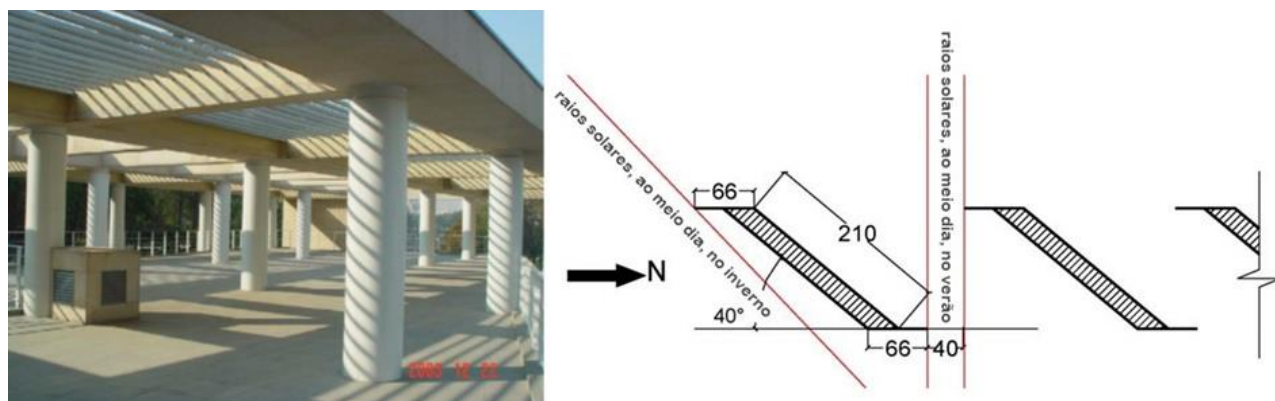


Figura 40 - Cobertura pergolada. South China University of Technology.
Fonte: Adaptado de Meng *et al.* (2006).

A inclinação das placas foi calculada levando-se em conta a variação do posicionamento solar ao longo do ano. Após a instalação do pergolado, analisou-se a variação da porcentagem de sombreamento. Em meados de julho (verão chinês), obteve-se bloqueio de 85% da radiação solar direta ao meio dia. Já durante o inverno, a incidência solar direta no telhado chegou a aproximadamente 75%, permitindo o aquecimento do mesmo (Meng *et al.*, 2006).

O sombreamento composto por cobertura verde também tem como função evitar a incidência solar direta. Ao contrário das estruturas pergoladas, porém, não tem variação da área de sombreamento, sendo ideal, portanto, para países de climas quentes. Segundo Silva (2011) este tipo de sombreamento foi implementado na Faculdade de Saúde Pública (FSP) da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, com o objetivo de promover sombreamento e reduzir o barulho causado pelo impacto da água da chuva na cúpula de compõe o telhado do prédio. Ainda segundo Silva (2011), apesar de medições precisas não ter sido realizadas, o conforto térmico e sonoro melhorou significativamente após o crescimento da vegetação. Além disso, a cobertura verde proporciona melhoria da qualidade do ar e gera frutos para os alunos e funcionários do prédio. Outro fator positivo é que coberturas vegetais não necessitam de fortalecimento da estrutura do telhado para serem aplicadas, pois são leves.

O sombreamento verde ainda pode ser aplicado em fachadas de edifícios. Devido ao excessivo calor das ilhas térmicas em cidades japonesas, onde em 2011 as temperaturas foram as mais altas já registradas, cortinas verdes, como as da Figura 41 têm sido implementadas em edifícios residenciais, proporcionando diminuição da temperatura de 40,5°C para 32,9°C, além de, assim como as coberturas verdes, proporcionar frutos aos moradores (Silva,2011).



Figura 41 - Cortina feita de pepino e plantas, Japão.
Fonte: Silva (2011).

Outra tecnologia desenvolvida para sombreamento de fachadas, mas ainda não adaptada para telhados, tem-se mostrado bastante eficaz e em crescente implementação. Trata-se da dupla camada de vidro, que proporciona a formação de um túnel de ar capaz de blindar parcialmente os raios solares incidentes. A Figura 42 apresenta o esquema deste sombreamento.

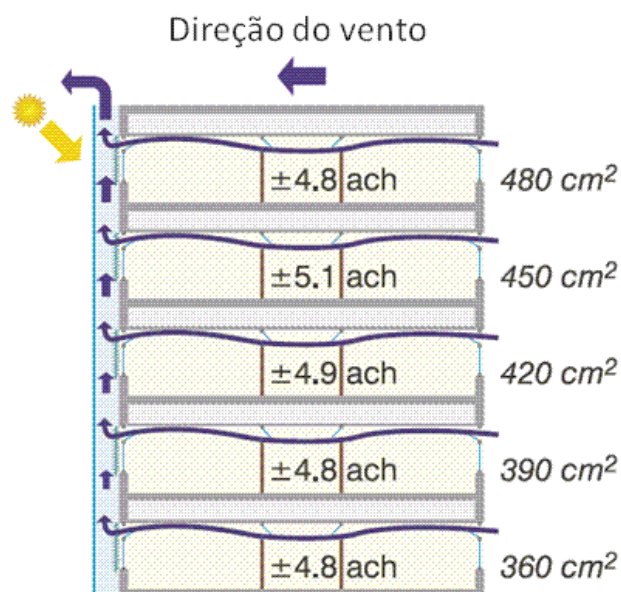


Figura 42. Esquema do sombreamento e troca do ar confinado para a dupla fachada.
Fonte: Gratia (2004).

Se posicionada corretamente, esta segunda camada pode proporcionar diminuição de até 20,5% da demanda energética de resfriamento. A distância entre as duas camadas de vidro é responsável pelo aumento ou diminuição da taxa de troca do ar confinado neste espaço. Um espaçamento de 2,5 cm entre as camadas proporciona 10 Ach (Taxa de troca da camada de ar), o que provoca um resfriamento de até 40°C da superfície exposta ao sol, já 50 cm de distância entre as placas, proporciona uma taxa de 100 Ach, com abaixamento de 27 °C (Gratia, 2004).

3. MODELO

3.1. MODELAGEM

Modelos são utilizados em praticamente todas as áreas científicas, sendo por vezes necessária a utilização de diversos modelos em conjunto para descrever fenômenos complexos. Para Barbosa (2005), *“A realidade dos fatos é de tal forma complexa que seu estudo por completo, a exaustão das análises que poderiam decorrer, se torna praticamente impossível”*. Assim sendo, a modelagem é capaz de fornecer um entendimento global dos cenários.

Um modelo matemático consiste em uma representação ou interpretação simplificada da realidade. A estrutura de um modelo matemático é composta por um conjunto universo e por constantes, relações e funções definidas neste conjunto (CEPSRM,2015).

3.2. SOFTWARES DE MODELAGEM

Consistem em um conjunto de informações a serem seguidas ou executadas como resposta a um dado acontecimento. Os softwares, como os programas de computador, são escritos em linguagens de programação (Java, Visual Basic, PHP, C, C++, entre outras).

3.2.1 O Matlab

O software utilizado para este trabalho foi o MATLAB (Matrix Laboratory), que é destinado à resolução de cálculos com matrizes e possui linguagem própria, podendo-se, portanto, desenvolver e solucionar algoritmos em MATLAB. Este software será utilizado neste trabalho para o desenvolvimento das soluções.

3.3. PREMISSAS DO MODELO

A seguir será apresentado um conjunto de premissas necessárias para o entendimento do modelo desenvolvido, assim como também indicar as particularidades adotadas.

3.3.1 Cidades analisadas

O trabalho aqui desenvolvido tem como tema central a análise da eficiência energética de telhados no Brasil. Para tanto, o estudo deve abranger todo o território brasileiro. Todavia, haveria uma repetição excessiva de dados, mesmo que o estudo abrangesse apenas as capitais dos 27 estados brasileiros.

Para fins de caracterização, em lugar de análises pontuais, foram escolhidas seis cidades, sendo estas, seis capitais brasileiras, cada uma delas localizada em um diferente domínio climático, conforme Figura 43. Desta maneira, considerou-se cada uma dessas capitais como representativas dos respectivos domínios.

1. Equatorial: Representado pela cidade de Manaus.
2. Tropical: Representado pela cidade de Cuiabá.
3. Semi-árido: Representado pela cidade de Teresina.
4. Litorâneo: Representado pela cidade de Recife.
5. Sub-Tropical: Representado pela cidade de Curitiba.
6. Tropical de altitude: Representado pela cidade de Belo Horizonte.

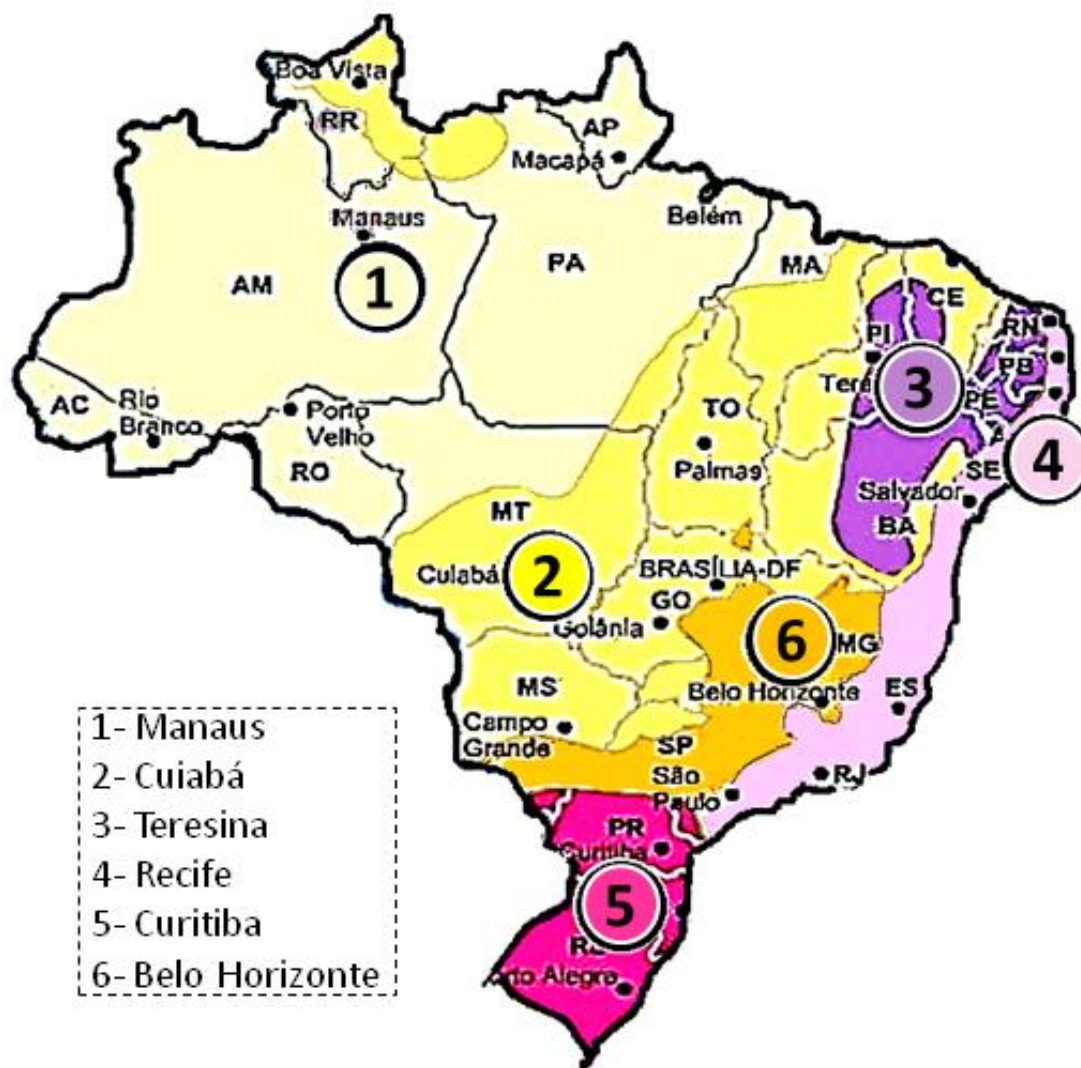


Figura 43 – Cidades representativas para cada domínio climático.

Fonte: Adaptado pela Autora, de www.aboutbrasil.com.

3.3.2 Geometria e material do telhado

A despeito da grande variedade de geometrias e materiais que constituem os telhados das casas e estabelecimentos comerciais, conforme exposto no capítulo de fundamentação teórica, ao longo do Brasil, destacam-se a aplicação de telhas de cerâmica para edifícios residenciais e de telhas metálicas para os comerciais, estas últimas, preferidas devido ao seu baixo custo (Brito Filho et. al., 2011).

As quatro composições de telhados propostas para este trabalho estão expostas na Figura 44. As configurações têm como base duas vertentes (Telhado 1 e Telhado 2) . O tipo 1 é composto por uma chapa lisa (sem ondulações ou ranhuras) de aço galvanizado, já o tipo 2, consiste em uma telha sanduíche composta por duas chapas lisas de aço galvanizado interpostas por um isolante térmico (poliuretano).

As duas vertentes ainda diferenciam-se por conter ou não o revestimento branco (tinta reflexiva) sobre sua superfície externa. Sendo o tipo A aquele telhado que não contém o revestimento e o tipo B, aquele que o contém em sua composição.

Telhado 1A



Telhado 1B



Telhado 2A



Telhado 2B

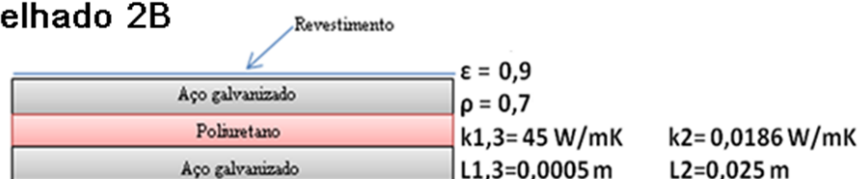


Figura 44 - Representação das quatro variações de cobertura analisadas.

As propriedades termofísicas e espessuras desses materiais foram obtidas de trabalhos previamente realizados, sendo estas e suas referências expostas na Tabela 2. Os materiais utilizados são: aço galvanizado, revestimento branco e poliuretano. Assume-se que todas as propriedades termofísicas são independentes da temperatura.

Tabela 2 - Propriedades termofísicas dos materiais.

Material	ρ [-]	ϵ [-]	k [W/mK]	L [m]	Referência
Aço galvanizado	0,3	0,3	45	0,0005	Brito Filho <i>et al</i> , 2011.
Poliuretano	x	x	0,0186	0,025	Brito Filho <i>et al</i> , 2011.
Revestimento branco	0,70	0,9	-	-	Levinson <i>et al.</i> , 2005*.

*Tabela da página 155. Ítem: telhado metálico pintado de branco.

3.3.3. O balanço de energia

O balanço de energia consiste na exposição sistemática dos fluxos e transformações de energia em um sistema. A base teórica para um balanço energético é a primeira lei da termodinâmica, segundo a qual a energia não pode ser criada ou destruída, apenas modificada em forma. As fontes de energia ou ondas de energia são, portanto, as entradas e saídas do sistema em observação. Neste caso, a exigência de conservação se torna (Incropera, 2008):

$$\begin{aligned} \left(\begin{array}{c} \text{Energia que entra} \\ \text{no} \\ \text{Volume de Controle} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Energia} \\ \text{gerada no} \\ \text{Volume de Controle} \end{array} \right) \\ = \left(\begin{array}{c} \text{Energia que sai} \\ \text{do} \\ \text{Volume de Controle} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Energia armazenada} \\ \text{no} \\ \text{Volume de Controle} \end{array} \right) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Para o balanço aqui considerado, assume-se que não há geração interna de calor nem armazenamento de energia. Desta forma, o balanço de energia é simplificado por:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Energia que entra} \\ \text{no} \\ \text{Volume de Controle} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Energia que sai} \\ \text{do} \\ \text{Volume de Controle} \end{array} \right) = 0 \quad (3.2)$$

Assume-se ainda:

- Regime transiente (condições de contorno variantes no tempo);
- Não se consideram influências das paredes nem dos pisos;
- Condução unidimensional;
- Propriedades independentes da temperatura;
- O telhado consiste em uma superfície plana e lisa (sem ranhuras);
- Telhado paralelo à superfície terrestre (inclinação nula);
- Para cálculo da radiação solar, foram considerados dias sem chuva;

- A temperatura do ambiente interno é constante e igual a 23 °C;
- Convecção do telhado para o ambiente interno é considerada responsável pela troca térmica entre o ar ambiente mantido à temperatura constante ($T_i = 23^\circ\text{C}$) e a temperatura da face interna do telhado;
- Radiação externa é considerada pois assume-se que a superfície externa do telhado aquece suficientemente para influenciar o meio externo próximo ao telhado;
- Convecção do telhado para o ambiente externo é considerada devido a movimentação dos ventos em torno do telhado promover trocas convectivas.

As Figuras 45 e 46 esquematizam o balanço de energia realizado, com destaque para o volume de controle na superfície do telhado e o direcionamento do fluxo térmico na figura 45.

O fluxo térmico (ou fluxo de calor) consiste na taxa de energia térmica transferida, sendo seu valor em unidades de área e tempo. A unidade de medida do fluxo de calor (Q) é W/m^2 .

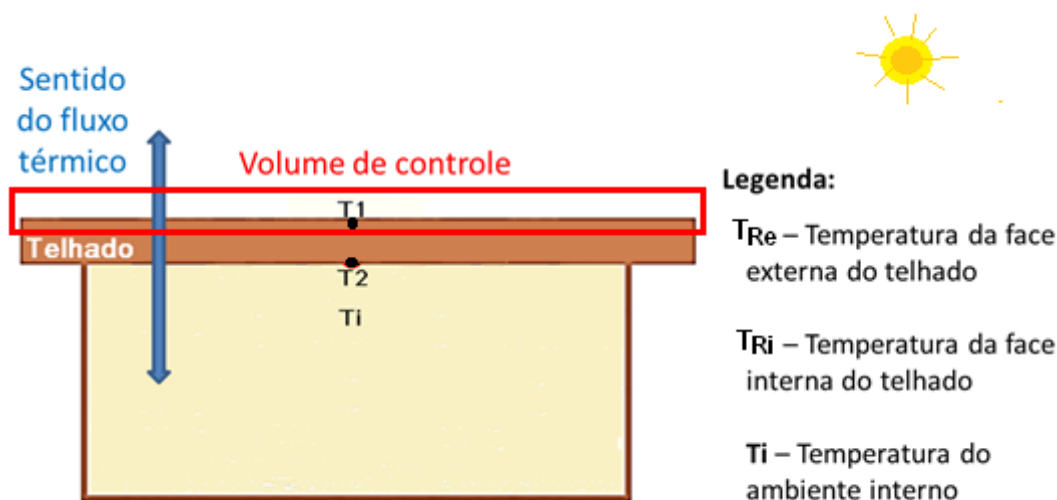


Figura 45 – Volume de controle e direcionamento do fluxo térmico.

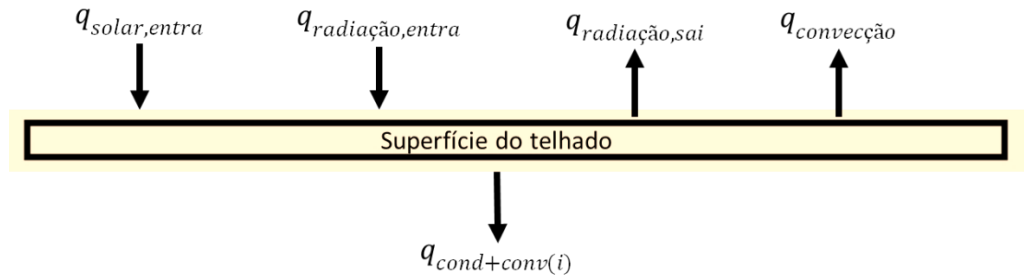


Figura 46 – Balanço de energia na superfície do telhado (volume de controle).

A energia que entra no volume de controle é advinda da radiação solar e do calor emitido pelo céu. A energia sai do volume de controle por meio de mecanismos de radiação, convecção e condução que o telhado realiza. Assim, o balanço é reescrito da seguinte forma:

$$q_{solar,entra} + q_{radiação,entra} - q_{cond+conv(i)} - q_{radiação,sai} - q_{convecção} = 0 \quad (3.3)$$

Em que:

$q_{solar,entra}$ = calor da radiação solar que entra no ambiente.

$q_{radiação,entra}$ = calor emitido pelo céu, que entra no ambiente.

$q_{cond+conv}$ = troca de calor com o ambiente por condução e por convecção para o interior.

$q_{radiação,sai}$ = calor perdido por radiação para o ambiente externo.

$q_{convecção}$ = troca de calor com o ambiente externo por convecção.

3.3.3.1. Análise dos termos que compõem o balanço

$$q_{\text{solar,entra}} = \alpha G_t(t) \quad (3.4)$$

em que: G_t radiação solar total incidente, W/m^2 .
 α absortividade da superfície do telhado, adimensional.

$$q_{\text{radiação,entra}} = \varepsilon_{\text{céu}} \sigma T_o(t)^4 \quad (3.5)$$

em que: $\varepsilon_{\text{céu}}$ emissividade do céu, adimensional.
 σ constante de Stefan-Boltzmann ($= 5,67 \times 10^{-8}$), $\text{W/m}^2\text{K}^4$.
 T_o Temperatura do ar externo, K.

$$q_{\text{cond+conv(i)}} = U[T_R(t) - T_i] \quad (3.6)$$

em que: U coeficiente de transferência de calor global, $\text{W/m}^2\text{K}$.
 T_R Temperatura da superfície do telhado, K.
 T_i Temperatura do ambiente interno, K.

$$q_{\text{radiação,sai}} = \varepsilon \sigma T_R(t)^4 \quad (3.7)$$

em que: ε emissividade da superfície do telhado, adimensional.
 α absortividade da superfície do telhado, adimensional.
 T_R Temperatura da superfície do telhado, K.

$$q_{\text{convecção}} = h_o[T_R(t) - T_o(t)] \quad (3.8)$$

em que: h_o coeficiente de transferência de calor por convecção no telhado, $\text{W/m}^2\text{K}$.
 T_R Temperatura da superfície do telhado, K.

T_o Temperatura do ar externo, K.

Reescrevendo o balanço nos termos que o compõem:

$$\alpha G_t(t) + \varepsilon_{céu} \sigma T_o(t)^4 - U[T_R(t) - T_i] - \varepsilon \sigma T_R(t)^4 - h_o[T_R(t) - T_o(t)] = 0 \quad (3.9)$$

Para atingir os objetivos propostos, deseja-se obter a solução do balanço de energia e, para tanto, faz-se necessária a obtenção dos termos que o compõe. Dentre os termos, há propriedades inerentes aos materiais, condições ambientais e outros que devem ser obtidos.

O modelo utilizado consiste na obtenção dos termos do balanço por meio de procedimentos padrões contidos na literatura científica, como exemplo as equações de obtenção da radiação solar total incidente ($G_t(t)$) ao longo do curso de um dia, iniciando com os dados da irradiação hemisférica (Brito Filho et. al., 2011). A tabela 3 contém todos os termos e a forma de determinação dos mesmos. O termo T_R , que corresponde à temperatura da superfície externa do telhado, consiste na incógnita para resolução do balanço. As equações de modelos consolidados da literatura possuem suas respectivas fontes citadas no item “obtenção”. O termo h_i , apesar de não estar explícito no balanço, é necessário para o cálculo do coeficiente de transferência global.

Tabela 3 - Formas de obtenção dos termos do balanço de energia.

