

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

JEAN BARDEN DA SILVA

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE AR CONDICIONADO
EM AMBIENTES COM VENTILADORES PESSOAIS**

São Leopoldo

2019

JEAN BARDEN DA SILVA

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE AR CONDICIONADO
EM AMBIENTES COM VENTILADORES PESSOAIS.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica, pelo Curso de
Engenharia Mecânica da Universidade do
Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Wander

São Leopoldo

2019

Dedico este trabalho à minha família, em especial à
minha grande companheira Rodrielle, aos meu pais Jorge e Jocélia
e a todos que, de alguma forma, contribuíram para o resultado deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

À minha grande companheira de todas as horas, Rodrielle, pelo incentivo e compreensão das noites em claro. Aos meus pais, Jorge e Jocélia, pelo carinho, educação e apoio motivacional em todos os momentos. A todos os meus familiares e amigos que colaboram diretamente ou indiretamente para esta conquista. A Unisinos, como instituição e corpo docente, pelo aprendizado e pela oportunidade de troca de experiências. Ao orientador Professor Dr. Paulo Roberto Wander, por sua paciência, incentivo, apoio e excelentes contribuições para a realização deste trabalho. Muito Obrigado!

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

– Arthur Schopenhauer

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo da eficiência energética de sistemas de ar condicionado em ambientes com ventiladores pessoais. Teve como objetivo simular, teoricamente, uma sala comercial de um edifício corporativo de ocupação do tipo multiusuário, localizado no centro da cidade de Porto Alegre. Visto que os equipamentos de ar condicionado são grandes consumidores de energia, buscou-se uma alternativa a qual fosse possível obter redução neste consumo sem afetar os padrões de conforto térmico. Utilizaram-se ventiladores pessoais para promoverem o aumento da velocidade de deslocamento do ar, assim obtendo a redução da temperatura efetiva, onde o equipamento de ar condicionado pode utilizar de *setpoints* mais elevados em sua operação. Esta alteração na temperatura do termostato busca reduzir o tempo de funcionamento do equipamento e, conseqüentemente, economizando energia elétrica, a qual será justificada via simulação computacional simplificada. Utilizando o programa *EnergyPlus*, foram realizadas cinco simulações distintas para avaliar os efeitos que a velocidade do ar proporciona em um ambiente climatizado, enfatizando a eficiência energética e o conforto térmico. Para obtenção dos resultados foi necessário a inserção dos dados dos componentes construtivos do ambiente, os padrões de ocupação, as cargas térmicas dos equipamentos internos e de iluminação, do condicionamento de ar, dos ventiladores, e de infiltração. Com esses dados inseridos no *EnergyPlus*, foi analisado anualmente o desempenho energético dos equipamentos. Nos resultados encontrados foi possível identificar os fatores que influenciam no consumo de energia e no conforto térmico, destacando os bons resultados obtidos com a utilização dos ventiladores pessoais para a redução no consumo de energia do sistema de ar condicionado, nos quais alcançou uma economia de até 1349,3 kWh, equivalente a aproximadamente 45% de redução no consumo.

Palavras-chave: Ar condicionado. Ventilação pessoal. Simulação energética. Conforto térmico.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Fatores que afetam o conforto térmico.....	18
Figura 2 - Emissão de calor por uma pessoa em função da temperatura	22
Figura 3 - Região de conforto em função da temperatura local e velocidade do ar ..	23
Figura 4 - Gráfico para determinação da temperatura efetiva	24
Figura 5 – Escala de sete pontos	26
Figura 6 - Gráfico para obtenção do PPD	27
Figura 7 - Zonas aceitáveis de temperatura em função da velocidade do ar	28
Figura 8 - Valores recomendados da temperatura para satisfação dos ocupantes...	28
Figura 9 - Zona de bem-estar para o ar parado	29
Figura 10 - Zona de bem estar com movimento do ar.....	31
Figura 11 – Modalidade construtiva dos rotores dos ventiladores.....	32
Figura 12 - Ciclo de refrigeração por compressão a vapor	33
Figura 13 - Efeito de refrigeração e capacidade de um compressor ideal, a temperaturas de evaporação.....	35
Figura 14 - Efeito de refrigeração e capacidade de um compressor ideal, a temperaturas de condensação	36
Figura 15 - Potência e trabalho de compressão de um compressor ideal.....	37
Figura 16 – Compressor volumétrico rotativo.....	37
Figura 17 – Gráfico da temperatura média diária de bulbo seco de Porto Alegre	45
Figura 18 – Escritório de engenharia modelo do estudo	46
Figura 19 - Gráfico da escala da temperatura efetiva	51
Figura 20 – Gráfico da temperatura externa x temperatura interna.....	54
Figura 21 – Gráfico do consumo de energia anual para condição 1	57
Figura 22 – Gráfico do consumo elétrico mensal de refrigeração	58
Figura 23 – Consumo de energia anual para condição 2.....	59
Figura 24 – Gráfico adaptativo para condição 2.....	61
Figura 25 – Consumo de energia anual para condição 3.....	62
Figura 26 – Gráfico adaptativo para condição 3.....	63
Figura 27 – Consumo de energia anual para condição 4.....	64
Figura 28 – Gráfico adaptativo para condição 4.....	66
Figura 29 – Consumo de energia anual para condição 5.....	67
Figura 30 – Gráfico adaptativo para condição 5.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Construções	47
Tabela 2 – Schedules de operação	50
Tabela 3 – Condições do ambiente para análise	52
Tabela 4 – Valores de clo.....	53
Tabela 5 - Capacidade ideal do equipamento de ar condicionado.....	55
Tabela 6 - Capacidade do equipamento de ventilação	56
Tabela 7 – PMV e PPD para condição 1	58
Tabela 8 – PMV e PPD para condição 2	60
Tabela 9 – PMV e PPD para condição 3.....	63
Tabela 10 – PMV e PPD para condição 4.....	65
Tabela 11 – PMV e PPD para condição 5.....	67
Tabela 12 – Comparativo entre as condições propostas	69
Tabela 13 – Reajuste da capacidade ideal do equipamento de ar condicionado.....	70

LISTA DE SIGLAS

ABESCO	Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ASHRAE	<i>American Society Of Heating, Refrigerating And Air-Conditioning Engineers</i> (Sociedade Americana dos Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado)
BEN	Balanco Energético Nacional
CAPFT	<i>Capacity Correction Fator Function of Temperature</i> (Fator de Correção da Capacidade em Função da Temperatura)
COP	<i>Coefficient of Performance</i> (Coeficiente de Desempenho)
CSV	<i>Comma Separated Values</i> (Valores Separados por Vírgula)
CTF	<i>Conduction Transfer Funtion Cooling Seasonal</i> (Função Transferência por Condução)
EER	<i>Energy Efficiency Ratio</i> (Razão de Eficiência Energética)
EF	<i>Effect Refrigerating</i> (Capacidade de Refrigeração)
EIR	<i>Energy Input Ratio</i> (Razão de Entrada de Energia)
EIRFPLR	<i>Energy Input Ratio Correction Factor Function of Part-Load Ratio</i> (Fator de Correção da Razão de Entrada de Energia em Função da Razão de Carga Parcial)
EIRFT	<i>Energy Input Ratio Correction Factor Function of Temperature</i> (Fator de Correção da Razão de Entrada de Energia em Função da Temperatura)
HTML	<i>Hyper Text Markup Language</i> (Linguagem de Marcação de Hipertexto)
HVAC	<i>Heating, Ventilation, and Air Conditioning</i> (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado)
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NCDC	<i>National Climatic Data Center</i> (Centro Nacional de Dados)

	Climáticos)
NR	Normas Regulamentadoras
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i> (Laboratório Nacional de Energia Renovável)
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i> (Voto Médio Predito)
PPD	<i>Predicted Percentage Of Dissatisfied</i> (Percentagem Prevista de Insatisfeitos)
PTHP	<i>Packaged Terminal Heat Pumps</i> (Terminal de Bomba de Calor)
TMY	<i>Test Meteorological Year</i> (Ano Meteorológico de Teste)
TRY	<i>Test Reference Year</i> (Ano de Referência do Teste)
VRF	<i>Variable Refrigerant Flow</i> (Vazão de Refrigerante Variável)

LISTA DE SÍMBOLOS

apf	Área de superfície translúcida [m ²]
A_s	Área da superfície [m ²]
CAP	Capacidade de remoção de calor total [W]
COP	Coeficiente de desempenho [-]
C_p	Calor específico à pressão constante [J/(kg K)]
C_z	Capacitância térmica do ar da zona [J/K]
EER	Razão de eficiência energética [BTU/(h W)]
EF	Capacidade de refrigeração [BTU/h]
f_{cl}	Razão entre a área superficial da vestimenta, pela área do corpo [-]
$h1$	Entalpia do refrigerante na saída do evaporador [kJ/kg]
$h4$	Entalpia do refrigerante na entrada do evaporador [kJ/kg]
h_c	Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/(m ² °C)]
I_{cl}	Resistência térmica das roupas [(m ² °C)/W]
M	Taxa metabólica [W/m ²]
\dot{m}	Taxa de massa [kg/s]
\dot{m}_{inf}	Taxa de massa do ar proveniente da infiltração [kg/s]
P_a	Pressão parcial do vapor de água [Pa]
PMV	Voto médio predito [-]
POT	Potência elétrica [W]
PPD	Porcentagem de pessoas insatisfeitas [-]
q	Fluxo de calor [W/m ²]
\dot{Q}	Taxa de calor [W]
\dot{Q}_E	Capacidade de refrigeração [kW]

\dot{Q}_{sys}	Taxa de calor do sistema [W]
$SHGC$	Coeficiente de ganho de calor solar [-]
T_{∞}	Temperatura do fluido [K]
t_a	Temperatura do fluido [°C]
TBS	Temperatura do bulbo seco [°C]
TBS_e	Temperatura do bulbo seco do ambiente externo [°C]
TBS_i	Temperatura do bulbo seco do ambiente interno [°C]
TBU	Temperatura do bulbo úmido [°C]
TBU_i	Temperatura do bulbo úmido do ambiente interno [°C]
t_{cl}	Temperatura superficial das roupas [°C]
T_{in}	Temperatura externa do ar [°C]
T_{out}	Temperatura interna do ar [°C]
t_r	Temperatura radiante média [°C]
T_s	Temperatura da superfície [°C]
T_z	Temperatura média do ar da zona [K]
T_{zi}	Temperatura média do ar da zona adjacente [K]
W	Trabalho mecânico [W/m ²]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Tema	15
1.2 Delimitação do Tema	15
1.4 Objetivos	15
1.4.1 Objetivo Geral	15
1.4.2 Objetivos Específicos	16
1.5 Justificativa.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Conforto Térmico	17
2.1.1 Avaliação de Conforto Térmico	19
2.1.2 Adaptação Térmica	19
2.2 Mecanismos de Transferência de Calor	20
2.3 Efeitos do Movimento de Ar Sobre o Conforto Térmico.....	22
2.3.1 Temperatura Efetiva	23
2.3.2 Umidade Absoluta e Umidade Relativa	24
2.3.3 Metabolismo	25
2.3.4 Normas Regulamentadoras.....	27
2.4 Sistemas de Ventilação.....	29
2.4.1 Ventilação de Ar Natural.....	30
2.4.2 Ventilação Forçada	30
2.4.3 Ventiladores	31
2.5 Sistemas de Refrigeração.....	32
2.5.1 Ciclo de Refrigeração por Compressão de Vapor	33
2.5.2 Sistema de Ar Condicionado Tipo Expansão Direta.....	34
2.5.3 Renovação de Ar.....	38
2.6 Eficiência Energética em Ventilação e Refrigeração	38
2.7 Carga Térmica	39
2.8 Estudos de Referência.....	40
3 METODOLOGIA	41
3.1 Ferramentas para Modelagem da Simulação.....	41
3.1.1 Google SketchUp e OpenStudio	41
3.1.2 EnergyPlus	42

3.1.3 Arquivo Climático	44
3.2 Ambiente Modelo do Estudo	45
3.2.1 Zona Térmica	46
3.2.2 Construção	47
3.3 Cargas Térmicas Internas.....	47
3.3.1 Equipamentos Internos.....	48
3.3.2 Pessoas.....	48
3.3.3 Iluminação	48
3.3.4 Infiltração.....	48
3.4 Ar Condicionado	48
3.4.1 Dias de Projeto.....	49
3.5 Ventilação	49
3.6 Cronograma de Ocupação.....	50
3.7 Cenários Estudados.....	51
3.8 Variáveis de Saída	52
3.9 Voto Médio Predito (PMV).....	53
4 RESULTADOS.....	54
4.1 Temperaturas Externas x Temperaturas Internas	54
4.2 Sistema de Climatização do Tipo Split.....	55
4.2 Ventiladores Pessoais	56
4.3 Consumo de Energia Elétrica.....	56
4.3.1 Condição 1	56
4.3.2 Condição 2	59
4.3.3 Condição 3	61
4.3.4 Condição 4	64
4.3.5 Condição 5	66
4.4 Potencial de Escolha	69
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
REFERÊNCIAS.....	74
ANEXO A – CARACTERÍSTICAS DOS EQUIPAMENTOS DE VENTILAÇÃO	77

1 INTRODUÇÃO

O consumo energético de edificações no Brasil apresenta uma tendência de rápido crescimento, devido principalmente aos aumentos no padrão de conforto e serviços exigidos por seus usuários. Os recentes picos de demanda e altas taxas de construção priorizam a necessidade de aumentar a eficiência energética dos equipamentos, uma vez que os sistemas instalados agora consumirão energia também nos anos seguintes.

Os sistemas de climatização tornam-se grandes consumidores de energia em edificações. Conforme o BEN 2019 (Balanço Energético Nacional), ano base 2018, as edificações do segmento industrial, comercial, serviços, residencial e público, são identificadas como a principal demanda de eletricidade no Brasil, responsável pelo consumo de cerca de 50% do total da eletricidade consumida no país.

Através do movimento de construção sustentável, o tema “eficiência energética” vem sendo muito explorado nos últimos anos. Diversas pesquisas estão sendo desenvolvidas, e novas tecnologias surgindo para reduzir dentre outros fatores, os gastos com energia elétrica.

O custo de energia vem aumentando a cada ano e pode aumentar ainda mais. Existem duas formas básicas de se obter maior disponibilidade de energia: produzindo-a através de um dos mecanismos já existentes na matriz energética brasileira (hidroelétricas, termoelétricas, usinas nucleares, dentre outros) ou otimizando racionalmente o uso da energia atual. A primeira solução demanda tempo e altos investimentos, o que não resolveria a curto e médio prazo a condição. Utilizar melhor a energia e reduzir as perdas através da execução de projetos de eficiência energética é a forma mais rápida e de menor custo para a sociedade.

Para promover a eficiência energética dos sistemas de climatização, bem como promover a sensação de conforto aos ocupantes do ambiente climatizado, a norma regulamentadora nº 17 sugere que é necessário manter o índice de temperatura efetiva entre 20 e 23 °C e a velocidade do ar menor que 0,75 m/s, no caso de ambientes onde são executadas atividades que exijam solicitação intelectual e atenção constantes, tais como: salas de controle, laboratórios, escritórios, salas de desenvolvimento ou análise de projetos, dentre outros. Porém, outros autores que aplicam o conceito de conforto adaptativo, afirmam que a

velocidade do ar considerada como aceitável para um escritório pode chegar a 1,6 m/s, se baseado em problemas práticos, tais como voo de papéis sobre a mesa.

Sabendo-se que ao aumentar a velocidade do ar é reduzida a temperatura efetiva e de que os ventiladores gastam apenas uma pequena fração da energia consumida pelos aparelhos de ar condicionado, este trabalho teve como objetivo simular teoricamente um ambiente na cidade de Porto Alegre, onde será aumentada a velocidade do ar por meio de ventilação mecânica pessoal localizada, buscando reduzir o tempo de funcionamento do equipamento de ar condicionado e, conseqüentemente, economizando energia elétrica, a qual será justificada via simulação energética.

1.1 Tema

O presente trabalho possui como tema a área de climatização e conforto térmico adaptativo, visando à eficiência energética dos equipamentos, os quais são relevantes temas em estudo na atualidade.

1.2 Delimitação do Tema

Este trabalho limita-se à realização de simulações computacionais simplificadas com base em estudos experimentais, para avaliar os efeitos da velocidade do ar com equipamentos pessoais em um ambiente climatizado, enfatizando a eficiência energética e conforto térmico. Não será analisada minuciosamente a carga térmica interna do ambiente, e o perfil de ocupação não serão variáveis.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a eficiência energética de ambientes climatizados, mantendo as condições de conforto térmico com o uso de ventilação pessoal, comparando-se aos sistemas de climatização usuais.

1.4.2 Objetivos Específicos

Este trabalho terá como objetivos específicos os seguintes itens:

- a) Avaliar o efeito da velocidade do ar para o conforto térmico;
- b) Analisar a eficiência do equipamento de climatização em relação à temperatura de utilização;
- c) Avaliar e comparar o conforto tradicional e adaptativo.

1.5 Justificativa

Este trabalho apresenta uma alternativa considerada relevante, pois utiliza parâmetros de conforto adaptativo, através do aumento da velocidade aplicada, buscando a economia de energia elétrica. A economia seria obtida com o aumento da eficiência energética do equipamento de climatização, onde o compressor atua em uma menor faixa de trabalho (rotação e carga) e também na redução do período de utilização do mesmo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda a fundamentação teórica usada como embasamento do presente trabalho. São apresentados os conceitos de conforto térmico, ciclos de refrigeração, componentes de refrigeração, ventilação, componentes de ventilação, eficiência energética, psicrometria, os quais são tópicos fundamentais para atendimento aos objetivos estabelecidos.

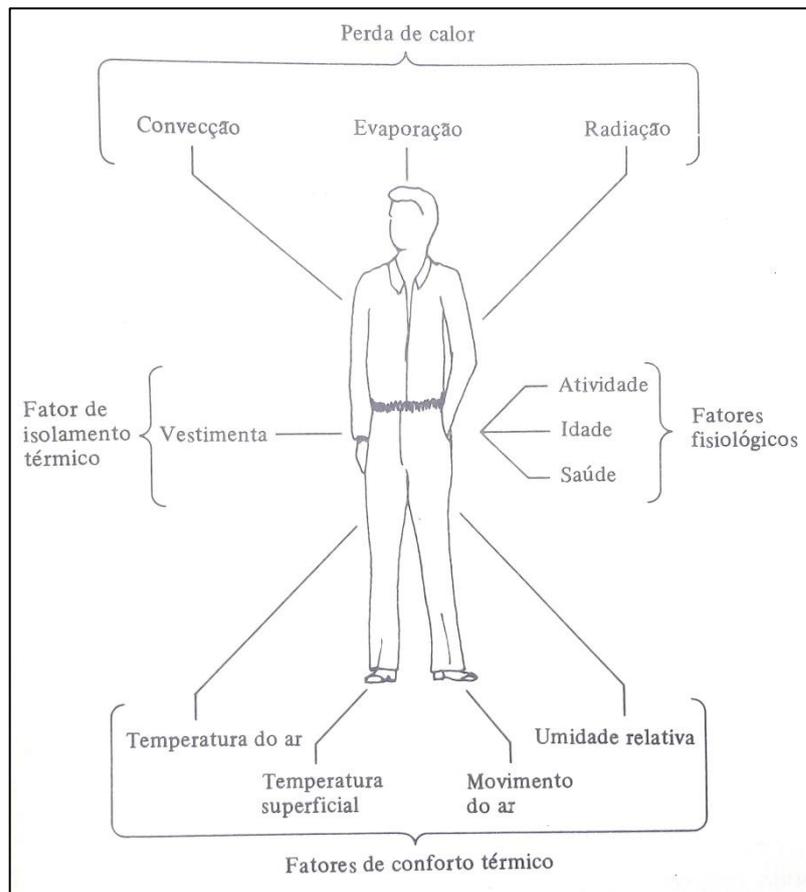
2.1 Conforto Térmico

Segundo a ASHRAE 55 (2017), conforto térmico é definido como “A condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico”. O estudo deste tema visa analisar as condições ideais para a satisfação dos ocupantes de um ambiente, a fim de que se sintam termicamente confortáveis, obtendo desta forma melhor desempenho ou rendimento no trabalho que está sendo executado (MACINTYRE, 1990).

