

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DE UM INDICADOR DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA INTEGRADO
PARA ANÁLISE DO DESEMPENHO DE CONDICIONADORES DE AR DE BAIXA
CAPACIDADE**

SERGIO LUIZ SOARES

Dissertação de Mestrado

São Leopoldo, maio de 2018

ESTUDO DE UM INDICADOR DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA INTEGRADO PARA
ANÁLISE DO DESEMPENHO DE CONDICIONADORES DE AR DE BAIXA
CAPACIDADE

Sergio Luiz Soares

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como pré-requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Wander

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan
Profa. Dra. Jacqueline Copetti
Prof. Dr. Nathan Mendes - PUCPR

S676e Soares, Sergio Luiz.

Estudo de um indicador de eficiência energética integrado para análise do desempenho de condicionadores de ar de baixa capacidade / Sergio Luiz Soares. – 2018.

120 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2018.

"Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Wander."

1. Coeficiente integrado. 2. Desempenho energético.
3. Carga parcial. I. Título.

CDU 621

Sergio Luiz Soares

ESTUDO DE UM INDICADOR DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA INTEGRADO PARA
ANÁLISE DO DESEMPENHO DE CONDICIONADORES DE AR DE BAIXA
CAPACIDADE

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como pré-requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Aprovado em 24 de maio 2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan

Profa. Dra. Jacqueline Copetti

Prof. Dr. Nathan Mendes - PUCPR

Dedico este trabalho à minha família,
em especial à minha filha Milena, minha companheira Tânia, minha mãe Denair e a todos
que, de alguma forma, contribuíram para a sua realização.

AGRADECIMENTOS

A Deus, inteligência suprema e causa primária de todas as coisas, pela capacidade física e intelectual para a realização deste trabalho;

A toda minha família, pela compreensão, apoio e incentivo;

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto Wander, pela orientação e valiosas contribuições.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), e em especial ao Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan e a Profa. Dra. Jacqueline Copetti, pela contribuição na minha formação e pelo conhecimento transmitido.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein

RESUMO

O presente estudo aborda a influência das condições climáticas, do perfil de utilização nos ambientes e da utilização da tecnologia *inverter* em equipamentos do tipo *Split Hi Wall*, aplicados a ambientes residenciais e comerciais de pequeno porte no Brasil, através da utilização de um indicador de eficiência energética integrado. Considerando que esse tipo de equipamento é o mais utilizado para a climatização desses ambientes, existe um grande potencial de redução de consumo de energia elétrica se profissionais e consumidores possuem subsídios para selecionar equipamentos comprovadamente mais eficientes. O trabalho apresenta a metodologia desenvolvida para: seleção de cidades para representar diferentes zonas bioclimáticas brasileiras; definição das características construtivas e de utilização de uma sala de estar e de um escritório; determinação dos coeficientes das curvas de performance do *Split Hi Wall*, com capacidade de 2640 W e coeficiente de eficiência energética (CEE) de 3,30 W/W, operando em refrigeração. Com a utilização do programa computacional *EnergyPlus*, foram realizadas 24 simulações do comportamento do equipamento com velocidade fixa e variável, nas salas e escritórios das cidades de Curitiba/PR, São Paulo/SP, Brasília/DF, Campo Grande/MS, Cuiabá/MT e Fortaleza/CE, durante um ano de funcionamento. Utilizando-se um índice integrado, o Coeficiente de Eficiência Energética Integrado (ICEE), e analisando-se os resultados de um ano de operação, o *Split Hi Wall* estudado alcançou 4,95 W/W, 50% maior que o CEE nominal (3,30 W/W), sendo que os aparelhos com tecnologia *inverter* atingiram valores 29% superiores aos com velocidade fixa. Independente da tecnologia, os condicionadores de ar estudados apresentam os maiores valores de ICEE em temperaturas externas na faixa entre 20 °C e 25 °C, sendo 4,01 W/W com velocidade fixa e 5,18 W/W nos *inverter*'s. A faixa de razão de carga parcial (PLR) entre 0,4 e 0,6 apresenta a maior quantidade de valores máximos, podendo alcançar ICEE de 5,19 W/W com o *inverter*. As informações obtidas serviram como base na elaboração de uma proposta para cálculo de um coeficiente integrado de eficiência energética, o qual utiliza informações de arquivos climáticos e resultados de CEE segundo o fator de carga e de temperatura externa, sem a necessidade de utilização de programas de simulação computacional, sendo capaz de fornecer os subsídios necessários para a correta seleção dos condicionadores de ar mais eficientes.

Palavras-chave: Coeficiente Integrado. Desempenho Energético. Carga Parcial.

ABSTRACT

The following study approaches the influence of climatic conditions, usage profile in different environments and the use of the inverter technology on Split Hi Wall models, applied in residences and small size businesses in Brazil, by using an integrated energy efficiency indicator. Considering that this is the most used model in those types of environment, there is great potential for reduction of energy consumption if professionals who work in the field and consumers have guidance in choosing equipment that is proven to be more efficient. The study presents the methodology developed for: selecting cities that will portray different bioclimatic zones in Brazil; defining the construction and usage features of a living room and an office; determining the coefficient that represents the performance curves of an operating Split Hi Wall device, with capacity of 2640 W and Coefficient of Energy Efficiency (CEE) of 3.30 W/W. By using the computer software EnergyPlus, the performance of the device with fixed and variable speeds was simulated 24 times in living rooms and offices in the cities of Curitiba/PR, São Paulo/SP, Brasília/DF, Campo Grande/MS, Cuiabá/MT and Fortaleza/CE, during one year of operation. Utilizing an integrated indicator, the Integrated Energy Efficiency Ratio (IEEC), and analyzing the results of one year's operation, the studied model achieved 4.95 W/W, 50% above the nominal CEE (3.30 W/W), given that the devices with the inverter technology reached values that are 29% above the fixed speed ones. Regardless the technology, the analyzed models show the highest rates of IEEC in outside temperatures that range between 20°C and 25°C, being 4.01 W/W on the fixed speed models and 5.18 W/W on the inverter ones. The Part Load Ratio (PLR) that ranges between 0.4 and 0.6 shows the highest amount of maximum rates, being able to reach a 5.19 W/W rate with the inverter. The acquired information served as a foundation for the creation of a proposal to calculate an integrated energy efficiency coefficient, which uses information from climate archives and EEC results according to the load factor and outside temperature, without the need of simulation softwares, being able to provide the necessary subsidies for the correct selection of the most efficient air conditioners.

Keywords: Integrated coefficient. Energy performance. Partial load.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Etiqueta ENCE e Selo PROCEL.	34
Figura 2.2 - Etiqueta de eficiência energética para condicionadores de ar do tipo <i>split</i> e janela da União Europeia.	38
Figura 2.3 - Agrupamento das zonas bioclimáticas brasileiras.	40
Figura 3.1 – Planta Baixa e modelagem em 3D da envoltória no <i>SketchUp</i>	53
Figura 3.2 - Unidades evaporadora e condensadora do sistema <i>Split Hi Wall</i>	58
Figura 4.1 – Comparação entre a capacidade do condicionador de ar e necessidade de refrigeração nas salas de estar das capitais selecionadas.	69
Figura 4.2 - Comparação entre a capacidade do condicionador de ar e necessidade de refrigeração nos escritórios das capitais selecionadas.	70
Figura 4.3 – Tempo de ocupação com temperatura acima de 23,2 °C.	70
Figura 4.4 – Percentual de tempo em que o ambiente apresentou temperatura operativa acima de 25,5 °C, na condição 1.	71
Figura 4.5 – Distribuição das horas de operação em função da temperatura do ambiente externo (TBS _e).	74
Figura 4.6 - Distribuição das horas de operação segundo a faixa de PLR.	74
Figura 4.7 – Valores de ICEE obtidos nas simulações dos condicionadores de ar com velocidade fixa e variável, das salas e escritórios das capitais selecionadas.	76
Figura 4.8 - Comportamento do ICEE em função da temperatura do ambiente externo dos condicionadores de ar com velocidade variável instalados nos escritórios.	79
Figura 4.9 - Comportamento do ICEE com temperatura externa até 20°C.	82
Figura 4.10 – Valores médios de PLR, em cada faixa de TBS _e , para os condicionadores de ar com velocidade fixa instalados na sala de estar e escritório de Campo Grande.	90
Figura 4.11 – Influência do PLR sobre o ICEE obtido pelos condicionadores com velocidade fixa e variável nos ambientes de Campo Grande.	91
Figura 4.12 - Quantidades de condicionadores de ar <i>Split Hi Wall</i> , com rotação fixa e variável, segundo a classificação energética.	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Projeção do consumo de eletricidade por setor (TWh).	26
Tabela 2.2 - Normas de eficiência energética em edificações.....	28
Tabela 2.3 - Indicadores de Eficiência Energética normatizados pela AHRI.	32
Tabela 2.4 Requisitos mínimos de eficiência energética para condicionadores de ar segundo a ASHRAE <i>Standard</i> 90.1.	33
Tabela 2.5 - Requisitos mínimos de eficiência energética para condicionadores de ar VRF segundo a ASHRAE <i>Standard</i> 90.1.	33
Tabela 2.6 - Classificação dos condicionadores de ar <i>Split Hi Wall</i>	34
Tabela 2.7 - Comparação dos valores de SEER mínimos para condicionadores de ar com velocidade fixa nas principais economias do mundo (W/W).....	37
Tabela 2.8 - Requisitos mínimos de eficiência energética de condicionadores de ar do tipo <i>split</i> e janela segundo a União Europeia (W/W).	38
Tabela 2.9 - Características das zonas bioclimáticas brasileiras.	40
Tabela 3.1 - Capitais associadas a cada zona bioclimática brasileira.....	48
Tabela 3.2 - Disponibilidade de arquivos climáticos das capitais brasileira.	50
Tabela 3.3 – CDD das capitais selecionáveis.	51
Tabela 3.4 – Amplitude térmica anual das capitais selecionáveis.....	52
Tabela 3.5 – Capitais selecionadas e seus parâmetros de seleção.	52
Tabela 3.6 – Propriedades físicas dos materiais utilizados na envoltória.	54
Tabela 3.7 – Propriedades termo físicas do vidro tipo CLEAR.	55
Tabela 3.8 – Padrão de ocupação da Sala de Estar.....	56
Tabela 3.9 – Padrão de ocupação do escritório.	56
Tabela 3.10 - Taxa típica de dissipação de calor pela iluminação.	57
Tabela 3.11 – Dissipação dos equipamentos elétricos utilizados no escritório.....	58
Tabela 3.12 – Codificação das simulações.....	66
Tabela 3.13 - Delimitação das condições de operação.....	66
Tabela 4.1 – Máxima taxa de remoção de calor no dia de projeto.	68
Tabela 4.2 – Redução do número de horas com T_{op} acima de 25,5 °C, provocado pela redução do <i>set-point</i> em Campo Grande, Fortaleza e Cuiabá.	72
Tabela 4.3 – Temperaturas de teste para determinação do CEE.	73

