

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS RTS E CLTD/SCL/CLF PARA O CÁLCULO DA
CARGA TÉRMICA DE RESFRIAMENTO

por

Enrico Zilio Borelli

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2021

Borelli, Enrico Zilio
COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS RTS E CLTD/SCL/CLF PARA O
CÁLCULO DA CARGA TÉRMICA DE RESFRIAMENTO / Enrico
Zilio Borelli. -- 2021.
29 f.
Orientador: Andrés Armando Mendiburu Zevallos.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Carga Térmica de Resfriamento. 2. Método RTS. 3.
Método CLTD/SCL/CLF. I. Zevallos, Andrés Armando
Mendiburu, orient. II. Título.

LISTA DE SÍMBOLOS

t_o	Temperatura de bulbo seco externa	°C
α	Absortividade da superfície	
E_t	Radiação solar total incidente sobre a superfície	W/m ²
h_o	Coefficiente de transferência de calor por radiação de onda longa e convecção	W/m ² K
$E_{t,b}$	Irradiação direta	W/m ²
$\varepsilon\Delta R$	Troca de radiação entre o céu e um corpo negro a temperatura	W/m ²
E_b	Irradiação normal	W/m ²
θ	Ângulo de incidência	°
$E_{t,d}$	Irradiação difusa	W/m ²
E_d	Irradiação difusa sobre uma superfície horizontal	W/m ²
Y	Razão de irradiação difusa de céu claro em uma superfície vertical	
$E_{t,r}$	Irradiação refletida pelo o solo	W/m ²
β	Ângulo de altitude solar	°
ρ_g	Refletância do solo	
$q_{i,\theta-n}$	Entrada de calor condutivo da superfície em função da hora	W
U	Coefficiente global de transferência de calor para a superfície	W/m ² K
A	Área da superfície	m ²
$t_{e,\theta-n}$	Temperatura sol-ar em função da hora	°C
t_{rc}	Temperatura constante do ar para o ambiente	°C
q_θ	Ganho de calor condutivo para a superfície	W
$q_{i,\theta}$	Entrada de calor para a hora corrente	W
c_n	Fatores de tempo condutivos	
q_s	Ganho de calor sensível dos ocupantes	W
q_l	Ganho de calor latente dos ocupantes	W
$q_{s,per}$	Ganho de calor sensível por pessoa	W/pessoa
$q_{l,per}$	Ganho de calor latente por pessoa	W/pessoa
N	Número de ocupantes	
q_{il}	Ganho de calor referente a iluminação	W
W	Potência total instalada	W

F_{ul}	Fator de uso	
F_{sa}	Fator especial de tolerância	
$Q_{r,\theta}$	Carga de resfriamento radiante Q_r para uma determinada hora Θ	W
r_n	Fatores de tempo radiantes	
$q_{r,\theta}$	Ganho de calor radiante para uma determinada hora	W
$q_{r,\theta-n}$	Ganho de calor horas atrás	W
$CLTD$	Fator de diferença de temperatura para a carga de resfriamento para a superfície	
SC	Coeficiente de sombra	
SCL	Fator da carga de resfriamento solar com ou sem sombras internas	
CLF	Fator da carga de resfriamento dependente dos horários de ocupação	
e_r	Erro relativo	%
VV	Valor verdadeiro	
VE	Valor encontrado	
Λ	Fator de comparação dos métodos	
Q_{CLTD}	Carga obtida através do método CLTD/SCL/CLF	W
Q_{RTS}	Carga obtida através do método RTS	W

Enrico Zilio Borelli

COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS RTS E CLTD/SCL/CLF PARA O CÁLCULO DA
CARGA TÉRMICA DE RESFRIAMENTO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador(a) do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof./Prof^a. Andrés Armando Mendiburu Zevallos

Comissão de Avaliação:

Prof./Prof^a. Letícia Jenisch Rodrigues

Prof./Prof^a. Cirilo Seppi Bresolin

Prof./Prof^a. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, novembro de 2021

Zilio Borelli, Enrico. **Comparação dos métodos RTS e CLTD/SCL/CLF para o cálculo da carga térmica de resfriamento**. 2021. 29. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

RESUMO

No escopo da climatização de ambientes, o cálculo da carga térmica tem um papel fundamental para atingir resultados satisfatórios no dimensionamento de sistemas e assim, obter um ambiente climatizado. O objetivo deste trabalho é analisar os métodos RTS (Séries temporais de radiação) e CLTD/SCL/CLF (Diferenças de temperatura) desenvolvidos pela ASHRAE, com a finalidade de apresentar suas vantagens e desvantagens, além de mostrar se estes são eficientes e coerentes entre si. Portanto, duas formas principais de abordagem do problema são utilizadas, primeiramente o contraste entre os dois métodos é apresentado a partir de uma análise comparativa componente por componente, após isso é feita uma comparação abrangendo todos os componentes de carga somados formando a carga térmica total. Os resultados obtidos mostram que os métodos apresentam resultados com perfis semelhantes de carga, porém o CLTD/SCL/CLF em todos casos estudados superestimou o valor da carga térmica quando comparados com os resultados do método RTS. Para componentes isolados, essa diferença ficou em valores em torno de 10% e 50% e para os casos do estudo da carga total de resfriamento, as diferenças relativas resultaram em valores próximos de 30% em casos para construções pesadas, chegando a mais de 100% em casos de construções leves.

PALAVRAS – CHAVE: Carga térmica, método RTS, método CLTD/SCL/CLF.

Zilio Borelli, Enrico. **Comparação dos métodos RTS e CLTD/SCL/CLF para o cálculo da carga térmica de resfriamento**. 2021. 29. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

ABSTRACT

In the scope of climate control, the calculation of the thermal load plays a fundamental role in achieving satisfactory results in the dimensioning of systems and, thus, obtaining a climate-controlled environment. The objective of this work is to analyze the RTS (Radiation Time Series) and CLTD/SCL/CLF (Temperature Differences) methods developed by ASHRAE, with a performance of presenting their advantages and disadvantages, as well as showing whether they are efficient and consistent between themselves. Therefore, the two main ways of approaching the problem are used, primarily the contrast between the two methods is presented from a component-by-component comparative analysis, after that, a comparison is made covering all load components added together, forming a total thermal load. The results presented, showed that the methods present results with similar load models, however CLTD/SCL/CLF in all studied cases overestimated the value of the thermal load when compared with the results of the RTS method. For isolated components, this difference was in values around 10% and 50% and for the cases of the study of the total cooling load, as relative differences resulted in values close to 30% in cases for heavy constructions, reaching more than 100% in cases of light construction.

KEYWORDS: Thermal load, RTS method, CLTD/SCL/CLF method.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO.....	2
2.1 Método das séries temporais de radiação (RTS)	2
2.1.1 Temperatura sol-ar.....	3
2.1.2 Ganhos de calor por condução.....	4
2.1.3 Ganhos de calor internos	5
2.1.4 Conversão dos ganhos de calor em carga térmica.....	6
2.2 Método das diferenças de temperatura da carga de resfriamento/carga de resfriamento solar/fator de carga de resfriamento (CLTD/SCL/CLF)	7
3. METODOLOGIA.....	7
3.1 Dados necessários para implementação dos métodos	8
3.2 Validação do método RTS.....	9
3.3 Validação do método CLTD/SCL/CLF.....	9
3.4 Comparação entre os métodos	10
4. RESULTADOS	11
5. CONCLUSÃO.....	16
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	17

1. INTRODUÇÃO

O conforto térmico pode ser definido como “a expressão de satisfação mental com as condições térmicas (temperatura, umidade, etc.) do ambiente. A mente é capaz de concluir sobre o conforto térmico a partir da sensação de temperatura e umidade da pele, órgãos e esforço necessário para regular a temperatura do corpo”. (ASHRAE 55, 2010, p.4).

O conceito apresentado no parágrafo acima, representa um dos principais, senão o principal fator para a construção de um ambiente climatizado. A climatização de ambientes corresponde a um processo analisado durante as fases de projeto e construção de uma edificação e, portanto, muitas variáveis necessitam ser avaliadas para que ao fim do projeto, os sistemas de condicionamento sejam corretamente dimensionados, assim obtendo o conforto térmico esperado.

A determinação/cálculo das cargas térmicas representa o primeiro e mais fundamental passo para a realização correta de um projeto para a instalação de um sistema de ar-condicionado, pois os demais procedimentos como seleção da máquina, dimensionamento dos dutos e difusores, entre outros, são realizados visando suprir a necessidade imposta pela carga térmica obtida.

Atualmente, a Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado (ASHRAE) disponibiliza em seus manuais uma série de métodos que foram sendo desenvolvidos e aperfeiçoados de acordo com o avanço dos estudos e da tecnologia ao longo dos anos, e que apresentam suas respectivas vantagens e desvantagens em relação a sua utilização.

K. G Acharya et al. (2019) apresenta uma análise para a carga de resfriamento em Ahmadabad, no subcontinente indiano. Uma sala de computadores foi analisada para um total de 24 ocupantes durante um expediente de 8 horas, onde as temperaturas de bulbo seco externa e interna correspondem a 43,3°C e 23°C, respectivamente. Neste caso, os métodos CLTD/SCL/CLF e TETD foram comparados e seus resultados foram validados através do software HAP v4.9. Foi observado que para as determinadas condições, enquanto o método TETD resultou em uma carga de resfriamento de 48700W, o método CLTD/SCL/CLF, que entregou 42700W, teve uma maior aproximação se comparado com o software v4.9, este tendo apresentado uma carga de 41500W. Além disso para determinada localização, é apontado que a hora de pico varia entre 14h e 16h, independente da orientação.

Em Spitler e Rees (1998) foi realizada uma comparação quantitativa para os procedimentos de cálculo da carga térmica de resfriamento nos Estados Unidos e do Reino Unido, sendo mais de 7000 diferentes combinações de cenários avaliados. Os resultados apontaram que, se comparado com o método de balanço de calor, o método das séries temporais de radiação apresentou um desvio significativamente alto se tratando da carga térmica de pico sob a condição de grandes quantidades de vidraças de painel único, atingindo uma diferença de 37%, enquanto para as demais condições os resultados obtidos ficaram dentro do esperado.