Ainda na definição de Macintyre (1990), o corpo humano possui elevada capacidade de adaptação ao ambiente, podendo suportar condições térmicas adversas, tanto de temperaturas baixas como elevadas, que variam em fatores como idade, saúde e atividade que está sendo executada. Entretanto, em alguns casos estas condições externas de temperatura e umidade podem ultrapassar a capacidade de adaptação do corpo, sendo necessário o controle das mesmas a fim de tornar o ambiente sadio e propício a execução da tarefa para o qual foi projetado.

Além disso, as pessoas mudam seus hábitos de vestir com as estações do ano para manter o conforto sob uma faixa mais larga de condições ambientais. A Figura 1 apresenta alguns fatores que afetam o conforto térmico. O calor, que é gerado continuamente pelo corpo, deve ser dissipado a fim de que a temperatura interna se mantenha constante (STOECKER E JONES, 1985).

Figura 1– Fatores que afetam o conforto térmico



Fonte: Stoecker e Jones, 1985

Segundo Fanger (1970), existe uma condição chamada neutralidade térmica que é “A condição na qual uma pessoa não prefira nem mais calor nem mais frio no ambiente a seu redor”.

Ao longo do tempo, estudos têm discutido a influência da velocidade do ar e os limites de temperatura aceitos nessas condições. Em climas quentes e úmidos, sabe-se que a ventilação exerce um papel relevante no conforto, promovendo as trocas térmicas que podem ser efetuadas através de três processos físicos de transferência de calor, a condução, a convecção e a radiação, conforme item 2.2 Mecanismos de Transferência de Calor. A liberação de calor por convecção e evaporação é consideravelmente influenciada pelo movimento do ar, sendo o mais presente no caso da liberação de calor pelo corpo humano (COSTA, 2013).

2.1.1 Avaliação de Conforto Térmico

Para avaliar estes aspectos relativos de conforto térmico, são encontradas duas abordagens diferentes. A primeira, mais conhecida como estática, desenvolvida por Fanger (1970), é a principal representante da linha analítica de avaliação das sensações térmicas humanas e considera os ocupantes como receptores passivos do ambiente. Seus estudos são realizados em câmaras climatizadas, onde tanto as variáveis do ambiente como as variáveis pessoais são manipuladas, para encontrar a melhor combinação possível entre elas, a fim de obter resultados de uma condição mais confortável.

Na segunda abordagem, é considerado o modelo adaptativo de Nicol e Humphreys (2010), no qual são abordadas condições reais do cotidiano, com pessoas desempenhando suas atividades diárias. Este modelo supõe que as pessoas se adaptam diretamente ao lugar onde estão sendo, as ações adaptativas uma forma de ajuste do corpo ao meio térmico.

Vários estudos defendem a abordagem adaptativa como uma ferramenta ideal para avaliação precisa de conforto humano em relação à temperatura, onde a principal diferença entre ambas as abordagens reside no fato de que na abordagem adaptativa, o ocupante desempenha um papel decisivo na criação do seu próprio ambiente térmico, interagindo com o meio envolvente, modificando comportamentos e revendo hábitos, e adaptando as suas expectativas às condições ambientais existentes.

Optou-se, no presente trabalho, pela utilização de uma abordagem adaptativa do conforto térmico. No ambiente estudado, o papel do residente na interação com o meio é decisivo para a obtenção do conforto térmico, por exemplo, pela colocação de uma peça adicional de vestuário, no inverno.

2.1.2 Adaptação Térmica

Distinguem-se três categorias de adaptação térmica:

- a adaptação comportamental engloba um conjunto de atitudes que um indivíduo pode estabelecer com o ambiente, tendo em vista a manutenção do seu conforto térmico. As atitudes podem ser de natureza individual (alteração de

vestuário, da atividade, da postura ou do local de permanência), ambiental (controle das condições ambientais, abertura e fechamento de portas e janelas, ou o acionamento dos dispositivos de climatização) e cultural (programação de atividades ou adoção de determinados padrões de vestuário) (FOUTAIN, 1996);

- a adaptação fisiológica engloba um conjunto de alterações periódicas desenvolvidas pelo mecanismo termorregulador de um indivíduo de modo a conseguir adaptar-se, isto é, a ajustar a resposta do organismo ao ambiente interior. Divide-se em duas categorias: a adaptação genética e a aclimatação (BRAGER e DE DEAR, 1998);

- a adaptação psicológica engloba um conjunto de reações desenvolvidas pelo ocupante aos estímulos sensoriais, fortemente condicionadas pelas experiências prévias de habituação do ocupante ao ambiente interior, bem como pelas expectativas criadas ao mesmo (FOUTAIN, 1996).

O conceito de “oportunidade adaptativa”, desenvolvido por Baker e Standeven, avalia a possibilidade de desenvolvimento, pelo indivíduo, de uma determinada ação adaptativa (comportamental, fisiológica ou psicológica). De um ponto de vista prático caracteriza-se do seguinte modo: “se ocorre uma mudança tal que provoque desconforto, as pessoas reagem de forma a restaurar o seu conforto” (BAKER e STANDEVEN, 1996).

2.2 Mecanismos de Transferência de Calor

Segundo Çengel e Ghajar (2012) transferência de calor é um conjunto de fenômenos que caracterizam a quantidade de calor transferido quando um sistema passa por um processo de estado de equilíbrio de um para outro estado. A transferência de energia como calor, ocorre do meio de maior temperatura para o de menor temperatura e cessa quando os dois atingem a mesma temperatura. Ainda segundo os mesmos autores, as três principais formas de transferência de calor são: condução, convecção e radiação.

A condução de calor é a passagem de calor de uma zona para outra de um mesmo corpo ou de corpos em um sistema, devido ao movimento vibratório molecular dos mesmos. Esse movimento vibratório permite um intercâmbio de energia cinética entre as moléculas das quais, as de maior temperatura cedem energia as de menor temperatura. A capacidade de transferência de calor por

condução de diferentes materiais é denominada de condutividade térmica. (COSTA, 2013).

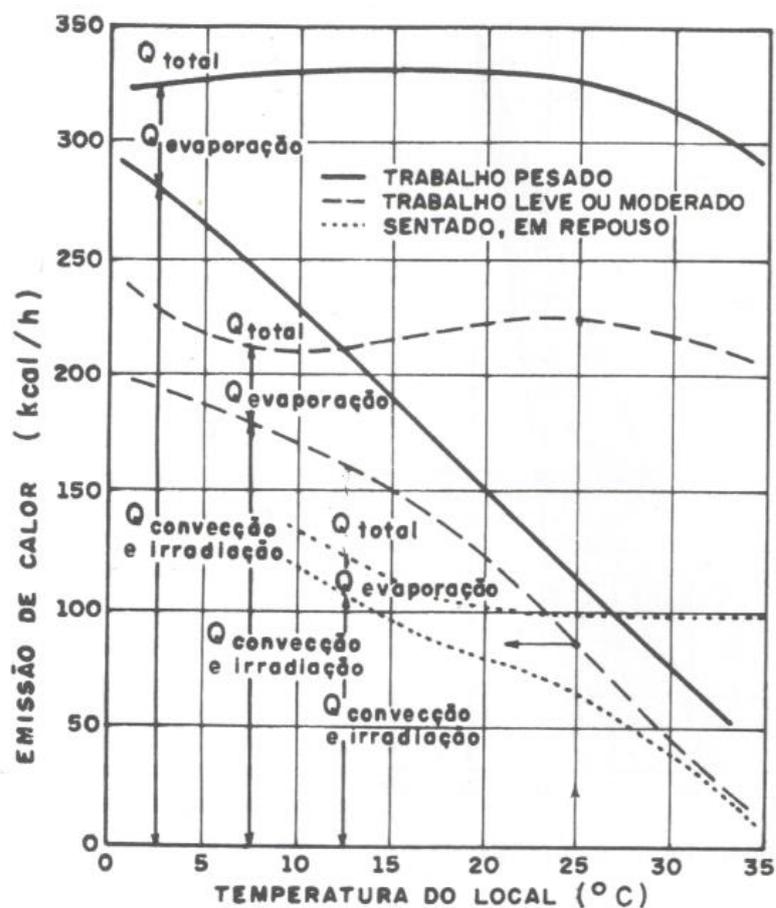
Já a convecção, trata-se do processo de transferência de calor que ocorre entre um sólido e um fluido, devido ao movimento das partículas, ocasionado por uma diferença de pressão que por sua vez é gerada pela diferença de temperatura. Quanto mais rápido for o movimento do fluido, maior será a quantidade de calor transferido por convecção. Se o ar aquecido pela pele for removido por uma corrente de ar, estabelece-se com ar ambiente uma corrente de convecção. As correntes de ar por convecção ocorrem porque o ar quente menos denso que o ar frio tende a subir, enquanto o ar frio mais denso tende a descer, efetuando uma troca de ar dentro do espaço (COSTA, 2013).

A terceira forma de transferência de calor é a radiação térmica, pela qual todos os corpos emitem energia térmica sob a forma de radiações semelhantes à luz. A radiação ocorre sob forma de ondas eletromagnéticas e não necessita de ar nem outro meio intermediário para se propagar, dependendo apenas das diferentes temperaturas do corpo e das superfícies circundantes. Quando esta energia radiante atinge a superfície do corpo, transforma-se em calor. O corpo humano transmite ou recebe calor por radiação, em função da sua diferença de temperatura em relação às superfícies existentes no ambiente (COSTA, 2013).

A Figura 2 apresenta as taxas de emissão de calor por uma pessoa em função da temperatura do ambiente, demonstrando graficamente o que foi citado neste tópico.

Este trabalho visa favorecer estas trocas com o ambiente devido ao deslocamento do ar proporcionado por ventiladores pessoais, logo as curvas de emissão de calor serão reduzidas se mantermos fixo sempre que possível as temperaturas. Com todos esses conceitos, consegue-se compreender melhor os processos de transmissão de calor, que são essenciais para este estudo.

Figura 2 - Emissão de calor por uma pessoa em função da temperatura



Fonte: Macintyre, 1990

2.3 Efeitos do Movimento de Ar Sobre o Conforto Térmico

O ar em movimento favorece a transferência de calor através da pele, de modo a eliminar o excesso de calor produzido pelo corpo ou adquirido pelo mesmo em consequência do calor proveniente do ambiente, demonstrado na Figura 3. Em climas tropicais, para que seja possível trabalhar em condições ambientais necessárias, primordialmente para saúde e secundariamente para a produtividade, deve-se procurar atender às condições adequadas de ventilação (MACINTYRE, 1990).

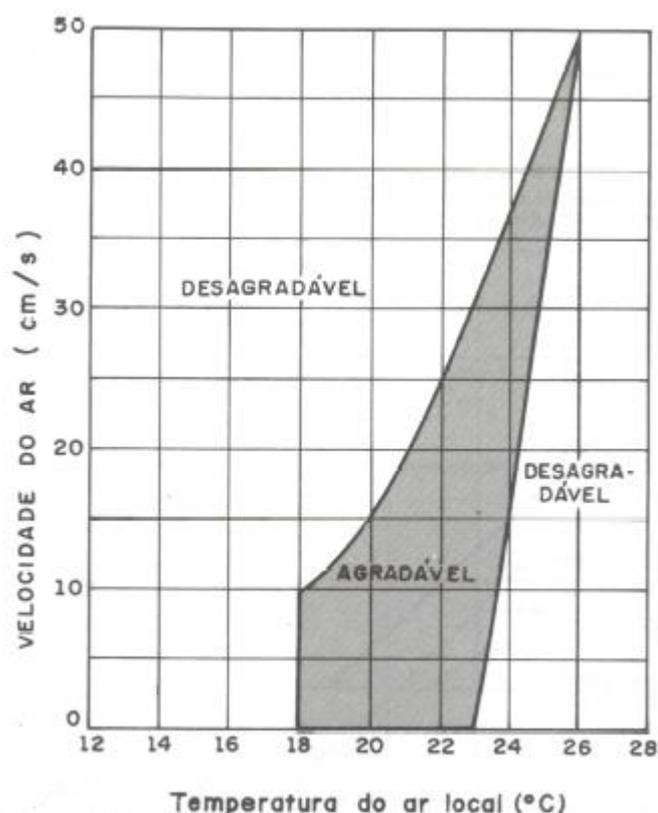
O movimento do ar tem por efeito:

- Acelerar a perda de calor por convecção;
- Auxiliar o corpo a dissipar o calor fornecido por condução na camada de ar superficial da pele;

- Auxiliar a perda de calor por transpiração, permitindo ao homem suportar temperaturas mais elevadas.

O movimento do ar é necessário não somente para remover o calor por evaporação, mas também para controlar a intensidade da transpiração.

Figura 3 - Região de conforto em função da temperatura local e velocidade do ar



Fonte: Macintyre, 1990

Conforme a Figura 3, é possível observar que mesmo em temperaturas moderadas, é conveniente provocar certo movimento de ar para acelerar a perda de calor do corpo por convecção (MACINTYRE, 1990).

2.3.1 Temperatura Efetiva

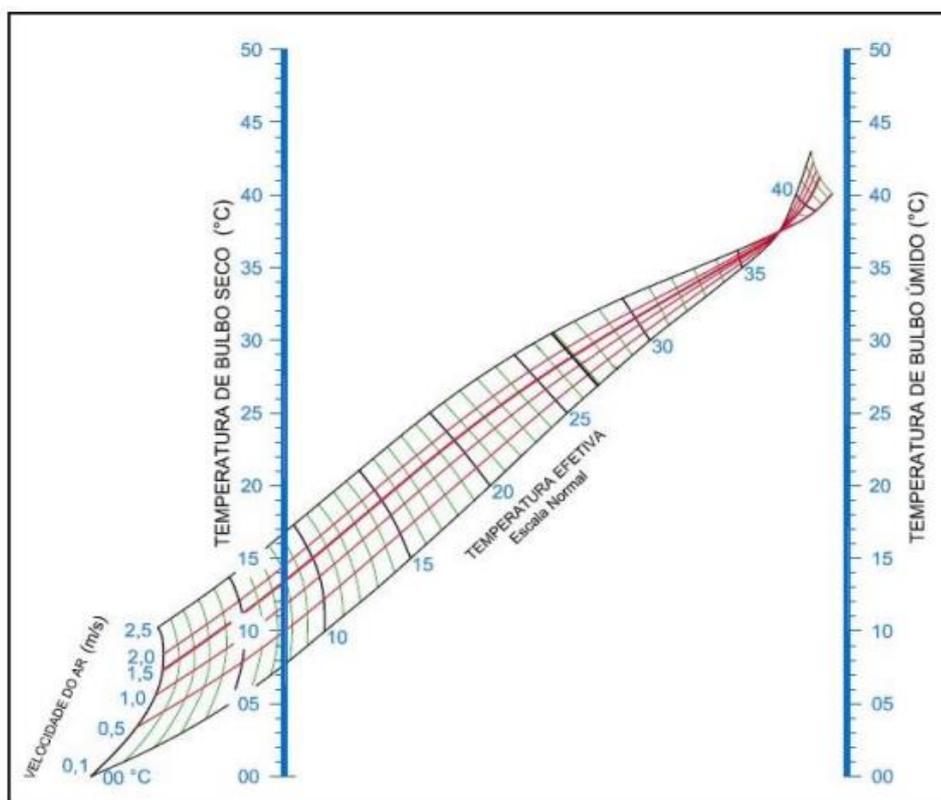
A temperatura efetiva é uma grandeza empírica capaz de exprimir em um único índice a sensação de calor, combinando a temperatura do ar, a umidade relativa e a velocidade do ar (STOECKER E JONES, 1985). Corresponde a certa temperatura de bulbo seco, certa umidade relativa e certa velocidade do ar. Para aferição se utilizam diagramas, entrando-se com os valores das temperaturas dos

termômetros de bulbo seco e de bulbo úmido e da velocidade do ar (MACINTYRE, 1990). A Figura 4 mostra como determinar este parâmetro.

Empregam-se duas escalas de temperaturas efetivas:

- Temperatura efetiva normal, aplicável ao homem vestido.
- Temperatura efetiva básica corresponde ao homem sem roupa da cintura para cima.

Figura 4 - Gráfico para determinação da temperatura efetiva



Fonte: ELEFANT, 2016

Se o ar se encontrar com elevada umidade, mesmo que se aplique ventilação com velocidade considerável, não será possível conseguir evaporação nas condições necessárias. O conforto ambiental só se torna possível com a remoção da umidade do ar, e esta remoção ocorre com a climatização do ambiente (STOECKER E JONES, 1985).

2.3.2 Umidade Absoluta e Umidade Relativa

A umidade absoluta é a massa de vapor de água existente na atmosfera em um dado momento, por unidade de massa ar seco. A unidade de medição é a

quantidade total de umidade, em gramas, em relação a massa ou ao volume de ar (COSTA, 2013). Pode, portanto, ser expressa como g_{H_2O}/g_{ar} ou ainda em g_{H_2O}/m^3_{ar} .

A umidade que geralmente se considera na prática é a umidade relativa, definida como a relação entre o número de gramas de umidade existente em 1 m³ de ar num determinado ambiente e numa determinada temperatura, e a quantidade máxima de gramas de umidade de ar nessa mesma temperatura que poderá conter quando estiver saturado. A umidade relativa aumenta com o conteúdo de água no ar e com a diminuição da temperatura do ambiente. Quanto maior a umidade relativa do ar, mais lento se torna o processo de evaporação e menor será sua taxa com o qual o suor evapora do corpo, quando saturado o ar não será capaz de proporcionar a evaporação do suor (MACINTYRE, 1990).

2.3.3 Metabolismo

Metabolismo é a produção de calor por metro quadrado de superfície corpórea de um indivíduo em repouso, em jejum e em equilíbrio térmico com o exterior. Corresponde a quantidade mínima de energia despendida para a manutenção da respiração, circulação sanguínea, tono muscular, temperatura corporal e outras funções do organismo. Sua avaliação se mede em quilocalorias por metro quadrado de superfície corporal e por hora (MACINTYRE, 1990).

O corpo humano possui mecanismos de controle das trocas de calor com o ambiente, sendo o hipotálamo o centro de controle que regula o fluxo sanguíneo e a intensidade da transpiração a partir da temperatura interior, de forma a igualar a energia produzida no interior do corpo com as perdas térmicas para o exterior. Este mecanismo apenas funciona para um dado limite de condições exteriores, porque a exposição a temperaturas extremas durante um longo período de tempo inibe a capacidade de resposta (temperaturas interiores do corpo humano inferiores a 28°C, determinam sérios problemas cardíacos e de arritmia, e acima de 46 °C determinam danos cerebrais irreversíveis) (ASHRAE, 2010).

A equação geral de conforto desenvolvida por Fanger (1970), o PMV (voto médio predito) é o índice que prevê o valor médio de um grande grupo de pessoas, segundo uma escala de sete sensações de 7 pontos, como mostra a Figura 5 e a Equação 2.1.

$$\begin{aligned}
 PMV = & (0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028) \cdot \{ (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99(M - W) - P_a] \\
 & - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - P_a) \\
 & - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] \\
 & - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Onde M é a taxa metabólica, W é o trabalho mecânico, I_{cl} é a resistência térmica das roupas, f_{cl} é a razão entre a área superficial do corpo vestido pela área do corpo nú, t_a é a temperatura do ar, t_r é a temperatura radiante média, P_a é a pressão parcial do vapor da água, h_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção, t_{cl} é a temperatura superficial das roupas.

Figura 5 – Escala de sete pontos

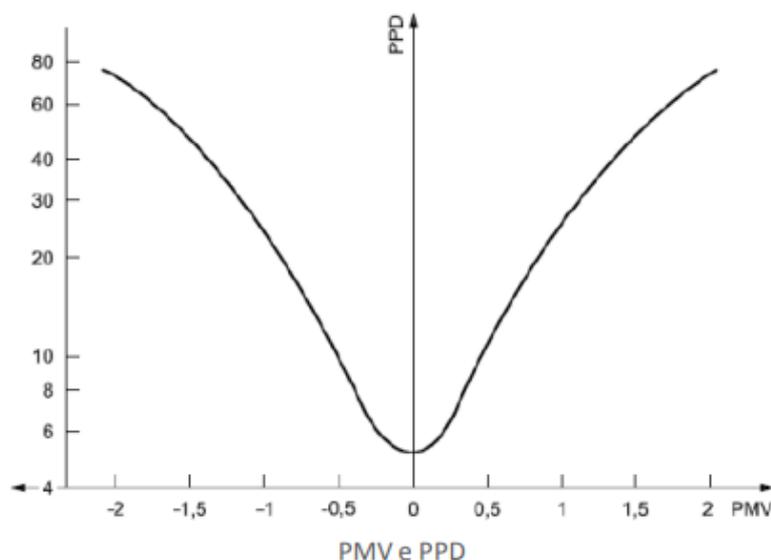
+3	•Muito quente
+2	•Quente
+1	•Levemente quente
0	•Neutro
-1	•Levemente frio
-2	•Frio
-3	•Muito frio

Fonte: Adaptado de ASHRAE 55, 2017

Devido à variação biológica entre as pessoas, não é possível que todos ocupantes se sintam confortáveis termicamente ao ambiente. O PPD (porcentagem de pessoas insatisfeitas) estabelece a quantidade estimada de pessoas insatisfeitas, conforme Equação 2.2 ou pela Figura 6.

