

ESTIMATIVA DE CARGA TÉRMICA EM AR CONDICIONADO PARA CONFORTO COM AUXÍLIO DO
PROGRAMA COMPUTACIONAL ENERGYPLUS.

Prof. Dr. Jorge Emanuel Corrêa, jecorrea@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Mecânica
Campus Universitário do Guamá, Rua Augusto Corrêa, 01, CEP 66.075-110, Belém, Pará, Brasil

F3 - Cálculos Térmicos e Energéticos: Informações Climáticas; Ventilação e Infiltração; Cálculos da Carga de Resfriamento e Aquecimento; Métodos de Modelamento e Estimativa Energéticas.

Resumo: O programa computacional EnergyPlus foi utilizado para obter o perfil da carga térmica numa edificação comercial, localizada em Belém, capital do Estado do Pará, região Norte do Brasil. Os resultados foram comparados aos obtidos pelo programa CHVAC, desenvolvido pela Elite Software Development, Inc., bastante difundido entre a comunidade técnica que atua em projetos de engenharia em ar condicionado. O programa EnergyPlus emprega o método HB (Heat Balance Method) para determinar as cargas térmicas em ambientes condicionados, enquanto o CHVAC emprega o método RTS (Radiant Time Series Method). As análises comparativas procurarão quantificar diferenças nas magnitudes das cargas térmicas e identificar suas possíveis causas. Além disso, serão verificadas as dificuldades para utilização de cada um desses programas como ferramenta usual em cálculos de estimativas da carga térmica em ar condicionado.

Palavras-chave: Carga térmica em ar condicionado, simulação térmica, EnergyPlus.

1. INTRODUÇÃO

Em projetos de instalações de ar condicionado para conforto, o primeiro passo é realizar os cálculos de estimativa da carga térmica. A carga térmica é a taxa na qual o calor deve ser adicionado ou removido do ar no ambiente condicionado, para manter constantes sua temperatura e umidade relativa, em algum valor dentro das faixas ditadas pelas normas técnicas vigentes, relacionadas ao conforto térmico e à qualidade do ar interior. Fatores externos (temperatura do ar atmosférico e radiação solar) e internos (ocupantes, iluminação artificial e utensílios que geram calor), juntamente com o ar externo de ventilação, devem ter seus ganhos de calor quantificados. A edificação armazena energia térmica em sua estrutura e a libera por convecção para o ar do ambiente condicionado, paulatinamente, no decorrer das horas. Assim, variações nas magnitudes dos ganhos de calor, juntamente com características de transporte, armazenamento e liberação dessa energia pela estrutura são responsáveis pela variação da magnitude da carga térmica ao longo do dia. Os cálculos da carga térmica são realizados em cada hora de um dia climático típico (dia de projeto), de modo que o valor máximo (carga térmica de pico) obtido em dada hora é usado posteriormente para selecionar equipamentos, acessórios e dispositivos de controle. Assim, as instalações de ar condicionado são projetadas para satisfazer uma demanda variável de carga térmica durante seu período diário de funcionamento. (ASHRAE, 2005; McQuiston, 2005).

O EnergyPlus (Crawley, 2001) é um programa de simulação, empregado para análises térmicas de edificações, pouco difundido entre os profissionais brasileiros. Por isso não faz parte das ferramentas de trabalho rotineiras nos escritórios de engenharia e arquitetura. Para Westphal e Lamberts (2005), a causa principal dessa ausência é sua complexidade, que dificulta e demanda bastante tempo de aprendizado. Além disso, as interações de energia entre o ambiente, a estrutura da edificação e sua vizinhança, que determinam o comportamento térmico da edificação, requerem grande quantidade de dados de entrada nas simulações, exigindo conhecimento multidisciplinar do usuário. O método HB (*Heat Balance Method*), utilizado pelo EnergyPlus, trata os balanços de energia por condução, convecção e radiação em todas as superfícies opacas e transparentes dos elementos construtivos que limitam o ambiente condicionado. Adicionalmente, são realizados balanços convectivos entre o ar e as superfícies internas que limitam o ambiente condicionado para determinar a carga térmica. Descrições desse método são encontradas em ASHRAE (2005), Pedersen *et al* (1997), e Chantrasrisalai *et al* (2003).

Existem vários métodos para obter estimativas da carga térmica de ar condicionado, e todos decorrem de alguma simplificação do método HB. No Brasil, de acordo com a NBR 16401:1 (ABNT, 2008), deve-se usar um procedimento computacional baseado preferencialmente no método RTS (*Radiant Times Serie Method*), descrito em Spitler (2010), Spitler *et al* (1999; 1997) e ASHRAE (2005). O programa CHVAC versão 7.1, desenvolvido pela Elite Software Development, Inc., bastante difundido na comunidade técnica que atua em projetos de engenharia em ar condicionado, foi outro programa selecionado, por dois motivos: primeiro, por disponibilizar o método RTS para cálculos de estimativas de carga térmica de resfriamento para conforto; segundo, o Laboratório de Ar Condicionado e Conforto Térmico (Ar-ConLAB) da Universidade Federal do Pará (UFPA) dispõe de sua licença para uso.

2. MÉTODO HB (HEAT BALANCE METHOD)

Nesse método, em cada elemento construtivo opaco são realizados balanços de energia por condução no próprio elemento, e por convecção e radiação em suas superfícies externa e interna. No caso das superfícies transparentes os balanços são semelhantes, com a diferença de que não há radiação absorvida na superfície externa. Em vez disso, a radiação incidente é fracionada em duas: uma, que integra o balanço de energia da superfície externa; outra, que integra o balanço de energia da superfície interna. Adicionalmente, os balanços de energia entre o ar do ambiente condicionado e as superfícies internas em contato com o mesmo permitem determinar a carga térmica. Nesses balanços, algumas hipóteses devem ser assumidas: temperaturas uniformes do ar no ambiente condicionado e nas superfícies, incidência uniforme de radiação de onda curta e onda longa, superfícies radiantes difusas, e condução unidimensional. A Fig.1 mostra um elemento construtivo opaco, identificando os ganhos de calor utilizados nos balanços de energia.

