

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DANIEL CADARIO DE AZEVEDO CENTINI

PROJETO E SELEÇÃO DE UM EQUIPAMENTO DE AR
CONDICIONADO PARA UM VAGÃO DE PASSAGEIROS DE TREM

SÃO PAULO

2011

DANIEL CADARIO DE AZEVEDO CENTINI

PROJETO E SELEÇÃO DE UM EQUIPAMENTO DE AR
CONDICIONADO PARA UM VAGÃO DE PASSAGEIROS DE TREM

Texto apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a obtenção
do título de Engenheiro Mecânico.

Área de Concentração: Engenharia
Mecânica.

Orientador:

Prof. Doutor. José R. Simões Moreira

SÃO PAULO

2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Centini, Daniel Cadario de Azevedo

Determinação do equipamento de ar condicionado para um vagão de passageiros / D.C. de A. Centini. – São Paulo, 2011. p. 77

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

**1.Trem 2.Ar condicionado 3.Conforto térmico 4.Carga térmica 5.Refrigeração
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.**

RESUMO

Um ambiente interno agradável é fundamental no transporte ferroviário de pessoas, uma vez que uma sensação de desconforto poderia influenciar as pessoas a desistirem de usar este meio de transporte. Portanto, no projeto de um trem, é muito importante assegurar o conforto térmico dentro do vagão de passageiros, especialmente para grandes deslocamentos em dias quentes de verão. Este trabalho consiste em avaliar a carga térmica de refrigeração dentro de um vagão de passageiros, para em seguida determinar o equipamento de condicionamento de ar mais apropriado, que possa garantir condições de conforto térmico para todos os passageiros.

Palavras-chave: Trem. Ar Condicionado. Carga Térmica. Conforto Térmico. Refrigeração. Trem.

ABSTRACT

A pleasant indoor environment is fundamental for the railway transportation of people, since a discomfort feeling could influence passengers to quit this mean of transportation. Therefore, during the design of a train, it is very important to ensure the thermal comfort within the passenger wagon, especially for long displacements in summer hot days. This work consists in evaluating the cooling load inside a passenger wagon, in order to select the most appropriate air conditioning equipment that may ensure thermal comfort conditions for all the passengers.

Key-words: Train. Air Conditioning. Cooling Load. Thermal Comfort. Refrigeration.
Train.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 - Ficha técnica de dois equipamentos de ar condicionado.....	10
Figura 4.1 - Zona de conforto térmico em um diagrama psicrométrico [5].	13
Figura 5.1 - Ganhos de calor e carga térmica na refrigeração.	15
Figura 5.2 - Transferência de calor em paredes. [13].....	16
Figura 5.3 - Resistências térmicas para o cálculo do coeficiente global U. [13].....	17
Figura 5.4 - Radiação solar através de superfície opaca [5].	19
Figura 5.5 - Principais características de um diagrama psicrométrico. [5]	20
Figura 5.6 - Diagrama Psicrométrico para a cidade de São Paulo [5].....	21
Figura 5.7 - Carta de Conforto da AHSRAE (Atividade sedentária, Var <0,2m/s) – ASHRAE 2005. [4].....	23
Figura 6.1 - Composição do trem. [21]	25
Figura 6.2 – Foto do vagão de passageiros. [21]	25
Figura 7.1 - Insolação em uma superfície transparente.	35
Figura 8.1 - Simplificação de uma instalação de ar condicionado. [1].....	50
Figura 8.2 - Linha de Carga na carta psicrométrica [1].	52
Figura 8.3 - Processos de condicionamento de ar.	54
Figura 8.4 - Processos do sistema no diagrama psicrométrico.	56
Figura 8.5 - Unidade de ar condicionado de 48,9 kW – Hitachi[18].....	58
Figura 8.6 - Otimização das pás do ventilador externo [18].	59
Figura 8.7 - Otimização das pás do ventilador interno [18].	59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 7.1 - Carga térmica de transmissão de calor ao longo do dia.....	34
Gráfico 7.2 - Carga Térmica de Radiação Solar para movimento Sul → Norte do trem.....	38
Gráfico 7.3 - Carga térmica resultante da ocupação do vagão.	41
Gráfico 7.4 - Carga Térmica resultante da iluminação do vagão.....	42
Gráfico 7.5 - Carga Térmica de renovação do ar (Sensível).	46
Gráfico 7.6 - Carga Térmica de renovação do ar (Latente).....	46
Gráfico 7.7 - Carga térmica total de renovação do ar.....	47
Gráfico 7.8 - Distribuição da carga térmica total ao longo do dia.	48
Gráfico 7.9 - Distribuição das cargas térmicas sensível e latente ao longo do dia....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Metabolismo para diversas atividades (ASHRAE 2005). [4]	19
Tabela 6.1 - Características do trem. [21]	26
Tabela 7.1 - Condições climáticas de um dia típico de verão do mês de janeiro, em São Paulo. [9].....	30
Tabela 7.2 - Valores dos parâmetros relacionados ao vagão de passageiros. [21]* .	30
Tabela 7.3 - FGCI para São Paulo, mês de janeiro. [22].....	36
Tabela 7.4 - Valores de FCR para a cidade de São Paulo. [22].....	37
Tabela 7.5 - Quantidade de passageiros ao longo do dia.	40
Tabela 7.6 - Valores de carga térmica sensível e latente ao longo do dia	49
Tabela 8.1 - Condições de Operação do Equipamento de ar condicionado.	55

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	4
2.	OBJETIVOS	5
2.1	Criação de um Modelo Físico a partir de Carros de Trens Reais.....	5
2.2	Avaliação da Carga Térmica dentro do Carro de Trem.....	5
2.3	Dimensionar o Equipamento de Ar Condicionado Adequado para a Carga Térmica Crítica	6
2.4	Escolher o Equipamento para Garantir Condições de Conforto Térmico	6
3.	REVISÃO DE MATERIAL TÉCNICO	7
3.1	Livros.....	7
3.1.1	Refrigeração e Ar Condicionado [1].....	7
3.1.2	Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa [2]	7
3.1.3	Física Aplicada à Construção – Conforto Térmico [3].....	8
3.2	Apostilas e Notas de Aula	8
3.2.1	Conforto Térmico [4].....	8
3.2.2	Ar Condicionado em Trens [5]	9
3.3	Manuais e Catálogos.....	9
4.	METODOLOGIA	11
4.1	Coleta de Informações	11
4.1.1	Trens	11
4.1.2	Carga Térmica	12
4.1.3	Conforto Térmico	13
4.1.4	Seleção do equipamento de ar condicionado	14
4.2	Programa de Simulação: Microsoft Excel.....	14
5.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	15
5.1	Carga Térmica	15

5.2	Mecanismos de Ganho de Calor	16
5.3	Psicrometria	20
5.4	Conforto Térmico	21
5.4.1	Valor de Isolação da Vestimenta	22
5.4.2	Velocidade do Ar Interno	22
5.4.3	Taxa Metabólica de uma Pessoa.....	23
6.	DESCRIÇÃO DAS ETAPAS	24
6.1	Determinação da Carga Térmica	24
6.1.1	Determinação dos Tipos de Cargas Térmicas a serem Estudadas	24
6.1.2	Determinação das Condições de Exposição ao Clima Externo	24
6.1.3	Características do Ambiente: Dimensões, Materiais Utilizados etc.	25
6.1.4	Características de Ocupação: Valor e Variação do Número de Passageiros ao Longo do Dia.	27
6.2	Determinação do Sistema de Ar Condicionado.....	27
7.	CÁLCULO DA CARGA TÉRMICA	28
7.1	Metodologia.....	28
7.2	Condições de Qualidade do Ar	28
7.3	Condições de Projeto	29
7.4	Carga Térmica de Transmissão de calor	31
7.4.1	Convecção Externa	32
7.4.2	Convecção Interna.....	33
7.5	Carga térmica de Insolação através de superfícies transparentes.....	34
7.6	Carga Térmica da Geração Interna de Calor	38
7.6.1	Carga Térmica de Ocupação.....	39
7.6.2	Carga Térmica de Iluminação.....	41
7.7	Carga Térmica de Renovação do Ar.....	43
7.8	Resultados gerais do Cálculo de Cargas Térmicas	47

8.	DETERMINAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE AR CONDICIONADO	50
8.1	Noções de Condicionamento de ar	50
8.2	Condições de Operação.....	55
8.3	Escolha da unidade de ar condicionado.....	57
9.	CONCLUSÕES	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
	APÊNDICE	64

1. INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário de passageiros difere do transporte rodoviário, por ser um transporte de grande capacidade, para grandes fluxos de pessoas.

Algumas das funções que devem ser exercidas pelas linhas ferroviárias no que diz respeito ao transporte de pessoas são:

- *Distribuição no centro*: transporte de pessoas, a curtas distâncias, na zona interna da cidade.
- *Aproximação intra-metropolitana*: interligação da zona metropolitana ao centro da cidade.
- *Interligação regional*: ligação de uma cidade ou conjunto de cidades a uma cidade metropolitana mais importante.
- *Ligação interurbana*: transporte de passageiros entre cidades ou regiões metropolitanas de igual importância ou mesmo cidades de diferentes países.
- *Funções específicas*, tais como, ligação a aeroportos.

Nas grandes cidades, o aumento do número de habitantes provoca um deslocamento diário de um número cada vez maior de pessoas. Portanto, o transporte ferroviário torna-se muito importante, porque facilita este deslocamento, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida, através do descongestionamento do tráfego rodoviário e da redução da emissão de poluentes.

Um projeto adequado de um carro de trem deve proporcionar um ambiente térmico confortável para os passageiros. No processo de dimensionamento de um sistema de condicionamento de ar para um carro de trem, a determinação da carga térmica interna representa o mais importante passo e o seu cálculo é muito importante para a seleção do equipamento de ar condicionado. O dimensionamento incorreto da carga térmica pode acarretar a seleção inadequada do equipamento e conseqüentemente, desconforto térmico dos passageiros.

2. OBJETIVOS

Os objetivos principais deste projeto são mostrados nos itens que compõem esse capítulo.

2.1 Criação de um Modelo Físico a partir de Carros de Trens Reais

Nesta etapa, deseja-se construir um modelo físico, baseado em um trem existente, para que se possa fazer a análise de cargas térmicas. São consideradas as características construtivas e as dimensões de um trem escolhido, assim como os materiais utilizados na sua construção. Para fins de cálculos de cargas térmicas, é preciso também considerar, por exemplo, a ocupação do trem, a orientação geográfica do trajeto do trem, a velocidade de cruzeiro do trem, a taxa de renovação de ar, o calor dissipado pelas lâmpadas, etc.

2.2 Avaliação da Carga Térmica dentro do Carro de Trem

A partir do modelo físico adotado anteriormente, deseja-se determinar como variam as cargas térmicas internas ao vagão ao longo das 24 horas do dia, de modo a se ter uma noção de qual deve ser o comportamento do ar condicionado durante o dia. Para tanto, serão utilizados modelos da transferência de calor como, por exemplo, o modelo de placa plana para avaliar a convecção do ar, o modelo de circuito térmico para avaliar a transmissão de calor, e algumas tabelas da ASHRAE para cálculo de radiação solar sobre superfícies transparentes e para o cálculo de geração interna de calor.

2.3 Dimensionar o Equipamento de Ar Condicionado Adequado para a Carga Térmica Crítica

Com base na variação da carga térmica ao longo do dia, determina-se a carga térmica crítica, para em seguida dimensionar as principais características do equipamento de ar condicionado a ser utilizado, tais como potência necessária e vazão requerida. Em seguida, com os valores obtidos, faz-se a seleção do equipamento.

Para esta seleção, serão consultados catálogos de equipamentos, assim como os manuais da ASHRAE.

2.4 Escolher o Equipamento para Garantir Condições de Conforto Térmico

Será considerado que as exigências de conforto térmico são caracterizadas por valores das seguintes variáveis: umidade relativa, temperatura e velocidade do ar.

Existem normas que apresentam faixas de valores recomendados para temperatura e umidade relativa do ar para ambientes condicionados, assim como valores recomendados para velocidade de ar interno.

As condições de conforto térmico podem ser estipuladas com o uso de “Cartas de conforto térmico” da ASHRAE, que apresentam na forma de um gráfico, as faixas de temperatura e umidade relativa necessárias para se garantir uma situação de conforto térmico. Uma carta de conforto será utilizada neste trabalho, para escolher uma região de trabalho do sistema de ar condicionado.

3. REVISÃO DE MATERIAL TÉCNICO

3.1 Livros

As noções teóricas necessárias para o desenvolvimento do trabalho são encontradas em livros sobre refrigeração e ar condicionado, transferência de calor e conforto térmico. Podemos citar, nesta seção, dois livros teóricos importantes que eventualmente serão utilizados e serão apresentados nas seções 3.1.1, 3.1.2 e 3.1.3.

3.1.1 Refrigeração e Ar Condicionado [1]

Este livro é muito útil para a segunda parte do trabalho, que consistirá em determinar o sistema de condicionamento de ar. Por um lado, este livro possui uma base teórica importante sobre os métodos de refrigeração, os diferentes ciclos de refrigeração, os equipamentos utilizados em aquecimento ou resfriamento (compressores, condensadores, dispositivos de expansão, evaporadores, etc.) e psicrometria. Por outro lado, o livro também apresenta uma metodologia para cálculos de condicionamento de ar e para carga térmica de resfriamento.

3.1.2 Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa [2]

Este livro apresenta os fenômenos de troca de calor (condução, convecção, radiação) e as formas de equacioná-los, de forma que seja útil para compreender melhor quais formas de transferência de calor estão presentes dentro do ambiente a ser estudado. O equacionamento dos meios de troca de calor é importante também

para entender o conceito de carga térmica e as suas aplicações.

3.1.3 Física Aplicada à Construção – Conforto Térmico [3]

Trata-se de um livro que possui noções de transmissão de calor, refrigeração e conforto térmico. No entanto, a parte mais importante diz respeito ao condicionamento de ar: o livro apresenta as diferentes formas de tratamento de ar, os sistemas de condicionamento de ar, noções de carga térmica, e uma metodologia para projetos de instalações de ar condicionado. Esta metodologia engloba assuntos importantes como: escolha do sistema, levantamento da carga térmica, cálculo da temperatura de orvalho da instalação, seleção do equipamento de tratamento de ar e isolamento térmico.

3.2 Apostilas e Notas de Aula

Além dos livros, algumas apostilas e notas de aulas são importantes para o desenvolvimento do trabalho.

3.2.1 Conforto Térmico [4]

Trata-se de uma apostila com as noções fundamentais sobre conforto térmico e suas aplicações. A apostila indica, nas suas referências, algumas obras importantes que devem ser consultadas, como por exemplo, os manuais da ASHRAE.

3.2.2 Ar Condicionado em Trens [5]

Estas notas de aula, referentes ao curso “Tecnologia Metroferroviária”, apresenta noções de termodinâmica, psicrometria, cálculos de carga térmica, úteis para o trabalho.

3.3 Manuais e Catálogos

Os manuais da ASHRAE são importantes não somente no aspecto teórico, mas também para a obtenção de dados (valores de coeficientes, gráficos, tabelas) referentes a assuntos como conforto térmico, refrigeração e condicionamento de ar. Em relação à área de conforto térmico, por exemplo, os manuais da ASHRAE fornecem tabelas de metabolismo humano, assim como tabelas contendo valores de isolamento para diferentes tipos de vestimenta. Estes manuais são, portanto, indispensáveis para o projeto.

Por outro lado, após os cálculos de dimensionamento de ar condicionado, é indispensável à consulta a catálogos de equipamentos de ar condicionado que tenham informações detalhadas, para que se possa fazer uma seleção precisa do equipamento que melhor atende às características térmicas do vagão de passageiros. Um exemplo de ficha técnica de equipamento de ar condicionado é mostrada na Figura 3.1.

