



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

EMMERSON XAVIER LIMA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA O DESEMPENHO TÉRMICO DE
PAREDES TROMBE PARA A CIDADE DE SÃO LUÍS**

**SÃO LUÍS/MA
2017**

EMMERSON XAVIER LIMA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA O DESEMPENHO TÉRMICO DE
PAREDES TROMBE PARA A CIDADE DE SÃO LUÍS**

Monografia de graduação apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica Bacharelado da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. MSc Louryval Coelho Paixão.

SÃO LUÍS/MA
2017

Lima, Emmerson Xavier.

Simulação computacional para o desempenho térmico de paredes trompe para a cidade de São Luís / Emmerson Xavier Lima. – São Luís, 2017.

75 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2017.

Orientador: Prof. MSc. Louryval Coelho Paixão.

EMMERSON XAVIER LIMA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA O DESEMPENHO TÉRMICO DE
PAREDES TROMBE PARA A CIDADE DE SÃO LUÍS**

Monografia de graduação apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica Bacharelado da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. MSc Louryval Coelho Paixão.

Aprovada em: 28 de junho de 2017

BANCA EXAMINADORA

Prof. MSc Louryval Coelho Paixão
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Lourival Matos de Sousa Filho
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. MSc Paulino Martins
Universidade Estadual do Maranhão

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, e em seguida ao meu orientador Prof. MSc Louryval Coelho Paixão que esteve sempre presente me instruindo nessa pesquisa e agradecer também a toda minha família pois sem ela não conseguiria chegar aonde cheguei.

RESUMO

A presente pesquisa busca investigar o uso de Paredes Trombe na cidade de São Luís para a promoção de conforto térmico. O método utilizado para investigar e analisar os resultados foi o Método das Diferenças Finitas usado em análise de Transferências de Calor. Foi necessário a coleta de dados referentes as temperaturas do ar e das radiações solares de quatro períodos das estações do ano de 2016: equinócio de outono, solstício de inverno, equinócio de primavera e solstício de verão. E também do uso de informações referentes a espessura inicial para a Parede Trombe, levando em consideração a realidade das edificações da cidade, coeficiente de condutividade térmica, coeficiente de convecção do ar interno e externo e temperatura interna de projeto, informações obtidas por consultas em normas regulamentadoras e catálogos técnicos. Após a análise dos resultados gráficos constatou-se que o uso dessa tecnologia para a cidade de São Luís não seria tecnicamente viável do ponto de vista do conforto térmico, porém com o aumento a espessura da Parede Trombe (aumento da Inércia Térmica da Parede Trombe) os resultados tendem a se aproximar de uma realidade térmica mais viável, ou seja, de chegar mais próximo da temperatura de conforto.

Palavras-chave: Parede Trombe; Conforto térmico; Método das Diferenças Finitas.

ABSTRACT

The present research aims to investigate the use of Paredes Trombe in the city of São Luís to promote thermal comfort. The method used to investigate and analyze the results was the Finite Differences Method used in Heat Transfer analysis. It was necessary to collect data on air temperatures and solar radiation of four periods of the seasons of 2016: autumn equinox, winter solstice, spring equinox and summer solstice. As well as the use of information regarding the initial thickness of the Wall Trombe, taking into account the reality of the city buildings, coefficient of thermal conductivity, convection coefficient of internal and external air and internal design temperature, information obtained by queries in standards Regulatory and technical catalogs. After analyzing the graphical results, it was verified that the use of this technology for the city of São Luís would not be technically feasible from the point of view of thermal comfort, but with the increase of the Wall Trombe thickness (increase of the Thermal Inertia of the Wall Trombe) The results tend to approach a more viable thermal reality, that is, to get closer to the comfort temperature.

Key-words: Trombe Wall; Thermal Confort; Finite Differences Method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – influência do número de Biot na destruição de temperatura de uma parede plana.	17
Figura 2 – Distribuição de temperaturas transientes para diferentes números de Biot.	17
Figura 3 – Esquematização dos nós e das temperaturas nodais em MDF	19
Figura 4 – Esquema dos processos de radiação solar com a atmosfera terrestre	23
Figura 5 – Incidência da radiação solar no Brasil	25
Figura 6 – Construção de uma Parede Trombe na faixa em uma casa	26
Figura 7 – Esquema usado durante o inverno para aquecer	27
Figura 8 – esquema usado durante o verão para ventilação	27
Figura 9 – Esquema da Parede com seus respectivos dados	31
Figura 10 – Esquematização dos nós e espaçamentos nodais	32
Figura 11 – Fluxograma do algoritmo construído em Matlab	37
Figura 12 – Distribuição de temperatura da parede Trombe de 14 cm Equinócio de outono.	38
Figura 13 – Distribuição de temperatura da parede Trombe de 30 cm Equinócio de outono.	39
Figura 14 – Calor transferido pela parede Trombe de 14 cm Equinócio de outono.	40
Figura 15 – Calor transferido pela parede Trombe de 30 cm Equinócio de outono.	41
Figura 16 – Distribuição de temperatura da parede Trombe de 14 cm Solstício de inverno	43
Figura 17 – Distribuição de temperatura da parede Trombe de 30 cm Solstício de inverno	43
Figura 18 – Calor transferido pela parede Trombe de 14 cm Solstício de inverno	44
Figura 19 – Calor transferido pela parede Trombe de 30 cm Solstício de inverno	45
Figura 20 – Distribuição de temperatura da parede Trombe de 14 cm Equinócio de primavera	46
Figura 21 – Distribuição de temperatura da parede Trombe de 30 cm Equinócio de primavera	47
Figura 22 – Calor transferido pela parede Trombe de 14 cm Equinócio de primavera	48
Figura 23 – Calor transferido pela parede Trombe de 30 cm Equinócio de primavera	49
Figura 24 – Distribuição de temperatura da parede Trombe de 14 cm Solstício de verão	50
Figura 25 – Distribuição de temperatura da parede Trombe de 30 cm Solstício de verão	51
Figura 26 – Calor transferido pela parede Trombe de 14 cm Solstício de verão	52
Figura 27 – Calor transferido pela parede Trombe de 30 cm Solstício de verão	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Temperaturas horarias ambientais (T_{ext}) e suas respectivas radiações solares	75
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

α – Difusividade Térmica do material [m^2/s]

k – Coeficiente de condutividade térmica do material [$\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$]

L – Espessura da parede [m]

h – Coeficiente de convecção térmica do fluido [$\text{W}/\text{m}^2^\circ\text{C}$]

h_{int} – Coeficiente de convecção térmica do ambiente interno do ar [$\text{W}/\text{m}^2^\circ\text{C}$]

h_{ext} – Coeficiente de convecção térmica do ambiente externo do ar [$\text{W}/\text{m}^2^\circ\text{C}$]

A – Área do fluxo de calor de uma parede [m^2]

c – Calor específico do material [$\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$]

ρ – Massa específica do material [kg/m^3]

τ – Transmissividade solar do vidro [adimensional]

$T_{s,1}$ – Temperatura superficial interna da parede [$^\circ\text{C}$]

$T_{s,2}$ – Temperatura superficial externa da parede [$^\circ\text{C}$]

T_∞ – Temperatura do fluido [$^\circ\text{C}$]

T_m^i – Temperatura nodal para cada instante [$^\circ\text{C}$]

T_{int} – Temperatura do ar do ambiente interno [$^\circ\text{C}$]

T_{ext} – Temperatura do ar do ambiente externo [$^\circ\text{C}$]

Q – Quantidade de calor [J]

CPTEC/INPE – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

NBR – Norma Regulamentadora Brasileira

CEBRACE – Companhia Brasileira de Cristal

Fo – Número de Fourier [adimensional]

Bi – Número de Biot [adimensional]

Bi_{int} – Número de Biot do ambiente interno [adimensional]

Bi_{ext} – Número de Biot do ambiente externo [adimensional]

Δx – Espaçamento nodal [m]

M – Número de seções

m – Número de nós

i – Instantes de Tempo

Δt – Passos de Tempo [s]

t – Tempo [s]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo Geral	15
1.1.1	Objetivos Específicos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Condução Transiente	16
2.2	Método das Diferenças Finitas	18
2.3	Radiação Solar	22
2.4	Parede Trombe	23
3	METODOLOGIA.....	30
3.1	Apresentação do problema	30
3.1.1	Hipóteses Simplificadoras do Problema	30
3.2	Modelagem Numérica	31
3.2.1	Critério da estabilidade do método explícito	33
3.3	Temperaturas nos instantes iniciais para cada período.....	35
3.4	Temperaturas posteriores	35
3.5	Calor transferido	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕEs	38
5	CONCLUSÃO.....	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
	APÊNDICE A - ALGORITMO PARA EQUINÓCIO DE OUTONO	59
	APÊNDICE B - ALGORITMO PARA SOLSTÍCIO DE INVERNO	62
	APÊNDICE C - ALGORITMO PARA EQUINÓCIO DE PRIMAVERA	65
	APÊNDICE D - ALGORITMO PARA SOLSTÍCIO DE VERÃO	68
	APÊNDICE E - CÁLCULO DAS TEMPERATURAS POSTERIORES PARA CADA PERÍODO	71
	ANEXO A - TEMPERATURAS HORÁRIAS DO AR E RADIAÇÕES SOLARES PARA CADA ESTAÇÃO DO ANO DE SÃO LUÍS.....	75

1 INTRODUÇÃO

Desde quando o homem passou a construir moradias, sempre buscou a proteção contra interpeles da natureza. As fachadas são paredes externas de edificações, que juntamente com o pavimento constitui um local de abrigo e segurança para o homem. As paredes atuam como uma interface entre o ambiente externo e o ambiente interno (recinto), sendo que a principal função é a proteção dos indivíduos contra condições climatológicas, ou seja, contra o vento, precipitações, temperaturas, radiação solar, dentre outros. Protege também contra outros tipos de inconvenientes, como ruídos, e mantém a segurança. (BRITO, 2010).

Em meados do século XX, a fabricação de janelas em fachadas tornou-se mais frequente por conta da facilidade de do fabrico e também por conta da necessidade de melhorar o ambiente interno. A evolução das soluções de paredes externas é motivada pela busca constante de resposta ao aumento das expectativas de melhorar o conforto nos ambientes internos e também as imposições legais que aforam aparecendo por meio de regulamentações sobre a qualidade térmica das edificações, nos anos 90. (BRITO, 2010)

Com o advento da tecnologia e da criatividade várias invenções foram surgindo ao final do século XX. Ao mesmo tempo o conceito de Desenvolvimento Sustentável surge, como resposta à gerações futuras. Com isso os estudos em relação a construções, clima e conforto das pessoas, passam a ser tratados com mais rigor, sendo criados sistemas ativos e passivos de climatização. (BRITO, 2010).

Embora ambos os sistemas já tinham um certo desenvolvimento, o sistema passivo em especial era bem mais antigo, usado por civilizações da antiguidade, na qual os abrigos serviam sobre tudo para proteção das condições climáticas, usados para obtenção de conforto na parte interna das habitações. Desde a revolução industrial e consequentemente o avanço tecnológico, as condicionantes climáticas e mecânicas puderam ser ignoradas pelo homem. Depois da segunda metade do século XX, o homem busca novas alternativas para tentar diminuir o consumo energético, tentando enquadrar em soluções construtivas no tipo de clima e localização geográfica. (BRITO, 2010).

Com isso os sistemas passivos passaram a ser fontes de estudo. Esses sistemas corroboram para a climatização do ambiente interior sem que seja necessário o uso de energia elétrica/mecânica. Em vez disso, aproveita-se a energia emitida pelo Sol e também de variáveis climáticas locais, com o intuito de manter o conforto no interior dos recintos. (CAVALVANTE, 2013)

É nesse contexto que aparece a utilização da Parede Trombe, embora o primeiro conceito tenha aparecido em 1881 por Edward Morse, a sua popularidade tornou-se pública por volta de 1967, com o engenheiro Felix Trombe e o arquiteto Jacques Michel. Constituído de uma parede orientada a norte (quando localizada no hemisfério sul) com aberturas superiores e inferiores além de uma placa de vidro a uma certa distância da parede. (BRITO, 2010)

Esse sistema promove aquecimento no inverno, isso porque o ar entre o vidro e a parede é aquecido por convecção natural e faz circular no interior do recinto, através das aberturas na parede. Em época de verão a parede deve ter energia solar e deve conter uma abertura para ventilação, sendo que os orifícios que dão acesso para o ambiente interno devem ficar fechados de forma a evitar entrada de ar quente. Esse sistema envolve trocas de calor por condução, por convecção e também por radiação solar, por conta disso faz-se necessário a coleta de dados relativos a temperatura do ar bem como os níveis de radiação solar. (CAVALVANTE, 2013)

Tendo em vista esse contexto o uso de simulações computacionais para o estudo do desempenho térmico das Paredes Trombe tem sido bastante utilizado em pesquisas e diversos trabalhos. As simulações computacionais serão usadas neste trabalho para analisar a distribuição de temperatura em um ambiente interno, para poder assim avaliar o desempenho e o eventual uso de Paredes Trombe para promoção do conforto térmico em ambientes na cidade de São Luís.

O município de São Luís fica localizado na região norte do estado do Maranhão, ficando também próximo da linha do Equador, ou seja, tem uma grande incidência solar na maior parte do ano, com uma altitude de 24 metros acima do nível do mar. Possui um clima tropical, quente e úmido. Na maior parte do ano a temperatura mínima fica entre 21 e 27 °C a temperatura máxima pode chegar entre 27 e 34 °C (WIKIPÉDIA, 2017). A partir dessas características a cidade de São Luís detém de um potencial considerável para a instalação de tal tipo de sistema.

Como os sistemas passivos para climatização são tidos como uma solução sustentável e visando a potencialidade da cidade de São Luís, como citado no parágrafo anterior, serão coletados dados relacionados as temperaturas horárias bem como os níveis de radiação solar referente ao ano de 2016.

Para esse sistema serão realizadas simulações computacionais através da implantação de um algoritmo no software Matlab, utilizando o Método das Diferenças Finitas, muito utilizado na modelagem matemática para a resolução de problemas de engenharia.

Após isso serão analisados gráficos sobre a distribuição de temperatura de ambientes internos bem como a análise de trocas de calor que podem ocorrer por condução na parede e por convecção.

1.1 Objetivo Geral

Verificação da potencialidade do uso de Paredes Trombe, através do Método das Diferenças Finitas em simulações computacionais executadas do software Matlab, para a cidade de São Luís do Maranhão.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Levantar os dados em relação a Temperaturas horárias bem como os dados referentes a Radiação solar horária dos Equinócios de outono e primavera; e dos Solstícios de inverno e verão do ano de 2016 (que correspondem as 4 estações do ano);
- Analisar a distribuição de temperatura e ganhos de calor da Parede Trombe por meio do software Matlab a simulação por meio dos dados coletados;
- Verificar a partir das análises, a eventual implantação de Paredes Trombe para proporcionar conforto térmico para população ludovicense.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Condução Transiente

Sabemos que na vida real a taxa de transferência de calor por condução não ocorre de maneira uniforme (INCROPERA, DEWITT, *et al.*, 2011). Isso quer dizer que tal comportamento varia em função de alguns fatores, como espaço e tempo. Para compreender esse processo se faz necessário fazer considerações iniciais.

Segundo (INCROPERA, DEWITT, *et al.*, 2011) o critério apropriado para desenvolver a análise de condução transiente, considera-se a princípio condução em regime permanente, que posteriormente se estende para processos transitórios.

Isso é confirmado quando (KREITH e BOHN, 2014) diz que mesmo sem haver a natureza material que apresente condução térmica infinita, diversos problemas de fluxo de calor transiente podem ser resolvidos com uma aceitável precisão por meio da hipótese de que a resistência condutiva interna é muito pequena que a temperatura interior seja substancialmente uniforme em qualquer instante, por isso a justificação da simplificação para esse tipo de processo é aceita.

A Figura 1, mostra a superfície de uma parede plana a uma temperatura $T_{s,1}$ e a temperatura do fluido, exposto ao ambiente, $T_{\infty} < T_{s,1}$. Porém entre essas temperaturas existe uma temperatura intermediária $T_{s,2}$, com isso aplicando o balanço de energia na superfície de contato com o ar, temos:

$$\frac{kA}{L}(T_{s,1} - T_{s,2}) = hA(T_{s,2} - T_{\infty}) \rightarrow \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{T_{s,2} - T_{\infty}} = \frac{(L/kA)}{(1/hA)} = \frac{hL}{k} \equiv Bi \quad (1)$$

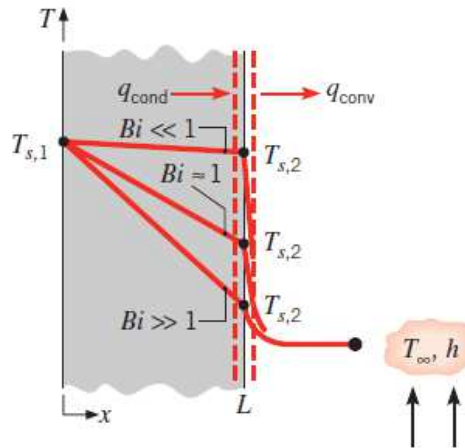
O termo (hL/k) mostrado em (1) é um parâmetro adimensional denominado de número de Biot, esse é de fundamental importância na análise de problemas que envolvem efeitos convectivos em superfícies bem como nos dá o fornecimento da queda de temperatura no sólido (parede) em relação as diferenças de temperaturas entre a superfície e o fluido (ar).

E nessa perspectiva (INCROPERA, DEWITT, *et al.*, 2011) mostra o tempo adimensional, denominado número de Fourier, dado por:

$$Fo = \frac{\alpha t}{L^2} \quad (2)$$

Em que $\alpha = k/\rho c_p$ representa a difusividade térmica da parede.

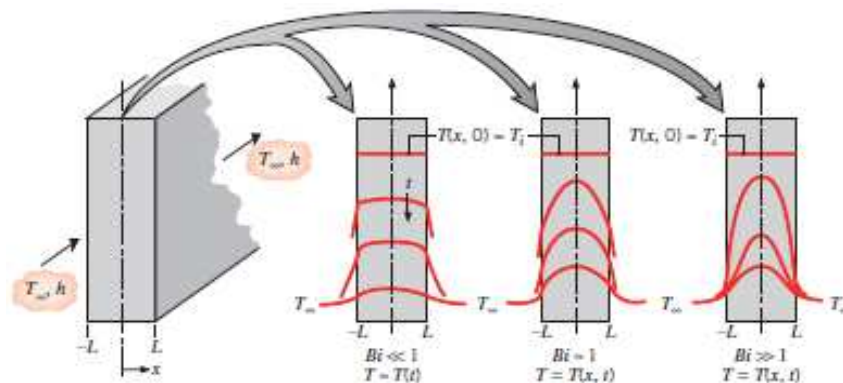
Figura 1 – influência do número de Biot na distribuição de temperatura de uma parede plana



Fonte: (INCROPERA, DEWITT, *et al.*, 2011)

Nesse contexto ao introduzir o número de Biot em problemas de condução transientes e considerando a parede plana da Figura 2, imposta a uma temperatura inicial uniforme T_i e passa por um resfriamento convectivo, ou seja $T_{\infty} < T_i$, o nosso problema passa a ser tratado como unidirecional, nos interessamos em saber qual a variação da temperatura em função da posição e do tempo, $T(x,t)$. Com isso o número de Biot tem suas variações e por conseguinte podem aparecer três situações.

Figura 2 – Distribuição de temperaturas transientes para diferentes números de Biot.



Fonte: (INCROPERA, DEWITT, *et al.*, 2011)

Quando $Bi \ll 1$, o gradiente de temperatura do sólido é pequeno podendo ser aproximado para $T(x,t) \approx T(t)$, quer dizer que a temperatura permanece uniforme em relação a posição. Na situação em que $Bi \approx 1$ e quando $Bi \gg 1$ assume valores moderadamente altos (Bi

>> L) a diferença de temperatura ao longo do sólido se torna muito maior, os gradientes de temperatura são notórios no interior do sólido, quer dizer que $T = T(x,t)$ (INCROPERA, DEWITT, *et al.*, 2011).