No estudo de Joudi (2015) foi realizada uma investigação sobre a carga térmica de resfriamento para construções típicas do Iraque. Dentre os métodos apresentados pela ASHRAE, foi selecionado o método RTS para a verificação, sendo o estudo realizado na cidade de Bagdá (Latitude de 33,3°N e Longitude de 44,4°E). O telhado com área de 22,25 m² e coeficiente global U de 0,371 W/m²K, duas paredes, uma orientada ao Nordeste com área de 8,32m² e outra orientada à Noroeste com área igual a 15,05 m² ambas com U igual a 0,5747 W/m²K, além de uma janela de 7,8 m² foram utilizados como parâmetros para o procedimento de cálculo. Os valores médios das cargas medida e teórica ao longo do dia resultaram em 1864,4 e 1690,3 W, respectivamente. Estes resultados demonstraram uma variação de cerca de 9,3%, o que infere uma boa concordância entre a carga de resfriamento média teórica e medida obtidas a partir da comparação utilizando o método das séries temporais.

MAO et al. (2018) realizaram uma comparação que abrange todos os cinco métodos apresentados pela ASHRAE em seus manuais desde o ano de 1967 até o presente, sendo eles o método de balanço de calor (HBM), o método das diferenças de temperatura totais equivalentes (TETD), o método das funções de transferência (TFM), o método de diferenças de temperatura de carga de resfriamento (CLTD/SCL/CLF) e o método das séries temporais de radiação (RTS). Neste determinado estudo, considerando os resultados obtidos referentes aos dois últimos métodos mencionados, concluiu-se que o método RTS se mostrou como sendo o mais preciso dos métodos simplificados, apresentando diferenças percentuais em relação as cargas medidas de 32,6% e 35,9% para construções pesadas e leves, respectivamente. Enquanto isso, o método CLTD/SCL/CLF apresentou os piores resultados entre os métodos, com diferenças de 132,3% e 80,5% quando comparado com a medição. Portanto, foi apresentada a conclusão de que este método é o menos preciso entre todos os cinco analisados neste estudo.

Qi Zhang et al. (2017) analisou sete prédios com funcionalidade de escritórios em Hong Kong com uma área bruta de 549000 m². Quarenta e seis inquilinos foram selecionados de forma aleatória dentro dos sete edifícios apresentados com a intenção de investigar sua área ocupada, número de funcionários, além de cargas de iluminação e tomadas utilizados por um período de 2 semanas em 2012. Os dois principais objetivos do estudo foram obter a distribuição dos ganhos de calor internos do projeto e compreender a lacuna entre a capacidade de refrigeração instalada e os picos de carga de resfriamento reais dos edifícios. A análise mostrou um intervalo bastante expressivo, na faixa de 19% e 45%, entre a capacidade do equipamento de refrigeração selecionado e a carga de pico real, observando-se então, que métodos que superestimam o valor da carga térmica afetam de uma forma ainda maior a diferença real entre a carga térmica pico e a capacidade do equipamento.

Considerando que existe ainda a necessidade de uma comparação voltada mais especificamente para os métodos de cálculo da carga térmica RTS e CLTD/SCL/CLF, o objetivo do presente trabalho é abordar estes dois diferentes métodos que apresentam características e procedimentos completamente distintos. Busca-se então, realizar uma análise do comportamento dos seus resultados, tendo como ponto de investigação fatores que possuem maior influência para a obtenção dos resultados, apontando assim o seu grau de interferência na solução final.

2. FUNDAMENTAÇÃO

2.1 Método das séries temporais de radiação (RTS)

Spitler et al. (1997) descreve como sendo um método novo para a realização do cálculo da carga térmica de resfriamento derivado do chamado método de balanço de calor, substituindo os outros métodos simplificados apresentados nos manuais da ASHRAE. Além disso, este método é caracterizado por se basear em uma série de fatores destinados ao cálculo do ganho de calor condutivo, contando com uma sucessão de 24 termos, cobrindo as 24 horas do dia, utilizados para converter o ganho instantâneo de calor radiante em carga de resfriamento.

Por ser um método simplificado, algumas das suas características o diferem do método de balanço de calor. Costa (2010) apresenta estas simplificações afirmando que não ocorre uma análise completa para o balanço térmico em superfícies externas, sendo assim, a análise individual de convecção para o ar externo, radiação para o meio e radiação solar são substituídas por um único modelo de transferência de calor, que envolve a diferença entre a temperatura do ar externo e uma temperatura equivalente, chamada de temperatura sol-ar.

Em complemento a isso, para as superfícies internas também não é realizado um balanço térmico completo, e sim, é pressuposto que as superfícies se encontram na mesma temperatura

do ar interno. Apresentando ainda as características deste método, Rees et al. (1998) descreve este modelo como sendo um procedimento em duas etapas, se mostrando diferente de métodos mais antigos como o CLTD/SCL/CLF. Isto significa que o cálculo realizado para a obtenção da carga térmica não é diretamente obtido pelos dados de entrada. Ao invés disso, inicialmente os ganhos de calor convectivo e radiante são calculados para cada hora do dia, na sequência é possível obter os valores para a carga de resfriamento. Para ambos os métodos a utilização de fatores de tempo específicos para cada etapa é necessária.

Em relação ao procedimento genérico de cálculo, a ASHRAE (2017) apresenta um passo a passo geral para o cálculo da carga térmica de resfriamento para cada componente como paredes, janelas, pessoas, iluminação, entre outros. Ele consiste em, primeiramente calcular o perfil das 24 horas dos ganhos de calor do componente para o dia de projeto (para condução, considera-se o atraso aplicando as séries temporais de condução), então separar os ganhos de calor em parcelas radiantes e convectivas e aplicar as séries temporais radiantes adequadas à parte radiante dos ganhos de calor para contabilizar o atraso de tempo na conversão para carga térmica. Por fim é necessário somar a parte convectiva da carga térmica com a parte radiante para determinar a carga térmica de resfriamento para cada componente em cada hora do dia.

Em ASHRAE, 2017 cap. 18 ainda é apresentado o procedimento detalhado para o cálculo da carga térmica de resfriamento. Por ser um processo extenso, um diagrama é apresentado no APÊNDICE I, indicando a série de passos necessária para obter a carga térmica de resfriamento. Porém, ainda assim alguns pontos principais do procedimento de cálculo serão apresentados nesta seção por serem considerados elementos de grande importância.

2.1.1 Temperatura sol-ar

A radiação solar é incluída no cálculo da taxa de transferência de calor através de uma temperatura equivalente chamada de temperatura sol-ar. Esta representa o efeito combinado da radiação solar incidente na superfície com as trocas térmicas entre a superfície e o meio (convecção e radiação).

A obtenção desta variável é essencial para a determinação do ganho de calor através das superfícies externas, e ela tem sua origem no balanço dos fluxos de calor para a superfície externa de uma parede opaca. Assumindo que a taxa de transferência de calor pode ser expressa em termos da temperatura sol-ar, se obtém a equação definitiva para esta temperatura dada pela eq. (1)

$$t_e = t_o + \frac{\alpha E_t}{h_o} - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_o} \quad (1)$$

onde t_o é a temperatura de bulbo seco externa [°C]; α é a absorvidade da superfície; E_t é a radiação solar total incidente sobre a superfície [W/m²]; h_o é o coeficiente de transferência de calor combinado (radiação e convecção) na superfície externa [W/m²K] e $\varepsilon \Delta R$ representa a troca de radiação entre o céu e um corpo negro a temperatura t_o [W/m²];

De acordo com Spitler (2014), o modelo de Céu Claro, que é utilizado para o cálculo da radiação solar total incidente sobre a superfície, e conseqüentemente para a obtenção da temperatura sol-ar, foi atualizado em 2013 para um modelo que utiliza um algoritmo completamente diferente. O modelo antigo, que era aplicado em métodos anteriores ao RTS, como por exemplo o CLTD/SCL/CLF, chamado de modelo A, B, C, trabalhava com a determinação da radiação solar total através destes três coeficientes. Enquanto isso, o modelo de 2013 implementado no método das séries temporais radiantes inclui cálculos da irradiância normal extraterrestre, massa de ar, profundidade óptica do feixe, profundidade óptica difusa, feixe de ar expoente de massa e expoente de massa de ar difuso para a sua resolução, cujas

equações e procedimento de cálculo estão apresentados detalhadamente em ASHRAE, 2017 p. 14.1. A irradiância solar total, presente na eq. (1) acima, é dividida em três parcelas sendo elas a irradiância direta ($E_{t,b}$), a irradiância difusa ($E_{t,d}$), e a irradiância refletida pelo o solo ($E_{t,r}$). A irradiância direta sobre a superfície inclinada que é apresentada a partir da eq. (2) abaixo, é dada em função da irradiância normal que pode ser determinada a partir do momento que são definidos os ângulos relacionados à posição do sol

$$E_{t,b} = E_b \cos \theta \quad (2)$$

onde E_b é a irradiância normal [W/m^2] e θ representa o ângulo de incidência [$^\circ$]. A irradiância difusa sobre a superfície vertical é dada pela eq. (3) abaixo

$$E_{t,d} = E_d Y \quad (3)$$

onde E_d representa a irradiância difusa sobre uma superfície horizontal [W/m^2] e Y representa a razão de irradiância difusa de céu claro em uma superfície vertical para irradiância difusa de céu claro na horizontal, que é tratada em função apenas do ângulo de incidência; é importante apontar ainda, que no caso de um cenário para uma superfície não vertical, com uma inclinação Σ , outras duas relações surgem, referentes a uma inclinação de $\leq 90^\circ$ ou $> 90^\circ$. Por último tem-se a irradiância refletida pelo solo sobre a superfície inclinada que é dada pela eq. (4) para todas orientações

$$E_{t,r} = (E_b \sin \beta + E_d) \rho_g \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (4)$$

onde β é o ângulo de altitude solar [$^\circ$] e ρ_g é o albedo, geralmente dada pelo valor 0,2.