Tabela 4.4 – Resultados de ICEE obtidos por faixa de temperatura do ambiente externo dos equipamentos de velocidade fixa e variável.	79
Tabela 4.5 – Horas de operação por faixa de temperatura externa nas simulações realizadas.	80
Tabela 4.6 – Comparação e o $ICEE_{TBS_e}$ e o $ICEE_{sim}$	81
Tabela 4.7 – Resultados obtidos em baixa temperatura externa.....	83
Tabela 4.8 – Comparativo entre os valores de ICEE obtidos por condicionadores de ar de velocidade fixa instalados em salas de cidades com diferentes médias de umidade relativa. externa.	85
Tabela 4.9 – Comparativo entre os valores de ICEE obtidos por condicionadores de ar de velocidade fixa instalados em escritórios de cidades com diferentes médias de umidade relativa externa.	85
Tabela 4.10 – Variação da capacidade latente do condicionador de ar com velocidade fixa em função da taxa de renovação de ar das salas e escritórios das cidades selecionadas.....	86
Tabela 4.11 – Comparativo entre os valores obtidos por condicionadores de ar de velocidade fixa instalados nas salas de Brasília e Fortaleza.	87
Tabela 4.12 – Comparativo entre os valores obtidos por condicionadores de ar de velocidade fixa instalados nos escritórios de Brasília e Cuiabá.	88
Tabela 4.13 – Quantidade de horas por faixa de umidade relativa do ambiente externo e o respectivo ICEE com a utilização de condicionadores de ar de velocidade fixa nas salas.	88
Tabela 4.14 – Comparação entre o $ICEE_{pred}$ e o $ICEE_{sim}$ dos condicionadores de ar de velocidade fixa instalados nas salas.	89
Tabela 4.15 - Valores de ICEE dos condicionadores de ar com velocidade variável instalados nos escritórios das cidades selecionadas	92
Tabela 4.16 - Comparativo das horas de operação e ICEE entre os condicionadores de ar com velocidade fixa e variável de Campo Grande e das cidades com menor demanda de remoção de calor.	93
Tabela 4.17 – Relação entre o RTF e o ICEE em todos os ambientes estudados.	95
Tabela 4.18 - Comparação entre o ICEE obtido com a estratégia <i>continuous fan</i> e com <i>cycling fan</i> para todos os ambientes simulados.	96
Tabela 4.19 - Condições de operação dos condicionadores de ar com velocidade variável instalados nos escritórios e os valores máximos de ICEE obtidos.....	98
Tabela 4.20 – Comparativo do consumo de energia elétrica e da eficiência energética dos condicionadores de ar com velocidade fixa e variável, em um ano, nos diferentes ambientes simulados.....	99

Tabela 4.21 – Fatores utilizados no cálculo do SEER de condicionadores de ar do tipo <i>Split inverter</i> nas etiquetas de eficiência energética da União Europeia.	101
Tabela 4.22 – Coeficientes em função da temperatura externa para as seis cidades selecionadas para representar as oito zonas bioclimáticas brasileiras.	102
Tabela 4.23 – Valores obtidos na simulação de um condicionador de ar com velocidade fixa instalado em Campo Grande, para as condições A, B, C e D.	102
Tabela 4.24 - Aplicação do modelo proposto para cálculo do coeficiente integrado de eficiência energética (ICEEprop).	104
Tabela 4.25 - Comparação entre os valores de ICEEprop obtidos através da aplicação da Eq. (4.3), e os valores de ICEEsim, obtidos nas simulações.	105
Tabela 4.26 – Comparação entre a classificação energética dos condicionadores de ar com velocidade fixa e variável, segundo a os requisitos do Brasil e da União Europeia.	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAVA	Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento
AHRI	Instituto Americano de Ar Condicionado, Aquecimento e Refrigeração (do inglês: <i>American Air Conditioning, Heating and Refrigeration Institute</i>)
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
APF	Fator de Desempenho Anual (do inglês: <i>Annual Performance Factor</i>)
ASHRAE	Sociedade Americana dos Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado (do inglês: <i>American Society Of Heating, Refrigerating And Air-Conditioning Engineers</i>)
BCA	Código de Construção da Austrália (do inglês: <i>Building Code of Australia</i>)
BEN	Balanco Energético Nacional
CAPFT	Fator de Correção da Capacidade em Função da Temperatura (do inglês: <i>Capacity Correction Fator Function of Temperature</i>)
CCREUB	Critérios para Clientes na Racionalização do Uso de Energia na Construção (do inglês: <i>Criteria for Clientson the Rationalization of Energy Use for Building</i>)
CDD	Grau-Dia de Refrigeração (do inglês: <i>Cooling Degree-Days</i>)
CEE	Coefficiente de Eficiência Energética
CIBSE	Instituição Oficial de Engenheiros de Serviços de Construção (do inglês: <i>Chartered Institution of Building Services Engineers</i>)
CLASP	Rotulagem Colaborativa e Programa de Normas de Aparelhos (do inglês: <i>Collaborative Labelingand Appliance Standards Program</i>)
CONPET	Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural
COP	Coefficiente de Desempenho (do inglês: <i>Coefficient of Performance</i>)
CSPF	Fator de Desempenho Sazonal de Refrigeração (do inglês: <i>Cooling Seasonal Performance Factor</i>)
CSV	Valores Separados por Vírgula (do inglês: <i>Comma Separated Values</i>)

CTF	Função Transferência por Condução (do inglês: <i>Conduction Transfer Function Cooling Seasonal</i>)
DOE	Departamento de Energia dos Estados Unidos (do inglês: <i>United States Department of Energy</i>)
ECBC	Código para Conservação de Energia na Construção (do inglês: <i>Energy Conservation Building Code</i>)
EEACI	Código Prático para Eficiência Energética em Instalações de Condicionadores de Ar (do inglês: <i>Code of Practice for Energy Efficiency of Air Conditioning Installations</i>)
EEI	Indicador de Eficiência Energética (do inglês: <i>Energy Efficiency Indicator</i>)
EEPB	Norma para Eficiência Energética nos Projetos de Prédios Públicos (do inglês: <i>Design Standard for Energy Efficiency of Public Buildings</i>)
EER	Razão de Eficiência Energética (do inglês: <i>Energy Efficiency Ratio</i>)
EIR	Razão de Entrada de Energia (do inglês: <i>Energy Input Ratio</i>)
EIRFPLR	Fator de Correção da Razão de Entrada de Energia em Função da Razão de Carga Parcial (do inglês: <i>Energy Input Ratio Correction Factor Function of Part-Load Ratio</i>)
EIRFT	Fator de Correção da Razão de Entrada de Energia em Função da Temperatura (do inglês: <i>Energy Input Ratio Correction Factor Function of Temperature</i>)
EIRHiPLR	Fator de Correção da Razão de Entrada de Energia em Função da Alta Razão de Carga Parcial (do inglês: <i>Energy Input Ratio Correction Factor Function of Hi Part-Load Ratio</i>)
EIRLowPLR	Fator de Correção da Razão de Entrada de Energia em Função da Baixa Razão de Carga Parcial (do inglês: <i>Energy Input Ratio Correction Factor Function of Low Part-Load Ratio</i>)
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPW	Arquivo Climático do <i>Energy Plus</i> (do inglês: <i>Energy Plus Weather</i>)
EU	União Europeia
EUA	Estados Unidos da América
HDD	Grau-Dia de Aquecimento (do inglês: <i>Heating Degree-Days</i>)

HSPF	Fator de Desempenho Sazonal de Aquecimento (do inglês: <i>Heating Seasonal Performance Factor</i>)
HTML	Linguagem de Marcação de Hipertexto (do inglês: <i>Hyper Text Markup Language</i>)
HVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (do inglês: <i>Heating, Ventilation, and Air Conditioning</i>)
ICEE	Coeficiente de Eficiência Energética Integrado (do inglês: <i>Integrated Coefficient of Energy Efficiency</i>)
ICOP	Coeficiente de Desempenho Integrado (do inglês: <i>Integrated Coefficient of Performance</i>)
IDF	Arquivo de Dados de entrada (do inglês: <i>Input Data File</i>)
IEA	Agencia Internacional de Energia (do inglês: <i>International Energy Agency</i>)
IEER	Razão de Eficiência Energética Integrada (do inglês: <i>Integrated Energy Efficiency Ratio</i>)
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPLV	Valor Integrado de Carga Parcial (do inglês: <i>Integrated Part-Load Value</i>)
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LABSOLAR	Laboratório de Energia Solar
MEC	Código Modelo de Energia (do inglês: <i>Model Energy Code</i>)
MME	Ministério de Minas e Energia
MNECB	Código Nacional de Energia para Construções do Canadá (do inglês: <i>Model National Energy Code of Canada for Buildings</i>)
NBR	Norma Brasileira
NCDC	Centro Nacional de Dados Climáticos (do inglês: <i>National Climatic Data Center</i>)
OPER	Horas de Operação
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PBE EDIFICA	Programa Brasileiro de Etiquetagem em Edificações
PLF	Fator de Carga Parcial (do inglês: <i>Part Load Factor</i>)