MODELOS		UNIDADE	AG-W096HDWO	AG-W126HDWO
REFRIGERAÇÃO		BTU/H.	3.040~9.000~12.620	3.070~12.000~13.780
AQUECIMENTO		BTU/H.	3.040~10.920~13.990	3.070~13.700~17.390
POTÊNCIA	REFRIG./AQUEC.	W	620 / 780	1.060 / 1.080
CORRENTE (A)	REFRIG./AQUEC.	A	2,8 / 3,5	4,7 / 4,8
EER		BTU/H.W	13,65	12,26
COP		W/W	4,1	3,71
ALIMENTAÇÃO ENERGIA ELÉTRICA		Ø / V / HZ	1/220/60	1/220/60
VAZÃO DE AR	INTERNO MÁX	M ³ /MIN	11,0	12,0
	EXTERNA, MÁX	M ³ /MIN	27,0	28,0
DEBUMIDIFICAÇÃO		L/H.	1,1	1,3
NÍVEL DE RUÍDO	INTERNO ,ALTA/MÉDIA/BX.	DB(A)±3	37 / 33 / 25 / 20	38 / 33 / 25 / 20
	EXTERNO, MAX	DB(A)±3	47	47
GÁS REFRIGERANTE/CARGA		g	R410A - 900	R410A - 900
DISJUNTOR		A	15	15
CABOS DE INTERLIGAÇÃO NO. °MM2		NO. °MM2	4*1,0	4*1,0
CONEXÕES	LÍQUIDO	MM(IN)	6,35(1/4)	6,35(1/4)
	GÁS	MM(IN)	9,52(3/8)	9,52(3/8)
DIMENSÕES	INTERNA (L*A*P)	MM	798*290*210	798*290*210
	EXTERNA (L*A*P)	MM	717*483*230	717*483*230
PESO LÍQUIDO	INTERNO	KG	8,5	8,5
	EXTERNO	KG	28	28
PESO BRUTO	INTERNO	KG	10	10
	EXTERNO	KG	30	30
COMPRIMENTO DA TUBULAÇÃO (MIN/MAX)		M	3/15	3/15
DESNÍVEL MÁX.		M	7	7
FUNÇÕES	CONTROLE DE TEMPERATURA		ELETRÔNICO	ELETRÔNICO
	FILTRO (LAVAVEL/ANTI-FUNGO)		SIM	SIM
	FUNÇÃO AUTO LIMPANTE		SIM	SIM
	CHAVE SWING		SIM	SIM
	VELOCIDADES: VENTIL./REFRIG./AQUEC.		3/4/4	3/4/4
	ALETAS(ACIMA&ABAIXO)		AUTO	AUTO
	ALETAS(DIREITASESQUERDA)		MANUAL	MANUAL
	CONTROLE REMOTO		SEM FIO LCD	SEM FIO LCD
	AJUSTE DE TEMPERATURA	REFRIGERAÇÃO	18°C ~ 30°C	18°C ~ 30°C
		AQUECIMENTO	16°C ~ 30°C	16°C ~ 30°C
	OPERAÇÃO AUTOMÁTICO		SIM	SIM
	AUTO DIAGNÓSTICO		SIM	SIM
	TIMER		24H, ON/OFF	24H, ON/OFF
	SLEEP TIMER		SIM	SIM
OPERAÇÃO SOFT DRY		SIM	SIM	
JET COOL		SIM	SIM	

Figura 3.1 - Ficha técnica de dois equipamentos de ar condicionado.

4. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do trabalho, é preciso coletar informações a respeito de vagões de passageiros, métodos para cálculo de carga térmica de refrigeração, cálculos de instalações de ar condicionado, conforto térmico de passageiros e equipamentos de ar condicionado. Por outro lado, é necessária a utilização de um software que permita realizar cálculos de carga térmica para diferentes situações e que mostre a sua variação durante um intervalo de tempo definido. A metodologia que será empregada para a coleta de informações e o programa a ser utilizado para simulações e cálculos é descrita nos demais itens desse capítulo.

4.1 Coleta de Informações

4.1.1 Trens

A primeira etapa do trabalho consiste em obter um modelo físico de um carro de passageiros de trem, no qual será feito o estudo de carga térmica. Para tanto, o objetivo é determinar as dimensões principais do carro, assim como os materiais utilizados em sua fabricação. A obtenção desses dados pode ser possível por contato com funcionários de empresas de construção de trens, como por exemplo, as empresas CAF e Alstom. Outras informações, como por exemplo, os horários de pico de ocupação por pessoas, podem ser obtidas junto a funcionários da CPTM.

4.1.2 Carga Térmica

Após a definição do modelo físico, é necessário realizar cálculos da variação de carga térmica. Para que seja possível realizar tais cálculos, necessita-se definir algumas condições de contorno, como por exemplo, as condições de exposição ao clima externo e as condições internas do vagão que são conhecidas ou que são desejadas.

Condições de Exposição ao Clima Externo

É importante definir, por exemplo, as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido, assim como a umidade relativa. Todas essas variáveis influenciam os cálculos de carga térmica e devem ser levadas em consideração em um projeto de dimensionamento de uma instalação de ar condicionado.

Para definir as condições climáticas externas, serão utilizados dados climáticos referentes à cidade de São Paulo. As variáveis citadas anteriormente podem ser obtidas em tabelas que listam os valores para essas variáveis para cada hora, dentro de um período de um dia, para um *dia típico de verão/inverno*. Estas tabelas podem ser obtidas em artigos de climatologia [9].

Condições Internas

Devem-se definir as condições de temperatura e umidade internas, isto é, as condições desejadas que serão fixadas e mantidas pelo equipamento de ar condicionado. Também é importante definir as condições de ocupação, como por exemplo, a variação da quantidade de passageiros e tipo de atividade que cada passageiro exerce (passageiro sentado ou em pé, por exemplo). Os manuais da ASHRAE possuem diversas tabelas com valores de metabolismo humano para diversas atividades.

4.1.3 Conforto Térmico

No que diz respeito ao conforto térmico, é necessário definir quais são as exigências humanas de conforto térmico. Trata-se da definição da faixa de temperaturas e umidades que caracteriza a situação de conforto térmico, tanto para o verão quanto para o inverno. Muitas pessoas, por exemplo, sentem-se confortáveis quando a temperatura do ar está na faixa de 18 a 22°C e a umidade relativa está entre 40 e 65%. No diagrama psicrométrico esta é a chamada zona de conforto térmico, como ilustrado no gráfico da Figura 4.1.

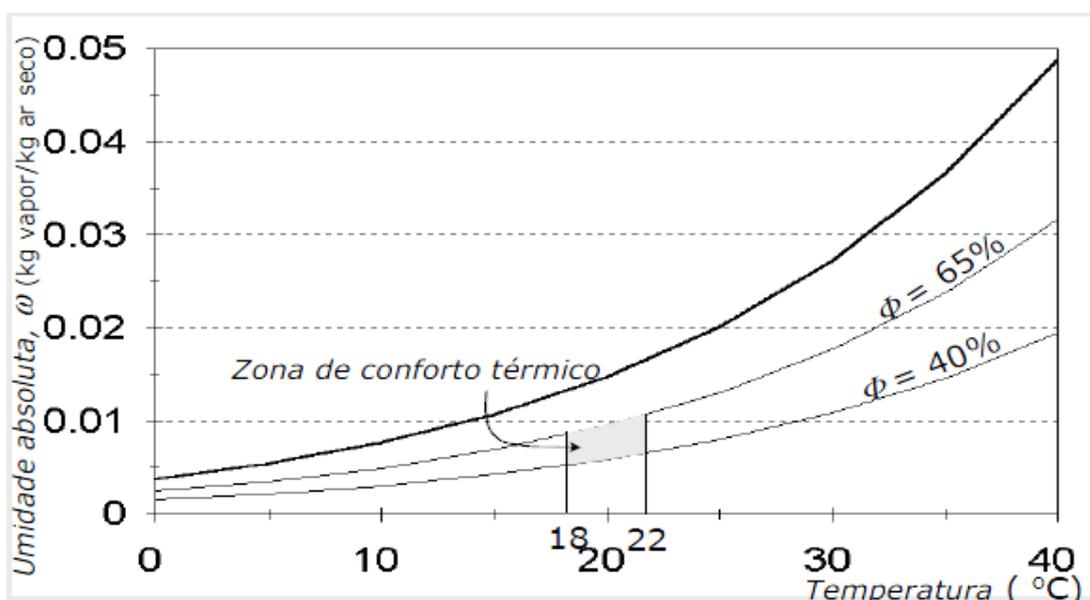


Figura 4.1 - Zona de conforto térmico em um diagrama psicrométrico [5].

Outra forma de avaliar o conforto térmico é a aplicação do *método de Fanger*, apresentado em [4].

4.1.4 Seleção do equipamento de ar condicionado

Após os cálculos de carga térmica, deve-se dimensionar e escolher o equipamento de ar condicionado adequado para a carga térmica interna estipulada e para manter as condições de temperatura e umidade desejadas. Para isso, são consultados catálogos de equipamentos de ar condicionado. A escolha se dará principalmente com base na carga térmica crítica do dia e nas condições internas desejadas.

4.2 Programa de Simulação: Microsoft Excel

O cálculo das cargas térmicas de refrigeração pode ser bastante prático com o uso da planilha do Excel. É possível montar planilhas integradas entre si por diversas fórmulas, de modo que se tenha por um lado os diversos dados de entrada do sistema como, por exemplo, as dimensões do vagão, o número de passageiros e a condutividade dos materiais e por outro lado os dados de saída como, por exemplo, os valores das diferentes cargas térmicas (geração interna, solar, transmissão). Após montar as diversas tabelas de cálculos, a realização de simulações torna-se simples, uma vez que basta modificar os dados de entrada para visualizar o comportamento da carga térmica em tempo real, seja através de gráficos, seja através dos dados numéricos.

Além da simplicidade para realizar diversas simulações para condições diferentes, uma boa formatação da planilha contribui para uma maior clareza e uma melhor apresentação dos resultados obtidos.

5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

5.1 Carga Térmica

Todo projeto de um sistema de refrigeração ou ar condicionado começa com a avaliação de qual é a quantidade de calor que deve ser retirada ou fornecida a um determinado ambiente ou processo. Esta quantidade de calor é chamada de carga térmica, ou potência térmica produzida. Esta carga térmica, na refrigeração, é fruto dos diversos ganhos de calor, ou seja, das diversas formas pela qual o ambiente recebe calor do meio externo.



Figura 5.1 - Ganhos de calor e carga térmica na refrigeração.

As principais fontes de ganho de calor em um vagão de passageiros são:

- **Geração Interna:** O calor é gerado internamente no carro devido às fontes de calor e de umidade. Os passageiros produzem calor e umidade e as máquinas elétricas e mecânicas produzem apenas calor;
- **Transmissão:** O calor é transferido para dentro do carro através das paredes por meio da condução de calor e do ar para as superfícies expostas por convecção. A temperatura interior do carro é afetada;
- **Solar:** Ocorre a incidência de radiação solar sobre a superfície externa do trem. Se a superfície for transparente, a incidência do sol se dá diretamente para o interior do trem (janelas). Se a superfície for opaca, haverá condução de calor para dentro do carro através das paredes. No caso de fonte de ganho de calor solar, a temperatura interna é afetada;

- **Infiltração:** Trata-se do calor que é adicionado ou perdido do carro devido à infiltração do ar exterior ou saída do ar interior (no caso de infiltração por vedação insuficiente). Nesta situação, a temperatura interior e a umidade são afetadas.

Existe ainda outra classificação possível para cargas térmicas:

- **Carga Térmica sensível:** Quantidade de calor que deve ser trocada com o ar para que seja possível atingir uma temperatura pré-definida. Esta carga térmica afeta a temperatura do carro. Exemplos: Transmissão de calor através das paredes, incidência solar, entrada de ar externo mais aquecido, fontes internas de calor (pessoas e equipamentos);
- **Carga Térmica Latente:** trata-se do calor da evaporação da água. Pode ser calculado por: $Q = \dot{m}.h_{vap}$, onde \dot{m} é a vazão da água e h_{vap} é a entalpia de evaporação da água. Esta carga térmica afeta a umidade do carro. Exemplos: entrada de ar mais aquecido, fontes internas de umidade (ocupantes).

5.2 Mecanismos de Ganho de Calor

Existem diversos mecanismos de ganho de calor. O mecanismo de transmissão através dos materiais que compõem as paredes, o teto e o piso envolve os fenômenos combinados de transferência de calor por condução, convecção e radiação, conforme mostrado na Figura 5.2.

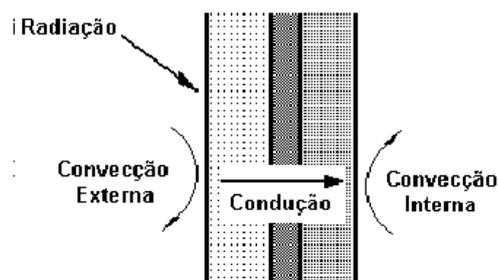


Figura 5.2 - Transferência de calor em paredes. [13]

No cálculo de carga térmica devido à transmissão através de paredes, considerando apenas convecção e condução o fluxo de calor é dado por:

$$Q = UA(T_e - T_i) \quad (5.1)$$

Onde U é o coeficiente global de transferência de calor da parede (W/ m² °C), A é a área da parede (m²), T_e é a temperatura do meio externo e T_i é a temperatura do meio interno. O coeficiente global U, que engloba apenas os efeitos de condução e convecção interna /externa, é calculado a partir do conceito de resistências térmicas, mostrado na Figura 5.3.

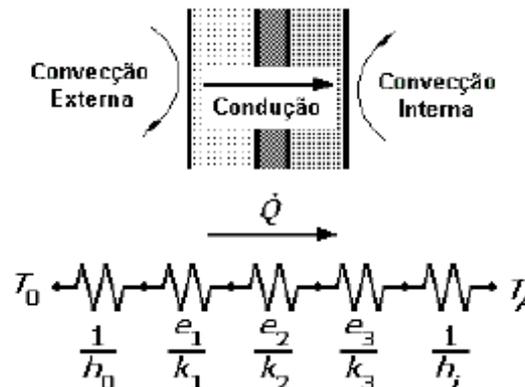


Figura 5.3 - Resistências térmicas para o cálculo do coeficiente global U. [13]

Desse modo, o coeficiente U será dado por:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_0} + \sum_{j=1}^n \frac{e_j}{k_j} + \frac{1}{h_i}} \quad (5.2)$$

Onde h₀ e h_i são os coeficientes de convecção do lado externo e interno (W/m².°C), e_j é a espessura das camadas que compõem a parede e k_j é a condutividade térmica das camadas.

Além dos fenômenos de condução e convecção, existe também o fenômeno de radiação solar, que pode atingir um ambiente condicionado de duas formas:

- Incidência através de janelas de vidro que permite a passagem de uma parcela dessa radiação para dentro do ambiente;
- Incidência sobre a superfície externa opaca, e transferência de calor para dentro do ambiente por condução.

Segundo [5], no primeiro caso, o fluxo de calor é dado por:

$$Q_s = (FCGI_{max}).(FCR).(CS).A \quad (5.3)$$

Onde Q_{st} é o fluxo de calor total que atravessa um vidro plano claro, $FCGI_{max}$ é o fator de ganho de calor por insolação máximo para um vidro plano claro [W/m^2], FCR é o fator de carga de refrigeração horária, CS é o coeficiente de sombreamento e A é a área de troca de calor (m^2). Existem valores tabelados para $FCGI_{max}$, FCR e CS .