Termo	Significado	Obtenção
α	Absortividade da superfície do telhado	*Usuário
G_t	Radiação solar total incidente	Liu and Jordan, 1963, p. 57
$\varepsilon_{céu}$	Emissividade do céu	Berdahl and Fromberg, 1982, pp.299
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	(= $5,67 \times 10^{-8}$), W/m ² K ⁴
T_o	Temperatura do ar externo	Ephrath, 1996
h_i	Coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície inferior do telhado	*** (= 8), W/m ² K
T_R	Temperatura da superfície externa do telhado	?
T_i	Temperatura do ambiente interno	** (= 23), °C
ε	Emissividade da superfície do telhado	*Usuário
h_o	Coeficiente de transferência de calor por convecção no telhado	McAdams, 1954

(*) Usuário: termo que depende diretamente das propriedades do material inseridas no programa pelo usuário.

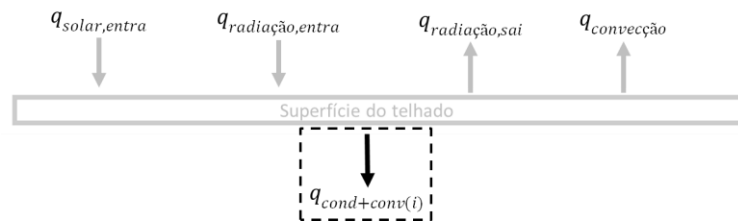
(**) Como a temperatura de conforto possui limites mínimo e máximo respectivamente de 18°C e 27°C, a temperatura interna foi assumida como 23°C, que corresponde à média do intervalo.

(***) Valor assumido para escoamento interno, contido no intervalo correspondente aos valores médios de escoamento natural do ar no interior do ambiente: $5 \text{ W/m}^2\text{K} < h_i < 15 \text{ W/m}^2\text{K}$

3.4. EQUAÇÕES DO MODELO

Os termos que compõem o balanço de energia em torno do telhado foram organizados no modelo de forma ao entendimento tornar-se mais didático.

Obtenção do termo: Calor total transferido durante qualquer intervalo de tempo, que representa a troca de calor com o ambiente por condução e por convecção para o interior (Figura 47)..



$$q_{\text{cond+conv(i)}} = U[T_R(t) - T_i]$$

Figura 47 – Calor transferido durante qualquer intervalo de tempo.

$$q(t) = U[T_R(t) - T_i] \quad (3.10)$$

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} U[T_R(t) - T_i] dt \quad (3.11)$$

q	Taxa de transferência de calor por unidade de área de superfície, W/m ² .
Q	Calor total transferido durante qualquer intervalo de tempo, J/m ² .
U	Coeficiente de transferência de calor global, W/m ² K.
T _R	temperatura da superfície externa do telhado, K.
T _i	Temperatura do ar no interior do ambiente, K.
(t ₁ , t ₂)	intervalo de tempo (entre 0 e 24), horas, h.

Para o cálculo, serão necessários os valores do Coeficiente de transferência de calor global (U) e da Temperatura da superfície externa do telhado (T_R(t)).

Para o calculo do Coeficiente de transferência de calor global, tem-se:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_{i=0}^n \frac{L_i}{k_i}} \quad (3.12)$$

U	Coeficiente de transferência de calor global, W/m ² K.
h _i	Coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície inferior do telhado, W/m ² K.
L	Espessura do material do telhado, m.
k	Condutividade térmica do material do telhado, W/mK.

Assume-se para este modelo o coeficiente de transferência de calor entre o ambiente interno e a superfície inferior do telhado como um valor constante no intervalo correspondente aos valores médios de escoamento natural do ar no interior do ambiente:

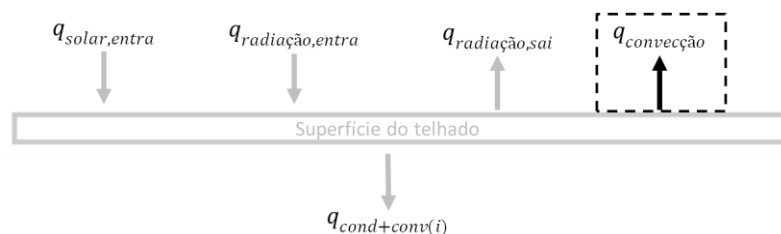
$$5 \text{ W/m}^2\text{K} < h_i < 15 \text{ W/m}^2\text{K}.$$

$$h_i = 8 \text{ W/m}^2\text{K}.$$

h _i	Coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície inferior do telhado, W/m ² K.
----------------	--

A Temperatura da superfície externa do telhado ($T_R(t)$) será obtida por meio do balanço de energia e resolução do modelo.

Obtenção do termo: Calor transferido por convecção da superfície do telhado para o ambiente externo (Figura 48).



$$q_{\text{convecção}} = h_0 [T_R(t) - T_0(t)]$$

Figura 48 – Troca de calor com o ambiente externo por convecção.

Para cálculo do calor transferido por convecção da superfície do telhado para o ambiente externo são necessários o Coeficiente de transferência de calor para superfície externa do telhado (h_o) e a Temperatura do ambiente externo (T_o), assim obtidos:

Coeficiente de transferência de calor para superfície externa do telhado [McAdams, 1954]:

$$h_o = 5,7 + 3,8v \quad (3.13)$$

h_o	Coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície externa do telhado, W/m^2K
v	Velocidade do vento, m/s

Observação: A velocidade do vento para cada cidade é obtida dos dados meteorológicos expostos no ANEXO I, extraídos de C.Tiba (2004) e Normais Climatológicas (1992).

Temperatura do ambiente externo [Ephrath, 1996]:

$$T_o(t) = T_{o,med} + \frac{1}{2}(T_{o,max} - T_{o,min}) \cos(\omega(t) - \frac{\pi}{4}) \quad (3.14)$$

T_o	Temperatura do ambiente externo, °C
$T_{o,ave}$	Temperatura média mensal do ar exterior, °C
$T_{o,max}$	Temperatura máxima mensal do ar exterior, °C
$T_{o,min}$	Temperatura mínima mensal do ar exterior, °C
ω	Ângulo horário ($-\pi$ a 0 a.m e 0 a π p.m), rad

Observação: As Temperaturas médias, máximas e mínimas para cada cidade são obtidas dos dados meteorológicos expostos no ANEXO I, extraídos de C.Tiba (2004) e Normais Climatológicas (1992).

Conceito: Ângulo Horário

O ângulo horário corresponde ao deslocamento solar, se observado da superfície plana terrestre. Considerando os 180° da superfície plana, sendo o padrão de 12 horas de

deslocamento solar de um ponto a outro, cada hora corresponde a um deslocamento de 15° , assim, o ângulo horário varia de $-\pi$ a π , conforme Figura 49.

ω ângulo horário ($-\pi$ a 0 a.m e 0 a π p.m), rad



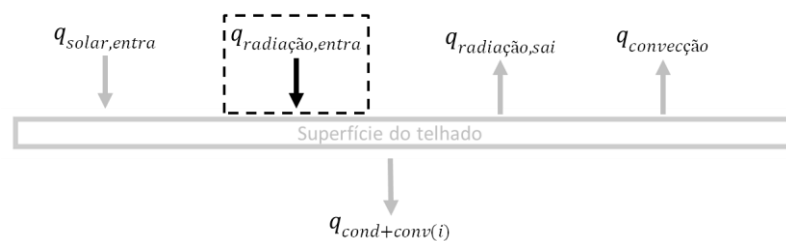
Figura 49 - Deslocamento e ângulo horário do Sol.

Calculado por:

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau_{dia}} t \quad (3.15)$$

ω ângulo horário ($-\pi$ to 0 a.m e 0 to π p.m), rad
 t tempo do dia (-12 to 0 a.m e 0 to 12 p.m), hr
 τ_{dia} comprimento do dia (=24), hr

Obtenção do termo: Calor da radiação solar que entra no ambiente (Figura 50).



$$q_{radiação,entra} = \epsilon_{céu} \sigma T_0(t)^4$$

Figura 50 - Calor da radiação solar que entra no ambiente.

Para tanto, é necessário o cálculo da emissividade do céu [Berdahl and Fromberg, 1982, pp.299]:

$$\varepsilon_{\text{céu}} = 0,741 + 0,0062T_{po} \quad (3.16)$$

$E_{\text{céu}}$ Emissividade do céu, adimensional.
 T_{po} Temperatura do ponto de orvalho, °C.

Em que:

$$T_{po} = 1,0119 - 0,035T_{o,méd} + 0,9679T_{o,min} + 0,0072(T_{o,max} - T_{o,min}) \quad (3.17)$$

$T_{o,méd}$ temperatura média mensal do ar exterior, °C
 $T_{o,max}$ temperatura máxima mensal do ar exterior, °C
 $T_{o,min}$ temperatura mínima mensal do ar exterior, °C

Obtenção do termo: Calor perdido por radiação para o ambiente externo (Figura 51).

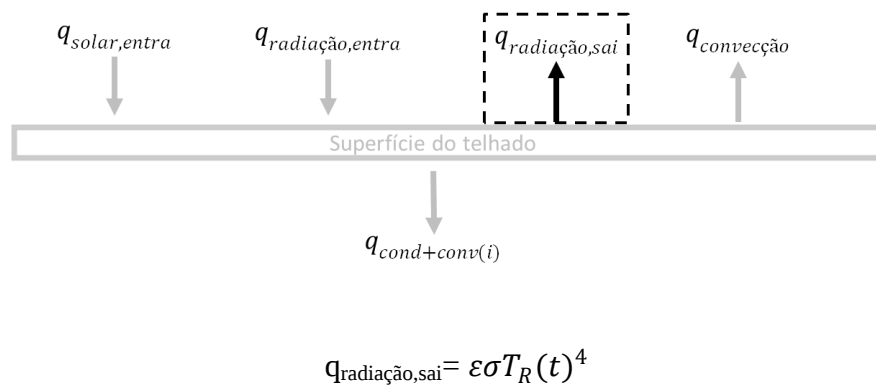
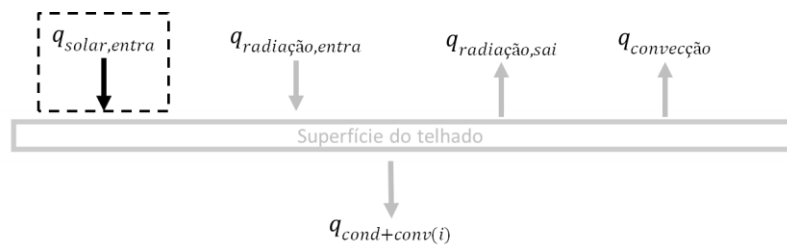


Figura 51 – Calor perdido por radiação para o ambiente externo.

O cálculo desse termo dependerá da emissividade da superfície do telhado, que é uma propriedade do material constituinte da superfície externa do telhado.

ε = emissividade da superfície do telhado, adimensional.

Obtenção do termo: Calor da radiação solar que entra no ambiente (Figura 52).



$$q_{\text{solar,entra}} = \alpha G_t(t)$$

Figura 52 – Calor da radiação solar que entra no ambiente.

Para o cálculo, é necessária a obtenção da Radiação solar total incidente [Liu and Jordan, 1963, p. 57]:

$$G_t = \overline{I_{b,n}} \cos \theta + \frac{\overline{I_d}}{2} (1 + \cos \beta) + \overline{I_h} \rho_{\text{solo}} \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \quad (3.18)$$

G_t radiação solar total incidente, W/m^2 .

$\overline{I_{b,n}}$ Irradiância média mensal feixe de hora em hora (insolação instantânea) em incidência normal, W/m^2 .

$\overline{I_h}$ Irradiância horária média mensal hemisférica sobre uma superfície horizontal, W/m^2 .

$\overline{I_d}$ Irradiância horária média mensal difusa sobre uma superfície horizontal, W/m^2 .

θ	ângulo de incidência, rad
β	inclinação do telhado a partir da superfície horizontal (+direção equador), rad.
ρ_{solo}	refletividade do solo, adimensional.

Observação: $\rho_{\text{solo}} = 0,6$. (Brito Filho *et al.*, 2011).

Ainda, a fim de se obter a Radiação solar total incidente, os termos que compõe sua equação são determinados a seguir nos tópicos a, b, c e d:

a. Coseno do ângulo de incidência ($\cos\theta$) [Rabl, 1985, pp. 35]

$$\cos\theta = \sin\delta (\sin\lambda \cos\beta - \cos\lambda \sin\beta \cos\phi) + \cos\delta \cos\omega (\cos\lambda \cos\beta + \sin\lambda \sin\beta \cos\phi) + \cos\delta \sin\beta \sin\omega \sin\phi \quad (3.19)$$

θ	ângulo de incidência, rad
δ	declinação solar, rad
λ	latitude, rad
β	inclinação do telhado a partir da superfície horizontal (+direção equador), rad
ϕ	azimute telhado do Sul devido em relação ao plano horizontal (+ Oeste, - Leste), rad
ω	ângulo horário ($-\pi$ to 0 a.m e 0 to π p.m), rad

Obervação:

A latitude (λ) para cada cidade é obtida dos dados meteorológicos expostos no ANEXO I, extraídos de C.Tiba (2004) e Normais Climatológicas (1992). Positiva no Hemisfério Norte e negativa no Hemisfério Sul.

Conceitos:

Ângulo de incidência (θ)

O ângulo entre a normal da superfície e a direção dos raios solares é denominado ângulo de incidência.

Declinação solar (δ)

O ângulo entre o plano do Equador e o plano da trajetória terrestre é de aproximadamente $23,45^\circ$, sendo esta inclinação a causa de ocorrência das estações climáticas. Este ângulo é denominado declinação solar (δ), esquematizado na Figura 53.

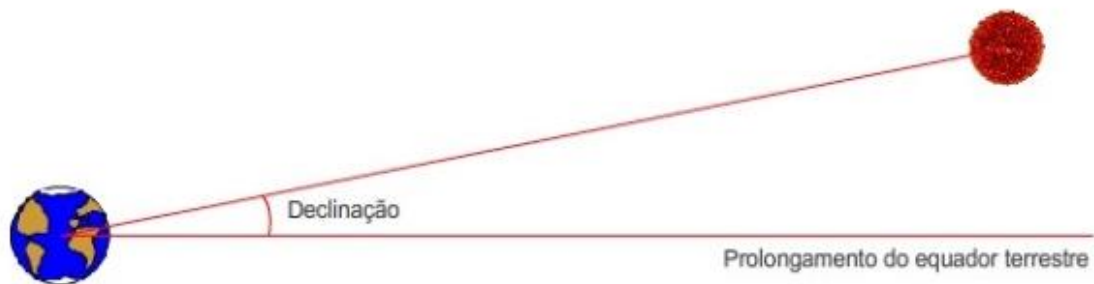


Figura 53 – Declinação solar.

Fonte: www.ae2.pt

Segundo Collares-Pereira and Rabl (1979), pode ser assim obtido:

$$\delta = \sin^{-1}(0.3979 \cdot \sin \gamma) \quad (3.20)$$

(Nota-se que: $0.3979 = \sin 23.45^\circ$)

Onde, aproximando-se a órbita da Terra para circular, tem-se:

$$\gamma \approx \gamma_0 = \frac{2\pi(n + 284)}{365,24} \quad (3.21)$$

Para maior precisão, a expressão é dada por:

$$\gamma = \gamma_0 + 0.007133 \sin \gamma_0 + 0.032680 \cos \gamma_0 - 0.000318 \sin 2\gamma_0 + 0.000145 \cos 2\gamma_0 \quad (3.22)$$

Inclinação do telhado a partir da superfície horizontal (β)

Em um local de latitude λ , caso se incline o plano de incidência para o Equador de um ângulo β , deve-se ter a seguinte condição:

$$\lambda - \beta = 0, \quad \text{quando } |\beta| = |\lambda|.$$

Ou seja, ambos possuem o mesmo sentido, conforme Figura 54.

Para este modelo, atribuiu-se $\beta = 0$. Isto é, o telhado é um plano paralelo à superfície da Terra.

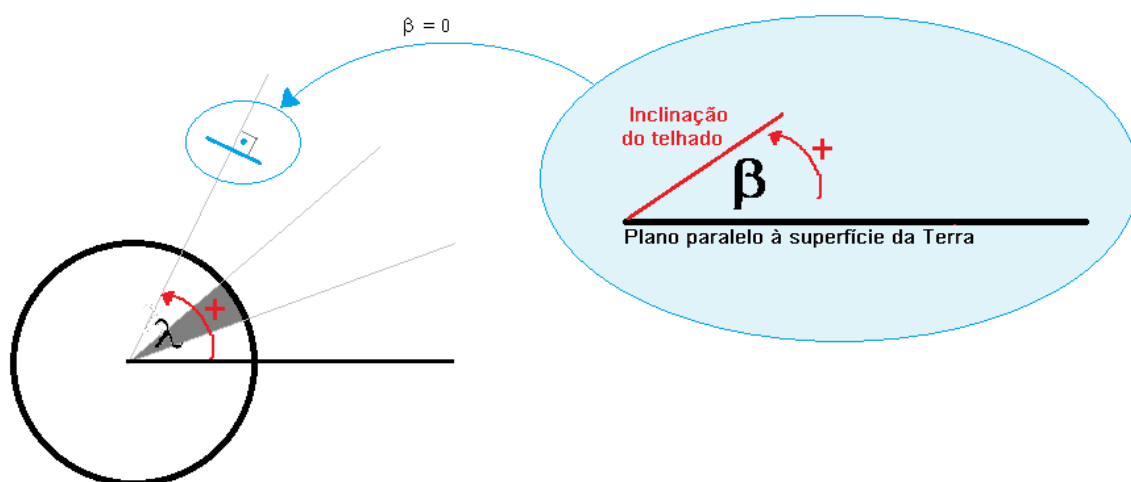


Figura 54 – Inclinação do telhado a partir da superfície horizontal.

Azimute (ϕ)

O ângulo de azimute (ϕ), fixado neste trabalho como π rad (equivalente a 180°), é formado pela projeção da normal à superfície, no plano horizontal, com a direção Norte-Sul. Varia de 0 a ± 180 a partir do Sul, positivo a Oeste e negativo a Leste. A Figura 55 torna explícito o processo de determinação do azimute.

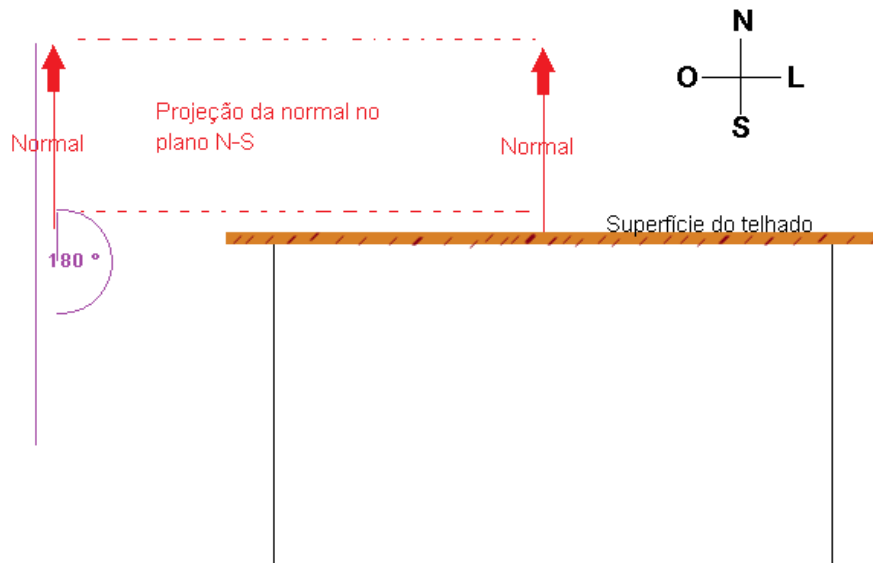


Figura 55 - Processo de determinação do ângulo de azimuth para superfície simulada.

- b. Irradiância média mensal feixe de hora em hora (insolação instantânea) em incidência normal ($\overline{I_{b,n}}$):

$$\overline{I_{b,n}} = \frac{\overline{I_h} - \overline{I_d}}{\cos \theta_z} \quad (3.23)$$

$\overline{I_{b,n}}$ Irradiância média mensal feixe de hora em hora (insolação instantânea) em incidência normal, W/m^2 ;

$\overline{I_h}$ Irradiância horária média mensal hemisférica sobre uma superfície horizontal, W/m^2 ;

$\overline{I_d}$ Irradiância horária média mensal difusa sobre uma superfície horizontal, W/m^2 ;

θ_z ângulo zenital, rad.

Conceito: Ângulo zenital

É o comprimento da altura medida sobre o círculo vertical da Terra, conforme Figura 56.

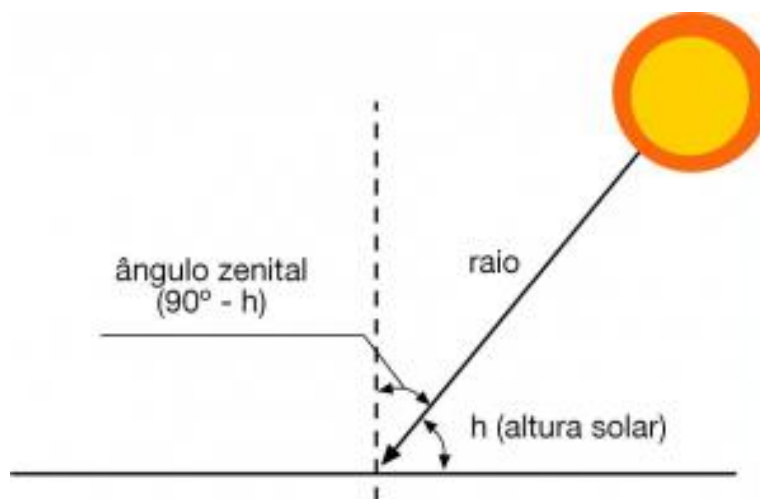


Figura 56 – Ângulo zenital.

Fonte: www.mf200cf.blogspot.com.br.

c. Irradiância horária média mensal difusa sobre uma superfície horizontal ($\overline{I_d}$):

$$\overline{I_d} = r_d \overline{H_d} \quad (3.24)$$

$\overline{I_d}$ Irradiância horária média mensal difusa sobre uma superfície horizontal,
W/m²

r_d proporção de hora em hora a radiação hemisférica diária, adimensional.