PLR	Razão de Carga Parcial (do inglês: <i>Part Load Ratio</i>)
PNE	Plano Nacional de Energia
PNEf	Plano Nacional de Eficiência Energética
PROCEL	Programa de Conservação de Energia Elétrica
PROCEL EDIFICA	Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações
PTAC	Terminal de Ar Condicionado (do inglês: <i>Packaged Terminal Air Conditioner</i>)
PUC	Pontifícia Universidade Católica
RITE	Regulamento de Instalações Térmicas em Edifícios (do espanhol: <i>Reglamento de instalaciones térmicas en edificios</i>)
RTF	Fração de Tempo de Operação do Compressor (do inglês: <i>Run Time Fraction</i>)
RTQ-C	Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos
RTQ-R	Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
SCOP	Coefficiente de Desempenho Sazonal (do inglês: <i>Seasonal Coefficient of Performance</i>)
SEEP	Sistema de Etiquetagem Energética de Produtos
SEER	Razão de Eficiência Energética Sazonal (do inglês: <i>Seasonal Energy Efficiency Ratio</i>)
SWERA	Avaliação dos Recursos Solar e de Vento (do inglês: <i>Solar and Wind Resource Assessment</i>)
TMY	Ano Meteorológico Típico (do inglês: <i>Typical Meteorological Year</i>)
TR	Toneladas de Refrigeração
TRY	Teste de Ano de Referência (do inglês: <i>Test Reference Year</i>)
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
VRF	Vazão de Refrigerante Variável (do inglês: <i>Variable Refrigerant Flow</i>)
WEO	Perspectiva Mundial da Energia (do inglês: <i>World Energy Outlook</i>)
WWR	Razão entre Área de Janela e Área de Parede (do inglês: <i>Window to Wall Ratio</i>)
ZB	Zona Bioclimática

LISTA DE SÍMBOLOS

A_s	Área da superfície [m ²]
CAP	Capacidade de remoção de calor total [W]
CAP_{lat}	Capacidade de remoção de calor latente [W]
CAP_{nom}	Capacidade de remoção de calor nominal [W]
CEE	Coefficiente de eficiência energética [W/W]
CEE_{nom}	Coefficiente de eficiência energética nominal [W/W]
COP	Coefficiente de desempenho [-]
COP_{nom}	Coefficiente de desempenho nominal [-]
$COP_{máx}$	Coefficiente de desempenho nominal máximo [W/W]
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]
h_c	Coefficiente de transferência de calor por convecção [W/(m ² K)]
$ICEE$	Coefficiente de eficiência energética integrado [W/W]
$ICEE_{pred}$	Coefficiente de eficiência energética integrado predominante [W/W]
$ICEE_{prop}$	Coefficiente de eficiência energética integrado proposto [W/W]
$ICEE_{sim}$	Coefficiente de eficiência energética integrado simulado [W/W]
$ICEE_{TBSe}$	Coefficiente de eficiência energética integrado em uma determinada faixa de temperatura de bulbo seco externa [W/W]
$ICOP$	Coefficiente integrado de performance [-]
L	Espessura [m]
\dot{m}	Taxa de massa [kg/s]
\dot{m}_{inf}	Taxa de massa do ar proveniente da infiltração [kg/s]
$OPER$	Tempo de operação [h]
POT	Potência elétrica [W]

POT_{nom}	Potência elétrica nominal [W]
\dot{Q}	Taxa de calor [W]
\dot{Q}_{sys}	Taxa de calor do sistema [W]
$SEER$	Razão de Eficiência Energética Sazonal [W/W]
T_{∞}	Temperatura do fluido [K]
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_{op}	Temperatura operativa [°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]
UR	Umidade relativa [%]
UR_e	Umidade relativa externa [%]
UR_i	Umidade relativa interna [%]
α	Absortância [-]
κ	Condutividade térmica [W/(m K)]
ρ	Massa específica [kg/m ³]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	22
1.2 OBJETIVOS	23
1.2.1 Objetivo Geral	23
1.1.2 Objetivos Específicos	23
1.3 JUSTIFICATIVA	23
1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 PARTICIPAÇÃO DOS CONDICIONADORES DE AR DO TIPO <i>SPLIT HI WALL</i> NO CONSUMO DE ENERGIA NACIONAL	26
2.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES	27
2.2.1 ASHRAE <i>Standard 90.1</i>	28
2.2.2 Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviço e Públicos (RTQ-C)	29
2.2.3 Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R)	29
2.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM CONDICIONADORES DE AR	30
2.3.1 Requisitos Mínimos de Eficiência Energética para Condicionadores de Ar	33
2.3.2 Padronização na Utilização de Indicadores de Eficiência Energética	35
2.4 INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS SOBRE O DESEMPENHO ENERGÉTICO	39
2.4.1 Zoneamento Bioclimático Brasileiro	39
2.4.2 Grau Dia	41
2.4.3 Arquivos Climáticos	41
2.5 INFLUÊNCIA DA TECNOLOGIA VRF EM CONDICIONADORES DE AR	42
2.6 ANÁLISE ENERGÉTICA ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	43
2.6.1 Programa Computacional <i>EnergyPlus</i>	44
2.6.2 Utilização do <i>EnergyPlus</i> na Avaliação de Sistemas VRF	44
3 METODOLOGIA	47
3.1 SELEÇÃO DAS LOCALIDADES	47
3.1.1 Seleção das Localidades com Base nas Zonas Bioclimáticas Brasileiras	48
3.1.2 Disponibilidade de Arquivos Climáticos	49
3.1.3 Análise do Grau-Dia na Seleção das Localidades	50

3.1.4 Amplitude Térmica das Localidades	51
3.1.5 Localidades selecionadas.....	52
3.2 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DA ENVOLTÓRIA.....	53
3.3 CARACTERÍSTICAS DE OCUPAÇÃO E UTILIZAÇÃO.....	55
3.3.1 Padrão de Ocupação.....	55
3.3.2 Taxa Metabólica	56
3.3.3 Iluminação.....	57
3.3.4 Equipamentos Elétricos	57
3.3.5 Renovação de Ar.....	58
3.4 CARACTERÍSTICAS DO CONDICIONADOR DE AR	58
3.4.1 Curvas de Desempenho do Condicionador de Ar	59
3.5 PROGRAMA DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	61
3.5.1 Modelagem dos Ambientes	62
3.5.2 Dados de Entrada	63
3.5.3 Dados de Saída.....	64
3.5.4 Indicador de Eficiência Energética	65
3.6 CODIFICAÇÃO DAS SIMULAÇÕES E CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO	65
4 RESULTADOS	67
4.1 ESTUDO DE CARGA TÉRMICA	68
4.2 DESEMPENHO ENERGÉTICO DOS CONDICIONADORES DE AR.....	72
4.3 INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS SOBRE O ICEE	77
4.3.1 Influência da temperatura do ambiente externo sobre o ICEE	77
4.3.2 Influência da umidade relativa do ar externo sobre o ICEE.....	84
4.4 INFLUÊNCIA DA TECNOLOGIA APLICADA NOS CONDICIONADORES DE AR	89
4.4.1 Utilização da tecnologia <i>inverter</i>.....	89
4.5 CONDIÇÕES FAVORÁVEIS DE OPERAÇÃO	97
4.6 PROPOSTA DE CÁLCULO DO ICEE PARA O BRASIL.....	100
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	107
REFERÊNCIAS	111
ANEXO A - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS GERAIS DO X_POWER.....	116
APENDICE A	117
APENDICE B.....	118
APENDICE C	120

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da sociedade humana está intrinsecamente vinculado à energia elétrica. Com a industrialização, a dependência em relação a esse recurso aumentou consideravelmente e, com a revolução tecnológica ocorrida a partir da segunda metade do século XX, essa dependência teve crescimento exponencial. Hoje, a integração de ciência e tecnologia coloca à disposição da sociedade um expressivo número de novos aparelhos a cada ano e a indústria necessita de maquinário capaz de garantir a produtividade. Crescem também os setores de comunicações, comércio, transporte e serviços. Logo, a geração de energia para atender a toda essa demanda tornou-se o grande desafio. Além disso, a sociedade moderna se depara com uma outra necessidade: intensificar a busca por estratégias que permitam um consumo mais inteligente da energia.

Segundo o *World Energy Outlook 2015* (WEO), publicado pela *International Energy Agency* (IEA), desde a década de 1980 foram feitos progressos no desenvolvimento de energias mais limpas e na implantação de tecnologias mais eficientes. Porém, para evitar que a média da temperatura global suba mais de 2 °C, é necessário promover um grande esforço mundial. Dentre as medidas propostas pelo IEA, está o aumento da eficiência energética na indústria, nas edificações e nos transportes (IEA, 2016).

No Brasil, estudos desenvolvidos pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), deram origem ao Plano Nacional de Energia (PNE) 2030, o qual documenta as análises e pesquisas realizadas no sentido de fornecer subsídios para a elaboração de uma estratégia de expansão de oferta de energia em longo prazo para o uso integrado e sustentável dos recursos disponíveis (EPE, 2007).

O Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf) tem como objetivo promover o progresso induzido e identificar instrumentos de ação e de captação de recursos, de promoção do marco legal e regulatório que possibilitem a existência de um mercado sustentável de eficiência energética e mobilizar a sociedade brasileira no combate ao desperdício de energia, preservando os recursos naturais (EPE, 2011).

Segundo o PNEf, além de 5% de redução da demanda considerada no setor elétrico, foi estabelecida uma meta de 5% adicionais através do progresso induzido, totalizando 10% no consumo de energia elétrica ao final do horizonte previsto no PNE 2030 (EPE, 2011).

A obtenção de resultados favoráveis está alicerçada em programas de eficiência energética, reconhecidos internacionalmente como o Programa de Conservação de Energia

Elétrica (PROCEL), o Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET) e o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE).

O PBE, criado em 1984, visa prover os consumidores de informações que lhes permitam avaliar o consumo dos equipamentos eletrodomésticos, dentre eles os condicionadores de ar, e selecionar, na sua decisão de compra, aqueles de maior eficiência em relação ao gasto de energia elétrica.

O PROCEL, criado em 1985, caracteriza-se pela publicação de manuais destinados à conservação de energia elétrica, estímulo ao desenvolvimento tecnológico, adequação da legislação e normas técnicas e formação de profissionais em cursos técnicos na área. O programa registra resultados expressivos em termos de economia de energia no País, com montante avaliado em 14.859 GWh no período entre 1996 e 2003. De acordo com estudos do EPE, nos últimos 20 anos os ganhos com eficiência energética são equivalentes a uma usina hidrelétrica de cerca de 10.000 MW, que corresponde a 80% da potência instalada em Itaipu (EPE, 2017).

O Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações (PROCEL EDIFICA) foi instituído em 2003, através de uma ação conjunta entre o Ministério de Minas e Energia e o Ministério das Cidades, além de universidades e diversos segmentos da construção civil. Considerando que o consumo de energia elétrica nas edificações corresponde a cerca de 45% do consumo nacional, o PROCEL EDIFICA estima que existe um potencial de redução no consumo de 50% para novas edificações e de 30% para as que serão reformadas (EPE, 2011).

Recentemente, novas tecnologias foram apresentadas ao mercado nacional pelos diferentes fabricantes de condicionadores de ar, indicando maiores índices de eficiência energética. Equipamentos com vazão variável de refrigerante (VRF), até então oferecidos em capacidades maiores e em sistemas múltiplos (uma unidade condensadora para diversas unidades evaporadoras), chegam ao mercado residencial e comercial de pequeno porte, permitindo aos consumidores a obtenção de equipamentos que proporcionam o uso racional de energia elétrica. A tecnologia empregada para variar a vazão de refrigerante nesse sistema é a variação da frequência de rotação do seu compressor. Por isso, o mercado adotou o termo comercial “*inverter*” para designar os produtos que se utilizam dessa tecnologia. Segundo Econoler *et al.* (2011), o estabelecimento de índices mínimos de eficiência energética é o melhor instrumento para redução do consumo energético dos sistemas de condicionamento de ar. Na China, índices mais restritivos de COP foram aprovados recentemente, alterando o índice

de desempenho dos produtos menos eficientes de 2,3 W/W para 2,9 W/W e os mais eficientes de 4,5 W/W para 6,2 W/W.

No mesmo sentido, em agosto de 2016 no Brasil, o Comitê Gestor de Indicadores de Eficiência Energética, do MME, propôs elevar o Coeficiente de Eficiência Energética (CEE) dos condicionadores de ar modelo *split*, que representam 80% dos aparelhos vendidos no Brasil, para 2,81 W/W em uma primeira etapa e 3,02 W/W, em seguida. A medida irá retirar do mercado os equipamentos com classificação D ($2,61 \leq \text{CEE} \leq 2,81$). Entretanto, mesmo assim o limite mínimo ficará abaixo do mínimo exigido em países como México, China e Índia (GOVERNO, 2018).

As principais barreiras para que os consumidores adquiram equipamentos de alta eficiência energética não são técnicas. Isso por que os grandes fabricantes possuem tecnologia para desenvolver e comercializar produtos capazes de oferecer este atributo. Entretanto, faltam informações sobre o real comportamento de consumo de energia elétrica desses equipamentos. Logo, para que o País consiga atingir as metas de redução de consumo de energia em edificações residenciais e comerciais, é necessária a implantação de programas de incentivo à eficiência energética capazes de proporcionar o progresso induzido.

1.1 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

O estudo proposto neste trabalho limita-se à avaliação da eficiência energética de condicionadores de ar do tipo *Split Hi Wall* de baixa capacidade, operando somente em refrigeração, aplicado em um ambiente residencial e outro comercial, ambos com características construtivas e de ocupação típicas para o território nacional, operando com vazão de refrigerante fixa e variável. A avaliação será feita com base nos resultados obtidos através de simulação computacional, utilizando-se como ferramenta o *EnergyPlus*, programa distribuído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), desenvolvido para simulação de carga térmica e análise energética de edificações.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos tomados como base para a elaboração desta pesquisa estão dispostos a seguir:

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é analisar a eficiência energética de condicionadores de ar de baixa capacidade de refrigeração, quando aplicados em ambientes residenciais ou comerciais de pequeno porte, submetidos às diferentes condições climáticas do território brasileiro, independente da tecnologia com que o mesmo tenha sido desenvolvido (velocidade fixa ou variável).

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) analisar a influência das condições climáticas sobre o desempenho do equipamento;
- b) analisar a influência das características de utilização, tais como: tipos de aparelhos elétricos e horário de ocupação, sobre o desempenho do equipamento;
- c) analisar a diferença entre a eficiência energética de um equipamento que utiliza a tecnologia *inverter*, cuja velocidade de rotação do seu compressor é variável, e outro cuja velocidade do compressor é fixa;
- d) propor a utilização de um indicador de desempenho que melhor represente a eficiência energética do condicionador de ar, no período de um ano de funcionamento.

1.3 JUSTIFICATIVA

Os condicionadores de ar do tipo *Split Hi Wall* representam o maior volume de equipamentos comercializados no Brasil e, por isso, são responsáveis por uma parcela considerável no consumo de energia elétrica nas edificações residenciais e comerciais.

O desempenho energético de um condicionador de ar é influenciado por suas características construtivas e pelas condições de operação a que o mesmo está sujeito.

Atualmente, no Brasil são comercializados condicionadores de ar do tipo *Split Hi Hall* com compressores que operam com rotação fixa e uma nova geração de equipamentos que utilizam a tecnologia *inverter*, cujos compressores operam com velocidade variável e apresentam como vantagem maior eficiência energética.

Em um país com dimensões continentais como o Brasil, com oito zonas bioclimáticas distintas, um condicionador de ar pode apresentar resultados diferentes de desempenho energético, portanto se faz necessário entender a influência dos fatores climáticos, tais como temperatura e umidade relativa do ar, sobre o seu desempenho. Além das condições do ambiente externo, o perfil de utilização e ocupação de um ambiente residencial apresenta diferenças em relação a um ambiente comercial e podem influir na eficiência do equipamento.

Prover os consumidores de informações que lhes permitam avaliar o consumo de energia dos equipamentos eletrodomésticos e selecionar, no momento da compra, aquele de maior eficiência em relação ao consumo é o principal objetivo do PBE. Porém, o CEE, usado como indicador de eficiência energética em condicionadores de ar, está baseado em uma medição em regime permanente, com o equipamento operando em carga total e estando submetido a uma condição de temperatura externa que poucas vezes é verificada ao longo do ano. Além disso, os equipamentos que utilizam a tecnologia VRF apresentam maior desempenho em cargas parciais. Logo, essa vantagem em relação à eficiência energética não aparece na classificação do equipamento, segundo o PBE.

Diante disso, a proposta de apresentar aos consumidores e profissionais envolvidos na climatização de ambientes um indicador de eficiência energética que represente com maior fidelidade o comportamento de condicionadores de ar, integrado ao longo de um ano, além de justificar o investimento na aquisição de equipamentos mais eficientes, pode colaborar na redução no consumo de energia das edificações residenciais e comerciais.

1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

Neste capítulo, a busca pela utilização inteligente da energia no mundo foi introduzida como referência para o tema abordado, bem como as delimitações, os objetivos e as justificativas para a realização deste estudo.

O segundo capítulo apresenta os fundamentos teóricos necessários para a elaboração da dissertação, através de referenciais sobre temas como: a participação dos condicionadores de ar do tipo *Split Hi Wall* no consumo de energia do Brasil, regulamentações existentes sobre a

eficiência energética em edificações, os indicadores e requisitos mínimos de eficiência energética em condicionadores de ar, influência das condições climáticas sobre o desempenho energético das edificações e condicionadores de ar, a tecnologia VRF e a utilização do *Energy Plus* na simulação energética.

A metodologia adotada para a obtenção dos dados que serão analisados está disposta no terceiro capítulo. Nele, são apresentados os critérios utilizados para a seleção das localidades que representam as zonas bioclimáticas brasileiras, as características construtivas, de ocupação e utilização dos ambientes, as características dos condicionadores de ar e do programa de simulação computacional utilizado.

O quarto capítulo apresenta um estudo de carga térmica e os resultados obtidos a partir do presente estudo no que tange à influência das condições climáticas e da utilização da tecnologia *inverter* sobre o desempenho energético dos condicionadores de ar aplicados em ambientes residenciais e comerciais. Ainda nesse capítulo serão apresentadas as condições favoráveis de operação e será proposta uma metodologia para cálculo de um coeficiente integrado de eficiência energética. Por fim, o quinto capítulo apresenta as considerações finais e conclusivas e sugestões para futuras pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será apresentada a participação dos condicionadores de ar do tipo *Split Hi Wall* em relação à utilização de condicionadores de ar em ambientes residenciais e comerciais e a sua representatividade no consumo de energia elétrica nessas aplicações.