2.1.2 Ganhos de calor por condução

No método RTS, os ganhos de calor por condução através das paredes e telhados são calculados utilizando os chamados fatores temporais de condução. Estes fatores que são calculados para cada tipo de parede e telhado dentro de 24 horas, fornecem uma solução de série temporal para o problema de transferência de calor condutivo transiente e unidimensional. (SPITLER, 1997). Portanto, os fatores temporais de condução chamados de CTS, buscam uma forma de comparar as características do atraso do ganho de calor condutivo através dos diferentes tipos de superfícies exteriores, buscando assim solucionar o problema de transferência de calor condutivo transiente e unidimensional. Então, esta entrada de calor é definida pela eq. (5)

$$q_{i,\theta-n} = UA(t_{e,\theta-n} - t_{rc}) \quad (5)$$

onde $q_{i,\theta-n}$ é a entrada de calor condutivo da superfície em função da hora [W]; U é o coeficiente global de transferência de calor para a superfície [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]; A é a área da superfície [m^2]; $t_{e,\theta-n}$ é a temperatura sol-ar em função da hora [$^\circ\text{C}$] e t_{rc} é temperatura constante do ar para o ambiente [$^\circ\text{C}$]. O ganho de calor condutivo então pode ser definido pelo somatório das entradas de calor para as 24 horas do dia, multiplicadas pelos seus respectivos fatores temporais de condução, como é visto na eq. (6)

$$q_\theta = c_0 q_{i,\theta} + c_1 q_{i,\theta-1} + c_2 q_{i,\theta-2} + c_3 q_{i,\theta-3} + \dots + c_{23} q_{i,\theta-23} \quad (6)$$

onde q_θ é o ganho de calor condutivo para a superfície [W]; $q_{i,\theta}$ é a entrada de calor para a hora corrente [W] e c_n são os fatores de tempo condutivos.

2.1.3 Ganhos de calor internos

Os ganhos de calor interno provenientes de pessoas, iluminação e equipamentos, atualmente podem representar a maior parte da carga de resfriamento em uma construção, principalmente por causa dos avanços tecnológicos, que resultam em uma maior modernização dos ambientes. Fatores como o aumento do uso equipamentos eletrônicos e o advento de espaços de ocupação densa exemplificam o motivo do aumento considerável das cargas internas atualmente. (ASHRAE, 2017, p. 18.3).

Qi Zhang et al. (2017) cita que dentro do procedimento de cálculo visando um ambiente climatizado, as cargas de resfriamento de pico são normalmente obtidas através de uma apuração na fase inicial do projeto, onde os ganhos reais de calor interno são altamente incertos. Sendo assim, os engenheiros geralmente tratam destas incertezas assumindo os piores cenários possíveis, utilizando de grandes fatores de segurança.

No entanto, estes cenários raramente acontecem na realidade, e apesar desta abordagem atender aos requisitos pré-determinados, isso resultará em um projeto com parâmetros superiores ao necessário. No estudo em questão, a análise mostrou um intervalo na faixa de 19% e 45%, entre a capacidade do equipamento de refrigeração selecionado e a carga de pico real. Sendo assim, é clara a necessidade de uma correta análise dos ganhos de calor internos tomando como objetivo uma alta eficiência no cálculo da carga térmica de resfriamento, e consequentemente, um projeto bem dimensionado.

O ganho de calor relacionado à ocupação é dividido em duas parcelas, a sensível e a latente, sendo que as quantidades totais e relativas de calor sensível e latente variam dependendo do nível de atividade (SPITLER, 2014). Estas parcelas que estão apresentadas através das eq. (7) e eq. (8) abaixo, respectivamente.

$$q_s = q_{s,per}N(CLF) \quad (7)$$

$$q_l = q_{l,per}N(CLF) \quad (8)$$

Onde q_s é o ganho de calor sensível dos ocupantes [W]; q_l é o ganho de calor latente dos ocupantes [W]; $q_{s,per}$ é o ganho de calor sensível por pessoa [W/pessoa]; $q_{l,per}$ é o ganho de calor latente por pessoa [W/pessoa] e N é o número de ocupantes.

Sendo a iluminação um importante componente gerador de carga interna, uma correta estimativa para o ganho de calor deste é de grande importância para uma avaliação da carga de resfriamento em um determinado ambiente. Spitler (2014) afirma que a taxa de ganho de calor para qualquer momento pode ser bastante distinta do equivalente de calor proveniente da energia fornecida instantaneamente às fontes de iluminação. Ainda em Spliter é dito que a principal fonte de calor tem sua origem nos elementos emissores de luz, ou lâmpadas, porém componentes associados às luminárias que tem o papel de abrigar estes elementos podem gerar um calor adicional significativo. Normalmente, a taxa instantânea de ganho de calor da iluminação elétrica pode ser dada pela eq. (8) dada abaixo

$$q_{il} = WF_{ul}F_{sa}(CLF) \quad (9)$$

onde q_{il} é o ganho de calor referente à iluminação [W]; W é a potência total instalada [W]; F_{ul} é o fator de uso, dado pela relação entre a potência em uso e a potência total instalada e F_{sa} é o

chamado fator especial de tolerância, relacionado com a proporção do consumo de energia das luminárias. Este fator leva em consideração o calor dos reatores, sendo assim, normalmente é igual a 1,2 para lâmpadas fluorescentes e 1,0 para lâmpadas incandescentes devido à falta de reatores nesta última. Sobre o coeficiente CLF apresentado nas equações, é importante mencionar que este é igual a 1 quando se trata da utilização do método RTS, enquanto que para o método CLTD/SCL/CLF as equações são exatamente iguais, tendo apenas este fator como sendo diferente de 1. Fisher e Chantrasrisalai (2007) realizaram um estudo experimental composto de um total de 9 diferentes tipos de luminárias além de 6 categorias distintas, apresentando dados e projeto para a fração de espaço climatizado e frações radiativas de ondas curta e longa definidas como as razões de ganhos líquidos de calor radiante para o uso de energia elétrica de iluminação.

Alguns destes dados, junto a notas para auxiliar na sua utilização se encontram tabeladas em Spitler (2014, p.124). Por fim, os equipamentos representam também uma parcela importante da carga térmica interna para ambientes, atualmente cada vez mais equipamentos eletrônicos fazem parte do dia-a-dia principalmente em um ambiente de trabalho. Spitler (2014) afirma que existe uma grande disponibilidade de dados com o objetivo de obter resultados confiáveis. Portanto, a avaliação cuidadosa do cronograma operacional e o fator de carga para cada equipamento presente em um determinado ambiente é essencial. Em ASHRAE, 2017 são apresentadas diversas tabelas assim como equações específicas para diferentes tipos de equipamentos, com aplicações diversas.

2.1.4 Conversão dos ganhos de calor em carga térmica

No método das séries temporais radiantes, o cálculo da carga de resfriamento se torna complicado pela troca radiante entre superfícies, móveis, divisórias e outros componentes na zona térmica onde a maioria destas fontes de ganho de calor transferem energia tanto por convecção como por radiação. Apesar dos ganhos por convecção serem instantaneamente convertidos em carga térmica de resfriamento, os ganhos de calor radiantes introduzem uma dependência em relação ao tempo que não é facilmente quantificada. A radiação é absorvida por estruturas que possuem capacidade de absorver, armazenar e liberar calor e depois é transferida por convecção para o ar circundante. Esse processo cria um intervalo de tempo e um efeito de amortecimento. (ASHRAE, 2017, p. 18.27).

Neste caso, fatores de tempo radiantes são usados para calcular a carga de resfriamento para uma determinada hora com base nos ganhos de calor atual e passado. Assim, a série de tempo radiante para uma zona específica dá a resposta dependente do tempo da zona a um único pulso de energia radiante. A série temporal radiante assim gerada tem como função converter a porção radiante dos ganhos de calor para uma determinada hora em carga de resfriamento de acordo com a eq. (10) abaixo

$$Q_{r,\theta} = r_0 q_{r,\theta} + r_1 q_{r,\theta-1} + r_2 q_{r,\theta-2} + r_3 q_{r,\theta-3} + \dots + r_{23} q_{r,\theta-23} \quad (10)$$

onde $Q_{r,\theta}$ representa a carga de resfriamento radiante Q_r para uma determinada hora θ [W]; r_n são os fatores da série temporal de radiação; $q_{r,\theta}$ é o ganho de calor radiante para uma determinada hora [W] e $q_{r,\theta-n}$ é o ganho de calor n horas atrás [W].

2.2 Método das diferenças de temperatura da carga de resfriamento/carga de resfriamento solar/fator de carga de resfriamento (CLTD/SCL/CLF)

Spitler et al. (1993) inicia sua análise citando este método como sendo um procedimento desenvolvido com o intuito de realizar os cálculos manualmente, utilizando valores para os fatores CLTD e CLF de forma tabelada. O ganho de calor através das paredes e telhados depende da localização, forma e orientação de uma determinada construção, bem como das superfícies internas do espaço climatizado. Sendo assim, selecionar um sistema de condicionamento de ar adequado para qualquer construção, requer uma estimativa precisa e eficiente da carga de resfriamento. Assim, o método CLTD/SCL/CLF é dado como um dos métodos programados em planilha, mais simples e rápidos utilizados para estimar a carga térmica de resfriamento.

O CLTD/SCL/CLF é definido como sendo um método de apenas um passo. Sendo assim, seus três fatores (CLTD, CLF e SCL) foram gerados com o intuito de calcular de forma direta a carga de resfriamento relacionada ao ganho de calor por condução através das paredes e telhados iluminados pelo sol e condução através de vidros, ganho de calor solar através vidros assim como ganhos de calor devidos às fontes internas e aprimorar o cálculo da carga solar através de vidros buscando incluir parâmetros adicionais para uma melhor precisão, respectivamente. (ASHRAE, 1997, p. 28.3). Relembrando que por ser um método de fácil utilização, a ASHRAE apresenta o seu procedimento de cálculo sendo realizado de forma bastante direta, e este é apresentado de forma completa através de um fluxograma no APÊNDICE II. Para o cálculo da carga térmica de resfriamento externa como paredes, telhado e condução através dos vidros, é utilizada a eq. (11) apresentada abaixo

$$q = UA(CLTD) \quad (11)$$

onde *CLTD* corresponde ao fator de diferença de temperatura para a carga de resfriamento para a superfície. Ainda em relação à carga externa de resfriamento, a carga térmica relacionada à irradiação solar através dos vidros é dada pela eq. (12) apresentada a seguir.

$$q = A(SC)(SCL) \quad (12)$$

Onde *SC* representa o coeficiente de sombra e *SCL* representa o fator da carga de resfriamento solar com ou sem sombras internas. Em relação às cargas internas, provenientes das pessoas e equipamentos, o procedimento é o mesmo apresentado anteriormente para o método das séries temporais de radiação nas eq. (7), (8) e (9), com a única diferença da presença do fator CLF diferente de 1, esse coeficiente é responsável pelo atraso de tempo entre os picos de temperatura externa e interna e é representado pelo valor 1 no método RTS pelo fato de o atraso ser corrigido através dos fatores condutivos e radiantes.