No segundo caso, de acordo com [13], de modo a considerar todos os fenômenos de transferência de calor, isto é, radiação, convecção e condução, o fluxo de calor é dado por:

$$Q_t = UA(T_e + \Delta T_{rad} - T_i) \quad (5.4)$$

Onde Q_{so} é o fluxo de calor total que atravessa uma superfície opaca (W), U é o coeficiente de troca de calor ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), A é a área de troca de calor (m^2), T_e é a temperatura do meio externo e T_i é a temperatura do meio interno. O termo ΔT_{rad} é um termo de correção da temperatura externa devido ao efeito da radiação solar na superfície. Este termo pode valer $3^\circ C$, $4^\circ C$ ou $5^\circ C$, de acordo com a cor e a orientação da parede [13].

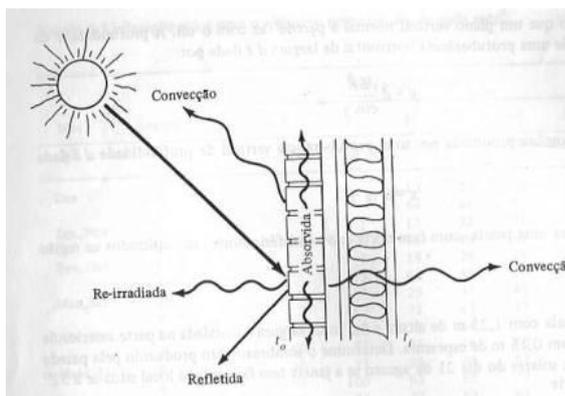


Figura 5.4 - Radiação solar através de superfície opaca [5].

Além da geração de calor ocasionada pela transmissão e pela radiação solar, é preciso considerar também a geração de calor interna, produzida pela iluminação e pelos passageiros.

No caso da geração de calor produzida pela iluminação, é preciso somar as potências nominais das lâmpadas de acordo com a distribuição horária. Deve-se, no entanto, multiplicar por um fator de carga térmica de refrigeração (tabelado [8]), para considerar o fato de que a carga térmica das luzes é “retardada”.

Tabela 5.1 - Metabolismo para diversas atividades (ASHRAE 2005). [4]

Atividade	Metabolismo (W/m²)
<i>Basal</i>	34
<i>Reclinado</i>	46
<i>Sentado relaxado (sedentário)</i>	58
<i>Sentado em atividade de escritório</i>	70
<i>Em pé relaxado</i>	70
<i>Dirigindo carro</i>	70 a 80
<i>Em pé, atividade leve</i>	93
<i>Caminhando em plano horizontal a 2km/h</i>	110
<i>Em pé, atividade média (trabalhos domésticos)</i>	116
<i>Caminhando em plano horizontal a 5 km/h</i>	200
<i>Trabalhando na Construção Civil</i>	275
<i>Esportes, correndo a 15km/h</i>	550

No caso do calor liberado pelas pessoas, deve-se multiplicar o valor do calor liberado para uma determinada atividade pelo número de ocupantes que realizam tal atividade. Existem tabelas de valores de calor liberado para diversas atividades

nos manuais da ASHRAE, como por exemplo, a Tabela 5.1.

Por fim, deve-se também considerar o caso em que ar externo entra no carro (por exemplo: renovação de ar desejada ou infiltração de ar através de vedação ineficiente ou abertura de portas), afetando a temperatura e a umidade interna.

5.3 Psicrometria

O estado termodinâmico de uma mistura de duas substâncias tais como ar seco e vapor de água podem ser determinados por três de suas propriedades. Com base neste fato, foi possível reunir em um diagrama todas as propriedades psicrométricas do ar úmido.

Um diagrama psicrométrico é construído para uma dada pressão de mistura (pressão barométrica). Conhecendo duas propriedades quaisquer do ar, como por exemplo, as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido TBS e TBU, as demais propriedades podem ser obtidas do diagrama. A figura a seguir ilustra as principais características de um diagrama psicrométrico. As propriedades são apresentadas em função da massa de ar seco da mistura.

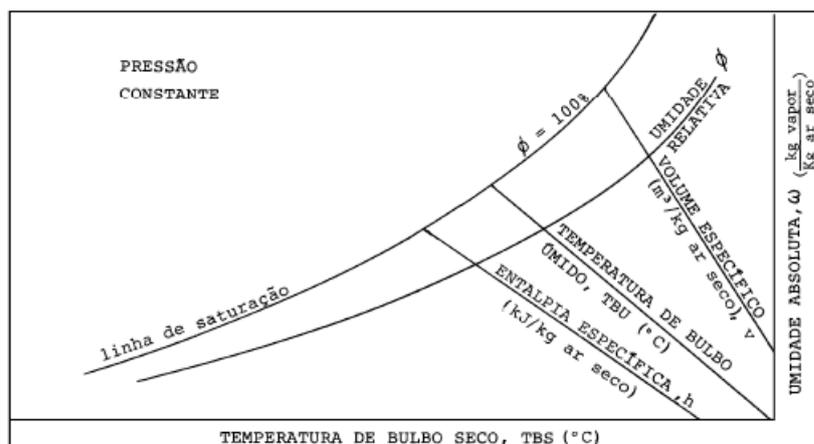


Figura 5.5 - Principais características de um diagrama psicrométrico. [5]

Para os cálculos de instalação de um sistema de ar condicionado, o diagrama psicrométrico para a cidade de São Paulo deve ser consultado e utilizado (Figura 5.6).

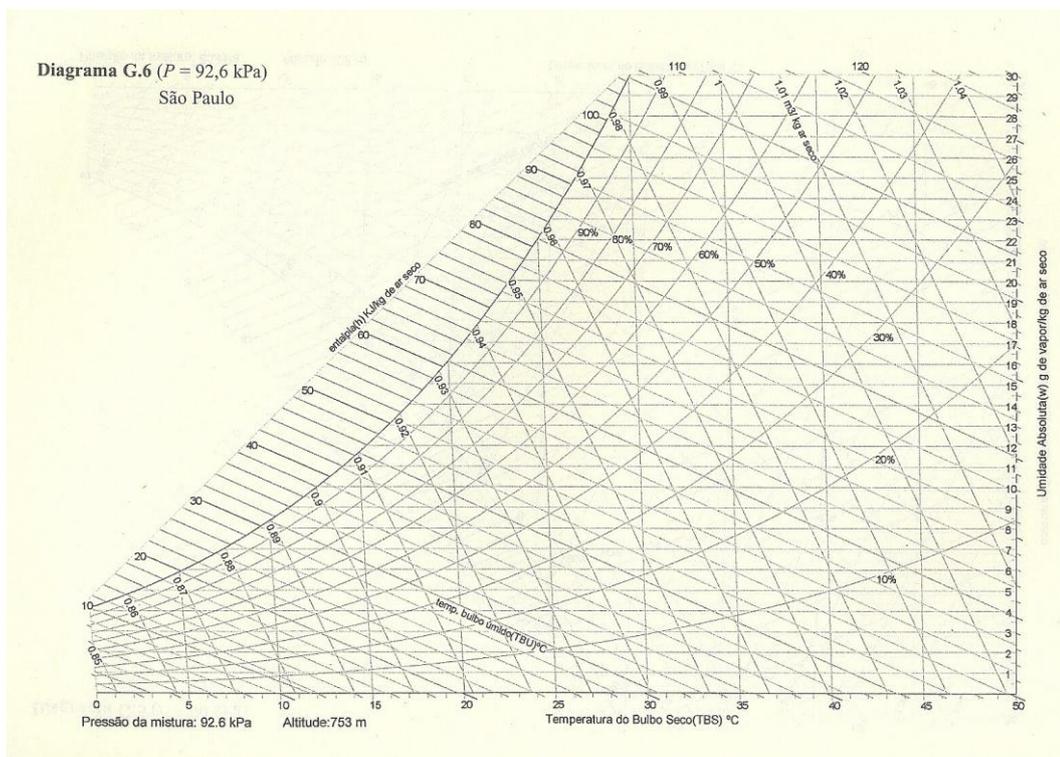


Figura 5.6 - Diagrama Psicrométrico para a cidade de São Paulo [5].

5.4 Conforto Térmico

As condições de conforto térmico humano são definidas por intervalos de valores das seguintes variáveis: temperatura, umidade relativa, vazão de ar, e temperatura radiante média do ambiente. Esses valores são definidos de acordo com as características do ocupante, que dependem da taxa metabólica e também da resistência térmica devido à vestimenta da pessoa. Esses valores devem respeitar condições satisfatórias de conforto térmico.

Existem normas, como por exemplo, as normas ASHRAE e ISO, que apresentam critérios para avaliação das condições de conforto térmico de ambientes com condições térmicas moderadas, considerando as variáveis citadas anteriormente.

Estas normas também estabelecem que as condições internas de um ambiente respeitem as exigências de conforto térmico uma vez que 80% dos ocupantes encontram-se satisfeitos com as condições presentes.

Alguns parâmetros importantes que podem ser fixados, a fim de analisar o conforto térmico do ambiente são descritos nas próximas seções.

5.4.1 Valor de Isolação da Vestimenta

A vestimenta relaciona-se a uma resistência térmica interposta entre o corpo e o meio ambiente e, também, à permeabilidade ao vapor d'água. Quanto mais espessas, menos condutivas e menos permeáveis forem às roupas, maior dificuldade terá o organismo para trocar calor com o meio ambiente. Já que a vestimenta reduz a perda de calor, a mesma pode ser classificada de acordo com o seu valor de isolação.

A unidade normalmente usada é o CLO ("clothing"), sendo que 1 CLO equivale a $0,15^\circ \text{C W/m}^2$ no SI. A escala de CLO é projetada de modo que uma pessoa despida tenha um valor de 0,0 CLO e outra vestindo um terno típico tenha um valor e 1,0 CLO. A norma ASHRAE vários valores de isolações típicas para conjuntos de vestimentas, como por exemplo, um valor de 0,35 CLO para roupas leves de verão, típicas de habitações.

5.4.2 Velocidade do Ar Interno

Assim como a temperatura do ar, a velocidade do vento é determinante na troca de calor por convecção entre o corpo e o ambiente. Quanto mais intensa for a ventilação, maior será a quantidade de calor trocada entre o corpo humano e o ar, conseqüentemente menor será a sensação de calor.

5.4.3 Taxa Metabólica de uma Pessoa

Existem taxas diferentes de metabolismo, dependendo da atividade que uma pessoa realiza, estimadas pela ASHRAE. Por exemplo, uma pessoa sentada e relaxada possui uma taxa de metabolismo equivalente a 58W/m^2 .

Em relação às normas técnicas de conforto térmico, a ASHRAE 55 (2005) apresenta gráficos para determinação das condições de conforto térmico em ambientes condicionados, considerando percentagem máxima de pessoas insatisfeitas limitada a 20%. Um exemplo de carta de conforto da ASHRAE é mostrado na Figura 5.7.

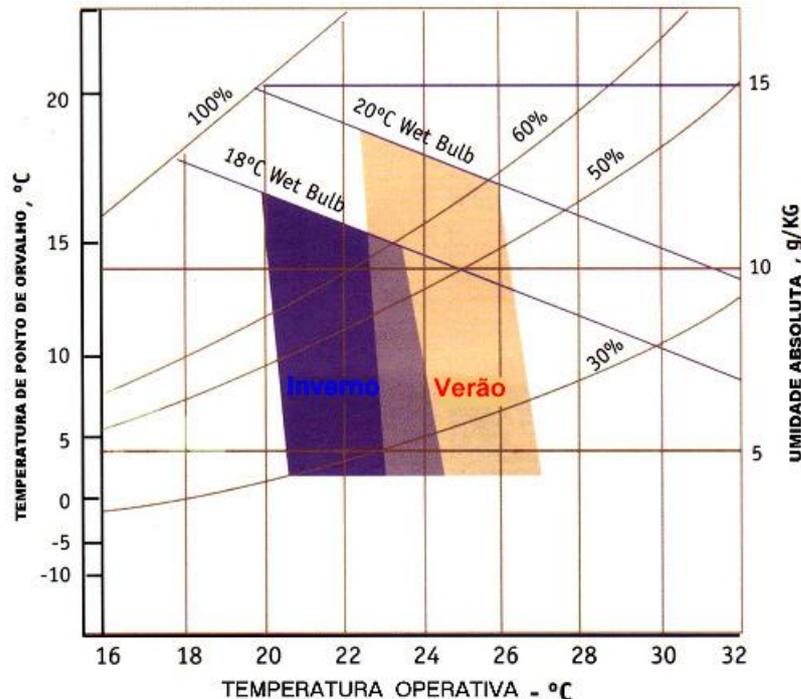


Figura 5.7 - Carta de Conforto da AHSRAE (Atividade sedentária, Var <0,2m/s) – ASHRAE 2005. [4]

A carta de conforto acima será utilizada para definir as condições internas de temperatura e umidade que devem ser mantidas pelo equipamento de ar condicionado.

Outra forma de avaliar o conforto térmico de uma pessoa é pelo *método de Fanger*, descrito em [4], que faz o uso de uma equação matemática para relacionar o tipo de vestimenta e o nível de atividade metabólica com as condições de temperatura e velocidade do ar.

6. DESCRIÇÃO DAS ETAPAS

6.1 Determinação da Carga Térmica

A determinação da carga térmica é uma etapa fundamental de um projeto de sistema de ar condicionado, uma vez que a capacidade de refrigeração do sistema deve atender integralmente à carga térmica total do ambiente que deve ser condicionado. O cálculo de cargas térmicas deve ser o mais preciso possível, para evitar que o projeto saia incorreto, isto é, que as condições de conforto não sejam respeitadas.

O roteiro utilizado para a determinação da carga térmica do ambiente interno pode ser dividido nas etapas presentes nas seções de 6.1.1 a 6.1.4.

6.1.1 Determinação dos Tipos de Cargas Térmicas a serem Estudadas

Existem diversos tipos de cargas térmicas que podem ser estudados, como já foi discutido: carga térmica de transmissão de calor, carga térmica de insolação através de vidros, carga térmica devido à ocupação interna do vagão, etc. É importante listar todas estas cargas térmicas e decidir como serão calculadas, isto é, quais parâmetros serão definidos e fixados e quais hipóteses serão adotadas.

6.1.2 Determinação das Condições de Exposição ao Clima Externo

O *dia típico de projeto* é uma ferramenta importante na determinação das exigências de conforto durante o verão e o inverno. Com base nas características deste dia que o projeto pode ser elaborado para melhor responder ao conforto térmico do

indivíduo. O procedimento para a obtenção de um dia típico de projeto é baseado na metodologia desenvolvida por SATTLER (1989) [9].

Neste trabalho, serão consideradas condições climáticas correspondentes a um dia típico de verão ou inverno na cidade de São Paulo. Para cada dia típico, são listados, por exemplo, os valores horários de temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, umidade relativa e velocidade do vento.

6.1.3 Características do Ambiente: Dimensões, Materiais Utilizados etc.

Uma pesquisa de carros de passageiros reais ofereceu algumas opções de modelos físicos a serem empregados no estudo de cargas térmicas. Neste trabalho, o modelo físico é baseado em um vagão de passageiros construído pela empresa CAF, em 2009, para a CPTM. As características gerais deste trem são listadas na Tabela 6.1.