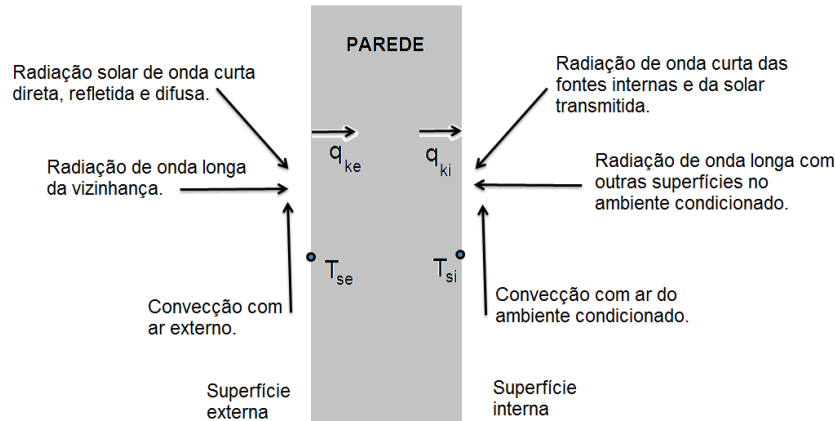


Figura 1 – Balanços de energia em elemento construtivo opaco.

Na superfície externa, o balanço de energia é dado por:

$$q''_{asol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ke} = 0 \quad (1)$$

onde: q''_{asol} = fluxo de calor devido à radiação solar direta e difusa (onda curta) absorvida (W/m^2), q''_{LWR} = fluxo líquido de calor devido à radiação térmica (onda longa) trocado com céu e com a vizinhança (W/m^2), q''_{conv} = fluxo de calor por convecção trocado com o ar externo (W/m^2), e q''_{ke} = fluxo de calor por condução na parede (W/m^2).

Os fluxos de calor por radiação de onda curta e onda longa são tratados por modelos padrões de trocas radiantes da superfície com o céu e com a circunvizinhança (terrenos, prédios, etc). Portanto, necessitam-se valores de absorptâncias e temperaturas superficiais, temperaturas do céu e da vizinhança, e dos fatores de forma da superfície com a circunvizinhança e com o céu.

Na parede, a condução de calor pode ser formulada de várias maneiras, pois o assunto recebeu muita atenção nos últimos anos (Spitler, 1996). O EnergyPlus permite selecionar entre diferenças finitas (Çengel, 2009) e funções de transferência (Iu, 2004), sendo este último usado como padrão (*default*), dado sua vantagem de menor consumo de tempo computacional, com perda mínima de generalidade. Nos métodos simplificados, incluindo o RTS, os coeficientes convectivos nas superfícies da parede são incluídos na condutância térmica total; assim, a temperatura do ar substitui a da superfície da parede. Esta simplificação camufla o fato de que os coeficientes convectivos variam com a velocidade do ar, e também impedem a modelação de aspectos não lineares das trocas de calor por radiação de onda longa.

Na superfície interna, o balanço de energia é dado por:

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (2)$$

onde: q''_{LWX} = fluxo líquido de radiação de onda longa entre as superfícies (W/m^2), q''_{SW} = fluxo líquido de radiação de onda curta das lâmpadas para as superfícies (W/m^2), q''_{LWS} = fluxo de radiação de onda longa emitido por equipamentos e ocupantes (W/m^2), q''_{ki} = fluxo por condução de calor na parede (W/m^2), q''_{sol} = fluxo da radiação solar transmitida e absorvida nas superfícies (W/m^2), e q''_{conv} = fluxo por convecção para o ar do ambiente condicionado (W/m^2).

A radiação de onda curta origina-se na radiação solar transmitida nas superfícies transparentes e pelas emissões de fontes internas, tais como lâmpadas acesas. A radiação de onda longa origina-se em emissões e reflexões de fontes de baixa temperatura, tais como, superfícies de paredes, mobílias, utensílios e ocupantes. Na formulação das trocas de radiação de onda longa entre superfícies admite-se que o ar do ambiente condicionado é completamente transparente. A

radiação de onda longa de fontes internas (utensílios, equipamentos e ocupantes) é fracionada: uma radiante, distribuída uniformemente sobre todas as superfícies internas; outra convectiva, que é carga térmica instantânea (Hosni e colaboradores, 1999). No caso da radiação de onda curta das lâmpadas acesas, admite-se distribuição uniforme sobre todas as superfícies internas.

A radiação solar transmitida é determinada através do SHGC (*Solar Heat Gain Coefficient*). Este coeficiente inclui tanto a energia solar transmitida como a fração absorvida pelo vidro e liberada por convecção no ambiente condicionado. No método HB, esta última parcela deve ser adicionada à energia transferida por condução no vidro, para então ser incluída no balanço de energia de sua superfície interna. Admite-se que a energia transmitida distribui-se uniformemente sobre as superfícies internas dos elementos construtivos.

O fluxo de calor por convecção é obtido por $q_{conv}'' = h_{ci} (T_{si} - T_{ac})$ onde h_{ci} é o coeficiente convectivo na superfície interna da parede, T_{si} sua temperatura, e T_{ac} a temperatura do ar no ambiente condicionado (constante).

No ambiente condicionado, a capacitância térmica do ar é desprezada. Assim, o balanço de energia em regime permanente é dado por:

$$q_{conv} + q_{CE} + q_{IV} + q_{sis} = 0 \quad (3)$$

onde: q_{conv} = convecção nas superfícies internas para o ar do ambiente condicionado (W), q_{CE} = fração convectiva das cargas internas radiantes (W), q_{IV} = calor sensível devido à infiltração e/ou ventilação (W), e q_{sis} = calor sensível liberado ou recebido em qualquer ponto da instalação (W). Nas superfícies, a convecção é dada por:

$$q_{conv} = \sum_{j=1}^{m \text{ superfícies}} h_{c,j} A_j (T_{ac} - T_{s,j}) \quad (4)$$

O sistema de equações resultante da formulação pelo método HB deve ser resolvido por um processo iterativo, impossível de executar sem auxílio de um computador.