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-[0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2]}
 \tag{2.2}$$

Figura 6 - Gráfico para obtenção do PPD



Fonte: ASHRAE 55, 2017

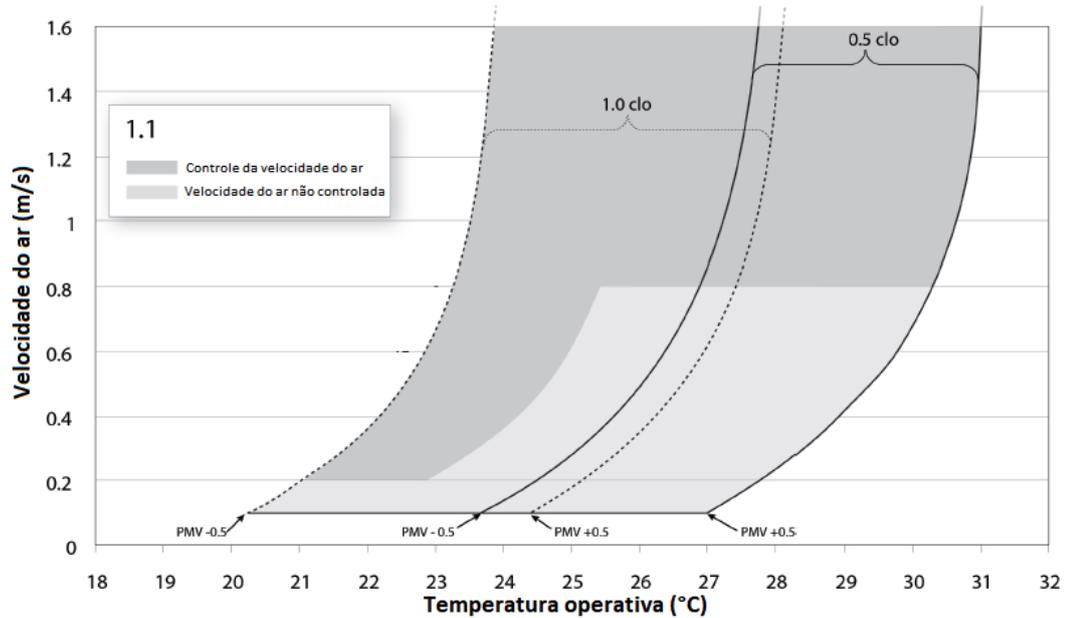
2.3.4 Normas Regulamentadoras

No Brasil, a norma regulamentadora nº 17 (2018), padroniza a manutenção do índice de temperatura efetiva entre 20 e 26 °C e a velocidade do ar não deve ultrapassar 0,75 m/s para ambientes onde são executadas atividades que exijam solicitação intelectual e atenção constantes, tais como: salas de controle, laboratórios, escritórios, salas de desenvolvimento ou análise de projetos, dentre outros.

Já a norma ASHRAE 55 (2017), inclui um modelo adaptativo de avaliação do conforto térmico representado graficamente na Figura 7. Sua aplicação está restrita à ambientes condicionados, onde os seus ocupantes podem livremente adaptar o seu vestuário às condições ambientes interiores ou exteriores. É admissível aplicar o método de zona de conforto com velocidade de ar elevada para ambientes em que tenha velocidade de ar maior que 0,2 m/s e limite superior de 0,8 m/s, taxas metabólicas médias estejam na faixa de 1,0 e 2,0 met e isolamento de vestuário entre 0,0 e 1,5 clo.

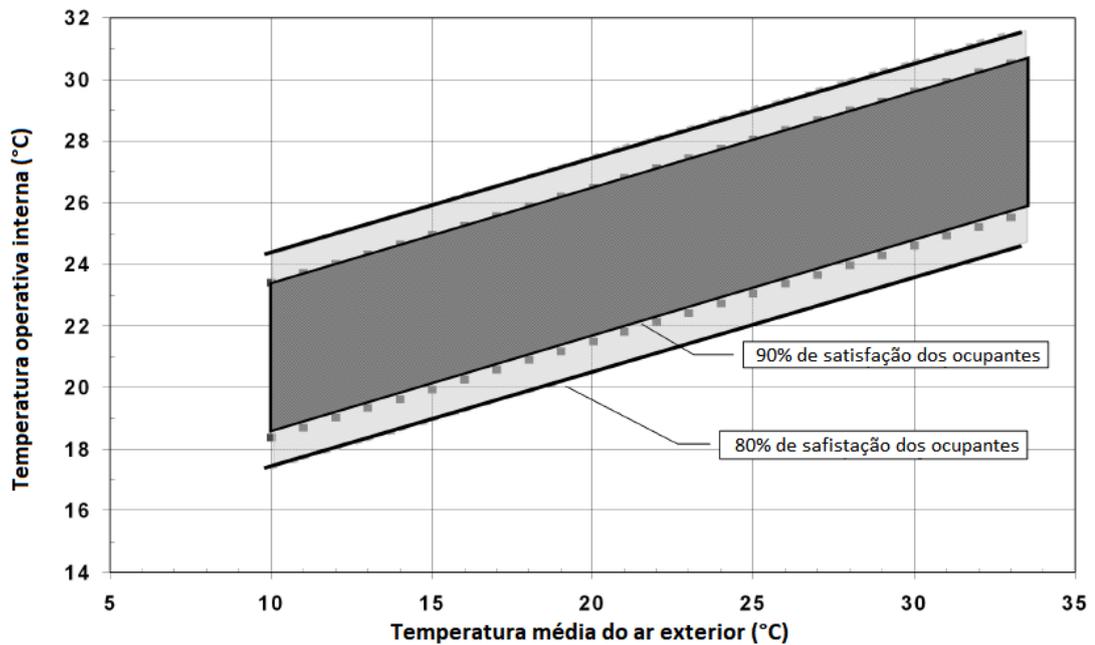
A Figura 8 representa o intervalo de conforto da temperatura operativa de conforto, em função da temperatura média mensal exterior, para duas classes de conforto correspondentes a 80 % e 90 % de satisfação dos ocupantes.

Figura 7 - Zonas aceitáveis de temperatura em função da velocidade do ar



Fonte: ASHRAE 55, 2017

Figura 8 - Valores recomendados da temperatura para satisfação dos ocupantes



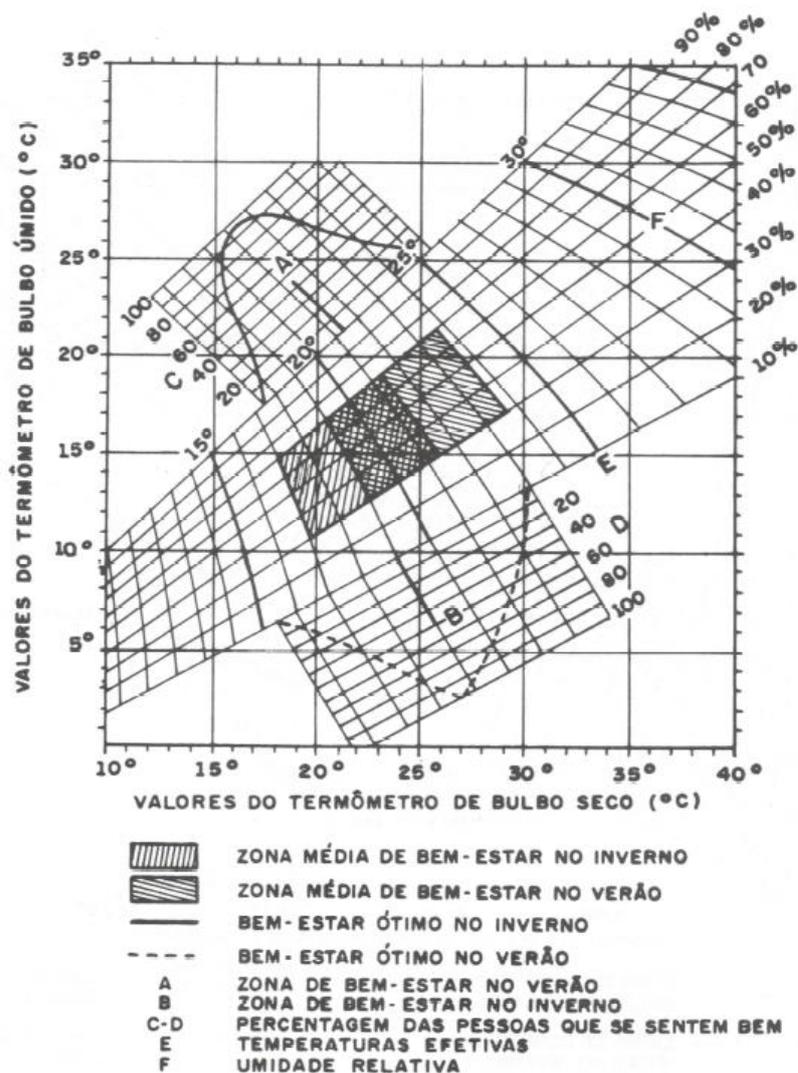
Fonte: ASHRAE 55, 2017

Com a disponibilidade do uso de ventiladores pessoais no ambiente, os limites da temperatura operativa de trabalho podem ser expandidos, mantendo a mesma porcentagem de satisfação em temperaturas superiores.

2.4 Sistemas de Ventilação

Dá-se o nome de ventilação ao processo de renovar o ar em um recinto. A ventilação em geral consiste na movimentação de quantidades relativamente grandes de ar através de espaços confinados, com a finalidade de melhorar as condições do ambiente em função do controle da temperatura, da distribuição, da pureza do ar e da umidade, seja por meios naturais ou mecânicos. Classifica-se a ventilação em duas finalidades, a primeira buscando a manutenção do conforto e a eficiência do homem, a segunda tem como objetivo manter a saúde e a segurança do homem (MACINTYRE, 1990). A Figura 9 mostra as zonas de bem-estar para o ar parado.

Figura 9 - Zona de bem-estar para o ar parado



Fonte: Macintyre, 1990

2.4.1 Ventilação de Ar Natural

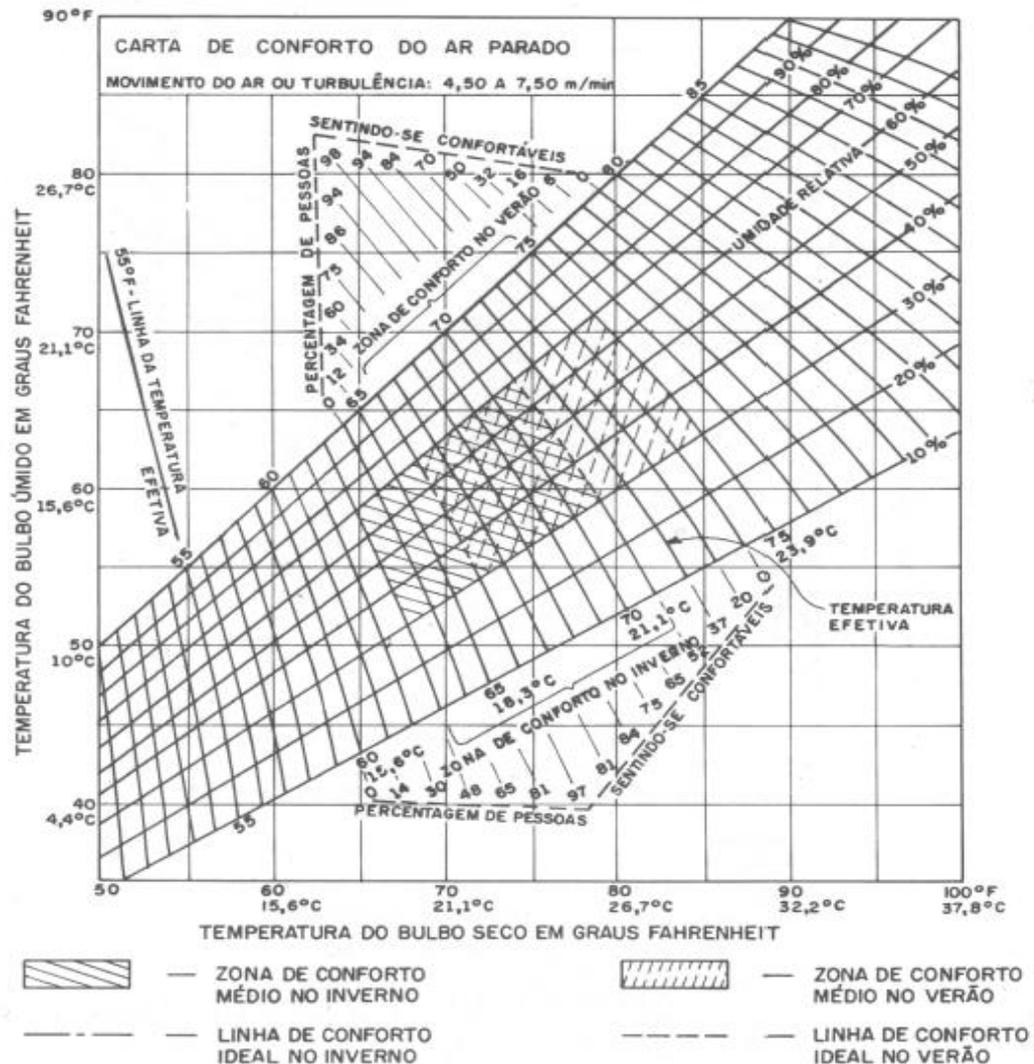
Consiste em proporcionar a entrada e a saída de ar de um ambiente de forma controlada e intencional, através de aberturas destinadas para esta finalidade. O fluxo de ar depende diretamente da diferença de pressão ou temperatura existente entre o exterior e interior do ambiente, junto das resistências oferecidas pelas aberturas. A variação de densidade cria diferenças de pressão, provocando um gradiente de pressão do sentido horizontal (COSTA, 2013).

2.4.2 Ventilação Forçada

A renovação de ar proporcionada por diferenças de pressão criadas mecanicamente é adotada sempre que os meios naturais não proporcionam o índice de renovação de ar necessário, ou como elemento de segurança nas condições de funcionamento precário da circulação natural. Possibilita o tratamento do ar com filtragem, umidificadores, etc (COSTA, 2013).

Pode-se observar na Figura 10, que a porcentagem de pessoas sentindo-se confortáveis com o movimento do ar em faixas de temperaturas mais elevadas, é superior quando comparado à Figura 9, na qual não há movimentação forçada de ar.

Figura 10 - Zona de bem estar com movimento do ar

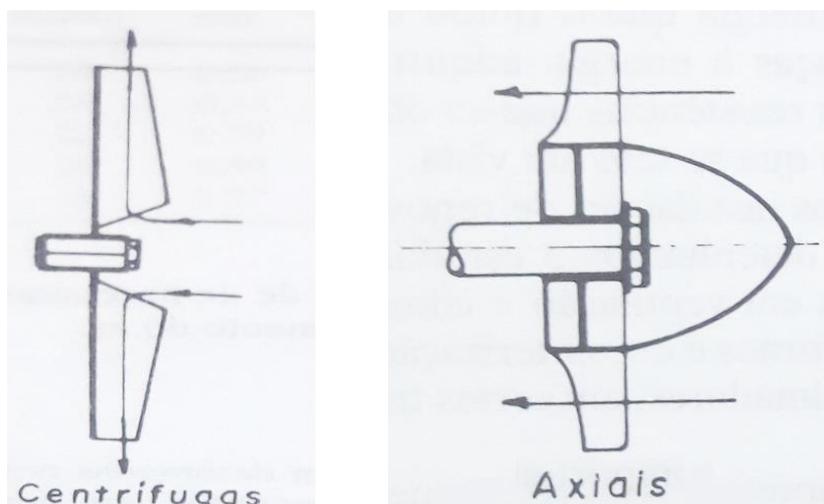


Fonte: Macintyre, 1990

2.4.3 Ventiladores

Ventiladores são máquinas turbodinâmicas, que se destinam a produzir deslocamento dos gases de forma que, a rotação de um rotor dotado de pás adequadas, acionado por um motor, em geral elétrico, permite a transformação da energia potencial de pressão e a energia cinética. Devido a esta energia adquirida, o ar torna-se capaz de vencer as resistências que se oferecem ao seu deslocamento, proporcionando a vazão de ar desejável. Em sua modalidade construtiva, os ventiladores são classificados como centrífugos e axiais, como mostra a Figura 11 (MACINTYRE, 1990).

Figura 11 – Modalidade construtiva dos rotores dos ventiladores



Fonte: Macintyre, 1990

- Centrifugos, quando a trajetória de uma partícula gasosa no rotor se realiza em uma superfície que é aproximadamente um plano normal ao eixo, uma espiral. São equipamentos de construção mais robusta, onde sua principal característica é a capacidade de gerar alta pressão em redes de dutos.
- Axiais, quando a trajetória percorrida por uma partícula em sua passagem pelo rotor é uma hélice descrita em uma superfície de revolução aproximadamente cilíndrica. Estes equipamentos desenvolvem baixa pressão, porém elevada vazão de ar.

Com base no modelo adaptativo de conforto térmico, item de estudo deste trabalho, não há necessidade de grandes máquinas, mas sim o incremento do deslocamento de ar, podendo ser fornecido por microventiladores.

2.5 Sistemas de Refrigeração

Para Cengel e Boles (2013), refrigeração é a transferência de calor de uma região de temperatura mais baixa para outra com temperatura mais alta. Os dispositivos que produzem refrigeração são chamados de refrigeradores, e os ciclos de operação são chamados de ciclos de refrigeração.

As áreas de refrigeração e ar condicionado são correlatas, onde a aplicação mais disseminada da refrigeração é o ar condicionado. O processo de condicionamento de ar tem como objetivo controlar a temperatura, umidade e distribuição do ar no sentido de proporcionar conforto aos ocupantes do recinto

condicionado. Os ambientes também devem ser resfriados para compensar o calor liberado por pessoas, luzes e equipamentos elétricos (STOECKER E JONES, 1985).

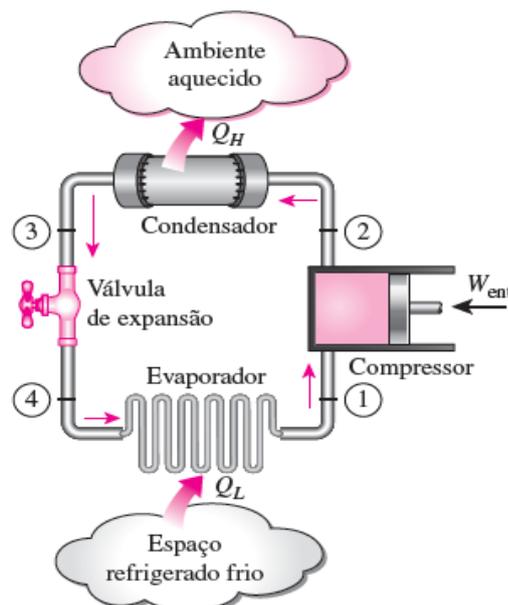
O processo de refrigeração mais adotado, tanto em técnicas de refrigeração industrial como a de conforto térmico, é a refrigeração mecânica por meio de vapores, mais conhecida como ciclo de refrigeração por compressão de vapores (COSTA, 2013).

2.5.1 Ciclo de Refrigeração por Compressão de Vapor

Consiste no processo em que o refrigerante é vaporizado e condensado de maneira contínua em um sistema fechado. Para conseguir a vaporização deste líquido é necessário que a tensão de seu vapor seja superior à pressão a que está submetido o fluido de vaporização, o qual deverá ser condensado novamente para manter o ciclo do processo (COSTA, 2013).