Neste trabalho serão apresentadas, conforme (ÇENGEL e GHAJAR, 2011. p. 71) a equação diferencial da condução de calor em uma parede plana unidirecional sem a geração de energia interna e em regime transiente, em (2) bem como condições de contorno interna e externa em (3) e (4), ainda segundo (ÇENGEL e GHAJAR, 2011. p. 80) respectivamente:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

$$T(0, t) = T_{s,1} \quad (4)$$

$$T(L, t) = T_{s,2} \quad (5)$$

As equações (2), (3) e (4), servem para modelar matematicamente a distribuição de temperatura e também o fluxo de condução de calor de uma parede plana. Porém para uma Parede Trombe que será usada na cidade de São Luís, serão adicionadas informações para a complementação de sua modelagem.

2.2 Método das Diferenças Finitas

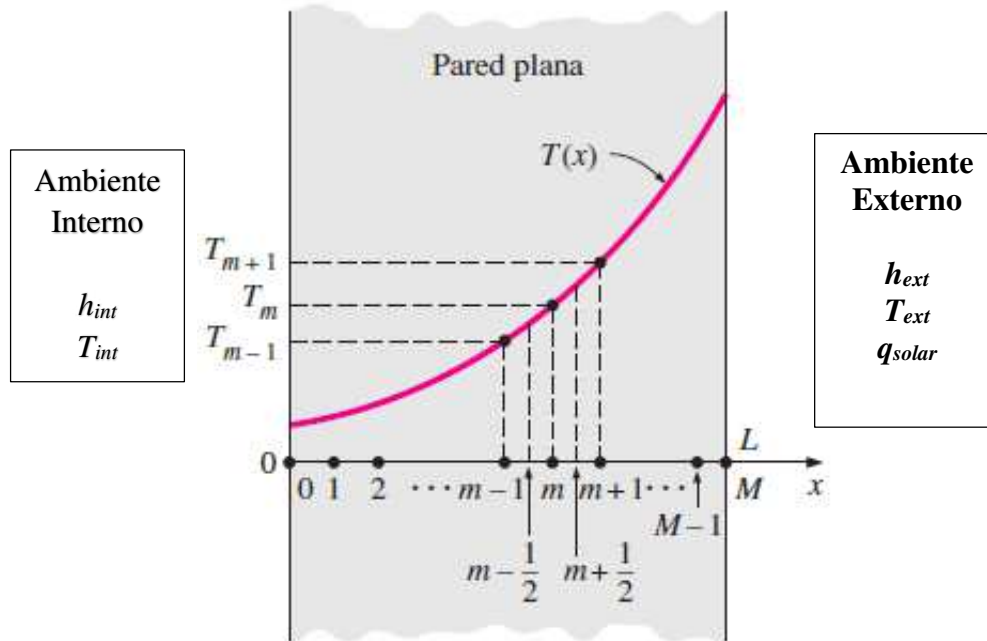
Com o advento da tecnologia de computadores e softwares puderam ser implementados no ambiente da engenharia de forma mais eficaz. Isso pode ser confirmado com (ÇENGEL e GHAJAR, 2011) quando diz que o uso de métodos numéricos, em especial o método das diferenças finitas (MDF), são utilizados para a resolução equações diferenciais.

A formulação de um problema usando o método das diferenças finitas envolve o uso de pontos nodais ou simplesmente nós, que dependendo da quantidade desses nós, ou seja, do refinamento termos resultados bem próximos da realidade (NEVES, LIMA e LIMA, 2013).

Considerando uma parede plana com uma espessura L e subdividida em M seções, teremos que o espaçamento nodal da parede será $\Delta x = L/M$ na direção x nos pontos $0, 1, 2, \dots$,

$m - 1, m, m + 1$, como mostrado na Figura 3 em que qualquer ponto m na coordenada x é $x_m = m\Delta x$ e a temperatura nesse ponto é $T(x_m) = T_m$ (ÇENGEL e GHAJAR, 2011).

Figura 3 – Esquemática dos nós e das temperaturas nodais em MDF



Fonte: (ÇENGEL e GHAJAR, 2011)

O método das diferenças finitas é bastante eficaz na aplicação de problemas de transferência de calor em regime transiente (FERNANDES e AZENHA, 2016). Esse método possui duas formas de apresentação das equações nodais: forma explícita e implícita. Nessa pesquisa são usadas as equações na forma explícita. Para que o método seja eficaz e tenha índice de confiabilidade considerada deve ser verificado sua estabilidade (critério de estabilidade), que em regime transiente a resolução das temperaturas nodais, se aproxima do regime estacionário com o passar do tempo.

Para que isso aconteça o tempo discretizado (Δt) tem que ser mantido abaixo de um certo limite que depende da malha (Δx) e de outros fatores do sistema. De modo geral, isso é conseguido quando se agrupam os termos que envolvem T_m^i para obter a forma do coeficiente, tal resultado é usada para obter uma relação limite que envolve Fo com o valor máximo permitido de Δt . por conta disso a estabilidade segue o critério para um nó unidimensional e bidimensional, respectivamente: $(1 - 2Fo) \geq 0$ e $(1 - 4Fo) \geq 0$. E o critério de estabilidade usado é dado pela equação (6) (INCROPERA, DEWITT, *et al.*, 2011).

$$1 - 2Fo - 2FoBi \geq 0 \quad \text{ou} \quad Fo(1 + Bi) \geq \frac{1}{2} \quad (6)$$

Como os números de Biot e Fourier já foram definidos anteriormente, suas formas discretizadas são apresentadas nas equações (7) e (8) respectivamente:

$$Bi = \frac{h\Delta x}{k} \quad (7)$$

$$Fo = \frac{\alpha\Delta t}{\Delta x^2} \quad (8)$$

O índice i é usado como contador de passos de tempo para problemas transferência de calor transientes, na qual $i = 0$ corresponde a condição inicial adotada ou especificada. A literatura informa que o tempo (total) de análise da transferência de calor é dado por (ÇENGEL e GHAJAR, 2011):

$$t = i\Delta t \quad (9)$$

Os problemas de transferência de calor em regime transientes são contornados por um termo adicional que significa a mudança da quantidade de energia à medida em que o tempo passa. Esse termo aparece como uma derivada temporal de primeira ordem da temperatura em função do tempo na equação diferencial e como mudança de quantidade de energia interna no decorrer do Δt na elaboração do balanço de energia (ÇENGEL e GHAJAR, 2011).

De acordo com (ÇENGEL e GHAJAR, 2011) e (KREITH e BOHN, 2014) assumimos que a transferência de calor, que pode ser por condução, convecção e radiação, é para o elemento e o balanço de energia no elemento de volume de controle durante o intervalo de tempo Δt e sem geração de energia do elemento é dado por:

$$\sum \dot{Q} = \rho V_{elem} c_p \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} \quad (10)$$

Podemos notar da equação (10) que o termo $(T_m^{i+1} - T_m^i / \Delta t)$ equivale a aproximação pode diferenças finitas da derivada parcial $\partial T / \partial t$ que aparece em (3) e $V_{elem} = A\Delta x$.

As temperaturas nodais modificam em problemas transientes com o passar do tempo (ÇENGEL e GHAJAR, 2011). Com isso o mesmo autor apresenta a equação (11) usando o método explícito:

$$\sum \dot{Q}^i = \rho V_{elem} c_p \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} \quad (11)$$

Como mostrado na Figura 3, usando o nó m interno a parede plana, na equação (11) é considerado apenas os efeitos de condução na parede, obtendo um balanço de energia da seguinte forma, apresentado em (12):

$$kA \frac{T_{m-1}^i - T_m^i}{\Delta x} + kA \frac{T_{m+1}^i - T_m^i}{\Delta x} = \rho c_p A \frac{\Delta x}{2} \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t}, \text{ para } m = 0 \quad (12)$$

Tomando como base a Figura 3, a equação (11) e considerando que o lado esquerdo da Figura 3 seja a parte interna de um ambiente, aonde temos que em T_0 atuam os efeitos de transferência de calor condução de calor na parede e de convecção natural do ar interno e também considerando o espaçamento nodal médio, o balanço energético é dado pela equação (13):

$$h_{int} A (T_{int}^i - T_m^i) + kA \frac{T_m^i - T_{m+1}^i}{\Delta x} = \rho c_p A \frac{\Delta x}{2} \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t}, \text{ para } m = 0 \quad (13)$$

Ainda tomando como base a Figura 3, a equação (11) e considerando agora que o lado direito da Figura 3 seja a parte externa de um ambiente, aonde temos que em T_M atuam os efeitos de transferência de calor condução de calor na parede, de convecção natural do ar externo e de radiação solar e também considerando o espaçamento nodal médio, o balanço energético é dado pela equação (14):

$$h_{ext} A (T_{ext}^i - T_m^i) + kA \frac{T_{m-1}^i - T_m^i}{\Delta x} + q_{solar}^i A = \rho c_p A \frac{\Delta x}{2} \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t}, \text{ para } m = M \quad (14)$$

Diante dos balanços de energias apresentados nas equações (12), (13) e (14) são usadas para determinar as temperaturas nodais superficiais internas e externas da parede, bem como as

temperaturas nodais internas a parede em cada nó e consequentemente a distribuição de temperatura ao longo da espessura de uma parede é (ÇENGEL e GHAJAR, 2011):

$$T_m^{i+1} = (T_{m-1}^i + T_{m+1}^i)Fo + (1 - 2Fo)T_m^i \quad (16)$$

$$T_m^{i+1} = (1 - 2Fo - 2FoBi_{int})T_m^i + 2FoT_{m+1}^i2FoBiT_{int}^i \quad (17)$$

$$T_m^{i+1} = (1 - 2Fo - 2FoBi_{ext})T_m^i + 2FoT_{m+1}^i2FoBiT_{ext}^i + q_{solar}Fo \frac{\Delta x}{k} \quad (18)$$

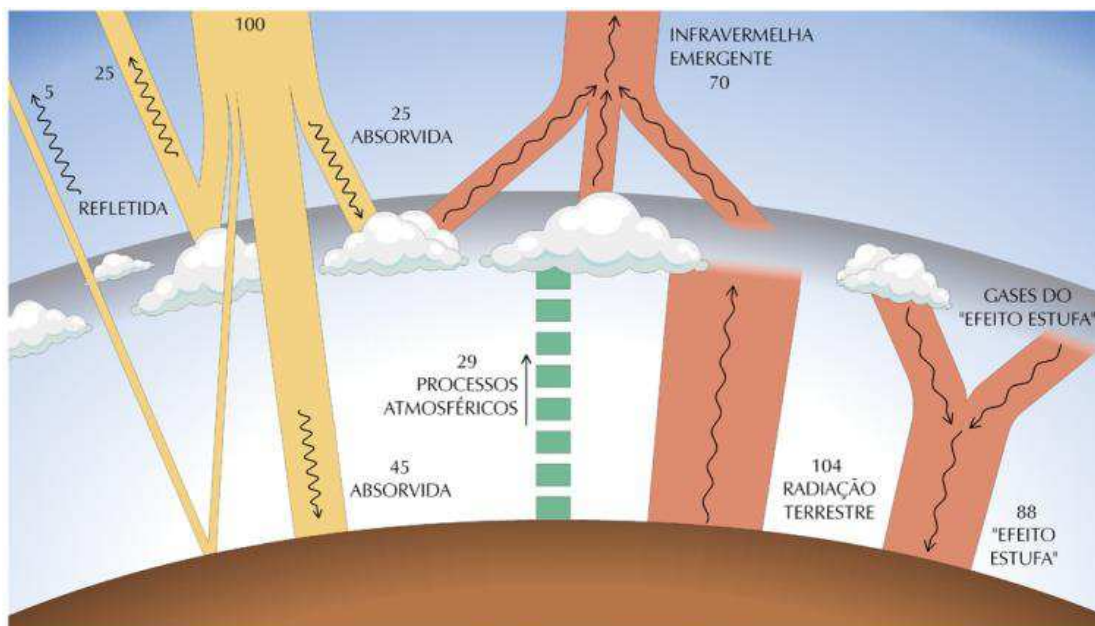
A equação (16) calcula as temperaturas internas a parede, a equação (17) calcula a temperatura nodal da superfície interna e a equação (18) calcula a temperatura nodal da superfície externa. Esta última equação é a mais completa pois envolve problemas de condução e convecção em regime transiente, pois são dois tipos de problemas que serão tratados nessa pesquisa, além também da radiação solar que será discutido na próxima seção.

2.3 Radiação Solar

A energia solar é a principal fonte energética para diversos processos terrestres como a fotossíntese, circulação atmosférica etc. A radiação solar, que é a incidida pelo Sol, é a principal fonte de energia para a Terra e influencia diretamente em vários elementos climáticos como: temperatura, pressão, vento, umidade dentre outros (PEREIRA, ANGELOCCI e SENTELHAS, 2002).

Tendo em vista tais premissas citadas pelo autor do parágrafo anterior, existem modelos físicos para se obterem uma estimativa de radiação solar que é emitida na Terra. Segundo (PEREIRA, MARTINS, *et al.*, 2006) quando a radiação solar atravessa a atmosfera terrestre, processos físicos de espalhamento e absorção são efetuados por meio da superfície do planeta e de constituintes da atmosfera, como mostra a Figura 4.

Figura 4 – Esquema dos processos de radiação solar com a atmosfera terrestre



Fonte: (PEREIRA, MARTINS, *et al.*, 2006)

Elementos atmosféricos como gases, nuvens e a superfície da Terra refletem aproximadamente 30% da radiação solar, os outros 70% são absorvidos gerando aquecimento do sistema ocasionando a evaporação da água e desse percentual a maior parte é absorvida pela superfície do planeta como pôde ser visto na Figura 4.

Para fazer a estimativa do fluxo de radiação solar, as modelagens utilizam parametrizações que simulam os processos físicos na atmosfera (PEREIRA, MARTINS, *et al.*, 2006). Essas parametrizações são fundamentadas em dados coletados por satélites ou equipamentos que ficam monitorando na superfície.

Haja vista essa quantidade considerável de energia radiativa solar, são feitas diversas pesquisas nessa linha para se obter o melhor aproveitamento da mesma, transformando essa energia em outra forma, podendo ser elétrica ou mesmo térmica.

2.4 Parede Trombe

Desde épocas remotas o ser humano sempre procurou construir suas moradias com uma certa compatibilidade em relação a fatores climáticos da região. (CAVALVANTE, 2013). Com o passar dos anos o ser humano pode observar que a natureza oferece recursos que podem ser utilizados para benefício próprio, como por exemplo a utilização da energia solar para geração

de energia elétrica e também para a promoção de um conforto térmico em ambientes, que iremos priorizar ao longo do texto.

Nesse sentido o conceito de conforto térmico é definido segundo a (ASHRAE, 2004) como sendo a sensação de bem estar em relação a temperatura que cerca o ser humano em um determinado ambiente. Historicamente o conforto térmico tem uma relação direta com o desenvolvimento tecnológico, sendo esse proporcionado por equipamentos de ar condicionado.

Conforme (RORIZ, 1987) citado por (SUZUKI, 2012), existem fatores climáticos que influenciam na sensação de conforto térmico, que são: temperatura superficial da vedação, temperatura do ar, umidade relativa do ar, adaptação das pessoas ao clima, tipo de roupa usada, metabolismo humano, entre outros fatores. Esses fatores combinados podem trazer uma sensação de bem-estar térmico para qualquer pessoa, daí então podemos dizer que ela se encontra em uma “zona de conforto”.

Outro autor, citado por (SUZUKI, 2012), (GIOVANI, 1976) diz que os principais fatores que afetam no conforto humano em projeto de edificações são: a radiação solar, a radiação emitida pelas superfícies, temperatura e umidade relativa do ar, ventos e chuvas.

Tendo em vista toda essa contextualização, (MENDONÇA, 2005) anuncia que além de sistemas de climatização ativos, ou seja, os sistemas de condicionamento de ar que utilizam meios artificiais para transferência de calor; temos também sistemas de climatização passivos, que são usados para aquecer ou arrefecer um ambiente de forma natural. Assim sendo, soluções sustentáveis para o conforto térmico foram desenvolvidas ao longo dos anos, na qual podemos citar o uso desses sistemas, que utiliza a energia solar, como fonte principal, para promover esta finalidade.

A literatura nos informa que o uso de paredes trombe para o sistema passivo é uma possível solução. Edward S. Morse foi o primeiro a apresentar o conceito desse tipo de edificação em fachadas de residências, na qual patenteou sua invenção em 1881 (SUZUKI, 2012). Essa ideia foi difundida e repatenteada pelo francês Felix Trombe e Jacques Michael em 1967 (BINGGELI, 2003).

Em algumas regiões, onde o clima local pode oferecer sensações de desconforto térmico, provocando assim queda no rendimento de atividades executadas no interior do recinto, além de produzir desperdício de energia podem ser empregadas técnicas em uma edificação que podem amenizar sensações de desconforto. (GIVONI, 1991).

Diante disso a cidade de São Luís tem períodos do ano em que essas sensações podem ser notórias. Ao mesmo tempo em que isso ocorre podemos tirar proveito disso. Na Figura 5 a cidade de São Luís, localiza-se em uma região privilegiada, ou seja, em um território

predominantemente tropical próximo da linha do Equador, na qual possui um índice de radiação solar bastante elevado, não ocorrendo grandes variações durante o dia.

Figura 5 – Incidência da radiação solar no Brasil



Fonte: (PEREIRA, MARTINS, *et al.*, 2006)

Segundo (CAVALVANTE, 2013) o Brasil possui um enorme potencial para o aproveitamento de recursos energéticos solares em todo território nacional, sendo a base para o funcionamento das paredes trombe.

O uso de paredes trombe, como mostrado na Figura 6, detém de um potencial considerável para a promoção do conforto térmico em ambientes, responsável pela ventilação natural, aquecimento solar e inércia térmica (ELSADIG, 2005).

Figura 6 – Construção de uma Parede Trombe na faixa da casa

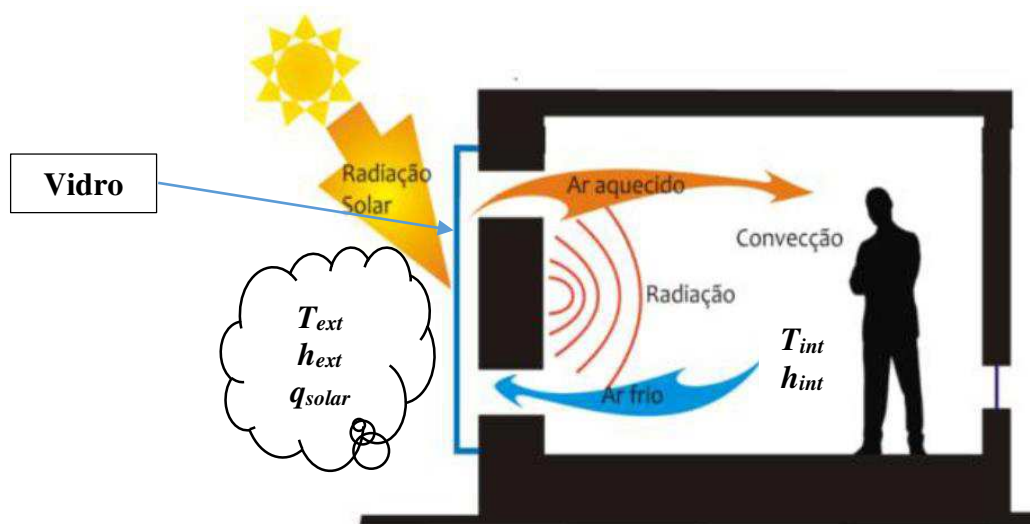


Fonte: <https://br.pinterest.com/pin/463730092850355115/>

A parede trombe tem um funcionamento bem simples. Sendo que pode funcionar tanto para ventilação natural em dias quentes, quanto para aquecimento de ambientes em dias mais frios (CAVALVANTE, 2013). A radiação solar absorvida pelo vidro que constitui a face da parede exterior, permite que a onda de radiação curta transpasse e aumente a temperatura da parede com alta inercia térmica que possui uma alta absorbância. Quando aquecida, a parede com inercia térmica reemite calor para a camara de ar do sistema, gerando “efeito estufa” (CAVALVANTE, 2013).