3. MÉTODO RTS (RADIANT TIME SERIES METHOD)

O método RTS foi desenvolvido com intuito de obter um procedimento simplificado e rigoroso para cálculo da estimativa da carga térmica, porém sem as iterações existentes no método HB. Embora exija muitos cálculos para ser usado como um método manual, seus procedimentos podem ser inseridos em planilhas de cálculo com relativa facilidade. A Fig.2 mostra as etapas de procedimentos para aplicação do método RTS.

Em paredes externas e coberturas, os ganhos de calor por condução são obtidos por meio das CTS's (*Conduction Time Series*), que fornecem uma solução do problema unidimensional transiente de transferência de calor nesses elementos construtivos. Em qualquer hora θ , o ganho de calor por condução é dado por:

$$q_{\theta} = \sum_{j=0}^{23} c_j UA (t_{arsol, \theta-j\delta} - t_{ac}) = c_0 UA (t_{arsol, \theta} - t_{ac}) + c_1 UA (t_{arsol, \theta-\delta} - t_{ac}) + c_2 UA (t_{arsol, \theta-2\delta} - t_{ac}) + \dots + c_{23} UA (t_{arsol, \theta-23\delta} - t_{ac}) \quad (5)$$

onde: q_{θ} = ganho de calor por condução no elemento construtivo, na hora considerada (W), U = transmitância térmica total ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), A = área superficial (m^2), c_j = j-ésimo coeficiente da CTS (adimensional), $t_{arsol, \theta-j\delta}$ = temperatura ar-sol há j horas ($^\circ C$), t_{ac} = temperatura do ar no ambiente condicionado ($^\circ C$), e δ = incremento de tempo (uma hora).

Na Equação (5), os fatores $UA (t_{arsol, \theta-j\delta} - t_{ac})$ calculam a transferência de calor em cada hora, se prevalecesse o regime permanente. Os coeficientes $c_0, c_1, \dots, c_{23}$ fornecem as porcentagens dos ganhos de calor convertidos em carga térmica em cada hora. Por definição, a soma desses coeficientes ao longo de 24 horas deve ser 100%. Nos manuais, as CTS's devem ser selecionadas em função da transmitância e da capacidade térmica do elemento construtivo, de modo a representar com maior fidelidade seu comportamento térmico (Spitler, 1999b). Estão relacionadas para 35 tipos de paredes externas e 19 tipos de coberturas (ASHRAE, 2005; Spitler, 2010).

Em dada zona térmica, as RTS's (*Radiation Time Series*) convertem os ganhos de calor por radiação em carga térmica: os coeficientes radiantes temporais fornecem as frações dos ganhos de energia radiante transferidos por convecção para o ar do ambiente condicionado, com base nos ganhos de calor na hora atual e nas precedentes. A Eq. (6) apresenta a expressão geral das RTS's, onde r_0 representa a fração convectiva na hora atual, r_1 valor correspondente na primeira hora anterior, e assim por diante, daí:

$$Q_{\theta} = r_0 q_{\theta} + r_1 q_{\theta-\delta} + r_2 q_{\theta-2\delta} + r_3 q_{\theta-3\delta} + \dots \quad 23\delta \quad (6)$$

onde: Q_{θ} = carga térmica na hora θ atual (W), q_{θ} = ganho de calor na hora atual (W), $q_{\theta-n\delta}$ = ganho de calor n horas atrás (W), e r_n = enésimo coeficiente da RTS (adimensional).

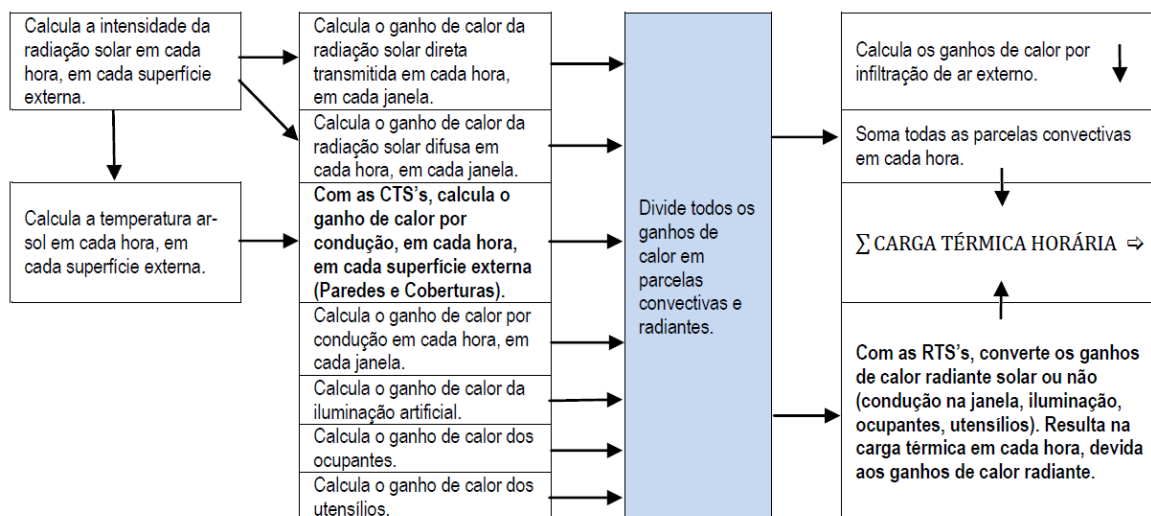


Figura 2 – Etapas de procedimentos para aplicação do método RTS.