Este é definido como o fator da carga de resfriamento dependente dos horários de ocupação, e se apresenta sendo multiplicado às cargas sensível e latente para cada componente de carga interna. Por fim, é importante mencionar que todas as tabelas referentes aos parâmetros e fatores citados acima, para diferentes materiais, diversas atividades, entre outros, estão disponibilizados em ASHRAE, 1997 cap. 28.

3. METODOLOGIA

Pelo fato dos métodos RTS e CLTD/SCL/CLF terem sido validados pela ASHRAE em seus manuais, o procedimento de cálculo apresentado segue os passos retratados nas versões de 2017 e 1997, para o procedimento das séries radiantes e para o das diferenças de temperatura

da carga de resfriamento, respectivamente. Por envolver um grande número de equações e procedimentos, a metodologia de cálculo utilizada é apresentada nos APÊNDICES I e II, em forma de diagramas de fluxo. O método RTS, por ser um método de duas etapas, ou seja, existe a obtenção dos valores de entrada e ganhos de calor e estes, através dos fatores temporais, são convertidos em carga térmica, se mostra um pouco mais trabalhoso, tendo alguns passos a mais que o CLTD/SCL/CLF. No fluxograma do APÊNDICE I mencionado anteriormente, estão descritos todos os passos necessários para a determinação da carga térmica de resfriamento para uma determinada hora do dia, desde a análise e determinação dos valores de entrada, cálculo dos ganhos de calor para cada componente presente, sendo estes internos ou externos, a divisão entre parcelas convectivas e radiantes seguido da implementação dos fatores temporais e por fim, a soma de todas as parcelas de carga para obter a carga de resfriamento total.

Com relação ao método das diferenças de temperatura da carga de resfriamento CLTD/SCL/CLF, o procedimento de cálculo que é apresentado no fluxograma do APÊNDICE II, se mostra um pouco mais simples se comparado com o anterior. Por ser um método de apenas um passo, ou seja, os dados de entrada são aplicados diretamente para o cálculo da carga térmica de resfriamento, ele possui uma construção mais direta. O fluxograma apresentado no APÊNDICE II mostra um número de procedimentos bem reduzido se comparado com o fluxograma referente ao RTS, apresentando etapas relativas ao cálculo das cargas térmicas externa e interna que se dão pelo somatório das cargas de cada componente presente e a obtenção da carga térmica total para uma determinada hora do dia.

Sobre a sua implementação, por serem métodos compatíveis e caracterizados pela sua fácil adaptação a uma planilha, a utilização do editor de planilhas da Microsoft se mostrou como a melhor forma para a construção destes. O Excel, por ser uma ferramenta bastante versátil e que apresenta uma confiabilidade alta, foi utilizado de forma que todos os procedimentos apresentados nos fluxogramas acima foram explicitamente calculados, obtendo uma fácil visualização de todos os passos assim como de todas as equações utilizadas no processo. Com isso, são exibidos dentro das planilhas de cálculo todos os dados iniciais, as equações e os mecanismos utilizados tanto no processo de validação dos dois métodos, como também na comparação entre eles.

3.1 Dados necessários para implementação dos métodos

Para a implementação dos métodos, dados climáticos e geográficos como temperaturas, orientação de paredes e telhado, latitude e longitude da localidade entre outros, assim como informações sobre os materiais e área das superfícies, além dos fatores e coeficientes utilizados em cada método, são necessários para que o procedimento de cálculo possa ser realizado de forma completa e efetiva. Com relação ao método RTS, o manual da ASHRAE de 2017 apresenta tanto os dados climáticos e geográficos, como os dados para os materiais e coeficientes das séries temporais de forma completa, abrangendo informações e tabelas para regiões do mundo inteiro, o que torna a obtenção dos elementos necessários para executar os procedimentos de cálculo acessível. Entretanto, com relação ao método CLTD/SCL/CLF, o manual de 1997 apresenta uma quantidade de informações reduzida. Com relação aos dados climáticos e geográficos, ainda é possível buscar as informações de forma simples. Porém as tabelas de coeficientes referentes ao cálculo da carga térmica das superfícies como paredes, telhados e janelas são bastante limitadas, apresentando poucas variedades de materiais para as superfícies e apenas valores relativos a uma latitude de 40° norte. Foi ainda realizada uma procura na literatura com o intuito de buscar dados referentes a outras localidades, porém a única referência adicional encontrada apresenta apenas tabelas para latitudes de 24°, 36° e 48° norte, que estão presentes em MCQUISTON e SPITLER, 1992.

Diante disso, apesar da validação dos métodos não apresentar complicações por ser feita de forma isolada para cada um, para efetuar uma comparação destes, foi necessária a seleção de uma região acessível para os dois, em que os dados necessários fossem de fácil acesso.

3.2 Validação do método RTS

Com o objetivo de validar o método RTS implementado dentro do Excel, foi utilizado como parâmetro o exemplo 9.1 em ASHRAE, 2017. O problema proposto consiste em um único cômodo de 12 m² localizado na cidade de Atlanta, em Georgia nos Estados Unidos. As condições climáticas de projeto são apresentadas na tabela 1 presente no capítulo 14 do manual, onde a temperatura de bulbo seco externa e a temperatura interna de projeto são 33,1 °C e 23,9°C, respectivamente. O caso proposto apresenta suas superfícies externas com exposição a sul e a oeste, com orientações de 39° a leste do sul e 60° a oeste do sul seguindo o exemplo da figura presente no APÊNDICE IV. Referente aos ganhos de calor internos, a ocupação é dada por 1 pessoa realizando atividades moderadas de escritório das 8 às 17 horas e a iluminação de luminárias fluorescentes e lâmpadas T-8 corresponde a um consumo de 110 W em um período das 7 às 19 horas. Além de um computador e uma impressora com um total de 130 W operando também das 8 às 17 horas representando a carga interna ligada aos equipamentos. Para informações mais detalhadas do problema, ele está disposto a partir da página 18.44 do manual.

Esta validação consiste em comparar os resultados apresentados no manual de 2017 com os obtidos dentro do modelo construído no Excel, onde é realizada uma análise a partir da eq. (16) abaixo que representa o erro relativo, ou seja, a razão entre o erro absoluto e o valor verdadeiro.

$$e_r = 100 * \frac{|VV-VE|}{|VV|} \quad (16)$$

Onde e_r corresponde ao erro relativo [%]; VV é valor verdadeiro e VE é o valor encontrado. Assim este procedimento é realizado para cada componente de carga térmica presente no problema, verificando assim os valores para a carga de resfriamento de cada componente para cada hora do dia, além da construção da média dos erros obtidos.

3.3 Validação do método CLTD/SCL/CLF

O processo de validação para o método CLTD/SCL/CLF consistiu no mesmo procedimento para a validação do método RTS. Porém, neste caso foi selecionado o exemplo presente em ASHRAE, 1997 cap.28, e este foi adaptado para o sistema internacional de medidas. O problema consiste em uma sala de escola com 6 m de largura e 6 de comprimento para uma latitude de 40°. As condições climáticas de projeto são dadas no problema, onde a temperatura de bulbo seco interna corresponde a 25,5 °C. O caso apresenta ainda apenas uma parede e uma janela exteriores, onde o coeficiente global de transferência de calor da janela é dado por 7 W/m²K enquanto o da parede é calculado a partir das informações dadas sobre os materiais desta. Sobre a carga interna o problema descreve uma ocupação de 20 pessoas que entram no ambiente às 8 horas e permanecem no local até as 16 horas. Em relação a iluminação, a carga térmica advém de 300 W durante o mesmo período de ocupação. A solução deste caso vem da determinação da carga térmica de resfriamento para as 9 e as 12 horas do dia 21 de julho para as condições mencionadas anteriormente. Como dito inicialmente, a validação se deu através da comparação dos resultados obtidos pelo manual da ASHRAE com os obtidos dentro do modelo no Excel, utilizando a mesma eq. (16) para a obtenção do erro relativo para cada componente de carga térmica presente no problema para as horas estipuladas.

3.4 Comparação entre os métodos

Após a validação dos dois métodos, é realizada então a comparação entre eles com o objetivo de abordar suas principais características, buscando realizar uma análise do comportamento dos seus resultados. Para este procedimento foi selecionada a cidade norte-americana de Champaign, localizada no estado de Illinois. A escolha é justificada pela questão já apresentada acima referente ao fato dos manuais da ASHRAE não disponibilizarem uma grande variedade de dados se tratando do método CLTD/SCL/CLF. Tendo isso em mente, buscou-se encontrar uma cidade que mais se aproximasse da latitude de 40° norte, relativa às tabelas disponíveis em ASHRAE, 1997. O caso proposto, que é representado pela Fig. (2) abaixo, apresenta condições climáticas de projeto listadas no apêndice presente em ASHRAE 2017 cap.14, apresentando uma temperatura de bulbo seco externa de 30,9 °C e temperatura interna de projeto de 25°C, além de latitude e longitude iguais a 40,053° norte e 88,373° oeste, respectivamente.