$\overline{H_d}$ irradiância média mensal diária difusa sobre uma superfície horizontal,
J/m²-dia

em que:

[Liu and Jordan, pp. 16, 1960]

$$r_d(\omega, \omega_s) = \frac{\pi}{\tau_{dia}} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s} \quad (3.25)$$

r_d	proporção de hora em hora da radiação difusa diária, adimensional
τ_{dia}	comprimento do dia (=24), hr
ω	ângulo horário (- π to 0 a.m e 0 a π p.m), rad
ω_s	ângulo horário do Sol (- π to 0 a.m e 0 a π p.m), rad

Conceito: Ângulo horário do Sol

Varia conforme o ângulo horário, expresso na Figura 46, sendo a variação de $-\pi$ a π . Porém, considera o deslocamento da latitude, fazendo sempre o meio-dia solar ser o ponto zero do eixo x (horizontal) de deslocamento. Ou seja, diz respeito à hora local, enquanto que o ângulo horário estabelece o ângulo em que o Sol se encontra em relação à hora oficial.

$$\cos \omega_s = -\tan \lambda \tan \delta \quad (3.26)$$

ω_s	ângulo horário do Sol (- π to 0 a.m e 0 a π p.m), rad
λ	latitude, rad
δ	declinação solar, rad

e

[Collares-Pereira and Rabl, pp. 158, 1979]

$$\bar{H}_d = \left[0,775 + 0,347 \left(\omega_s - \frac{\pi}{2} \right) - \left[0,505 + 0,216 \left(\omega_s - \frac{\pi}{2} \right) \right] \cos[2(\bar{K}_h - 0,9)] \right] \bar{H}_h \quad (3.27)$$

em que:

$$\bar{K}_h = \frac{\bar{H}_h}{H_0} \quad (3.28)$$

$\overline{K_h}$	Índice de claridade media mensal, adimensional;
$\overline{H_h}$	Radiação solar incidente, J/m ² -dia.
H_o	Irradiação extraterrestre diária em uma superfície horizontal, J/m ² -dia;
$\overline{H_d}$	Irradiância média mensal diária difusa sobre uma superfície horizontal, J/m ² -dia;
ω_s	Ângulo horário do Sol (- π to 0 a.m e 0 a π p.m), rad.

e

Irradiação extraterrestre diária em uma superfície horizontal

[Collares-Pereira and Rabl, 1979, p. 156]

$$H_o = \frac{\tau_{dia}}{\pi} I_{0,n} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{2\pi n}{365,24} \right) \right] \cos \lambda \cos \delta (\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s) \quad (3.29)$$

H_o	irradiação extraterrestre diária em uma superfície horizontal, J/m ² -dia
τ_{dia}	comprimento do dia (=24), hr
$I_{0,n}$	constante solar (= 1367), W/m ²
n	Dia do ano (começando em 1 Janeiro), adimensional;
λ	Latitude, rad
δ	Declinação solar, rad
ω_s	ângulo horário do Sol (- π to 0 a.m and 0 to π p.m), rad.

Conceito: Dia do ano (n)

É considerado como sendo o dia típico de cada mês, ou seja, o dia cujas propriedades meteorológicas são representativas para o mês em questão. Os dias típicos para os meses são expostos na Tabela 4.

Tabela 4 - Dia típico de cada mês.

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
17	47	75	105	135	162	198	228	258	288	318	344

d. Irradiância horária média mensal hemisférica sobre uma superfície horizontal ($\overline{I_h}$):

$$\overline{I_h} = r_h \overline{H_h} \quad (3.30)$$

$\overline{I_h}$	Irradiância horária média mensal hemisférica sobre uma superfície horizontal, W/m ²
r_h	proporção de hora em hora da radiação hemisférica diária, adimensional.
$\overline{H_h}$	radiação solar incidente, J/m ² -dia

A proporção de hora em hora da radiação hemisférica diária (r_h) é determinada por [Collares-Pereira and Rabl, pp. 160, 1979]:

$$r_h(\omega, \omega_s) = (a + b \cos \omega) r_d(\omega, \omega_s) \quad (3.31)$$

$$a = 0,4090 + 0,5016 \sin(\omega_s - \pi/3) \quad (3.32)$$

$$b = 0,6609 + 0,4767 \sin(\omega_s - \pi/3) \quad (3.33)$$

em que:

$$r_d(\omega, \omega_s) = \frac{\pi}{\tau_{dia}} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s} \quad (3.34)$$

r_d	proporção de hora em hora da radiação difusa diária, adimensional
τ_{dia}	comprimento do dia (=24), hr
ω	ângulo horário (- π to 0 a.m and 0 to π p.m), rad
ω_s	ângulo horário do Sol (- π to 0 a.m and 0 to π p.m), rad

Cosseno do ângulo zenital

$$\cos \theta_z = \cos \lambda \cos \delta (\cos \omega - \cos \omega_s) \quad (3.35)$$

θ_z	ângulo zenital, rad
λ	latitude, rad
δ	declinação solar, rad
ω	ângulo horário (- π to 0 a.m and 0 to π p.m), rad
ω_s	ângulo horário do Sol (- π to 0 a.m and 0 to π p.m), rad

3.4.1. Especificações

- Os dados de longitude, latitude e climáticos para cada capital brasileira foram coletados no IMET (Instituto de meteorologia), sendo estas, as médias históricas, que compõem a planilha ‘BRASIL’, disponível no ANEXO I.
- Foi considerada a hora solar sendo de 12 horas, iniciando-se às 06:00 da manhã e finalizando-se às 18:00.

Conceito: Hora Solar

A hora solar consiste na hora baseada no movimento aparente que o Sol apresenta sobre o céu, do ponto de vista de um observador terrestre. Assim, ao meio dia, o Sol está sobre o meridiano do observador.

Para Rabl (1985), o tempo solar pode ser convertido para tempo padrão através da denominada Equação do tempo (EOT):

(3.36)

$$EOT = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.01461 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B)$$

Onde

$$B = \frac{360(n-1)}{365} \quad (3.37)$$

n = dia do ano (começando em 1 de Janeiro), adimensional.

EOT = Equação do tempo, min.

Faz-se a conversão do tempo solar para o tempo padrão (tempo de relógio):

$$\text{TempoPadrão} = \text{TempoSolar} - [4(L_{st} - L_{loc}) + EOT] \quad (\text{em minutos}) \quad (3.38)$$

$$\text{TempoPadrão} = (\text{TempoSolar} + 12) - \left[\frac{(L_{st} - L_{loc})}{15} + \frac{EOT}{60} \right] \quad (\text{em horas}) \quad (3.39)$$

L_{st} meridiano padrão para a zona de tempo local, em graus.

L_{loc} longitude da locação, em graus.

Sob estes aspectos, elaborou-se um modelo para prever o aquecimento sofrido pela cobertura que se deseja avaliar, desde que se forneça a condutividade térmica (K , em W/m.K), a espessura (L , em metros), além da refletividade (ρ) e da emissividade (ϵ) de cada material que a compõe. Materiais estes que podem ser desde isolantes térmicos variados até metais e tintas isolantes de superfície.

Quanto ao direcionamento do fluxo de calor calculado, o mesmo foi considerado unidimensional, conforme as premissas expostas, e as influências de borda foram descartadas, assim sendo, o fluxo que atravessa a cobertura, para todas as simulações aqui desenvolvidas sofre influencias apenas das propriedades dos materiais e do gradiente de temperatura entre os ambientes externo e interno.

3.4.2. Obtenção da Temperatura Sol-ar

A Temperatura Sol-ar (T_{sa}) consiste na temperatura da região próxima ao telhado, isto é, em torno do mesmo. A T_{sa} leva em conta a radiação advinda da superfície do telhado, além da radiação solar direta e difusa. É a temperatura que melhor descreve os processos envolvidos na formação das ilhas de calor.

Além do coeficiente global de transferência de calor em torno da superfície da cobertura (U), que permite, por meio da resolução do balanço de energia, a obtenção da temperatura da superfície externa do telhado (T_R), um coeficiente mais abrangente, o U^* , pode ser considerado com o objetivo de se determinar a temperatura Sol-ar (T_{sa}). Assim, o

volume de controle abrangeria aspectos do ar ambiente, considerando as convecções que ocorrem entre a superfície do telhado e o meio externo, conforme Figura 57.

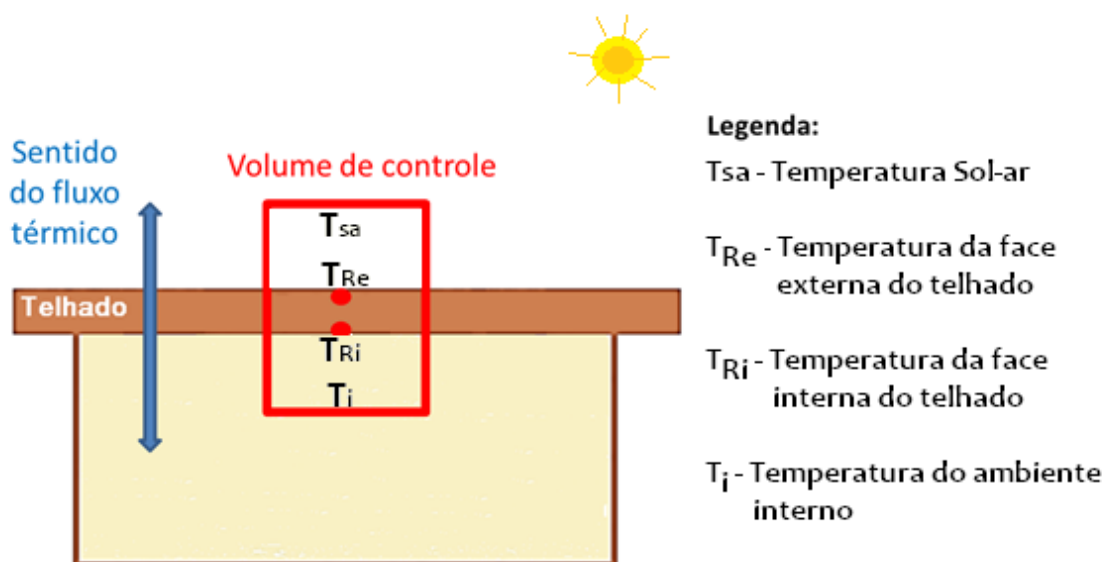


Figura 57 – Volume de controle para cálculo de T_{sa} .

O processo de transferência de calor que ocorre entre o ambiente externo, o telhado e o ambiente interno pode ser melhor entendido usando o modelo de resistência mostrado na Figura 58.

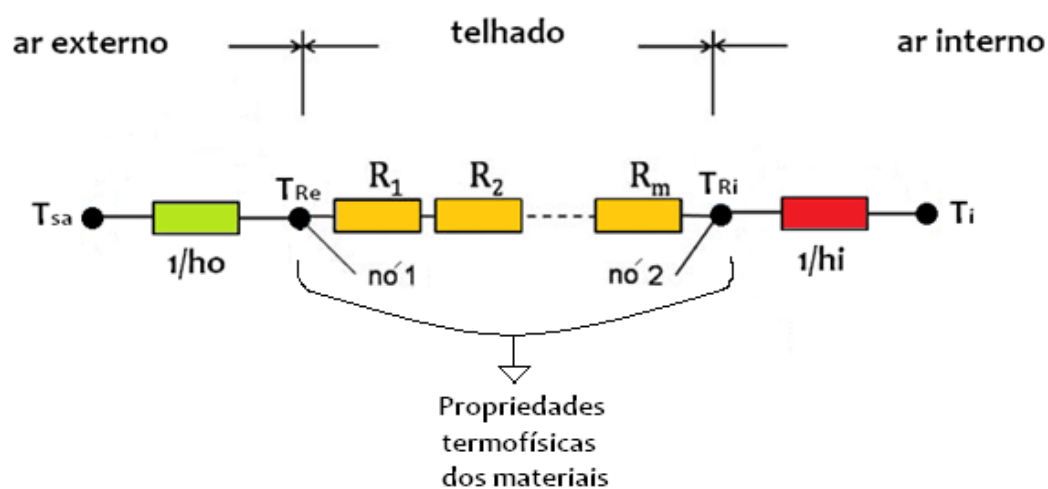


Figura 58 – Modelo da resistência para o processo de transferência de calor.

Em concordância com as premissas iniciais:

- Propriedades independentes da temperatura;
- A temperatura do ambiente interno é constante e igual a 23 °C;
- Convecção do telhado para o ambiente interno ($h_i = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$) é considerada responsável pela troca térmica entre o ar ambiente mantido à temperatura constante ($T_i = 23^\circ\text{C}$) e a temperatura da face interna do telhado;
- Radiação externa é considerada, pois assume-se que a superfície externa do telhado aquece suficientemente para influenciar o meio externo próximo;
- Convecção do telhado para o ambiente externo ($h_o = 5.7 + 3.8v$) é considerada devido a movimentação dos ventos em torno do telhado promover trocas convectivas.

Fluxo de calor total que atravessa o telhado durante qualquer interval de tempo

$$q(t) = U * [T_{sa}(t) - T_i] \quad (3.40)$$

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} U * [T_{sa}(t) - T_i] dt \quad (3.41)$$

- q Taxa de transferência de calor por unidade de área de superfície, W/m^2 .
 Q Calor total transferido durante qualquer interval de tempo, J/m^2 .
 U* Coeficiente de transferência de calor global, $\text{W/m}^2\text{K}$.
 T_{sa} Temperatura Sol-ar, K.
 T_i Temperatura do ar no interior do ambiente, K.
 (t₁, t₂) intervalo de tempo (entre 0 e 24), horas, h.

Coeficiente global de transferência de calor [Incropera et al., 2008]

O coeficiente global de transferência de calor (U*) equivale à resistência global para o modelo da resistência aplicado ao processo de transferência de calor (Figura 58). Sendo $(1/h_o)$ e $(1/h_i)$, respectivamente as resistências convectivas externa e interna e $R=R_1+R_2+\dots+R_m$, a resistência dos materiais componentes do telhado à transferência de calor por condução.

$$U^* = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \sum_{i=0}^n \frac{L_i}{k_i} + \frac{1}{h_i}} \quad (3.42)$$

U^*	Coeficiente de transferência de calor global, W/m^2K
h_o	Coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície externa do telhado, W/m^2K
h_i	Coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície interna do telhado, W/m^2K
L	espessura do material, m
k	condutividade térmica do material, W/mK

Em que: $R=L/K$.

Dado o modelo inicial apresentado e se considerando, por ele determinada, a temperatura T_R , a temperatura Sol-ar é obtida segundo a ASHRAE 27 (1997):

$$T_{sa}(t) = T_o(t) + \alpha \frac{G_t(t)}{h_o} - \varepsilon \frac{\Delta R(t)}{h_o} \quad (3.43)$$

T_{sa}	Temperatura Sol-ar, $^{\circ}C$;
T_o	Temperatura do ambiente externo, $^{\circ}C$;
α	Absortividade da superfície para radiação de ondas curtas, adimensional;
G_t	Radiação solar total incidente, W/m^2 ;
h_o	Coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície externa do telhado, W/m^2K ;
ε	Emissividade da superfície de radiação de ondas longas, adimensional;
ΔR	Diferença entre a superfície de onda longa e radiação atmosférica, W/m^2 .

Nota: radiação de onda curta (radiação solar: 0,4 a 0,8 μm) de radiação / onda longa (emitida pelo céu) ($> 0,8 \mu\text{m}$).

Diferença entre a superfície de onda longa e radiação atmosférica [Mills, 1995]

$$\Delta R(t) = \sigma [T_R(t)^4 - \varepsilon_{\text{céu}} T_o(t)^4] \quad (3.44)$$

ΔR	Diferença entre a superfície de onda longa e a radiação atmosférica, W/m^2 ;
σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($= 5,67 \times 10^{-8}$), $\text{W/m}^2\text{K}^4$;
T_R	Temperatura da superfície do telhado, K;
$\varepsilon_{\text{céu}}$	Emissividade do céu, adimensional;
T_o	Temperatura do ambiente externo, K.

3.5. DESENVOLVIMENTO DO CÓDIGO EM MATLAB

A primeira parte do código destina-se à obtenção de dados referente aos materiais que compõem a cobertura e à escolha da cidade que o usuário do programa deseja obter as informações. Os dados de saída são disponibilizados em forma de gráficos, sendo quatro diferentes tipos, à escolha do usuário.

Para modelagem, elaborou-se um fluxograma a fim de se obter melhor visualização da dependência das variáveis. O fluxograma, projeto do código, encontra-se disponível no tópico 3.5.3.

Para tornar acessível a utilização do software, foi desenvolvida uma interface de interação para o usuário do programa, assim, os dados fornecidos pelo usuário são compilados e usados diretamente para o cálculo dos gráficos gerados. A interface pode ser vista na Figura 59.

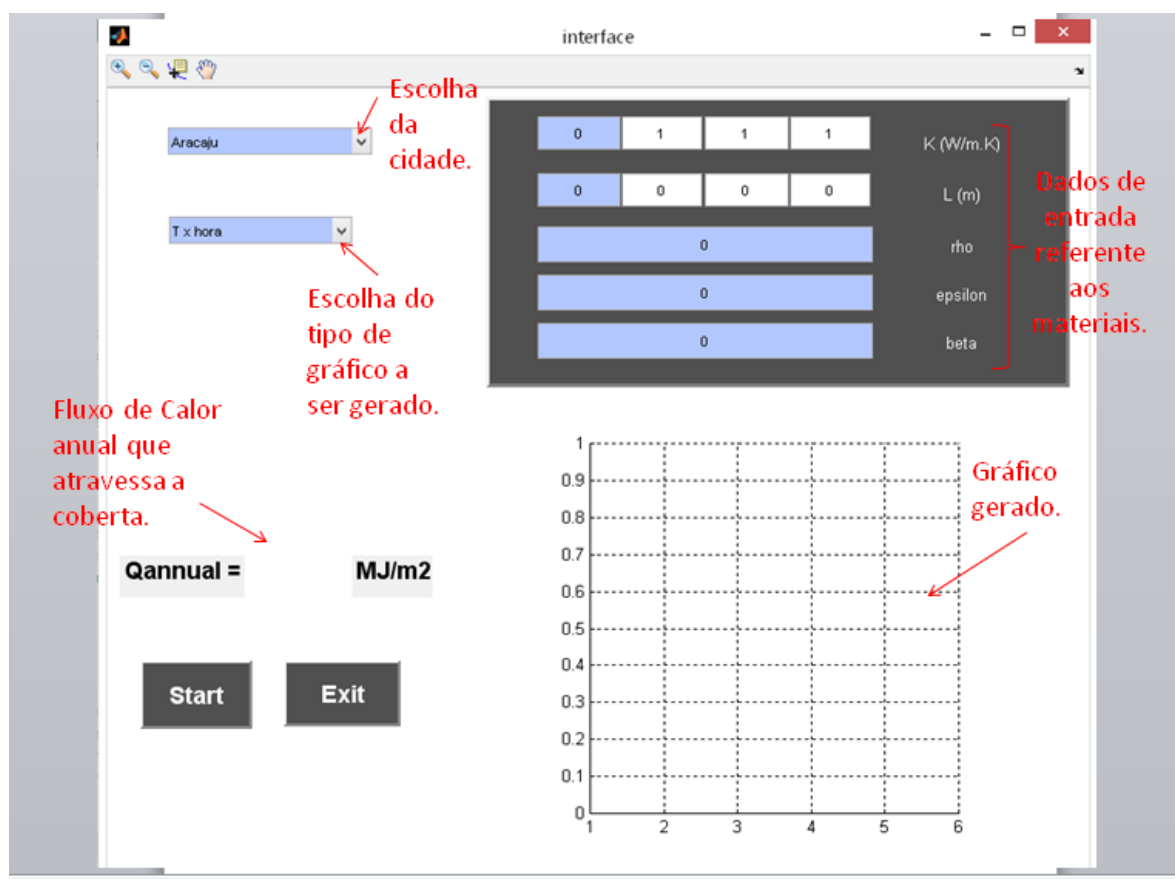


Figura 59 - Interface programa-usuário, com destaque para os campos de dados.

3.5.1. Entradas

Cidade

Estão presentes no modelo os dados de todas as capitais brasileiras, presentes na planilha 'BRASIL', anteriormente mencionada, que consta no ANEXO I. Este Banco de dados contém todas as informações relevantes para o cálculo de interesse, tal como, latitude, longitude, meridiano, velocidade do vento, temperatura média, temperatura máxima, temperatura mínima e radiação solar, referente a cada mês.

Assim, neste parâmetro, o usuário pode escolher qual, dentre as capitais deseja medir a quantidade de calor que atravessa a cobertura.

K

Corresponde à condutividade térmica do material da cobertura, em Watt por metro Kelvin.

L

Esse parâmetro consiste na espessura da cobertura utilizada, em metros.

 ρ

Refletividade da superfície para radiação de ondas curtas, ou seja, a capacidade de reflexão da radiação solar (de ondas curtas) pelo material da cobertura. Este parâmetro é adimensional.

 ϵ

Esse parâmetro representa a emissividade do material da cobertura. Sendo este o quanto o material da cobertura emite de calor para o meio ambiente, através da radiação de ondas curtas emitida pela superfície. Este parâmetro é adimensional.

 β

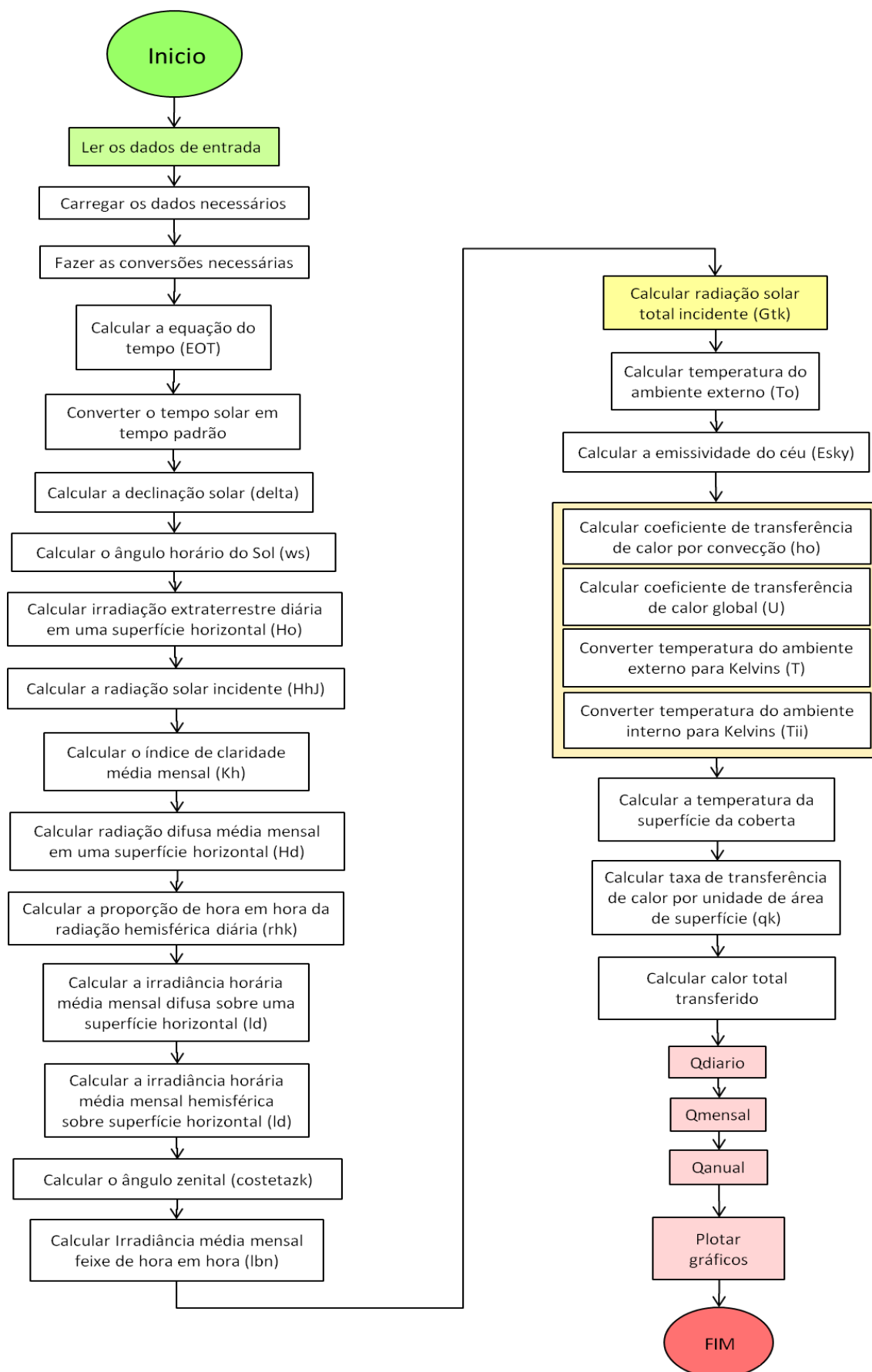
Conforme anteriormente mencionado, este parâmetro consiste na inclinação do telhado a partir da superfície horizontal, sendo tomado como positivo a partir da direção do equador. Sua unidade de medida é [rad] radianos.