Em cada ambiente condicionado são necessários dois tipos de RTS's: uma, para os ganhos da radiação solar transmitida (admite-se uniformemente distribuída sobre o piso); outra, para outros tipos de ganhos de calor radiante (admite-se uniformemente distribuído sobre todas as superfícies internas expostas). As RTS's estão disponíveis para três grupos de construção e de zona térmica (leve, média e pesada), considerando ainda se o piso dessa última é ou não revestido com carpete, e ainda seu percentual de área envidraçada. Uma descrição detalhada desse método pode ser consultada em Spitler (2010).

4. DESCRIÇÃO DA EDIFICAÇÃO

A Figura 3 mostra a planta baixa da edificação com orientação cardinal norte e dimensões. Nas fachadas leste e oeste, todas as janelas possuem dimensões 1,40×1,30 m, posicionadas 1,00 m acima do piso; na fachada norte 6,00×0,60 m (Reunião) e 4,00×0,60 m (Gerência), posicionadas 1,80m acima do piso. As janelas são de vidro claro comum de 3 mm de espessura. Na fachada sul, a porta de vidro possui dimensões 2,10×2,10 m, em vidro claro comum de 6 mm de espessura. As áreas envidraçadas não têm dispositivos de sombreamento nem de proteção solar interna. Todas as paredes, com pé-direito de 2,8m, são construídas em alvenaria com blocos cerâmicos de 6 furos quadrados (9cm×14cm×24cm) assentados na menor dimensão, com argamassa de acabamento (2,5 cm) nas duas faces, e de assentamento (1,5cm). A cobertura é feita em telhas cerâmicas (1cm) sobre caibros com forro de madeira (1cm). A cumeeira do telhado de duas águas, inclinados 15°, coincide com o eixo longitudinal da edificação. A edificação é assentada em radier de concreto com 10 cm de espessura. Lâminas de madeira com 1 cm de espessura cobrem o piso, exceto no refeitório e nos banheiros, que são cerâmicos.

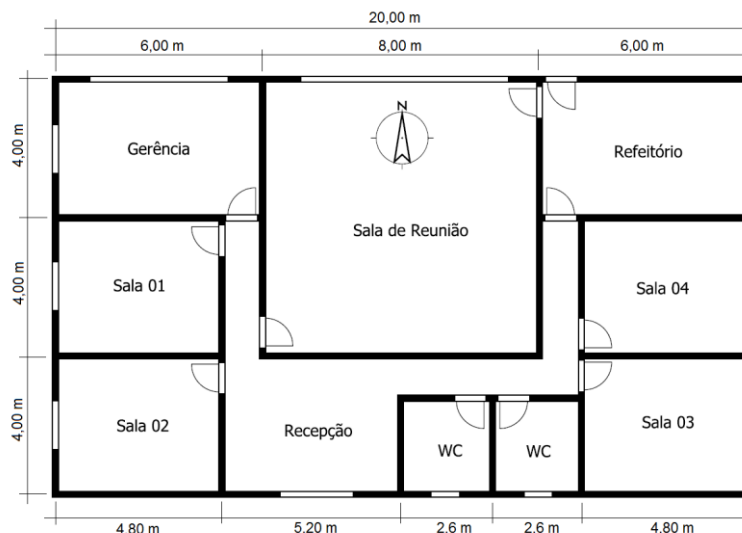


Figura 3 – Planta baixa com orientação cardeal e dimensões.

5. PARÂMETROS DE CÁLCULOS

Tanto o CHVAC como o EnergyPlus demandam grande quantidade de dados de entrada, porém, essa quantidade é bem maior no EnergyPlus, principalmente na fase de construção do modelo computacional da edificação. Embora sua coleção de bibliotecas seja vasta e diversificada, muitos objetos não podem ser diretamente aplicados, e devem ser ajustados ou modificados frente às condições reais. Como a interface com o usuário não é muito amigável erros são comuns e a atenção deve ser redobrada para localizá-los e corrigi-los. No CHVAC, uma interface mais amigável permite entrada de dados com mais facilidade, porém, sua quantidade e diversidade podem confundir o usuário menos experiente.

Para definir parâmetros de projeto as seguintes informações são consideradas: escritório comercial (funcionamento de 08:00 às 18:00 horas) e localizado em Belém do Pará (latitude 1°23' Sul, longitude 48°28' Oeste). No Brasil, as condições de projeto relativas ao conforto térmico e à qualidade do ar no ambiente condicionado, bem como condições climáticas, são definidas pela norma NBR 16.401: Partes 1, 2 e 3 (ABNT, 2008). Nesse caso, os valores selecionados são apresentados na Tab.1, considerando o dia 21 de novembro como dia de projeto. Além dos parâmetros da Tab.1, procurou-se compatibilizar os padrões operacionais de ocupação, de usos de iluminação e equipamentos. A transmitância e absorptância dos vidros também passaram pelo mesmo processo, de modo que os valores dos dados de entrada nos dois programas fossem os mesmos, se possível.

No método RTS, usado pelo CHVAC, cobertura e paredes externas devem ser enquadradas em tipos disponibilizados nas tabelas, que fornecem os valores dos coeficientes da Eq.(5). Em princípio, esse processo compara valores calculados de transmitância e capacitância térmica dos elementos construtivos reais aos tabelados para alguns tipos que satisfazem padrões americanos (USA) de construção. Na maior parte do território brasileiro, edificações não necessitam de paredes ou coberturas com isolamento térmico. Geralmente, o isolamento térmico reduz bastante a condutância térmica do elemento construtivo sem alterar significativamente sua capacitância térmica. Em consequência, coberturas e paredes externas brasileiras apresentam uma condutância bem maior do que as americanas, para a mesma capacitância. Assim, adotamos nos cálculos a condutância térmica do elemento construtivo real, e selecionamos a RTS comparando somente sua capacitância térmica aos valores tabelados. Para calcular a transmitância e capacitância térmicas em coberturas e paredes externas, adotou-se o procedimento descrito em NBR 15220:2 (ABNT, 2008): na cobertura, os valores calculados foram 2,02 W/m²·K e 26 kJ/m²·K, e nas paredes externas, 2,46 W/m²·K e 150 kJ/m²·K. Com isso enquadrou-se a cobertura no tipo 1 e a parede externa no tipo 26, caracterizados como elementos construtivos leves. Essas informações devem ser introduzidas na biblioteca dos elementos construtivos que serão utilizados na edificação.