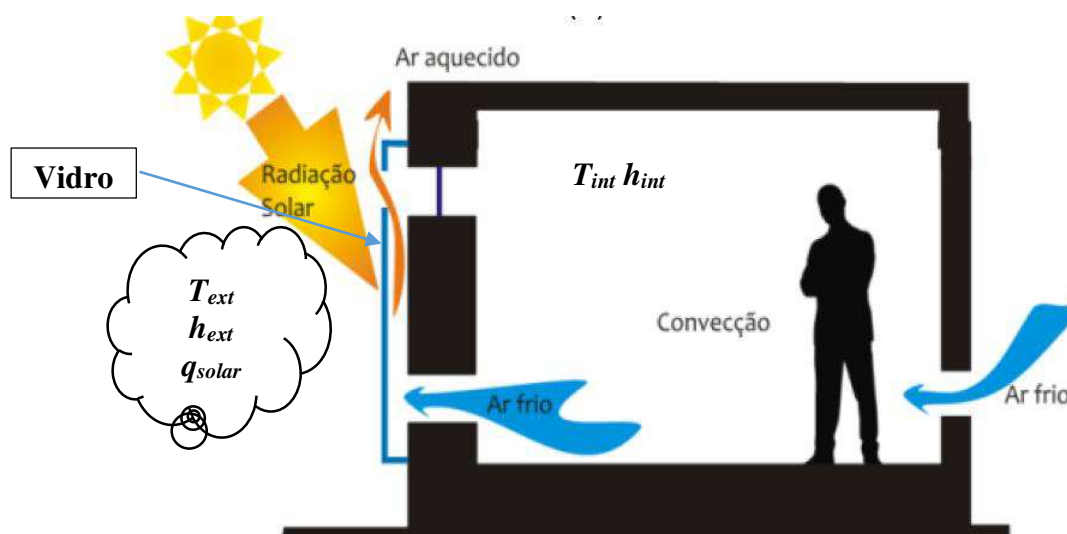
O efeito estufa aumenta por conta da alta absorbância e emissividade que a parede com alta massa térmica apresenta, pois, a radiação de onda longa emitida pela parede, na forma de calor, pode não atravessar o vidro novamente. Com isso o sistema pode acumular calor e liberar para o interior do recinto com o objetivo de aquecer; como também pode liberar calor para o ambiente externo via chaminé propiciando ventilação por convecção no ambiente interno, por meio de aberturas superior e inferior na parede potencializando a termocirculação, como pode ser observado nas Figura 7 e Figura 8, respectivamente (CAVALVANTE, 2013).

Figura 7 – Esquema usado durante o inverno para aquecer



Fonte: (CAVALVANTE, 2013)

Figura 8 – esquema usado durante o verão para ventilação



Fonte: (CAVALVANTE, 2013)

Conforme (ELSADIG, 2005), podemos citar algumas vantagens como:

- O calor é armazenado próximo ao vidro, contribuindo para maior eficiência bem como aproveitamento da radiação solar;
- Atraso térmico através da utilização desse sistema, permitindo a liberação de calor para dentro do recinto em momentos de necessidade, e incremento de ventilação natural em casos aonde é requisitado.

Em contrapartida o mesmo autor apresenta algumas desvantagens em relação a esse sistema:

- Móveis colocadas próximo a parede (internamente) afetam no desempenho;
- Paredes para ventilação devem ser fechadas a noite para evitar o processo inverso

O dimensionamento desse tipo de dispositivo requer o cuidado de alguns aspectos que devem ser levados em consideração:

- Clima, isso porque as perdas de calor dependem da diferença de temperatura interna com a externa;
- Latitude e orientação da edificação, isso porque a energia solar que incide pode variar em função da latitude;
- Escolher o tipo de conforto térmico se de aquecimento ou refrigeração;
- A eficiência do dispositivo pode variar de acordo com fatores internos (espessura da parede e seus materiais, superfície envidraçada bem com a quantidade e dimensões das aberturas).

As trocas térmicas de uma parede trombe depende de alguns fenômenos físicos que estão envolvidos em seu processo. De modo geral os processos de transferência de calor são aquecimento solar passivo (transferência por radiação), inércia térmica do sistema (transferência por condução) e ventilação natural (transferência por convecção) (CAVALVANTE, 2013).

A transferência de calor por radiação ocorre entre corpos com temperaturas diferentes, sem o contato entre ambos e com emissão de ondas eletromagnéticas e sua principal fonte de transmissão é o sol (CAVALVANTE, 2013). Nesse sentido o aproveitamento desse calor para o aquecimento de ambientes é denominado aquecimento solar passivo, sendo aproveitado por meio da construção de paredes trombe.

Além da radiação solar, outro fenômeno que ocorre na parede trombe é a inércia térmica que existe por causa da alta massa térmica da parede. É definida como a capacidade que o material tem de reter no seu interior parte do calor que é conduzido por meio dele, e quanto maior a massa térmica maior será o calor retido. Sendo que ela possui dependência de duas propriedades, difusividade térmica e efusividade térmica. (CORBELLA e YANNAS, 2003) apud (CAVALVANTE, 2013).

Outra forma de transmissão de calor é a convecção natural que aparece em decorrência do efeito chaminé. Esse efeito é gerado por diferenças de temperatura do ar em dois pontos diferentes da edificação. Quando se desloca para cima dentro da parede trombe mantém contato com as superfícies verticais do sistema. Experimentos mostram que o escoamento de um fluido paralelo a uma superfície aderem a ela, é como se a viscosidade do fluido fosse uma cola (PASSOS, 2010)

3 METODOLOGIA

3.1 Apresentação do problema

Para a modelagem da transferência de calor em Paredes Trombe, será considerado o esquema da Figura 9. Neste estudo a Parede Trombe é modelada como uma parede plana composta (mais de um material) para a avaliação numérica da Temperatura e das trocas de calor em regime transiente, submetida as condições ambientais (climáticas) da cidade de São Luís.

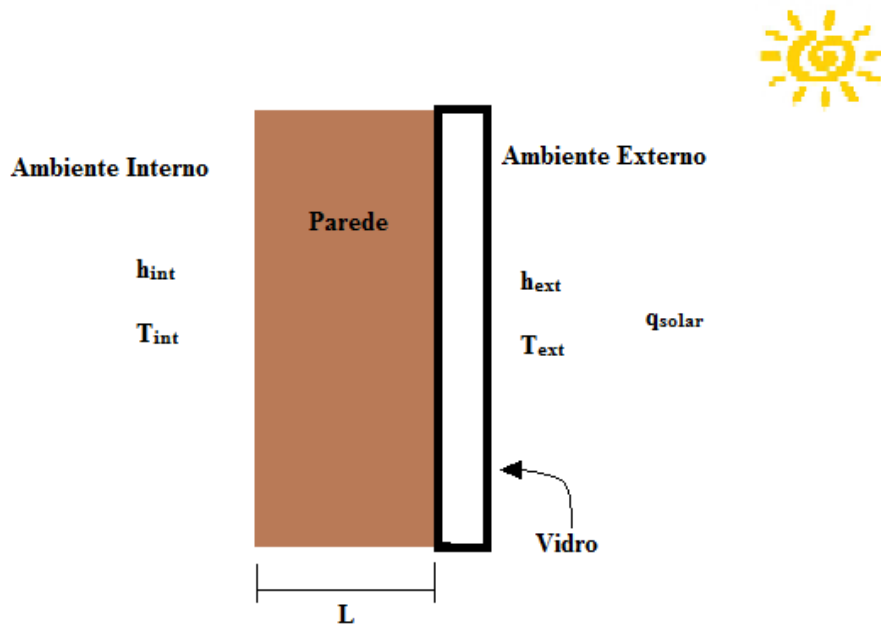
Para a parede foi escolhido um bloco cerâmico (tijolo de 6 furos) conforme (INMETRO, 2013) de espessura $L = 14$ cm, o número de nós será 7, portanto $m = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$; e também segundo a NBR 15220 (2003) o coeficiente de condutividade térmica da parede é de $k = 0,90$ W/m°C, o calor específico da parede é $c = 0,92$ kJ/kg°C e a massa específica da parede é $\rho = 1600$ kg/m³. O vidro escolhido, para compor a edificação, conforme o (INMETRO, 2013), foi um vidro do fabricante CEBRACE modelo *COOL-LITE KNT 164 6 mm* com transmitância a radiação solar de $\tau = 0,447$.

A temperatura interna do ambiente é uma temperatura de projeto, sua escolha é baseada na NBR 6401 (1980) sendo uma temperatura para a época de verão que varia ente 23 e 25 °C, para este estudo é escolhido a temperatura de $T_{int} = 24$ °C , e o coeficiente de convecção interna é escolhido, conforme (NETO, 2010), $h_{int} = 6$ W/m²K. Ainda segundo o mesmo autor o coeficiente de convecção externa será de $h_{ext} = 10$ W/m²K e as temperaturas externas são fornecidas pelo CPTEC/INPE da cidade de São Luís com seus respectivos horários em datas especificas das duas estações do ano mais sensíveis ao ser humano (inverno-verão) mostrado na Tabela 1 aonde serão analisados.

3.1.1 Hipóteses Simplificadoras do Problema

- Transferência de Calor em Regime Transiente;
- Transferência de Calor unidirecional 1D (na direção x);
- A área superficial da parede é muito grande em relação a espessura;
- O coeficiente de condutividade térmica da parede Trombe (k) é constante;
- Os coeficientes de convecção natural do ar interno e externo (h_{int} e h_{ext}) são constantes.

Figura 9 – Esquema da Parede com seus respectivos dados



Fonte: Autor

3.2 Modelagem Numérica

Para a solução deste problema será usada o método explícito das diferenças finitas aplicadas em paredes planas, considerando em 1 dimensão e que a superfície da parede é muito maior do que sua espessura bem como os coeficientes de condutividade térmica da parede e de convecção interna e externa são constantes. A discretização do espaço usa o número de seções $M = m - 1 = 6$ dividido pela espessura da parede:

$$\Delta x = \frac{L}{M} = \frac{14}{6} \therefore \Delta x = 2,33 \text{ cm} \quad (19)$$

Logo o espaçamento nodal para esse problema será de $\Delta x = 2,33 \text{ cm}$.

Como o número de nós é $m = 7$, teremos 5 nós internos, como é mostrado na Figura 10, com $m = 1, 2, 3, 4, 5$ e usando a equação (16) teremos:

$$\text{Para nó 1 } (m = 1): T_1^{i+1} = Fo(T_0^i + T_2^i) + (1 - 2Fo)T_1^i \quad (20)$$

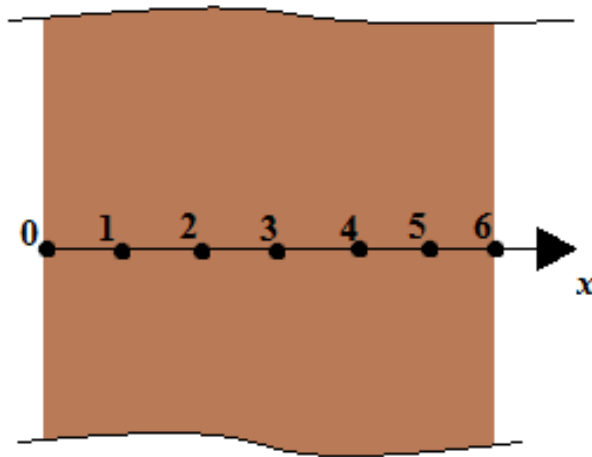
$$\text{Para nó 2 } (m = 2): T_2^{i+1} = Fo(T_1^i + T_3^i) + (1 - 2Fo)T_2^i \quad (21)$$

$$\text{Para nó 3 } (m = 3): T_3^{i+1} = Fo(T_2^i + T_4^i) + (1 - 2Fo)T_3^i \quad (22)$$

$$\text{Para nó 4 } (m = 4): T_4^{i+1} = Fo(T_3^i + T_5^i) + (1 - 2Fo)T_4^i \quad (23)$$

$$\text{Para nó 5 } (m = 5): T_5^{i+1} = Fo(T_4^i + T_6^i) + (1 - 2Fo)T_5^i \quad (24)$$

Figura 10 – Esquematização dos nós e espaçamentos nodais



Fonte: Autor

O nó 0 é a superfície interna, na qual está submetida a convecção natural, por conta disso o nó 0 pode ser obtida diretamente pela equação (17):

$$\text{Para nó 0 } (m = 0): T_0^{i+1} = (1 - 2Fo - 2FoBi_{int})T_0^i + 2FoT_1^i + 2FoBi_{int}T_{int}^i \quad (25)$$

Já para o nó 6 temos que é a superfície externa da parede, que também está submetido a convecção natural e a radiação solar, sua formulação explícita e dada também pela equação (18) com a inserção do anteparo de vidro com transmissividade τ :

Para nó 6 ($m = 6$):

$$T_6^{i+1} = (1 - 2Fo - 2FoBi)T_6^i + 2FoT_5^i + 2FoBiT_{ext}^i + 2Fo \frac{q_{solar}^i \tau \Delta x}{k} \quad (26)$$

3.2.1 Critério da estabilidade do método explícito

Após encontrar as equações de (20) a (26) faz-se necessário determinar o limite superior do passo de tempo (Δt) para a determinação do critério da estabilidade do método para esse problema em especial.

Para isso é necessário identificar o menor coeficiente do sistema de equações. Sabe-se que os nós de contorno (nó 0 e 6) são os mais restritivos que os internos, por isso serão examinados os nós 0 e 6. Substituindo os dados do item 3.1 nas equações (25) e (26), respectivamente, termos:

Para nó 0 ($m = 0$):

$$\begin{aligned} T_0^{i+1} &= \left(1 - 2Fo - 2Fo \frac{h_{int} \Delta x}{k}\right) T_0^i + 2FoT_1^i + 2Fo \frac{h_{int} \Delta x}{k} T_{int}^i \\ &= \left(1 - 2Fo - 2Fo \frac{6(2,33 \times 10^{-2})}{0,90}\right) T_0^i + 2FoT_1^i + 2Fo \frac{6(2,33 \times 10^{-2})}{0,90} T_{int}^i \\ &= (1 - 2Fo - 0,31Fo)T_0^i + 2FoT_1^i + 0,31FoT_{int}^i \\ \therefore T_0^{i+1} &= (1 - 2,31Fo)T_0^i + 2FoT_1^i + 0,31FoT_{int}^i \end{aligned} \quad (27)$$

Para nó 6 ($m = 6$):

$$\begin{aligned} T_6^{i+1} &= \left(1 - 2Fo - 2Fo \frac{h_{ext} \Delta x}{k}\right) T_6^i + 2FoT_5^i + 2Fo \frac{h_{ext} \Delta x}{k} T_{ext}^i + 2Fo \frac{q_{solar}^i \tau \Delta x}{k} \\ &= \left(1 - 2Fo - 2Fo \frac{10(2,33 \times 10^{-2})}{0,90}\right) T_6^i + 2FoT_5^i + 2Fo \frac{10(2,33 \times 10^{-2})}{0,90} T_{ext}^i \\ &\quad + 2Fo \frac{q_{solar}^i \tau \Delta x}{k} \\ &= (1 - 2Fo - 0,51Fo)T_6^i + 2FoT_5^i + 0,51FoT_{ext}^i + 2Fo \frac{q_{solar}^i \tau \Delta x}{k} \end{aligned}$$

$$\therefore T_6^{i+1} = (1 - 2,51Fo)T_6^i + 2FoT_5^i + 0,51FoT_{ext}^i + 2Fo \frac{q_{solar}^i \tau \Delta x}{k} \quad (28)$$

Portanto o coeficiente primário e o mais restritivo pertence ao coeficiente de T_m^0 e comparando entre as equações (27) e (28), temos:

$$(1 - 2,31Fo) < (1 - 2,51Fo) \quad (29)$$

Assim o critério da estabilidade para o problema das Paredes Trombe em São Luís, pode ser expresso:

$$1 - 2,31Fo \geq 0 \therefore Fo \leq \frac{1}{2,31} \approx 0,43 \quad (30)$$

Com o valor de Fo encontrado em (30) podemos encontrar o passo de tempo por meio da equação (8):

$$\begin{aligned} Fo &\leq \frac{1}{2,31} \\ \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} &\leq \frac{1}{2,31} \\ \Delta t &\leq \frac{1}{2,31} \frac{\Delta x^2}{\alpha} = \frac{1}{2,31} \frac{\Delta x^2}{k/\rho c} = \frac{1}{2,31} \frac{\Delta x^2 \rho c}{k} = \frac{1}{2,31} \frac{(2,33 \times 10^{-2})^2 \cdot 1600 \cdot 0,92 \times 10^3}{0,90} \\ \therefore \Delta t &\leq 384,38 \text{ s} \end{aligned} \quad (31)$$

Portanto para qualquer tempo menor que 384,83 s pode ser usado para a análise de transferência de calor em Paredes Trombe na cidade de São Luís. Por conveniência será decidido usar um passo de tempo $\Delta t = 360 \text{ s} = 6 \text{ min}$. Logo o Fo da malha é:

$$Fo = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} = \frac{0,90 \cdot 360}{1600 \cdot 0,92 \times 10^3 \cdot (2,33 \times 10^{-2})^2} \therefore Fo = 0,4054 \quad (32)$$

3.3 Temperaturas nos instantes iniciais para cada período

A princípio são escolhidos o dia 20 e 21 de março, junho, setembro e dezembro (dado da Tabela 1) considerando a que a primeira hora a ser analisada é a partir das 03:00 ($i = 0$) na qual a temperatura varia de forma linear de 24 °C (nó 0) até as respectivas temperaturas iniciais (nó 6) de cada período. Como há 6 espaços nodais ($M = 6$) a variação de temperatura entre os nós vizinhos é dada pelo seguinte:

- Para o Equinócio de outono (março): $(25 - 24)/6 = 0,17$ °C, portanto:

$$T_0^0 = 24 \text{ °C} \quad T_1^0 = 24,17 \text{ °C} \quad T_2^0 = 24,34 \text{ °C} \quad T_3^0 = 24,51 \text{ °C}$$

$$T_4^0 = 24,68 \text{ °C} \quad T_5^0 = 24,85 \text{ °C} \quad T_6^0 = 25 \text{ °C}$$

- Para o Solstício de inverno (junho): $(27,5 - 24)/6 = 0,58$ °C, portanto:

$$T_0^0 = 24 \text{ °C} \quad T_1^0 = 24,58 \text{ °C} \quad T_2^0 = 25,16 \text{ °C} \quad T_3^0 = 25,74 \text{ °C}$$

$$T_4^0 = 26,32 \text{ °C} \quad T_5^0 = 26,90 \text{ °C} \quad T_6^0 = 27,5 \text{ °C}$$

- Para o Equinócio de primavera (setembro): $(26 - 24)/6 = 0,33$ °C, portanto:

$$T_0^0 = 24 \text{ °C} \quad T_1^0 = 24,33 \text{ °C} \quad T_2^0 = 24,66 \text{ °C} \quad T_3^0 = 24,99 \text{ °C}$$

$$T_4^0 = 25,32 \text{ °C} \quad T_5^0 = 25,65 \text{ °C} \quad T_6^0 = 26 \text{ °C}$$

- Para o Solstício de verão (dezembro): $(29 - 24)/6 = 0,83$ °C, portanto:

$$T_0^0 = 24 \text{ °C} \quad T_1^0 = 24,83 \text{ °C} \quad T_2^0 = 25,66 \text{ °C} \quad T_3^0 = 26,49 \text{ °C}$$

$$T_4^0 = 27,32 \text{ °C} \quad T_5^0 = 28,15 \text{ °C} \quad T_6^0 = 29 \text{ °C}$$

3.4 Temperaturas posteriores

Em seguida as temperaturas nodais seguintes em $t = \Delta t = 6 \text{ min}$ (às 03:06) são determinadas pelas equações (20) a (26), com as respectivas substituições do item 3.3, os cálculos são mostradas no APÊNDICE E.