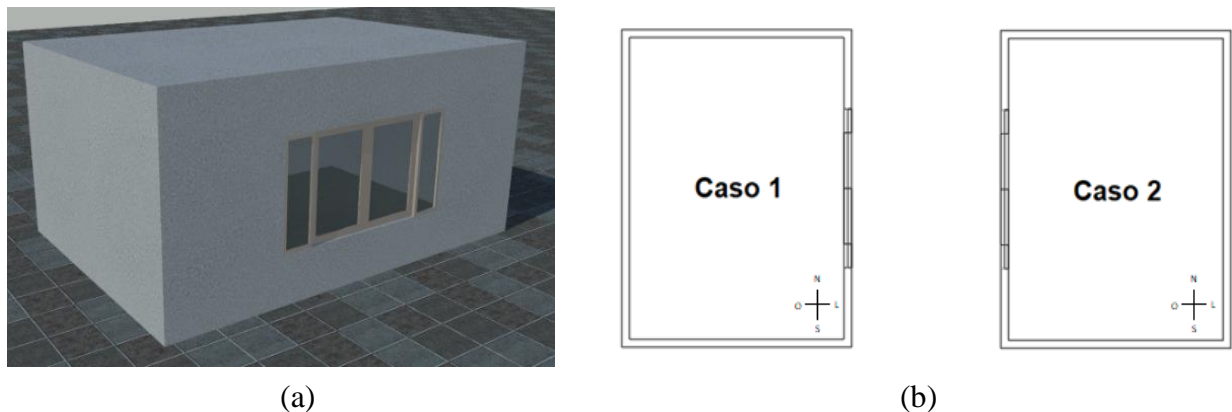


Figura 2 – Desenho esquemático (a) do problema estudado e (b) casos abordados na comparação dos métodos.

Com relação às superfícies externas, foram consideradas paredes, janelas e telhado com materiais e configurações que fossem mais próximas entre si dentro das tabelas de fatores para ambos os métodos. Isso se dá pelo fato de os dados oferecidos pelos manuais não serem totalmente compatíveis, além de que o método CLTD/SCL/CLF apresenta uma variedade bem reduzida de configurações em suas tabelas, portanto foi necessário buscar uma compatibilidade para todos os componentes geradores de carga térmica.

Sobre a carga interna, a ocupação é dada por 1 pessoa realizando atividades moderadas de escritório das 8 às 17 horas e a iluminação corresponde a um consumo de 300 W ao longo do mesmo período. Além de um computador e uma impressora com um total de 130 W operando também das 8 às 17 horas representando a carga interna ligada aos equipamentos. Para informações mais detalhadas do problema, o APÊNDICE III apresenta todos os dados iniciais do caso em estudo. Duas formas principais de abordagem do problema serão utilizadas, primeiramente a comparação entre os dois métodos será apresentada a partir de uma análise comparativa componente por componente. Isso apresentará o perfil de carga térmica, além de seus respectivos valores para as 24 horas do dia, isoladamente para todos os agentes geradores de carga para todas orientações. Em seguida, serão apresentadas as diferenças entre os dois métodos através de uma comparação abrangendo todos os componentes de carga somados formando a carga térmica de pico total calculada. Esse procedimento será dividido em dois casos específicos e opostos. Na Fig. (2-b) apresentada acima, estão dispostos os dois casos mencionados, onde o primeiro corresponde a um cômodo com a orientação da janela voltada para o leste, enquanto o caso 2 apresenta este mesmo componente, porém para uma orientação

oposta, ou seja, para o oeste. O problema foi apresentado para esses dois casos com o intuito de expor a comparação entre as cargas de pico totais para os dois métodos além de mostrar a influência das janelas para o cálculo da carga térmica e determinação do horário de pico. Utilizando a eq. (17), pretende-se analisar os resultados referentes à carga térmica de resfriamento para cada hora do dia, para cada parcela geradora de carga térmica do ambiente observado, além de uma inspeção da carga térmica total por horário e da carga térmica de pico referente a cada um dos dois métodos aplicados, estabelecendo um padrão de comportamento para estes

$$\Lambda = 1 - \frac{Q_{CLTD}}{Q_{RTS}} \quad (17)$$

onde Q_{CLTD} é a carga obtida através do método CLTD/SCL/CLF [W] e Q_{RTS} é a carga obtida através do método RTS [W]. Este fator Λ procura apresentar o comportamento destes dois métodos, sendo assim, se $\Lambda > 0$ o método RTS sempre superestima o CLTD/SCL/CLF. Porém se $\Lambda < 0$, o caso se inverte e o CLTD/SCL/CLF sempre irá superestimar o método RTS.

4. RESULTADOS

Abaixo estão dispostos nas Fig. (3), (4) e (5), os gráficos referentes à carga térmica em função da hora para cada componente do caso em estudo, sendo apresentados os resultados dos dois métodos analisados.

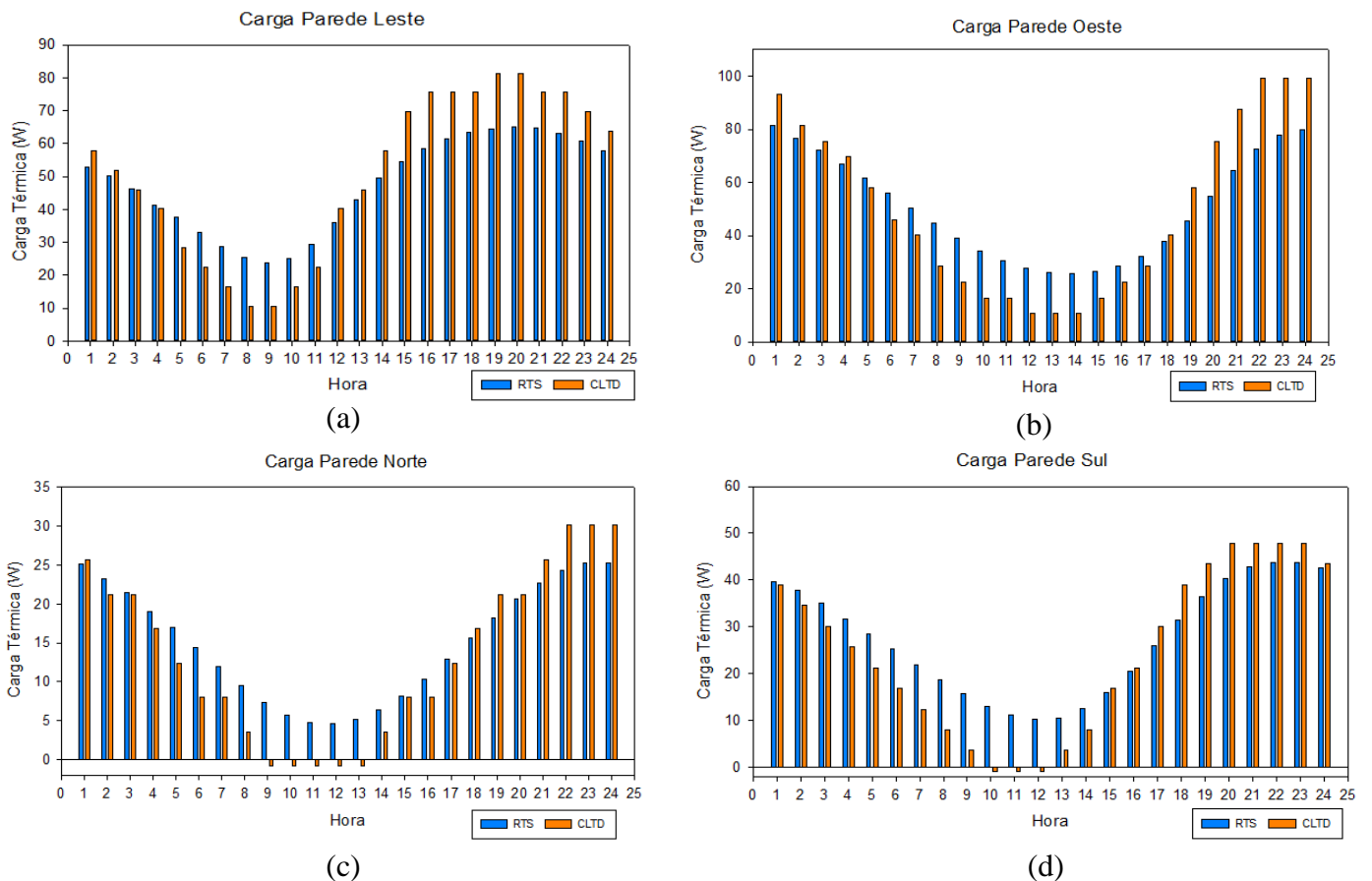
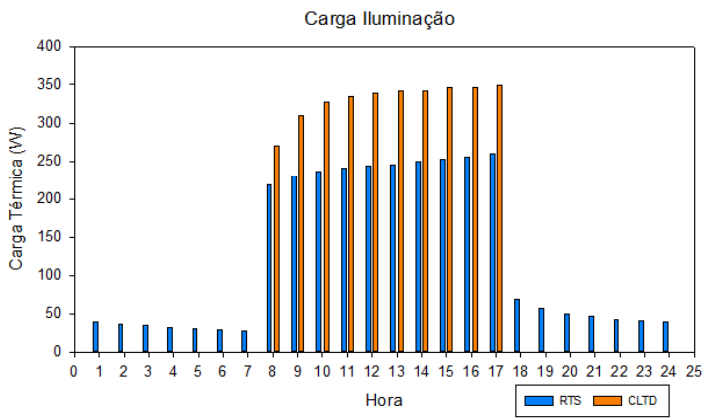
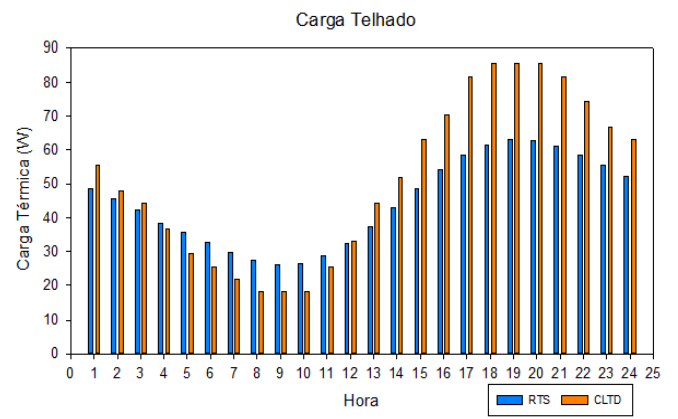


Figura 3 – Distribuição da carga térmica das paredes (a) Leste (b) Oeste, (c) Norte e (d) Sul ao longo das 24 horas do dia.