Tabela 1. Condições de projeto e parâmetros de cálculo em ar condicionado para conforto (Fonte: ABNT-NBR 16.401, 2008).

CONDIÇÕES DE PROJETO:	INTERNAS	EXTERNAS
Temperatura de bulbo seco, °C (1% de frequência anual).	--x--	32,8
Temperatura de bulbo úmido coincidente, °C (1% de frequência anual).	--x--	25,9
Variação média diária da temperatura de bulbo seco, °C.	--x--	8,2
Altitude, m.	--x--	16
Temperatura de bulbo seco, °C.	25	--x--
Umidade relativa, %.	50	--x--
PARÂMETROS DE CÁLCULO:		
Taxa de ocupação, m ² /ocupante.		10
Trabalho moderado em escritório, W:		
Calor sensível por ocupante.		75
Calor latente por ocupante.		60
Taxa de dissipação de calor sensível, W/m ² :		
Iluminação.		20
Equipamentos.		10
Porcentagem radiante do calor sensível, %:		
Ocupantes.		58
Iluminação.		67
Equipamentos.		20
Absortância da superfície:		
Telha cerâmica.		0,8
Paredes.		0,6
Argamassa.		0,6
Vazão eficaz mínima de ar exterior para ventilação, L/s :		
Por ocupante no ambiente condicionado.		3,8
Por m ² de área de piso do ambiente condicionado.		0,5

Outro procedimento exigido pelo método RTS é o enquadramento da zona térmica para determinar os coeficientes da Eq. (6). Nesse caso, as zonas térmicas são classificadas em leve, média ou pesadas, de acordo com o tipo de parede externa, forro, paredes divisórias, piso e mobílias. Além disso, deve ser considerado se o piso é ou não coberto com carpete, e o percentual de área envidraçada nas paredes externas e cobertura. Com essas informações, as RTS para ganhos radiantes decorrentes das cargas internas e da radiação solar podem ser obtidas. No caso de zonas térmicas internas, o percentual de área envidraçada não é necessário na determinação das RTS. No CHVAC, os dados de entrada fornecidos permitem que o próprio programa faça o enquadramento das zonas térmicas.

No EnergyPlus, coberturas e paredes externas são representadas por camadas homogêneas justapostas de materiais de construção. Assim, uma parede externa, como a descrita no item 4, deve ser substituída nas simulações por um elemento construtivo equivalente com as mesmas condutância e capacitância térmicas. Nesse processo, deve-se observar que o EnergyPlus possui modelos que calculam os coeficientes convectivos nas superfícies dos elementos construtivos, e, por conseguinte, as resistências térmicas convectivas não devem ser incluídas na equivalente. Um procedimento para obter o elemento construtivo equivalente é detalhado em Ordenes (2003). Assim, a parede equivalente ficou constituída de: argamassa (2,5 cm) + bloco cerâmico (1,4 cm) + câmara de ar (3 cm) + bloco cerâmico (1,4 cm) + argamassa (2,5 cm), com condutância térmica de $4,23 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ e densidade equivalente do bloco cerâmico de 1.940 kg/m^3 . As telhas de cerâmicas, a camada de ar de baixa emissividade, e o forro de madeira compõe diretamente a cobertura como camadas homogêneas desse elemento construtivo.

6. DIRETRIZES DE SIMULAÇÕES

A Figura 4 apresenta o modelo da edificação usado nas simulações com o EnergyPlus. Para cálculo da estimativa de carga térmica dividiu-se a edificação em duas zonas térmicas, com base nos padrões operacionais dos vários ambientes: Salas (gerência+recepção+salas 01 a 04) e Reunião (sala de reunião). Para obter a carga térmica com o EnergyPlus, dois objetos disponibilizados pelo programa devem ser referenciados: HVACTemplate:Thermostat e HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem. O primeiro controla a temperatura do ar a ser mantida no ambiente condicionado, nesse caso, 25°C . O segundo controla parâmetros específicos em cada zona térmica, tais como taxas de ventilação, umidade relativa a ser mantida, temperatura mínima de insuflação do ar (13°C), fator de calor sensível do ambiente e outros, além de identificar o termostato que será usado para controlar a temperatura da zona, conforme definidos no primeiro objeto. As simulações foram realizadas com timestep de 1 minuto, e os resultados da carga térmica registrados em cada hora. O perfil horário da temperatura externa de bulbo seco é obtido pelo método descrito em ASHRAE (2005), com dados climáticos disponíveis na Tabela 1, relacionados nas condições de projeto externas.

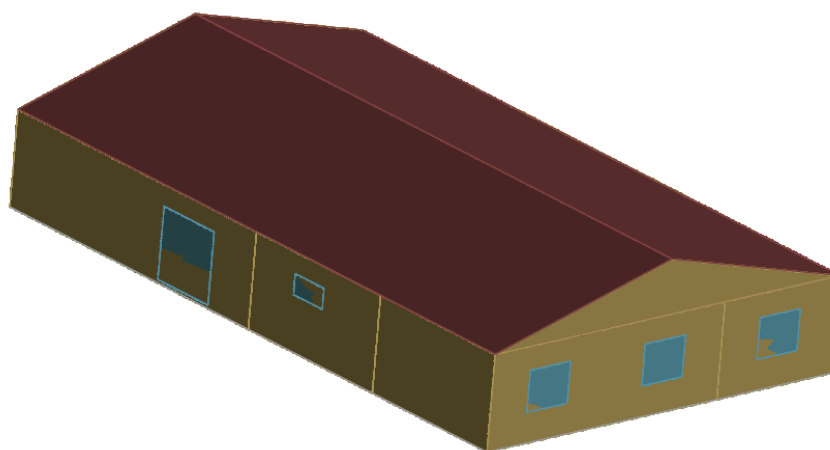


Figura 4 – Modelo da edificação usado nas simulações com o EnergyPlus.