Figura 6.1 - Composição do trem. [21]



Figura 6.2 – Foto do vagão de passageiros. [21]

Tabela 6.1 - Características do trem. [21]

Características Gerais	<i>Fabricante</i>	CAF
	<i>Ano de Fabricação</i>	2009
	<i>Origem</i>	Espanha e Brasil
	<i>Ano de Operação</i>	2010
	<i>Caixa</i>	Aço Inox
	<i>Bitola</i>	1,60 m
Dimensões Fornecidas	<i>Altura do Carro</i>	3,936 m
	<i>Altura do Pantografo Abaixado</i>	4,555 m
	<i>Altura do Boletto ao Piso</i>	1,335 m
	<i>Altura do Boletto ao Eixo Engate</i>	0,927 m
	<i>Largura do Carro</i>	3,05 m
	<i>Largura das Portas</i>	1,35 m
	<i>Comprimento dos vagões MC/MC1</i>	21,922 m
	<i>Comprimento dos Vagões R/R1</i>	20,61 m
	<i>Peso de MC</i>	49620 kg
	<i>Peso de R</i>	39917 kg
Capacidade e Desempenho	<i>Esforço Trator</i>	28300 kgf
	<i>Potência Contínua</i>	2860 kW
	<i>Velocidade Máxima</i>	100 km/h
	<i>Aceleração Máxima</i>	0,90 m/s ²
	<i>Desaceleração Máxima Freio de Serviço</i>	1,10 m/s ²
	<i>Desaceleração Máxima Freio de Emergência</i>	1,2 m/s ²
	<i>Lotação MC/MC1</i>	54+186
	<i>Lotação R/R1</i>	60+202

É preciso frisar que será considerada a hipótese de que as trocas de calor envolvendo os assentos internos do vagão não influenciam de forma significativa a carga térmica, se comparada à carga térmica gerada pela geração de calor devida ao metabolismo dos ocupantes e à carga térmica gerada pela penetração de radiação solar através dos vidros.

6.1.4 Características de Ocupação: Valor e Variação do Número de Passageiros ao Longo do Dia.

Por fim, as condições de ocupação devem ser definidas, isto é, de que forma a quantidade de passageiros varia ao longo do dia. Devem ser definidos horários de pico, nos quais há uma maior lotação, e horários de baixo movimento, nos quais a quantidade de ocupantes do vagão é baixa.

6.2 Determinação do Sistema de Ar Condicionado

Com base na carga térmica total calculada para o modelo físico adotado, nas exigências de conforto térmico determinadas através de uma carta de conforto térmico e nas condições climáticas externas, serão feitos cálculos de dimensionamento de equipamento de ar condicionado. Deseja-se, sobretudo, determinar a capacidade de refrigeração do equipamento de ar condicionado e a vazão de ar a ser insuflado no ambiente (vagão). Para uma maior facilidade na escolha do equipamento adequado em catálogos, é importante definir a capacidade de refrigeração em BTU/h e em TR, unidades comumente utilizadas em catálogos de equipamentos de condicionamento de ar.

7. CÁLCULO DA CARGA TÉRMICA

7.1 Metodologia

Para o dimensionamento de um ar condicionado, é preciso avaliar inicialmente as contribuições de cada ganho de calor com o objetivo de calcular a carga térmica total. O equipamento de ar condicionado deverá ser dimensionado de modo a suportar a carga térmica máxima que ocorre durante o dia dentro do vagão de passageiros. As cargas térmicas que serão avaliadas são: carga térmica de transmissão de calor através das paredes do vagão, carga térmica de insolação através dos vidros, carga térmica devida à geração interna (ocupação e iluminação) e carga térmica de ventilação e infiltração. Entretanto, antes de calcular os diferentes tipos de carga térmica, é preciso definir as condições de qualidade do ar interno, estabelecendo uma taxa de renovação de ar desejada, e as condições de projeto, que incluem desde a variação das condições externas de temperatura e umidade até as condições internas desejadas, considerando as características construtivas do trem.

7.2 Condições de Qualidade do Ar

É preciso garantir a qualidade do ar em um ambiente interno climatizado para que existam condições de conforto apropriadas para a saúde. As partículas de poluição oriundas de fontes externas ou internas devem ser removidas ou diluídas. Para tanto, é importante que haja um processo de ventilação e filtragem para eliminar odores, partículas contaminantes, e renovar o ar ambiente (evitar o acúmulo de gás carbônico).

Logo, uma taxa de troca de ar com o ambiente externo será adotada para propiciar a renovação do ar interno do vagão de passageiros. Segundo a norma ABNT NBR

16401:3 [16], a taxa de renovação de ar recomendável para um ambiente condicionado, para aplicações gerais, é de $27 \text{ m}^3/(\text{pessoa.hora})$. Esta taxa será utilizada para calcular a carga térmica de ventilação.

7.3 Condições de Projeto

Denomina-se condições de projeto o conjunto dos parâmetros e hipóteses, determinados pelo projetista, a serem adotados para se obter resultados satisfatórios para o projeto. Os cálculos das diversas cargas térmicas são realizados com base nesses parâmetros e hipóteses. Os parâmetros envolvem valores para as condições climáticas externas, valores para as condições climáticas internas desejadas, e as condições de ocupação, por exemplo.

Em um primeiro passo, devem-se definir as condições climáticas externas, isto é, a temperatura de bulbo seco e a umidade ao longo do dia. Para tanto, são considerados dados climáticos de um dia típico de verão de Janeiro para a cidade de São Paulo. A Tabela 7.1 mostra as características do dia típico adotado, ao longo das 24 horas.

Em relação às condições climáticas internas do vagão de passageiros, deseja-se que o ar condicionado mantenha o ambiente interno a uma temperatura de Bulbo Seco igual a 23°C e a uma umidade relativa de 60%, condições em que existe conforto térmico para os passageiros, para o inverno e para o verão. Esta escolha é feita a partir da Carta de conforto térmico da ASHRAE mostrada na Figura 5.7: deseja-se que a zona de conforto se situe na intersecção entre a zona relativa ao verão e a zona relativa ao inverno.

Além das questões climáticas, são necessários diversos dados a respeito do vagão de passageiros para realizar o cálculo de cargas térmicas, tais como: dimensões principais, dimensões das portas e janelas, velocidade do trem, espessura das paredes e dos vidros. A Tabela 7.2 apresenta os valores utilizados para os diversos parâmetros do carro de trem.

Tabela 7.1 - Condições climáticas de um dia típico de verão do mês de janeiro, em São Paulo. [9]

Condições Climáticas				
Hora	TBS (°C)	TBU (°C)	ϕ (%)	Vel. Vento (m/s)
1	22,9	20,2	79	2,3
2	22,5	20	81	2
3	22,2	19,8	82	1,9
4	21,8	19,6	82	2
5	21,5	19,4	83	2,1
6	21	19,2	85	2,1
7	20,8	19,1	85	2,1
8	21,5	19,2	82	2,3
9	23,5	19,7	75	2,9
10	24,9	20,2	67	3,9
11	26,7	20,6	59	4,9
12	28,1	20,9	54	5,4
13	29,3	21	49	5,7
14	29,9	20,3	48	5,7
15	30,7	21,2	45	5,6
16	30,8	21,3	45	5,9
17	30,3	21,3	47	5,6
18	29,8	21,3	49	5,3
19	28,7	21,2	53	4,7
20	27,4	21,2	60	3,5
21	26,1	21	66	3
22	25,2	20,8	71	2,7
23	24,3	20,6	73	2,7
24	23,8	20,4	75	2,4
Média Diária	25,5	20,4	66	3,6

Tabela 7.2 - Valores dos parâmetros relacionados ao vagão de passageiros. [21]*

Altura interna (m)	2,15
Comprimento (m)	21,92
Largura(m)	3,05
Largura Janela (m)	2,22
Altura Janela (m)	0,92
Largura porta lateral(m)	1,35
Altura Porta lateral(m)	1,90
Área Janela (m²)	2,04
Área Porta (m²)	2,57
Área Vidro Porta (m²)	0,26
Temperatura das Paredes (°C)	20,00
Velocidade do Trem (m/s)	22,22
e (espessura paredes da caixa) (m)	0,01
ev (espessura vidro) (m)	0,005

*Observação: alguns dos parâmetros acima foram estimados com base em outros parâmetros conhecidos através de relações de proporcionalidade. Outros parâmetros foram adotados, como por exemplo, a velocidade do trem, que foi estabelecida como sendo próxima da velocidade máxima da composição de carros.

7.4 Carga Térmica de Transmissão de calor

O cálculo de carga térmica devido à transmissão de calor através de paredes é determinado por:

$$Q_t = UA(T_e + \Delta T_{rad} - T_i) \quad (7.1)$$

Onde U é o coeficiente global de transferência de calor da parede ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), A é a área da parede (m^2), T_e é a temperatura do meio externo, T_i é a temperatura do meio interno e ΔT_{rad} é um termo de correção da temperatura externa devido ao efeito da radiação solar na superfície [13]. O coeficiente global U engloba apenas os efeitos de condução e convecção e é calculado a partir da seguinte relação, já vista anteriormente:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \sum_{j=1}^n (e_j/k_j) + \frac{1}{h_i}} \quad (7.2)$$

Onde h_o e h_i são os coeficientes de convecção do lado externo e interno ($W/m^2 \cdot K$), e_j é a espessura das camadas que compõem a parede (m) e k_j é a condutividade térmica das camadas ($W/m \cdot K$).

Assim verifica-se que para determinar o coeficiente global de transferência de calor U, é preciso determinar os coeficientes de convecção externa e interna. Para tanto, é considerado um modelo de escoamento de ar sobre uma placa plana para representar os efeitos de convecção externa ou interna do ar sobre as quatro paredes do trem (paredes laterais, teto e piso). Os efeitos de convecção externa e interna são tratados separadamente, e para cada tipo de convecção, são determinados dois coeficientes de convecção: um para o escoamento de ar sobre os vidros e outro para o escoamento de ar sobre as paredes de aço inoxidável. Com

isso, obtém-se uma carga térmica de transmissão referente à área de vidro, e outra carga térmica de transmissão referente à área de aço inoxidável. É importante frisar que cada uma das duas paredes laterais possui 3 janelas e 4 portas e que a área dos vidros das portas também foi considerada.

7.4.1 Convecção Externa

Para a determinação do coeficiente de convecção externa, tanto para as paredes de aço quanto para os vidros, são usadas as propriedades do ar para uma temperatura de 25°C, que é aproximadamente a temperatura média do dia típico de verão adotado. Além disso, é admitido que o trem viaja a uma velocidade um pouco abaixo da velocidade máxima de 100 km/h, ou seja, 80km/h (ou 22,22 m/s). Antes de ser calculado o coeficiente de convecção, é preciso obter o número de Reynolds para determinar se o tipo de escoamento é laminar ou turbulento, e com isso, determinar a fórmula a ser utilizada para obter o número de Nusselt. Em seguida, a partir do número de Nusselt, é obtido o coeficiente de convecção.

O número de Reynolds é dado por:

$$Re = \frac{V.L}{\nu} \quad (7.3)$$

Onde V é a Velocidade do Trem (m/s), L é o comprimento da placa - parede ou vidro - (m) e ν é a viscosidade cinemática do ar a 25°C (m²/s).

O número de Nusselt, por sua vez, é dado por:

$$Nu = \frac{h.L}{k} \quad (7.4)$$

Onde h é o coeficiente de convecção (W / m².K), L é o comprimento da placa - parede ou vidro – (m), e k é a condutividade térmica do material - vidro para as janelas ou aço inoxidável para as paredes – (W / m.K).

No caso da convecção externa, foi observado que o escoamento de ar é turbulento, e a fórmula utilizada para determinar o número de Nusselt, segundo [2], é:

$$Nu = (0,037 \cdot Re^{4/5} - 871) Pr^{1/3} \quad (7.5)$$

O termo Pr é denominado número de Prandtl e é dado por:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (7.6)$$

Onde ν é a viscosidade cinemática (m^2/s) e α é a difusividade térmica (m^2/s).

O coeficiente global de convecção externa obtido, ao aplicar as relações acima, foi:

$$h_0 = 17,5 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

7.4.2 Convecção Interna

No caso da convecção interna, adota-se que o ar se encontra a 23°C , temperatura desejável para os passageiros. Por outro lado, a velocidade do vento interno é considerada como sendo igual a $0,25 \text{ m/s}$, que é a velocidade máxima estabelecida pela ANVISA [12] para ambientes condicionados. Para a determinação do coeficiente de convecção interna, é utilizada a mesma metodologia, isto é, cálculo do número de Reynolds, verificação do tipo de escoamento, cálculo do número de Nusselt e, por último, obtenção do coeficiente de convecção. Verificou-se que, para o escoamento interno, o regime de escoamento é laminar, logo a fórmula utilizada, conforme [2], para determinar o número de Nusselt é:

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (7.7)$$

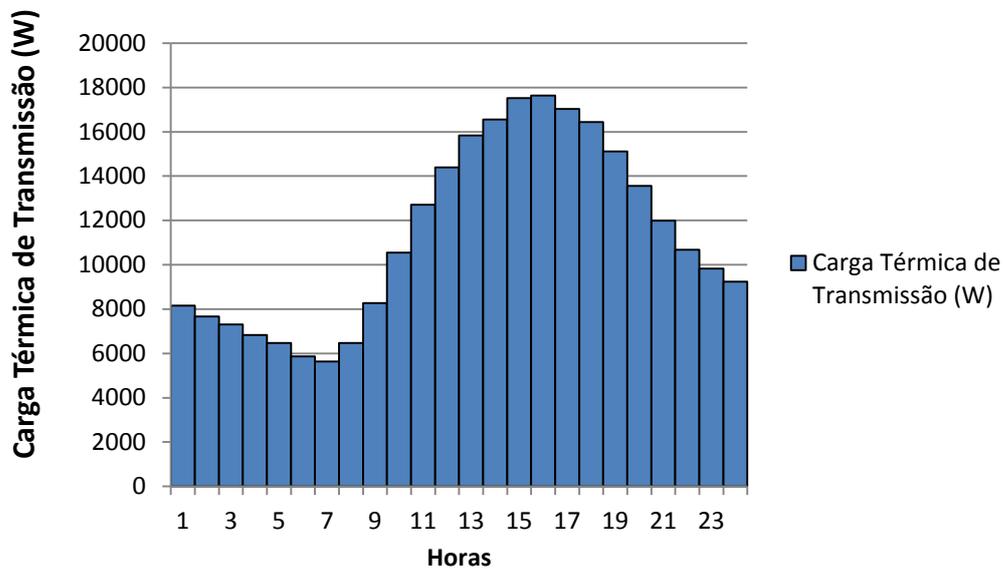


Gráfico 7.1 - Carga térmica de transmissão de calor ao longo do dia.

O coeficiente global de convecção interna obtido, ao aplicar as relações acima, foi:

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

Levando em conta as considerações acima, calculou-se a carga térmica devida à transmissão de calor ao longo das 24 horas do dia. O Gráfico 7.1, que representa a variação desta carga térmica.

7.5 Carga térmica de Insolação através de superfícies transparentes

A transferência de calor resultante da radiação solar em uma superfície depende de suas características físicas. Quando um raio de luz incide em uma superfície transparente (vidro, por exemplo), ocorrem três fenômenos: uma parte da energia

solar é absorvida, outra parte é refletida e a restante é transferida para o ambiente. A soma dessas três frações é igual a um.

Para o cálculo da carga térmica devido à insolação sobre as janelas do vagão, é preciso levar em conta a fração de energia absorvida. Conforme [2], a seguinte equação define a energia solar que atravessa uma superfície transparente:

$$Q_s = A. (\tau. I_t + N. \alpha. I_t) \quad (7.8)$$

Onde A é a área da superfície (m^2), I_t é a irradiação exterior (W / m^2), N é a fração da energia solar absorvida que é transmitida por convecção e condução e α é a absorvidade do vidro para radiações diretas, difusas e refletidas.

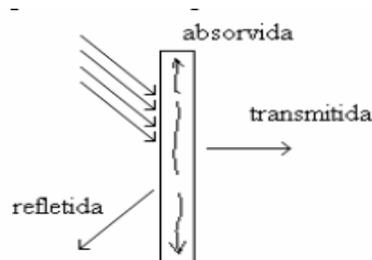


Figura 7.1 - Insolação em uma superfície transparente.