3.5 Calor transferido

O calor transferido da Parede Trombe para o interior da casa durante cada passo de tempo é determinado pela lei de Newton, na qual usamos a temperatura média da superfície interna da parede (nó 0), com isso temos:

$$Q_{PT}^i = h_{int} A \left[\frac{T_0^i + T_0^{i-1}}{2} - T_{int} \right] \Delta t \quad (61)$$

Logo a quantidade de calor transferido no primeiro passo de tempo ($i = 1$) ou após os primeiros 6 minutos em cada período analisado é de:

- Para o Equinócio de outono (março):

$$Q_{PT}^1 = h_{int} A \left[\frac{T_0^1 + T_0^0}{2} - T_{int} \right] \Delta t = 6 \cdot 1 \cdot \left[\frac{24,13 + 24}{2} - 24 \right] 360$$

$$\therefore Q_{PT}^1 = 140,4 J \quad (62)$$

- Para o Solstício de inverno (junho):

$$Q_{PT}^1 = h_{int} A \left[\frac{T_0^1 + T_0^0}{2} - T_{int} \right] \Delta t = 6 \cdot 1 \cdot \left[\frac{24,47 + 24}{2} - 24 \right] 360$$

$$\therefore Q_{PT}^1 = 507,6 J \quad (63)$$

- Para o Equinócio de primavera (setembro):

$$Q_{PT}^1 = h_{int} A \left[\frac{T_0^1 + T_0^0}{2} - T_{int} \right] \Delta t = 6 \cdot 1 \cdot \left[\frac{24,26 + 24}{2} - 24 \right] 360$$

$$\therefore Q_{PT}^1 = 280,8 J \quad (64)$$

- Para o Solstício de verão (dezembro):

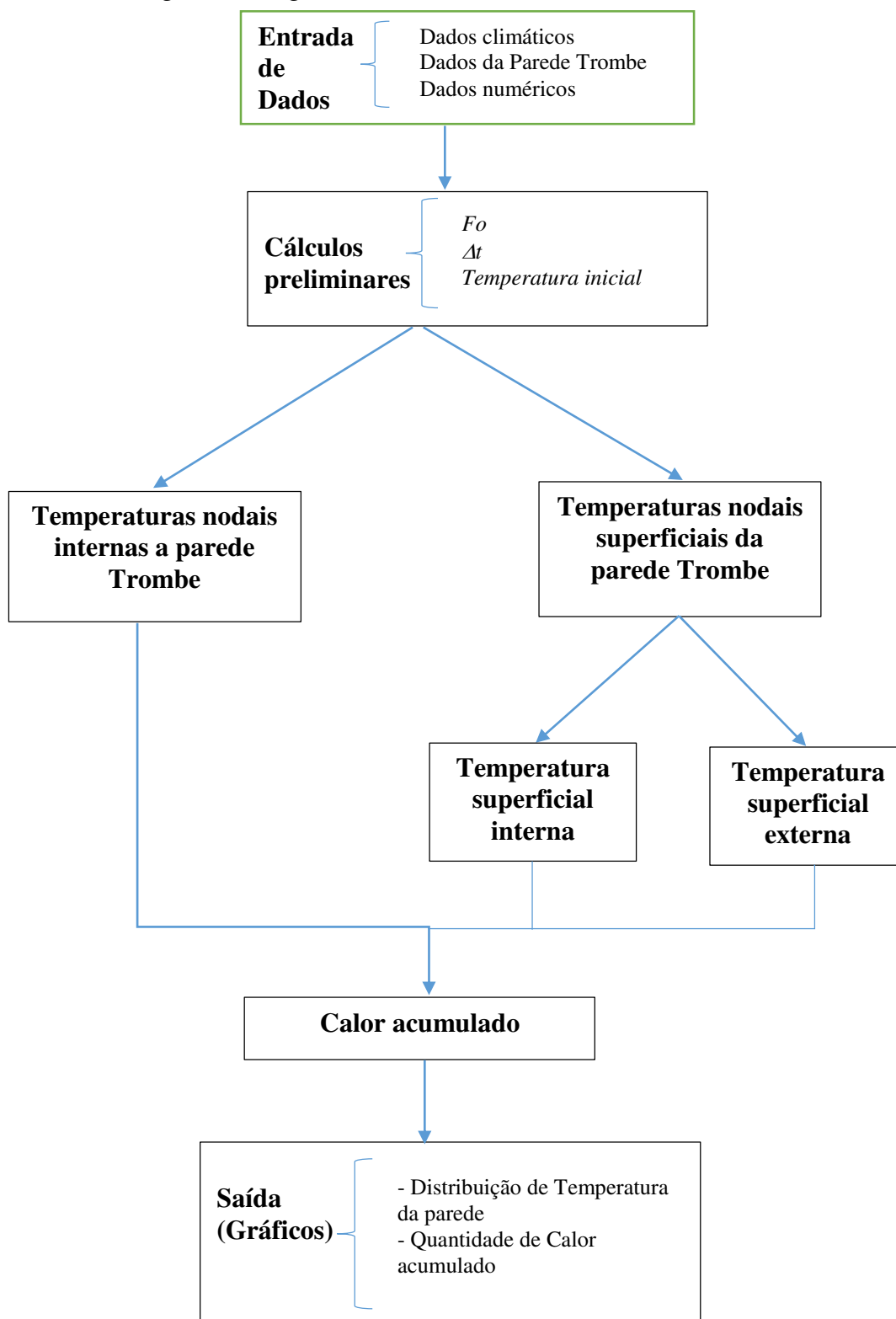
$$Q_{PT}^1 = h_{int} A \left[\frac{T_0^1 + T_0^0}{2} - T_{int} \right] \Delta t = 6 \cdot 1 \cdot \left[\frac{24,67 + 24}{2} - 24 \right] 360$$

$$\therefore Q_{PT}^1 = 723,6 J \quad (65)$$

Por meio de um código criado no Matlab, na qual é apresentado o fluxograma na figura 11, poderemos observar os comportamentos da distribuição de temperaturas em regime transiente nos períodos de equinócio de outono (20 e 21 de março), solstício de inverno (20 e

21 de junho), equinócio de primavera (22 e 23 de setembro) e solstício de verão (20 e 21 de dezembro) da cidade de São Luís no hemisfério sul.

Figura 11 – Fluxograma do algoritmo em Matlab



Fonte: Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme a apresentação da modelagem do problema podemos verificar que a medida em que o tempo passa as temperaturas nodais se comportam de tal forma que a zona de conforto para o ser humano se torna inviável para a permanência em um ambiente interno.

Em contrapartida observa-se com a análise dos resultados gráficos, mostrados a seguir, na proporção em que se modifica a espessura da Parede Trombe seu desempenho térmico para o conforto do ambiente se torna mais vantajoso em relação as trocas térmicas, ou seja, quanto mais espessa for a parede Trombe mais tempo a temperatura de projeto ($T_{int} = 24$ °C) será mantida.

Como já citado na seção 2.4, a inércia térmica da parede Trombe tem como objetivo reter no seu interior parte do calor que é conduzido. (CORBELLA e YANNAS, 2003) apud (CAVALVANTE, 2013).

A primeira simulação numérica é feita com a espessura de 14 cm para as respectivas temperaturas externas em cada estação do ano na cidade de São Luís. Posteriormente é feita uma nova simulação numérica com a mudança de espessura, de 30 cm para as respectivas temperaturas externas em cada estação do ano em São Luís, sendo que essa espessura é fictícia.

Com a construção de um algoritmo em Matlab podemos observar como a temperatura se comporta na parede ao longo de dois dias em cada estação do ano, isso é mostrado nos resultados gráficos a seguir.

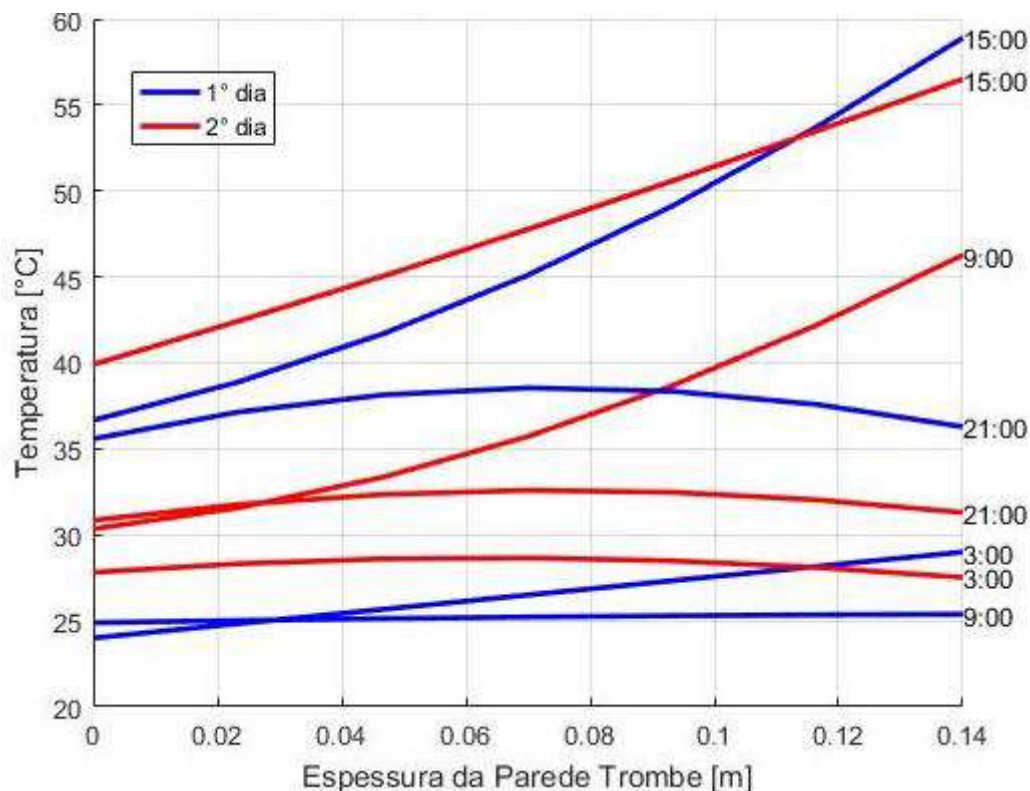
- Equinócio de outono

No período do equinócio de outono temos temperaturas consideradas um pouco elevadas em São Luís, podendo chegar até 31 °C como foi mostrado na tabela 1. A medida em que o tempo passa essas temperaturas podem variar bastante entre 26 e 31 °C. Em uma parede normal a temperatura interna varia juntamente com a temperatura externa, isso quer dizer que se durante o dia as temperaturas externas forem muito elevadas e a noite essas temperaturas forem muito baixas ou até elevadas (em relação a temperatura de conforto) as temperaturas internas acompanham as variações da temperatura externa causando uma zona de desconforto térmico para o ser humano.

Já em uma parede Trombe, que faz parte desse estudo, a temperatura interna sofre algumas variações ao longo do dia, porém essas variações podem ser muito elevadas ou não, isso vai depender da espessura da parede, nesse primeiro momento é usada uma parede de 14

cm de espessura. Utilizando as temperaturas externas do Equinócio de outono com as respectivas radiações solares inseridas no algoritmo temos o seguinte resultado como é apresentado na figura 12.

Figura 12 – Distribuição de temperatura da parede Trombe de 14 cm Equinócio de outono



Fonte: Autor

A figura 12 mostra como a temperatura interna se comporta, sendo que a temperatura interna é a mesma do nó 0, para a espessura de 14 cm podemos perceber que a temperatura do ambiente interno no 1º dia chega a temperatura por volta de 36 °C, isso ocorre por conta da energia solar absorvida pela superfície externa durante o dia. Já no nó 6 que representa a parte externa da parede sobe de 27 para 58,9 °C as 15:00 por causa da absorção da energia solar, mas as 21:00 a temperatura diminui por conta da perda de calor já no início da noite.

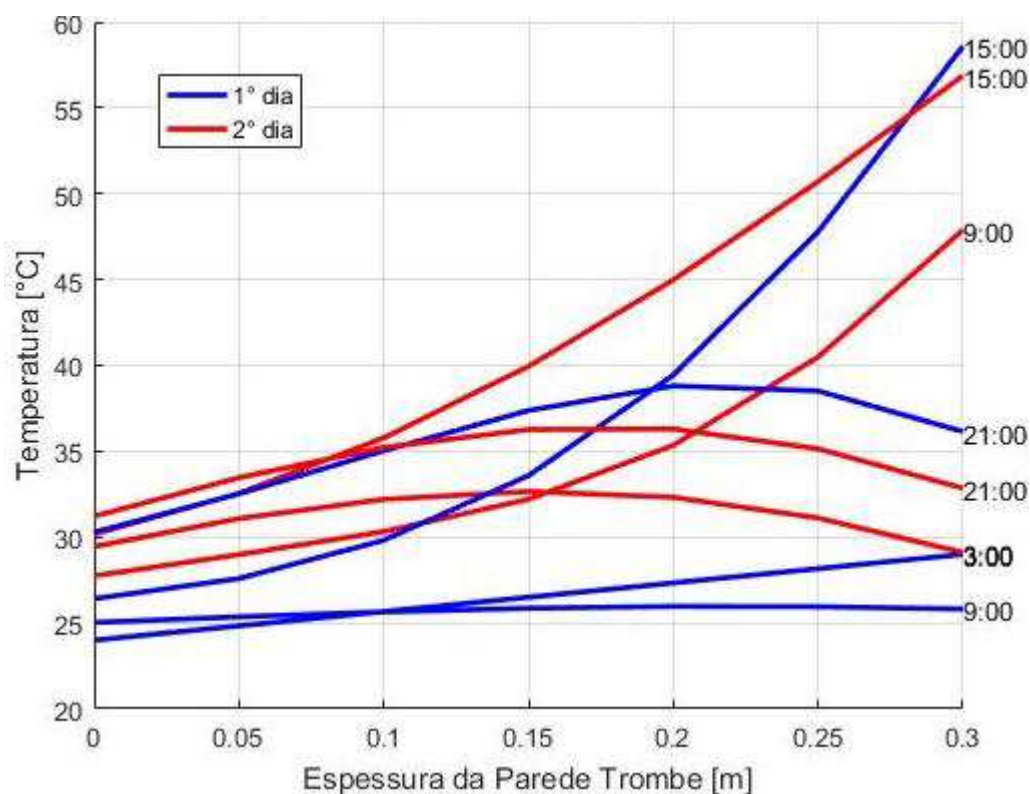
No primeiro instante da análise as 03:00 do dia 20 de março de 2016 (1º dia) a temperatura ao longo da parede Trombe varia linearmente, hipótese considerada no início da modelagem, 6 horas depois às 09:00 a temperatura continua variando linearmente, já nas próximas 6 e 9 horas às 15:00 e às 21:00, respectivamente, não variam linearmente, a temperatura externa porém o comportamento da temperatura ao longo da parede Trombe não está condizente com a temperatura de projeto estabelecida, ou seja, a temperatura do ambiente

interno vai ficar em torno dos 36 °C no fim do dia 20 de março, a essas condições de temperatura gera uma sensação muito desconfortante para o usuário.

No 2º dia podemos observar que as temperaturas internas são mais elevadas por conta da absorção da energia solar do 1º dia, no entanto por volta das 21:00 do 2º dia a temperatura interna tende a ser menor que a do 1º dia.

Esso comportamento acontece em decorrência da espessura de 14 cm, pois sua inércia térmica é baixa, agora para uma parede de espessura maior sua inércia térmica se torna mais elevada usando uma espessura de 30 cm para a parede Trombe em estudos temos a figura 13.

Figura 13 – Distribuição de temperatura da parede Trombe de 30 cm Equinócio de outono

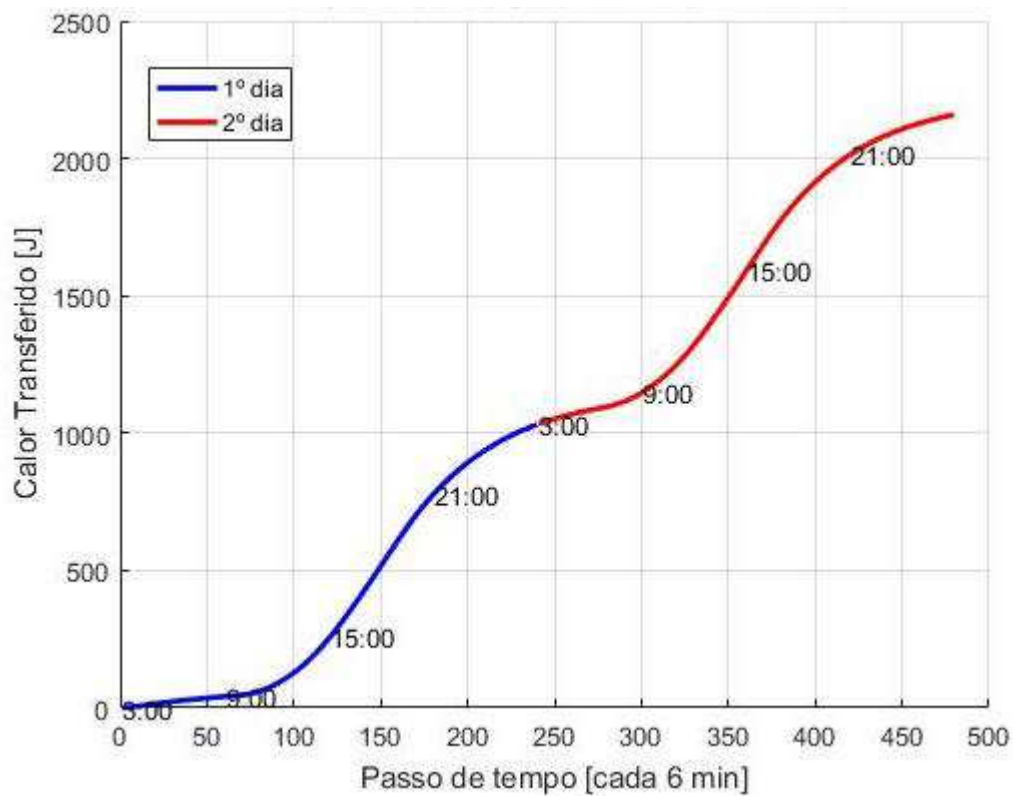


Fonte: Autor

Por meio da figura 13 podemos notar que a temperatura interna tanto no 1º quanto no 2º dia as temperaturas são mais baixas porém ainda não estão em uma zona de conforto térmico adequado. Nota-se que a temperatura superficial externa é a mesma as 03:00 do 1º e 2º dia, isso acontece por conta das perdas de calor da parede para o ambiente externo durante esse período. Isso confirma o que (BIANCO, 2016) afirma, quando ele fala que quanto maior for a massa térmica, maior será o a quantidade de calor a ser armazenado na parede Trombe. O calor

transferido pela parede Trombe de 14 cm para o ambiente interno pode ser observado pela figura 14.

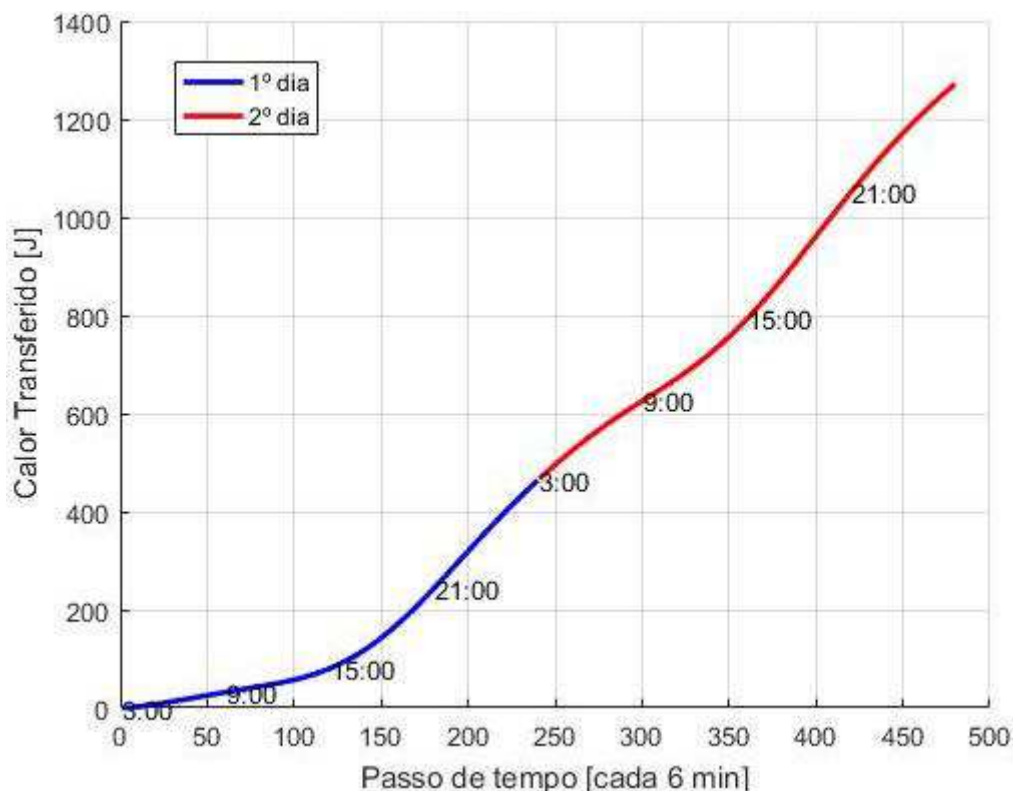
Figura 14 – Calor transferido pela parede Trombe de 14 cm Equinócio de outono



Fonte: Autor

Nota-se dessa figura que a parede Trombe irá ceder cerca de 1000 J para o ambiente interno durante o 1º dia e continuará cedendo no 2º dia, por isso que as temperaturas internas mostradas na figura 12 são elevadas.