7. ANÁLISES DOS RESULTADOS

A Figura 5 apresenta as variações de temperatura e umidade relativa do ar nas zonas térmicas, nas simulações realizadas com o EnergyPlus com dois tipos de modelos: no primeiro (representado pelas linhas tracejadas), as cargas internas nas zonas térmicas são consideradas, porém não há controle da temperatura e nem da umidade relativa do ar nas zonas térmicas; no segundo (representado pelas linhas contínuas), incluiu-se no primeiro modelo a ventilação juntamente com controles da temperatura e umidade relativa do ar nas zonas térmicas, através do termostato, e do umidostato, a fim de manter esses valores em 25°C e 50% durante o período de funcionamento do escritório, entre 08:00 e 18:00 horas. No segundo modelo, as cargas de resfriamento do ar no ambiente condicionado, e do ar externo de ventilação das zonas térmicas, podem ser determinadas em cada hora pelos balanços de energia correspondentes.

A Figura 6 apresenta os resultados das estimativas de carga térmica total, sensível e latente na edificação, incluindo as cargas de ventilação das zonas térmicas, obtidas pelos dois programas: EP (EnergyPlus) e CHVAC. No caso das cargas latentes, verifica-se que os valores calculados apresentam pequenas diferenças, embora as cargas latentes internas sejam iguais. Isso pode ser creditados ao modo como cada programa estabelece o perfil da temperatura de bulbo úmido

externa, que juntamente com a de bulbo seco determinam a umidade absoluta do ar externo em cada horário: no CHVAC, a temperatura de bulbo úmido coincidente, especificada na Tabela 1, é usada em todos os horários; no EnergyPlus, um perfil de temperatura externa de bulbo úmido é construído para realizar esses cálculos (ASHRAE, 2005). De modo geral, os maiores valores da carga térmica sensível são calculados pelo CHVAC e se refletem na carga térmica total. No CHVAC o pico de carga térmica total ocorre às 16:00 horas, com magnitude de 28.244 W; no EnergyPlus, o valor correspondente é 23.268 W e ocorre às 17:00 horas.

A Figura 7 apresenta as diferenças percentuais das cargas térmicas latente, sensível e total, calculadas pelo CHVAC e EP (EnergyPlus), com base nesses últimos valores. Verifica-se que, na maioria dos horários de funcionamento da edificação, o CHVAC calcula magnitudes de cargas térmicas sensíveis e totais maiores do que o EP. Por exemplo, as diferenças na carga térmica total são relativamente pequenas até às 12:00 horas, atingem seu ápice às 14:00 horas com 42,7%, e nos horários de pico atingem 24,4 % no CHVAC e 16 % no EP. Além disso, verifica-se que os menores valores da carga térmica latente são calculados pelo CHVAC, o que compensa em parte suas maiores cargas sensíveis na composição das cargas totais.

As causas das diferenças apresentadas nas Figs. 6 e 7 devem ser buscadas principalmente no modo como cada programa calcula a carga térmica sensível, e que podem ser resumidas nos seguintes pontos:

a) No método RTS todo ganho de calor radiante interno ou externo é convertido ao longo do dia de projeto em carga térmica; no método HB, parte desses ganhos retornam ao ambiente externo ou são armazenados em paredes externas, piso e divisórias, reduzindo, portanto, a carga térmica sensível;

b) No método RTS, o fracionamento pré-determinado dos ganhos de calor sensível em parcelas convectivas e radiantes ignoram as condições reais das trocas de calor por radiação entre as superfícies internas e por convecção com o ar do ambiente condicionado; no método HB, modelos convectivos e radiantes de maior complexidade realizam os balanços de energia entre essas superfícies e o ar do ambiente condicionado, introduzindo variações de alguns parâmetros que afetam fortemente seus cálculos, tais como, coeficientes convectivos e fatores de forma entre superfícies;

c) Todas as zonas térmicas condicionadas apresentam paredes externas com áreas envidraçadas e isso, independentemente das outras condições, resulta em cargas térmicas calculadas pelo método RTS maiores se comparadas ao HB (Spitler et al, 1997). Em áreas envidraçadas, o método RTS calcula sempre um ganho de calor para o ambiente, pois as diferenças entre a temperatura ar-sol e a do ar no ambiente condicionado são usadas nos cálculos; no HB, em alguns horários, os balanços de energia radiante entre as superfícies internas podem elevar a temperatura na superfície interna dos vidros em relação à de sua superfície externa, e, nesse caso, haverá perda de calor em vez de ganho, reduzindo a carga térmica.