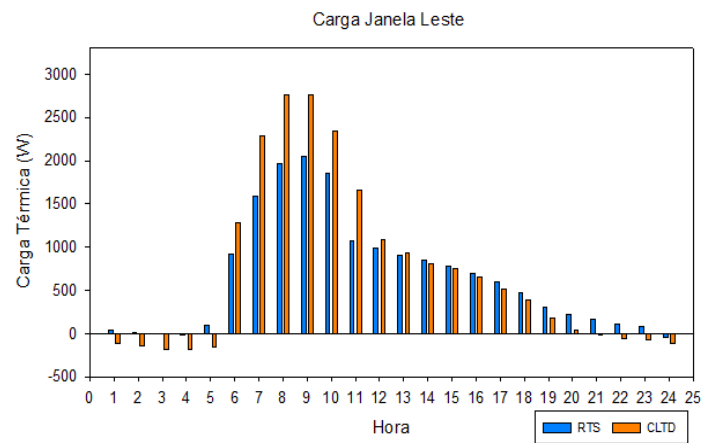


(a)

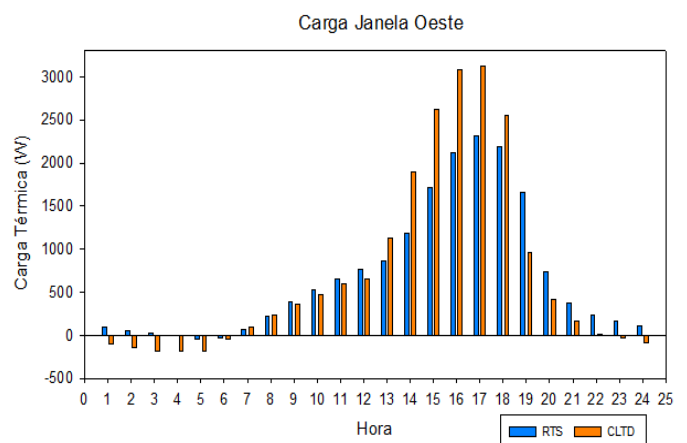


(b)

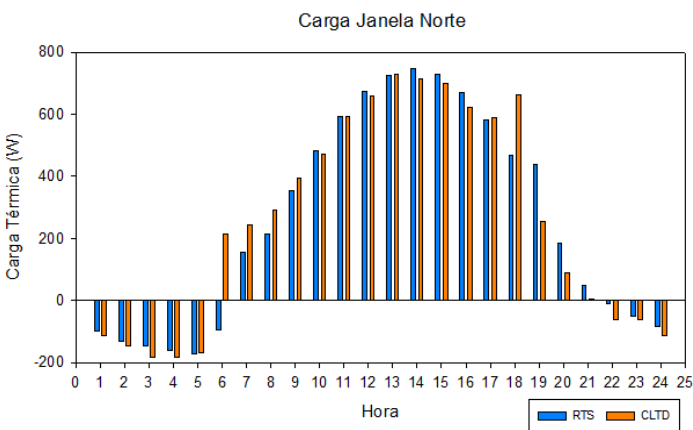
Figura 4 – Distribuição da carga térmica da (a) Iluminação e (b) Telhado ao longo das 24 horas do dia.



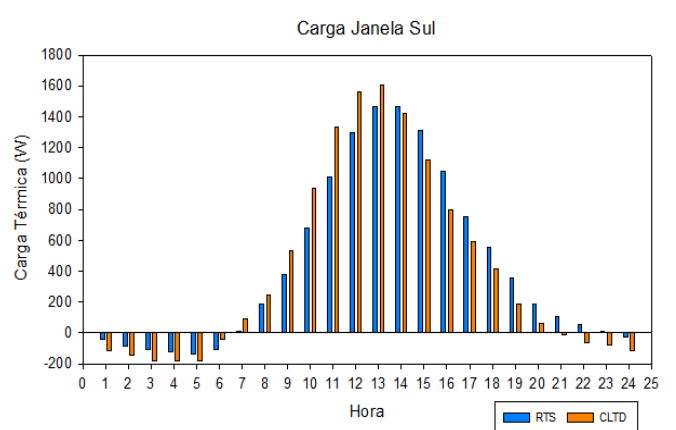
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5 – Distribuição da carga térmica das janelas (a) Leste (b) Oeste, (c) Norte e (d) Sul ao longo das 24 horas do dia.

Para todos os componentes de carga, exceto a iluminação que possui uma abordagem um pouco diferente entre os dois métodos, onde o RTS distribui a carga térmica ao longo das 24 horas do dia enquanto o CLTD/SCL/CLF considera apenas as horas de utilização da iluminação (neste caso das 8 às 17 horas), apesar de haverem diferenças bastante expressivas chegando a mais de 30% para as cargas de pico, o perfil durante as 24 horas se mostra qualitativamente consistente entre os dois métodos.

A fig. (5), que apresenta a carga das janelas para as quatro diferentes orientações de forma isolada, mostra que esta tem uma importância significativa no cálculo. Isso fica claro observando que as cargas térmicas das janelas atingem valores pico muitos superiores a qualquer outro componente de carga apresentado. Portanto os horários de pico para a carga total de resfriamento são determinados pelos horários com maior incidência de sol nas janelas. Isto é notável quando se comparam as Fig. (5-a) e (5-b) que apresentam comportamentos completamente opostos. Enquanto a janela que está orientada para o leste apresenta horário de pico às 9 horas da manhã, a janela com orientação para oeste apresenta o horário de pico às 17 horas, lembrando os parâmetros de entrada utilizados em todas as janelas, como composição e área, são idênticos, apontando a orientação como o único fator de influência sobre a distribuição de carga de resfriamento.

Com relação as discrepâncias entre o CLTD/SCL/CLF e o RTS, abaixo é apresentada a Tabela 1, que mostra a diferença relativa entre os dois métodos para os componentes de carga tratados. A Tabela mostra que mesmo os métodos apresentando um mesmo perfil de distribuição de carga de resfriamento, a diferença relativa entre os dois ficou na faixa entre 10% e 50%, sendo que as diferenças relativas máximas correspondem às janelas sul e leste.

Tabela 1 – Diferença relativa entre os métodos referente aos componentes geradores de carga térmica.

Componente de carga	Diferença relativa entre os métodos (%)
Parede Leste	22,21
Parede Oeste	28,96
Parede Norte	39,52
Parede Sul	34,41
Janela Leste	50,91
Janela Oeste	21,61
Janela Norte	10,34
Janela Sul	49,40
Telhado	23,25

Um dos principais fatores que ocasionam esta discordância entre os resultados dos dois métodos apresentados é a utilização de dois modelos de Céu-Claro diferentes. Inicialmente o modelo chamado de A, B, C tinha sua aplicação em todos os métodos propostos nos manuais da ASHRAE, porém, a partir de 2013 foi implementado um modelo diferente, que inclui cálculos da irradiância normal extraterrestre, massa de ar, profundidade óptica do feixe, entre outros. Entretanto este modelo novo não foi implementado para todos os métodos apresentados pela ASHRAE, sendo assim observa-se que os novos cálculos de radiação solar e, conseqüentemente temperatura sol-ar, foram implementados para o método RTS, mas não para outros métodos simplificados.

O gráfico abaixo apresenta estas diferenças entre os modelos utilizados para os métodos RTS e CLTD/SCL/CLF através da disposição das temperaturas sol-ar obtidas para a parede leste do problema proposto acima ao longo das 24 horas do dia.

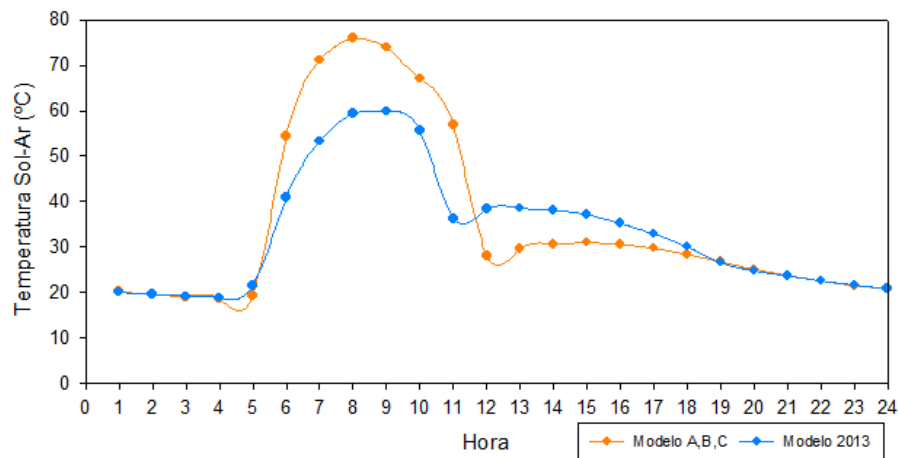


Figura 6 – Comparação dos modelos de Céu-Claro utilizados nos cálculos de carga térmica dos métodos CLTD/SCL/CLF e RTS.

Como nas fig. (3), (4) e (5) de carga térmica apresentadas anteriormente, o gráfico para as temperaturas sol-ar acima apresenta um comportamento bastante similar para os dois modelos, tendo perfis qualitativamente consistentes. Porém, o modelo de 2013, que apresenta um algoritmo diferente do antigo, mostra valores de temperatura inferiores ao modelo A, B, C na parte da manhã, entre as 5 e 11 horas e valores superiores na parte da tarde, entre as 12 e 18 horas, justificando um dos importantes pontos que geram divergência entre os resultados obtidos para os métodos. Além disso é possível notar que para as primeiras e últimas horas do dia, a temperatura sol-ar para os dois modelos de Céu-Claro se mostra inferior a temperatura interna do cômodo, o que explica o fato de nestes horários a carga térmica para as janelas na Fig. (5) ser negativa.

Com relação à carga térmica total de resfriamento, a Fig. (7) abaixo mostra dois perfis de ambientes, abordando os dois casos apresentados na seção anterior. Os gráficos mostram casos de dois cômodos apresentando apenas uma janela, que no caso 1 está orientada para o leste e no caso 2 para o oeste.