3.5.2. Saídas**Gráficos**

Aqui podem ser selecionados alguns gráficos de acordo com o desejo do usuário. As saídas desse software são:

- Temperatura do ambiente externo (T_0);
- Temperatura Sol-ar (T_{sa})
- Temperatura da superfície do telhado ($^{\circ}\text{C}$);
- Radiação solar incidente (W/m^2);
- Calor que atravessa o telhado (MJ/m^2) mensal e anualmente.

3.5.3. Fluxograma do Modelo



4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. COMPARATIVO DAS TEMPERATURAS MÉDIAS DO AMBIENTE EXTERNO

Do ANEXO I, as temperaturas médias do ambiente externo das Cidades de Manaus, Teresina, Recife, Cuiabá, Belo Horizonte e Curitiba estão dispostas na Figura 60, sendo estas independentes do tipo de material da cobertura.

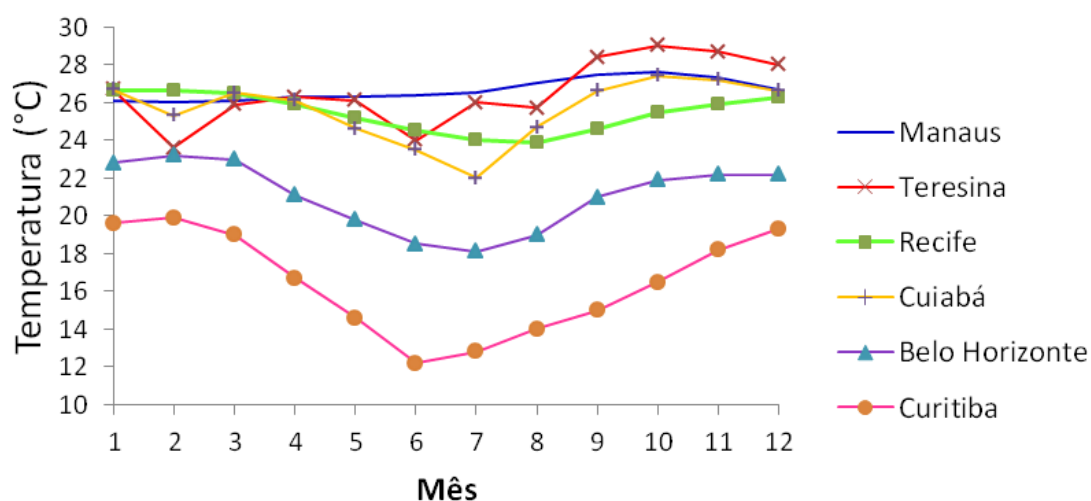


Figura 60- Comparativo das temperaturas médias do ambiente externo (To).

A diferença climática mais perceptível está entre as cidades de Manaus (em azul) e Curitiba (em rosa) que, além disso, possuem respectivamente climas úmido e seco. É esperado, portanto, uma necessidade de telhados de tipos distintos.

4.2. COMPARATIVO DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE

Do ANEXO I, a radiação solar incidente (Hh) das Cidades de Manaus, Teresina, Recife, Cuiabá, Belo Horizonte e Curitiba estão dispostas na Figura 61, sendo estas independentes do tipo de material da cobertura, por se tratar de dados solarimétricos.

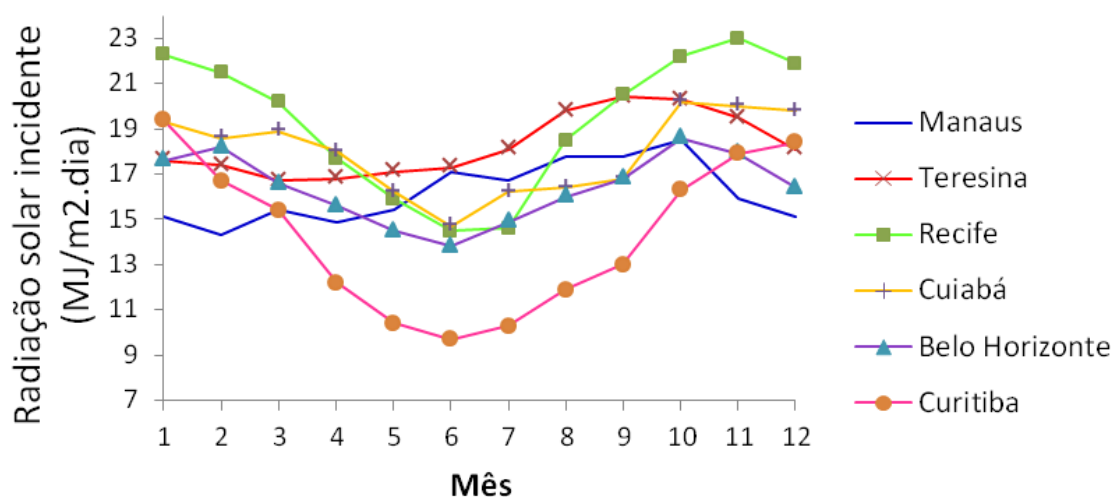


Figura 61 - Radiação solar incidente (Hh).

Ainda independentemente do material da coberta, calculou-se a radiação solar total incidente (G_t), em W/m^2 para as cidades de Manaus, Teresina, Recife, Cuiabá, Belo Horizonte e Curitiba, cujas médias diárias anuais estão dispostas na Figura 62, no intervalo de 0 a 24 horas diário.

A obtenção da radiação solar total incidente dá-se a partir do desenvolvimento da equação 3.13, sendo esta, diferentemente da radiação solar incidente, dependente do índice de claridade média mensal, da difusão, além da angulação do telhado.

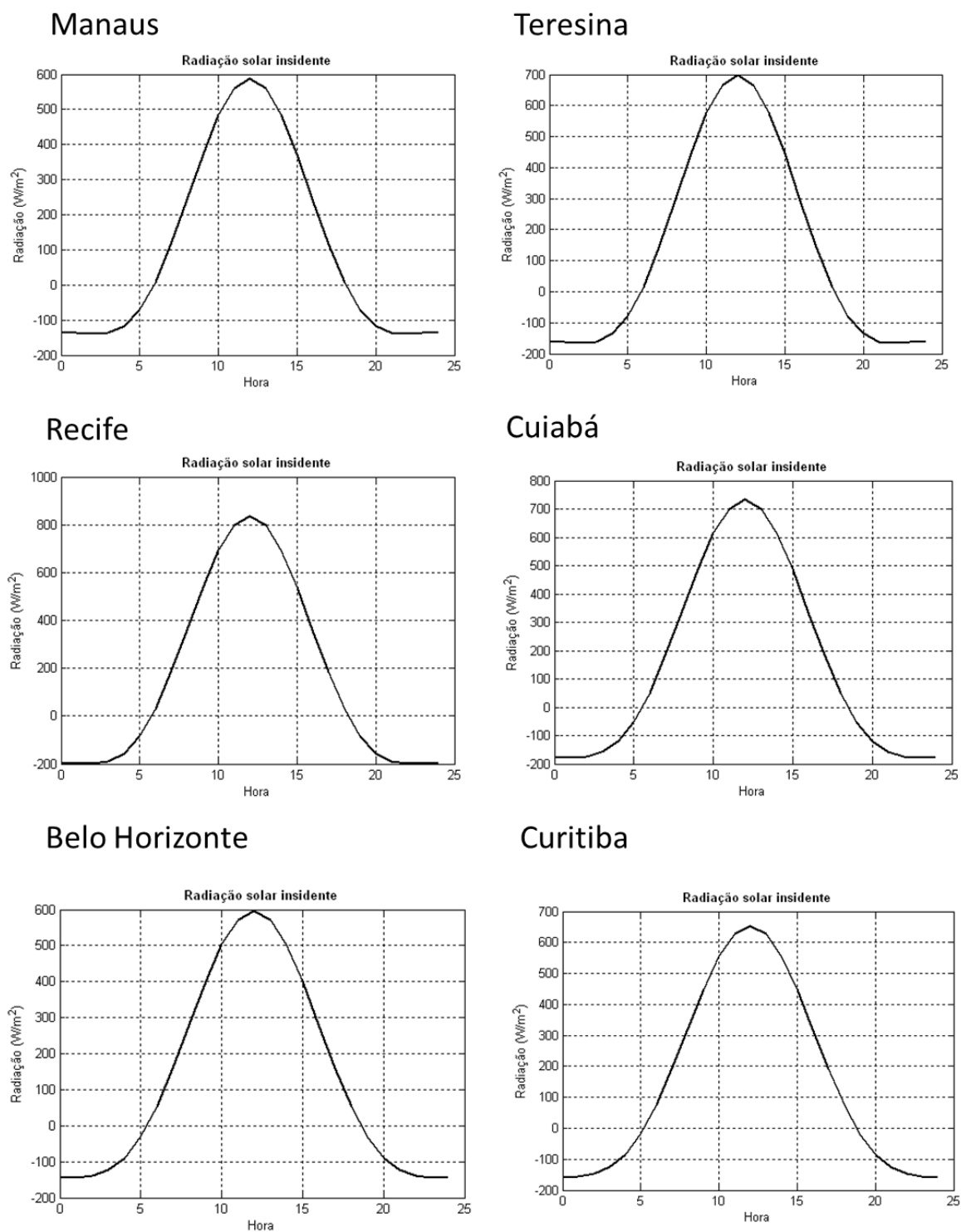


Figura 62 - Radiação solar total incidente (Gtk).

O pico de radiação solar mais alto observado foi o da cidade de Recife, em torno de 800 W/m^2 e os mais baixos, registrados nas cidades de Manaus e Belo Horizonte, ambos em torno de 600 W/m^2 .

4.3. COMPARATIVO DAS TEMPERATURAS DOS TELHADOS.

4.3.1. Temperatura da superfície do telhado (T_{RC})

Para os tipos de telhados analisados (1A, 1B, 2A e 2B), a comparação entre a temperatura da superfície do telhado (T_{RC}) para os quatros casos permite observar o comportamento dos mesmos, tendo sido submetidos às mesmas condições ambientais.

Dessa forma, observa-se o aquecimento sofrido pela superfície dos quatro tipos de telhado, para cada uma das cidades representativas, nas Figuras 63 a 68. As figuras apresentam dados das temperaturas do ambiente externo (T_o) e temperaturas da superfície do telhado (T_{RC}), sendo estas, as médias das temperaturas apresentadas ao longo dos dias do ano, isto é, apresentam a variação das temperaturas T_o e T_R ao longo do dia (de 0 a 24 horas).

Manaus

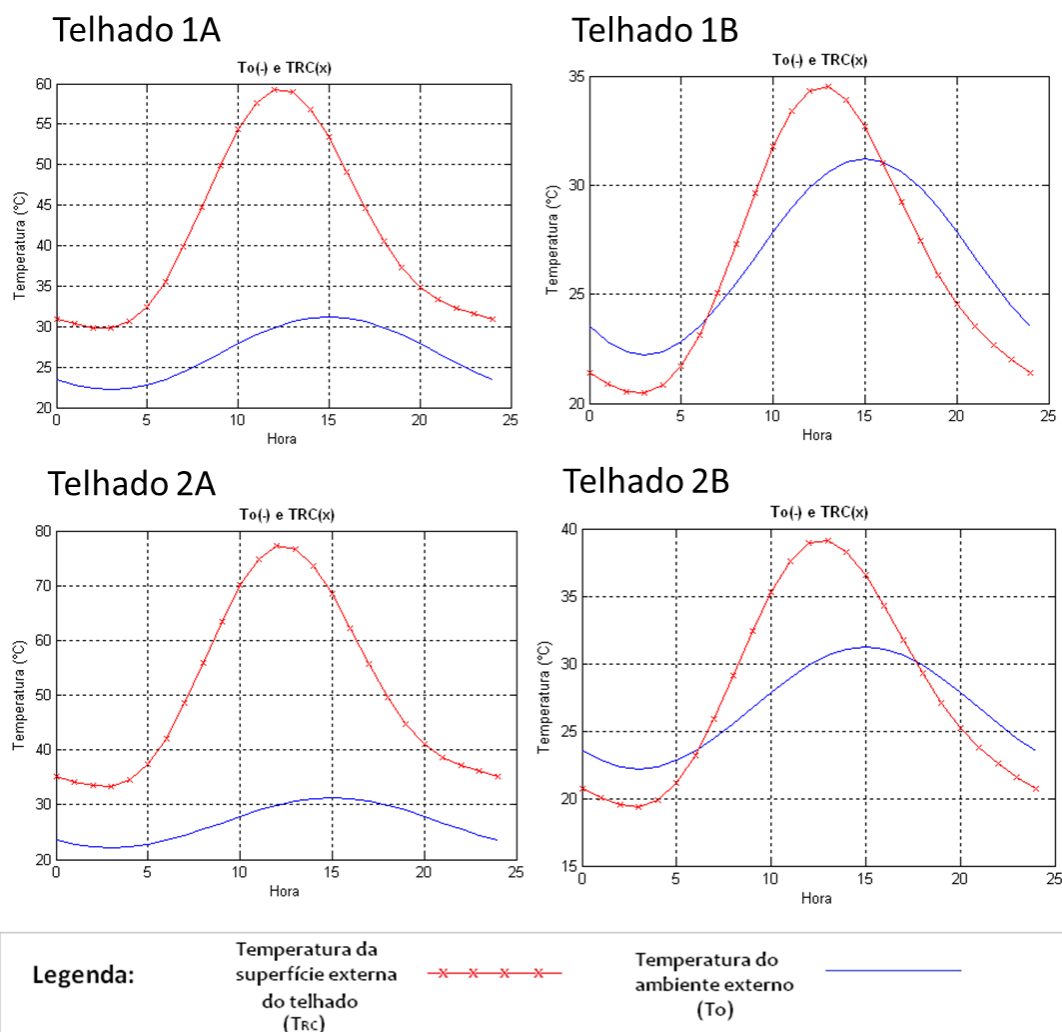


Figura 63 – Análise da temperatura da superfície do telhado (T_{RC}) para Manaus.

Observa-se que, para Manaus, o telhado 2A (configuração tipo sanduíche sem aplicação de tinta reflexiva) apresentou um maior aquecimento em relação aos demais tipos, atingindo temperaturas em torno de 78°C. O telhado 1B (configuração simples com aplicação de tinta reflexiva) apresentou a menor temperatura superficial, sendo seu pico máximo em torno de 35°C.

Cuiabá

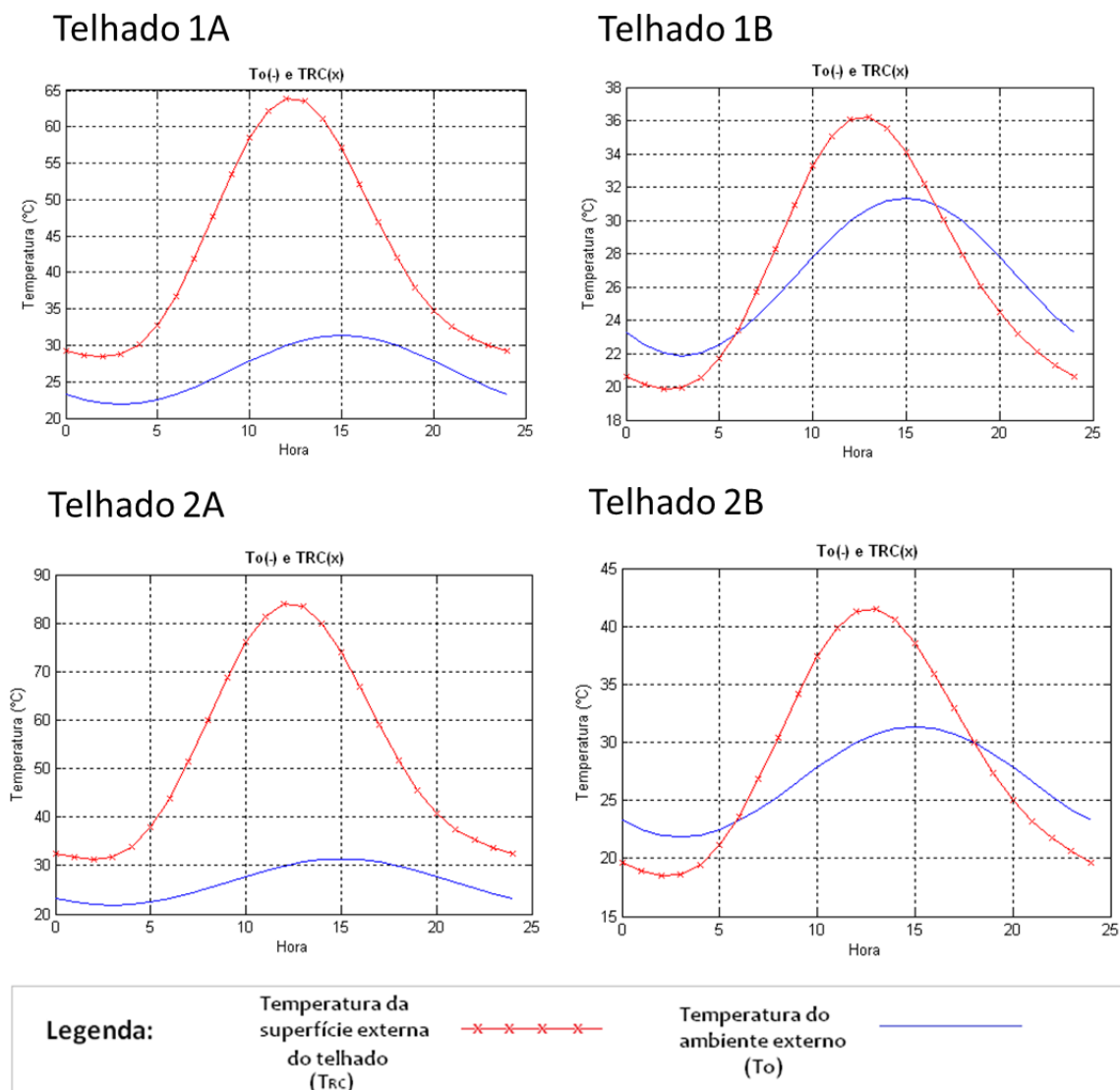


Figura 64 – Análise da temperatura da superfície do telhado (TRC) para Cuiabá.

Em Cuiabá, Figura 64, o comportamento dos telhados apresentou-se de forma semelhante à Manaus, sendo o maior aquecimento registrado para o telhado 2A (configuração tipo sanduíche sem aplicação de tinta reflexiva), atingindo temperaturas em torno de 83°C. O telhado 1B (configuração simples com aplicação de tinta reflexiva) apresentou a menor temperatura superficial, sendo seu pico máximo em torno de 36°C.

Teresina

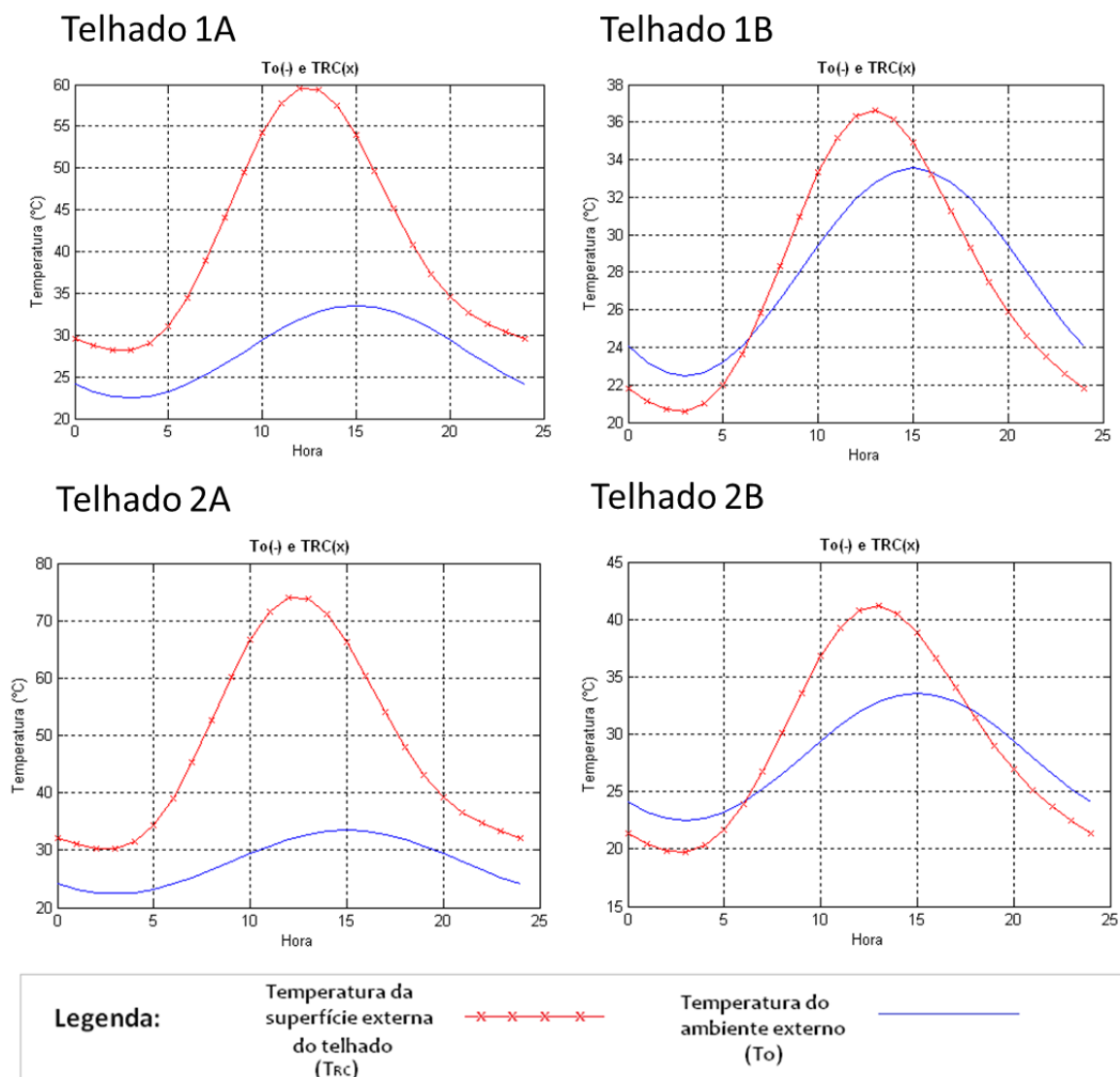


Figura 65 – Análise da temperatura da superfície do telhado (TRC) para Teresina.

A Figura 65 demonstra, para Teresina, o maior aquecimento registrado para o telhado 2A (configuração tipo sanduíche sem aplicação de tinta reflexiva), atingindo temperaturas em torno de 75°C. O telhado 1B apresentou a menor temperatura superficial, sendo seu pico máximo em torno de 37°C. As configurações 1A (configuração simples sem aplicação de tinta reflexiva) e 2B (configuração tipo sanduíche com aplicação de tinta reflexiva) apresentaram picos máximos da TRC respectivamente de 60°C e 41°C.