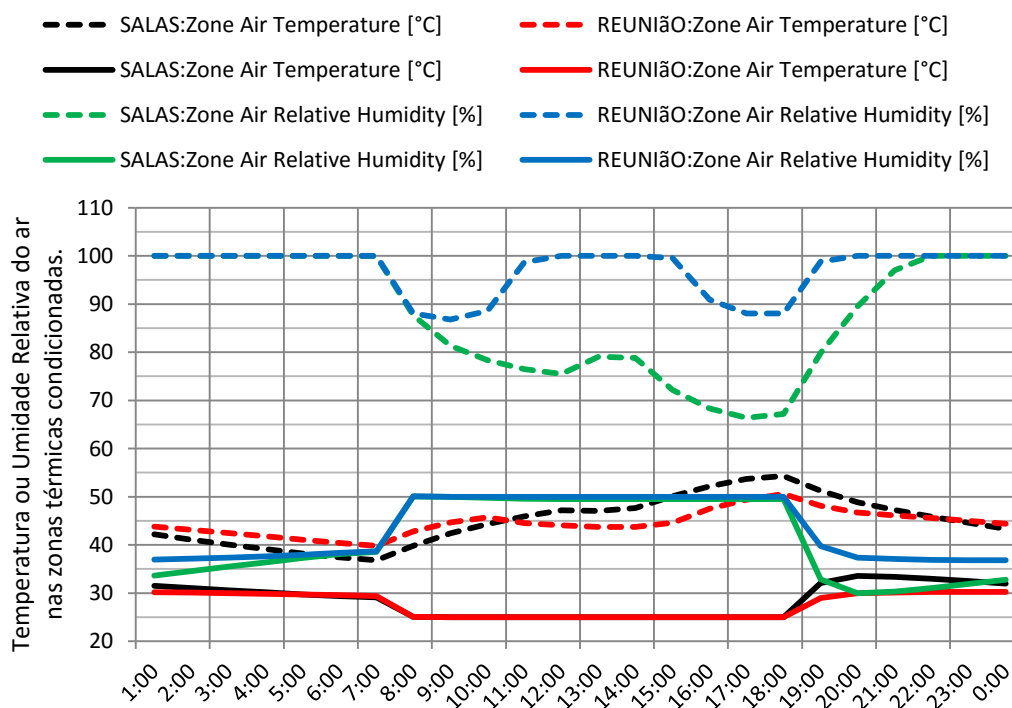


Figura 5 – Temperatura e umidade relativa do ar: modelo com cargas internas e sem controles de temperatura e umidade relativa do ar nas zonas térmicas (linhas tracejadas), e modelo com cargas internas, ventilação e controles de temperatura e umidade relativa nas zonas térmicas (linhas contínuas).

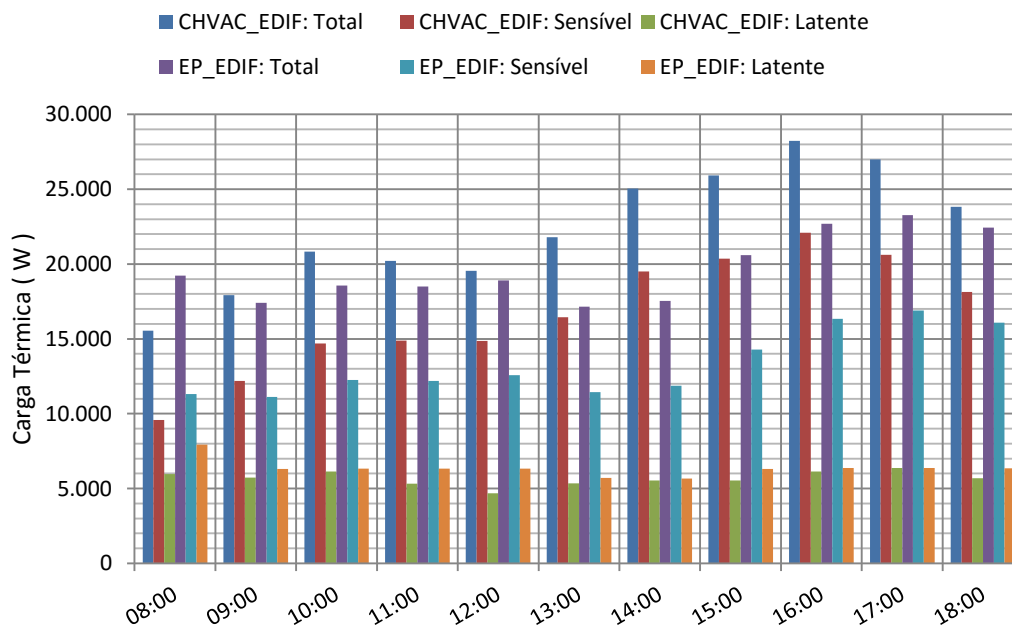


Figura 6 – Cargas térmicas total, sensível e latente na edificação calculadas pelo método HB (EP-EnergyPlus) e pelo método RTS (CHVAC), incluindo ventilação das zonas térmicas.

8. CONCLUSÕES

Os programas CHVAC e EnergyPlus foram utilizados para obter o perfil de cargas térmicas latente, sensível e total, numa edificação comercial de pequeno porte, localizada em Belém-PA. Verificou-se que o programa CHVAC, ao utilizar o método RTS, calcula na maioria dos horários abordados cargas térmicas maiores da que as obtidas pelo EnergyPlus (EP), que utiliza o método HB. Essas diferenças são acentuadas se a edificação possui grandes áreas envidraçadas associadas com elementos construtivos leves, tais como se apresenta nesse caso. Além disso, identificaram-se algumas dificuldades para que os enquadramentos dos elementos construtivos e das zonas térmicas fossem realizados no método RTS, e apontaram-se formas de superá-las.

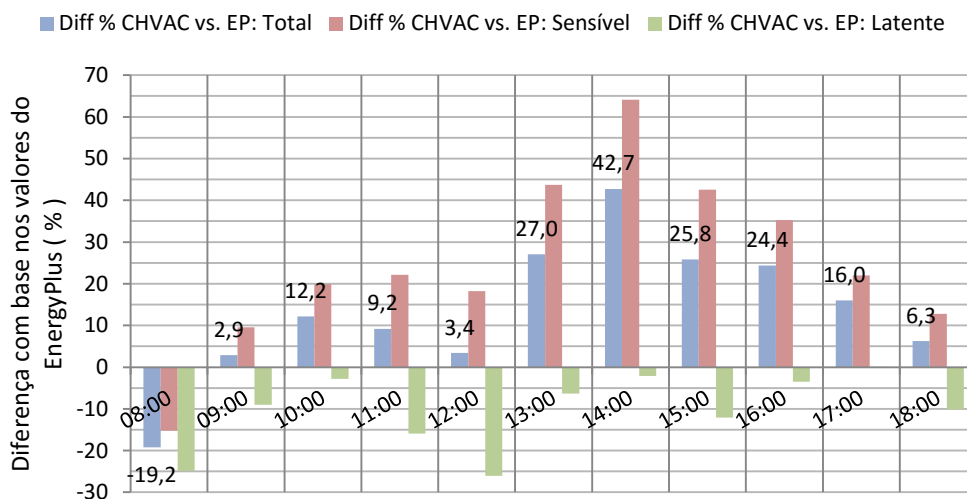


Figura 7 – Diferenças percentuais nas cargas térmicas latente, sensível e total, calculadas pelo CHVAC e EP, com base nos valores calculados pelo EnergyPlus.