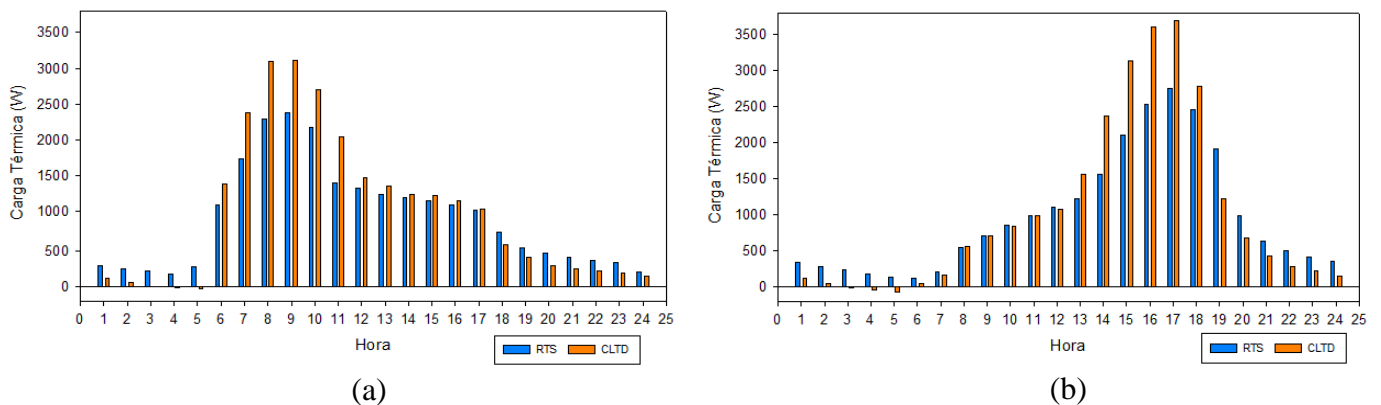


Figura 7 – Distribuição de carga térmica total com janela orientada para (a) leste e (b) oeste.

Os gráficos acima demonstram novamente a influência das janelas dentro do cálculo da carga térmica, é possível notar a similaridade entre os perfis da carga térmica total com os perfis das janelas leste e oeste.

Com relação ao valor obtido para as cargas térmicas de pico referentes aos métodos analisados, nota-se que o método CLTD/SCL/CLF superestima os valores em relação ao RTS nos dois casos apresentados acima. Para o caso 1 onde a janela está orientada para o leste, o horário de pico que se encontra às 9 horas, apresenta um resultado 31,23% maior para o método das diferenças de temperatura em relação ao método das séries temporais.

Referente ao caso 2, o horário de pico das 17 horas apresenta um percentual ainda maior que o anterior, chegando a 34,16%. MAO et al. (2018) em seu estudo que engloba a comparação de todos os cinco métodos de cálculo de carga térmica de resfriamento, incluindo os métodos CLTD/SCL/CLF e RTS, disponibiliza os resultados de carga de pico obtidos para diferentes parâmetros, sendo estes, construções leves e pesadas, além de vidros simples, duplos e triplos. Todos estes dados são apresentados na Tabela 2 junto aos resultados para os dois casos apresentados neste trabalho.

Tabela 2 – Resumo da comparação das cargas de pico para diferentes configurações.

Caso analisado								
Parâmetros	Caso 1	Caso 2	Leve vidro simples	Leve vidro duplo	Leve vidro triplo	Pesada vidro simples	Pesada vidro duplo	Pesada vidro triplo
RTS (W)	2381	2744	3412	2634	2323	4637	3723	3280
CLTD/SCL/CLF (W)	3124	3682	5976	5300	4756	6145	5469	4925
Diferença relativa (%)	31,21	34,18	75,15	101,21	104,74	32,52	46,90	50,15
Λ	-0,31	-0,34	-0,75	-1,01	-1,05	-0,33	-0,47	-0,50

Como é visto na tabela, em todos os casos o método CLTD/SCL/CLF superestima a carga térmica em comparação ao RTS, tanto nas situações estudadas neste trabalho como nas do artigo mencionado anteriormente. Também se nota que para construções pesadas, característica presente nos casos 1 e 2 e em três das situações de estudo de MAO et al. (2018), as diferenças relativas são menores, abrangendo valores entre de 30% e 51%, enquanto para construções leves as diferenças entre os dois métodos chegam a mais de 100%.

Em complemento a isso, a tabela mostra o coeficiente Λ apontado pela eq. (17) para os casos em questão, e para todos estes, o coeficiente se mostra menor que zero. Isso se dá pelo fato de que para a carga térmica total de pico, o método das diferenças de temperatura sempre resultará em valores de carga superiores independente da configuração.

Sendo assim, tendo analisado previamente os resultados apresentados pelo artigo de MAO et al. (2018), os resultados obtidos para os Casos 1 e 2 convergiram para uma solução esperada sobre os dois métodos, apresentando os dois como sendo métodos que geram resultados coerentes com os analisados previamente para a carga, apresentando diferenças relativas elevadas entre os dois.

5. CONCLUSÃO

Neste estudo, foi realizada uma comparação entre dois dos métodos da ASHRAE para o cálculo da carga térmica de resfriamento com o intuito de determinar as principais diferenças referentes ao processo de cálculo e, principalmente, em relação às suas exatidões.

O método CLTD/SCL/CLF apresenta algumas vantagens ligadas à sua execução simplificada e rápida, além de ser um método onde os dados iniciais podem ser diretamente aplicados para a obtenção da carga, porém ele apresenta dificuldades referentes à eficiência, além de possuir uma pequena quantidade disponível de informações, essencialmente quando se trata da escolha de materiais para as superfícies geradoras de carga.

Já o método RTS, se tratando de um método mais novo, se mostrou resultados considerados mais precisos se comparado com o mencionado acima, e apesar de apresentar uma sequência um pouco mais complexa e demorada de procedimentos, isto se paga pelo fato de o método gerar valores mais coerentes se comparados com os do CLTD/SCL/CLF, além de possuir uma maior variedade de informações acerca das variáveis necessárias para a obtenção da carga de resfriamento.

Em relação aos seus resultados, para os dois casos principais estudados na comparação, o método das diferenças de temperatura superestimou o método das séries temporais de radiação em 31,23% para o caso 1 e 34,16% para o caso 2, considerando as suas respectivas cargas de pico. Porém, os perfis de carga térmica para as 24 horas do dia se mostraram muito semelhantes entre os dois métodos, demonstrando que apesar das discrepâncias em relação aos valores obtidos, os dois métodos apresentam resultados coerentes, contudo tendo diferenças em relação aos valores pico da carga térmica.

Esta vantagem do método RTS foi consolidada pela análise do fator Λ , resultando em valores menores que zero para todos os casos estudados, o que significou que em todas as situações a carga de pico do método CLTD/SCL/CLF foi superior ao método RTS.

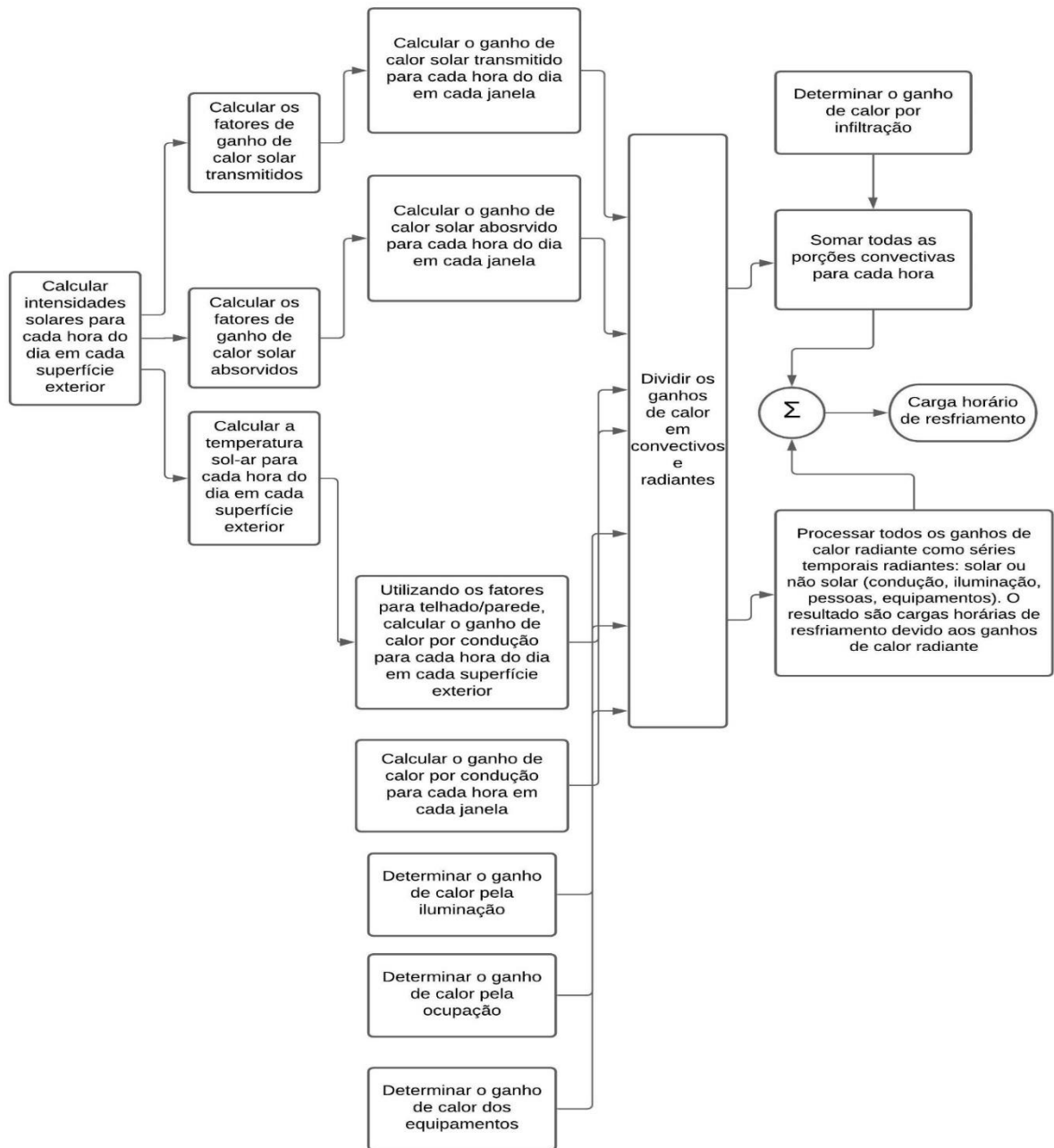
Essa discrepância entre os dois métodos se dá principalmente pelo fato de que o método CLTD/SCL/CLF, por ser mais antigo, não foi atualizado para utilizar o novo modelo de ganho de calor solar (SHGC) que usa o método angular mais preciso, além de valores atualizados do coeficiente de atenuação interna (IAC) para o cálculo da carga térmica para as janelas. Além disso, o método RTS já apresenta um modelo de Céu-Claro novo, implementado em 2013, que utiliza um algoritmo completamente diferente do modelo utilizado anteriormente chamado de A, B, C, resultando em valores de temperatura sol-ar e, conseqüentemente, valores para a carga térmica distintos. Portanto uma atualização do método CLTD/SCL/CLF se mostra necessária para melhorar a exatidão dos seus resultados.