Figura 15 – Calor transferido pela parede Trombe de 30 cm Equinócio de outono



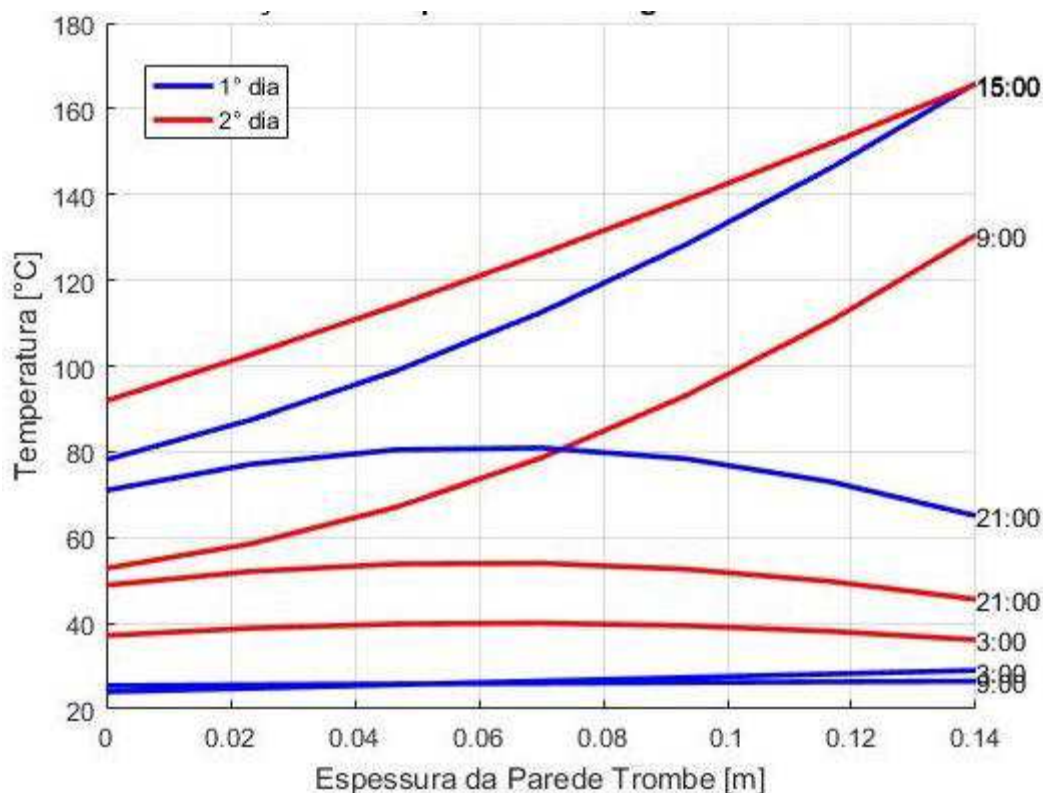
Fonte: Autor

A figura 15 mostra uma redução da transferência de calor da parede para o ambiente interno, nota-se também que a curva tende a assumir um comportamento linear. No 1º dia observa-se que a quantidade de calor transferido é próxima de 500 J para a sala, uma redução de 50 %, justamente por conta da inércia térmica aumentada na parede Trombe.

- Solstício de inverno

Durante o período do Solstício de inverno, assim como no período do Equinócio de outono, as temperaturas na cidade de São Luís podem chegar a 31 °C porem a diferença é que a incidência de raios solares são bem maior, fazendo com que a sensação térmica seja bem mais desconfortante para as pessoas. Com o uso das temperaturas externas e das respectivas radiações solares da tabela 1 temos os seguintes resultados para esse período do ano.

Figura 16 – Distribuição de temperatura da parede Trombe de 14 cm Solstício de inverno

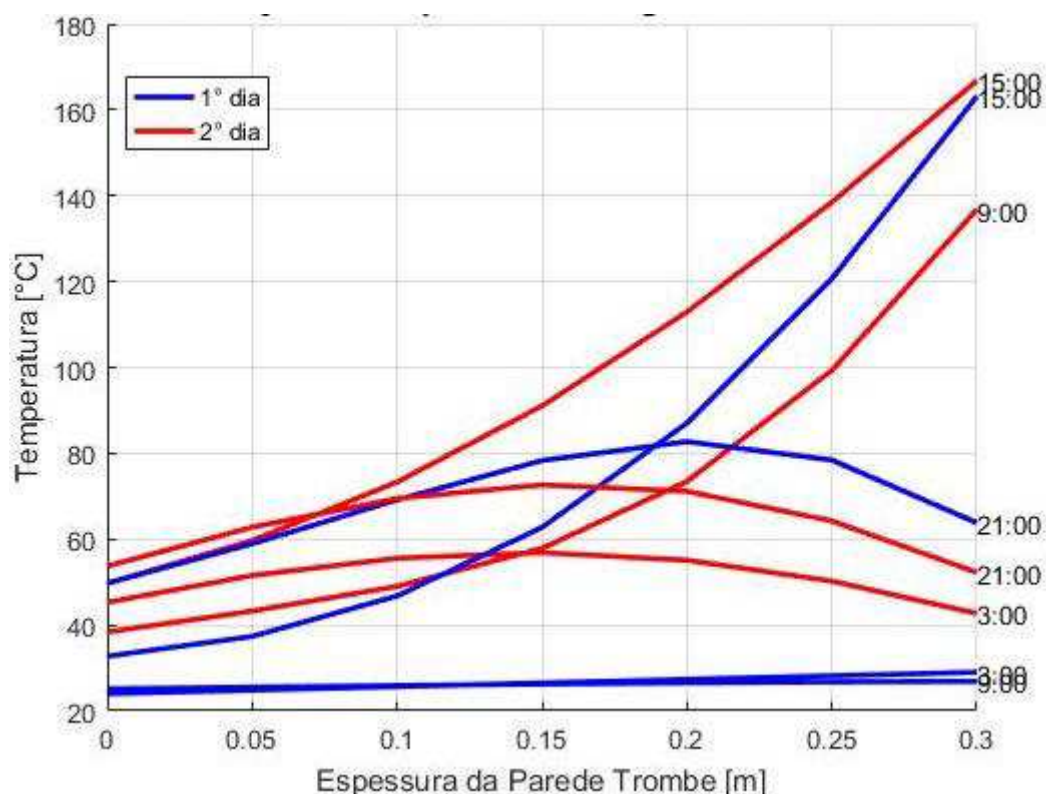


Fonte: Autor

Pode-se verificar a partir do gráfico da figura 16 que as 09:00 do 1º dia temperatura interna encontra-se em uma faixa aceitável do ponto de vista da zona de conforto térmico, 6 horas após às 15:00 observa-se um comportamento da temperatura interna, que é inaceitável, pois chega próximo de 80 °C. Tal situação é prevista justamente por conta da radiação solar ser muito mais alta do que nos outros períodos do ano. Embora as 21:00 do mesmo dia a temperatura reduza, por conta das trocas térmicas, ainda sim é uma temperatura muito elevada para o ser humano. Tal comportamento descrito concorda com o que (SUZUKI, 2012) afirma.

No 2º dia as temperaturas internas estão muito mais elevadas do que no 1º dia, esse fenômeno ocorre por causa da grande absorção de energia solar que é difundida pela parede, ver-se que as 09:00 a temperatura externa fica em torno de 130 °C, mas as 21:00 próximo de 45 °C essa temperatura cai para. Uma forma de melhorar essas condições da parede Trombe durante esse período é aumentar a espessura da parede Trombe, como é mostrado na figura 18.

Figura 17 – Distribuição de temperatura da parede Trombe de 30 cm Solstício de inverno

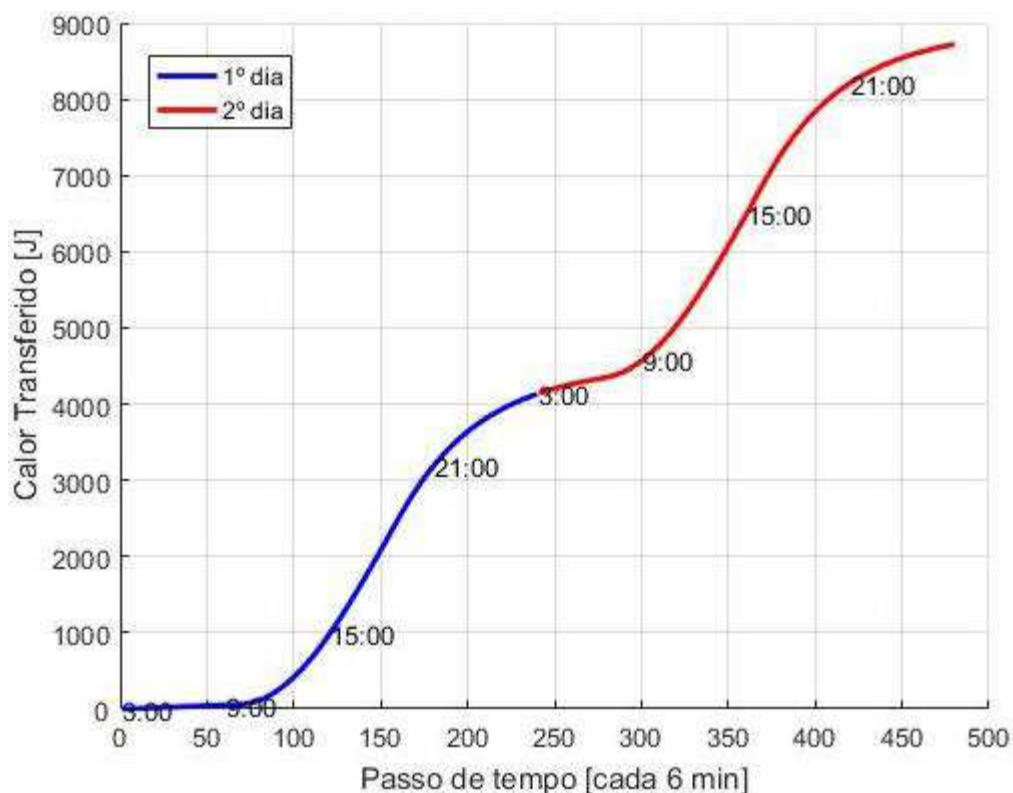


Fonte: Autor

O gráfico da figura 17 mostra a distribuição de temperatura de uma parede Trombe de 30 cm de espessura, podemos perceber que as temperaturas internas do 1º dia reduziram bastante. As 15:00 do 1º dia da figura 16 com 80 °C para 35 °C no mesmo horário da figura 17, uma redução de aproximadamente 56% com um pouco mais que o dobro da espessura da parede Trombe.

Podemos perceber também que ao fim de cada dia as 21:00 as temperaturas externas reduzem uma em relação a outra, no 1º dia as 21:00 encontra-se a uma temperatura de aproximadamente 62 °C, já no segundo dia está por volta de 50 °C, essa redução se dá por conta da perda de calor para o ambiente externo, isso mostra que nos próximos dias a temperatura irá reduzir ainda mais.

Figura 18 – Calor transferido pela parede Trombe de 14 cm Solstício de inverno

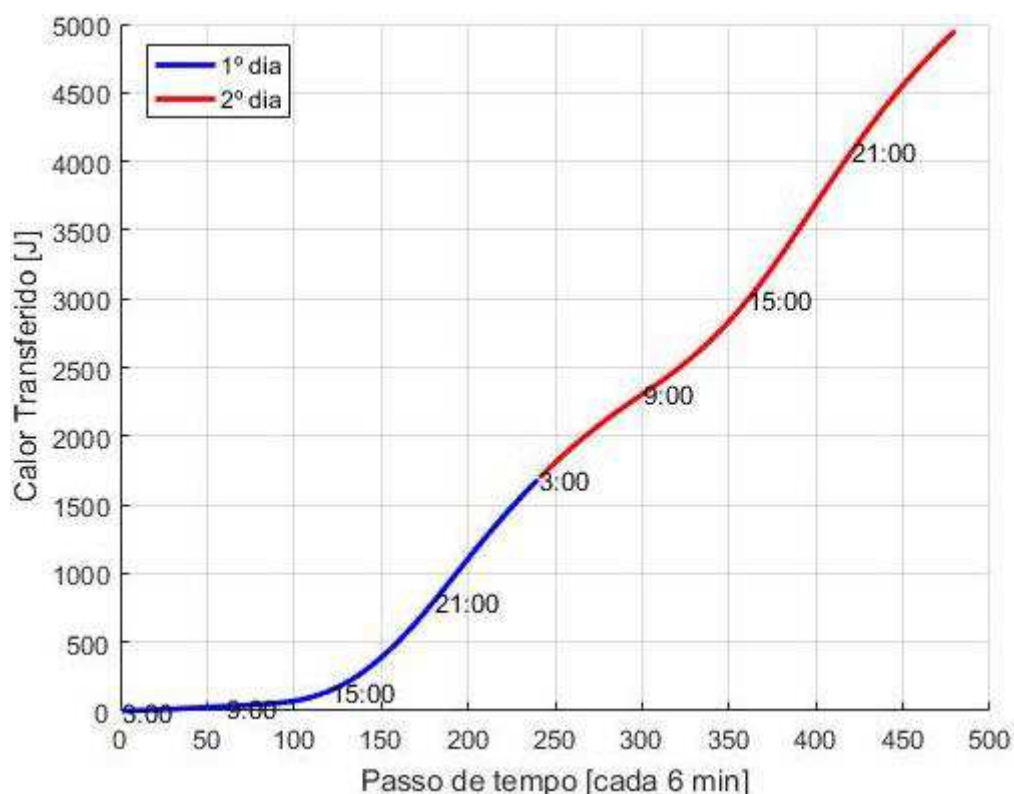


Fonte: Autor

O gráfico da figura 18 apresenta os ganhos de calor acumulado da parede Trombe no Solstício de inverno, podemos observar que ao longo do 1º dia os ganhos de calor acumulado podem chegar em torno dos 4000 J para uma parede Trombe de 14 cm e no 2º dia próximo dos 8800 J. Essas quantidades de calor são transferidas para o interior da casa o que torna seu ambiente cada vez mais desconfortável.

Agora usado uma parede com a configuração de 30 cm de espessura temos o resultado apresentado a seguir na figura 20.

Figura 19 – Calor transferido pela parede Trombe de 30 cm Solstício de inverno



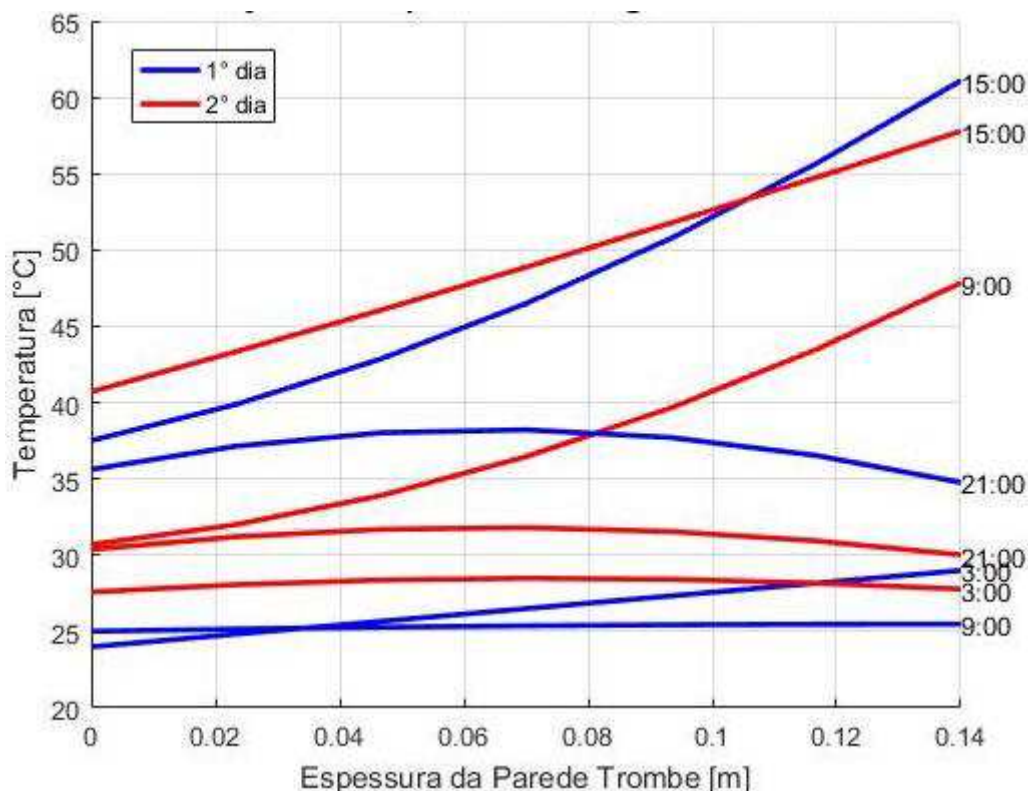
Fonte: Autor

O gráfico da figura 19 mostra que com uma espessura de 30 cm o calor acumulado da parede houve uma redução do calor ao longo dos dois dias. É interessante observar que ao longo do 1º dia o ganho foi de aproximadamente 1700 J, por outro lado o ganho de calor no 2º dia foi em torno de 3300 J, na qual a figura 20 mostra um ganho de calor acumulado no fim do 2º dia de quase 5000 J. Esse reflexo do excessivo ganho de calor no 2º dia se dá por conta da elevada radiação solar em relação ao 1º dia desse período.

- Equinócio de primavera

No período de Equinócio de primavera as temperaturas podem chegar a 30 °C, porem com radiações solares menores em relação ao período de Solstício de inverno. A figura 23 mostra a distribuição de temperaturas ao longo de uma parede Trombe de 14 cm de espessura.

Figura 20 – Distribuição de temperatura da parede Trombe de 14 cm Equinócio de primavera

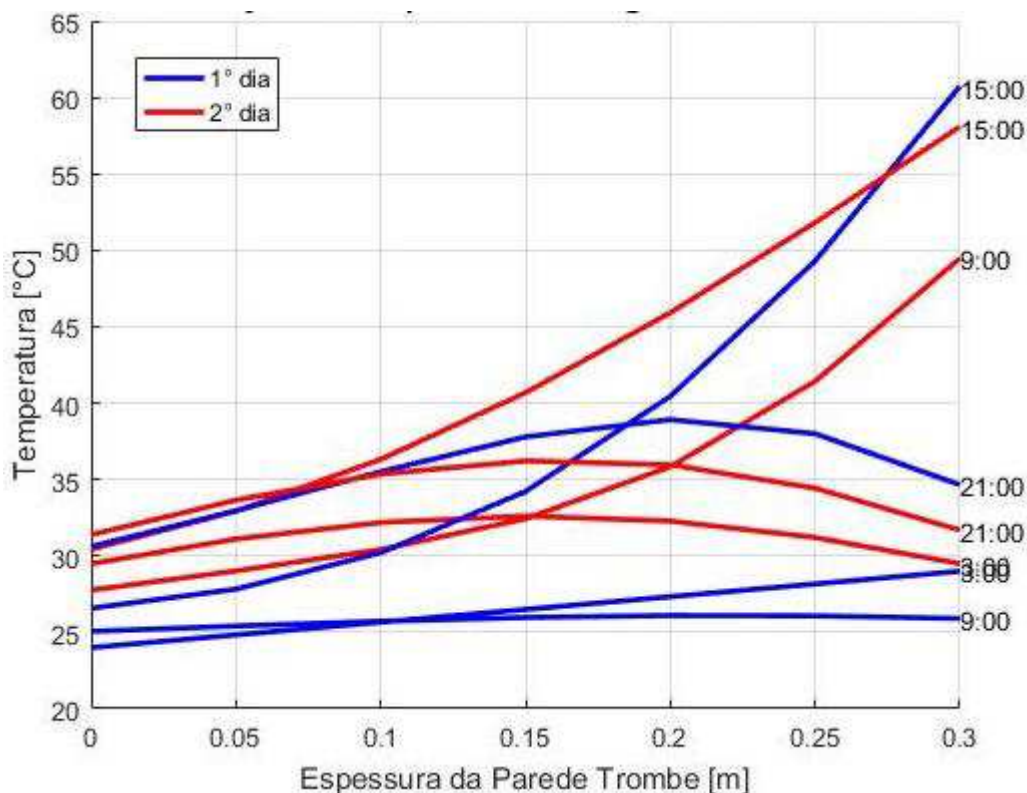


Fonte: Autor

O gráfico da figura 20 mostra que as temperaturas internas ao longo do 1º dia variando da temperatura da zona de conforto (24 °C), as 09:00, até a temperatura de 37,5 °C as 15:00, porem no fim do dia as 21:00 essa temperatura cai para próximo de 35 °C, essa redução na temperatura ocorre por conta das perdas de calor no início da noite no 1º dia.