A eficiência energética será abordada nas regulamentações sobre edificações residenciais e comerciais, nos requisitos mínimos recomendados para a utilização de condicionadores de ar, na utilização de indicadores que representem o seu funcionamento e garantam economia de energia, e na influência das condições climáticas no desempenho tanto das edificações quanto dos condicionadores de ar.

2.1 PARTICIPAÇÃO DOS CONDICIONADORES DE AR DO TIPO *SPLIT HI WALL* NO CONSUMO DE ENERGIA NACIONAL

Estudos apresentados no PNE 2030 mostram que consumo de energia elétrica no setor residencial e comercial são os que apresentam maior perspectiva de crescimento no Brasil, considerando-se o período entre 2005 e 2030. A projeção é que o setor residencial atinja um crescimento na ordem de 5,0% ao ano, seguido pelo setor comercial com 4,6% ao ano, conforme disposto na Tab. (2.1) (EPE, 2007).

Tabela 2.1 - Projeção do consumo de eletricidade por setor (TWh).

Setor	Realizado		Projeção		Δ% ao ano
	2005	2010	2020	2030	2005 - 2030
Residencial	83,2	105,2	169,1	283,3	5,0
Industrial	145,1	197,1	272,6	357,7	3,7
Comercial e público	86,2	107,3	159,6	267,3	4,6
Outros	16,9	19,0	26,1	38,3	3,3
Subtotal	331,4	428,6	627,4	946,6	4,3
Setor energético	13,5	20,2	28,3	41,6	4,6
TOTAL	344,9	448,8	655,7	988,2	4,3

Fonte: EPE (2007, p. 185).

Conforme dados do Balanço Energético Nacional (BEN), o consumo final do recurso no Brasil em 2016 foi de aproximadamente 520 TWh, sendo que as edificações que

compreendem os setores residencial, comercial e prédios públicos foram responsáveis pelo consumo de 265 TWh, o que corresponde a 51% do consumo final (EPE, 2017).

Segundo o Panorama HVAC (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*) - Brasil 2015, elaborado pela Associação Brasileira de Refrigeração, Ar condicionado, Ventilação e Aquecimento - ABRAVA (2015), os condicionadores de ar do tipo *Split Hi Wall* representam 56% da capacidade de refrigeração instalada no Brasil e os *Split Hi Wall* com tecnologia *inverter* 11%. Desse modo, 67% da capacidade instalada é atendida com equipamentos do tipo *Split Hi Wall*.

Assim como no Brasil, atualmente o *split* é o tipo mais comum de sistema de condicionamento de ar em todo o mundo, utilizado tanto em edificações residenciais quanto não residenciais. Segundo Pessoa e Ghisi (2015), a maioria dos sistemas de condicionamento de ar fabricados na China têm capacidade de refrigeração abaixo de 12 kW. A média ponderada dos produtos chineses é de 4,3 kW, sendo que 89% têm capacidade inferior a 4,5 kW.

2.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

A eficiência energética na arquitetura pode ser entendida como um atributo inerente à edificação, representante de seu potencial em possibilitar conforto térmico, visual e acústico aos usuários com baixo consumo de energia. Portanto, um edifício é mais eficiente energeticamente que outro quando proporciona as mesmas condições ambientais com o menor consumo de energia (LAMBERTS *et al.*, 2014).

A preocupação mundial com a eficiência energética nas edificações pode ser evidenciada através da criação de regulamentos e programas de certificação, desde a década de 90. O objetivo delas vêm sendo incentivar a conservação e o uso eficiente dos recursos naturais tais como água, luz e ventilação, assim como reduzir desperdícios e impactos ambientais. A Tab. (2.2) apresenta uma síntese das principais regulamentações voltadas para a eficiência energética em edificações, elaborada por Lombard *et al.* (2011), com base em cinco estudos internacionais e outros trabalhos de pesquisa, que atualmente cobrem mais de 30 países nos quatro continentes.

Tabela 2.2 - Normas de eficiência energética em edificações.

País	Norma de Eficiência Energética
Estados Unidos	<i>ASHRAE Standard 90.1 – 2007 (ASHRAE 90.1)</i> <i>International Energy Conservation Code 2009</i> <i>Building Energy Efficiency Standards for Buildings 2008</i>
Canadá	<i>Model National Energy Code of Canadá for Building- 1997 (MNECB)</i>
Japão	<i>Criteria for Clientson the Rationalization of Energy Use for Buildings – 1999 (CCREUB)</i>
China	<i>Design Standard for Energy Efficiency of Public Buildings – 2005 (EEPB)</i>
Índia	<i>Energy Conservation Building Code – 2007 (ECBC)</i>
Hong Kong	<i>Code of Praticice for Energy Efficiency of Air Conditioning Installations 2007 (EEACI)</i>
Austrália	<i>Building Code of Australia – 2007 (BCA)</i>
Inglaterra	<i>Building Regulations Part L2A 2007 (PartL2A)</i>
França	<i>Caractéristiques Thermiques Des Bâtiments Nouveaux et Desparties Nouvelles de Bâtiments (RT2005)</i>
Espanha	<i>Reglamento de Instalaciones Térmicas em Edifícios 2007 (RITE)</i>

Fonte: Lombard *et al.* (2011, p. 256).

Porém, segundo Lamberts *et al.* (2014), as regulamentações por si só não garantem qualidade em níveis de eficiência em uma edificação. Maiores níveis de eficiência podem ser alcançados por meio de estratégias de projeto e por iniciativas e cooperação dos diversos agentes envolvidos na construção (arquitetos, engenheiros civis, eletricitas, mecânicos, empreendedores etc). Os usuários têm participação decisiva no uso eficiente das edificações através de seus hábitos, que podem reduzir de forma significativa o consumo de energia, aumentando assim a eficiência das edificações e reduzindo desperdícios. Todos os envolvidos na concepção e utilização das edificações e seus sistemas podem contribuir para criar e manter edificações energeticamente eficientes.

2.2.1 ASHRAE *Standard* 90.1

A versão original da ASHRAE Standard 90 foi publicada em 1975 e edições revisadas foram publicadas em 1989 e 1999. A partir de 2001, o padrão passou a ser divulgado na íntegra a cada três anos, com inclusões referenciadas em códigos de construção e energia. A norma fornece os requisitos mínimos de eficiência energética para concepção e construção de novos

edifícios com seus sistemas e equipamentos em edifícios existentes, além de critérios para determinar a conformidade com esses requisitos. As disposições apresentadas aplicam-se a ambientes aquecidos por sistemas com capacidade igual ou superior a 10 W/m^2 , ou refrigerados por sistemas de refrigeração com capacidade igual ou superior a 15 W/m^2 , bem como os demais sistemas utilizados nas edificações, tais como: ventilação, aquecimento de água, motores elétricos e iluminação (ASHRAE, 2010).

2.2.2 Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviço e Públicos (RTQ-C)

O Regulamento Técnico de Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviço e Públicos (RTQ-C) visa estabelecer as condições para classificação do nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos, a fim de obter a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) emitida pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO, 2013). O RTQ-C possui caráter voluntário e tem por objetivo preparar o mercado construtivo, de forma gradativa, a assimilar a metodologia de classificação e obtenção da etiqueta.

O regulamento apresenta dois métodos de classificação do nível de eficiência energética: o método prescritivo, através de aplicação de uma equação fornecida, válida para edifícios condicionados; e o método de simulação, o qual utiliza o método prescritivo e a simulação do desempenho termo-energético de edifícios condicionados e não condicionados. Para a classificação geral do nível de eficiência de uma edificação, as avaliações parciais recebem pesos, distribuídos da seguinte forma: Envoltória: 30%, Sistema de Iluminação: 30% e Sistema de Condicionamento de Ar: 40% (INMETRO, 2010).

2.2.3 Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R)

O Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) visa estabelecer as condições para a classificação do nível de eficiência energética de edificações residenciais a fim de possibilitar a obtenção da ENCE emitida pelo INMETRO. O RTQ-R também possui caráter voluntário e, assim como o RTQ-C, visa preparar

o mercado construtivo, de forma gradativa, a assimilar a metodologia de classificação e obtenção da etiqueta.

O RTQ-R especifica a classificação do nível de eficiência energética para edificações residenciais, sejam elas unidades habitacionais autônomas, edificações unifamiliares, edificações multifamiliares ou áreas de uso comum de edificações multifamiliares ou de condomínios de edificações residenciais (INMETRO, 2012).

O nível de eficiência da envoltória quando condicionada artificialmente é de caráter informativo. A obtenção do nível A de eficiência quando condicionada artificialmente é obrigatória para a bonificação de condicionamento artificial de ar, sendo que, para obtenção dessa bonificação (até 0,20 pontos), os condicionadores de ar do tipo janela (parede) e do tipo *split* devem possuir Selo Procel (ENCE A), considerando-se a última versão das tabelas do PBE para condicionadores de ar, publicadas no site do INMETRO (INMETRO, 2012).

2.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM CONDICIONADORES DE AR

Eficiência energética pode ser entendida como a obtenção de um serviço com alta economia de energia. Desse modo, um condicionador de ar é energeticamente mais eficiente que outro quando consegue trocar a mesma quantidade de calor, no mesmo intervalo de tempo, consumindo menos energia.