Recife

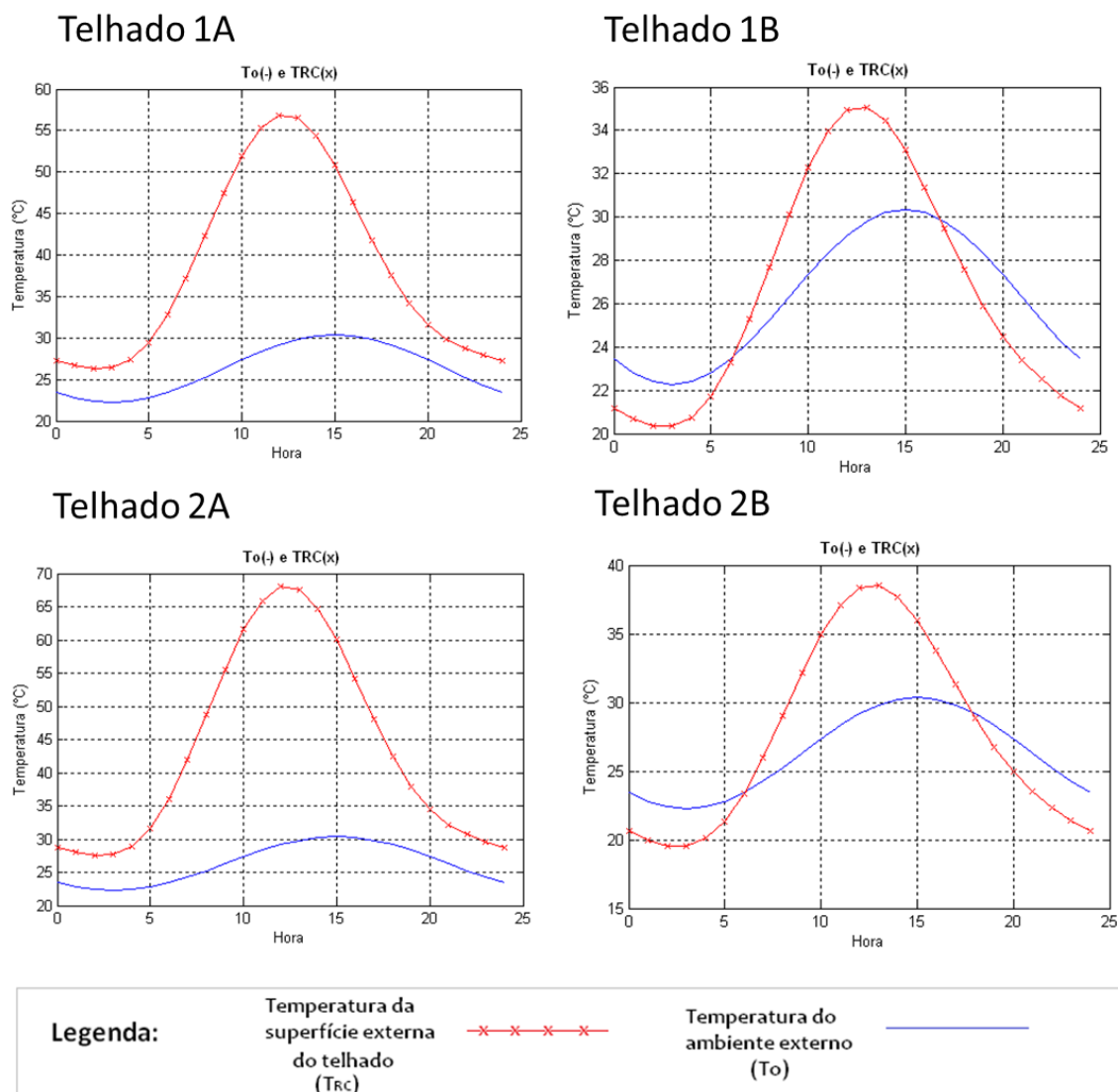


Figura 66 – Análise da temperatura da superfície do telhado (TRC) para Recife.

Para Recife, representado na Figura 66, o maior aquecimento foi registrado para o telhado 2A (configuração tipo sanduíche sem aplicação de tinta reflexiva), atingindo temperaturas em torno de 68°C. O telhado 1B, seguindo a tendência das demais regiões, também apresentou a menor temperatura superficial, sendo seu pico máximo em torno de 35°C.

Curitiba

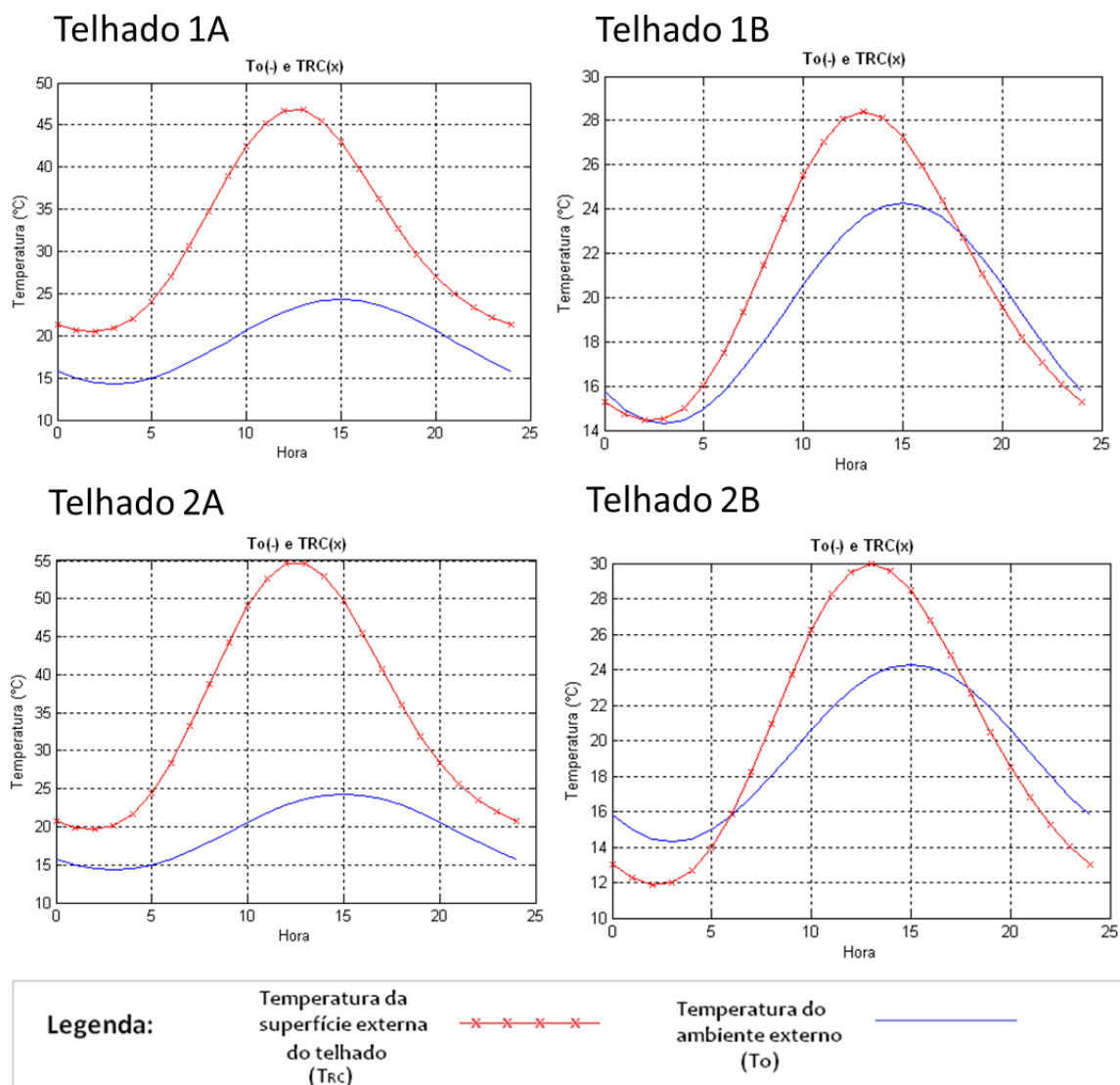


Figura 67 – Análise da temperatura da superfície do telhado (TRC) para Curitiba.

A Figura 67 apresenta o comportamento dos telhados 1A (configuração simples, sem aplicação de tinta reflexiva), 1B (configuração simples, com aplicação de tinta reflexiva), 2A (configuração tipo sanduíche, sem aplicação de tinta reflexiva) e 2B (configuração tipo sanduíche, com aplicação de tinta reflexiva), para a cidade de Curitiba, representante da região climática Sub-Tropical brasileira.

As temperaturas mais altas foram atingidas na configuração de telhado tipo 2A, chegando a 55°C, já o telhado tipo 1B apresentou temperaturas mais amenas, com pico apresentado de 28°C.

Belo Horizonte

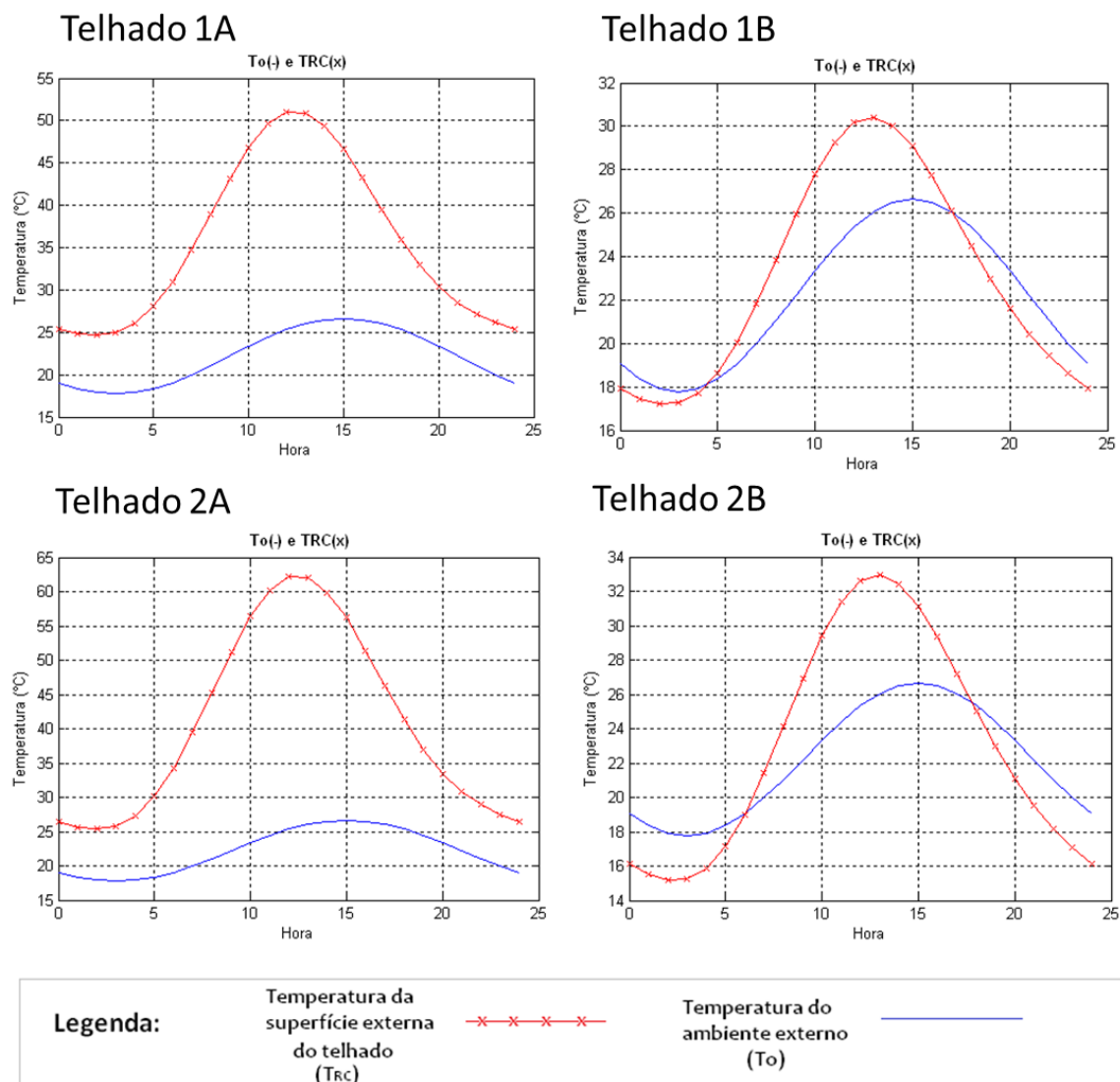


Figura 68 – Análise da temperatura da superfície do telhado (TRC) para B.H.

Para Belo Horizonte, representado na Figura 68, o maior aquecimento foi registrado para o telhado 2A (configuração tipo sanduíche sem aplicação de tinta reflexiva), atingindo temperaturas em torno de 63°C. O telhado 1B, seguindo a tendência das demais regiões, também apresentou a menor temperatura superficial, sendo seu pico máximo em torno de 30°C.

4.3.2. Temperatura Sol-ar (T_{sa})

A análise desta temperatura, que é a temperatura em torno da superfície do telhado e externa a ele, permite verificar a contribuição do telhado para o evento das ilhas de calor ao seu entorno. Desta maneira, quanto maior T_{sa} , maior a contribuição do telhado para o aquecimento das regiões vizinhas.

As figuras 69 a 74 apresentam as médias anuais das temperaturas T_{sa} e T_{RC} ao longo do dia (0 a 24 horas) para as seis cidades representativas das regiões climáticas brasileiras.

Manaus

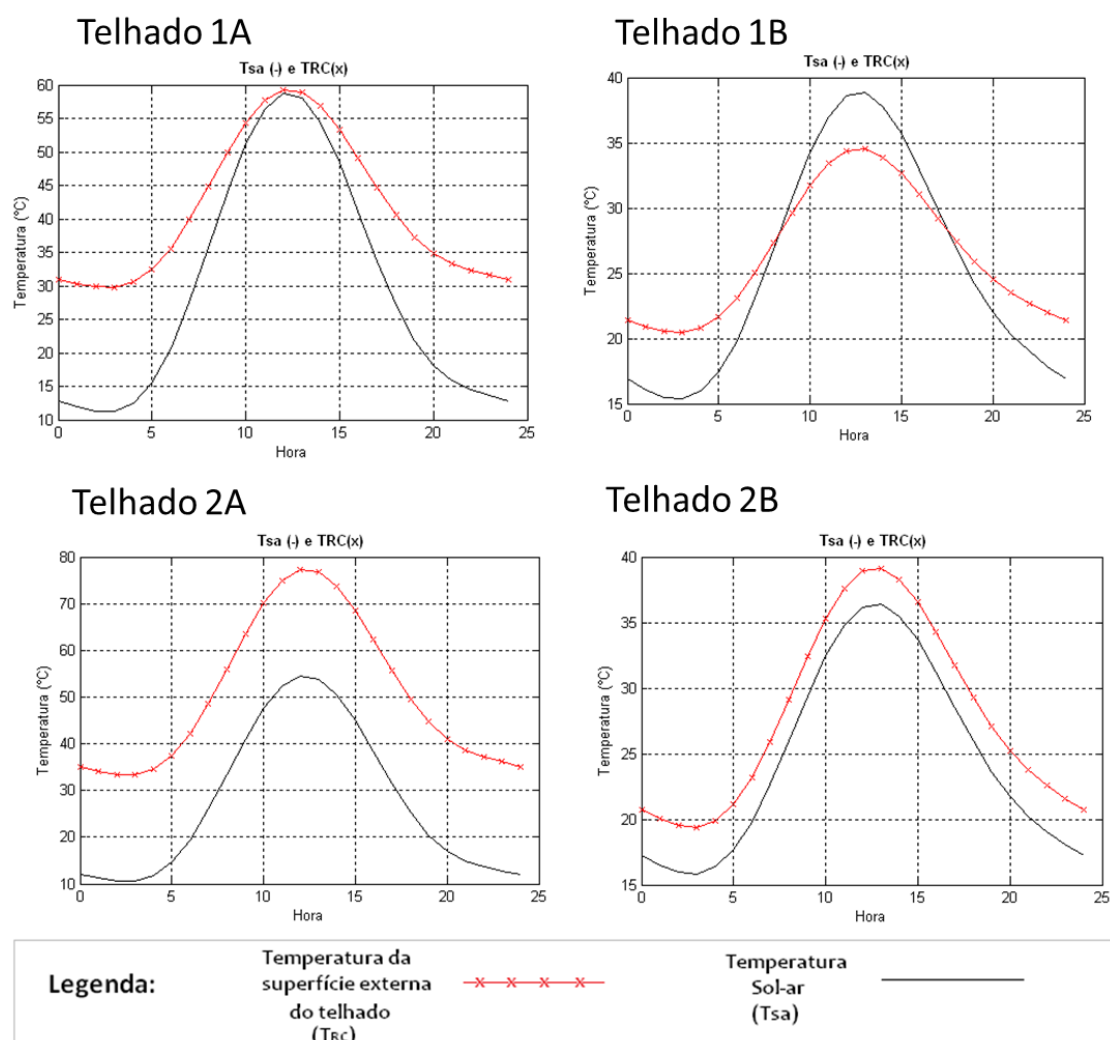


Figura 69 – Análise da temperatura Sol-ar (T_{sa}) para Manaus

A maior temperatura Sol-ar registrada para Manaus corresponde ao telhado 1A, sendo esta de 58°C. Por sua vez, a menor Tsa corresponde ao telhado 2B, de 36°C. Infere-se, portanto que o telhado 1A é o que mais contribui para a formação de ilhas de calor na região de Manaus, dentre os tipos analisados.

Cuiabá

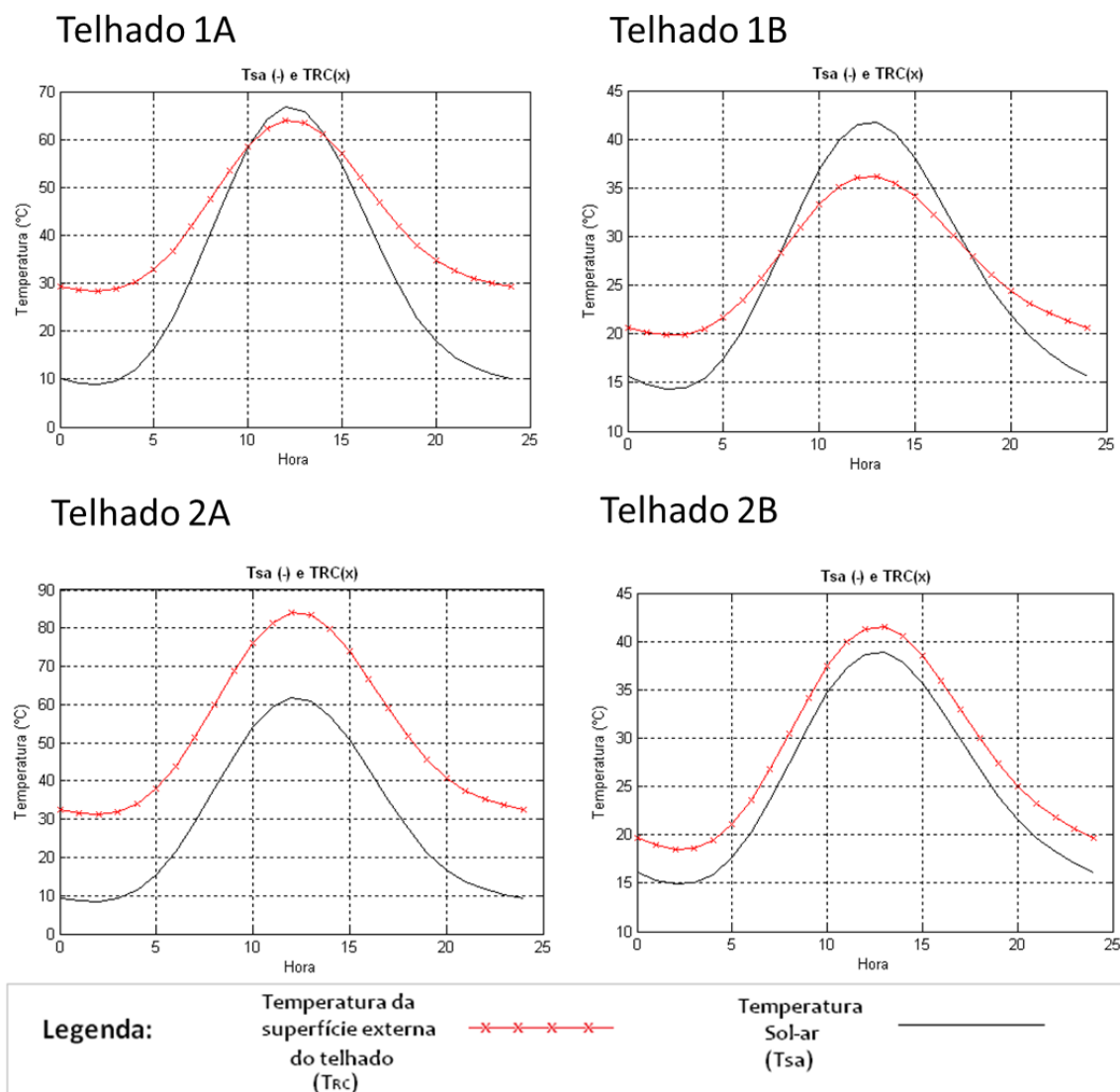


Figura 70 – Análise da temperatura Sol-ar (Tsa) para Cuiabá.

A maior temperatura Sol-ar registrada para Cuiabá corresponde ao telhado 1A, sendo esta de 67°C. Por sua vez, a menor Tsa corresponde ao telhado 2B, de 37°C. Infere-

se, portanto que o telhado 1A é o que mais contribui para a formação de ilhas de calor na região de Cuiabá, dentre os tipos analisados.

Teresina

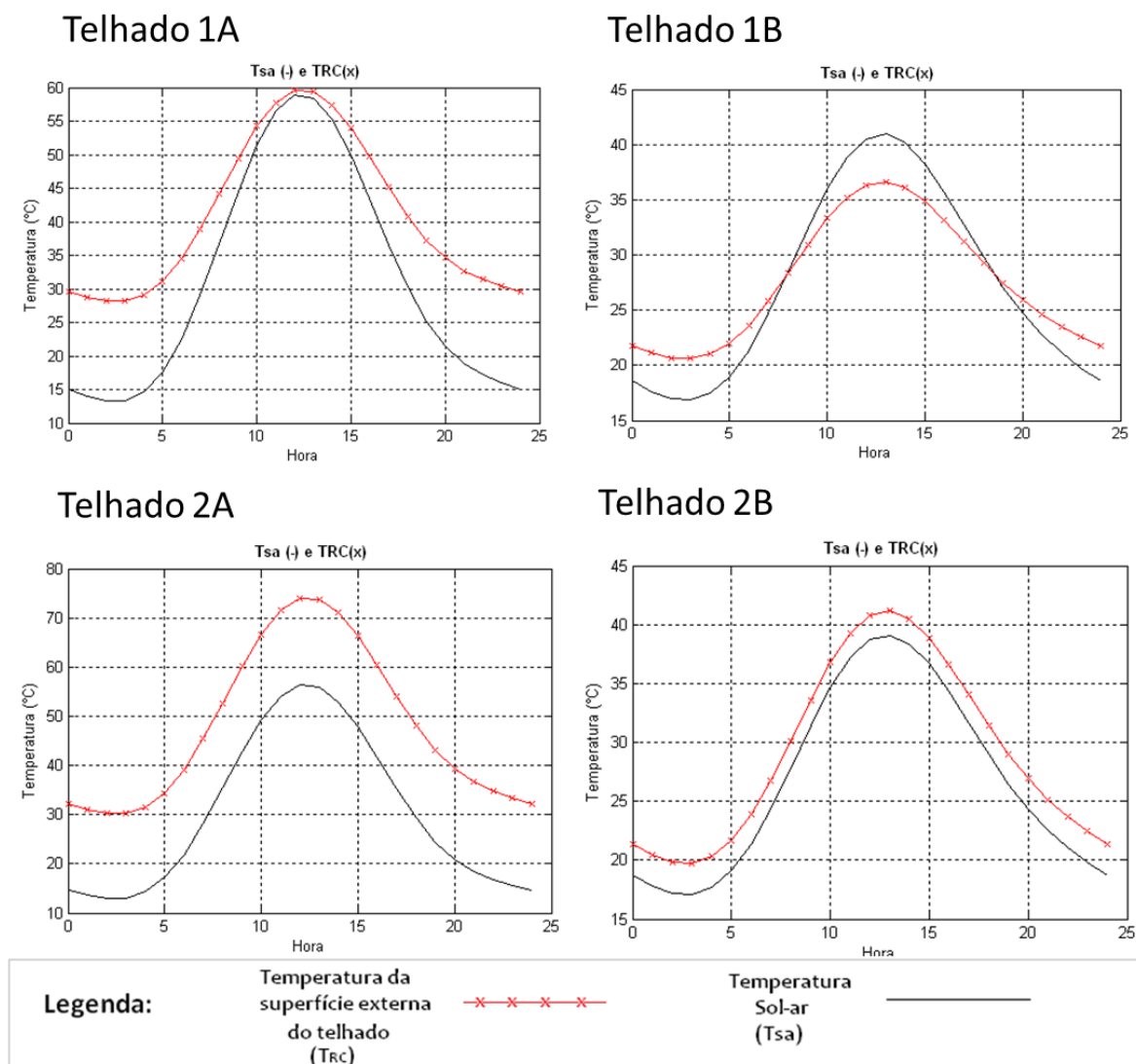


Figura 71 – Análise da temperatura Sol-ar (Tsa) para Teresina.