Costa (2013), afirma que uma instalação de refrigeração mecânica por meio de vapor nada mais é do que um conjunto de elementos ligados em circuito fechado, destinado a condensar o fluido e possibilitar sua vaporização contínua. Os elementos essenciais para realização do ciclo são: compressor, condensador, dispositivo de expansão e evaporador. Estes componentes e o ciclo que compõem quando operam em conjunto são mostrados na Figura 12.

Figura 12 - Ciclo de refrigeração por compressão a vapor



Fonte: Cengel e Boles, 2013

2.5.2 Sistema de Ar Condicionado Tipo Expansão Direta

É assim denominado o sistema composto por aparelhos que utilizam a serpentina para condicionar diretamente o ar distribuído no ambiente, por meio de uso de fluido refrigerante. Os equipamentos mais comuns desse tipo de sistema são os condicionadores autônomos, tais como de janela, split, compacto e, de tecnologia mais moderna, a central multi-split VRF (Vazão de Refrigerante Variável) (ABNT NBR 16401, 2008).

Atualmente o sistema de condicionamento de ar tipo *split* é o mais encontrado em edificações residenciais e comerciais, pelo fato de ser fácil e rápida sua instalação sem a necessidade de grandes aberturas em paredes como no sistema do tipo janela. Outra característica fica por conta do baixo nível de ruído, uma vez que o compressor fica na parte externa junto ao condensador. Assim a unidade evaporadora está separada da unidade condensadora apenas conectada por tubulações de cobre ou alumínio. A capacidade de resfriamento desses equipamentos geralmente estão entre 1,75 e 17,5 kW (SILVA, 2004).

Os componentes básicos apresentados são:

- o condensador, que tem a função de dissipar para o ambiente externo ao sistema de refrigeração o calor absorvido no evaporador e gerado pelo processo de compressão;
- o evaporador, que absorve a carga térmica do sistema de resfriamento através da vaporização do refrigerante;
- o compressor, que eleva a pressão e temperatura do fluido refrigerante proveniente do evaporador;
- o dispositivo de expansão, que regula a vazão do fluido refrigerante líquido que entra no evaporador e mantém a diferença de pressão entre os lados de alta e baixa pressão do ciclo, com o objetivo de permitir a vaporização do refrigerante na condição desejada de baixa pressão no evaporador e alta pressão necessária no condensador;
- o fluido de refrigeração, substância empregada como veículo térmico na realização dos ciclos, transportando energia térmica à baixa temperatura de um local para outro.

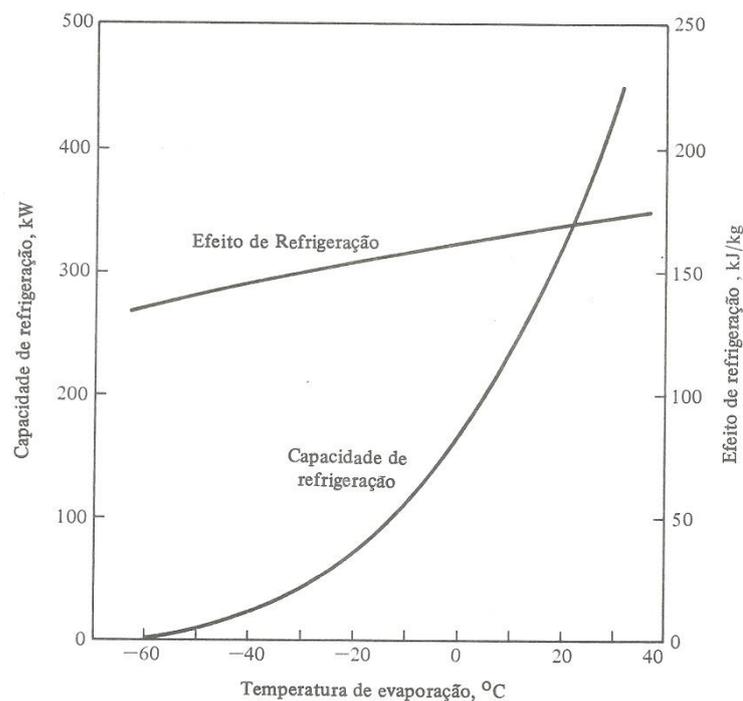
O maior consumo de energia em um sistema de ar condicionado de expansão direta é proveniente do compressor, componente que terá maior enfoque devido ao objetivo deste trabalho.

A capacidade de refrigeração de um compressor é dada por:

$$\dot{Q}_E = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (2.3)$$

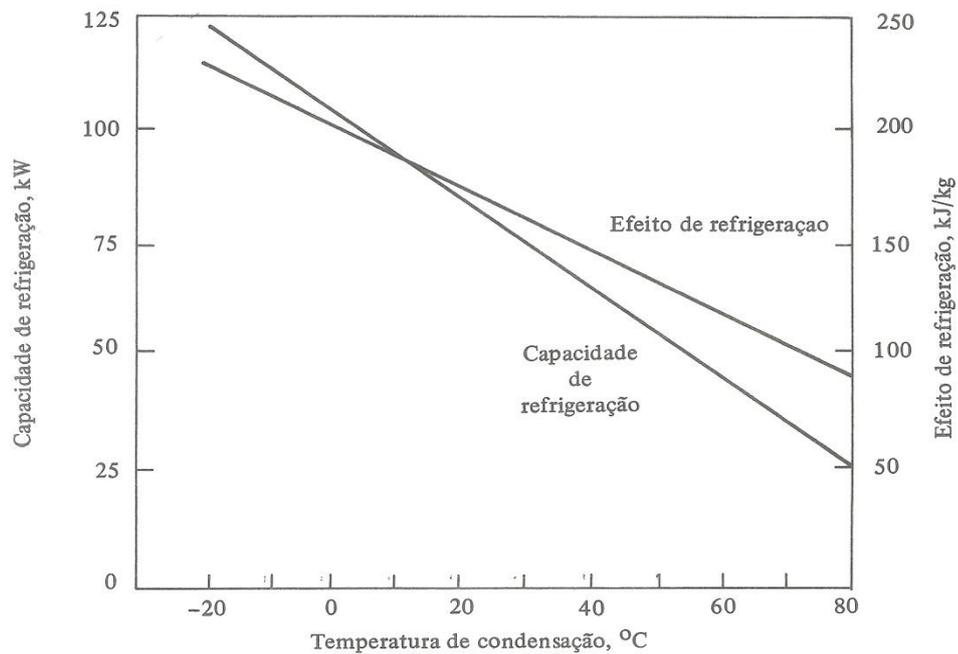
Onde h_1 e h_4 são as entalpias do refrigerante na saída e na entrada do evaporador, em kJ/kg. O efeito de refrigeração e a capacidade de um compressor ideal são mostrados na Figura 13 para evaporação e na Figura 14 para condensação (STOECKER E JONES, 1985).

Figura 13 - Efeito de refrigeração e capacidade de um compressor ideal, a temperaturas de evaporação



Fonte: Stoecker e Jones, 1985.

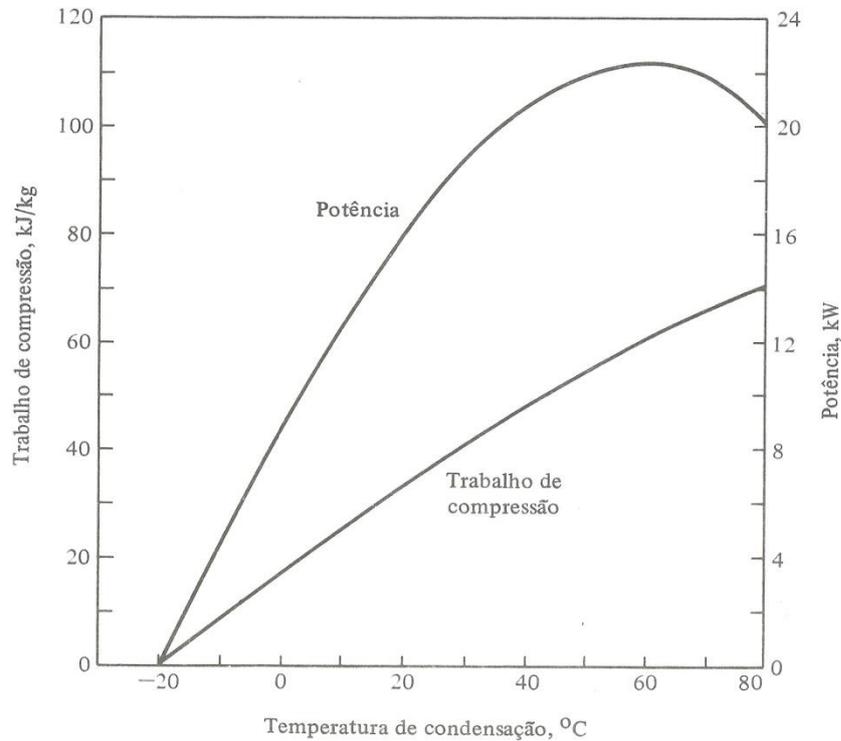
Figura 14 - Efeito de refrigeração e capacidade de um compressor ideal, a temperaturas de condensação



Fonte: Stoecker e Jones, 1985.

A potência de um compressor é dada pelo produto do trabalho de compressão, pela taxa de massa. O trabalho de compressão aumenta e a taxa de massa diminui com o aumento da temperatura de condensação, logo é necessário que a potência do compressor cresça com a temperatura de condensação, como mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Potência e trabalho de compressão de um compressor ideal



Fonte: Stoecker e Jones, 1985

Diversos tipos de compressores são utilizados em sistemas de refrigeração. Um deles é o volumétrico rotativo, sendo o mais econômico e silencioso dos compressores. Sua grande eficiência energética ocorre pelo fluido refrigerante que é comprimido nas espirais internas do equipamento, onde mesmo que seu funcionamento aconteça em altíssima rotação, o trabalho é realizado com menor esforço e conseqüentemente consumindo menos energia (SILVA, 2004). A Figura 16 mostra um compressor do tipo rotativo.

Figura 16 – Compressor volumétrico rotativo



Fonte: WebArCondicionado, 2019

Uma das tecnologias que podem ser aplicadas nos compressores rotativos para torná-los mais eficientes é a inverter, que faz com que o compressor regule sua rotação conforme a necessidade de refrigeração do sistema, trabalhando em baixa frequência, evitando assim os picos de energia, sem perder a eficiência. Em comparação ao compressor rotativo convencional, um sistema inverter pode chegar a consumir 40% menos energia do que um sistema convencional que liga e desliga a cada ciclo de resfriamento. Outra inovação que vem sendo aplicada nesses sistemas é a utilização de uma unidade condensadora para mais de uma unidade evaporadora podendo ligar quatro unidades internas ao mesmo tempo, onde o ar é insuflado nos ambientes através de dutos (CAMPANHOLA, 2014).

2.5.3 Renovação de Ar

Conforme determinação da ANVISA, Agência Nacional de Vigilância Sanitária, através da Resolução RE nº 9, de janeiro de 2003, a qual atualiza a Resolução RE nº 176, apresenta padrões referenciais de qualidade do ar interior em ambientes climatizados artificialmente. Segundo esta resolução a taxa de renovação de ar deverá ser, no mínimo 27 m³/h por pessoa para manter a qualidade de ar interior aceitável, quando ventilação natural não estiver sendo usada, a mesma deve ser feita mecanicamente por sistema de ventilação.

2.6 Eficiência Energética em Ventilação e Refrigeração

A eficiência energética, também chamada de utilização racional da energia, consiste em usar de modo eficiente a energia para se obter um determinado resultado. Por definição, a eficiência energética consiste da relação entre a quantidade de energia empregada em uma atividade e aquela disponibilizada para sua realização (ABESCO, 2018).

Para avaliar o rendimento de um equipamento de refrigeração se utiliza como parâmetro o Coeficiente de Performance (COP), que relaciona a capacidade de remoção de calor de um equipamento com a potência requerida pelo compressor, como mostra a Equação 2.4. Quanto maior o COP, maior a eficiência do ciclo de refrigeração.

$$COP = \frac{ENERGIA \acute{U}TIL}{ENERGIA CONSUMIDA} \quad (2.4)$$

Outra forma de indicar a eficiência de uma máquina frigorífica é pela Razão de Eficiência Energética, *Energy Efficiency Ratio (EER)*, mostrada na equação 2.5 que relaciona a Capacidade de Refrigeração (*EF*) produzida e o Trabalho de Compressão (*W*) dispendido.

$$EER = \frac{EF}{W} \quad (2.5)$$

Uma regra prática diz que o COP melhora de 2 a 4% para cada 1 °C de elevação de temperatura de evaporação ou para cada 1 °C de diminuição da temperatura de condensação (CENGEL; BOLES, 2013).

2.7 Carga Térmica

A adição ou remoção de calor sensível e/ou latente de um ambiente climatizado leva o nome de carga térmica, e tem a finalidade de manter as condições desejadas de temperatura e umidade relativa (CREDER, 2010).

Os ganhos de calor num ambiente estão diretamente ligados às fontes externas e provenientes do próprio ambiente. Segundo Silva (2004) podem-se dividir os ganhos externos em:

- Radiação solar através das paredes e vidros das janelas expostas ao sol, transferindo calor diretamente para as superfícies internas ou para as paredes;
- A Infiltração de ar quente exterior pela renovação do ar ou até mesmo infiltração pelo mau isolamento do ambiente.

As caracterizações dos ganhos internos ficam por conta da ocupação do ambiente pelas próprias pessoas que liberam calor, iluminação e pela dissipação de potência de equipamentos e maquinários como televisores, computadores, cafeteiras, máquinas de cópias, motores elétricos, etc (MACINTYRE, 1990).

2.8 Estudos de Referência

Na área de estudo deste trabalho, destacam-se alguns autores utilizados como referência para o seu desenvolvimento. Dentre eles Omrani *et al.* (2017), que relata em seu artigo o benefício da utilização de ventilação natural para se obter níveis mais satisfatórios de conforto térmico. Os pesquisadores De Vecchi *et al.* (2013), que buscam avaliar o efeito de conforto térmico dos ocupantes em uma sala de aula utilizando de valores elevados de velocidade do ar (0,20-1,35 m/s) em um sistema de condicionamento de ar híbrido, no qual utiliza de ar condicionado e ventiladores de teto. A pesquisa de Rupp *et al.* (2017), na qual analisou e comparou os resultados de sensação térmica obtidos em estudos de campo com os valores calculados de PMV/PPD provenientes do método analítico adotado pela ASHRAE 55, avaliando o Conforto térmico humano em escritórios com sistema central de condicionamento de ar.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são mostrados os métodos utilizados para obter as condições de conforto ideal, baseando-se no modelo da norma regulamentadora nº 17 (2018), pela qual a temperatura efetiva ideal deve variar entre 20 e 26 °C. Respeitando estes limites, em um primeiro momento foi considerada uma condição onde um ambiente é climatizado apenas por um sistema de ar condicionado.

Na sequência, utilizando o embasamento do modelo adaptativo da ASHRAE 55 de zona de conforto com velocidade do ar elevada, foram inclusos ventiladores pessoais localizados individualmente em cada posto de trabalho, sendo estes responsáveis por promover o aumento da velocidade de deslocamento do ar. Desta forma é possível manter as mesmas condições de conforto térmico, com aumento da temperatura e com a redução do tempo de funcionamento do sistema de ar condicionado. Estas condições propostas serão descritas na sequência, e comparadas quanto a seus gastos com energia elétrica.

3.1 Ferramentas para Modelagem da Simulação

As ferramentas utilizadas para realização da simulação serão descritas a seguir.

3.1.1 Google SketchUp e OpenStudio

Para o modelamento geométrico do ambiente foi utilizado o *software* Sketchup, um programa de desenho tridimensional no qual é possível modelar as edificações com facilidade. Já para determinação das zonas térmicas foi necessário uso de um *plug-in*, Legacy OpenStudio, desenvolvido pelo NREL (National Renewable Energy Laboratory), 2019. O *plug-in*, em conjunto com o Sketchup gera um arquivo do tipo “.idf” (input data file), onde são inseridos os parâmetros de entrada do EnergyPlus para que seja possível simular o comportamento energético e térmico da edificação.

3.1.2 EnergyPlus

O EnergyPlus é um programa que permite simular o comportamento térmico e energético de uma edificação, em termos de aquecimento, arrefecimento, refrigeração, iluminação, ventilação e energia, possibilitando uma análise do conjunto destas várias características. Para o funcionamento do programa é necessário introduzir uma série de dados (*inputs*) para a obtenção dos resultados pretendidos (*outputs*).

O balanço de energia da zona térmica estudada é obtido pelo EnergyPlus através do algoritmo Conduction Transfer Function (CTF), representado na Equação 3.1.

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{si}} \dot{Q} + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_{c,si} A_{si} (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (3.1)$$

Na Equação 3.1, T_z é a temperatura média do ar da zona; T_{zi} é a temperatura média do ar da zona adjacente; T_{si} é a temperatura da superfície interna da zona; T_{∞} é a temperatura do ar exterior; C_z é a capacitância térmica do ar da zona; C_p é o calor específico do ar; $h_{c,si}$ é o coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície interna da zona; A_{si} é a área da superfície da zona; \dot{m}_i é a vazão mássica de ar proveniente da zona adjacente; \dot{m}_{inf} é a vazão mássica do ar de infiltração na zona; $C_z \frac{dT_z}{dt}$ é a taxa de energia armazenada no volume de ar da zona; $\sum_{i=1}^{N_{si}} \dot{Q}$ é a potência térmica das fontes internas de calor transferida por convecção para a zona; $\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_{c,si} A_{si} (T_{si} - T_z)$ é a potência térmica transferida por convecção das superfícies que constituem a zona; $\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$ é a potência térmica devido a troca de ar infiltrado entre zonas; $\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$ é a taxa de calor devido à infiltração de ar externo na zona; e \dot{Q}_{sys} é a taxa de energia que o sistema do condicionador de ar remove na zona.

A parede externa de uma zona tem o seu balanço de energia expresso pela Equação 3.2.

$$q''_{\alpha sol} + q''_{\alpha LWR} + q''_{conv} - q''_{k0} = 0 \quad (3.2)$$

Na Equação 3.2 $q''_{\alpha sol}$ é o fluxo de radiação solar direta e difusa absorvida; q''_{LWR} é o fluxo de radiação de comprimento de onda longo trocado com o meio, sendo a absorção e emitância de fontes de baixa temperatura; q''_{conv} é o fluxo de calor trocado por convecção entre a superfície e o ar exterior; q''_{k0} é o fluxo de calor trocado com a face da parede. O balanço de energia na parede interna da zona é expresso pela Equação 3.3.

$$q''_{lwx} + q''_{sw} + q''_{lws} + q''_{ki} + q''_{qsol} + q''_{conv} = 0 \quad (3.3)$$

Os termos da Equação 3.3 representam: q''_{lwx} é o fluxo de radiação por comprimento de onda longa trocado entre as superfícies; q''_{sw} é o fluxo de radiação por comprimento de onda curto emitido por lâmpadas e a radiação solar que incide através das janelas no interior da zona; q''_{lws} é o fluxo de calor de ondas longas emitido por equipamentos; q''_{ki} é o fluxo de condução de calor conduzido na face interna da parede; q''_{sol} é o fluxo de radiação solar absorvida e transmitida pela superfície; q''_{conv} é o fluxo de calor por condução com o ar na zona.

O balanço de energia para as janelas, as quais têm suas superfícies translúcidas é expresso pela Equação 3.4.

$$Q = hc.apf(T_{out} - T_{in}) + SHGC.apf.Et \quad (3.4)$$

Onde Q é o fluxo de energia; hc é o coeficiente de transferência de calor; apf é a área de superfície translúcida, T_{out} é a temperatura externa do ar; T_{in} é a temperatura interna do ar; $SHGC$ é o coeficiente de ganho de calor solar; Et é a radiação total incidente.

A simulação do comportamento de um condicionador de ar depende diretamente do conhecimento do seu desempenho mediante as diversas condições de funcionamento. A potência elétrica do equipamento foi corrigida pelas seguintes curvas: $CAPFT$, $EIRFT$ e $EIRFPLR$, conforme a Equação 3.5.

$$POT = \left[\frac{CAP.CAPFT}{COP} \right] EIRFT . EIRFPLR \quad (3.5)$$

Onde POT é a potência elétrica do condicionador de ar operando em refrigeração; CAP é a capacidade nominal em refrigeração; COP é o coeficiente de performance nominal; $CAPFT$ é o fator de correção da capacidade em função das temperaturas de operação; $EIRFT$ é a razão de entrada de energia EIR (Energy Input Ratio) em função das temperaturas de operação; e o $EIRFPLR$ é a correção do EIR em função das cargas parciais. A curva biquadrática $CAPFT$ é representada pela Equação 3.6.

$$CAPFT = a + [b TBU_i] + [c TBU_i^2] + [d TBS_e] + [e TBS_e^2] + [f TBU_i TBS_e] \quad (3.6)$$

Sendo $CAPFT$ o fator que corrige a capacidade em função das temperaturas de operação; a a f são os coeficientes da equação; TBU_i é a temperatura de bulbo úmido do ambiente interno; e TBS_e é a temperatura de bulbo seco do ambiente externo.