No 2º dia as 09:00 a temperatura interna está menor do que no mesmo horário do 1º dia, em torno de 31 °C, em contra partida com o passar do tempo por volta de 15:00 a temperatura interna chega a alcançar 41 °C devido aos ganhos de calor no decorrer do dia e por volta das 21:00 a temperatura interna cai para 31 °C. Essas temperaturas são comuns para uma parede com baixa inercia térmica, como é o caso da parede Trombe de 14 cm.

Figura 21 – Distribuição de temperatura da parede Trombe de 30 cm Equinócio de primavera



Fonte: Autor

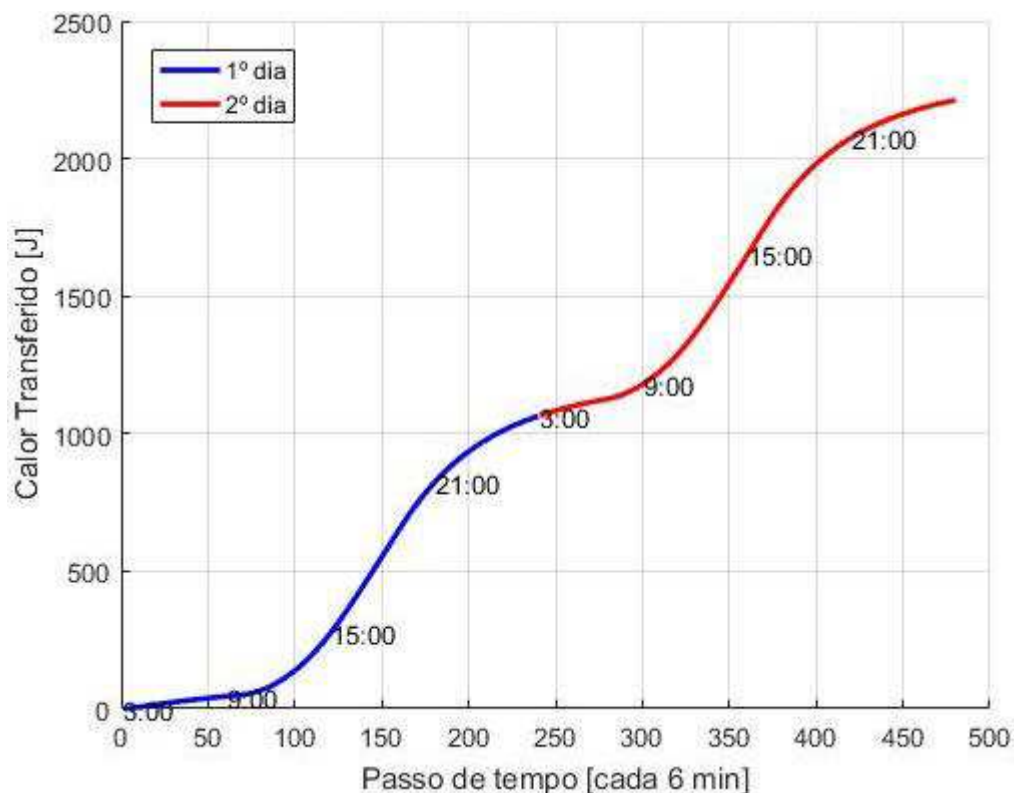
A figura 21 mostra claramente que com o aumento da espessura da parede Trombe a temperatura interna se aproxima cada vez mais da temperatura da zona de conforto térmica. Com esse resultado podemos perceber que a temperatura máxima entre o 1º e o 2º dia é de aproximadamente 32 °C. Verifica-se também que no 1º dia a temperatura externa vai de 61 °C as 15:00 até 34 °C as 21:00, esse comportamento acontece em decorrência da energia solar absorvida e difundida ao longo da parede pela superfície externa.

As 09:00 do dia seguinte (2º dia) a temperatura externa encontra-se por volta de 50 °C, esse aumento de temperatura se dá por conta dos ganhos de calor bem como acontece as 15:00 chegando a uma temperatura de 58 °C.

Mesmo com essas temperaturas apresentadas, o importante de ponto de vista do conforto térmico é que a temperatura interna pode se aproximar da temperatura de projeto estabelecida no início da modelagem (item 3.1).

Dessa forma são apresentados os resultados gráficos do acumulo de calor ao longo do 1º e 2º para as respectivas espessuras no período de Equinócio de primavera.

Figura 22 – Calor transferido pela parede Trombe de 14 cm Equinócio de primavera

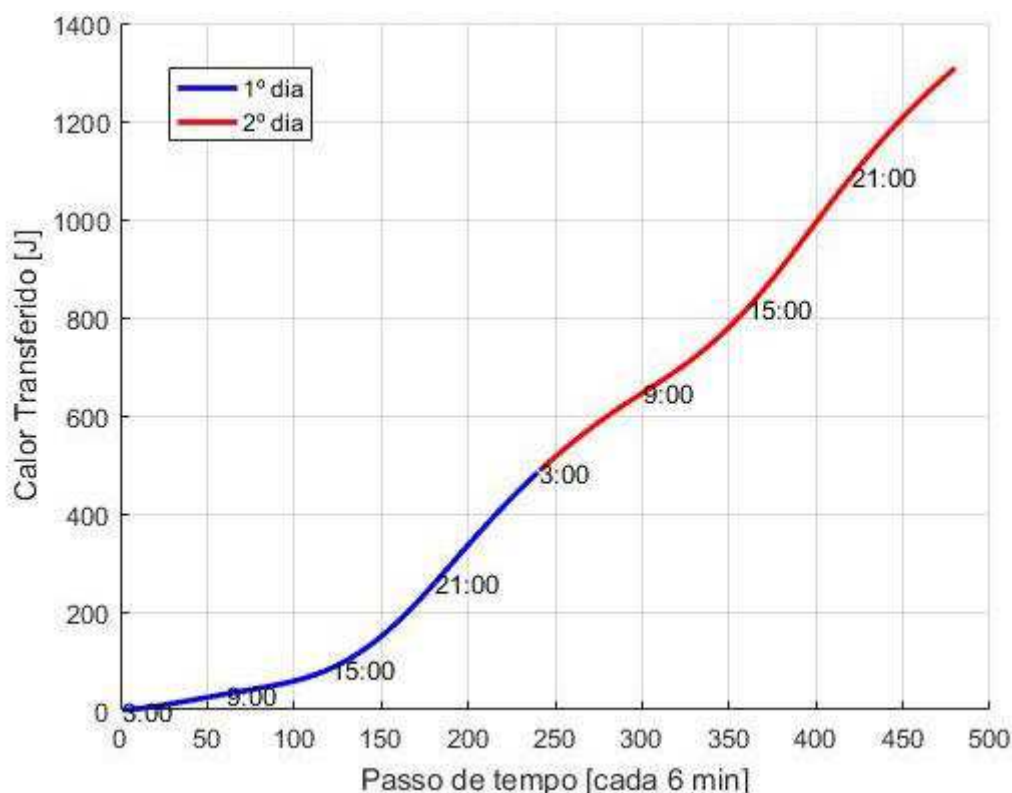


Fonte: Autor

Nesse período, durante as 6 primeiras horas do 1º dia os ganhos de calor entre a superfície interna (nó 0) da parede Trombe e o ambiente interno é muito pouca, no entanto no decorrer do dia a figura 22 mostra que os ganhos de calor chegam a pouco mais que 1000 J, sendo que no início da noite (onde não há radiação solar) os ganhos de calor tendem a se comportar como no início do dia (entre as 03:00 e 09:00).

No 2º dia o comportamento dos ganhos de calor são semelhantes ao do 1º dia, porém com uma pequena ascendência na curva, como mostrado na figura 21, isso ocorre por conta da energia solar absorvida no dia anterior. Os ganhos de calor ao longo do 2º dia é de aproximadamente 1225 J, totalizando ao longo do período em análise um acúmulo de calor 2225 J para uma parede Trombe de 14 cm.

Figura 23 – Calor transferido pela parede Trombe de 30 cm Equinócio de primavera



Fonte: Autor

A figura 23 mostra uma redução do calor acumulado da parede Trombe com uma espessura de 30 cm. Nas primeiras 6 horas (1º dia) é observado que os ganhos de calor são muito pouco ascendentes pelo mesmo motivo discutido anteriormente, porém ao longo do dia os ganhos de calor acumulado pode chegar a 500 J.

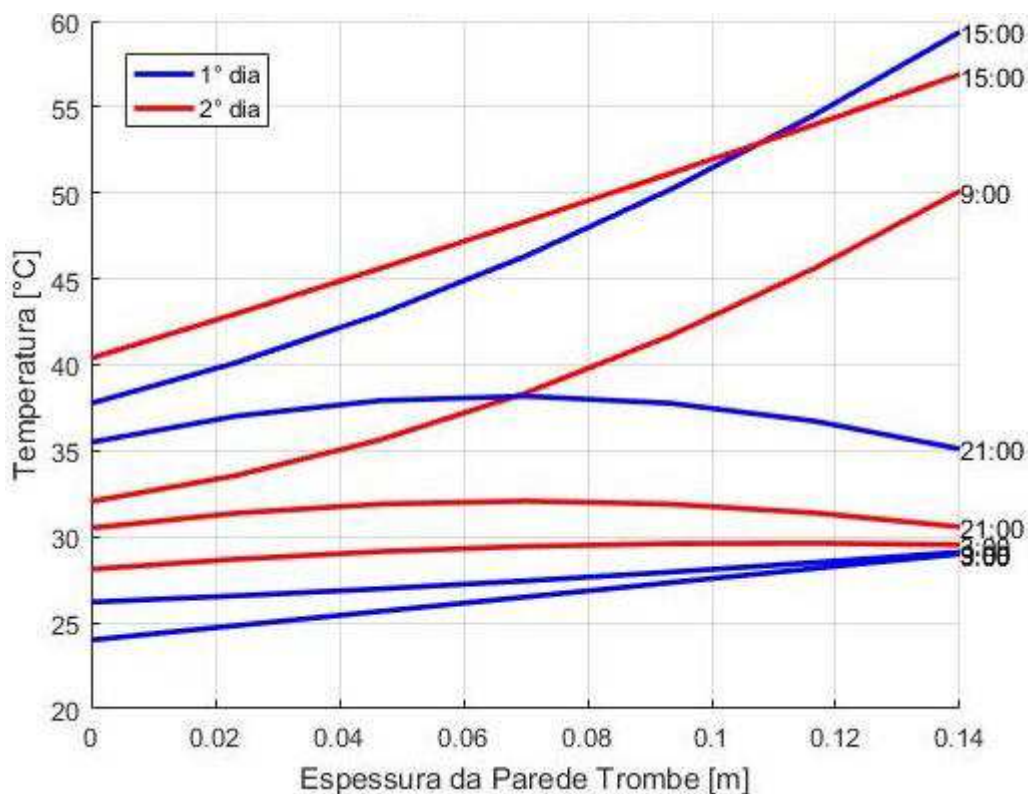
Já no 2º dia, nas primeiras 6 horas os ganhos de calor já são mais ascendentes, tendendo a uma certa linearidade, e ao longo do segundo dia é proporcionado um ganho de calor de aproximadamente 800 J.

Durante o período em análise os ganhos de calor acumulado chegam por volta de 1300 J, isso reflete em uma redução dos ganhos de calor internos do ambiente de cerca de 58,4% com um aumento da espessura da parede Trombe de 14 cm para 30 cm.

- Solstício de verão

No período do Solstício de verão as temperaturas horarias da cidade de São Luís podem chegar a máxima de 31,5 °C como mostrado na tabela 1, porem esse é o período ano em que a incidência de radiação solar é a menor. A partir disso podemos observar os seguintes resultados baseados na simulação numérica.

Figura 24 – Distribuição de temperatura da parede Trombe de 14 cm Solstício de verão

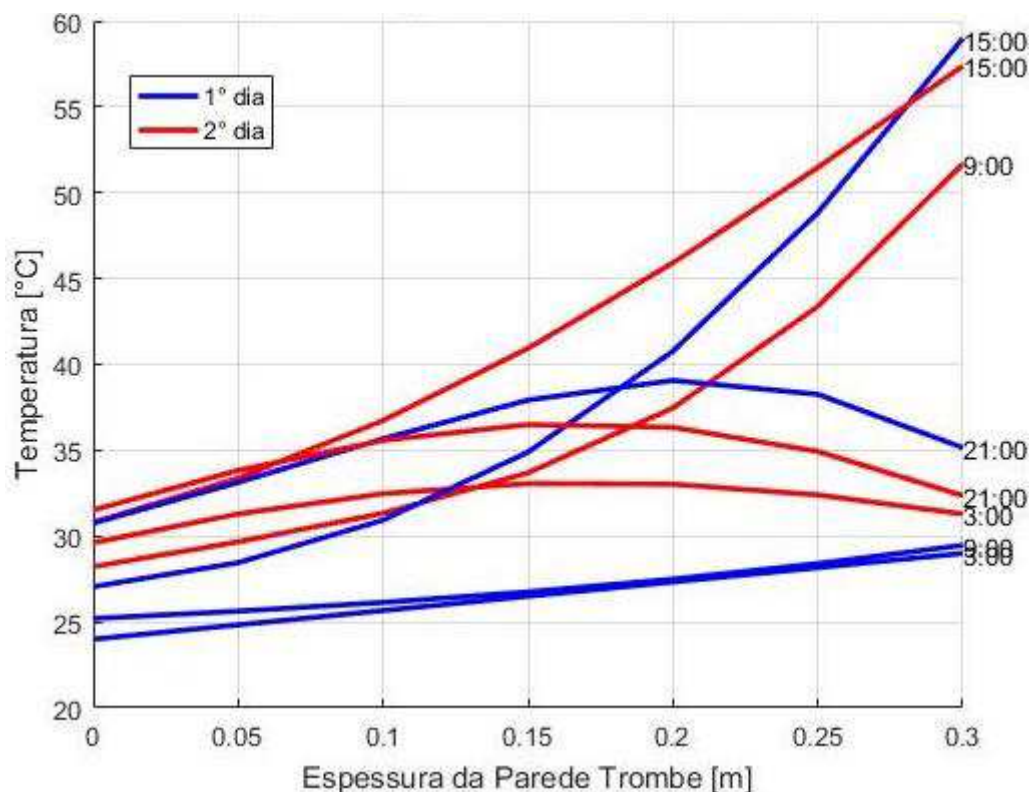


Fonte: Autor

A figura 24 mostra como a temperatura se comporta ao longo da parede Trombe de 14 cm de espessura no período analisado. No 1º dia a temperatura interna chega a máxima de 37,5 °C às 15:00, porém às 21:00 essa temperatura cai para 35,5 °C, por conta das perdas de calor. As temperaturas externas já chegam em torno de 31 °C às 15:00 pelo fato de a temperatura do ambiente externo estar a 31 °C bem como o efeito da radiação.

No 2º dia por conta da energia térmica (energia solar) armazenada pela parede Trombe, as temperaturas internas são mais elevadas até certo momento do dia. Verifica-se que às 09:00 a temperatura interna é de 32,5 °C cerca de 6,5 °C a mais que no mesmo horário do dia anterior e às 15:00 a temperatura interna chega a 40,5 °C cerca de 5 °C a mais que no mesmo horário do dia anterior, em contrapartida às 21:00 a temperatura interna é 31,5 em torno de 5 °C menor que no mesmo horário no dia anterior, isso acontece em decorrência da perda de calor. Já as temperaturas externas não seguem o mesmo padrão por estarem expostas a radiação solar em alguns momentos do dia e em outros não.

Figura 25 – Distribuição de temperatura da parede Trombe de 30 cm Solstício de verão



Fonte: Autor

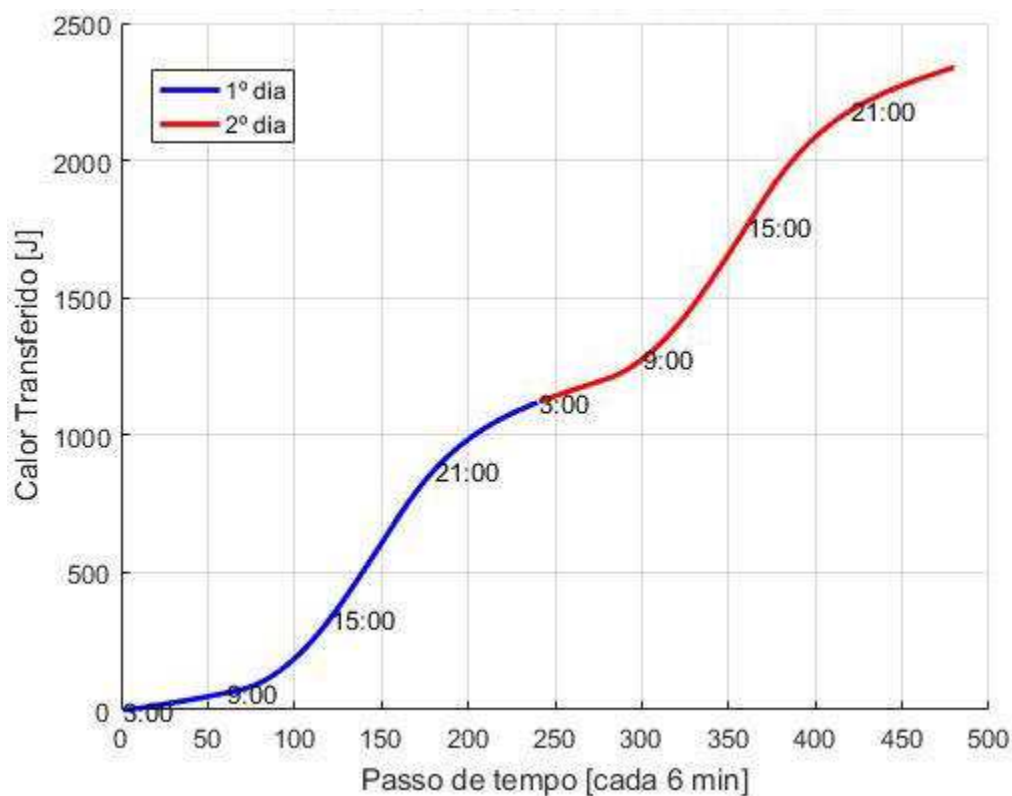
Já a figura 25 mostra a distribuição de temperatura para o mesmo período analisado com uma espessura modificada para 30 cm. Ela mostra que ao longo dos dois dias a temperatura máxima chega a 32 °C, cerca de 7,5 °C menor que com a parede Trombe de 14 cm. Podemos perceber, na figura 30, que no 1º dia que as temperaturas internas são menores devido ao aumento da inércia térmica da parede Trombe, por volta de 09:00 a temperatura aumenta para 25 °C, efeito da radiação solar, mas essa temperatura é menor do que com a parede Trombe de 14 cm, as 15:00 a temperatura interna encontra-se a cerca de 27,5 °C, porém nota-se que as 21:00 a temperatura interna sobe para 31,5 °C devido aos ganhos de calor (energia solar). Já as 15:00 a temperatura externa que encontra próximo de 59 °C sofre um decaimento ao passo em que a noite cega, por volta das 21:00 a temperatura externa desce para 35 °C devido às perdas de calor para o ambiente.

No 2º dia verifica-se que as temperaturas internas são um pouco mais elevadas em relação ao do 1º dia, devido aos ganhos de calor (energia armazenada durante a noite) porém as temperaturas externas em certo momento do dia são menores em relação aos mesmos

momentos do 1º dia. Da figura 30 observamos que as 09:00 a temperatura interna está em 28 °C e ao longo do 2º dia essa temperatura aumenta, as 15:00 a temperatura interna encontra-se a 31 °C, porem a noite as 21:00 a temperatura interna sobe 1 °C, chegando a temperatura máxima do período analisado de 32 °C.