Em regime permanente, é possível considerar que N é igual a U / h_e , logo, a equação pode ser reescrita da seguinte forma:

$$Q_s = A. I_t \left(\tau + \frac{U. \alpha}{h_e} \right) \quad (7.9)$$

A expressão acima, ao ser dividida pela área A , é definida como fator de ganho por insolação, FGCI (W). Os valores do fator FGCI variam de acordo com a orientação (leste, oeste, norte, sul), com o mês do ano e com a latitude. Para São Paulo, durante o mês de Janeiro, os valores para FGCI estão listados na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 - FGCI para São Paulo, mês de janeiro. [22]

<i>Orientação</i>	<i>Valor</i>
NE	407
NO	407
SO	555
SE	555
N	145
L	142
S	672
O	672

Além do fator FGCI, um coeficiente de sombreamento CS deve ser utilizado para adequar os valores de FGCI para os diversos tipos de vidro. Para os vidros do vagão de passageiros, o coeficiente CS adotado será de 1,00, de acordo com o manual da ASHRAE [8].

O cálculo da radiação solar que atravessa uma superfície transparente é dado, portanto, pela seguinte equação, segundo [5]:

$$Q_s = (FGCI_{max}) \cdot (FCR) \cdot (CS) \cdot A \quad (7.10)$$

O fator FCR (fator de carga de refrigeração) é usado para levar em consideração o fato da radiação solar que penetra no recinto não ser uma carga térmica instantânea, sendo inicialmente absorvida pelas superfícies transparentes. Deste modo, a transferência de calor para o ambiente é retardada, sendo necessário o uso do FCR para estimar a parcela de radiação solar que é transmitida para o ambiente condicionado ao longo do dia. Os valores de FCR para a cidade de São Paulo são mostrados na Tabela 7.4.

Tabela 7.4 - Valores de FCR para a cidade de São Paulo. [22]

Hora	NE	NO	SO	SE	N	L	S	O
1	0,05	0,12	0,11	0,04	0,08	0,17	0,04	0,12
2	0,04	0,1	0,09	0,04	0,07	0,14	0,03	0,1
3	0,04	0,08	0,08	0,03	0,05	0,11	0,03	0,08
4	0,03	0,06	0,06	0,02	0,04	0,09	0,02	0,06
5	0,03	0,05	0,05	0,2	0,04	0,08	0,02	0,05
6	0,13	0,06	0,06	0,23	0,06	0,33	0,19	0,06
7	0,28	0,08	0,08	0,41	0,09	0,42	0,37	0,07
8	0,43	0,1	0,1	0,51	0,14	0,48	0,51	0,08
9	0,55	0,12	0,12	0,51	0,22	0,56	0,57	0,1
10	0,62	0,14	0,14	0,45	0,34	0,63	0,57	0,11
11	0,63	0,16	0,16	0,39	0,48	0,71	0,5	0,12
12	0,57	0,24	0,17	0,36	0,59	0,76	0,42	0,14
13	0,48	0,36	0,19	0,33	0,65	0,8	0,37	0,2
14	0,42	0,49	0,23	0,31	0,65	0,82	0,32	0,32
15	0,37	0,6	0,33	0,28	0,59	0,82	0,29	0,45
16	0,33	0,66	0,47	0,26	0,5	0,79	0,25	0,57
17	0,28	0,66	0,59	0,23	0,43	0,75	0,22	0,64
18	0,24	0,58	0,6	0,19	0,36	0,84	0,19	0,61
19	0,19	0,43	0,42	0,15	0,28	0,61	0,15	0,44
20	0,15	0,33	0,33	0,12	0,22	0,48	0,12	0,34
21	0,12	0,27	0,26	0,1	0,18	0,38	0,1	0,27
22	0,1	0,22	0,21	0,08	0,15	0,31	0,08	0,22
23	0,08	0,18	0,17	0,06	0,12	0,25	0,06	0,18
24	0,07	0,14	0,14	0,05	0,1	0,2	0,05	0,14

É importante observar que dependendo da direção do movimento do trem em relação ao Sol, a carga térmica de radiação solar será diferente uma vez que os coeficientes FGCI e FCR, por exemplo, dependem da orientação das janelas. Uma vez que o objetivo é determinar a carga térmica devido à radiação solar mais crítica, necessita-se consultar as tabelas de FGCI e FCR de modo a determinar qual é a composição de coeficientes mais crítica, ou seja, quais são as colunas que resultam em uma carga térmica de insolação maior. Portanto, verifica-se que quando o trem viaja de sul a norte, de modo que as janelas do vagão fiquem orientadas ao leste e ao oeste, a combinação dos fatores FGCI respectivos com os fatores FCR ao longo do dia faz com que a radiação solar que é transmitida para dentro do vagão seja maior do que nos outros casos.

Logo, para o cálculo de carga térmica de radiação, será considerado que os vidros laterais do vagão estão orientados em direção ao leste e ao oeste, respectivamente. Portanto, os valores de FGCI correspondente ao leste e ao oeste, assim como as colunas de FCR, foram utilizados. Admite-se também que não existe radiação solar na parte inferior do trem.

Tendo em vista as considerações anteriores, a carga térmica de radiação solar, ao longo do dia, para o caso em que o movimento do trem se dá do Sul em direção ao Norte, é representada no Gráfico 7.2.

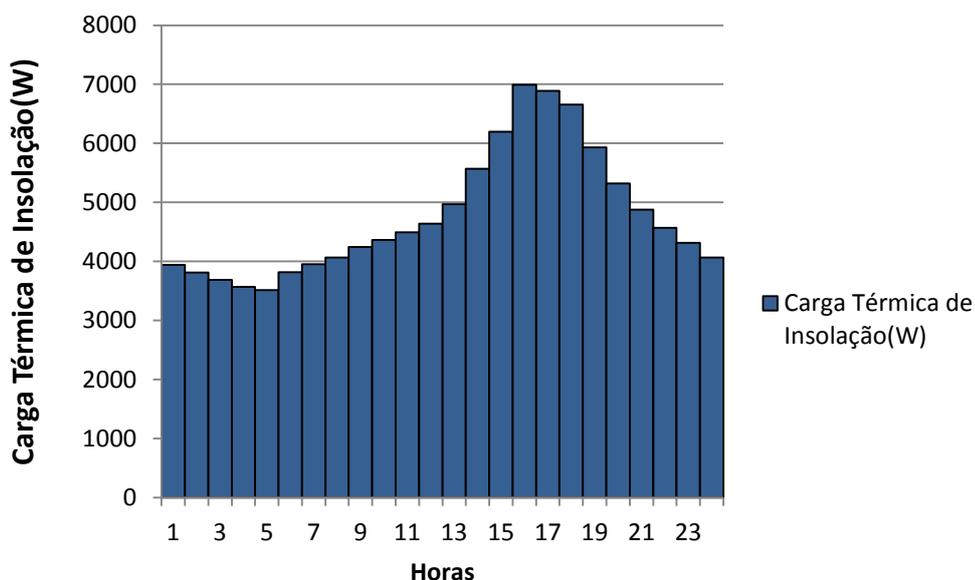


Gráfico 7.2 - Carga Térmica de Radiação Solar para movimento Sul → Norte do trem.

7.6 Carga Térmica da Geração Interna de Calor

A iluminação de um vagão e a sua ocupação por passageiros representam duas fontes de geração interna de calor. Para estudar a carga térmica oriunda dessas fontes, será definido um padrão para variação da quantidade de passageiros ao longo do dia, e por outro lado, a quantidade e a potência das lâmpadas utilizadas para a iluminação do vagão.

7.6.1 Carga Térmica de Ocupação

Para determinar a carga térmica resultante da ocupação do vagão, é preciso, em um primeiro momento, definir de que forma varia a quantidade de passageiros ao longo do dia. A variação do número de passageiros adotada pode ser vista na Tabela 7.5.

Duas observações acerca da tabela devem ser feitas:

- São definidos picos de ocupação dentro de um dia, que ocorrem de manhã (entre 4h e 9h) e no fim da tarde (entre 16h e 20h), para considerar efeitos de lotação de passageiros nos períodos de *rush*. Entre esses períodos de pico, foi considerado que a ocupação é um pouco menos intensa e fora desses períodos, a ocupação foi definida como sendo igual ao número de assentos do vagão. Durante o período de pico, considera-se o caso mais crítico, isto é, que o vagão encontra-se lotado. Vale ressaltar que os períodos de pico, assim como a quantidade máxima de passageiros nas condições de lotação, foram definidos de acordo com [15].
- É importante fazer uma separação entre a quantidade de passageiros sentados e a quantidade de passageiros em pé, uma vez que, em condições de lotação, há uma escassez de assentos, de modo que os demais ocupantes sejam obrigados a permanecerem em pé. A lotação mínima do vagão adotada corresponde a 60 assentos, e a lotação máxima atingida em horário de pico é de 260 passageiros, isto é, 60 passageiros sentados e 200 passageiros em pé.

A distinção entre passageiros em pé e passageiros sentados é fundamental uma vez que o metabolismo do corpo humano é diferente para cada situação. Segundo a tabela 5.1, que apresenta valores de metabolismo para diversas atividades, o metabolismo de uma pessoa sentada é de 58 W/m^2 , e o metabolismo de uma pessoa em pé é de 70 W/m^2 . Como as tabelas fornecem a taxa de energia por área, é preciso estimar a área ocupada por um passageiro. Para este estudo, foi admitido que a área de superfície típica de uma pessoa é de $1,8 \text{ m}^2$, conforme a ASHRAE [11].

Tabela 7.5 - Quantidade de passageiros ao longo do dia.

Ocupação do vagão			
Hora	Pessoas sentadas	Pessoas de Pé	Total
1	60	0	60
2	60	0	60
3	60	0	60
4	60	150	210
5	60	200	260
6	60	200	260
7	60	200	260
8	60	200	260
9	60	150	210
10	60	150	210
11	60	120	180
12	60	120	180
13	60	120	180
14	60	150	210
15	60	150	210
16	60	200	260
17	60	200	260
18	60	200	260
19	60	200	260
20	60	200	260
21	60	150	210
22	60	0	60
23	60	0	60
24	60	0	60

A equação que foi utilizada, portanto, para calcular a carga térmica devida aos passageiros, para cada hora, é mostrada a seguir:

$$Q_p = (n_s \cdot M_s + n_p \cdot M_p) \cdot A$$

Onde n_s é o número de pessoas sentadas, M_s é o metabolismo de uma pessoa sentada (W/m^2), n_p é o número de pessoas em pé, M_p é o metabolismo de uma pessoa em pé e A é a área de superfície típica de uma pessoa.

Admitindo as considerações acima, a carga térmica resultante da ocupação foi calculada e é representada pelo Gráfico 7.3.

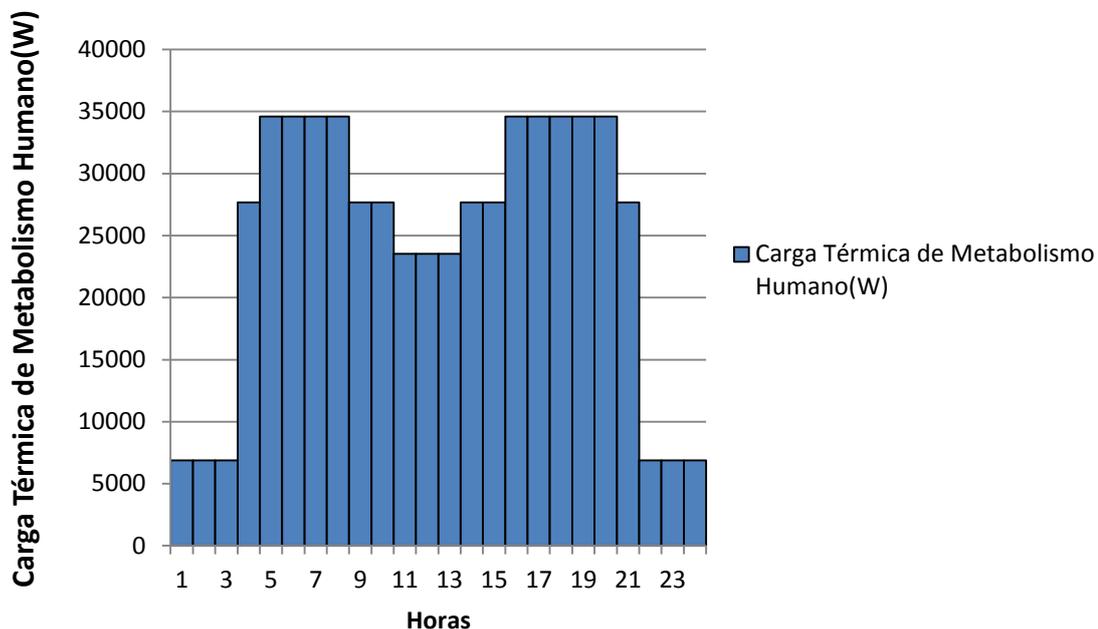


Gráfico 7.3 - Carga térmica resultante da ocupação do vagão.

7.6.2 Carga Térmica de Iluminação

De acordo com [15], a iluminação de um vagão de passageiros é feita por 30 lâmpadas de 40 W de potência cada. Considera-se que as lâmpadas ficam acesas durante toda a operação do trem.

A parcela de calor liberado pelas lâmpadas na forma de radiação não representa uma carga energética instantânea para o sistema de climatização. Ocorre um retardamento entre o instante de acionamento das luzes e a sua dissipação de energia térmica. Por conta deste atraso, a carga térmica persiste por mais tempo mesmo após serem desligadas. Usualmente, para levar em conta este retardamento, deve-se utilizar um fator de carga térmica de refrigeração (FCR), que depende do tempo decorrido após o acionamento das luzes e também do tempo de operação das lâmpadas. Porém, como é admitido que as lâmpadas permanecem acesas o dia todo, então o efeito de retardamento foi desprezado e não foi utilizado

um fator de carga térmica de refrigeração: o calor liberado pelas lâmpadas foi considerado como sendo constante.

Fazendo as considerações acima, a carga térmica resultante da iluminação do vagão foi simplesmente estimada somando as potências de todas as lâmpadas. A relação utilizada é mostrada a seguir:

$$Q = n.P \quad (7.11)$$

Onde n é o número de lâmpadas e P é a potência de cada lâmpada (W). O Gráfico 7.4 representa a carga térmica resultante da iluminação do vagão.

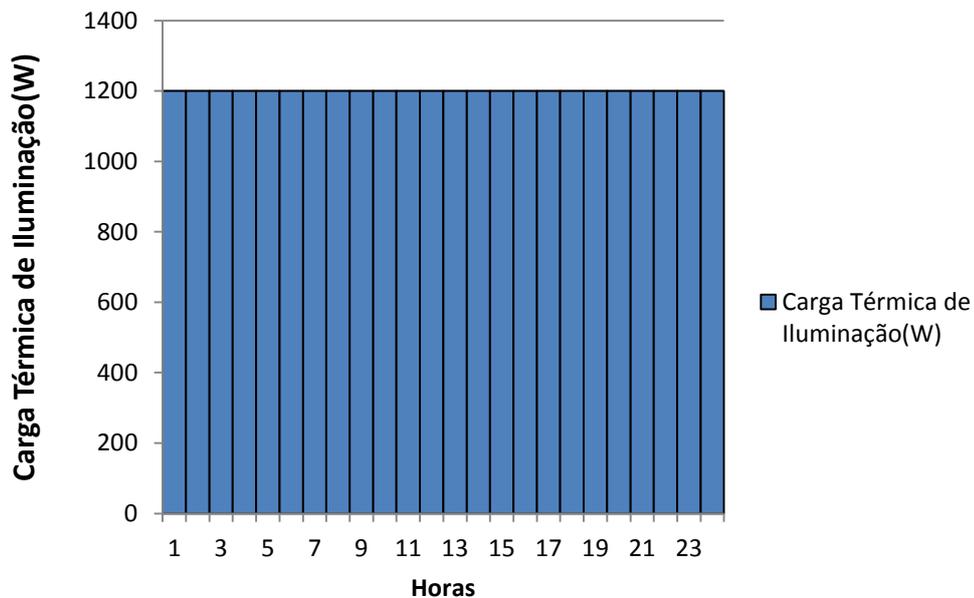


Gráfico 7.4 - Carga Térmica resultante da iluminação do vagão.