A eficiência energética de um ciclo teórico de refrigeração, que utiliza como princípio de funcionamento a compressão do vapor de um fluido refrigerante, é a relação entre a energia útil, ou seja, a energia na forma de calor que é absorvida no evaporador e a energia consumida pelo compressor para realizar o trabalho mecânico de compressão do vapor. O Coeficiente de Desempenho (COP), obtido através da Eq. (2.1), representa tal relação.

$$\text{COP} = \frac{\text{Energia Útil}}{\text{Energia Consumida}} \quad (2.1)$$

Segundo Lombard *et al.* (2011), indicadores de eficiência energética para condicionadores de ar podem expressar a eficiência do equipamento através das seguintes perspectivas:

- a) instantâneo: pontual;
- b) total ou parcial: para um determinado estado de carga;
- c) condições normalizadas (*Rating Conditions*): condições pré-determinadas para o funcionamento;
- d) sazonal: eficiência média durante um período de funcionamento.

As eficiências instantâneas dependem de maneira direta das condições normalizadas e estado da carga, devendo ser medidas em regime permanente, seguindo procedimentos de ensaio e validação (LOMBARD *et al.*, 2011). O COP e o EER (*Energy Efficiency Ratio*) são exemplos de indicadores de eficiência instantânea utilizados para avaliação de condicionadores de ar em condições de plena carga.

As eficiências sazonais ou integradas não dependem apenas das eficiências instantâneas, mas também do "Perfil de Carga" e das condições de operação ao longo de todo um período de tempo em funcionamento. A eficiência sazonal é de notória importância, tendo como objetivo principal condensar o desempenho energético de um condicionador de ar a um valor de desempenho médio, o que permite aos arquitetos e projetistas selecionar um equipamento capaz de atender a carga térmica necessária de forma mais eficiente segundo valores de desempenho médio, e não somente em um único ponto de projeto. (LOMBARD *et al.*, 2011). Para avaliação de condicionadores de ar em condições de carga parcial, eficiência sazonal ou integrada, poderão ser aplicados os indicadores como: IEER (*Integrated Energy Efficiency Ratio*), HSPF (*Heating Seasonal Performance Factor*), SEER (*Seasonal Energy Efficiency Ratio*) e IPLV (*Integrated Part-Load Value*).

A *Air Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute* (AHRI) é uma reconhecida associação comercial norte americana, que representa os principais fabricantes de HVAC & Aquecimento de Água, Equipamentos e Componentes. A Tab. (2.3) apresenta a descrição de indicadores de eficiência energética (EEI), com suas respectivas descrições e unidades, identificando a norma AHRI (2010) que contempla cada indicador.

Tabela 2.3 - Indicadores de Eficiência Energética normatizados pela AHRI.

EEI	Definição	Descrição	Unidade	Norma
COP	<i>Coefficient of Performance</i>	Razão entre a taxa média de remoção de calor e a taxa média de energia elétrica consumida em um dado conjunto de condições de avaliação.	[W/W]	AHRI 550/560; AHRI 1230
EER	<i>Energy Efficiency Ratio</i>	Relação entre a capacidade de refrigeração líquida para o valor de entrada de energia, em uma determinada condição de avaliação.	[Btu/(W h)]	AHRI 210/240; AHRI 340/360; AHRI 550/560; AHRI 1230
IEER	<i>Integrated Energy Efficiency Ratio</i>	Número único de eficiência de resfriamento em carga parcial, calculado por um método determinado.	[Btu/(W h)]	AHRI 210/240; AHRI 340/360; AHRI 1230
SEER	<i>Seasonal Energy Efficiency Ratio</i>	Calor total removido do espaço durante um período anual de arrefecimento, dividido pela energia elétrica total consumida pelo aparelho de ar condicionado/bomba de calor.	[Btu/(W h)]	AHRI 210/240; AHRI 340/360 AHRI 1230
		Calor total removido por um sistema com uma capacidade <65.000 Btu / h [19.000 W] durante o período de uso normal para o resfriamento (não deve exceder 12 meses) dividida pelo consumo total de energia elétrica durante o mesmo período.	[Btu/(W h)]	
HSPF	<i>Heating Seasonal Performance Factor</i>	Capacidade total de uma bomba de calor (inclusive calor elétrico complementar) necessária para alcançar as necessidades de aquecimento durante o seu período de utilização normal anual dividido pelo total de energia elétrica.	[Btu/(W h)]	AHRI 210/240; AHRI 340/360; AHRI 1230
IPLV	<i>Integrated Part-Load Value</i>	Número singular de eficiência de carga parcial, calculado por um determinado método, em condições normais de avaliação.	[W/W]	AHRI 550/560; AHRI 340/360; AHRI 1230
			[Btu/(W h)]	
			[kW/TR]	

Fonte: Adaptado de Xavier (2016, p. 59).

No Brasil, o indicador de desempenho para condicionadores de ar adotado pelo INMETRO é o Coeficiente de Eficiência Energética (CEE), o qual relaciona a taxa de calor absorvida pelo equipamento e a taxa de energia total consumida pelo mesmo (W/W). O método de avaliação do CEE é a aplicação de testes de funcionamento em condições normalizadas, em calorímetros, em conformidade com a Portaria nº 007, de 04 de janeiro de 2011 do INMETRO (INMETRO, 2011).

2.3.1 Requisitos Mínimos de Eficiência Energética para Condicionadores de Ar

Segundo a ASHRAE *Standard* 90.1 (2010), os condicionadores de ar deverão atingir requisitos mínimos no que se refere à eficiência energética. Para o caso do sistema tipo *Split* com capacidade inferior a 19 kW (65 000 Btu/h), operando em refrigeração, é requerido um SCOP (*Seasonal Coefficient of Performance*) mínimo de 3,81 (SEER de 13), obtida através da aplicação de teste contido na norma AHRI 210/240 (2008), conforme mostrado na Tab. (2.4).

Tabela 2.4 Requisitos mínimos de eficiência energética para condicionadores de ar segundo a ASHRAE *Standard* 90.1.

Tipo de Equipamento	Capacidade	Subcategoria	Eficiência Mínima	Procedimento de Teste
Ar Condicionado, com condensação a ar	< 19 kW	<i>Split</i>	3,81 SCOP	AHRI 210/240

Fonte: Adaptado de ASHRAE (2010, p. 56).

Para os equipamentos do tipo *split* com tecnologia VRF, ou seja, cujo compressor possui velocidade variável e capacidade inferior a 19 kW (65 000 Btu/h), a eficiência mínima requerida é de 13,0 SEER (3,81 SCOP), conforme mostrado na Tab. (2.5), obtida através da aplicação de teste contido na norma AHRI 1230 (2010), tanto para equipamentos que operam somente em refrigeração como para os que operam também em aquecimento (ASHRAE, 2010).

Tabela 2.5 - Requisitos mínimos de eficiência energética para condicionadores de ar VRF segundo a ASHRAE *Standard* 90.1.

Tipo de Equipamento	Capacidade	Subcategoria	Eficiência Mínima	Procedimento de Teste
Ar Condicionado VRF, com condensação à ar	< 19 kW	<i>VRF Multi-Split</i>	13,0 SEER	AHRI 1230

Fonte: Adaptado de ASHRAE (2010, p. 64).

O consumidor brasileiro dispõe de uma ferramenta importante para avaliar a eficiência energética de um condicionador de ar: a classificação divulgada na ENCE. Essa ação faz parte do PBE, coordenado pelo INMETRO, que, com base na Lei da Eficiência Energética, publicada

em 17 de outubro de 2001 (BRASIL, 2001), tornou compulsória a participação dos fabricantes nos programas de etiquetagem.

O Selo PROCEL de Economia de Energia, instituído através de Decreto Presidencial de 08 de dezembro de 1993 e desenvolvido pelo Programa Nacional de Energia Elétrica, é concedido aos equipamentos que apresentam os melhores índices, ou seja, classificação A, divulgada na ENCE. Os fabricantes submetem seus produtos a ensaios específicos, em laboratórios idôneos, indicados pelo PROCEL, para obter a classificação e o Selo PROCEL (Classificação A). A Fig. (2.1) apresenta as imagens da etiqueta ENCE e o Selo PROCEL.

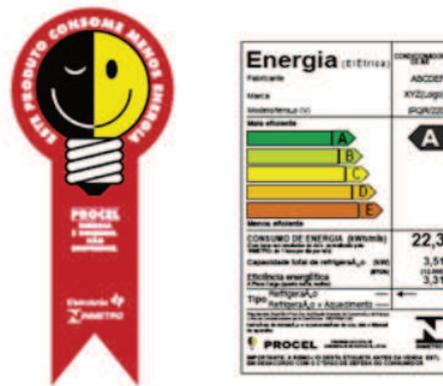


Figura 2.1 - Etiqueta ENCE e Selo PROCEL.

Fonte: INMETRO (2013).

Atualmente, o INMETRO disponibiliza na tabela de consumo/eficiência energética de condicionadores de ar *Split Hi Wall* informações sobre 1.242 modelos de equipamentos, subdivididos em grupos conforme a tecnologia empregada: rotação fixa e rotação variável. Para ser classificado, o equipamento precisa atingir um CEE mínimo de 2,60 W/W e, para obter o Selo PROCEL (classificação A) é necessário atingir, no mínimo, CEE de 3,23 W/W, conforme mostrado na Tab. (2.6).

Tabela 2.6 - Classificação dos condicionadores de ar *Split Hi Wall*.

Classes	Coeficiente de eficiência energética (W/W)		<i>Split Hi Wall</i>			
			Rotação Fixa		Rotação Variável	
A	3,23	< CEE	375	41,8%	315	91,3%
B	3,02	< CEE ≤ 3,23	178	19,8%	22	6,4%
C	2,81	< CEE ≤ 3,02	272	30,5%	8	2,3%
D	2,60	≤ CEE ≤ 2,81	70	7,8%	0	0,0%
			897		345	

Fonte: INMETRO (2017, p. 01).