Mesmo com essas temperaturas internas consideradas elevas para a parede Trombe de 30 cm, as temperaturas externas tem uma pequena redução em alguns momentos do 2º dia, mas também tem aumento. As 09:00 do 2º dia a temperatura externa encontra-se a 52 °C muito acima do que no mesmo horário para o 1º dia, porem as 15:00 a temperatura externa está a 57 °C que já é menor em relação ao mesmo momento do 1º dia. Mas em contrapartida as 21:00 a temperatura cai, devido as perdas de calor, para 32,5 °C.

Figura 26 – Calor transferido pela parede Trombe de 14 cm Solstício de verão

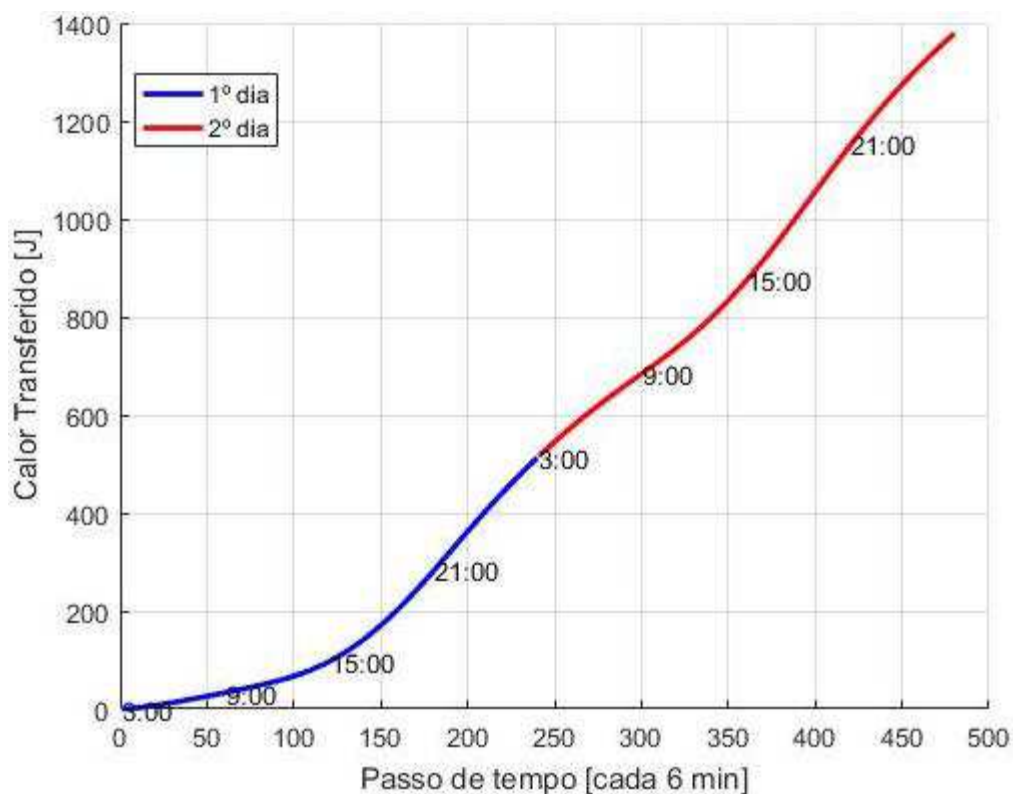


Fonte: Autor

A figura 26 mostra os ganhos de calor da parede Trombe de 14 cm no período em análise. Ao longo do 1º dia o acumulo de calor chegar a 1100 J, sendo que nas 6 primeiras horas da análise, até as 09:00 os ganhos de calor são pouco ascendentes, isso porque os efeitos da radiação solar ainda não são considerados, somente a partir das 09:00 que esses efeitos serão considerados, por isso que as 15:00 a curva do calor começa a ascender até as 21:00.

No 2º dia tal comportamento se repete nas primeiras 6 horas a ascendência da curva e pouca em decorrência do não aparecimento da radiação solar, somente a partir das 09:00 que tais efeitos serão considerados. Ao fim do período verifica-se que o acumulo de calor chega a 2300 J, sendo que no 2º dia o acumulo chegou a 1200 J para uma parede Trombe de 14 cm.

Figura 27 – Calor transferido pela parede Trombe de 30 cm Solstício de verão



Fonte: Autor

Com base na figura 27, é notável que com o aumento da espessura de 14 cm para 30 cm, os ganhos do acumulo de calor para o ambiente são reduzidos bruscamente, de 2300 J da figura 31 para próximo de 1400 J, da figura 32. Isso quer dizer que com o aumento da inercia térmica os ganhos de calor do ambiente interno são reduzidos, refletidos pela distribuição de temperaturas, como discutidos anteriormente.

No 1º dia observa-se que em função do aumento da inercia térmica a ascendência da curva do acumulo dos ganhos de calor, mostrado na figura 26, é bem menor do que a ascendência da curva da figura 25. Podemos notar que a curva cresce depois das 15:00, com uma inclinação maior em relação ao da figura 3, isso ocorre porque a parede Trombe de 30 cm de espessura tem maior capacidade de armazenamento de energia térmica ao longo do dia, já

considerando os efeitos da radiação solar, tanto é que esse comportamento é mantido no 2º dia, tendendo a um aumento linear a medida em que o tempo passa.

5 CONCLUSÃO

Como já discutido no decorrer dessa pesquisa, sabemos que o homem sempre buscou a melhor forma de se adaptar em um local quando passou de nômade para um ser sedentário. Tendo em vista isso a moradia ou abrigo foi o melhor método de se proteger dos animais, de outras pessoas, principalmente de fatores climatológicos como chuva, ventania, radiação solar dentre outros. Com o passar dos anos o aprimoramento na construção de residências trouxe problemas relacionados a qualidade de vida do ser humano, relacionado ao conforto térmico, por isso o incentivo na criação e invenção de máquinas térmicas para proporção de tal conforto veio a tona, porem o uso dessas maquinas demanda consumo de fonte de energia elétrica. Nessa buscou-se discutir sobre o uso de um sistema passivo usando Paredes Trombe para o desempenho do conforto térmico na cidade de São Luís.

A presente pesquisa buscou analisar o desempenho térmico das Paredes Trombe através da coleta de dados sobre a temperatura do ar e das radiações solares da cidade de São Luís, fornecidas pelo INPE, e da análise de parâmetros gráficos que nos mostrou a distribuição de temperatura ao longo da parede, dos acúmulos de calor (relacionados ao ganho de calor do ambiente interno – sala) e também das temperaturas nodais ao longo da parede. Sendo que o método usado para a análise e construção dos resultados gráficos foi o método das diferenças finitas em transferência de calor, com o auxílio da construção de um algoritmo no ambiente Matlab.

Durante a pesquisa foram coletados dados referentes as temperaturas do ar e as radiações solares da cidade de São Luís do ano de 2016, sendo escolhidas quatro datas: 20 e 21 de março, que corresponde ao equinócio de outono; 20 e 21 de junho, que corresponde ao solstício de inverno; 20 e 21 de setembro, que corresponde ao equinócio de primavera; e 20 e 21 de dezembro que corresponde ao solstício de verão. Com o algoritmo em Matlab construído foram inseridos os dados de entrada (citados anteriormente) além de todas as outras informações citadas na seção 3.1 deste trabalho.

A partir dos resultados gráficos obtidos pode-se constatar que o uso de Paredes Trombe para as atuais residência de São Luís não são viáveis do ponto de vista do conforto térmico, como discutido na seção 4, porem uma possível solução seria alterar no fator espessura de uma parede normal adicionando os outros materiais que uma Parede Trombe utiliza para viabilizar o uso dessa técnica para a região.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6401: Instalações centrais de ar-condicionado para conforto - Parametros básicos de projeto**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1980.

_____. **NBR 15220: Desempenho de térmico de edificações**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2003.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers - ASHRAE. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta: [s.n.], 2004.

BIANCO, C. F. **Parede Trombe: estudo experimental comparativo de desempenho térmico para aquecimento e arrefecimento na cidade de São Paulo**. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo de São Paulo, 2016.

BINGGELI, C. **Building systems for interior designers**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2003.

BRITO, M. C. **Reabilitação de Fachadas e o seu Contributo Energético: Caso de estudo de um hotel em Lisboa**. (Dissertação) - Instituto Superior Técnico. [S.l.]: Universidade Técnica de Lisboa, 2010.

CAVALVANTE, F. A. D. M. S. **Parede Trombe no Brasil: Análise do potencial de utilização para aquecimento e refrigeração**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo e Área de Concentração em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia. São Carlos: Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, 2013.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA**. 4ª. ed. México, D.F.: MCGRAW-HILL, 2011.

CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os tópicos: conforto ambiental**. Rio de Janeiro: Revan, 2003.

ELSADIG, A. K. **Energy Efficiency in commercial Building**. [S.l.]: Dissertation presented to Master Course of Science Sustainable Engineering, University of Strathclyde, 2005.

FERNANDES, L. B.; AZENHA, M. **Ferramenta baseada no método das diferenças finitas 2D para cálculos térmicos expeditos de faseamento construtivo de estruturas de betão em massa**. Encontro Nacional Betão Estrutural, Coimbra, 2016. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1822/43470>>. Acesso em: 18 março 2017.

GIOVANI, B. **Man, Climate and Architecture**. 2 th. ed. London: Applied Science Publishers, 1976.

_____. **Performance and Applicability of Passive and Low Energy Cooling Systems. Energy and Buildings**. Elsevier, Lausanne, v. 17, n. 3, p. 177-199, 1991. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788\(91\)90106-D](http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788(91)90106-D)>. Acesso em: 16 fevereiro 2017.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 7 th. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA - INMETRO. **ANEXO GERAL V - CATÁLOGO DE PROPRIEDADES TERMICAS DE PAREDES, COBERTURAS E VIDROS**. [S.l.]: [s.n.], 2013. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtosPBE/regulamentos/AnexoV.pdf>>.

KREITH, F.; BOHN, M. S. **Princípios de transferência de calor**. 7ª. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

MENDONÇA, P. J. F. A. U. **Habitar sob uma segunda pele: Estratégias para a Redução do Impacto Ambiental de Construções Solares Passivas em Climas Temperados**. (Tese de Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil. Guimarães: Universidade do Minho, 2005.

NETO, C. B. **Transferência de Calor**. [S.l.]: Instituto Federal de Santa Catarina, v. I, 2010.

NEVES, J. B.; LIMA, J. M. F.; LIMA, P. R. L. **Método das Diferenças Finitas Energéticas para simulação do comportamento sob flexão do concreto reforçado com fibras curtas de aço**. Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural, Passo Fundo, v. 10, n. 2, p. 31-55, jul./dez. 2013. Acesso em: 18 março 2017.

PASSOS, J. C. **O Conceito de Camada Limite: Uma Revisão Crítica de Livros-Texto de Transferência de Calor**. Anais do VI do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, João Pessoa, 2010.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropécua, 2002.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 1ª. ed. São José dos Campos: INPE, 2006.

RORIZ, M. **Zona de conforto térmico - Um estudo comparativo de diferentes abosrdagens**. (Dissertação) Programa de Pós-Graduação do Departamento de Arquitetura e Planejamento. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1987.

SUZUKI, E. V. **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE AQUECIMENTO/RESFRIAMENTO**. Dissertação (Mestrado) - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL. Curitiba: UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, 2012.

WIKIPÉDIA. **São Luís (Maranhão)**. Wikipédia a enciclopédia livre, 2017. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/S%C3%A3o_Lu%C3%ADs_\(Maranh%C3%A3o\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/S%C3%A3o_Lu%C3%ADs_(Maranh%C3%A3o))>. Acesso em: 20 março 2017.

APÊNDICES

APÊNDICE A – ALGORIMO PARA O EQUINÓCIO DE OUTONO

[illegible]

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%CALCULO PRELIMINAR (AUXILIARES)
ptime=Dhor/Dt; %Passo de tempo
ptot=n_dia*(24*60*60)/Dt; %Passo de tempo total (durante os dois dias de
á nálise)
Dtsup=Dx^2/(2.31*alfa); %Passo de tempo superior (o 2.31 é encontrado na
eução (27) no trabalho escrito)
Fo=(alfa*Dt)/Dx^2; %Número de Fourier
cnt_ini=1; %Contador inicial do passo de tempo
cnt_fin=ptime; %Contador final do tempo

for i=0:n_dia %Este laço cria os vetores coluna (por causa dos : depois da
,) Te e qs de tal forma que
    for j=1:length(Te) %sejam maiores para calcur as temperaturas nodais
nos instantes seguintes
        Text(cnt_ini:cnt_fin,:) = Te(j); %Mais informações ver Anotação 1.
        qsol(cnt_ini:cnt_fin,:) = qs(j);
        cnt_ini=cnt_ini+ptime;
        cnt_fin=cnt_fin+ptime;
    end
end
T(1,3:m+2)=linspace(24,29,m); %Temperatura inicial discretizada (ver
Anotação 1), considerando variação linear  $T(x) = ax + b$ 
                                %para a hora inicial (0 h == 03:00)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%CÁLCULO DAS TEMPERATURAS NODAIS
cnt_hr=0; %Contador de horas (onde o 0 é a hora inicial da análise)
cnt_p=0; %Contador de passo (i)
somaQ=0;
for i=1:ptot
    cnt_hr=cnt_hr+(Dt/3600);
    cnt_p=cnt_p+1;
    T(i+1,1:2)=[cnt_hr cnt_p];
    for k=3:m+2 % nós
        if k~=3 && k~=m+2
            T(i+1,k)= Fo*(T(i,k-1)+T(i,k+1)) + T(i,k)*(1-2*Fo); %nós
internos
        elseif k==3 %Temperatura do nó 0
            T(i+1,k)= (1 - 2*Fo - 2*Fo*h_conv(k-2)*Dx/kp)*T(i,k)...
                + 2*Fo*T(i,k+1) + 2*Fo*h_conv(k-2)*Dx*Tint/kp;
        elseif k==m+2 %Temperatura do nó 6
            T(i+1,k)= (1 - 2*Fo - 2*Fo*h_conv(k-2)*Dx/kp)*T(i,k)...
                + 2*Fo*T(i,k-1) + (2*Fo*h_conv(k-2)*Dx/kp)*Text(i)...
                + (2*Fo*tau*h_conv(k-2)*Dx/kp)*qsol(i);
        end
    end
    somaQ= somaQ + h_conv(1)*A*((T(i+1,3)+T(i,3))/2 - Tint)*(Dt/3600);
    Q(i)=somaQ;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%RESULTADOS
figure
x= linspace(0,L,m);
ph= 1:60:ptot;
hr(1,1:length(ph)/n_dia)= {'3:00' '9:00' '15:00' '21:00'};
cor=['b';'r'];

```

```

for j=1:length(ph)/n_dia
    hold on
    grid on
    TT1=T(ph(j),3:m+2);
    TT2=T(ph(j+length(ph)/n_dia),3:m+2);
    plot(x,TT1,cor(1),'LineWidth',2);
    plot(x,TT2,cor(2),'LineWidth',2);
    text(x(m),TT1(m),hr(j));
    text(x(m),TT2(m),hr(j));
end
title('Distribuição de Temperatura ao longo da Parede Trombe')
legend('1° dia','2° dia')
xlabel('Espessura da Parede Trombe [m]')
ylabel('Temperatura [°C]')

figure
hold on
plot(1:ptot/n_dia,Q(1:ptot/n_dia),'b','LineWidth',2)
text(1:60:ptot/n_dia,Q(1:60:ptot/n_dia),hr)
plot(ptot/n_dia+1:ptot,Q(ptot/n_dia+1:ptot),'r','LineWidth',2)
text(ptot/n_dia+1:60:ptot,Q(ptot/n_dia+1:60:ptot),hr)
title('Transferencia de Calor da Parede Trombe')
legend('1° dia','2° dia')
xlabel('Passo de tempo [cada 6 min]')
ylabel('Calor Transferido [J]')
grid on

figure
hold on
curva=['-o'; '-.'; '-x'; '-+'; '-*'; '--'; ' :'];
for i=3:m+2
    r=plot(T(1:60:421,1),T(1:60:421,i),curva(i-2,1:2));
end
legend('T0','T1','T2','T3','T4','T5','T6')
xlabel('Tempo [h]')
ylabel('Temperatura [°C]')

```

APÊNDICE B – ALGORIMO PARA O SOLESTÍCIO DE INVERNO

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%UNIVERSIDADE ESTADUA DO MARANHÃO - UEMA
%CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
%ENGENHARIA MECANICA BACHARELADO - DEMECP
%EMMERSON XAVEIR LIMA
%
%
%SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM PAREDES TROMBE: USO DESSA TECNOLOGIA NA
%CIDADE DE SÃO LUÍS

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%DADOS DE ENTRADA: Solstício de inverno (20 e 21 de Junho de 2016)
%Dimensão da sala
L=0.14; %[m] - Espessura da Parede
A=1; %[m²] - Área da parede
kp=0.9; %[W/m°C] - Coef. de condutividade da Parede
alfa=6.11E-7; %[m²/s] - Difusividade da Parede
tau=0.477; %Transmissividade do Vidro
Tint=24; %[°C] - Temperatura interna (projeto)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%DADOS NUMÉRICOS
m=7; %Número de nós
Dx=L/(m-1); %[m] - Espaçamento nodal
Dt=360; %[s] - Passo de tempo
Dhor=3*3600; %[s] - Intervalo de tempo que a temperatura permanece
constante
n_dia=2; %Número de dias (480 passos de 6 min cada)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%DADOS CLIMÁTICOS
hi=6; %[W/m²°C] - Coef. de convecção interna
he=10; %[W/m²°C] - Coef. de convecção externa
h_conv(1,1:m-1:m)=[hi he]; %Vetor coef de convecção
Te1=27.5; %[°C] - 03:00
Te2=27; %[°C] - 06:00
Te3=23.5; %[°C] - 09:00
Te4=29; %[°C] - 12:00
Te5=31; %[°C] - 15:00
Te6=30.5; %[°C] - 18:00
Te7=27.5; %[°C] - 21:00
Te=[Te1 Te2 Te3 Te4 Te5 Te6 Te7]'; %[°C] - Vetor temperaturas externas
(Dados_INPE)

qs1=0; %[W/m] - 03:00
qs2=0; %[W/m] - 06:00
qs3=395; %[W/m] - 09:00
qs4=453; %[W/m] - 12:00
qs5=395; %[W/m] - 15:00
qs6=0; %[W/m] - 18:00
qs7=0; %[W/m] - 21:00

```

```

qs=[qs1 qs2 qs3 qs4 qs5 qs6 qs7]'; %[W/m] - Vetor Radiação solar de São
Luís para cada Dhor (Dados)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%CALCULO PRELIMINAR (AUXILIARES)
ptime=Dhor/Dt; %Passo de tempo
ptot=n_dia*(24*60*60)/Dt; %Passo de tempo total (durante os dois dias de
ânalise)
Dtsup=Dx^2/(2.31*alfa); %Passo de tempo superior (o 2.31 é encontrado na
euqação (27) no trabalho escrito)
Fo=(alfa*Dt)/Dx^2; %Número de Fourier
cnt_ini=1; %Contador inicial do passo de tempo
cnt_fin=ptime; %Contador final do tempo

for i=0:n_dia %Este laço cria os vetores coluna (por causa dos : depois da
,) Te e qs de tal forma que
    for j=1:length(Te) %sejam maiores para calcur as temperaturas nodais
nos instantes seguintes
        Text(cnt_ini:cnt_fin,:) = Te(j); %Mais informações ver Anotação 1.
        qsol(cnt_ini:cnt_fin,:) = qs(j);
        cnt_ini=cnt_ini+ptime;
        cnt_fin=cnt_fin+ptime;
    end
end
T(1,3:m+2)=linspace(24,29,m); %Temperatura inicial discretizada (ver
Anotação 1), considerando variação linear  $T(x) = ax + b$ 
                                %para a hora inicial (0 h == 03:00)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%CÁLCULO DAS TEMPERATURAS NODAIS
cnt_hr=0; %Contador de horas (onde o 0 é a hora inicial da análise)
cnt_p=0; %Contador de passo (i)
somaQ=0;
for i=1:ptot
    cnt_hr=cnt_hr+(Dt/3600);
    cnt_p=cnt_p+1;
    T(i+1,1:2)=[cnt_hr cnt_p];
    for k=3:m+2 % nós
        if k~=3 && k~=m+2
            T(i+1,k)= Fo*(T(i,k-1)+T(i,k+1)) + T(i,k)*(1-2*Fo); %nós
internos
        elseif k==3 %Temperatura do nó 0
            T(i+1,k)= (1 - 2*Fo - 2*Fo*h_conv(k-2)*Dx/kp)*T(i,k)...
                + 2*Fo*T(i,k+1) + 2*Fo*h_conv(k-2)*Dx*Tint/kp;
        elseif k==m+2 %Temperatura do nó 6
            T(i+1,k)= (1 - 2*Fo - 2*Fo*h_conv(k-2)*Dx/kp)*T(i,k)...
                + 2*Fo*T(i,k-1) + (2*Fo*h_conv(k-2)*Dx/kp)*Text(i)...
                + (2*Fo*tau*h_conv(k-2)*Dx/kp)*qsol(i);
        end
    end
    somaQ= somaQ + h_conv(1)*A*((T(i+1,3)+T(i,3))/2 - Tint)*(Dt/3600);
    Q(i)=somaQ;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%RESULTADOS
figure
x= linspace(0,L,m);