O EIR representa a razão entre a potência consumida e a capacidade do equipamento operando em refrigeração, ou seja, o EIR é o inverso do COP. O comportamento do EIR em função das temperaturas de operação é representado pela curva $EIRFT$ e, esta curva biquadrática, por sua vez, é representada pela Equação 3.7.

$$EIRFT = g + [h TBU_i] + [i TBU_i^2] + [j TBS_e] + [k TBS_e^2] + [l TBU_i TBS_e] \quad (3.7)$$

Onde $EIRFT$ é o fator de correção de EIR em função das temperaturas de operação, as letras de g a l representam os coeficientes da equação, obtidos da mesma forma que para o $CAPFT$, de acordo com as referências do *EnergyPlus* (2018).

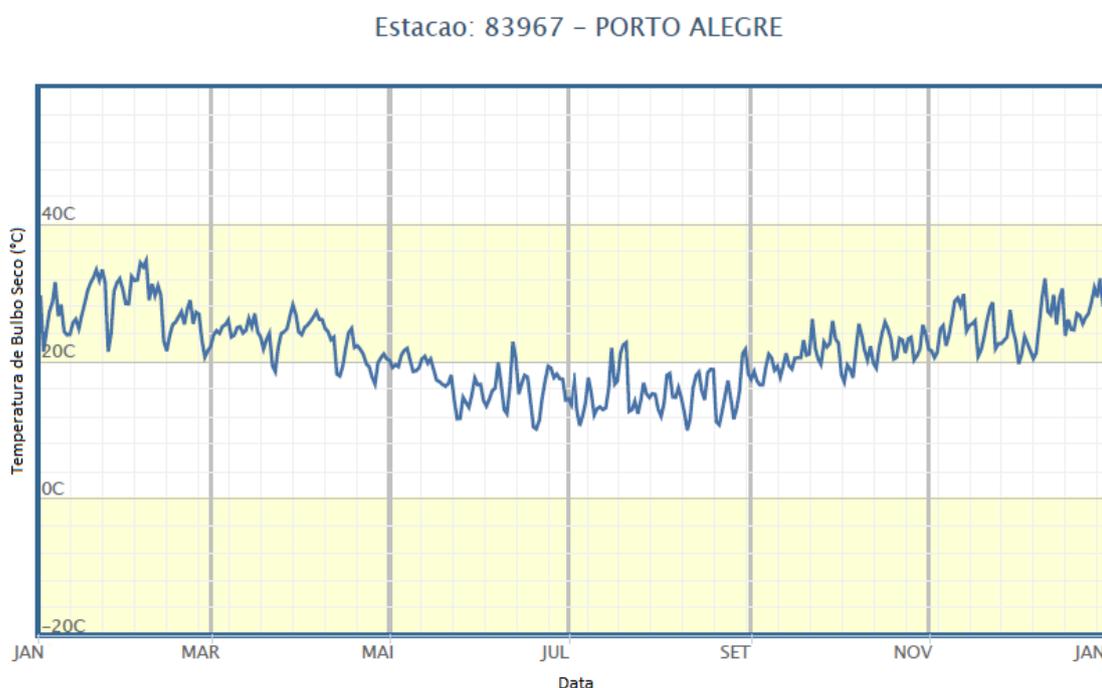
3.1.3 Arquivo Climático

O arquivo climático é um banco de dados relevante para a simulação térmica do ambiente, pois contempla informações climáticas da localidade de análise. Estes dados são organizados de forma a simular um ano típico, gerando arquivos climáticos do tipo TRY (*Test Reference Year*) no qual considera apenas o ano mais

representativo e o do tipo TMY (*Test Meteorological Year*) considerando os meses mais representativos.

Para este estudo foram considerados os arquivos do tipo TMY com extensão “.epw”, coletados na base meteorológica de Porto Alegre, disponíveis na página eletrônica do laboratório de referência LabEEE (www.labeee.ufsc.br), com a última atualização dos arquivos do ano de 2018. Estas informações estão organizadas em intervalos horários ao longo de um ano completo, totalizando 8760 horas de simulação. A Figura 17 mostra a variação da temperatura média diária de bulbo seco da cidade de Porto Alegre, representada durante um ano.

Figura 17 – Gráfico da temperatura média diária de bulbo seco de Porto Alegre



Fonte: LabEEE - Ufsc, 2018.

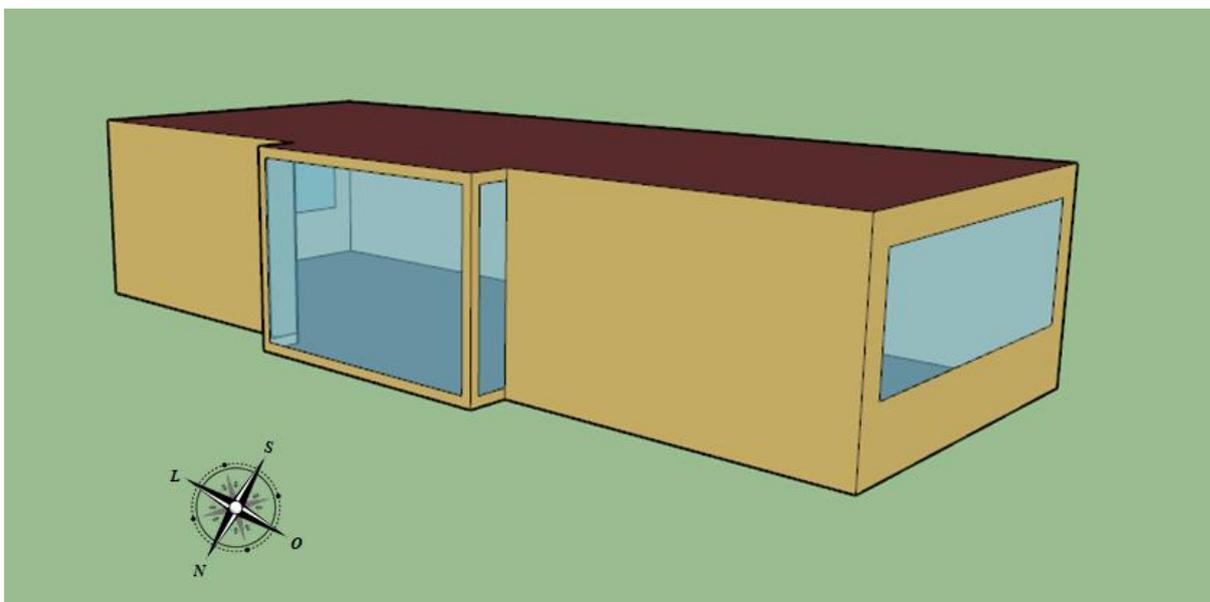
É possível observar neste gráfico que as maiores temperaturas de bulbo seco ocorrem entre os meses de dezembro a fevereiro e as menores temperaturas decorrem entre junho e setembro.

3.2 Ambiente Modelo do Estudo

Este estudo teve como modelo de referência uma sala comercial de um edifício corporativo de ocupação do tipo multiusuário localizado no centro da cidade de Porto Alegre, a sala se encontra em um andar de pavimento tipo e é utilizada por

escritório de engenharia especializado em execução de projetos, as características descritas estão mostradas na Figura 18. O horário de expediente do escritório é das 07:12h às 17 :00h, de segunda a sexta feira, onde a capacidade efetiva é de 7 funcionários.

Figura 18 – Escritório de engenharia modelo do estudo



Fonte: O autor, 2019.

A sala possui uma área total de 72,05 m² e pé-direito de 2,90 m, tendo suas paredes externas voltadas para o Norte, Leste e Oeste, e possuindo janelas não operativas expostas ao sol e ao vento. A parede voltada para o Sul divide o ambiente estudado de outros ambientes do edifício, por isso foi considerada adiabática, sendo nela posicionada uma porta de madeira com 1,89 m² de área, a qual permite a passagem dos ocupantes. O piso e o teto também foram considerados adiabáticos, pois separam o ambiente dos demais pavimentos do empreendimento.

3.2.1 Zona Térmica

Definiu-se uma única zona térmica para o ambiente de estudo, para que os limites fossem bem definidos. Estas zonas tiveram suas condições de contorno com o meio externo definido manualmente para cada item, inclusive demarcando os que estavam expostos ao sol e ao vento.

3.2.2 Construção

As informações obtidas da construção foram inseridas no *EnergyPlus*, dispostas com os materiais em camadas para definir um conjunto de construção, descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Construções

Construção	Material	Espessura (m)	Condutividade Térmica (W/m.K)	Densidade (kg/m ³)	Calor Específico (Cp)
Paredes externas	reboco	0,0254	0,72	1856	840
	tijolo	0,2	0,89	1920	790
	reboco	0,0254	0,72	1856	840
Paredes internas	reboco	0,0254	0,72	1856	840
	tijolo	0,1016	0,89	1920	790
	reboco	0,0254	0,72	1856	840
Lajes internas	concreto pesado	0,2032	1,95	2240	900
Janelas externas	vidro	0,003	0,9	-	-
	ar	0,0127	-	-	-
	vidro	0,003	0,9	-	-
Porta interna	madeira	0,025	0,15	608	1630

Fonte: adaptado de Materiais LabEEE - UFSC, 2018.

Para a modelagem dos materiais e sistemas construtivos, foram utilizados os parâmetros apresentados na biblioteca de materiais, disponível na página eletrônica do laboratório de referência LabEEE (www.labeee.ufsc.br), a qual apresenta informações de materiais e componentes adequados aos padrões construtivos brasileiros.

3.3 Cargas Térmicas Internas

As cargas térmicas internas correspondem às fontes geradoras de calor, e seus resultados são determinados em função da máxima dissipação de energia de equipamentos internos, pessoas, iluminação, infiltração e ventilação. Seus valores foram estimados por tabelas definidas pela ASHRAE (2017).

3.3.1 Equipamentos Internos

Por tratar-se de um escritório de engenharia, definiu-se equipamentos característicos deste tipo de ambiente, tais como: computadores, impressoras de grande porte, copiadoras, cafeteiras, projetor, etc. Considerando o ganho de calor por unidade de área, a densidade se enquadra pelas tabelas da ASHRAE (2017) em média/alta, sendo igual a $16,2 \text{ W/m}^2$ e uma fração radiante de 30%.

3.3.2 Pessoas

Para a ocupação foi considerada, com base em ASHRAE (2017), uma média de $9,3 \text{ m}^2/\text{pessoa}$, sendo que cada um dissipa como calor total valores de 110 W com fração radiante de 44%, conforme as atividades exercidas em um escritório, utilizando $1,2$ como valor de taxa metabólica, valor adequado para onde não se exige muito esforço físico.

3.3.3 Iluminação

Segundo ASHRAE (2017), para iluminação de escritórios pode ser utilizada uma taxa de 12 W/m^2 , com fração radiante de 42% e fração visível de 56%. Estes valores são válidos para utilização de lâmpadas do tipo LED, de embutir e com difusores.

3.3.4 Infiltração

Foram previstas taxas globais de infiltração, conforme estabelecido pela ASHRAE (2017) para edifícios comerciais, utilizando $0,65$ de trocas de ar por hora do volume disposto no escritório de estudo.

3.4 Ar Condicionado

O EnergyPlus possui em seu banco de dados modelos de condicionadores de ar, testados e com características registradas. Foram utilizadas características de funcionamento de sistemas HVAC (*Heating, Ventilating and Air Conditioning*).

O modelo utilizado para simular a operação do ar condicionado foi do tipo “PTHP” (*Packaged Terminal Heat Pumps*), o qual fornece a maior parte de sua produção de calor e resfriamento usando a tecnologia de ciclo reverso com eficiência energética.

Para determinar a capacidade do condicionador de ar necessário para o ambiente, a simulação foi executada no modo “*autosize*”, no qual o software calcula a capacidade de refrigeração ou aquecimento baseado na equação de balanço térmico da zona térmica, na condição do dia de projeto.

3.4.1 Dias de Projeto

Para o dimensionamento mais preciso e correto do ar condicionado, é necessário utilizar os dias de projeto, os quais são dias definidos pela ASHRAE (2017), considerando apenas os dias mais críticos de todo o ano. A cada quadriênio é publicado em seu manual “*Handbook – Fundamentals*”, na versão digital, tabelas fornecendo dados de dia de projeto para diversas localidades ao redor do mundo. Valores obtidos a partir do levantamento fornecido pelo NCDC (National Climatic Data Center), para um período de 25 anos (quando possível). Obedecendo aos critérios de qualidade descritos nos manuais, os meses considerados foram de janeiro e de julho, sendo que o primeiro apresentou suas temperaturas máximas de verão nos dias 19, 20 e 21. Já o segundo teve suas temperaturas máximas de inverno nos dias 21, 22 e 23 do respectivo mês.

3.5 Ventilação

Para simular a operação dos ventiladores pessoais foi utilizado o modelo “Fan:ZoneExhaust” do EnergyPlus. Esta categoria de ventilação difere das demais categorias, pois é possível controlar de forma individualizada seu funcionamento, ao invés de servir como parte de um sistema de ar HVAC. O controle do ventilador será baseado em uma comparação entre a temperatura atual do ar na zona e os valores de temperaturas programadas nos *schedules*. A função “ZoneVentilation” coordena a operação do ventilador, considerando os dados da ocupação definidos para o posto de trabalho e o *setpoint* fixado para a ventilação, fazendo com que o equipamento funcione quando a zona estiver mais quente que o limite programado.

O elemento encarregado de proporcionar o aumento da velocidade de deslocamento do ar é um microventilador do tipo Axial, assim classificando o ambiente como uma zona de conforto com velocidade de ar elevada. Cada posto de trabalho do escritório tem disponível um aparelho para uso, totalizando 7 equipamentos.

3.6 Cronograma de Ocupação

São inseridos dentro do software os cronogramas de ocupação, conhecidos como *Schedules*, onde constam informações que se referem para cada hora de todos os dias da semana, incluso finais de semana e feriados. Estes dados são inseridos de forma porcentual, tendo valor mínimo de 0 para nenhuma ocupação à 1 para a ocupação máxima.

Desta forma há o reconhecimento pelo programa de todos os dias e horários de operação. A Tabela 2 relaciona os Schedules desenvolvidos para a operação do *software*.

Tabela 2 – Schedules de operação

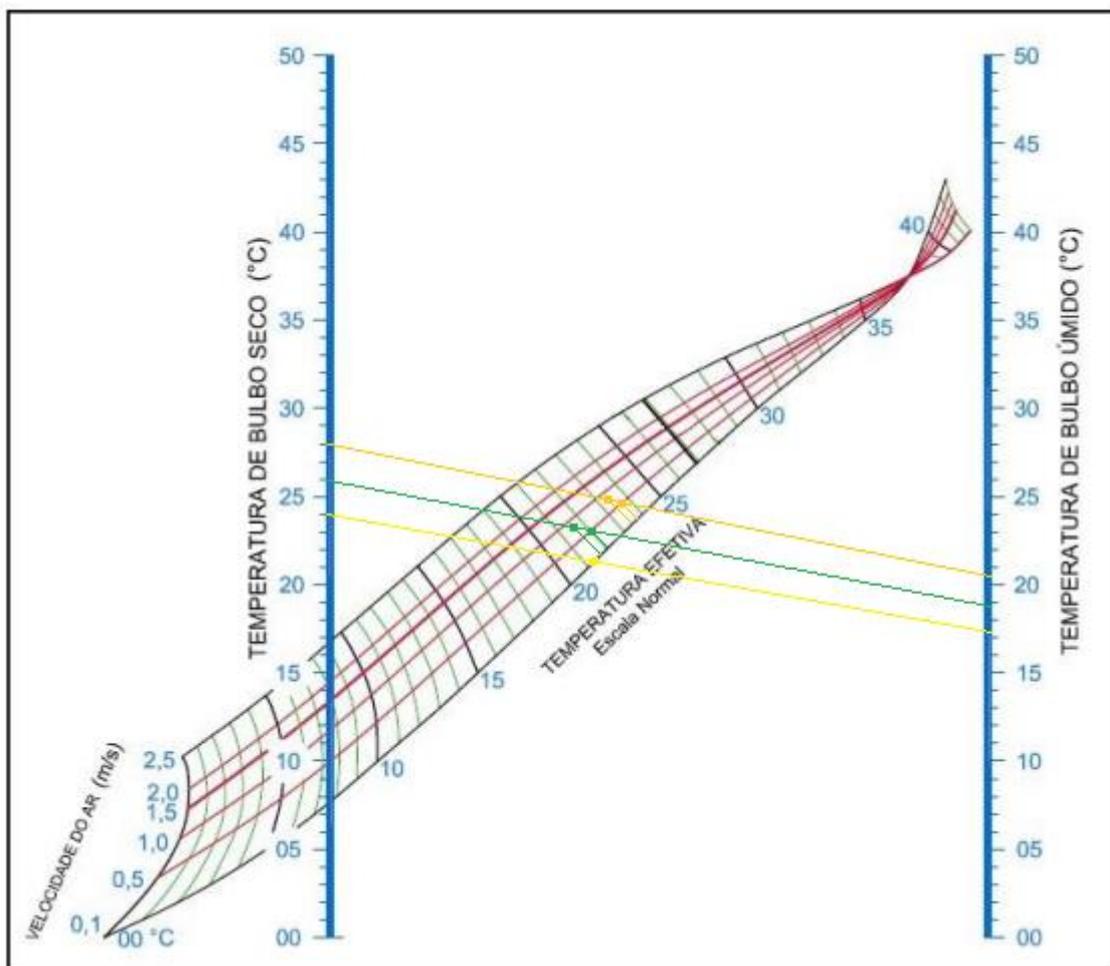
Schedule	Função de Ocupação	Tipo de Programação
Office Lights	Luzes Internas	Fração
Office Equipment	Equipamentos Internos	Fração
Infiltration	Infiltração	Fração
Always On	Ligado	Fração
Always Off	Desligado	Fração
Heating Setpoint	Controle de Aquecimento	Temperatura
Cooling Setpoint	Controle de Resfriamento	Temperatura
Ventilation Setpoint	Controle da Ventilação	Temperatura
Office Activity	Atividade dos Ocupantes	Número
Office Clothing	Vestuário dos Ocupantes	Número
Hours of Operation	Horários de Funcionamento	Ligado/Desligado

Fonte: elaborado pelo autor.

3.7 Cenários Estudados

Para avaliar a eficiência energética do sistema de ar condicionado com ventiladores pessoais, mantendo o conforto térmico, foram propostas diferentes condições. Os parâmetros variados foram a temperatura de bulbo seco e a velocidade de deslocamento do ar, enquanto a umidade relativa foi fixada em todas as condições, as quais estão descritas na Tabela 3. Os valores de temperatura efetiva resultantes foram obtidos através do diagrama de temperatura efetiva com a entrada das variáveis, mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Gráfico da escala da temperatura efetiva



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 3 – Condições do ambiente para análise

Condição	Temperatura Bulbo Seco (°C)	Umidade Relativa (%)	Temperatura Bulbo Úmido (°C)	Velocidade do Ar (m/s)	Temperatura Efetiva (°C)
01	24	50	17,1	0,1	21,3
02	26	50	18,7	0,5	22
03	26	50	18,7	0,8	21,7
04	28	50	20,4	0,5	23,7
05	28	50	20,4	0,8	23,4

Fonte: elaborado pelo autor.

A primeira condição considerou os padrões da norma regulamentadora nº 17 (2018), considerando o ambiente mantido a temperatura fixa de 24 °C. Nesta análise foi simulada a climatização do ambiente utilizando apenas o aparelho de ar condicionado.

Em todas as condições seguintes foi adicionado o uso dos ventiladores pessoais, para se obter uma zona de conforto com velocidade de ar elevada, utilizando os dados da ASHRAE 55 (2017), que estipula intervalos de 0,2 à 0,8 m/s na velocidade de deslocamento do ar.