Dentre os equipamentos classificados, 55,5% atingem a classificação A (Selo PROCEL), sendo 375 com rotação fixa e 315 com rotação variável (*inverter*). Assim, o consumidor que não possui conhecimento técnico sobre as vantagens da utilização da tecnologia VRF em relação à eficiência energética, dificilmente terá subsídios que possam contribuir para a sua decisão de compra.

Segundo o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R), o nível de eficiência da envoltória quando condicionada artificialmente é de caráter informativo, mas deve ser calculado para qualquer edificação, mesmo que naturalmente ventilada. A utilização de um condicionador de ar eficiente é considerada pelo RTQ-R como uma iniciativa que aumenta a eficiência da unidade habitacional autônoma, desde que comprovada e, por isso, será bonificada com até 0,2 pontos. Condicionadores de ar individuais do tipo parede (janela) ou *split* devem possuir Selo PROCEL (INMETRO, 2012).

O Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviço e Públicos (RTQ-C) trata os sistemas de condicionamento de ar de dois modos distintos, dependendo se os condicionadores de ar são avaliados pelo PBE/INMETRO ou não. Os sistemas que utilizam condicionadores de ar do tipo *split* são classificados através do nível de eficiência que o INMETRO atribui a cada modelo. Na página eletrônica do INMETRO, encontram-se tabelas com a classificação energética e os requisitos mínimos de eficiência para cada classe, para diversos modelos de condicionadores de ar, tais como: janela, *Split Hi Wall*, *Split Piso-Teto*, *Split Cassete* (INMETRO, 2012).

2.3.2 Padronização na Utilização de Indicadores de Eficiência Energética

Segundo Pessoa e Ghisi (2015), recomenda-se a normalização dos indicadores de eficiência energética, unidades de medida e procedimentos de medição em nível global, o que torna possível a comparação do desempenho energético de sistemas de condicionamento de ar em diferentes locais do mundo, além de possibilitar a implantação de programas de estímulo comerciais beneficiando tanto os países fabricantes quanto os importadores. Pessoa e Ghisi (2015) concluíram que o Brasil se beneficiaria caso adotasse níveis de eficiência energética mais restritivos para os sistemas de condicionamento de ar, visto que a indústria já detém conhecimento sobre tecnologias que permitem produzir equipamentos com maior eficiência energética. Os autores reforçam que o custo de implantação de sistemas com melhor

performance torna-se mais vantajoso, tanto para o País quanto para o consumidor final, do que o custo de energia usada em excesso por produtos ineficientes.

As unidades de medidas mais utilizadas pelos fabricantes na maior parte do mundo são o COP e o EER, os quais medem a eficiência do sistema operando com sua capacidade total. Essa prática é fortemente influenciada pelos fabricantes que priorizam a medição com capacidade total em detrimento da medição com capacidade parcial. O SEER é uma forma de medição que representa melhor a realidade operacional dos sistemas condicionadores de ar, pois estes operam em carga parcial na maior parte do ano. Além disso, o método é sensível ao clima local, tipologia da edificação e comportamento do usuário. O crescente uso do SEER é uma tendência global, sendo que nos Estados Unidos, Coreia, China e Japão já existem testes normatizados para a medição desse indicador de desempenho (ECONOLER *et al.*, 2011).

Econoler *et al.* (2011) realizaram um estudo, em colaboração com o *Collaborative Labeling and Appliance Standards Program* (CLASP), com o objetivo de fornecer ferramentas que permitam a comparação da eficiência dos condicionadores de ar utilizados nas principais economias do mundo. Essa pesquisa foi realizada em equipamentos com capacidade até 19 kW utilizados nos setores residencial e comercial de oito economias mundiais: Austrália, China, União Europeia, Japão, Índia, Coreia Taiwan e Estados Unidos. Através do desenvolvimento de equações matemáticas que minimizam a diferença nos procedimentos de medição e obtenção do SEER nas diferentes economias, são apresentadas comparações entre os índices mínimos de eficiência energética.

Os valores obtidos, mostrados na Tab. (2.7), representam os índices mínimos de eficiência energética exigidos para um determinado produto, se ele fosse testado segundo a norma de outro país e convertido para o SEER, utilizando como unidade W/W. Os resultados mostram que o nível de exigência no Japão é o maior dentre as nações estudadas, no que se refere aos condicionadores de ar com velocidade fixa e capacidade inferior a 3,2 kW.

Tabela 2.7 - Comparação dos valores de SEER mínimos para condicionadores de ar com velocidade fixa nas principais economias do mundo (W/W).

SEER adaptado para	Estados Unidos (2006) < 19,0 kW	União Europeia (2014) 6,0 a 12,0 kW	China (2008) < 4,5 kW	Coreia (2004) < 4,5 kW	Japão (2012) <3,2 kW
Norma americana	3,80	4,09	3,17	3,37	7,13
Norma japonesa (CSPF)	3,98	4,28	3,33	3,54	7,47
Norma japonesa (APF)	3,58	3,84	3,01	3,19	6,60
Norma chinesa	3,83	4,12	3,20	3,40	7,19
Norma coreana	3,80	4,08	3,17	3,37	7,12
Norma da União Europeia	4,28	4,60	3,57	3,80	8,02

Fonte: Adaptado de ECONOLER *et al.* (2011, p.39).

O Japão informa aos consumidores tanto o *Cooling Seasonal Performance Factor* (CSPF), que é o SEER para a parte do ano em que se usa a refrigeração, quanto o *Heating Seasonal Performance Factor* (HSPF), que é o SEER para a parte do ano em que se usa aquecimento. No Japão, também se informa o *Annual Performance Factor* (APF), que é a média ponderada dos dois anteriores (ECONOLER *et al.*, 2011).

Segundo Pereira, Lamberts e Ghisi (2013), o uso do coeficiente de eficiência energética sazonal é favorável para a avaliação de condicionadores de ar, principalmente os que utilizam a tecnologia *inverter*. Em mercados mais maduros, como a União Europeia, o Japão e os Estados Unidos, os condicionadores de ar do tipo *split* com tecnologia *inverter* estão amplamente disponíveis, assim como na China, onde as vendas desse modelo de equipamento estão crescendo rapidamente.

Em 2011, a União Europeia apresentou, através do Regulamento Delegado 626/2011, uma nova etiqueta de eficiência energética, mostrada na Fig. (2.2), introduzindo duas escalas de eficiência energética que utilizam o método de eficiência sazonal. Ao estabelecer requisitos mínimos de eficiência energética superiores aos da classe A utilizados anteriormente, o método de cálculo representou uma nova concepção ecológica e a reclassificação dos equipamentos do mercado. A partir dessa data, os condicionadores de ar do tipo janela (parede) e *split* devem dispor da nova escala de classes de eficiência energética de A a G, sendo acrescentado, de dois em dois anos, um “+” no topo da escala até se atingir a classe A+++ (SISTEMA DE ETIQUETAGEM ENERGÉTICA DE PRODUTOS - SEEP, 2011).

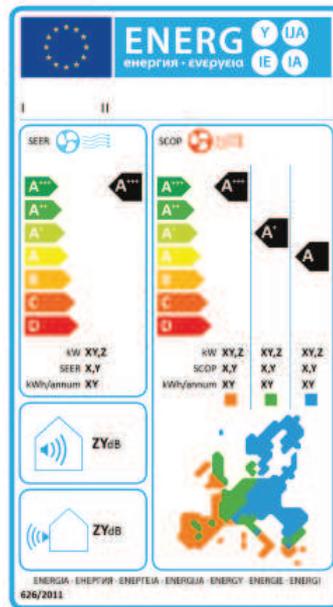


Figura 2.2 - Etiqueta de eficiência energética para condicionadores de ar do tipo *split* e janela da União Europeia.

Fonte: SEEP (2011, p. 10).

A nova etiqueta aplica-se para condicionadores de ar com capacidade até 12 kW e utiliza como indicadores de eficiência energética o SEER para refrigeração, e o SCOP para aquecimento. Ambos são expressos em W/W, cujos valores mínimos utilizados para a classificação estão dispostos na Tab. (2.8). A etiqueta apresenta valores diferentes de eficiência energética para três regiões diferentes da Europa, de acordo com as características de clima, identificadas pelas cores laranja, verde e azul.

Tabela 2.8 - Requisitos mínimos de eficiência energética de condicionadores de ar do tipo *split* e janela segundo a União Europeia (W/W).

Classe de Eficiência Energética	SEER	SCOP
A+++	SEER \geq 8,50	SCOP \geq 5,10
A++	6,10 \leq SEER < 8,50	4,60 \leq SCOP < 5,10
A+	5,60 \leq SEER < 6,10	4,00 \leq SCOP < 4,60
A	5,10 \leq SEER < 5,60	3,40 \leq SCOP < 4,00
B	4,60 \leq SEER < 5,10	3,10 \leq SCOP < 3,40
C	4,10 \leq SEER < 4,60	2,80 \leq SCOP < 3,10
D	3,60 \leq SEER < 4,10	2,50 \leq SCOP < 2,80
E	3,10 \leq SEER < 3,60	2,20 \leq SCOP < 2,50
F	2,60 \leq SEER < 3,10	1,90 \leq SCOP < 2,20
G	SEER < 2,60	SCOP < 1,90

Fonte: SEEP (2011, p. 9).

Shah, Waide e Phadke (2013) estimam que, no Brasil, a relação entre custo e benefício se mantém positiva para o consumidor final quando os sistemas de condicionamento de ar tiverem o índice de eficiência energética de até 5,67 W/W. Isso significa que o valor da energia economizada ao final da vida útil do produto seria igual ao diferencial de custo pago pelo produto mais eficiente. Os autores estimam que o País poderia economizar 18 TWh por ano se todos os sistemas de condicionamento de ar do estoque fossem substituídos, no período entre os anos de 2012 e 2020, por sistemas com eficiência energética de 5,67W/W, no mínimo.