A maior temperatura Sol-ar registrada para Teresina corresponde ao telhado 1A, sendo esta de 58°C. Por sua vez, a menor Tsa corresponde ao telhado 2B, de 38°C. Infere-se, portanto que o telhado 1A é o que mais contribui para a formação de ilhas de calor na região de Teresina, dentre os tipos analisados.

Recife

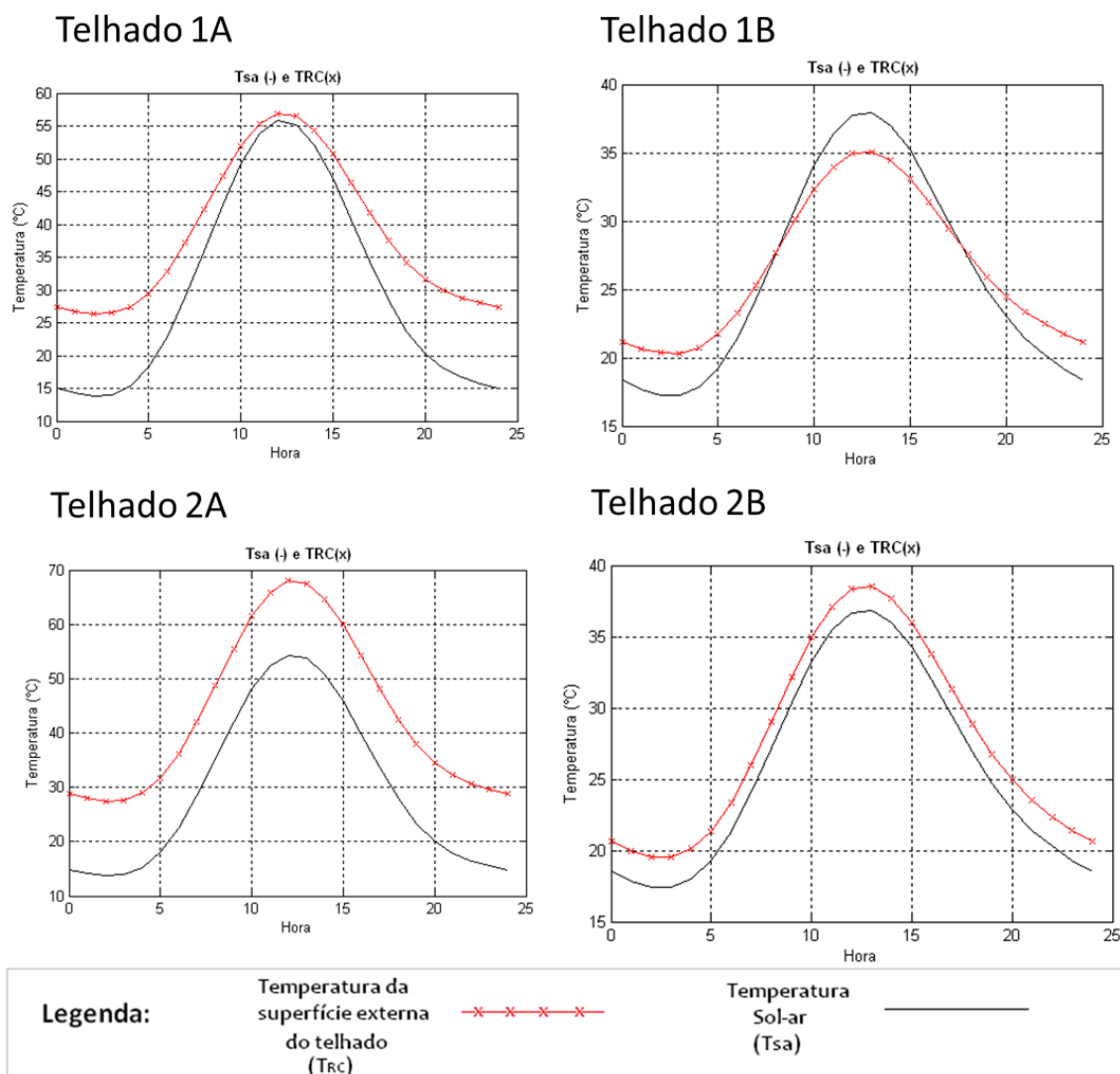


Figura 72 – Análise da temperatura Sol-ar (Tsa) para Recife.

A maior temperatura Sol-ar registrada para Recife corresponde ao telhado 1A, sendo esta de 55°C. Por sua vez, a menor Tsa corresponde ao telhado 2B, de 36°C. Infere-se, portanto que o telhado 1A é o que mais contribui para a formação de ilhas de calor na região de Recife, dentre os tipos analisados.

Curitiba

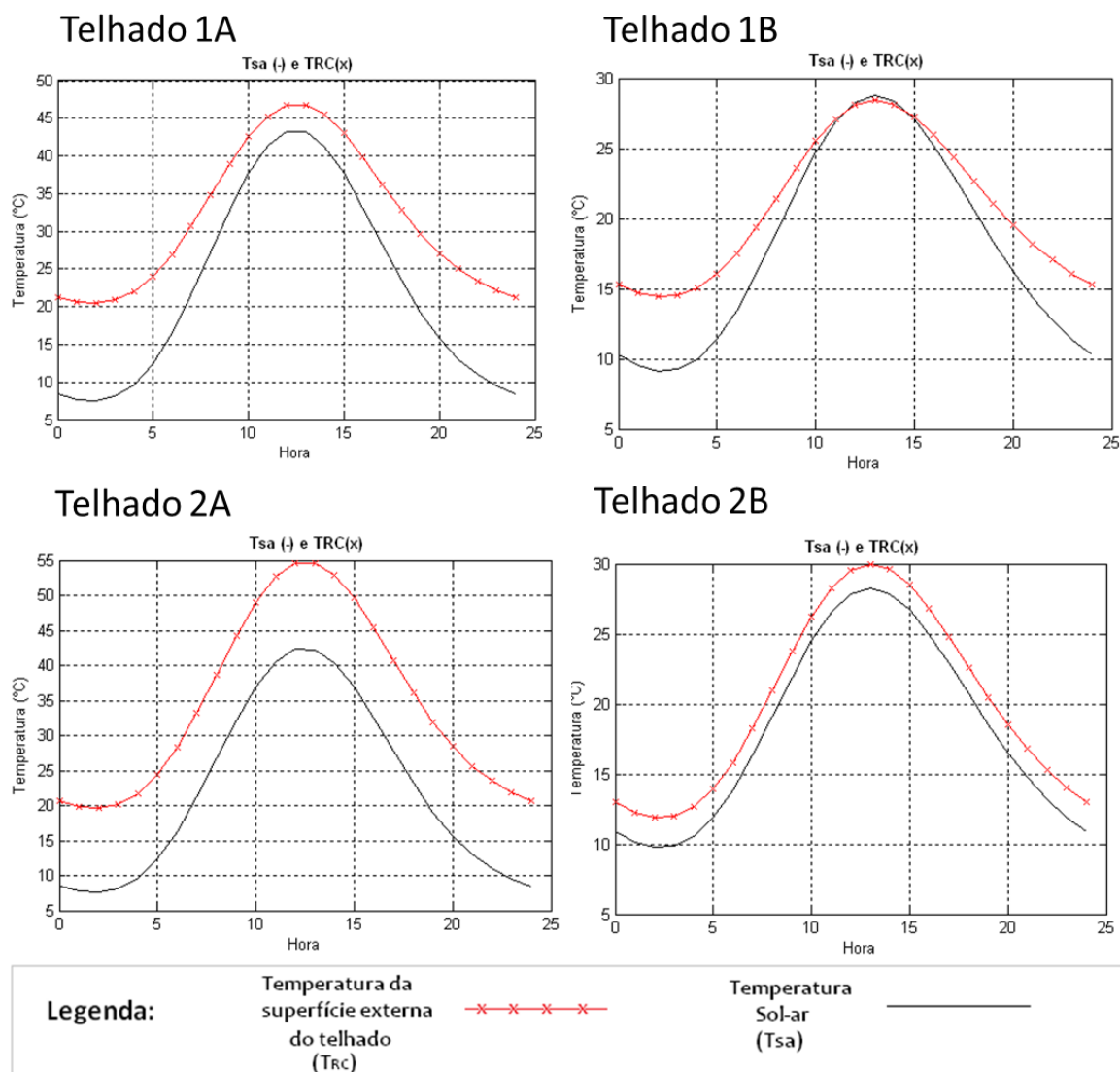


Figura 73 – Análise da temperatura Sol-ar (Tsa) para Curitiba.

A maior temperatura Sol-ar registrada para Curitiba corresponde ao telhado 1A, sendo esta de 43°C. Por sua vez, a menor Tsa corresponde ao telhado 2B, de 27°C. Infere-se, portanto que o telhado 1A é o que mais contribui para a formação de ilhas de calor na região de Curitiba, dentre os tipos analisados.

Belo Horizonte

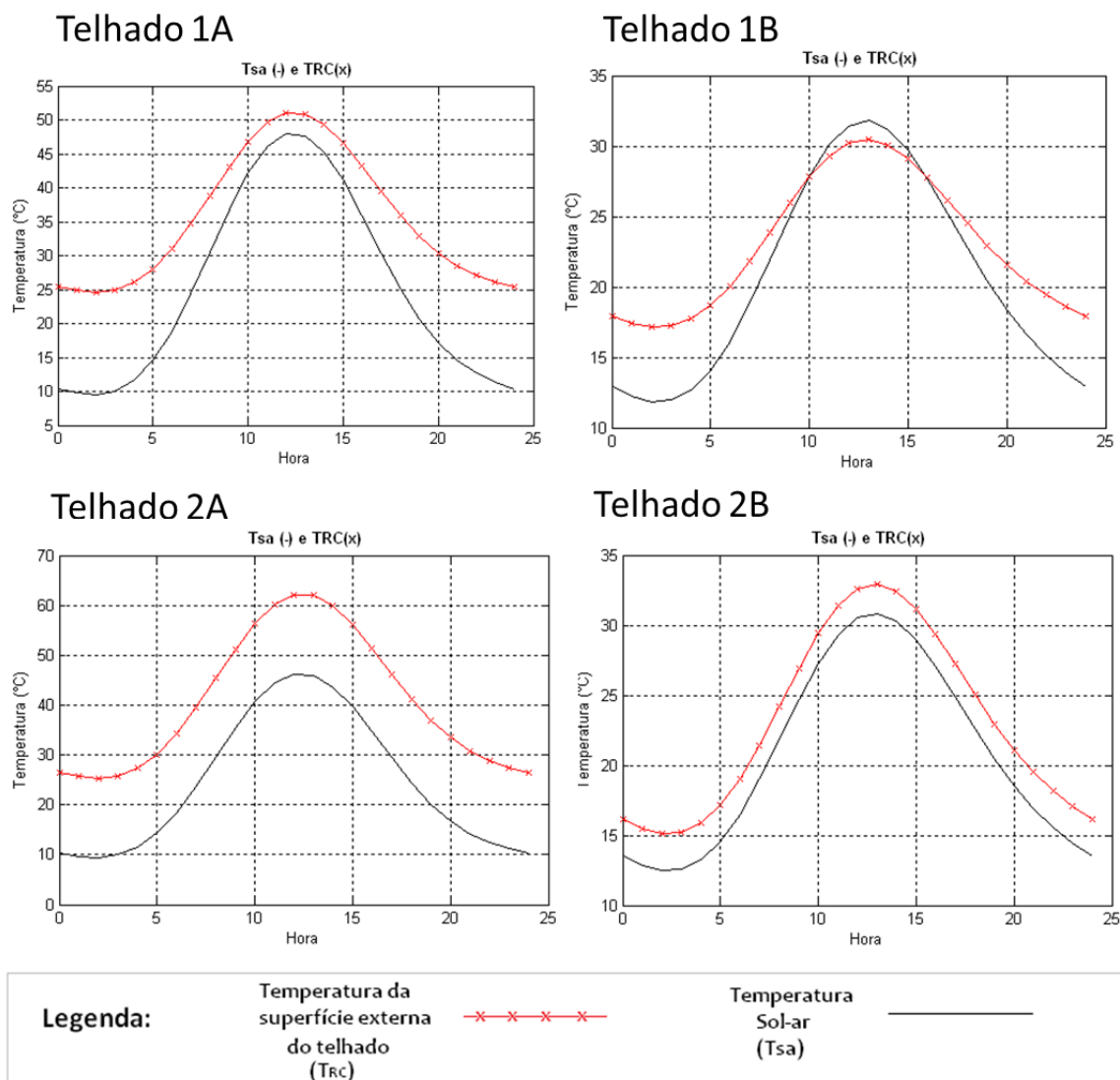


Figura 74 – Análise da temperatura Sol-ar (Tsa) para B.H.

A maior temperatura Sol-ar registrada para Belo Horizonte (B.H.) corresponde ao telhado 1A, sendo esta de 48°C. Por sua vez, a menor Tsa corresponde ao telhado 2B, de 31°C. Infere-se, portanto que o telhado 1A é o que mais contribui para a formação de ilhas de calor na região de B.H., dentre os tipos analisados.

4.3.3 Quadro resumo para os valores de T_{RC} e T_{sa}

Em síntese, as temperaturas máximas T_{RC} e T_{sa} apresentadas pelos telhados das seis cidades, podem ser vistas na Figura 75.

Cidade	To Máx. (°C)	T_{RC} Máx. (°C)				T_{sa} Máx. (°C)			
		Telhado 1A	Telhado 1B	Telhado 2A	Telhado 2B	Telhado 1A	Telhado 1B	Telhado 2A	Telhado 2B
Manaus	31	60	34	78	38	58	38	54	36
Cuiabá	32	64	36	85	42	67	42	61	37
Teresina	33	60	37	75	42	67	42	61	37
Recife	30	57	35	68	38	55	37	53	36
Curitiba	24	47	28	55	30	43	29	42	27
Belo Horizonte	27	51	30	63	33	48	32	45	31

Legenda:

To Máx. = Temperatura ambiente máxima registrada

T_{RC} Máx. = Temperatura as superfície do telhado máxima registrada

T_{sa} Máx. = Temperatura Sol-ar máxima registrada

Figura 75 – Quadro resumo para T_{sa} e T_{RC}

Destacam-se as temperaturas apresentadas pelo telhado do tipo 1A, constituído por uma chapa simples de aço galvanizado, sem revestimento reflexivo e sem isolamento térmico. Para todas as cidades apresentadas a temperatura T_{sa} foi maior para esta configuração de telhado, sendo, portanto, seu uso sujeito ao aumento da temperatura da vizinhança e a formação das ilhas de calor.

A simples aplicação da tinta reflexiva, observada se comparadas as T_{sa} para o telhado 1A e para o telhado 1B promove uma redução de temperatura conforme exposto no quadro comparativo da Figura 76.

Cidade	Tsa Máx. (°C)		RET (°C)
	Telhado 1A	Telhado 1B	
Manaus	58	38	20
Cuiabá	67	42	25
Teresina	67	42	25
Recife	55	37	18
Curitiba	43	29	14
Belo Horizonte	48	32	16

Legenda:

Tsa Máx. = Temperatura Sol-ar máxima registrada

RET = Redução Efetiva de temperatura (Telhado 1A- Telhado 1B)

Figura 76 – Quadro comparativo entre Telhados 1A e 1B.

4.4. FLUXO DE CALOR QUE ATRAVESSA O TELHADO

Para a melhor visualização da variação de fluxo térmico ao longo das estações do ano, objetivando-se apenas o destaque para os meses correspondentes a cada estação, sem interferências para a análise do fluxo, o gráfico gerado pelo software foi desenvolvido em cores diferenciadas, representativas de cada estação. Sendo estas:

- Amarelo para verão: meses de dezembro, janeiro e fevereiro;
- Verde para outono: meses de março, abril e maio;
- Azul para inverno: meses de junho, julho e agosto;
- Rosa para primavera: meses de setembro, outubro e novembro.

O fluxo térmico para o interior do ambiente proporcionado pelos quatro tipos de telhado foi analisado, a fim de inferir qual será mais eficiente para cada região.

Entende-se como mais eficiente aquele em que o fluxo de calor, tanto para o interior quanto para o exterior seja o menor possível, pois dessa forma gastos energéticos com aquecimento ou refrigeração são minimizados.

Conforme anteriormente mencionado, a temperatura de conforto escolhida para a realização das simulações foi de 23°C. Dessa forma, conclui-se que o fluxo de calor apresenta-se positivo quando a temperatura da superfície externa da cobertura é superior a 23°C e negativo quando se apresenta inferior a esta temperatura.

4.4.1. Comparativo do fluxo térmico para cada tipo de telhado analisado

As figuras de 77 a 88 apresentam as simulações realizadas para as cidades de Manaus, Cuiabá, Teresina, Recife, Curitiba e Belo Horizonte e a respeito do fluxo térmico que transpassa os quatro tipos de telhados analisados.

Manaus

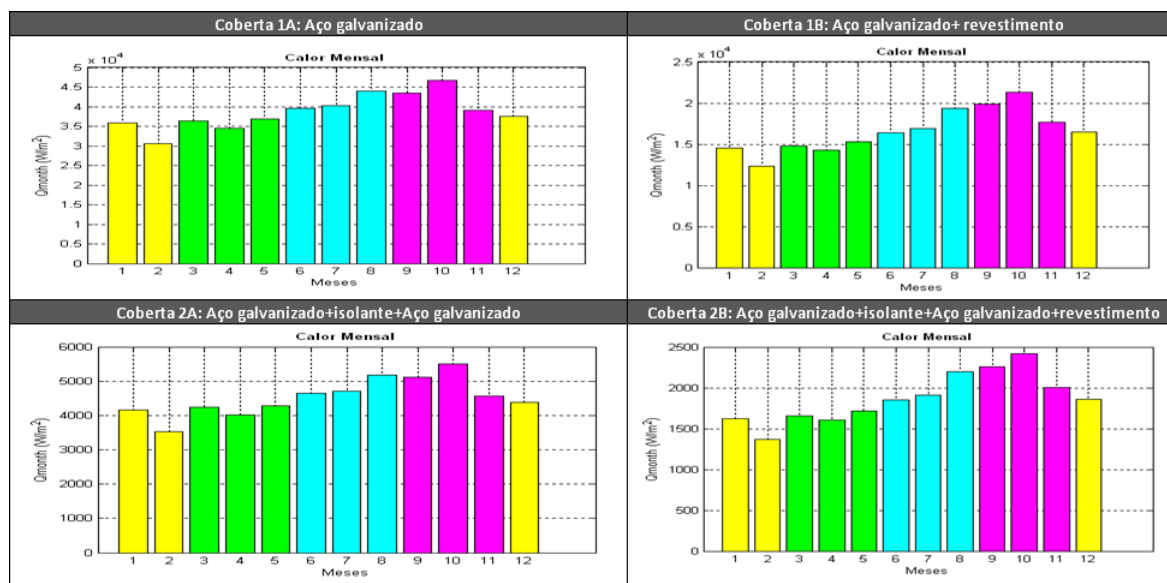


Figura 77 - Fluxo térmico que atravessa os telhados 1A, 1B, 2A e 2B para Manaus.

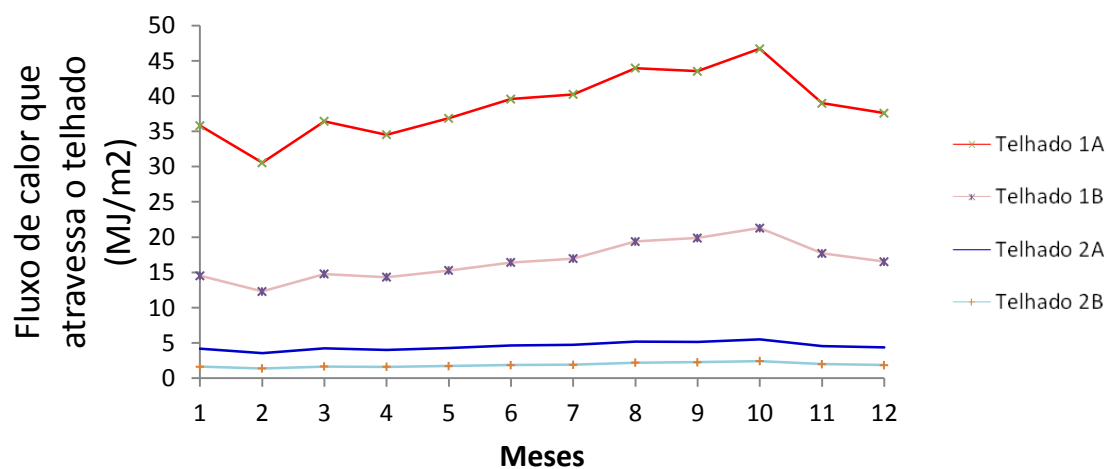


Figura 78 - Comparativo do fluxo térmico que atravessa os telhados 1A, 1B, 2A e 2B.

Da análise do fluxo térmico para Manaus, nas Figuras 77 e 78. Observa-se a pouca influência das estações climáticas de verão, outono, inverno e primavera sobre a variação de temperatura do telhado. É bastante perceptível, porém, a diminuição do fluxo térmico com a simples adição da tinta reflexiva, observada entre os fluxos térmicos apresentados pelos telhados 1A e 1B, respectivamente de 35 e 15 MJ/m^2 .