Já a segunda condição teve sua temperatura de bulbo seco alterada para 26 °C e com a inserção dos ventiladores se obteve uma velocidade de deslocamento do ar para 0,5 m/s. Na terceira condição foi mantida a mesma temperatura anterior, porém empregando uma velocidade 0,8 m/s, buscando se obter um melhor resultado da temperatura efetiva utilizando o limite máximo de velocidade. Por fim, as duas últimas condições tiveram um acréscimo de temperatura para 28 °C, utilizando as velocidades de 0,5 e 0,8 m/s para as respectivas condições.

3.8 Variáveis de Saída

Os resultados das simulações foram obtidos através de dois relatórios disponibilizados pelo EnergyPlus: o Tabular Output Report e o Output Variable.

O arquivo Tabular Output Report é fornecido no formato “HTML” e apresenta um resumo dos valores anuais de desempenho da edificação, incluindo o detalhamento do consumo de energia elétrica (iluminação, equipamentos elétricos,

sistema de refrigeração, aquecimento e ventilação), desempenho energético do condicionador de ar (capacidade, potência elétrica).

Já o Output Variable permite que seja montado um relatório com as variáveis que se deseja analisar. O relatório é fornecido ao final da simulação, no formato “CSV”, e apresentam os valores obtidos para as 8.760 horas da simulação.

Para este estudo como há cinco cenários para comparação, foram solicitados para análise dados como temperatura de bulbo seco externa e interna, temperatura operativa do ambiente interno, consumo de energia elétrica e capacidade total de refrigeração, capacidades sensível e latente do condicionador de ar e a fração de tempo de operação do compressor e do ventilador.

3.9 Voto Médio Predito (PMV)

O método PMV de Fanger foi utilizado para avaliar o conforto térmico nas condições onde a velocidade média do ar era superior a 0,2 m/s, velocidade de ar mínima para ser considerada uma zona de conforto com velocidade de ar elevada, conforme ASHRAE 55 (2017). Foi desenvolvida uma planilha eletrônica com as equações do cálculo PMV, utilizando os dados de todas as simulações propostas para o ambiente.

A norma limita que a vestimenta dos ocupantes tenha intervalos de 0,5 e 1,5 clo. Para simulação, se tratando de um escritório de engenharia, foi definido trajes sociais, com valores de 0,63 clo, conforme Tabela 4. Os valores obtidos pelo método do PMV serão apresentados no capítulo 4.

Tabela 4 – Valores de clo

Roupas	Valores de clo
Roupa íntima	0,04
Sapatos	0,02
Meias finas	0,02
Camisa de manga comprida	0,25
Calça social	0,15
Cadeira executiva	0,15
<i>Total</i>	<i>0,63</i>

Fonte: adaptado de ASHRAE 55, 2017.

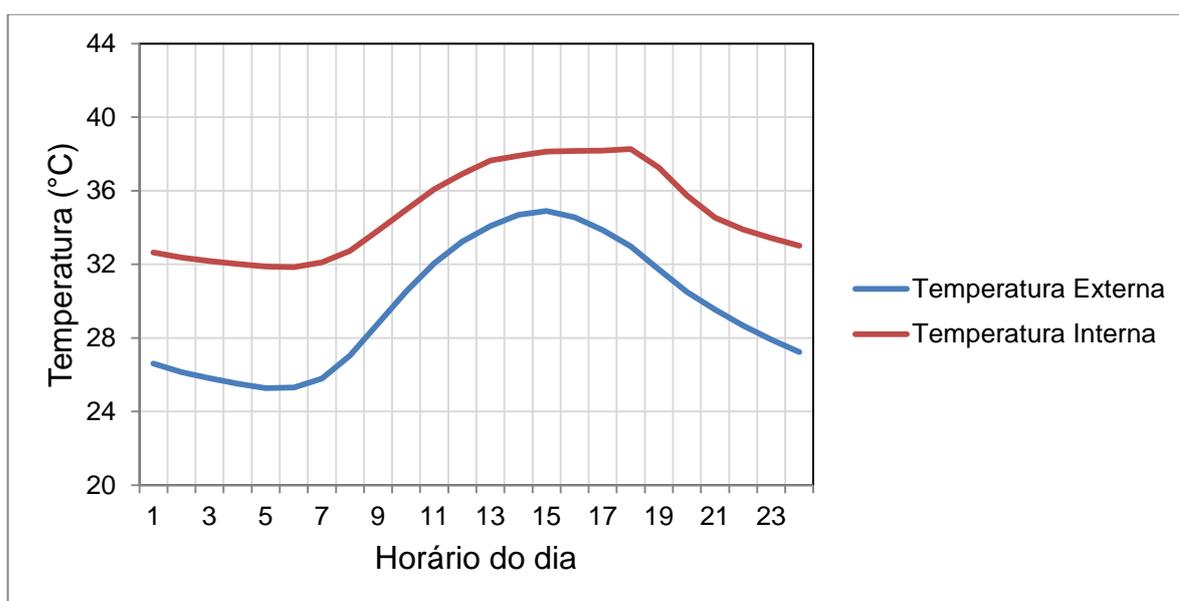
4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através da simulação para as condições propostas anteriormente. O período de análise contemplou os 365 dias de um ano.

4.1 Temperaturas Externas x Temperaturas Internas

Para avaliar os aumentos de temperatura interna do ambiente em relação à temperatura externa, não foram considerados o funcionamento dos equipamentos de refrigeração e de ventilação, bem como as janelas foram consideradas não operativas para abertura. Assim, como em todas as edificações, o calor externo atua em forma de calor sensível e latente, fazendo com que este seja armazenado em suas superfícies. Desta maneira é possível observar junto à Figura 20, que ocorreram pontos em que a máxima temperatura externa não coincidiu com o mesmo horário em que foi obtida a máxima temperatura interna na zona, mesmo com o acréscimo das cargas internas do ambiente. Esta variação ocorreu devido à localização da edificação, a qual tem o norte geográfico direcionado para a lateral com maior superfície de exposição solar, sem qualquer sombreamento, resultando em uma maior carga térmica.

Figura 20 – Gráfico da temperatura externa x temperatura interna



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 20 mostra a curva de comportamento da temperatura exterior e da temperatura interior da zona em análise para o dia de projeto de verão, a qual é utilizada para dimensionar o sistema de climatização. É possível observar que o pico de temperatura externa ocorreu próximo as 15 h, diferente do pico máximo da temperatura interna que ocorreu próximo das 18 h. Sendo este segundo, o ponto crítico, equivalente a maior carga térmica em um dia de projeto de verão. Conforme a ANEEL, este horário também acarreta um maior custo de energia, na qual considera os horários entre 18 e 21 h como período de ponta, o mais caro cobrado pela distribuidora.

4.2 Sistema de Climatização do Tipo Split

Determinar a carga térmica interna é necessário para o dimensionamento do sistema de climatização, como referido no capítulo 4.1. No EnergyPlus, após definido o modelo PTHP e utilizando o modo de “*autozise*”, o software fornece a capacidade ideal do equipamento de ar condicionado a ser utilizado, com base na máxima temperatura interna no ambiente, os resultados obtidos estão representados na Tabela 5.

Tabela 5 - Capacidade ideal do equipamento de ar condicionado

	Tipo	Capacidade Total Nominal (W)	Capacidade Sensível Nominal (W)	Capacidade Latente Nominal (W)	Fator de Calor Sensível	Eficiência (W/W)
PTHP	Serpentina de Resfriamento	6261,40	4463,22	1798,18	0,71	3,00

Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados nominais obtidos utilizaram como base o termostato definido em 24 °C, obtiveram 6261,40 W de potência de resfriamento, sendo 4463,22 W destinados a suprir o calor sensível e 1798,18 W para suprir o calor latente.

4.2 Ventiladores Pessoais

Os equipamentos destinados a promover o aumento da velocidade de deslocamento do ar são microventiladores do tipo axiais, e seus dados estão descritos na Tabela 6, sendo selecionados para atender as velocidades propostas de 0,5 e 0,8 m/s.

Tabela 6 - Capacidade do equipamento de ventilação

	Tipo	Potência Nominal (W)	Vazão (m³/h)	Rotação (rpm)	Eficiência (W/W)	Tensão (V)
Axial Mod.3800	Ø90mm Compacto	8	54	1900	0,65	115
Axial Mod.3600	Ø90mm Compacto	11	89	3100	0,65	115

Fonte: elaborado pelo autor.

Estes equipamentos selecionados são fabricados pela empresa *ebmpapst*, são extremamente finos graças à economia de espaço gerada pelo seu motor integrado e possuem baixo consumo energético, as demais características técnicas dos ventiladores são apresentadas no Anexo A. Serão inseridos ao levantamento total de consumo do ambiente, com a finalidade de economia na climatização.

4.3 Consumo de Energia Elétrica

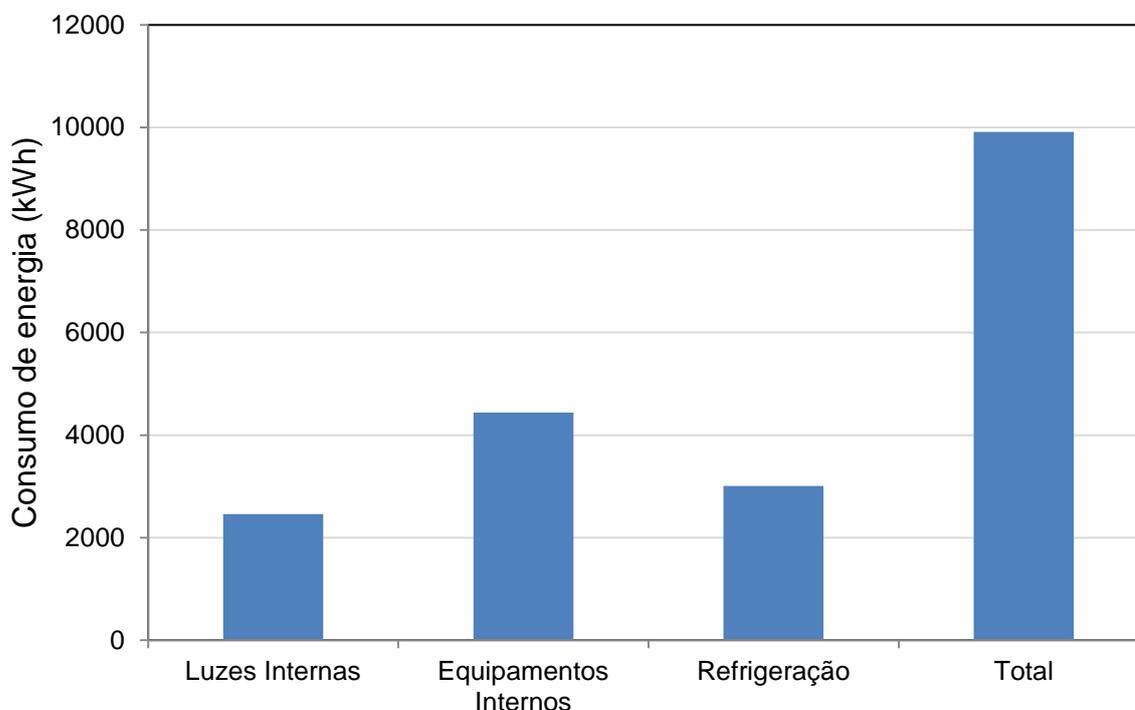
Para se obter um padrão de comparação, foi calculado o consumo energético anual do ambiente de estudo nas diversas condições propostas. Os valores foram obtidos da simulação do EnergyPlus e posteriormente avaliadas a influências que estas alterações resultariam no conforto térmico dos ocupantes, as quais estão descritas na sequência.

4.3.1 Condição 1

Para a climatização da condição 1 do ambiente, como descrito no item 3.7, foi utilizado apenas ar condicionado operando com o termostato fixado em 24 °C. Assim o equipamento somente estará funcionando quando a temperatura do ambiente

estiver acima do *setpoint*. A seguir a Figura 21 ilustra o comportamento energético do ambiente, ou seja, o consumo anual de energia elétrica para os equipamentos internos assumidos, iluminação interna e o sistema de ar condicionado.

Figura 21 – Gráfico do consumo de energia anual para condição 1

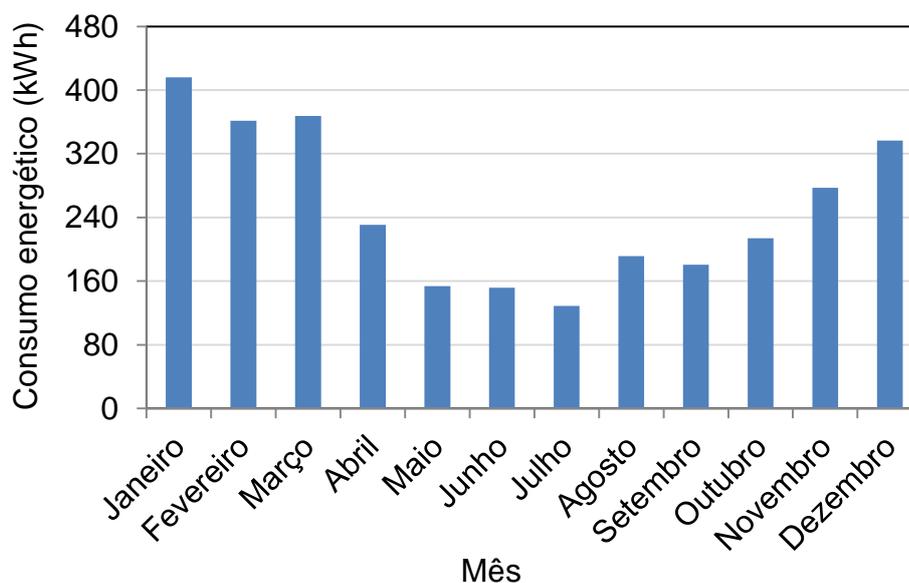


Fonte: elaborado pelo autor.

O consumo energético do ambiente durante o ano de análise teve valor total no valor de 9912,19 kWh. A maior parte deste consumo foi proveniente dos equipamentos internos com 4441,99 kWh, seguido pela refrigeração com 3009,80 kWh e pela iluminação interna com 2460,40 kWh.

Este consumo anual se dá pela característica da edificação durante o período e é coerente com a sua ocupação. O modo de utilização são os dados inseridos dos equipamentos e os horários de ocupação definidos. Para melhor entender o comportamento do consumo de energia elétrica, a Figura 22 ilustra o comportamento mensal.

Figura 22 – Gráfico do consumo elétrico mensal de refrigeração



Fonte: elaborado pelo autor.

O sistema de refrigeração opera na maior parte durante o mês de janeiro, por causa do maior índice de temperaturas elevadas neste período. Percebe-se que durante os meses de maio a setembro, a necessidade de refrigeração se torna significativamente menor, mas ainda é necessária devido à geração de cargas térmicas internas.

Para avaliar o conforto térmico que esta condição proporciona aos ocupantes, realizou-se o cálculo do PMV e do PPD. Com os valores de entrada inseridos na planilha eletrônica, foi possível obter os resultados mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – PMV e PPD para condição 1

PMV	PPD (%)	Sensação (°C)
0,07	5	Neutro

Fonte: elaborado pelo autor.

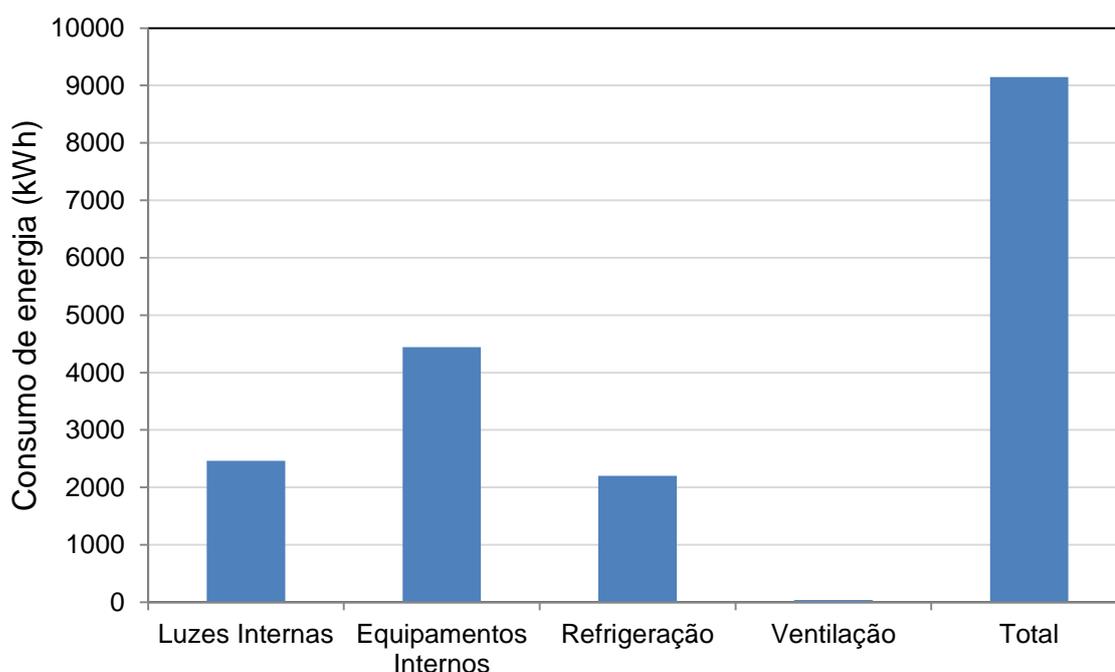
O valor obtido do PMV como está muito próximo de zero, sendo este o ponto de referência para classificação como neutro. Pode-se classificar esta condição como ótima, na qual apenas 5% dos ocupantes podem vir a sentir algum desconforto em relação à temperatura interna.

4.3.2 Condição 2

Para a climatização na condição 2 é utilizado o ar condicionado operando com o termostato fixado em 26 °C em conjunto com os ventiladores pessoais que promovem uma velocidade do ar de 0,5 m/s. Foi ajustado o funcionamento destes ventiladores para operarem quando a temperatura do ambiente for superior a 24 °C e para que o ar condicionado só atue quando a temperatura ultrapassar os 26 °C, para que não gere um precedente desconforto.

A Figura 23 ilustra o consumo anual dos equipamentos internos, para a iluminação interna, para o sistema de ar condicionado e para os ventiladores que estão em utilização.

Figura 23 – Consumo de energia anual para condição 2



Fonte: elaborado pelo autor.

O consumo energético anual total do ambiente referente à condição 2 foi de 9145,11 kWh, tendo como a maior parte deste consumo os equipamentos internos com 4441,99 kWh, seguido pela iluminação interna com 2460,40 kWh, pela refrigeração com 2203,75 kWh e pela ventilação com 38,97 kWh.

Nesta ocasião, a configuração de refrigeração proposta já demonstrou economia de energia, deixando de ser o segundo maior consumidor anual do ambiente, quando comparado à condição 1. Alterando o termostato de operação do

sistema de ar condicionado com a adição de 2 °C, obteve-se 806,05 kWh de redução no consumo de energia durante um ano de operação. Já o acréscimo de energia gerado pela adição de equipamentos de ventilação representou apenas 38,97 kWh, aproximadamente 0,004% do montante total.

Para esta condição também foi realizado o cálculo do PMV e do PPD, mostrados na Tabela 8, para avaliar se a condição simulada proporcionou algum desconforto entre os ocupantes.