```

```

ph= 1:60:ptot;
hr(1,1:length(ph)/n_dia)= {'3:00' '9:00' '15:00' '21:00'};
cor=['b';'r'];
for j=1:length(ph)/n_dia
    hold on
    grid on
    TT1=T(ph(j),3:m+2);
    TT2=T(ph(j+length(ph)/n_dia),3:m+2);
    plot(x,TT1,cor(1),'LineWidth',2);
    plot(x,TT2,cor(2),'LineWidth',2);
    text(x(m),TT1(m),hr(j));
    text(x(m),TT2(m),hr(j));
end
title('Distribuição de Temperatura ao longo da Parede Trombe')
legend('1° dia','2° dia')
xlabel('Espessura da Parede Trombe [m]')
ylabel('Temperatura [°C]')

figure
hold on
plot(1:ptot/n_dia,Q(1:ptot/n_dia),'b','LineWidth',2)
text(1:60:ptot/n_dia,Q(1:60:ptot/n_dia),hr)
plot(ptot/n_dia+1:ptot,Q(ptot/n_dia+1:ptot),'r','LineWidth',2)
text(ptot/n_dia+1:60:ptot,Q(ptot/n_dia+1:60:ptot),hr)
title('Transferencia de Calor da Parede Trombe')
legend('1° dia','2° dia')
xlabel('Passo de tempo [cada 6 min]')
ylabel('Calor Transferido [J]')
grid on

figure
hold on
curva=['-o'; '-.'; '-x'; '-+'; '-*'; '--'; ' :'];
for i=3:m+2
    r=plot(T(1:60:421,1),T(1:60:421,i),curva(i-2,1:2));
end
legend('T0','T1','T2','T3','T4','T5','T6')
xlabel('Tempo [h]')
ylabel('Temperatura [°C]')

```



```

%CALCULO PRELIMINAR (AUXILIARES)
ptime=Dhor/Dt; %Passo de tempo
ptot=n_dia*(24*60*60)/Dt; %Passo de tempo total (durante os dois dias de
análise)
Dtsup=Dx^2/(2.31*alfa); %Passo de tempo superior (o 2.31 é encontrado na
equação (27) no trabalho escrito)
Fo=(alfa*Dt)/Dx^2; %Número de Fourier
cnt_ini=1; %Contador inicial do passo de tempo
cnt_fin=ptime; %Contador final do tempo

for i=0:n_dia %Este laço cria os vetores coluna (por causa dos : depois da
,) Te e qs de tal forma que
    for j=1:length(Te) %sejam maiores para calcur as temperaturas nodais
nos instantes seguintes
        Text(cnt_ini:cnt_fin,:) = Te(j); %Mais informações ver Anotação 1.
        qsol(cnt_ini:cnt_fin,:) = qs(j);
        cnt_ini=cnt_ini+ptime;
        cnt_fin=cnt_fin+ptime;
    end
end
T(1,3:m+2)=linspace(24,29,m); %Temperatura inicial discretizada (ver
Anotação 1), considerando variação linear  $T(x) = ax + b$ 
                                %para a hora inicial (0 h == 03:00)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%CÁLCULO DAS TEMPERATURAS NODAIS
cnt_hr=0; %Contador de horas (onde o 0 é a hora inicial da análise)
cnt_p=0; %Contador de passo (i)
somaQ=0;
for i=1:ptot
    cnt_hr=cnt_hr+(Dt/3600);
    cnt_p=cnt_p+1;
    T(i+1,1:2)=[cnt_hr cnt_p];
    for k=3:m+2 % nós
        if k~=3 && k~=m+2
            T(i+1,k)= Fo*(T(i,k-1)+T(i,k+1)) + T(i,k)*(1-2*Fo); %nós
internos
        elseif k==3 %Temperatura do nó 0
            T(i+1,k)= (1 - 2*Fo - 2*Fo*h_conv(k-2)*Dx/kp)*T(i,k) ...
                + 2*Fo*T(i,k+1) + 2*Fo*h_conv(k-2)*Dx*Tint/kp;
        elseif k==m+2 %Temperatura do nó 6
            T(i+1,k)= (1 - 2*Fo - 2*Fo*h_conv(k-2)*Dx/kp)*T(i,k) ...
                + 2*Fo*T(i,k-1) + (2*Fo*h_conv(k-2)*Dx/kp)*Text(i) ...
                + (2*Fo*tau*h_conv(k-2)*Dx/kp)*qsol(i);
        end
    end
    somaQ= somaQ + h_conv(1)*A*((T(i+1,3)+T(i,3))/2 - Tint)*(Dt/3600);
    Q(i)=somaQ;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%RESULTADOS
figure
x= linspace(0,L,m);
ph= 1:60:ptot;
hr(1,1:length(ph)/n_dia)= {'3:00' '9:00' '15:00' '21:00'};
cor=['b';'r'];
for j=1:length(ph)/n_dia
    hold on

```

```

    grid on
    TT1=T(ph(j),3:m+2);
    TT2=T(ph(j+length(ph)/n_dia),3:m+2);
    plot(x,TT1,cor(1),'LineWidth',2);
    plot(x,TT2,cor(2),'LineWidth',2);
    text(x(m),TT1(m),hr(j));
    text(x(m),TT2(m),hr(j));
end
title('Distribuição de Temperatura ao longo da Parede Trombe')
legend('1° dia','2° dia')
xlabel('Espessura da Parede Trombe [m]')
ylabel('Temperatura [°C]')

figure
hold on
plot(1:ptot/n_dia,Q(1:ptot/n_dia),'b','LineWidth',2)
text(1:60:ptot/n_dia,Q(1:60:ptot/n_dia),hr)
plot(ptot/n_dia+1:ptot,Q(ptot/n_dia+1:ptot),'r','LineWidth',2)
text(ptot/n_dia+1:60:ptot,Q(ptot/n_dia+1:60:ptot),hr)
title('Transferencia de Calor da Parede Trombe')
legend('1° dia','2° dia')
xlabel('Passo de tempo [cada 6 min]')
ylabel('Calor Transferido [J]')
grid on

figure
hold on
curva=['-o'; '-.'; '-x'; '-+'; '-*'; '--'; ' :'];
for i=3:m+2
    r=plot(T(1:60:421,1),T(1:60:421,i),curva(i-2,1:2));
end
legend('T0','T1','T2','T3','T4','T5','T6')
xlabel('Tempo [h]')
ylabel('Temperatura [°C]')

```

APÊNDICE D – ALGORIMO PARA O SOLESTÍCIO DE VERÃO

[illegible]

```

%CALCULO PRELIMINAR (AUXILIARES)
ptime=Dhor/Dt; %Passo de tempo
ptot=n_dia*(24*60*60)/Dt; %Passo de tempo total (durante os dois dias de
análise)
Dtsup=Dx^2/(2.31*alfa); %Passo de tempo superior (o 2.31 é encontrado na
equação (27) no trabalho escrito)
Fo=(alfa*Dt)/Dx^2; %Número de Fourier
cnt_ini=1; %Contador inicial do passo de tempo
cnt_fin=ptime; %Contador final do tempo

for i=0:n_dia %Este laço cria os vetores coluna (por causa dos : depois da
,) Te e qs de tal forma que
    for j=1:length(Te) %sejam maiores para calcular as temperaturas nodais
nos instantes seguintes
        Text(cnt_ini:cnt_fin,:) = Te(j); %Mais informações ver Anotação 1.
        qsol(cnt_ini:cnt_fin,:) = qs(j);
        cnt_ini=cnt_ini+ptime;
        cnt_fin=cnt_fin+ptime;
    end
end
T(1,3:m+2)=linspace(24,29,m); %Temperatura inicial discretizada (ver
Anotação 1), considerando variação linear  $T(x) = ax + b$ 
                                %para a hora inicial (0 h == 03:00)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%CÁLCULO DAS TEMPERATURAS NODAIS
cnt_hr=0; %Contador de horas (onde o 0 é a hora inicial da análise)
cnt_p=0; %Contador de passo (i)
somaQ=0;
for i=1:ptot
    cnt_hr=cnt_hr+(Dt/3600);
    cnt_p=cnt_p+1;
    T(i+1,1:2)=[cnt_hr cnt_p];
    for k=3:m+2 % nós
        if k~=3 && k~=m+2
            T(i+1,k)= Fo*(T(i,k-1)+T(i,k+1)) + T(i,k)*(1-2*Fo); %nós
internos
        elseif k==3 %Temperatura do nó 0
            T(i+1,k)= (1 - 2*Fo - 2*Fo*h_conv(k-2)*Dx/kp)*T(i,k) ...
                + 2*Fo*T(i,k+1) + 2*Fo*h_conv(k-2)*Dx*Tint/kp;
        elseif k==m+2 %Temperatura do nó 6
            T(i+1,k)= (1 - 2*Fo - 2*Fo*h_conv(k-2)*Dx/kp)*T(i,k) ...
                + 2*Fo*T(i,k-1) + (2*Fo*h_conv(k-2)*Dx/kp)*Text(i) ...
                + (2*Fo*tau*h_conv(k-2)*Dx/kp)*qsol(i);
        end
    end
    somaQ= somaQ + h_conv(1)*A*((T(i+1,3)+T(i,3))/2 - Tint)*(Dt/3600);
    Q(i)=somaQ;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%RESULTADOS
figure
x= linspace(0,L,m);
ph= 1:60:ptot;
hr(1,1:length(ph)/n_dia)= {'3:00' '9:00' '15:00' '21:00'};
cor=['b';'r'];
for j=1:length(ph)/n_dia
    hold on

```

```

    grid on
    TT1=T(ph(j),3:m+2);
    TT2=T(ph(j+length(ph)/n_dia),3:m+2);
    plot(x,TT1,cor(1),'LineWidth',2);
    plot(x,TT2,cor(2),'LineWidth',2);
    text(x(m),TT1(m),hr(j));
    text(x(m),TT2(m),hr(j));
end
title('Distribuição de Temperatura ao longo da Parede Trombe')
legend('1° dia','2° dia')
xlabel('Espessura da Parede Trombe [m]')
ylabel('Temperatura [°C]')

figure
hold on
plot(1:ptot/n_dia,Q(1:ptot/n_dia),'b','LineWidth',2)
text(1:60:ptot/n_dia,Q(1:60:ptot/n_dia),hr)
plot(ptot/n_dia+1:ptot,Q(ptot/n_dia+1:ptot),'r','LineWidth',2)
text(ptot/n_dia+1:60:ptot,Q(ptot/n_dia+1:60:ptot),hr)
title('Transferencia de Calor da Parede Trombe')
legend('1° dia','2° dia')
xlabel('Passo de tempo [cada 6 min]')
ylabel('Calor Transferido [J]')
grid on

figure
hold on
curva=['-o'; '-.'; '-x'; '-+'; '-*'; '--'; ':'];
for i=3:m+2
    r=plot(T(1:60:421,1),T(1:60:421,i),curva(i-2,1:2));
end
legend('T0','T1','T2','T3','T4','T5','T6')
xlabel('Tempo [h]')
ylabel('Temperatura [°C]')

```

APÊNDICE E – CÁLCULO DAS TEMPERATURAS POSTERIORES PARA CADA PERÍODO

- Para o Equinócio de outono (março):

$$T_0^1 = (1 - 2,31 \cdot 0,4054)24 + 2 \cdot 0,4054(24,17) + 0,31 \cdot 0,4054(24)$$

$$T_0^1 = 24,13 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (33)$$

$$T_1^1 = 0,4054(24 + 24,34) + (1 - 2 \cdot 0,4054)24,17$$

$$T_1^1 = 24,17 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (34)$$

$$T_2^1 = 0,4054(24,17 + 24,51) + (1 - 2 \cdot 0,4054)24,34$$

$$T_2^1 = 24,34 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (35)$$

$$T_3^1 = 0,4054(24,34 + 24,68) + (1 - 2 \cdot 0,4054)24,51$$

$$T_3^1 = 24,51 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (36)$$

$$T_4^1 = 0,4054(24,51 + 24,85) + (1 - 2 \cdot 0,4054)24,68$$

$$T_4^1 = 24,68 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (37)$$

$$T_5^1 = 0,4054(24,68 + 25) + (1 - 2 \cdot 0,4054)24,85$$

$$T_5^1 = 24,85 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (38)$$

$$T_6^1 = (1 - 2,51 \cdot 0,4054)25 + 2 \cdot 0,4054(24,85) + 0,51 \cdot 0,4054(25) + 2$$

$$\cdot 0,4054 \cdot \frac{0 \cdot 0,447 \cdot (2,33 \times 10^{-2})}{0,90}$$

$$T_6^1 = 24,88 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (39)$$

- Para o Solstício de inverno (junho):

$$T_0^1 = (1 - 2,31 \cdot 0,4054)24 + 2 \cdot 0,4054(24,58) + 0,31 \cdot 0,4054(24)$$

$$T_0^1 = 24,47 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (40)$$

$$T_1^1 = 0,4054(24 + 25,16) + (1 - 2 \cdot 0,4054)24,58$$

$$T_1^1 = 24,58 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (41)$$

$$T_2^1 = 0,4054(24,58 + 25,74) + (1 - 2 \cdot 0,4054)25,16$$

$$T_2^1 = 25,16 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (42)$$

$$T_3^1 = 0,4054(25,16 + 26,32) + (1 - 2 \cdot 0,4054)25,74$$

$$T_3^1 = 25,74 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (43)$$

$$T_4^1 = 0,4054(25,74 + 26,90) + (1 - 2 \cdot 0,4054)26,32$$

$$T_4^1 = 26,32 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (44)$$

$$T_5^1 = 0,4054(26,32 + 27,5) + (1 - 2 \cdot 0,4054)26,90$$

$$T_5^1 = 26,90 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (45)$$

$$T_6^1 = (1 - 2,51 \cdot 0,4054)27,5 + 2 \cdot 0,4054(26,90) + 0,51 \cdot 0,4054(27,5) + 2$$

$$\cdot 0,4054 \cdot \frac{0 \cdot 0,447 \cdot (2,33 \times 10^{-2})}{0,90}$$

$$T_6^1 = 27,01 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (46)$$

Para o Equinócio de primavera (setembro):

$$T_0^1 = (1 - 2,31 \cdot 0,4054)24 + 2 \cdot 0,4054(24,33) + 0,31 \cdot 0,4054(24)$$

$$T_0^1 = 24,26 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (47)$$

$$T_1^1 = 0,4054(24 + 24,66) + (1 - 2 \cdot 0,4054)24,33$$

$$T_1^1 = 24,33 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (48)$$

$$T_2^1 = 0,4054(24,33 + 24,99) + (1 - 2 \cdot 0,4054)24,66$$

$$T_2^1 = 24,66 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (49)$$

$$T_3^1 = 0,4054(24,66 + 25,32) + (1 - 2 \cdot 0,4054)24,99$$

$$T_3^1 = 24,99 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (50)$$

$$T_4^1 = 0,4054(24,99 + 25,65) + (1 - 2 \cdot 0,4054)25,32$$

$$T_4^1 = 25,32 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (51)$$

$$T_5^1 = 0,4054(25,32 + 26) + (1 - 2 \cdot 0,4054)25,65$$

$$T_5^1 = 25,65 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (52)$$

$$T_6^1 = (1 - 2,51 \cdot 0,4054)26 + 2 \cdot 0,4054(25,65) + 0,51 \cdot 0,4054(26) + 2$$

$$\cdot 0,4054 \cdot \frac{0 \cdot 0,447 \cdot (2,33 \times 10^{-2})}{0,90}$$

$$T_6^1 = 225,72 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (53)$$

• Para o Solstício de verão (dezembro):

$$T_0^1 = (1 - 2,31 \cdot 0,4054)24 + 2 \cdot 0,4054(24,83) + 0,31 \cdot 0,4054(24)$$

$$T_0^1 = 24,67 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (54)$$

$$T_1^1 = 0,4054(24 + 25,66) + (1 - 2 \cdot 0,4054)24,83$$

$$T_1^1 = 24,83 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (55)$$

$$T_2^1 = 0,4054(24,83 + 26,49) + (1 - 2 \cdot 0,4054)25,66$$

$$T_2^1 = 25,66 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (56)$$

$$T_3^1 = 0,4054(25,66 + 27,32) + (1 - 2 \cdot 0,4054)26,49$$

$$T_3^1 = 26,49 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (57)$$

$$T_4^1 = 0,4054(26,49 + 28,15) + (1 - 2 \cdot 0,4054)27,32$$

$$T_4^1 = 27,32 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (58)$$

$$T_5^1 = 0,4054(27,32 + 29) + (1 - 2 \cdot 0,4054)28,15$$

$$T_5^1 = 28,15 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (59)$$

$$T_6^1 = (1 - 2,51 \cdot 0,4054)29 + 2 \cdot 0,4054(28,15) + 0,51 \cdot 0,4054(29) + 2$$

$$\cdot 0,4054 \cdot \frac{0 \cdot 0,447 \cdot (2,33 \times 10^{-2})}{0,90}$$

$$T_6^1 = 28,31 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (60)$$

ANEXOS

ANEXO A – TEMPERATURAS HORÁRIAS E RADIÇÕES SOLARES PARA CADA ESTAÇÃO DO ANO DE SÃO LUÍS

Tabela 1 – Temperaturas horarias ambientais (T_{ext}) e suas respectivas radiações solares.

	Data / hora	Temperatura do Ar [°C]	q_{solar} [Wh/m ²]
Março (Equinócio de outono)	2016-03-21 / 03:00	26	0
	2016-03-20 / 00:00	27	0
	2016-03-20 / 21:00	28	0
	2016-03-20 / 18:00	30,5	0
	2016-03-20 / 15:00	31	78
	2016-03-20 / 12:00	29	106
	2016-03-20 / 09:00	25,5	78
	2016-03-20 / 06:00	25,5	0
	2016-03-20 / 03:00	25	0
Junho (Solstício de inverno)	2016-06-21 /03:00	31	0
	2016-06-20 /00:00	28	0
	2016-06-20 /21:00	27,5	0
	2016-06-20 / 18:00	30,5	0
	2016-06-20 / 15:00	31	395
	2016-06-20 / 12:00	29	453
	2016-06-20 / 09:00	23,5	395
	2016-06-20 / 06:00	27	0
	2016-06-20 / 03:00	27,5	0
Setembro (Equinócio de primavera)	2016-09-21 / 03:00	28	0
	2016-09-20 / 00:00	27	0
	2016-09-20 / 21:00	26	0
	2016-09-20 / 18:00	27	0
	2016-09-20 / 15:00	30	83
	2016-09-20 / 12:00	29,5	112
	2016-09-20 / 09:00	26	84
	2016-09-20 / 06:00	25,5	0
	2016-09-20 / 03:00	26	0
Dezembro (Solstício de verão)	2016-12-21 / 03:00	29	0
	2016-12-20 / 00:00	27,5	0
	2016-12-20 / 21:00	27	0
	2016-12-20 / 18:00	28	0
	2016-12-20 / 15:00	31	45
	2016-12-20 / 12:00	28	56
	2016-12-20 / 09:00	31	45
	2016-12-20 / 06:00	31,5	0
	2016-12-20 / 03:00	29	0

Fonte: CPTEC/INPE – São Luís (Adaptado)