9. AGRADECIMENTOS

A UFPA (Universidade Federal do Pará) que através do programa PROINT (Programa Integrado de apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão), viabilizou a aquisição da licença de uso do programa CHVAC pelo [ArConLAB](#) (Laboratório de Ar Condicionado e Conforto Térmico) da FEM (Faculdade de Engenharia Mecânica).

Ao [DOE](#) (U.S. Department of Energy) que disponibiliza em seu site o programa computacional EnergyPlus, usado para realizar as simulações neste trabalho.

Ao [LabEEE](#) (Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina) que disponibiliza em seu site diversas informações técnicas e de engenharia, sem as quais seria impossível realizar as simulações aqui analisadas.

10. REFERÊNCIAS

- ABNT/NBR 16401-1: 2008. Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários Parte 1: Parâmetros de projeto. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT/NBR 16401-2: 2008. Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT/NBR 16401-3: 2008. Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários Parte 3: Qualidade do ar interno. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT/NBR 15220-2: 2005b. Desempenho térmico de edificações - Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- ASHRAE. Handbook of fundamentals. Atlanta-GA, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2005.
- ANSI/ASHRAE Standard 55-2004: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2004.
- Chantrasrisalai, C., D.E. Fisher, I.S. Iu, and D. Eldridge. 2003. "Experimental Validation of Design Cooling Load Procedures: The Heat Balance Method", ASHRAE Transactions. 109(2):160-173.
- Çengel, Y. A., 2009, Transferência de calor e massa: uma abordagem prática. São Paulo, McGraw-Hill, 5ª. Ed.
- Crawley, D. B., Linda K. Lawrie, Frederick C. Winkelman, W.F. Buhl, Y. Joe Huang, Curtis O. Pedersen, Richard K. Strand, Richard J. Liesen, Daniel E. Fisher, Michael J. Wite, Jason Glazer. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. Energy and Buildings 33 (2001) 319-331.
- Iu, I., D. Fisher. 2004. Application of Conduction Transfer Functions and Periodic Response Factors in Cooling Load Calculation Procedures. ASHRAE Transactions, 110(2): 829-841.
- McQuiston, F.C., Parker, J. D., Spitler, P.E., 2005, "Heating, Ventilating, and Air-Conditioning: Analysis and Design", Oklahoma, John Wiley & Sons, 6th ed.
- Ordenes, M.; Pedrini, A.; Ghisi, E.; Lamberts, R. Metodologia Utilizada na Elaboração da Biblioteca de Materiais e Componentes Construtivos Brasileiros para Simulações no VisualDOE-3.1. Relatório Interno – Departamento de Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2003.
- Pedersen, C.O., D.E. Fisher, R.J. Liesen. 1997. Development of a Heat Balance Procedure for Calculating Cooling Loads, ASHRAE Transactions, Vol. 103, Pt. 2, pp.459-468.
- Spitler, P.E. Cooling load application manual. Atlanta-GA, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2010. SI ed.
- Spitler, J.D., and D.E. Fisher. 1999a. On the relationship between the radiant time series and transfer function methods for design cooling load calculations. International Journal of Heating, Ventilating, Air-Conditioning and Refrigerating Research 5 (2): 125-138.
- Spitler, J.D., and D.E. Fisher. 1999b. Development of periodic response factors for use with the radiant time series method. ASHRAE Transactions 105(2).
- Spitler, J.D., D.E. Fisher and C.O. Pedersen. 1997. The radiant time series cooling load calculation procedure. ASHRAE Transactions 103 (2), 503-515.
- Spitler, J.D. 1996. Annotated guide to load calculation models and algorithms. ASHRAE.
- Westphal, F. S.; Lamberts, R. Building Simulation Calibration Using Sensitivity Analysis.: IBPSA. BUILDING SIMULATION. Montreal, 2005.

11. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

**EVALUATION AIR CONDITIONING COOLING LOAD FOR COMFORT WITH ENERGYPLUS
COMPUTER PROGRAM ASSISTANCE**

Prof. Dr. Jorge Emanuel Corrêa¹, jecorrea@ufpa.br
Prof. Dr. Carlos Umberto da Silva Lima¹, cumberto@ufpa.br

**Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Mecânica
Campus Universitário do Guamá, Rua Augusto Corrêa, 01, CEP 66.075-110, Belém, Pará, Brasil**

***Abstract.** The computer program EnergyPlus was used to obtain the cooling load profile on a commercial building located in Belém-PA, in Brazil northern. The results were compared to those obtained by CHVAC program, developed by Elite Software Development, Inc., widespread among the technical community that works in air conditioning engineering projects. The EnergyPlus program employs the HB method (Heat Balance Method) to determine the cooling loads in constrained environments while CHVAC employs the RTS method (Radiant Time Series Method). Comparative analyzes seek to quantify differences among magnitudes of cooling loads and identify possible causes. Moreover, difficulties in use of each program as usual in calculations tool estimates the air conditioner cooling load will be verified.*

***Keywords:** Air conditioning cooling load, thermal simulation, EnergyPlus.*