Deve-se frisar, observando o gráfico acima, que a carga térmica devida à iluminação é pequena em comparação à carga térmica devida ao metabolismo dos passageiros, não tendo, portanto, um peso importante na determinação da carga térmica total.

7.7 Carga Térmica de Renovação do Ar

A penetração de ar externo afeta tanto a temperatura do ar quanto a sua umidade. O efeito sobre a temperatura é chamado de *calor sensível* e o efeito sobre a umidade é chamado de *calor latente*.

A carga térmica resultante da renovação do ar é oriunda da troca de ar com o meio externo por meio de ventilação. A vazão definida para a troca de ar é de 27 m³ / h de ar de renovação por pessoa, de acordo com a norma ABNT [16]. A quantidade de pessoas consideradas, conforme visto anteriormente, é de 260 pessoas, que é a quantidade máxima de pessoas que ocupam o vagão de passageiros nos períodos de pico durante o dia.

Os efeitos de infiltração por frestas ou abertura de portas são desprezados uma vez que existe uma pressão positiva em relação ao exterior por conta da insuflação de ar para o interior do vagão, fazendo com que a perda de ar do vagão para fora seja maior do que a infiltração de ar.

O cálculo de carga térmica resultante da renovação do ar normalmente é dividido em duas parcelas (carga de renovação sensível e carga de renovação latente).

A equação para a carga térmica de renovação sensível é a seguinte:

$$Q_{r.sens} = \dot{m}_{ext} \cdot c_p \cdot (T_{ext} - T_{int}) \quad (7.12)$$

Onde,

\dot{m}_{ext} : vazão de ar externo que penetra no ambiente ($kg_{ar\ seco}/s$);

c_p : calor específico referido à massa de ar seco ($kJ/kg_{ar\ seco} \cdot ^\circ C$);

T_{ext} : temperatura do ar externo ($^\circ C$);

T_{int} : temperatura do ar interno ($^\circ C$).

Por outro lado, a equação para carga térmica de renovação latente é mostrada a seguir:

$$Q_{r.lat} = \dot{m}_{ext} \cdot L \cdot (\omega_{ext} - \omega_{int}) \quad (7.13)$$

Onde,

\dot{m}_{ext} : vazão de ar externo que penetra no ambiente ($kg_{ar\ seco}/s$);

L : calor latente de vaporização da água líquida, $L = 2,4535 \cdot 10^3 \text{ kJ/kg}$;

ω_{ext} : umidade absoluta do ar externo ($kg/kg_{ar\ seco}$);

ω_{int} : umidade absoluta do ar interno ($kg/kg_{ar\ seco}$).

Observa-se que, para o cálculo da carga térmica de renovação sensível, o valor dos seguintes parâmetros deve ser conhecido: \dot{m}_{ext} , c_p , T_{ext} , T_{int} . Os parâmetros \dot{m}_{ext} , T_{ext} e T_{int} dependem das condições de projeto adotadas: a vazão de ar externa foi definida como sendo $27 \text{ m}^3 / \text{h}$ de ar de renovação por pessoa, a temperatura do ar externo corresponde à temperatura de bulbo seco para determinada hora conforme as condições do dia típico de projeto escolhido e a temperatura interna corresponde à temperatura que deseja-se manter no ambiente interno (vagão) por meio do sistema de ar condicionado, para atender às exigências de conforto térmico. O outro parâmetro, c_p , deve ser calculado a partir da seguinte relação, conforme [5]:

$$c_p = c_{p,ar} + \omega \cdot c_{p,vap} \quad (7.14)$$

Onde,

$c_{p,ar}$: calor específico do ar seco ($kJ/kg \text{ } ^\circ C$);

ω : umidade absoluta ($kg/kg_{ar\ seco}$);

$c_{p,vap}$: calor específico do vapor d' água ($kJ/kg \text{ } ^\circ C$).

Nota-se que é preciso determinar a umidade absoluta a partir da umidade relativa indicada na tabela de condições climáticas ambientes do dia típico de verão adotado. Esta conversão pode ser realizada mediante o uso das seguintes expressões, segundo [5]:

$$\omega = 0,622 \cdot \frac{p_v}{p_{atm} - p_v} \quad (7.15)$$

Onde,

p_v : pressão parcial de vapor na mistura (Pa);

p_{atm} : pressão atmosférica (Pa).

$$p_v = \phi \cdot p_{sat} \quad (7.16)$$

Onde,

ϕ : umidade relativa;

p_{sat} : pressão parcial de vapor na mistura se esta estivesse saturada à mesma pressão e temperatura total da mistura.

Combinando as relações (7.14) e (7.15), é possível obter uma relação que permite calcular a umidade absoluta a partir da umidade relativa:

$$\omega = 0,622 \cdot \frac{\phi \cdot p_{sat}}{p_{atm} - \phi \cdot p_{sat}} \quad (7.17)$$

O cálculo da umidade absoluta ao longo das 24 horas do dia é importante também para determinar a carga térmica de renovação latente. A sua determinação depende das seguintes variáveis: \dot{m}_{ext} , L , ω_{ext} , ω_{int} . As variáveis \dot{m}_{ext} , ω_{ext} , ω_{int} dependem das condições de projeto adotadas. A partir das umidades relativas para as diversas horas do dia típico de verão adotado, foram calculadas as umidades absolutas com o uso da relação (7.16). A umidade absoluta do ar interno, ω_{int} , é um valor fixado de forma a atender as exigências de conforto térmico, e o valor que foi adotado para esta umidade é correspondente a uma umidade relativa de 60%, isto é, $\omega_{int} = 0,01293 \text{ kg/kg}_{ar \text{ seco}}$.

Outros valores adotados, necessários para a utilização das relações definidas anteriormente, foram:

- $c_{p,ar} = 1,0 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$;
- $c_{p,vap} = 4,19 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$.

Utilizando as relações matemáticas e os valores definidos nesta seção, foi possível determinar as cargas térmicas de renovação sensível e latente de ar. Os Gráfico 7.5 e Gráfico 7.6, para cada tipo de carga térmica, são apresentados na sequência:

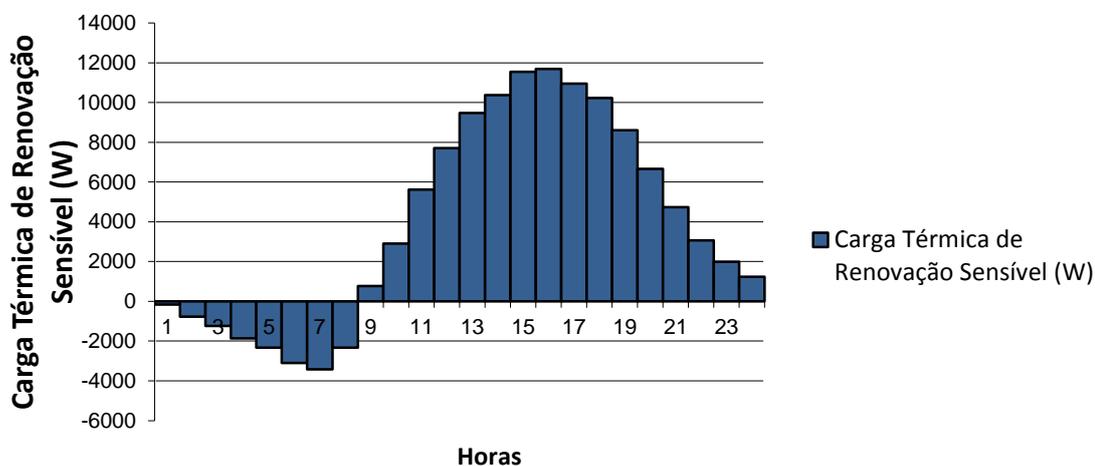


Gráfico 7.5 - Carga Térmica de renovação do ar (Sensível).

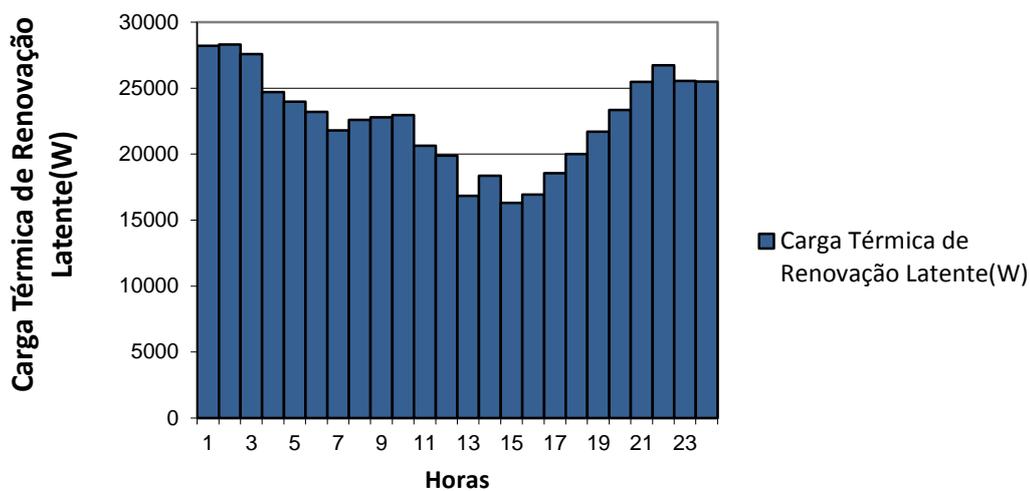


Gráfico 7.6 - Carga Térmica de renovação do ar (Latente).

A partir da soma das distribuições horárias das cargas térmica sensível e latente, obteve-se a carga térmica de renovação total, representada no Gráfico 7.7.

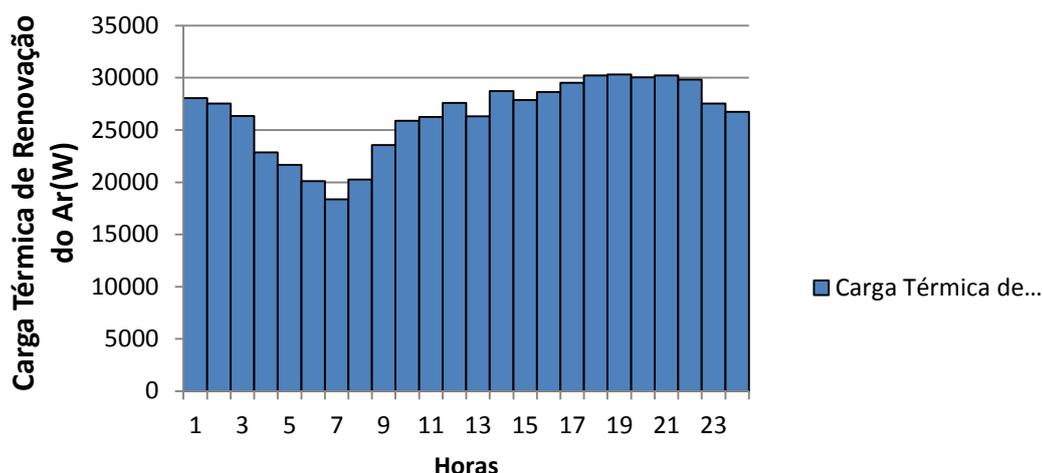


Gráfico 7.7 - Carga térmica total de renovação do ar.

É preciso observar que durante um período, a carga térmica de renovação sensível de ar é negativa, o que pode ser explicado pelo fato da temperatura externa ser inferior à temperatura que deseja ser mantida no interior do vagão. Portanto, para atingir a temperatura desejada, seria necessária uma carga térmica de aquecimento e não de refrigeração.

7.8 Resultados gerais do Cálculo de Cargas Térmicas

Após determinar separadamente os diferentes tipos de cargas térmicas, deve-se somá-las, de modo a obter uma distribuição da carga térmica total ao longo do dia, para que seja possível tirar conclusões que serão bastante úteis para o projeto de um sistema de ar condicionado. Para fins de cálculos de dimensionamento do equipamento de ar condicionado, deve-se considerar a carga térmica máxima. Por outro lado, a variação da carga térmica ao longo do dia fornece uma ideia de como deve ser o funcionamento da unidade de ar condicionado ao longo do dia.

Ao efetuar a soma de todas as cargas térmicas calculadas anteriormente, obtém-se o Gráfico 7.8 que representa a distribuição da carga térmica total durante o dia.

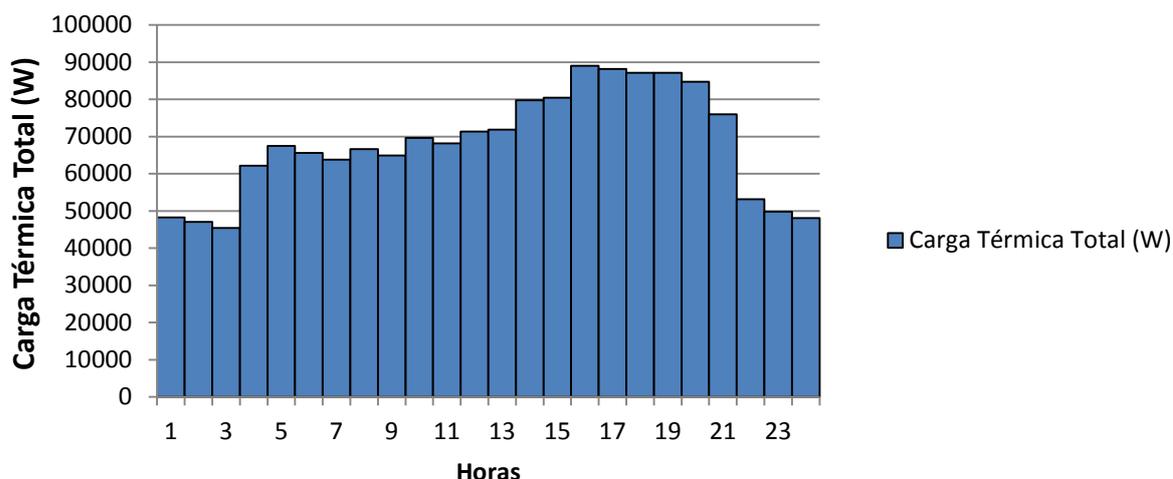


Gráfico 7.8 - Distribuição da carga térmica total ao longo do dia.

Outro modo de tratar as cargas térmicas obtidas é fazer a separação entre carga térmica sensível e carga térmica latente, conforme mostra a tabela 7.7. A transmissão de calor através da estrutura e a insolação são cargas térmicas sensíveis, uma vez que elas afetam a temperatura, enquanto que a carga térmica oriunda da ocupação do espaço por pessoas apresenta uma parcela de carga sensível e outra parcela de carga latente. Considera-se, de acordo com os manuais de ASHRAE [11], que a parcela de carga térmica produzida pelos passageiros que corresponde a uma carga térmica latente é de aproximadamente 40%. O gráfico 7.9 representa as cargas térmicas sensíveis e latentes ao longo do dia.

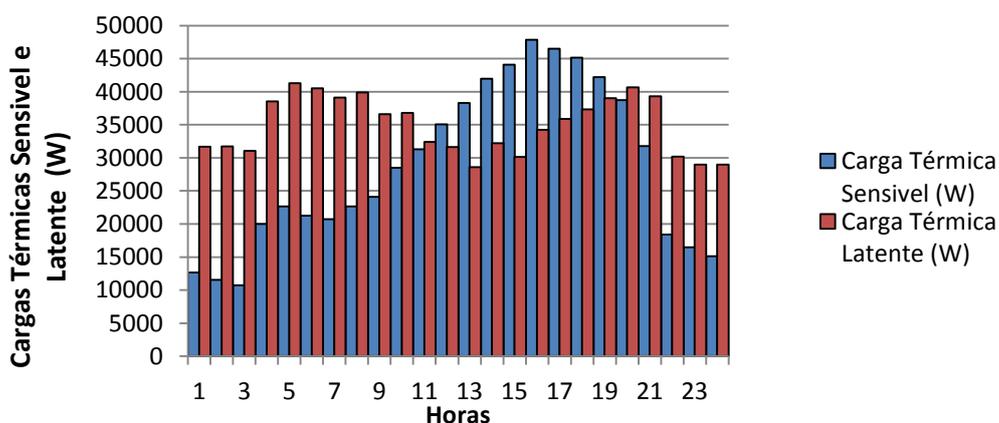


Gráfico 7.9 - Distribuição das cargas térmicas sensível e latente ao longo do dia.