Tabela 8 – PMV e PPD para condição 2

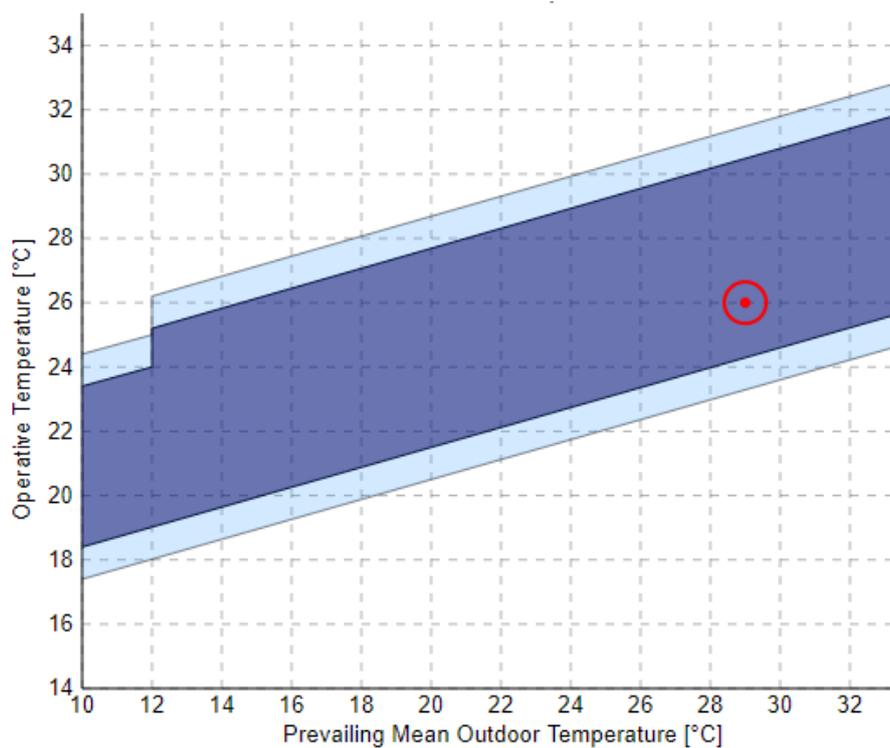
PMV	PPD (%)	Classificação	Efeito de Refrigeração (°C)	Sensação Térmica (°C)
-0,10	5	Neutro	2,6	23,4

Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando os resultados, o mesmo se manteve novamente próximo de zero e com a mesma porcentagem de pessoas insatisfeitas. A ventilação foi de extrema importância para esta condição, tratou-se de proporcionar um efeito de refrigeração de 2,6 °C aos ocupantes, atingindo a sensação térmica de 23,4 °C.

Com a adição dos ventiladores o ambiente passou a ser classificado como uma zona com deslocamento de ar elevada, sendo necessária também uma avaliação pelo método adaptativo conforme, Figura 24. Através desta figura é possível avaliar que os valores obtidos tiveram aceitação de 90% dos ocupantes e o ambiente é classificado como confortável porque está na faixa de temperatura de 23,3 a 31,9 °C.

Figura 24 – Gráfico adaptativo para condição 2

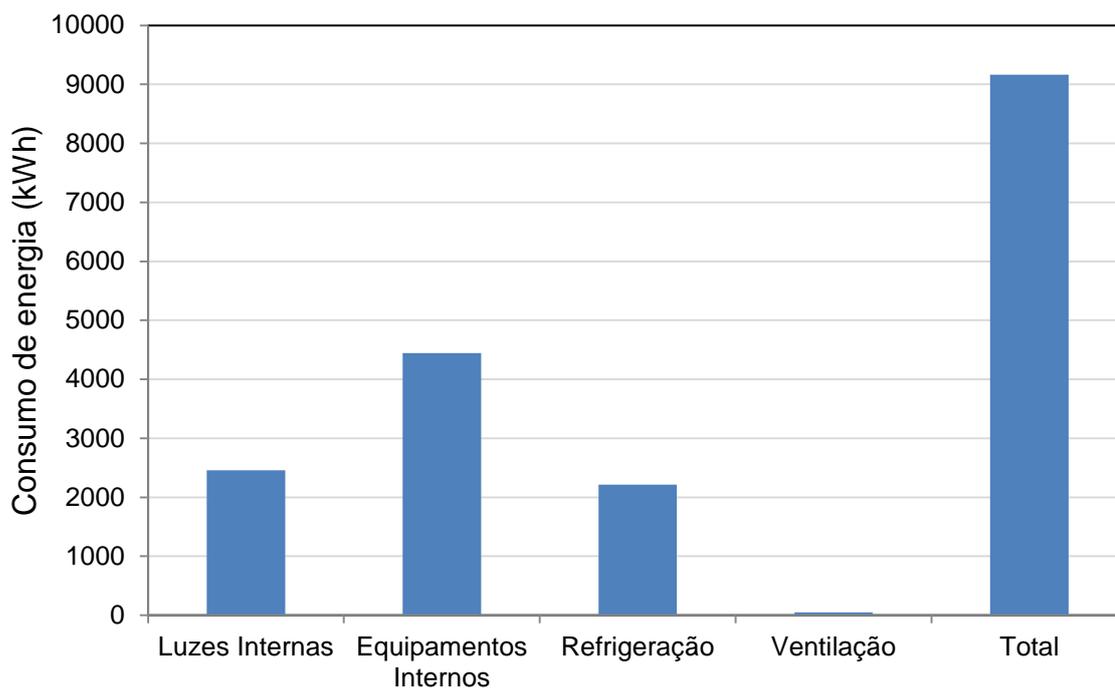


Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.3.3 Condição 3

Nesta condição é utilizado o ar condicionado operando com o mesmo valor de termostato de 26 °C da condição anterior, porém com alteração dos equipamentos de ventilação para o modelo que é capaz de promover a velocidade de deslocamento do ar para 0,8 m/s. O funcionamento programado foi mantido igual à condição 2, para que fosse possível avaliar a influência deste aumento de velocidade para as mesmas temperaturas definidas. Assim a Figura 25 apresenta os valores obtidos de consumo energético para os equipamentos utilizados.

Figura 25 – Consumo de energia anual para condição 3



Fonte: elaborado pelo autor.

O consumo energético anual do ambiente referente à condição 3 foi de total de 9163,63 kWh, tendo como a maior parte deste consumo os equipamentos internos, com 4441,99 kWh, seguido pela iluminação interna com 2460,40 kWh, pela refrigeração com 2211,73 kWh e por último a ventilação com 49,51 kWh.

Nesta ocasião a refrigeração apresentou um pequeno aumento no consumo de energia se comparado à condição 2, porque a adição de motores mais potentes para promover a velocidade de 0,8 m/s gerou uma maior carga térmica interna, estes equipamentos também consomem mais energia para o mesmo período de trabalho.

Para este caso se torna mais relevante o cálculo do PMV e do PPD para a avaliação da influência deste aumento na velocidade de deslocamento de ar, já que não se obteve redução do consumo de energia nesta condição, sendo os valores obtidos apresentados na Tabela 9.

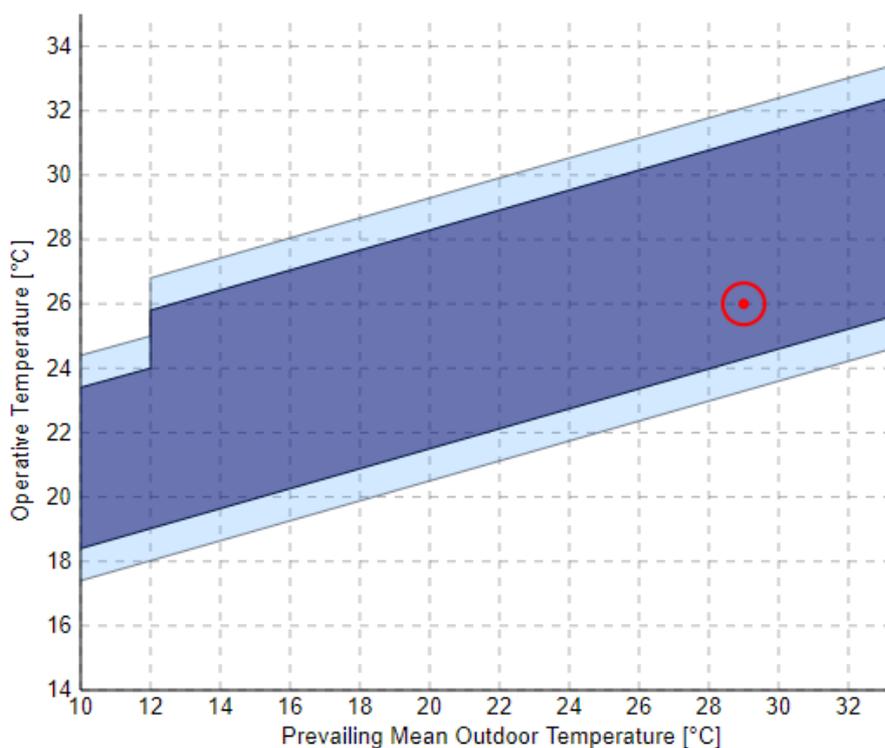
Tabela 9 – PMV e PPD para condição 3

PMV	PPD (%)	Classificação	Efeito de Refrigeração (°C)	Sensação Térmica (°C)
-0,30	7	Neutro	3,4	22,6

Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando os valores obtidos, compreende-se que o resultado novamente se aproximou de zero, mas a porcentagem de pessoas insatisfeitas teve um aumento para 7%. O fato de um maior número de pessoas se sentirem desconfortáveis ocorreu em função dos 22,6 °C de sensação térmica proporcionada por esta velocidade, tornando um ambiente mais frio para alguns ocupantes. A avaliação pelo método adaptativo foi realizada e está representado na Figura 26.

Figura 26 – Gráfico adaptativo para condição 3



Fonte: elaborado pelo autor.

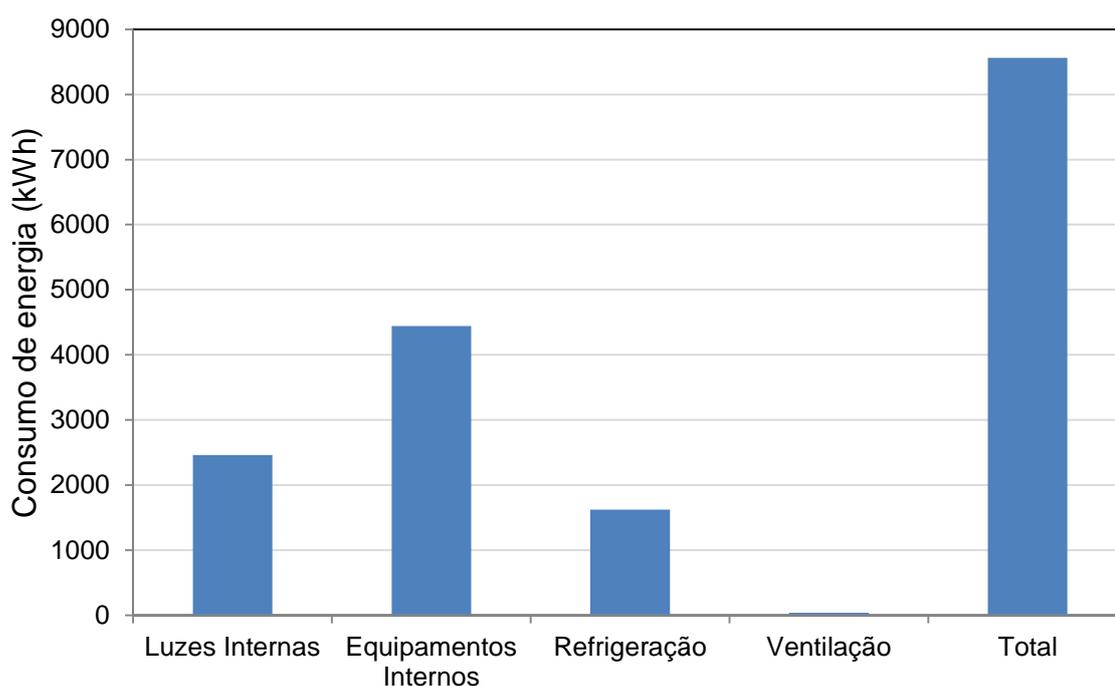
Através desta figura é possível avaliar que os valores obtidos estão dentro da faixa de aceitação de 90% e o ambiente é classificado como confortável porque está na faixa de 23,3 a 32,1 °C. Tratando-se de conforto térmico adaptativo, todo ocupante tem a disponibilidade de ajustar sua vestimenta caso sinta algum desconforto prejudicial.

4.3.4 Condição 4

Nesta condição foi alterado o termostato do ar condicionado para operar com 28 °C e utilizados os equipamentos de ventilação que promovem a velocidade de deslocamento do ar de 0,5 m/s. Foi ajustado o funcionamento destes ventiladores para operarem quando a temperatura do ambiente for superior a 24 °C e para que o ar condicionado só atue quando a temperatura ultrapassar os 28 °C, para que não gere um precedente desconforto.

Com este funcionamento programado será possível avaliar junto à condição 2, que utiliza o mesmo modelo de ventilador, a influência que a temperatura proporciona para mesma vazão de ar. A Figura 27 mostra os valores obtidos de consumo energético dos equipamentos definidos.

Figura 27 – Consumo de energia anual para condição 4



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O consumo energético anual total do ambiente referente à condição 4 foi de 8562,89 kWh, tendo como a maior parte deste consumo os equipamentos internos com 4441,99 kWh, seguido pela iluminação interna com 2460,40 kWh, pela refrigeração com 1621,53 kWh e por último a ventilação, com 38,97 kWh.

Nesta ocasião, a refrigeração apresentou menor consumo de energia frente às demais condições. Especificamente comparando com a condição 2, a qual apresenta o mesmo equipamento de ventilação, porém com o ar condicionado utilizando um termostato de menor temperatura, a economia desta condição chegou aos 582,22 kWh. Já em comparação com a condição 1, onde não se faz uso de ventiladores pessoais, utilizando apenas o ar condicionado operando em 24 °C, a economia de energia foi de 1349,3 kWh.

Os valores obtidos nos cálculos do PMV e do PPD são apresentados na Tabela 10.

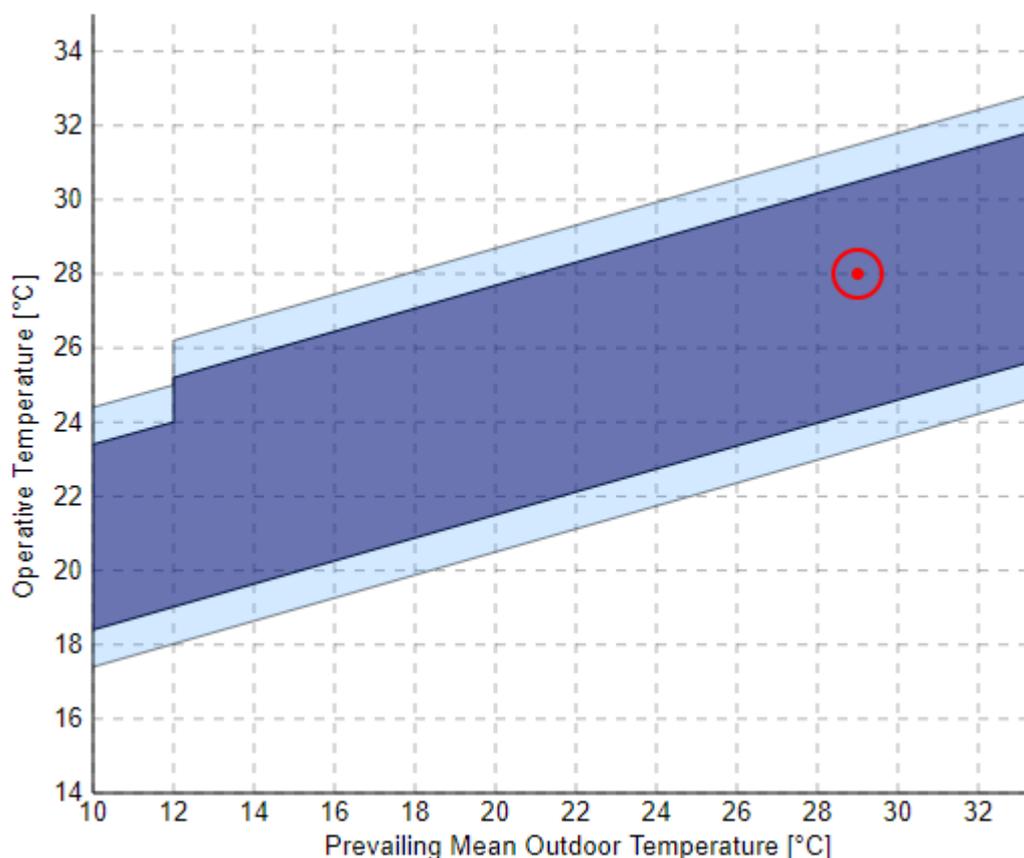
Tabela 10 – PMV e PPD para condição 4

PMV	PPD (%)	Classificação	Efeito de Refrigeração (°C)	Sensação Térmica (°C)
0,42	9	Neutro	2,7	25,3

Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando estes resultados, compreende-se que o valor obtido foi novamente próximo de zero, mas a porcentagem de pessoas insatisfeitas teve um aumento para 9%, decorrentes de um maior número de pessoas se sentirem desconfortáveis pelo baixo efeito de refrigeração, sendo de 2,7 °C, propiciando sensação térmica de 25,3 °C. Manteve sua classificação geral como neutro, mas esta condição pode ser considerada, por alguns ocupantes, como uma zona desconfortável devido ao calor. A avaliação pelo método adaptativo também foi realizada e está representado na Figura 28.

Figura 28 – Gráfico adaptativo para condição 4



Fonte: Elaborado pelo Autor.

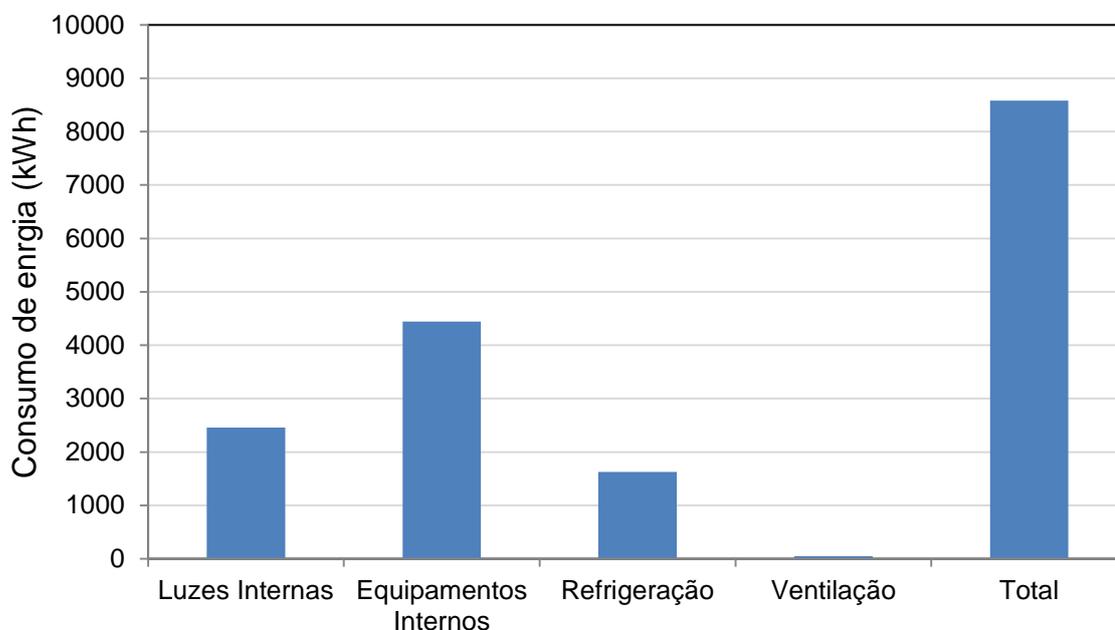
Através desta figura é possível avaliar que os resultados estão localizados dentro da faixa de aceitação de 90% e o ambiente é classificado como confortável porque está na faixa de 23,3 a 31,9 °C. Como está sendo utilizado o conforto térmico adaptativo, todo ocupante tem a disponibilidade de ajustar sua vestimenta caso sinta algum desconforto.

4.3.5 Condição 5

Nesta condição foi mantido o termostato do ar condicionado fixado em 28 °C e alterado os equipamentos de ventilação que promovem a velocidade de deslocamento do ar para 0,8 m/s. Foi mantido o funcionamento destes ventiladores para operarem quando a temperatura do ambiente for superior a 24 °C e para que o ar condicionado só atue quando a temperatura ultrapassar os 28 °C.

Desta maneira será possível avaliar a influência que uma elevada velocidade de ar proporciona em temperaturas mais altas. A Figura 29 mostra o consumo energético anual obtido pelo uso dos equipamentos definidos.

Figura 29 – Consumo de energia anual para condição 5



Fonte: elaborado pelo autor.

O consumo energético anual do ambiente referente à condição 5 foi de 8581,41 kWh, tendo como a maior parte deste consumo os equipamentos internos com 4441,99 kWh, seguido pela iluminação interna com 2460,40 kWh, pela refrigeração com 1629,51 kWh e por último a ventilação com 49,51 kWh.