Cuiabá

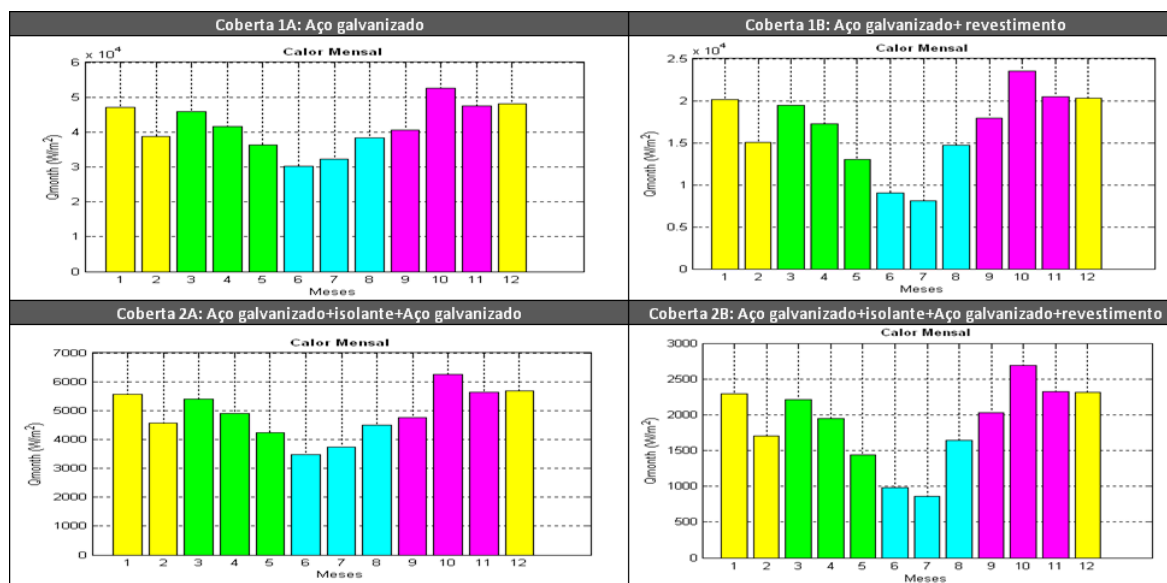


Figura 79 - Fluxo térmico que atravessa os telhados 1A, 1B, 2A e 2B para Cuiabá.

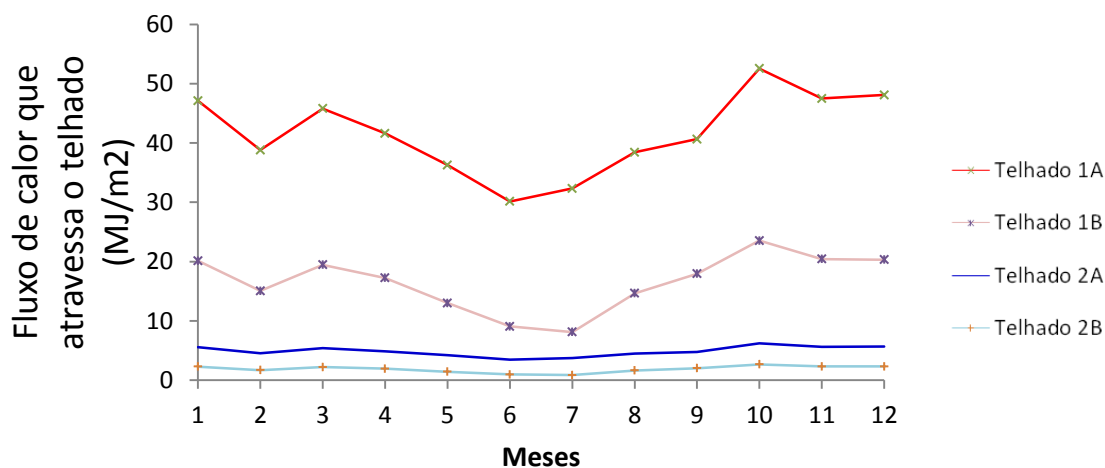


Figura 80 - Comparativo do fluxo térmico que atravessa os telhados 1A, 1B, 2A e 2B.

Cuiabá apresentou redução do fluxo térmico para o interior do ambiente de 50 MJ/m² para 20MJ/m² com a adição da tinta reflexiva na Coberta 1B. Para o telhado 2B, também houve redução com o uso da tinta, apresentando um fluxo médio de 2,5 MJ/m² para o interior do ambiente, ao longo do ano.

Teresina

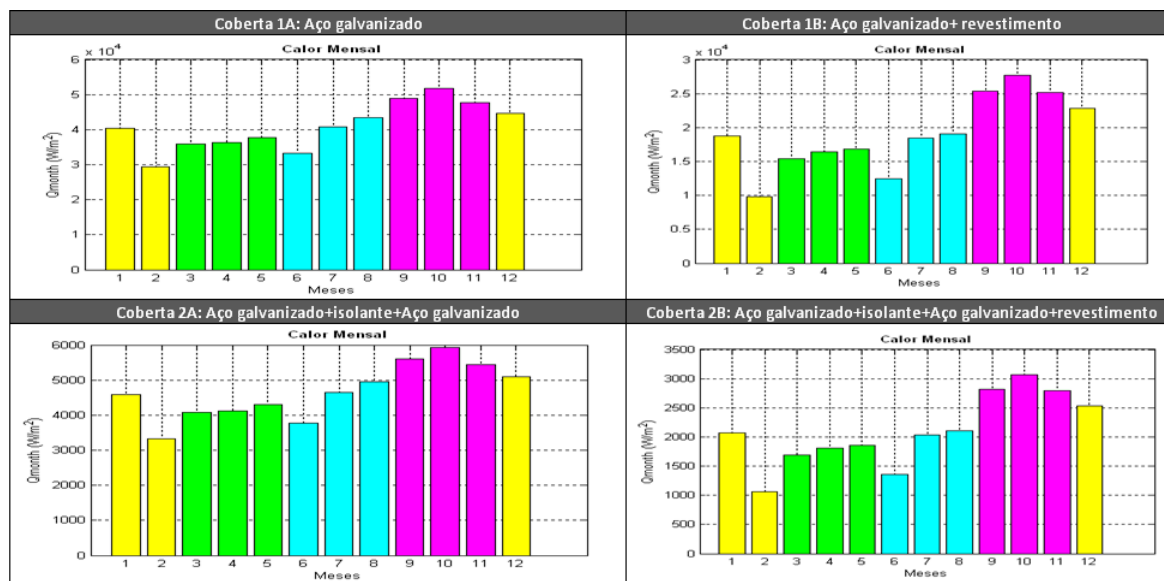


Figura 81 - Fluxo térmico que atravessa os telhados 1A, 1B, 2A e 2B para Teresina.

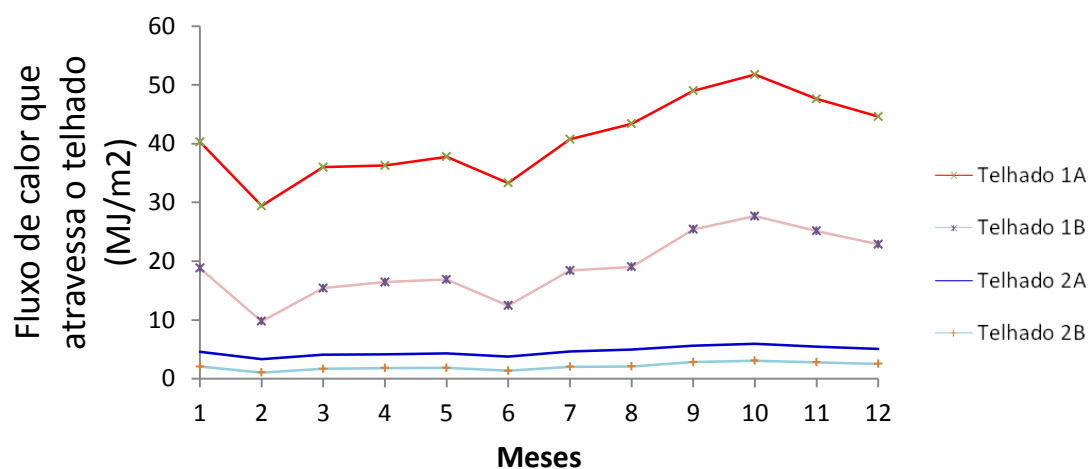


Figura 82 - Comparativo do fluxo térmico que atravessa os telhados 1A, 1B, 2A e 2B.

Para Teresina, figuras 81 e 82, observa-se, assim como para Manaus e Curitiba, a grande diminuição do fluxo térmico com a simples adição da tinta reflexiva, vista entre os fluxos térmicos apresentados pelos telhados 1A e 1B.

Recife

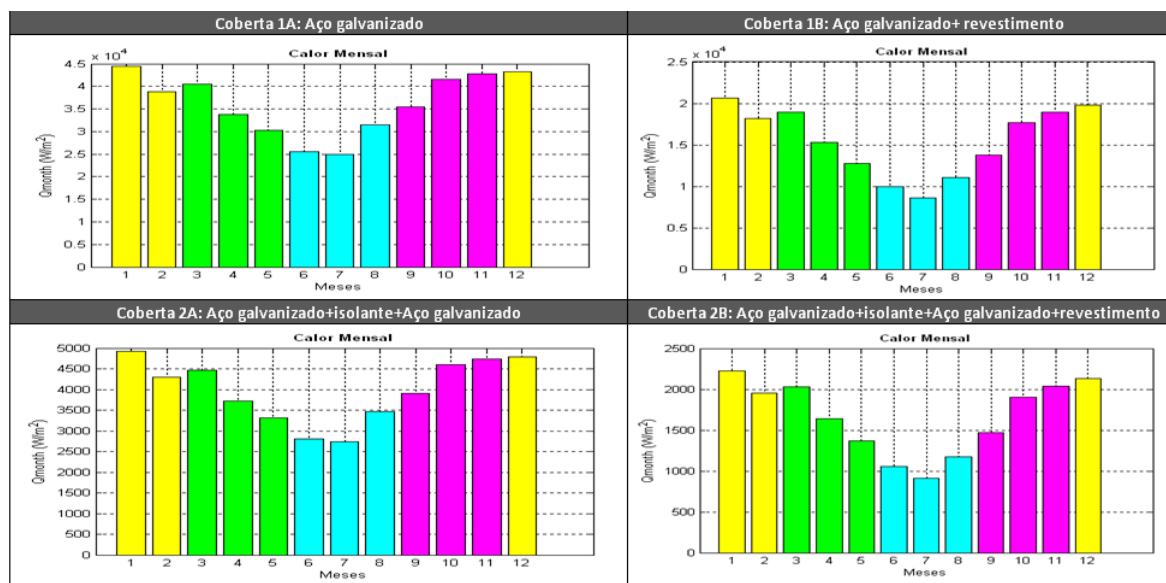


Figura 83 - Fluxo térmico que atravessa os telhados 1A, 1B, 2A e 2B para Recife.

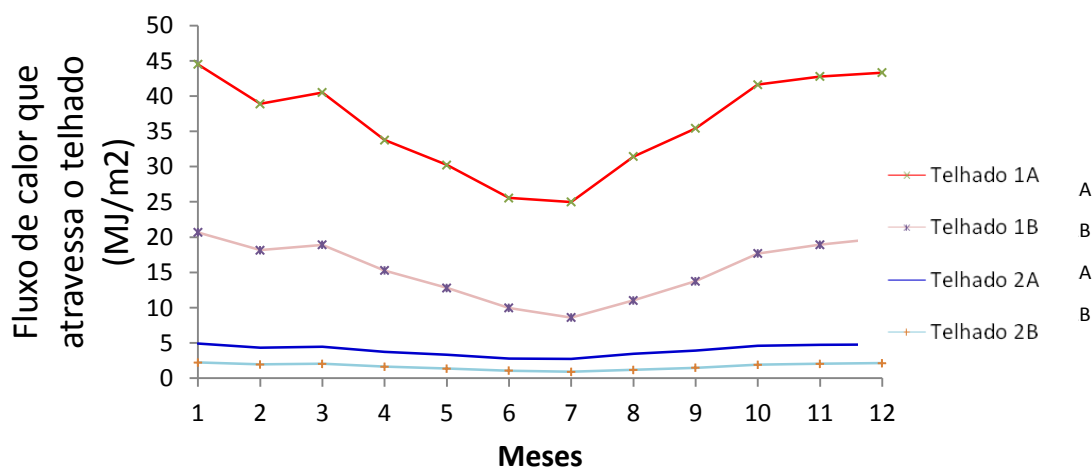


Figura 84 - Comparativo do fluxo térmico que atravessa os telhados 1A, 1B, 2A e 2B.

Para Recife, nas figuras 83 e 84, a simples adição da tinta reflexiva (comparação entre os telhados 1A e 1B) também foi bastante influente para redução do fluxo, sendo esta redução em torno de 25 MJ/m^2 ao longo do ano.

Curitiba

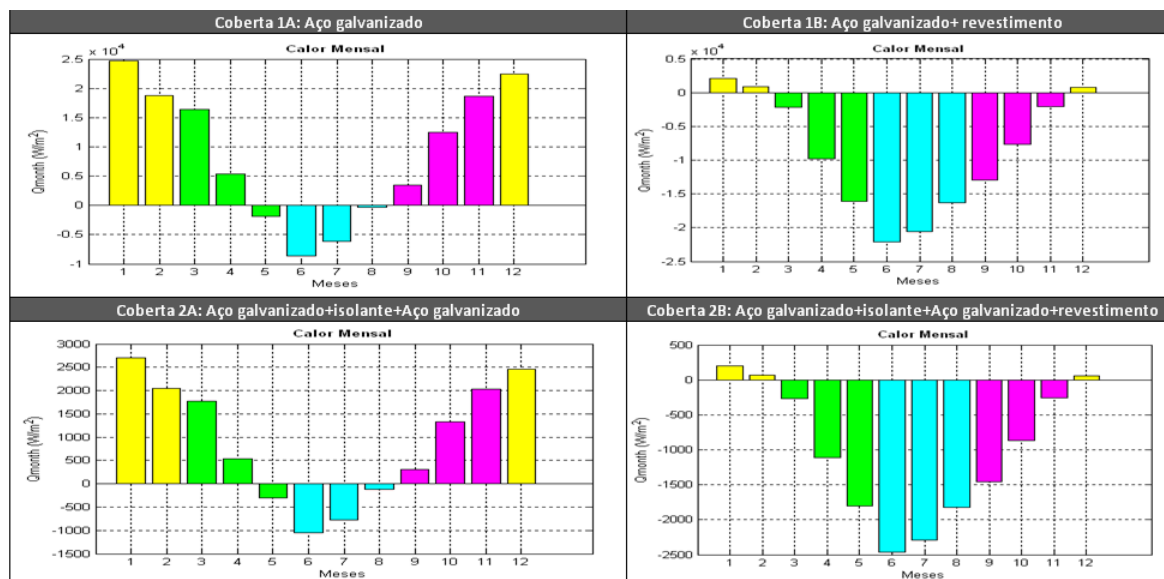


Figura 85 - Fluxo térmico que atravessa os telhados 1A, 1B, 2A e 2B para Curitiba.

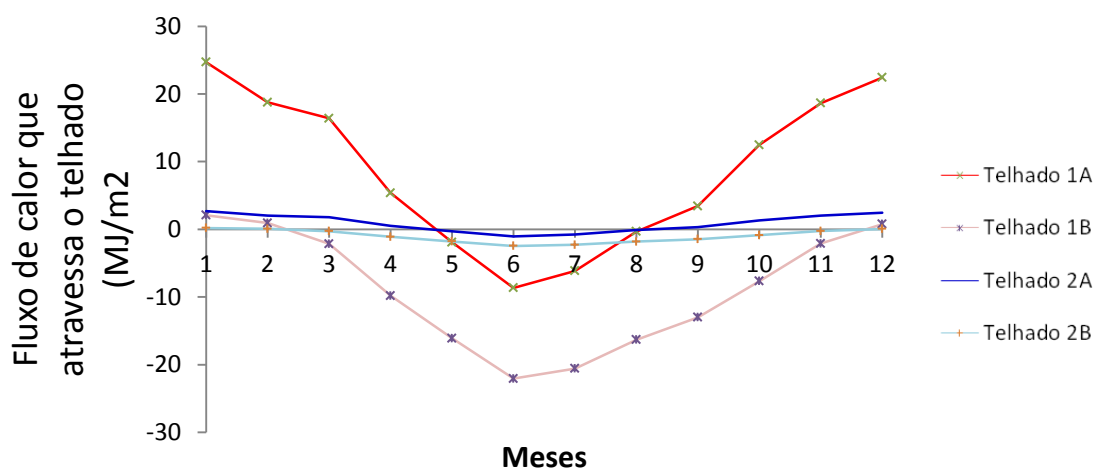


Figura 86 - Comparativo do fluxo térmico que atravessa os telhados 1A, 1B, 2A e 2B.

Curitiba está localizada em uma região que apresenta alterações climáticas mais expressivas ao longo do ano, para regiões como estas, observa-se que, tanto o Telhado 1A quanto o 1B, variam demasiadamente suas temperaturas. Nesta região, portanto, os isolantes térmicos são essenciais para garantir a manutenção de uma temperatura de conforto.

Belo Horizonte

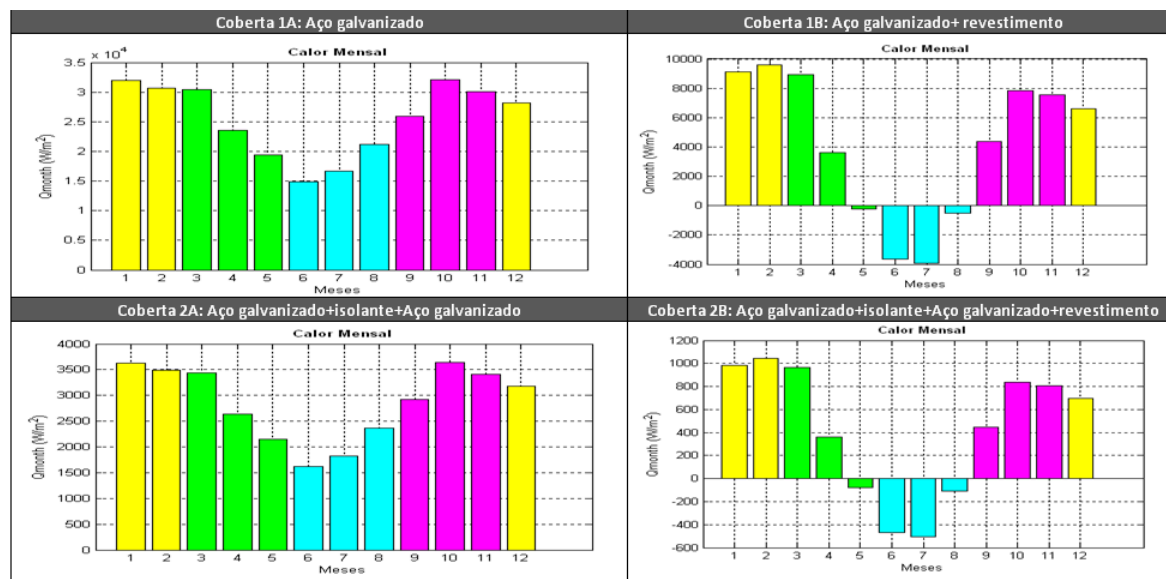


Figura 87 - Fluxo térmico que atravessa os telhados 1A, 1B, 2A e 2B para B.H.

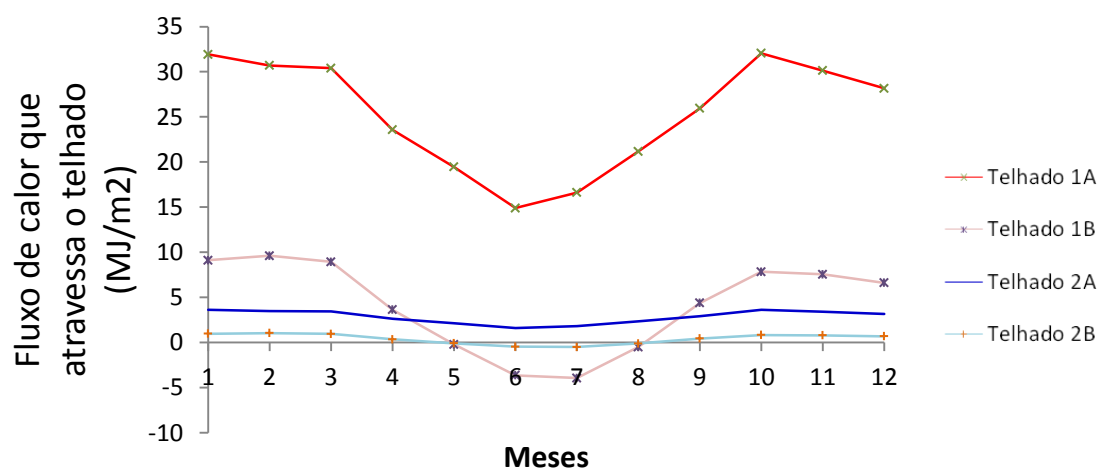


Figura 88 - Comparativo do fluxo térmico que atravessa os telhados 1A, 1B, 2A e 2B.

Em Belo Horizonte, o desempenho térmico dos telhados 2A e 2B permaneceu estável ao longo de todo o ano, apresentando uma diminuição do fluxo para o interior durante o inverno. O telhado 2B, como nas demais regiões, apresentou o melhor desempenho em termos de redução do fluxo.

4.4.2. Síntese da análise comparativa de fluxos

As figuras 89 e 90 apresentam análises comparativas dos telhados, tendo sido realizadas ao todo 24 combinações entre 4 tipos para as 6 cidades analisadas.

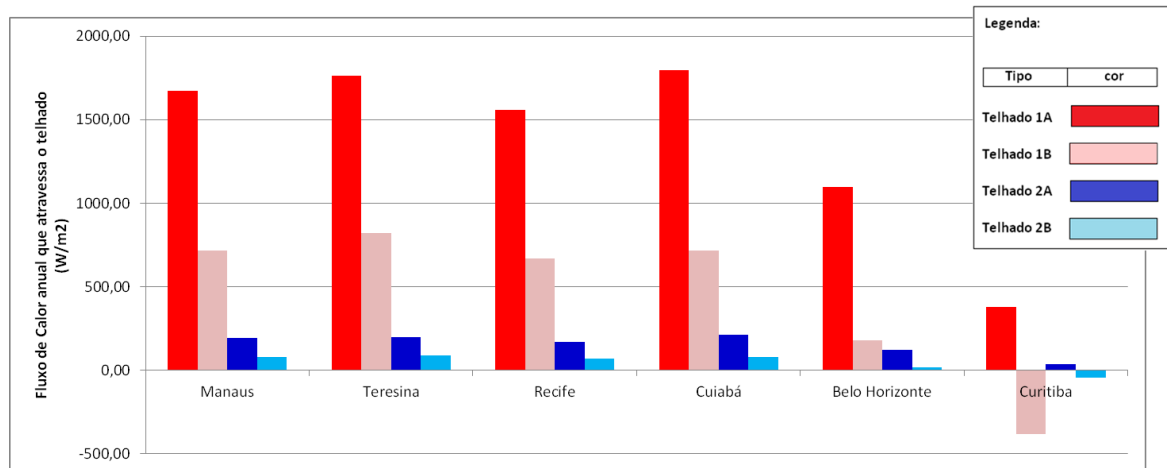


Figura 89 – Análise gráfica do desempenho térmico dos telhados.

Cidade	Manaus	Teresina	Recife	Cuiabá	Belo Horizonte	Curitiba
Telhado 1A						
*Q (MJ/m²)	1672,70	1764,15	1558,55	1797,51	1098,12	378,53
Telhado 1B						
*Q (MJ/m²)	717,31	821,75	667,95	716,48	177,92	-381,43
Telhado 2A						
*Q (MJ/m²)	195,53	201,12	171,94	211,38	123,51	39,34
Telhado 2B						
*Q (MJ/m²)	80,91	90,73	71,66	80,77	17,93	-43,28

*Q = Fluxo de Calor anual que atravessa o telhado

Figura 90 - Análise numérica do desempenho térmico dos telhados.