Como sugestão para trabalhos futuros, é aconselhada uma análise dos métodos em questão para casos localizados no hemisfério sul, buscando determinar os coeficientes e fatores necessários para a realização dos cálculos para as localidades deste hemisfério. Além disso, uma análise que englobe a comparação dos procedimentos presentes neste estudo com outros métodos desenvolvidos pela ASHRAE, como o método de balanço de calor (HBM) e o método das funções de transferência (TFM) além de compará-los com resultados obtidos através do software EnergyPlus seria bastante relevante, já que não existem muitos textos disponíveis na literatura que abordem este assunto.

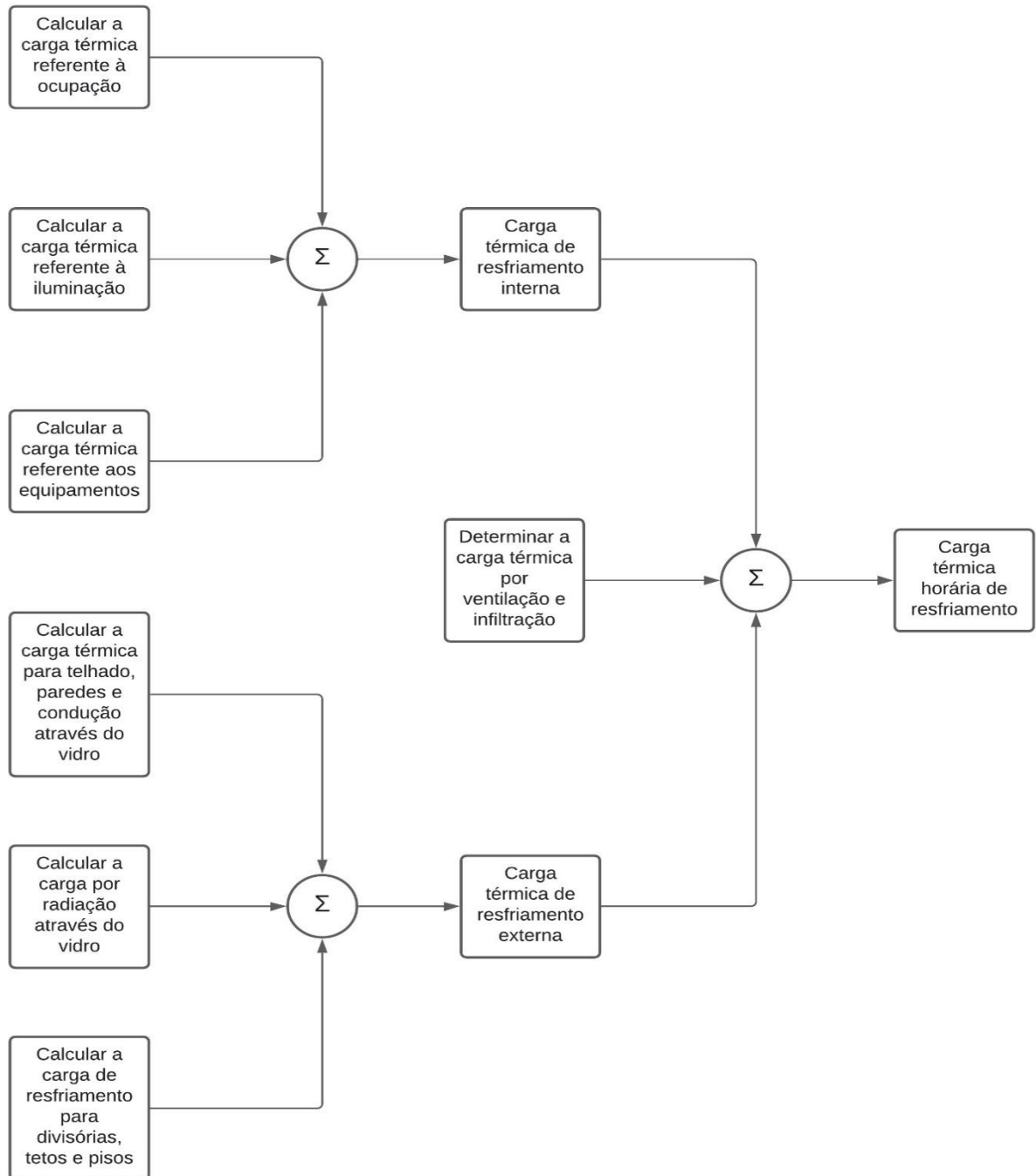
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHARYA, K. G. “**Estimation and Analysis of Cooling Load for Indian Subcontinent by CLD/SCL/CLF method at part load conditions**”. J. Phys.: Conf. Ser. 1240 012031, 2019.
- ASHRAE CLIMATIC DESIGN CONDITIONS. CHAMPAIGN 9 SW, IL, USA (WMO: 724360) - 2017". Disponível em: <http://ashrae-meteo.info/v2.0/>. Acesso em: 23 de setembro de 2021.
- ASHRAE. “**ASHRAE Handbook – Fundamentals**”. Edição SI. Atlanta, GA: 2018.
- ASHRAE. “**ASHRAE Handbook – Fundamentals**”. Edição SI. Atlanta, GA: 2017.
- ASHRAE. “**ASHRAE Handbook – Fundamentals**”. Edição SI. Atlanta, GA: 1997.
- ASHRAE. “**ASHRAE Standard 55 – Fundamentals**”. Atlanta, GA: 2010.
- CHANTRASRISALAI, C., FISHER, D.E, “**Lighting heat gain parameters: Experimental results**”. HVAC&R Research, 2007.
- COSTA, A. M. S. “**Cooling Load Calculation by the Radiant Time Series Method – Effect of Solar Radiation Models**”. Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. Uberlândia, MG, Brasil. 2010.
- JOUDI, K. A.; HUSSIEN, A. N. “**Cooling Load Calculations For Typical Iraqi Roof And Wall Constructions Using ASHRAE's RTS Method**”. Journal of Engineering, 21(5), p. 98 – 114, 2015.
- MAO, C.; BALTAZAR, J.; HABERL, J. S. “**Comparison of ASHRAE Peak Cooling Load Calculation Methods**”, Science and Technology for the Built Environment, 2018.
- SPITLER, J.D.; FISHER, D. E.; PEDERSEN, C.O. “**The Radiant Time Series Cooling Load Calculation Procedure**”, ASHRAE Transactions, 1997.
- SPITLER J. D.; REES, S. J, “**Quantitative Comparison of North American and U.K. Cooling Load Calculation Procedures—Methodology**”, ASHRAE Transactions, 1998.
- SPITLER J. D. “**Load calculation applications manual**” - Segunda edição, edição SI, 2014.
- SPITLER. J.D.; MCQUISTON F.C.; LINDSEY K. “**The CLTD/SCL/CLF Cooling Load Calculation Method**”, ASHRAE Transactions. 99(1), p. 183-192, 1993.
- ZHANG, Qi; YAN, Da; AN, Jingjing; HONG, Tianzhen; TIAN, Wei; SUN, Kaiyu. “**Spatial Distribution of Internal Heat Gains: A Probabilistic Representation and Evaluation of Its Influence on Cooling Equipment Sizing in Large Office Buildings.**” Lawrence Berkeley National Laboratory, Energy Technologies Area, p. 1-20, 2017.

APÊNDICE I - Diagrama de fluxo do método RTS. Adaptado [ASHRAE, 2017]



APÊNDICE II – Diagrama de fluxo do método CLTD/SCL/CLF.



APÊNDICE III – Dados detalhados do problema utilizado na comparação dos métodos.

Localização	Champaign
Latitude (°)	40,053
Longitude	-88,373
Tbs externa (°C)	30,9
Tbu externa (°C)	24,9
Amplitude (°C)	12,4
Texterna máxima (°C)	30,9
Tbs média dia (°C)	24,7
Mês	Julho
Tbs interna (°C)	25
VVV (m/s)	1,7
τ_{aub}	0,46
τ_{aud}	2,151
ρ_g	0,2

Método	RTS	CLTD
Nº Parede	29	16
Nº Telhado	32	13
RTS Solar	Pesada com carpete 50% vidro	-
RTS Não-Solar	Pesada com carpete 50% vidro	-
SCL Janela (Radiação)	-	Zona tipo A

Componente gerador de carga	Paredes e Janelas			
	Leste	Oeste	Norte	Sul
Orientação				
$\psi(^{\circ})$	-90	90	180	0
Área da Janela (m ²)	5	5	5	5
Área da Parede (m ²)	8	8	6	6
Ângulo de inclinação Σ das paredes (°)	90	90	90	90
α/h_o	0,052	0,052	0,052	0,052
$\varepsilon\Delta R/h_o$	0	0	0	0
U das paredes (W/m ² K)	0,738	0,738	0,738	0,738
U da janela (W/m ² K)	7	7	7	7

Componente gerador de carga	Telhado
$\psi(^{\circ})$	-
Área do Telhado (m ²)	12
Ângulo de inclinação Σ do telhado (°)	0
α/h_o	0,052
$\varepsilon\Delta R/h_o$	4
U do telhado (W/m ² K)	0,312

Ocupação		Equipamentos	
Pessoas	1	Impressora e computador	
Carga térmica (W)	130	Carga térmica (W)	130
Calor Sensível (W)	70	Iluminação	
Calor Latente (W)	45	Carga térmica (W)	300
Horário de funcionamento			10

APÊNDICE IV – Figura referente aos ângulos solares para as superfícies. [ASHRAE,2017]