Tabela 7.6 - Valores de carga térmica sensível e latente ao longo do dia .

Cargas Latentes e Cargas Sensíveis		
Hora	Carga Térmica Sensível (W)	Carga Térmica Latente (W)
1	12643	31658
2	11544	31749
3	10718	31033
4	20014	38548
5	22652	41291
6	21272	40501
7	20721	39096
8	22654	39896
9	24081	36628
10	28496	36809
11	31289	32391
12	35060	31644
13	38272	28602
14	41964	32198
15	44096	30156
16	47831	34238
17	46501	35869
18	45168	37312
19	42223	39004
20	38730	40660
21	31766	39326
22	18385	30193
23	16475	28989
24	15109	28958

Os gráficos levantados para a variação de carga térmica ao longo do dia revelam que existe um pico de carga térmica 16h. Portanto, o projeto do sistema de condicionamento de ar deve ser elaborado de forma a atender esta carga térmica crítica.

Deve-se ressaltar que determinados parâmetros, como por exemplo, as condições de ocupação, podem ser modificados, gerando distribuições diferentes para a carga térmica total para estudar o comportamento da carga térmica dentro do vagão por causa dessas variações dos parâmetros. Entretanto, a escolha de equipamento de ar condicionado será realizada considerando os resultados obtidos acima.

8. DETERMINAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE AR CONDICIONADO

8.1 Noções de Condicionamento de ar

Um sistema de ar condicionado deve ser capaz de remover calor e umidade de um determinado ambiente.

O ar fornecido para o ambiente condicionado deve ser deficiente em entalpia e umidade para compensar adições de calor e umidade ao ambiente devido a fontes externas e internas. Uma representação simplificada de uma instalação de ar condicionado por ser vista na Figura 8.1.

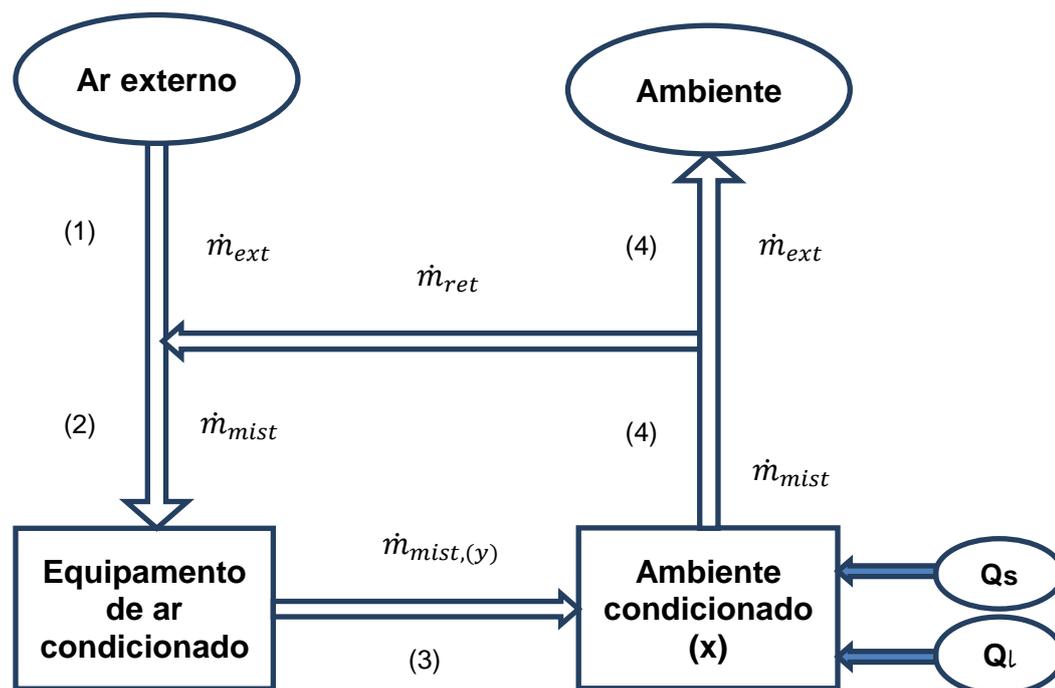


Figura 8.1 - Simplificação de uma instalação de ar condicionado. [1]

A vazão de ar externo, \dot{m}_{ext} , é a vazão correspondente à ventilação, que é necessária para remover impurezas do ar e minimizar odores. O valor adotado para esta vazão é de 27 m³/h/pessoa, segundo a norma ABNT [16], conforme discutido anteriormente. Esta vazão de ventilação é igual à vazão rejeitada pelo sistema para

o ambiente. A vazão de ar de retorno, \dot{m}_{ret} , corresponde à vazão de ar que é reaproveitada com o objetivo de ser misturada à vazão de ventilação. Por último, a vazão \dot{m}_{mist} corresponde à soma da vazão de ar externo com a vazão de ar de retorno. O ar de mistura entra no equipamento de condicionamento de ar, para em seguida sair nas condições (y), antes de ser posteriormente misturado ao ar do ambiente a ser condicionado, de modo a mantê-lo nas condições de conforto (x) previamente estabelecidas.

A carga térmica sensível que entra no ambiente condicionado, Q_s , é devida à transmissão de calor através da estrutura do trem, à energia solar de irradiação sobre a estrutura do vagão e também ao calor gerado pelas fontes internas como iluminação e ocupação.

As fontes de carga térmica latente Q_l correspondem ao calor emitido pelos ocupantes do vagão e à uma possível infiltração indesejada do ar (que foi desprezada neste estudo).

A mistura de ar, após passar pelo equipamento de ar condicionado, $\dot{m}_{mist,(y)}$, deve penetrar no ambiente interno com temperatura e umidade menores em relação às condições que devem ser mantidas. As condições de temperatura e umidade desta mistura de ar devem, conforme [1], respeitar o seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} \dot{m}_{mist} \cdot (T_x - T_y) \cdot c_{p,mist} = Q_s \\ \dot{m}_{mist} \cdot (\omega_x - \omega_y) \cdot L = Q_l \end{cases} \quad (8.1)$$

Onde,

\dot{m}_{mist} : vazão de ar insuflado no ambiente condicionado ($kg_{ar\ seco}/s$);

T_x : temperatura interna do ambiente condicionado ($^{\circ}C$);

T_y : temperatura do ar na saída do condicionador de ar ($^{\circ}C$);

ω_x : umidade absoluta interna do ambiente condicionado ($kg_{ar\ vapor}/kg_{ar\ seco}$);

ω_y : umidade absoluta do ar na saída do condicionador de ar ($kg_{ar\ vapor}/kg_{ar\ seco}$);

$c_{p,mist}$: calor específico da mistura de ar ($kJ/kg \cdot ^{\circ}C$);

L : o calor latente de vaporização da água líquida, $L = 2,4535 \cdot 10^3 \text{ kJ/kg}$;

Q_S : a soma das cargas térmicas sensíveis (kW);

Q_L : a soma das cargas térmicas latentes (kW).

O sistema de equações acima é importante, pois para uma determinada vazão de ar de mistura, é possível obter as condições de temperatura e umidade em que a mistura de ar é insuflada para dentro do ambiente.

As diversas condições $y_1, y_2, y_3 \dots y_n$ que o ar na saída do equipamento pode assumir geram na carta psicrométrica uma linha denominada "linha de carga". Esta linha pode ser observada no gráfico da Figura 8.2.

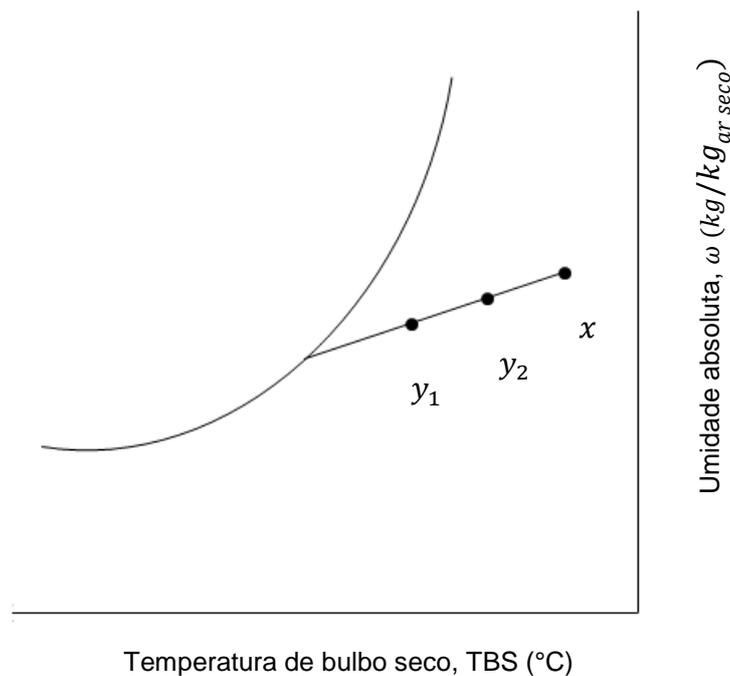


Figura 8.2 - Linha de Carga na carta psicrométrica [1].

A inclinação da linha de carga indica as proporções relativas de calor sensível e latente. Uma inclinação acentuada da linha ocorre quando, por exemplo, o ambiente condicionado tem uma carga latente considerável.

A potência de refrigeração que o equipamento de ar condicionado deve ter para transformar as condições ambientes nas condições internas de projeto é, segundo [1], dada por:

$$Q_{ref} = \dot{m}_{mist} \cdot (h_{mist} - h_y) \quad (8.2)$$

Onde,

\dot{m}_{mist} : Vazão do ar que será insuflado no ambiente ($kg_{ar\ seco}/s$);

h_{mist} : Entalpia da mistura do ar nas condições ambientes com o ar das condições de projeto ($kJ/kg_{ar\ seco}$);

h_y : Entalpia do ar na saída do equipamento de ar condicionado ($kJ/kg_{ar\ seco}$).

Por outro lado, a vazão de ar que deverá ser insuflado deve atender à seguinte relação:

$$\dot{m}_{mist} = \frac{Q_{crit}}{(h_x - h_y)} \quad (8.3)$$

Onde,

Q_{crit} : Carga térmica total crítica (kW);

h_x : Entalpia do ar no ambiente condicionado ($kJ/kg_{ar\ seco}$).

Todos os processos que ocorrem na instalação de ar condicionado representada pela Figura 8.1 podem ser esboçados em uma carta psicrométrica, conforme o gráfico da Figura 8.3.

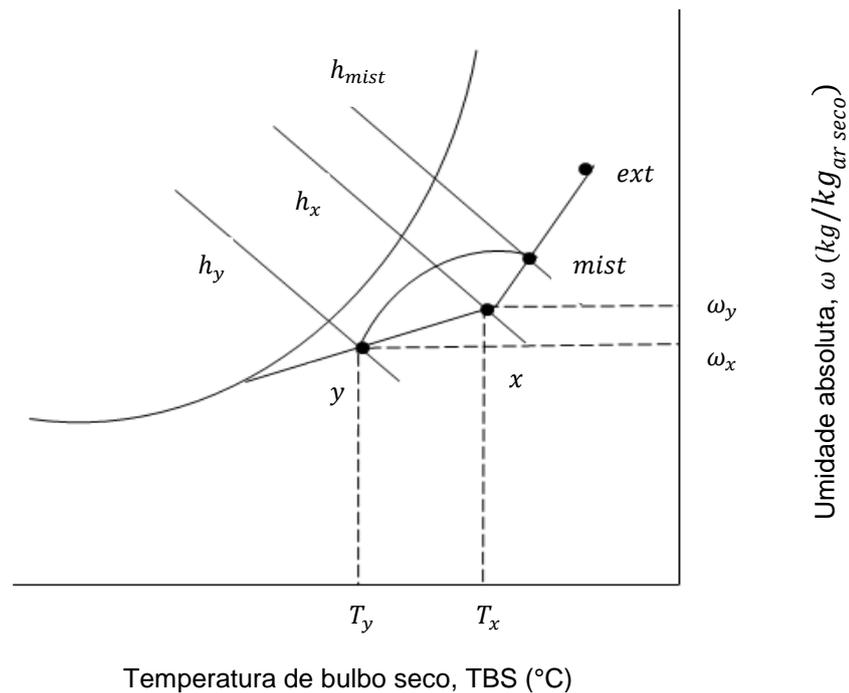


Figura 8.3 - Processos de condicionamento de ar.

O ar externo tem a sua temperatura e umidade diminuídas ao ser misturado com o ar de retorno (processo “ext” \rightarrow “mist”). A mistura que entra no condicionador, por sua vez, também sofre um processo de resfriamento e desumidificação (processo “mist” \rightarrow “y”). Por último, o ar que sai do condicionador, na condição y, sofre aquecimento e umidificação, ao ser misturado com o ar do ambiente (processo y \rightarrow x).

A curva que descreve o processo “mist” \rightarrow “y” representa a curva de operação do ar condicionado. Deseja-se, com base no cálculo da carga térmica e nas equações citadas acima, determinar a potência de refrigeração do equipamento, assim como as vazões (ar insuflado, ar externo, ar de retorno) da instalação de ar condicionado, de forma a escolher um equipamento adequado a partir da consulta de fabricantes.

8.2 Condições de Operação

Com base no cálculo de carga térmica realizado no capítulo 7 e nas noções de condicionamento de ar explicitadas no item anterior, foram realizados cálculos para determinar quais devem ser os requisitos principais de operação da unidade de ar condicionado. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 8.1.

Tabela 8.1 - Condições de Operação do Equipamento de ar condicionado.

Características da unidade AC			
PARÂMETROS	TERMOS	VALORES	REFERÊNCIAS
Condições do ar ambiente	T_{ext} (°C)	30,8	Tabela 7.1 (16h)
	ϕ_{ext} (%)	45,0	Tabela 7.1 (16h)
Condições do ar interno (vagão)	T_x (°C)	23,0	Seção 7.3
	ϕ_x (%)	60,0	Seção 7.3
Condições do ar insuflado	T_y (°C)	15,0	Calculado
	ϕ_y (%)	75,0	Calculado
Vazão de ar insuflado	\dot{m}_{mist} (kg _{ar seco} /s)	5,0	Calculado
	\dot{m}_{mist} (m ³ /h)	15000,0	Calculado
Vazão de ar exterior	\dot{m}_{ext} (kg _{ar seco} /s)	2,9	[16]
	\dot{m}_{ext} (m ³ /h)	8599,5	[16]
Vazão de retorno	\dot{m}_{ret} (kg _{ar seco} /s)	2,1	Calculado
	\dot{m}_{ret} (m ³ /h)	6400,5	Calculado
Potência de Refrigeração	Q_{ref} (kW)	93,2	Calculado
	Q_{ref} (Btu/h)	318073,0	Calculado
	Q_{ref} (TR)	26,5	Calculado

Vale ressaltar que na tabela acima, foram citadas umidades relativas ao invés de umidades absolutas. A seguinte expressão foi utilizada com o intuito de obter essas umidades a partir das respectivas umidades absolutas:

$$\phi = \frac{\omega \cdot p_{atm}}{0.01 \cdot p_{sat} \cdot (0.622 + \omega)} \quad (8.4)$$

Onde,

ϕ : umidade relativa (%);

p_{atm} : pressão atmosférica (Pa);

p_{sat} : pressão parcial de vapor d' água se a mistura estivesse à mesma temperatura e pressão total da mistura (Pa);

ω : umidade absoluta ($kg_{ar\ vapor}/kg_{ar\ seco}$)

Conforme foi visto na seção anterior, é possível representar os processos do sistema de condicionamento de ar em uma carta psicrométrica. A carta psicrométrica da Figura 8.4 resume todos os processos da instalação de ar condicionado e os valores das propriedades encontram-se na tabela abaixo.