Nesta ocasião a refrigeração não se manteve com o menor consumo, porque foi utilizado o equipamento de ventilação mais potente. Os valores obtidos nos cálculos do PMV e PPD são apresentados na Tabela 11.

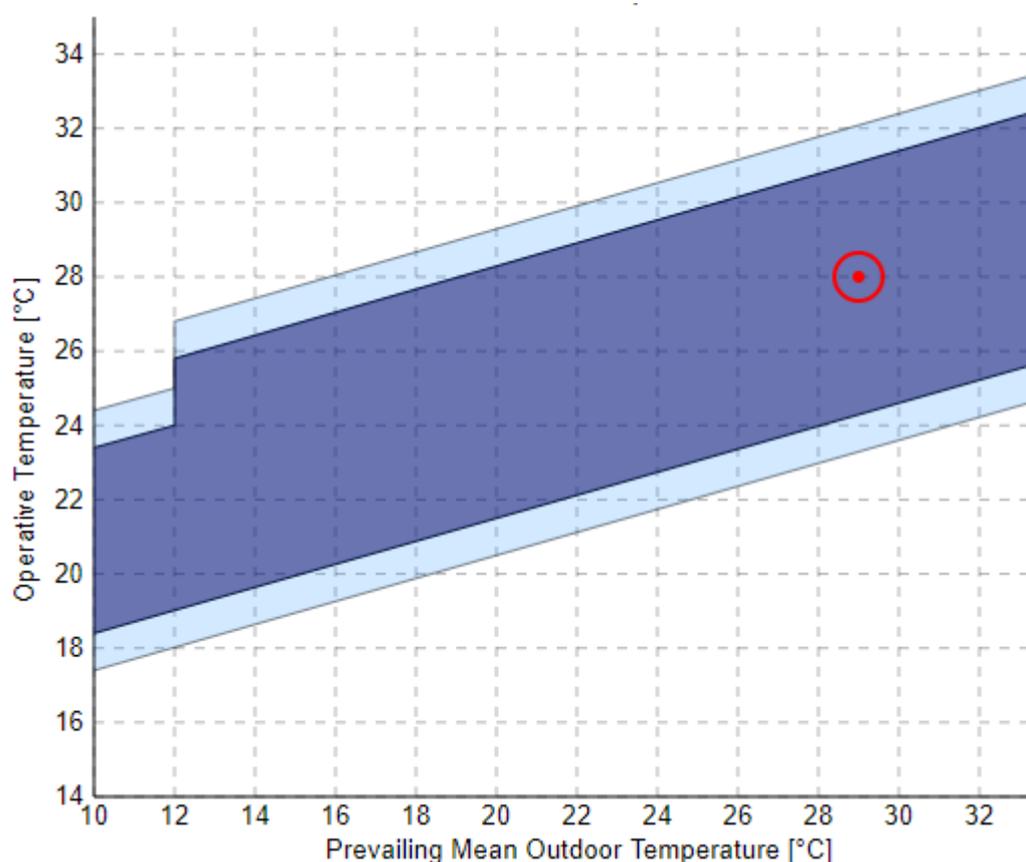
Tabela 11 – PMV e PPD para condição 5

PMV	PPD (%)	Classificação	Efeito de Refrigeração (°C)	Sensação Térmica (°C)
0,22	6	Neutro	3,4	24,6

Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando os resultados, mais uma vez o valor obtido foi próximo de zero, mas a porcentagem de pessoas insatisfeitas teve uma redução para 6%. Esta diminuição de pessoas insatisfeitas foi promovida pelo aumento do efeito de refrigeração proporcionado por utilizar de uma velocidade de deslocamento de ar maior que a condição anterior. A condição simulada 5 manteve sua classificação como neutro, apresentando uma sensação térmica satisfatória. A avaliação pelo método adaptativo foi realizada para esta condição e está representada na Figura 30.

Figura 30 – Gráfico adaptativo para condição 5



Fonte: elaborado pelo autor.

Com esta figura é possível observar que os resultados do conforto adaptativo estão localizados dentro da faixa de aceitação de 90% dos ocupantes do ambiente, classificando-se como confortável porque apresenta seus valores entres os limites aceitáveis de 23,3 a 32,1 °C.

4.4 Potencial de Escolha

Com as análises realizadas foi possível identificar, conforme o esperado, que os meses com as maiores médias de temperaturas são aqueles que representam o maior consumo de energia, pois exige mais demanda do sistema de refrigeração. Visto que com a utilização dos ventiladores pessoais em conjunto com o ar condicionado é possível de se obter reduções no consumo de energia em diversas condições, sem interferir no conforto térmico, se torna necessário identificar a condição que apresenta os melhores potenciais. A Tabela 12 apresenta de forma simplificada os valores mais representativos entre as condições analisadas.

Tabela 12 – Comparativo entre as condições propostas

Condição	Temperatura do termostato (°C)	Velocidade do ar (m/s)	Consumo refrigeração (kWh)	Consumo ventilação (kWh)	Sensação térmica (°C)
1	24	0,1	3009,80	-	24
2	26	0,5	2203,75	38,97	23,4
3	26	0,8	2211,73	49,51	22,6
4	28	0,5	1621,53	38,97	25,3
5	28	0,8	1629,51	49,51	24,6

Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando estes resultados, a condição 1 que utiliza a menor temperatura do termostato foi a que obteve o maior consumo de energia por parte da refrigeração, a qual teve de atuar de forma mais contínua para atender a carga térmica, já que não utiliza dos equipamentos de ventilação pessoal.

As condições 2 e 3 que tiveram seus *setpoints* elevados para 26 °C, obtiveram uma economia de aproximadamente 26% para refrigeração comparando com a condição anterior. Esta economia já seria possível sem a utilização dos equipamentos de ventilação por que a temperatura definida está dentro do limite máximo segundo os padrões normativos de conforto térmico, como está utilizando do valor limite já poderia causar desconforto em alguns ocupantes. Optou-se por

acrescentar os ventiladores pessoais já nestas condições, buscando a sensação térmica que é obtida com o deslocamento do ar em velocidades mais elevadas, porque estes equipamentos não apresentam valores significativos sobre o consumo de energia total do ambiente. Vale ressaltar que a condição 3, que utiliza a velocidade de 0,8 m/s foi a que resultou em uma menor sensação térmica entre as demais.

As condições 4 e 5 que utilizam a temperatura de *setpoint* definida em 28 °C, esta temperatura é considerada acima dos limites ideais de conforto térmico, mas é passível de utilização com o uso dos ventiladores pessoais. Assim a economia frente à condição 1 chegou em aproximadamente 45%, confirmando com clareza o benefício da utilização dos equipamentos de ventilação pessoal, que foram capazes de contribuir para que a sensação térmica obtida, de 25,3 e 24,6 °C respectivamente, atingissem as condições ideais de conforto para os ocupantes do ambiente. Para todas as condições, foi possível observar que o consumo de energia elétrica segue a variação de temperatura, conforme o aumento do *setpoint*, menor é o seu consumo.

Para justificar com mais ênfase esta economia que o uso dos ventiladores pessoais proporciona, foi utilizado somente o dia de projeto e reajustando o termostato conforme as demais condições, onde foi possível recalcular a capacidade ideal do equipamento de ar condicionado a ser utilizado, representados na Tabela 13.

Tabela 13 – Reajuste da capacidade ideal do equipamento de ar condicionado

Tipo	Temperatura de Termostato (°C)	Capacidade Total Nominal (W)	Capacidade Sensível Nominal (W)	Capacidade Latente Nominal (W)	Taxa de Calor Sensível	Eficiência (W/W)
PTHP	26	5180,36	3616,32	1564,04	0,70	3,00
PTHP	28	4185,24	2921,65	1263,59	0,70	3,00

Fonte: elaborado pelo autor.

Com este reajuste, a capacidade total do equipamento foi reduzida de 6261,04 W da condição prevista, para 5180,36 W utilizando o termostato em 26 °C e para 4185,24 W para o termostato fixado em 28°C. Além da economia de energia, é

possível se obter uma economia na aquisição do equipamento de climatização. Por que estes sistemas de condicionamento de ar são dimensionados para suportar a maior carga total esperada em condições extremas, por isso utilizam o dia de projeto para dimensionar a capacidade ideal. Os compressores e condensadores são posteriormente escolhidos para atender esta capacidade máxima necessária. Utilizando a função *Run Time Fraction* é possível avaliar o percentual do tempo que o sistema realmente está em operação para atender a carga de refrigeração total que está sendo demandada pelo ambiente, no qual apresentou funcionamento em carga reduzida por aproximadamente 97% do tempo que o sistema está ligado, e os compressores de velocidade fixa devem ser ciclados para tentar alcançar a carga, seu consumo de energia é maior do que o necessário para atingir os requerimentos do sistema.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentada uma análise comparativa entre cinco condições distintas, para avaliar a eficiência energética de equipamentos de ar condicionado em ambientes com ventiladores pessoais, buscando manter as mesmas condições de conforto térmico. As condições avaliadas tiveram como variáveis as temperaturas de termostato de funcionamento do ar condicionado e as velocidades disponíveis pelos equipamentos de ventilação individual. Por meio da utilização do *software de simulação computacional EnergyPlus*, foi possível obter os resultados de eficiência energética destes equipamentos e posteriormente realizadas as análises das condições de conforto térmico utilizando os métodos de PMV, PPD e adaptativo.

Analisando os resultados obtidos identificou-se que os meses nos quais apresentavam as maiores temperaturas, eram os mesmos que indicam o maior índice de consumo energético. Sendo o responsável por esta variação o sistema de climatização, que nestes meses apresentou um número maior nas horas de funcionamento para atender a carga térmica do ambiente, já os demais equipamentos apresentam pouca variação em seu consumo durante o ano.

O equipamento de ar condicionado dimensionado pelo EnergyPlus atende a capacidade máxima necessária para o dia de projeto de verão. Logo, é válido afirmar que os resultados obtidos para capacidade do sistema de climatização se encontram superdimensionados para a maior parte de seu funcionamento, onde o sistema está ligado e está atuando com carga reduzida. Os compressores de velocidade fixa devem ser ciclados para alcançar esta carga, desta forma seu consumo de energia é maior do que o necessário para atingir os requerimentos do sistema. Esta necessidade de um maior número de ciclagens se torna uma desvantagem para a refrigeração, pois reduz a vida útil dos compressores.

Conforme a comparação realizada dos cenários estudados, compreende-se que a condição 1 foi a que apresentou o maior consumo de energia, pois só utilizava o ar condicionado para o controle do ambiente, o qual era programado para 24°C. Já nas condições 2 e 3 que tiveram um aumento do termostato para 26 °C é possível observar a economia de energia associada a refrigeração, e que as cargas térmicas provenientes dos ventiladores foram extremamente baixos. Para as condições 04 e 05 que utilizaram do termostato fixado em 28 °C em conjunto com a utilização dos

ventiladores pessoais, foi possível obter a maior economia de energia entre todos os casos anteriores e ainda atender às temperaturas definidas como aceitáveis para o conforto térmico segundo a ASHRAE (2017).

Após a comparação de todas estas condições propostas para o mesmo ambiente, mantendo aceitáveis os parâmetros de conforto térmico, é possível compreender com clareza que a temperatura de termostato da refrigeração é a responsável por resultar na economia de energia. Em todos os casos em que se elevou esta temperatura, os valores obtidos para o consumo de energia obtiveram uma redução significativa, o que contribuiu para obtenção de bons resultados. Porém, somente elevando a temperatura ocasionaria em desconforto nos ocupantes.

Juntamente com a utilização dos ventiladores pessoais é possível manter o controle do termostato com valores mais elevados, porque a ventilação é capaz de propiciar um efeito de refrigeração com o deslocamento do ar em velocidade elevada, o que favorece a transferência de calor através da pele, de modo a eliminar o excesso de calor produzido pelo corpo ou adquirido pelo mesmo em consequência do calor proveniente do ambiente.

Por fim, como sugestão para trabalhos futuros, pode ser avaliada a influência que a umidade relativa pode proporcionar em um ambiente com equipamentos de ar condicionado e ventiladores pessoais, bem como a utilização de velocidades mais elevadas. Sendo possível, também analisar a eficiência do isolamento térmico das paredes e janelas, para diminuir os ganhos de calor interno envolvidos no sistema.

REFERÊNCIAS

ABESCO, Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia. **O que é Eficiência Energética?**. Disponível em: <<http://www.abesco.com.br/pt/o-que-e-eficiencia-energetica-ee/>>. Acesso em: março, 2019.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16401-1 – Instalações de ar condicionado – sistemas centrais e unitários**: Parte 1: projetos das instalações. Rio de Janeiro: ABNT, 2008a.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16401-2 – Instalações de ar condicionado – sistemas centrais e unitários**: Parte 2: parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008b.

ANVISA, Agência Nacional De Vigilância Sanitária. **RE nº9, de 16 de janeiro de 2003**. Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior em Ambientes Climatizados Artificialmente de Uso Público e Coletivo. Disponível em: <http://portal.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RE_09_2003_1.pdf>. Acesso em: junho, 2019.

ASHRAE 55. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 2017.

ASHRAE, **Fundamentals**, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 2017.

ASHRAE. Handbook of Refrigeration. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 2010.

BAKER, N. & STANDEVEN, M. **Thermal comfort for free-running buildings**. Energy and Buildings, volume 23, 1996.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN). **Balanço Energético Nacional - 2019**. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/>> Acesso em: agosto, 2019.

BRAGER, G. & DE DEAR, R. **Thermal adaptation in the built environment: a literature review**. Energy and Buildings, volume 27, 1998.

CAMPANHOLA, Filipe Possatti. **Avaliação de sistemas de condicionamento de ar para salas de prédio público**. Universidade Federal de Santa Maria 2014 25 f. Disponível em <<https://portal.ufsm.br/biblioteca/pesquisa/registro.html;jsessionid=adeb956bd9574a2607b29c916109?idRegistro=430433>> Acesso em: maio, 2019.

CENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre, RS: McGraw-Hill, 2013. XXVIII, 1018 p.

CENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4. ed. Porto Alegre: Amgh, 2012. 903 p.

COSTA, Ennio Cruz da. **Refrigeração**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2013. 322 p.

CREDER, Hélio. **Instalações de ar condicionado**. 6. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2010. XV, 318 p.

DE VECCHI, R.; CÂNDIDO, C.; LAMBERTS, R. **O efeito da utilização de ventiladores de teto no conforto térmico em salas de aulas com condicionamento híbrido em um local de clima quente e úmido**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 13, setembro, 2013. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

EBMPAPST. **Microventiladores Axiais, Modelo 3600**. Disponível em: <https://www.ebmpapst.com.br/pt_br/products/compact-fans/axial_compact_fans/axial_compact_fans_detail.php?pid=53824>. Acesso em: agosto, 2019.

EBMPAPST. **Microventiladores Axiais, Modelo 3800**. Disponível em: <https://www.ebmpapst.com.br/pt_br/products/compact-fans/axial_compact_fans/axial_compact_fans_detail.php?pid=53816>. Acesso em: agosto, 2019.

ELEFANT. **Ábaco de Temperatura Efetiva**. Disponível em: <<https://elefant.com.br/>>. Acesso em: abril, 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço Energético Nacional 2019** – Ano Base 2018. Rio de Janeiro, 2019.

ENERGYPLUS. **Data Sets**, EnergyPlus™ Documentation, Version 9.0.1. Lawrence Berkeley National Laboratory, USA, 2018.

ENERGYPLUS. **Energy Simulation Software, Version 9.0.1**. Disponível em: <<https://energyplus.net/>>. Acesso em: abril, 2019.

ENERGYPLUS. **Engineering Reference**, EnergyPlus™ Documentation, Version 9.0.1. Lawrence Berkeley National Laboratory, USA, 2018.

ENERGYPLUS. **Getting Started with EnergyPlus**™, EnergyPlus™ Documentation, Version 9.0.1. Lawrence Berkeley National Laboratory, USA, 2018.

ENERGYPLUS. **Input and Output References**, EnergyPlus™ Documentation, Version 9.0.1. Lawrence Berkeley National Laboratory, USA, 2018.

FANGER, P. **Thermal Comfort. Analysis and applications in environmental engineering**. Denmark: McGraw-Hill, 1970.

FOUTAIN, M., BRAGER, G. & DE DEAR, R. **Expectations of indoor climate control**. Energy and Buildings, volume 24, 1996.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2014. 694 p.

LABEEE, Laboratorio de Eficiência Energética em Edificações. **Arquivos Climáticos**. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>>. Acesso em: Maio de 2019.

LABEEE, Laboratorio de Eficiência Energética em Edificações. **Eficiência Energética em Edificações**. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/linhas-de-pesquisa/eficiencia-energetica-em-edificacoes>>. Acesso em: março de 2019.

MACINTYRE, Archibald Joseph. **Ventilação Industrial e Controle da Poluição**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 1990, 403 p.

NICOL, F. & HUMPHREYS, M. **Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN 15251**. Building and Environment, 2010.

NR, Norma Regulamentadora Ministério do Trabalho e Emprego. **NR-17 Ergonomia**, 2018.

OMRANI, S.; HANSEN, V.; CAPRA, B.; DROGEMULLER, R. **Effect of natural ventilation mode on thermal comfort and ventilation performance: Full-scale measurement**. Energy and Buildings, Volume 159, dezembro 2017.

OpenStudio. **Aplicativo de modelagem energética, Version 2.8.0**. Disponível em: <<https://www.openstudio.net/>>. Acesso em: abril, 2019.

RUPP, R. F.; DE VECCHI, R.; ASMUS, B. F.; CANDIDO, C. M.; GHISI, E. **Conforto térmico humano em escritórios com sistema central de condicionamento artificial em clima subtropical úmido: estudos de campo vs. abordagem analítica**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 17, março, 2017. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

SILVA, Jesué Graciliano da. **Introdução à tecnologia da refrigeração e da climatização**. São Paulo, SP: Artliber, 2004. 263 p.

SKETCHUP. **Software de Projetos 3D, Version 2019**. Disponível em: <<https://www.sketchup.com/pt-BR>>. Acesso em: abril, 2019.

STOECKER W.F., JONES J.W. **Refrigeração e Ar Condicionado**. São Paulo: Mc Gran-Hill do Brasil, 1985.

STOECKER, W. F.; JABARDO, J. M. Saiz. **Refrigeração industrial**. 2. ed. São Paulo, SP: Edgard Blücher, 2002.

ANEXO A – CARACTERÍSTICAS DOS EQUIPAMENTOS DE VENTILAÇÃO

- Modelo 3800

3800

AC axial compact fan



Technical description

Weight	0.420 kg
Dimensions	92 x 92 x 38 mm
Impeller material	Sheet steel, painted black
Housing material	Die-cast aluminum
Part no.	9244014722
Airflow direction	Exhaust over struts
Direction of rotation	Clockwise, viewed toward rotor
Bearing	Sintec sleeve bearing
Service life L10 at 40 °C	62500 h
Service life L10 at maximum temperature	25000 h
Cable	with 2 leads AWG 18, TR 64 Grounding lug M4 x 8
Motor protection	Protected from overload by impedance protection
Approval	VDE, CSA, UL, CE

Nominal data

close or Esc Key

Phase	1~
Type of voltage	AC
Nominal voltage	in V 115
Frequency	in Hz 60
Speed	in min ⁻¹ 1900
Power input	in W 8
Min. ambient temperature	in °C -10
Max. ambient temperature	in °C 80
Air flow	in m ³ /h 54
Sound power level	in B 3,9
Sound pressure level	in dB(A) 26

- Modelo 3600

3600

AC axial compact fan



Technical description	
Weight	0.420 kg
Dimensions	92 x 92 x 38 mm
Impeller material	Sheet steel, painted black
Housing material	Die-cast aluminum
Part no.	9244014706
Airflow direction	Exhaust over struts
Direction of rotation	Clockwise, viewed toward rotor
Bearing	Sintec sleeve bearing
Service life L10 at 40 °C	55000 h
Service life L10 at maximum temperature	30000 h
Cable	with 2 leads AWG 18, TR 64 Grounding lug M4 x 8
Motor protection	Protected from overload by impedance protection
Approval	VDE, CSA, UL, CE

Nominal data		close or Esc Key
Phase		1~
Type of voltage		AC
Nominal voltage	in V	115
Frequency	in Hz	60
Speed	in min ⁻¹	3100
Power input	in W	11
Min. ambient temperature	in °C	-10
Max. ambient temperature	in °C	65
Air flow	in m ³ /h	89
Sound power level	in B	5,1
Sound pressure level	in dB(A)	41