Pôde-se constatar o bom desempenho energético dos telhados 2A e 2B, compostos por isolantes térmicos, diante dos tipos 1A e 1B que não o contém. Além disso, a simples pintura do telhado já instalado com tinta reflexiva branca mostrou-se bastante eficaz para redução do fluxo térmico para o interior da cobertura, corroborando com os estudos sobre tintas reflexivas apresentados no tópico introdutório deste trabalho.

A redução mais significativa do fluxo anual para simples aplicação da tinta branca reflexiva mostrou-se mais efetiva para Cuiabá, sendo este reduzido de 1797,51MJ/m² para 716,48MJ/m². Desempenho este seguido pelas demais regiões, O que implica dizer que, de maneira geral, pintar os telhados de branco pode reduzir significativamente os gastos energéticos dos edifícios e casas.

4.5. MAPA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DOS TELHADOS NO BRASIL

Para finalização deste estudo, foi desenvolvido um mapa (Figura 91), com a marcação dos telhados que apresentaram melhor desempenho energético por região. Foi destacado o melhor entre os telhados 1A e 1B e entre os telhados 2A e 2B, observando-se que, para Curitiba, o desempenho do telhado tipo 2A, composto por isolante, mesmo sem a utilização da tinta térmica já pode ser considerado bastante satisfatório, a ponto de não serem necessários gastos com a aplicação e manutenção da tinta.

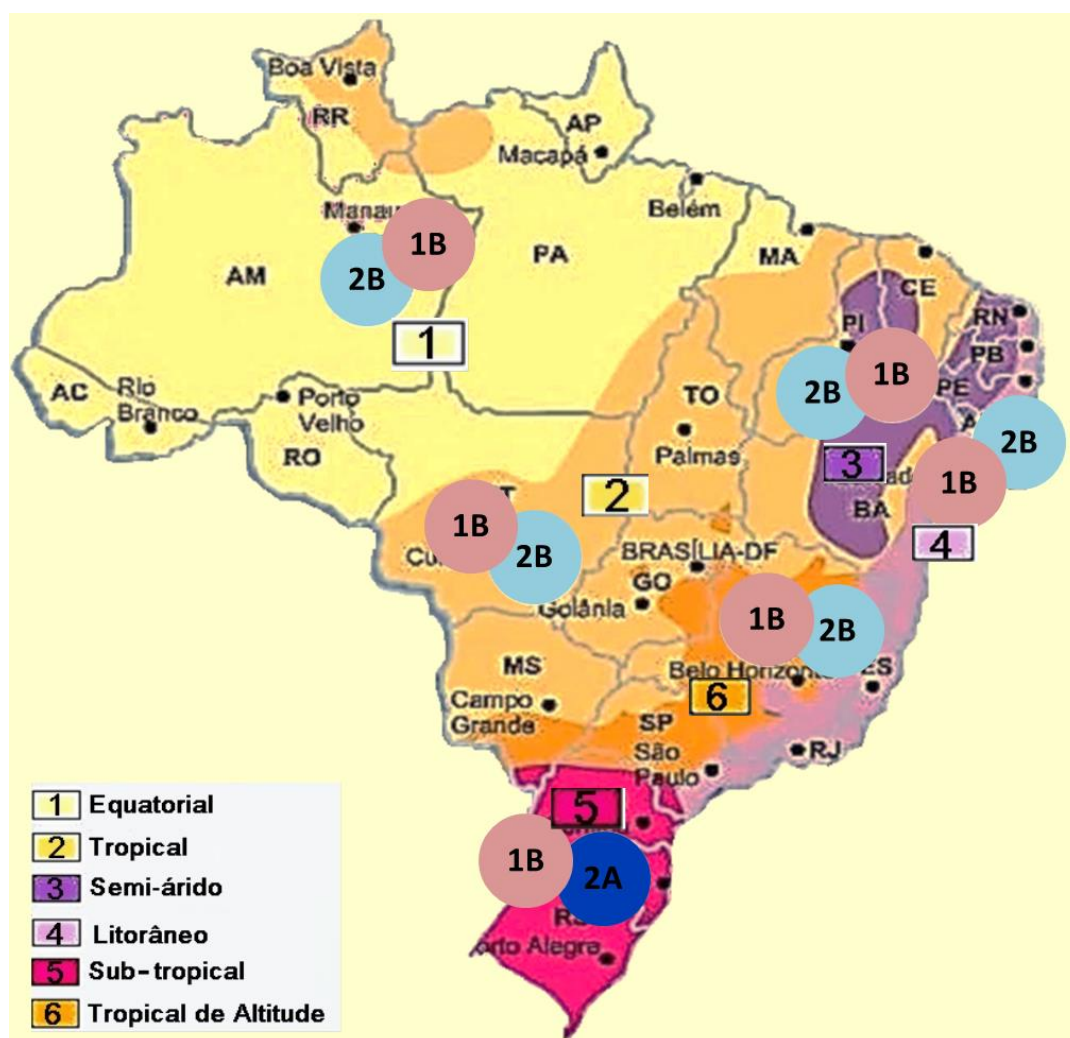


Figura 91 - Mapa de eficiência energética dos telhados no Brasil.

Fonte: Adaptado pela Autora, de www.aboutbrasil.com.

5. CONCLUSÃO

As características positivas e negativas associadas a tantos tipos de telhados que podem ser aplicados aos diversos tipos de edifícios levantam questões de qual o tipo de telhado mais adequado a cada região, sendo mais eficiente em termos energéticos e que promova um alto custo benefício. Estudos na área de aplicação e simulações dessas aplicações são de extrema importância para a promoção desta melhoria energética.

Aqui neste trabalho, foram realizadas análises de telhados compostos por chapas de aço, tintas reflexivas e isolantes térmicos, materiais estes cujas propriedades foram expostas em tópicos precedentes. A restrição quanto aos tipos de materiais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho faz-se necessária para que o mesmo não se torne extremamente complexo e dispendioso, já que o desenvolvimento do método de análise, com a elaboração do software baseado no modelo é o principal objetivo.

Foram analisados quatro tipos de telhados sendo eles: Telhado 1A (Composto por uma chapa simples de aço galvanizado, sem aplicação de tinta reflexiva), Telhado 1B (Composto por uma chapa simples de aço galvanizado, com aplicação de tinta reflexiva), Telhado 2A (Configuração tipo sanduíche, com duas camadas de aço galvanizado, sem aplicação de tinta reflexiva e interpostas por uma camada do isolante térmico poliuretano) e Telhado 2B (Configuração tipo sanduíche, com duas camadas de aço galvanizado, com aplicação da tinta reflexiva e interpostas por uma camada do isolante térmico poliuretano).

O desempenho térmico dos telhados foi analisado quanto ao aquecimento sofrido pela superfície dos mesmos, pois uma superfície extremamente aquecida contribui para formação de ilhas de calor. As temperaturas analisadas foram T_{RC} , que consiste na temperatura da própria superfície do telhado e T_{sa} , que consiste na temperatura das camadas de ar próximas à superfície do telhado. Os resultados obtidos foram sintetizados nos quadros das Figuras 75 e 76. Por eles, observa-se que o Telhado 1A apresenta o pior desempenho térmico entre os analisados, sendo observadas temperaturas T_{RC} e T_{sa} respectivamente, de 47-64°C e 43-67°C. Por sua vez, o telhado 2B apresentou o melhor desempenho térmico, com T_{RC} de 30-42 °C e T_{sa} de 27-37°C.

Os telhados que não possuem a tinta reflexiva, ou seja 1A e 2A, apresentaram pior desempenho se comparado aos mesmos após a aplicação do revestimento branco. Desta forma, constata-se a importância do uso de tintas reflexivas para o aumento da eficiência

energética dos telhados e diminuição das temperaturas das superfícies envolvidas na geração das ilhas de calor urbanas.

Quanto ao fluxo de calor que atravessa o telhado, entende-se como mais eficiente aquele em que o fluxo de calor, tanto para o interior quanto para o exterior seja o menor possível, pois dessa forma gastos energéticos com aquecimento ou refrigeração são minimizados. As Figuras 89 e 90 apresentam uma síntese dos resultados obtidos.

Em concordância com a análise térmica das superfícies, o fluxo de calor para ambiente interno foi menor para os telhados que possuem aplicação de tinta reflexiva se comparado às suas vertentes sem a tinta. A redução mais significativa do fluxo anual para simples aplicação da tinta branca reflexiva mostrou-se mais efetiva para Cuiabá, sendo este reduzido de $1797,51 \text{ MJ/m}^2$ para $716,48 \text{ MJ/m}^2$. Desempenho este seguido pelas demais regiões.

Ainda, é importante destacar o papel do isolante térmico quanto ao barramento do fluxo, seja para o interior (calor emitido para dentro da edificação) ou para o exterior (emitido para o ambiente externo), pois os telhados dos tipos 2A e 2B apresentaram ambos, desempenho térmico bastante superior aos telhados sem o isolamento.

Por fim, foi desenvolvido um mapa, indicando o melhor tipo de telhado para cada região climática brasileira. Dentre os telhados 1A e 1B, recomenda-se o uso do segundo tipo, isto é, com a aplicação da tinta reflexiva, para todas as regiões. Da mesma forma, entre os telhados 2A e 2B, o uso do tipo 2B é mais adequado para todas as regiões. Uma exceção foi dada para a região Sub-tropical, representada por Curitiba, cujo telhado do tipo 2A apresenta desempenho térmico bastante satisfatório, sendo o fluxo para o interior em torno de 39 MJ/m^2 , contra 378 MJ/m^2 para o tipo 1A.

O trabalho aqui desenvolvido atingiu seu objetivo inicial de estudo das quatro variantes analisadas, proporcionando uma boa avaliação das mesmas ao longo de todo o território brasileiro. Parte importante para o desenvolvimento da eficiência energética em edifícios no Brasil.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, análises posteriores podem ser feitas ampliando a variedade de telhados e incluindo os preços de implementação e manutenção dos mesmos, a fim de permitir ao usuário do programa a escolha mais adequada aos seus propósitos. Assim, saber dos custos de implementação inicial e de manutenção ao longo dos anos, além da durabilidade e eficiência de cada tipo de telhado, facilitaria a escolha do tipo de telhado mais adequado à finalidade que se destina.

A partir desta etapa, análises experimentais são importantes para o processo de validação do modelo e maior especificação do cálculo da eficiência energética em cada caso. Sugere-se, portanto o uso de dados experimentais já existentes, bem como a realização de estudos experimentais com as mesmas especificações das simulações adotadas.

Por fim, trabalhos futuros ainda poderiam aprimorar o software para, além do cálculo do fluxo energético, obter a capacidade de armazenamento energético das diversas configurações de telhado, a fim de reconduzir a energia para uso interno do edifício.

REFERÊNCIAS

Abernethy, D., “Evaporative roof cooling. A simple solution to cut cooling costs”. Energy Systems Laboratory, Texas A&M University, ESL-HH-85-09-14, 1985.

Abreu, P.G., Abreu, Valeria.M.N., Coldebella, A., Lopes, L.S., Conceição, V. e Tomazelli, I.L., “Análise termográfica da temperatura superficial de telhas”. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.15, n.11, pp.1193–1198, 2011.

Agência de Notícias dos Direitos da Infância (ANDI). Mudanças Climáticas. IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (Intergovernmental Panel on Climate Change). Disponível em: <<http://www.mudancasclimaticas.andi.org.br/content/ipcc-painel-intergovernamental-sobre-mudanca-do-clima-intergovernamental-panel-climate-change>>. Acesso em 20 de abril de 2015.

Artigas, Laila V. Materiais de Construção III. TC034. Fibrocimento. Universidade Federal do Paraná, 2013. Disponível em: <http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/0/0d/TC034_fibrocimento.pdf>. Acesso em 02 de Maio de 2015.

Ascione, F., Bianco,N., de’Rossi,F., Turni,G., Vanoli,G.P., “Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning?”. Applied Energy vol. 104, 845–859, 2013.

ASHRAE. American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers. ASHRAE Fundamentals Handbook 27, 1997.

ASHRAE Standard 55. Thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA, 2010.

Associação Brasileira da Construção Metálica (ABCEM). Manual Técnico Telhas de Aço. Edição 1. Setembro de 2009.

Barbosa Filho, Antônio N. Um modelo de avaliação da qualidade de vida no trabalho para pessoas com deficiência. Universidade Federal de Pernambuco. Recife,2005.

Balanço Energético Nacional (BEM). Relatório Síntese. Ano base 2014. Empresa de Pesquisa Energética EPE. Rio de Janeiro, 2015.

Berdahl, P.; Fromberg R. The thermal radiance of clear skies. Solar Energy 29, pp 299-314. 1982.

Bevilacqua, P.; Coma J.; Pérez G.; Chocarro C.; Juárez A.; Solé, C.; Simone M.D.; Cabeza L.F.. “Plant cover and floristic composition effect on thermal behaviour of extensive green roofs”, Building and Environment, vol. 92, pp.305-316, 2015.

Bonsai. André Toledo. Estações do ano no Brasil. Os principais tipos climáticos brasileiros segundo Köppen. Disponível em: <<http://bonsai.andretoledo.com.br/2013/05/mae-cade-minhas-estacoes/>>. Acesso em: 20 de abril de 2015.

Brito Filho, JP; Henriquez, JR and Dutra, JCC., "Effects of coefficients of solar reflectivity and infrared emissivity on the temperature and heat flux of horizontal flat roofs of artificially conditioned nonresidential buildings", *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 440-445, 2011.

Breitbach, A.M., Rocha, J.C., Gaylarde, C.C., "Influence of pigment on biodeterioration of acrylic paint films in Southern Brazil". *Journal of Coatings Technology and Research*, DOI 10.1007/s11998-011-9350-1, vol. 8, pp. 619-628, 2011.

Builditsolar. Sistemas de pulverizadores para resfriamento de água com sistema de recuperação e filtragem (-a-). Disponível em: <<http://www.builditsolar.com/Projects/Cooling/WhitecapRoofCoolingReport.pdf>>. Acesso em: 11 de maio de 2015.

Buker, Mahmut Sami ; Mempouo, Blaise ; Riffat, Saffa B. "Experimental investigation of a building integrated photovoltaic/thermal roof collector combined with a liquid desiccant enhanced indirect evaporative cooling system". *Energy Conversion and Management*, Vol.101, pp.239-254.10 de Junho de 2015.

Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM). "Página dinâmica para aprendizado do sensoriamento remoto". Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/engcart/PDASR/rem.html>>. Acesso em: 02 de maio de 2015.

Clark, C., Adrianes, P. and Talbot, F.B., "Green Roof Valuation: A probabilistic Economic Analysis of Environmental Benefits", *Environ. Sci. Technol.*, vol. 42, pp.2155-2161, 2008.

Collares-Pereira M, Rabl A. The average distribution of solar radiation – Correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy* 22: 155-164. 1979.

Construindo. Telhas de PVC – Coberturas de PVC em telhados. Disponível em: <<http://construindo.org/telhas-de-pvc/>>. Acesso em 20 de fevereiro de 2015.

Coutinho, Antonio S. Conforto e Insalubridade Térmica em Ambientes de Trabalho. Editora Universitária UFPB, 1998.

Coutts,A.M., Daly,E., Beringer,J., Tapper,N.J., "Assessing practical measures to reduce urban heat: Green and cool roofs". *Building and Environment*, vol. 70, pp. 266 e 276, 2013.

C. Tiba, N. Fraidenraich, H.G. Gallegos, F.J.M. Lyra, Brazilian solar resource atlas. CD-ROM, *Renewable Energy* 29 (6) 991–1001. 2004

Normais Climatológicas (1961–1990), Ministério da Agricultura e Reforma Agrária-Secretaria Nacional de Irrigação, Brasília, Brazil, 1992.

Dufie, John A.; Beckman, William A; Solar Engineering of Thermal Processes, Editora John Wiley & Sons, EUA, 1991.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Anuário estatístico de energia elétrica. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, 2013.

Ephrath, J., Goudriaan, E.J., Marani, A. Modelling diurnal patterns of air temperature, radiation, wind speed and relative humidity by equations from daily characteristics. Agric. Sys. 51, 377–393. 1996.

Federal Energy Management Program (FEMP). U.S. Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy, “Green Roofs” DOE/EE-0298. Estados Unidos, Agosto 2004.

Ferreira, Aurélio B.H. O minidicionário da língua portuguesa. 4ª edição revista e ampliada. 4ª impressão, Editora Nova Fronteira. Rio de Janeiro, 2001.

Florenzano, Tereza G. Imagens de satélites para estudos ambientais. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

Fraidenraich, Naum; Lyra, Francisco. Energia Solar. Fundamentos e tecnologias de conversão heliotermoelétrica e fotovoltaica. Universidade Federal de Pernambuco. Editora Universitária Recife, 1995.

Frota, Anésia B.;Schiffer, Sueli R. e Schiffer. Manual de Conforto Térmico. 2ª edição revista e atualizada, Studio Nobel. São Paulo, 1995.

Gratia E, Herde AD. Natural Cooling Strategies Efficiency in an Office Building With a Double Skin Facade. Energy and Buildings, vol. 36, pp. 1139-1152, 2004.

Homeexpo. Sistema de pulverizadores simples sobre telhado. Disponível em: <http://homeexpo.amritatv.com/2013/Ways_to_Cool_Your_Roof.html>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2014.

Incropera, Frank P.; Dewitt, David P.; Bergman, Theodore L.; Lavine, Adrienne S. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa, 6ª edição. Tradução e Revisão Técnica de Queiroz, Eduardo M. e Pessoa, Fernando L.P. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2008.

Ikematsu, Paula. Estudo da refletância e sua influência no comportamento térmico de tintas refletivas e convencionais de cores correspondentes. Departamento de Engenharia Civil e Urbana da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

Instituto de Matemática e Estatística (IME). Métodos Iterativos. Capítulo 4. Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://www.ime.usp.br/~colli/cursos/NumericoIAG-2005/LivroNumericoCapitulo4.pdf>>. Acesso em: 08 de Junho de 2015.

Instituto Nacional de Pesquisa Energética (INPE). Estações. Mapas de Climatologia de Temperaturas Máximas e Mínimas. Disponível em: <<http://clima1.cptec.inpe.br/estacoes/pt#>>>. Acesso em 21 de Abril de 2015.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. Geneva, Switzerland, 2014.

Jacobson, Mark Z.; Hovee, John E. T. Journal of Climate, Volume 25. Effects of Urban Surfaces and White Roofs on Global and Regional Climate. Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, California, 2011.

Jaffal, I., Ouldboukhitine, S.E, Belerbi, R., “A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance”. Renewable Energy, vol. 43, pp.157 e 164, 2012.

Gullberg, J. Mathematics from the birth of numbers, W. W. Norton & Company; ISBN 0-393-04002-X ISBN 978-0393040029, pp 216, 1997.

Kharrufa, S.N., Adil,Y., “Roof pond cooling of buildings in hot arid climates”. Building and Environment, vol. 43, pp. 82–89, 2008.

Levinson, R., Akbari, H., Konopacki, S., & Bretz, S. Inclusion of cool roofs in nonresidential Title 24 prescriptive requirements. Energy Policy; 33(2):151-170. 2005.

Liu, B. Y. H.; Jordan, R. C. The long term average performance flat plate solar energy collectors. Solar Energy, [S.l.], v. 7, p. 53-74, 1963.

Massafra, Dário; Viana, Gleicy; Faria, Guilherme; Voloch, Simão. Materiais Recicláveis na construção civil. Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: <www.demc.ufmg.br/tec3/Materiasis%20Reciclados.ppt>. Acesso em 02 de Maio de 2015.

McAdams, William H. Heat Transmission. McGraw-Hill Series in Chemical Engineering. 3rd Edition, 1954.

Meng,Q. and Zhang, L., “The Rooftop Shading System for the Humanities Building at SCUT”,Energy and Buildings, vol. 38, pp. 356-1359, 2006.

Metálica. Coberturas: os diversos tipos e suas características. Disponível em: <<http://wwwo.metalica.com.br/coberturas-os-diversos-tipos-e-suas-caracteristicas>>. Acesso em 10 de fevereiro de 2015.

Michels, Caren. Análise da transferência de Calor em Coberturas com Barreiras Radiantes. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

Oliveira, Tiago Henrique; Galvêncio, Josiclêda D.; Pimentel, Rejane M. M.; Silva, Bernardo B. Revista Brasileira de Geografia Física V. 06, n. 06, 1598-1616. Uso e Cobertura do Solo e Seus Efeitos na Distribuição da Temperatura de Superfície em Área Urbana. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2013.

Rabl, A. Active Solar Collectors and Their Applications. Oxford: Oxford University Press. 1985.

Rizwan, A.M., Dennis, L.Y.C. and Liu. C., “A Review of the Generation, Determination and Mitigation of Urban Heat Island”, *Journal of Environmental Sciences*, vol. 20, pp. 120-128, 2008

Ruas, Álvaro César. Conforto Térmico nos Ambientes de Trabalho. Ministério do Trabalho e Emprego Fundacentro. Campinas, 1999.

Saliba, Tuffi M. Curso Básico de Segurança e Higiene Ocupacional. 2ª Edição. Editora São Paulo. São Paulo, 2008.

Schweitzer, O., Erell, E., “Evaluation of the energy performance and irrigation requirements of extensive green roofs in a water-scarce Mediterranean climate”. *Energy and Buildings*, vol. 68, pp. 25–32, 2014.

Shackelford, James F. Ciência dos Materiais. 6ª edição. Tradução: VIEIRA, Daniel. Editora Pearson. São Paulo, 2008.

Silva, N.C. "Telhado Verde: Sistema construtivo de maior eficiência e menor impacto ambiental.", Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção. Monografia, 2011.

Smith, J.L., Smith, J.C., “Theory vs. Practice in Direct Evaporative Roof Spray Cooling”, Energy Systems Laboratory, Texas A&M University, ESL-HH-85-09-32, 1985.

Spanakia, A.; Tsoutsosb, T.; Kolokotsab, D. “On the selection and design of the proper roof pond variant for passive cooling purposes”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 3523–3533, 2011.

Synnefa, A.; Santamouris, M.; Livada, I. “A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment”, *Solar Energy*, vol. 80, pp. 968–981, 2006.

Takebayashi, H., “Surface Heat Budget on Green Roof and High Reflection Roof for Mitigation of Urban Heat Island”, *Building and Environment*, vol. 42, n 8, August, pp. 2971-2979, 2007.

Takebayashi, H.; Miki K.; Sakai K.; Murata Y.; Matsumoto T.; Wada S.; Aoyama, T. “Experimental examination of solar reflectance of high-reflectance paint in Japan with natural and accelerated aging”. *Energy and Buildings*, ISSN: 0378-7788 ; DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.06.019, 2015.

Tang, R. and Etzion, Y., “Cooling Performance of Roof Ponds with Gunny Bags Floating on Water Surface as Compared with a Movable Insulation”, *Renewable Energy*, vol. 30, pp. 373-1385, 2005.

TermoRoof. Telhas Térmicas Dânica. Disponível em: <http://www.termoroof.com.br/uploads/downloads/Cat_TermoRoof_07_2013.pdf>. Acesso em: 01 de junho de 2015.

Totten, George E.; Mackenzie, D. Scott. Handbook of Aluminum, vol.1. Physical Metallurgy and Process. Ed. Marcel Dekker. New York, 2003.

U.S. Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy, “Building Energy Data Book”, 2008.

U.S. Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy, “Green Roofs” DOE/EE-0298, September 2004.

U.S. Department of Energy, Pacific Northwest National Laboratory. Technology Installation Review. “WhiteCap Roof Spray Cooling System. Cooling Technology for Warm, Dry Climates”, 1998.

Yannas, S., Erel,E., Molina, J.L., “Roof Cooling Techniques A Design Handbook”, James & James (Science Publishers), London, 2006.

Boa Vista

Brasília

Florianópolis

Macapá

Palmas

Rio Branco