Tabela 8.2 – Valores das propriedades entre os processos do sistema

ponto	TBS (°C)	h (kJ/kg _{ar seco})	ω (kg _{vapor} /kg _{ar seco})	ϕ (%)
1	30,8	67	0,014	45
2	26	58,5	0,0125	55
3	15	37,8	0,0087	75
4	23	52,8	0,012	60

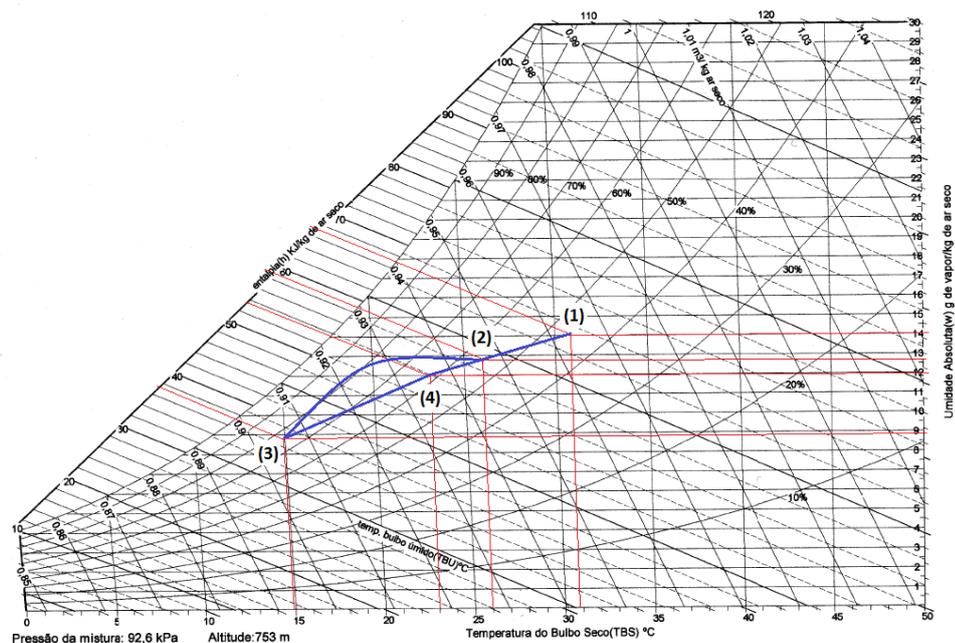


Figura 8.4 - Processos do sistema no diagrama psicrométrico.

8.3 Escolha da unidade de ar condicionado

De acordo com a tabela 8.1, o equipamento de ar condicionado a ser instalado deve ter uma capacidade de 93,2 kW (ou 26,5 TR). Este valor é plausível, uma vez que a capacidade de refrigeração do sistema de ar condicionado de alguns trens subterrâneos modernos se situa em torno de 18 TR [17] e existem diversos fabricantes de equipamentos de condicionamento de ar que fornecem unidades com essa potência.

Pretende-se, utilizando as especificações obtidas, escolher uma unidade compacta de ar condicionado para ser instalada no teto do vagão de passageiros. Muitas empresas fabricantes de equipamentos de ar condicionado oferecem serviços de determinação e instalação do sistema de ar condicionado, a partir das condições operacionais exigidas pela empresa cliente. Deste modo, as empresas responsáveis pela fabricação de trens, por exemplo, descrevem de forma detalhada quais são os requisitos do sistema de ar condicionado, indicando, por exemplo, quais são as condições externas e internas de projeto, qual deve ser a capacidade de refrigeração e quais são os valores das vazões de ar externo, de ar insuflado e de ar de retorno.

Podemos citar, por exemplo, a Hitachi [18], a King [19] e a Faiveley [20] como empresas que fornecem serviços especializados de condicionamento de ar para aplicações ferroviárias. Portanto, após especificar quais devem ser as principais condições de operação do equipamento de ar condicionado adequado para uma determinada composição de carros, deve-se contatar essas empresas (ou possivelmente outras) para receber uma orientação ou sugestão de equipamento para as características obtidas.

O equipamento que foi escolhido para o modelo de trem estudado neste trabalho é fornecido pela Hitachi¹, empresa que oferece produtos e serviços para diversas aplicações de ar condicionado. A empresa possui uma divisão denominada “Hitachi

¹ Esse equipamento foi selecionado com base no catálogo no site da empresa. Ao entrar em contato esta última para saber a vazão, não houve resposta. De modo análogo, quando se contactou outras empresas de ar condicionado, não houve retorno.

– Rail” voltada para aplicações de condicionamento de ar em transportes ferroviárias.

O equipamento selecionado possui uma capacidade de refrigeração de 48,9 kW, sendo, portanto, a instalação de dois equipamentos por carro. Uma vista de topo do equipamento é mostrada na Figura 8.5.



Figura 8.5 - Unidade de ar condicionado de 48,9 kW – Hitachi[18].

Esta unidade possui algumas vantagens tecnológicas, segundo o fabricante:

- Adoção de um ciclo de resfriamento independente a partir do qual as operações de resfriamento e aquecimento são realizadas simultaneamente, de modo a eliminar uma possível sensação de super-resfriamento. Esta solução permitiu eliminar os aquecedores elétricos, usados no passado com a finalidade de reaquecimento, permitindo a redução do consumo de energia e do peso do equipamento.
- Uso de pás enviesadas no ventilador externo permitiu a redução de ruídos provocados por escoamento turbulento gerado nas bordas, de modo a atingir uma intensidade de ruído de 63 dB fora dos vagões.
- Otimização do ângulo das pás do ventilador interno permitiu uma redução de ruído dentro do vagão.



Figura 8.6 - Otimização das pás do ventilador externo [18].

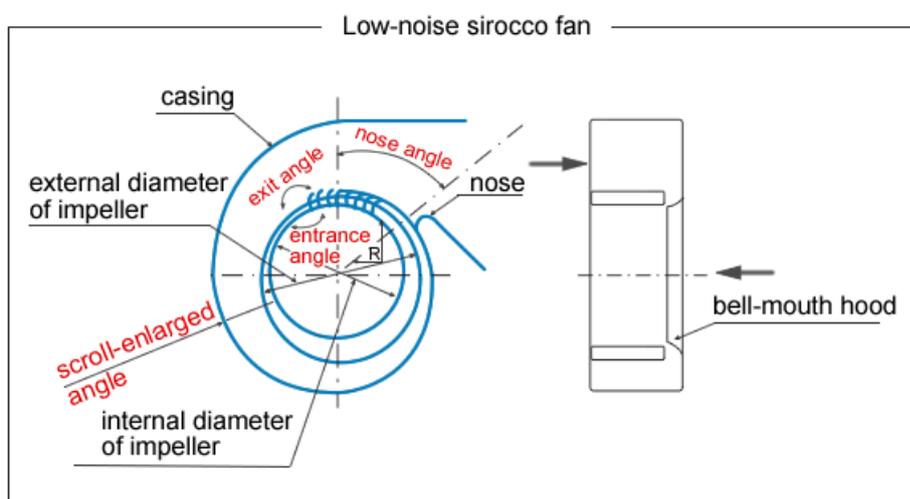


Figura 8.7 - Otimização das pás do ventilador interno [18].

9. CONCLUSÕES

Hoje em dia, muitos brasileiros utilizam o transporte ferroviário para se locomover, tendo que enfrentar longos e cansativos percursos. Durante o verão, os deslocamentos de trem tornam-se ainda mais desgastantes devido às altas temperaturas na cidade de São Paulo durante esta época. Por este motivo, é fundamental que o sistema de ar condicionado em trens seja bem projetado, de modo a garantir o conforto de seus passageiros, especialmente em dias muito quentes.

Este trabalho visou, em um primeiro momento, apresentar um roteiro para o cálculo da carga térmica em um carro de trem, que é uma etapa fundamental em um projeto de ar condicionado. Porém, para este cálculo, algumas simplificações foram feitas por falta de dados ou critérios de dimensionamento, como, por exemplo, a desconsideração da carga térmica devida aos equipamentos e máquinas presentes nos vagões e também da carga térmica de infiltração de ar. Embora estas cargas térmicas sejam relativamente pequenas em relação às demais cargas calculadas, é vantajoso determiná-las, para tornar o cálculo de carga térmica total ainda mais exato, melhorando a qualidade do projeto de ar condicionado. É preciso ressaltar, ainda, que as condições internas de temperatura e umidade, as condições de ocupação, a taxa de renovação escolhida e as condições externas adotadas, podem variar dependendo dos critérios do projetista: as decisões feitas neste estudo com relação a esses parâmetros não são únicas. Por outro lado, existem diferentes métodos para o cálculo de determinadas cargas térmicas além dos métodos apresentados neste trabalho, descritos, por exemplo, nos manuais da ASHRAE [8]. No entanto, o projetista deve tomar muito cuidado com o cálculo de carga térmica, uma vez que o resultado do cálculo tem uma influência significativa na seleção do equipamento de ar condicionado: um dimensionamento incorreto da carga térmica pode levar a uma seleção equivocada do equipamento, causando desconforto dos passageiros em relação a um ambiente quente, ou mesmo em relação a um resfriamento excessivo do ambiente.

Em um segundo momento, o trabalho teve como objetivo determinar as condições operacionais principais do equipamento de ar condicionado para o modelo de trem definido, para que fosse possível uma seleção apropriada de equipamento. Entretanto, deve-se lembrar que as unidades de ar condicionado produzidas para aplicações ferroviárias, ao contrário das produzidas para aplicações residenciais, fazem parte de um mercado restrito, no sentido de existir uma grande dificuldade de encontrar catálogos de produtos. Usualmente, os fabricantes de trens fornecem os requisitos do sistema de ar condicionado para empresas especializadas em serviços de condicionamento de ar voltados para trens, que sua vez, enviam propostas de equipamentos. O equipamento de ar condicionado selecionado para este estudo é adequado para o vagão de passageiros estudado, mas seria recomendável realizar um estudo mais abrangente, englobando outras possibilidades de unidades de ar condicionado, afim de ter outras opções de equipamentos para uma melhor seleção, o que não possível devido à ausência de resposta de determinados fabricantes de ar condicionado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] STOECKER; JONES. **Refrigeração e Ar condicionado**. São Paulo: McGraw-Hill, 1985.
- [2] INCROPERA; DEWITT; BERGMAN; LAVINE. **Fundamentos de transferência de Calor e de Massa**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- [3] CRUZ DA COSTA, ENNIO. **Física aplicada à construção – Conforto Térmico**. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.
- [4] TRIBESS, ARLINDO. **Conforto Térmico**. Apostila do curso de Conforto Térmico – disciplina PME2514. PME, EPUSP
- [5] SIMÕES MOREIRA, JOSÉ R.. **Ar Condicionado em trens**. Notas de aula do curso de extensão Tecnologia Metroferroviária, PECE, EPUSP, 2009.
- [6] ASHRAE HANDBOOK. **HVAC Systems and Equipment**. Atlanta, 2008
- [7] ASHRAE HANDBOOK. **Refrigeration**. Atlanta, 2006
- [8] ASHRAE HANDBOOK. **Fundamentals**. Atlanta, 2005
- [9] GOULART, SOLANGE; LAMBERTS, ROBERTO; FIRMINO, SAMANTA. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras**. 2ª edição. Outubro 1998
- [10] Disponível: <pcc261.pcc.usp.br/Carga%20Térmica%2006-00%20internet.pdf>. Acesso em 12/06/2011.
- [11] Disponível: <http://www.krueger-hvac.com/lit/pdf/therm_comf.pdf>. Acesso em 18/07/2011.
- [12] Disponível: <http://www.anvisa.gov.br/legis/resol/176_00re.htm>. Acesso em 20/05/2011.
- [13] FIORELLI, FLAVIO. **Cálculo de carga térmica de refrigeração para câmaras Frigoríficas**. São Paulo, 2010.
- [14] BUENO, André Valente. **Apostila de refrigeração e condicionamento de ar**. Universidade do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica. Fortaleza, 2007.
- [15] KAKO, José Carlos Castilho. Chefe do Departamento de Manutenção do Material Rodante – DORE (CPTM).

- [16] ABNT NBR 16401-3. **Instalações de ar condicionado – sistemas centrais e unitários. Parte 3: Qualidade do ar interior.** Primeira Edição. Rio de Janeiro, 2008.
- [17] Disponível: <<http://tgvbr.protrem.org/phpBB3/viewtopic.php?f=81&t=4947>>. Acesso em 07/10/11.
- [18] Disponível: < <http://www.hitachi.com/>> Acesso em 21/10/11.
- [19] Disponível: < <http://www.kingairinc.com/>> Acesso em 21/10/11.
- [20] Disponível: < <http://www.faiveleytransport.com.br/>> Acesso em 21/10/11.
- [21] Disponível: www.cptm.sp.gov.br/ Acesso em 25/11/10
- [22] ROBERTO F. J. , CARLOS. **Análise do sistema atual e projeto de um sistema central de ar condicionado para o palácio dos bandeirantes.** São Paulo, 2006
- [23] SIMÕES MOREIRA, JOSÉ R.. **Fundamentos e aplicações da Psicrometria.** RPA Editorial. São Paulo.

APÊNDICE

CARGAS TÉRMICAS

Carga Térmica Transmissão		
Hora	TBS	Qtransmissão (W)
1	23	8152
2	23	7672
3	22	7311
4	22	6831
5	22	6471
6	21	5871
7	21	5630
8	22	6471
9	23	8272
10	25	10553
11	27	12715
12	28	14396
13	29	15836
14	30	16557
15	31	17517
16	31	17637
17	30	17037
18	30	16437
19	29	15116
20	27	13555
21	26	11994
22	25	10673
23	24	9833
24	24	9233

Carga Térmica Insolação	
Hora	Qsolar(W)
1	3941
2	3814
3	3687
4	3570
5	3511
6	3814
7	3954
8	4064
9	4242
10	4362
11	4492
12	4639
13	4969
14	5569
15	6196
16	6989
17	6890
18	6656
19	5934
20	5319
21	4879
22	4566
23	4312
24	4068

Carga Térmica Ocupação	
Hora	Qp (W)
1	6 890
2	6 890
3	6 890
4	27 680
5	34 610
6	34 610
7	34 610
8	34 610
9	27 680
10	27 680
11	23 522
12	23 522
13	23 522
14	27 680
15	27 680
16	34 610
17	34 610
18	34 610
19	34 610
20	34 610
21	27 680
22	6 890
23	6 890
24	6 890

Carga Térmica de iluminação	
Hora	Qilum(W)
1	1200
2	1200
3	1200
4	1200
5	1200
6	1200
7	1200
8	1200
9	1200
10	1200
11	1200
12	1200
13	1200
14	1200
15	1200
16	1200
17	1200
18	1200
19	1200
20	1200
21	1200
22	1200
23	1200
24	1200

Carga Térmica Total de Renovação	
Hora	Qren_tot(W)
1,00	28058,47
2,00	27530,18
3,00	26349,26
4,00	22850,51
5,00	21661,97
6,00	20092,20
7,00	18376,70
8,00	20268,53
9,00	23557,50
10,00	25871,55
11,00	26243,35
12,00	27586,50
13,00	26315,21
14,00	28725,59
15,00	27854,38
16,00	28621,11
17,00	29522,93
18,00	30233,19
19,00	30300,73
20,00	30024,68
21,00	30218,00
22,00	29814,52
23,00	27540,22
24,00	26743,93