Pereira, Lamberts e Ghisi (2013) indicam que, no Brasil, é importante manter o diálogo com a indústria para elevar os níveis mínimos de eficiência. Quanto aos *splits*, é imprescindível e urgente a determinação de níveis mínimos de eficiência mais elevados, impulsionando o mercado a privilegiar os melhores equipamentos. É também importante a adoção do coeficiente de eficiência energética sazonal como parâmetro na regulamentação brasileira para favorecer os equipamentos com tecnologia *inverter*, notadamente mais eficientes que os convencionais.

2.4 INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS SOBRE O DESEMPENHO ENERGÉTICO

O consumo de energia de um sistema de condicionamento de ar é função do desempenho térmico da edificação e da eficiência do sistema de condicionamento de ar nas suas diversas condições de operação. O desempenho térmico de uma edificação está diretamente relacionado às condicionantes climáticas, como temperatura do ar, umidade e radiação. Por sua vez, essas variações estão relacionadas com a forma de ocupação dos ambientes e com as variações climáticas. Já a eficiência de um sistema de climatização é função da forma como ele responde às variações de carga térmica ao longo do ano. Em outras palavras, ela é determinada pelo consumo de energia de cada componente do sistema e a capacidade de refrigeração nas diversas formas de operação durante todo ano. Portanto, o desempenho do sistema é influenciado principalmente pela eficiência dos equipamentos, configuração do sistema e estratégias de operação (DUARTE, 2014).

2.4.1 Zoneamento Bioclimático Brasileiro

A NBR 15220 – Desempenho Térmico de Edificações – Parte 3, (ABNT, 2005) apresenta o Zoneamento Bioclimático Brasileiro e as Diretrizes Construtivas para Habitações

Unifamiliares de Interesse Social. Cinco estratégias de projeto foram estabelecidas (aquecimento solar da edificação, massa térmica para aquecimento, conforto térmico, desumidificação e ventilação) para classificar o clima de cada cidade em uma das oito zonas climáticas estabelecidas. A Tab. (2.9) apresenta as principais características de cada zona bioclimática (ZB), mostrando a grande diversidade do clima brasileiro, mas também algumas similaridades que permitem, para caso de estudo, que algumas zonas bioclimáticas possam ser agrupadas, tais como ZB 2 - ZB 3, ZB 4 - ZB 5 e ZB 6 - ZB 8.

Tabela 2.9 - Características das zonas bioclimáticas brasileiras.

Zona Bioclimática	Característica Climática
ZB 1	Clima predominantemente frio, com invernos frios, verões amenos e chuvas bem distribuídas.
ZB 2	Clima ameno, com verões quentes e invernos frios, grandes amplitudes térmicas diárias.
ZB 3	Clima predominantemente ameno, tendendo ao úmido ao longo do ano, frio à noite no inverno e calor e umidade no verão.
ZB 4	Invernos secos com noites frias e verões úmidos e tardes quentes durante o ano todo.
ZB 5	Clima predominantemente quente e úmido na maior parte do ano e chuvas concentradas no verão.
ZB 6	Clima predominantemente seco com noites confortáveis e tardes muito quentes e chuvas somente no verão.
ZB 7	Clima quente e seco, com chuvas escassas.
ZB 8	Clima quente e úmido com chuvas durante todo o ano.

Fonte: Adaptado de ABNT (2005).

Segundo o RTQ-C, algumas Zonas Bioclimáticas, listadas na Tab. (2.9), podem ser agrupadas, pois as simulações não mostraram diferenças significativas entre os consumos de energia de edificações simuladas nas referidas zonas. Conforme mostrado na Fig. (2.3), as zonas bioclimáticas 2-3, 4-5 e 6-8 podem ser agrupadas e as zonas 1 e 7, não (INMETRO, 2010).

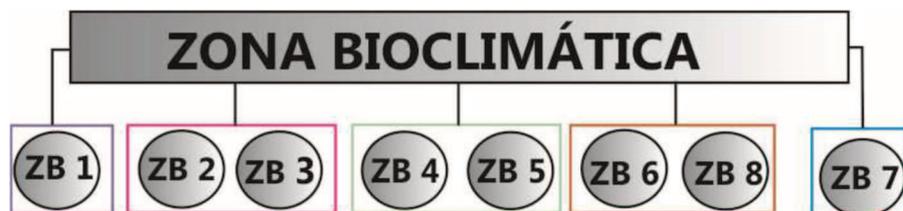


Figura 2.3 - Agrupamento das zonas bioclimáticas brasileiras.

Fonte: INMETRO (2010, p. 107).

2.4.2 Grau Dia

A ASHRAE *Standard* 90.1 utiliza o conceito de Grau-Dia, que corresponde à soma das diferenças entre a temperatura do ar exterior e uma temperatura de referência (base), para um período de tempo pré-determinado. Segundo essa norma, quando o conceito é aplicado para refrigeração, o parâmetro calculado é o CDD (*Cooling Degree-Days*) e quando se trata de aquecimento, o parâmetro é o HDD (*Heating Degree-Days*). Quanto maior o valor de HDD, menores são os valores de temperaturas médias diárias. O oposto ocorre para os valores de CDD.

Goulart (1993) explica que, se, por exemplo, a temperatura base adotada for 18 °C, verifica-se a temperatura média diária durante todo o ano. Já quando ela for menor que a temperatura base, calcula-se a diferença e, somando-se essas diferenças durante todo o ano, obtém-se o CDD.

2.4.3 Arquivos Climáticos

Segundo o RTQ-C, um arquivo climático deve possuir como características: fornecer valores horários para todos os parâmetros relevantes, tais como temperatura e umidade, direção e velocidade do vento e radiação solar; os dados climáticos devem ser representativos da zona bioclimática onde o projeto proposto será locado; devem ser utilizados arquivos climáticos e formatos publicados no site www.eere.energy.gov, tais como o TRY, o TMY. (INMETRO, 2010) ou aprovados por um laboratório de referência.

O programa de simulação computacional *EnegyPlus* é capaz de efetuar cálculos utilizando informações do clima definido pelo usuário, através de arquivos climáticos que possuam extensão *.epw*, os quais contêm dados climáticos das 8760 horas de um ano. Goulart, Lamberts e Firmino (1998) descrevem o *Test Reference Year* (TRY) como um arquivo climático formado através de uma metodologia baseada na eliminação de anos cujos dados contêm temperaturas médias mensais extremas (altas ou baixas) até que se obtenha apenas um ano de dados médios, denominado como Ano Climático de Referência.

Os arquivos climáticos obtidos através da metodologia TRY (*Test Reference Year*), transformados em arquivos com extensão *.epw* estão disponíveis na página eletrônica do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE), e cujos dados foram medidos em aeroportos em 14 capitais brasileiras. As referidas capitais são: Belém/PA, Brasília/DF,

Curitiba/PR, Florianópolis/SC, Fortaleza/CE, Maceió/AL, Natal/RN, Recife/PE, Rio de Janeiro/RJ, Salvador/BA, São Luis/MA, São Paulo/SP e Vitória/ES.

Segundo Carlo (2005), o *Typical Meteorological Year* (TMY) é uma compilação de meses sem extremos de temperatura proveniente de diferentes anos, gerando um ano climático que nunca existiu, mas que representa temperaturas sem extremos para cada mês. O *National Climatic Data Center* (NCDC), pertencente ao DOE dos Estados Unidos, reuniu uma base de dados climáticos horários de estações de aeroportos brasileiros, a qual foi tratada de acordo com a metodologia de um TMY, versão dois e apresenta dados que não existem no formato original do TRY, tais como: dados de radiação solar global horizontal e direta normal. Devido à baixa qualidade dos dados climáticos brasileiros fornecidos ao NCDC para formação dos arquivos TMY, apenas Belém/PA, Brasília/DF, Recife/PE e São Paulo/SP tiveram seus arquivos processados e transformados em formato *.epw*.

O projeto SWERA (*Solar and Wind Resource Assessment*) teve início em 2001 com o objetivo de disponibilizar informações solares e de vento. Hoje fornece informações sobre dados de recursos energéticos renováveis para diversas regiões do mundo. O projeto SWERA, juntamente com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o LABSOLAR da UFSC disponibilizam arquivos climáticos TMY para 20 cidades brasileiras. (SCHELLER *et al.*, 2015). Os arquivos climáticos elaborados pelo projeto SWERA, os quais foram convertidos pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) para extensão *.epw*, e que estão disponíveis no LabEEE são: Belém/PA, Belo Horizonte/MG, Boa Vista/AC, Bom Jesus da Lapa/BA, Brasília/DF, Campo Grande/MS, Cuiabá/MT, Curitiba/PR, Florianópolis/SC, Fortaleza/CE, Jacareacanga/PA, Manaus/AM, Petrolina/PE, Porto Nacional/TO, Porto Velho/RO, Recife/PE, Rio de Janeiro/RJ, Santa Maria/RS e São Paulo/SP.

2.5 INFLUÊNCIA DA TECNOLOGIA VRF EM CONDICIONADORES DE AR

A tecnologia *Variable Refrigerant Flow* (VRF) aplicada aos condicionadores de ar foi introduzida no Japão na década de 80, mas foi o desenvolvimento tecnológico verificado a partir da década de 90 que permitiu seu aperfeiçoamento e, conseqüentemente, sua atual competitividade no mercado. Na Ásia e na Europa, o sistema de condicionamento de ar VRF tem boa aceitação. No Japão, onde o mercado tem mais força, é empregado em

aproximadamente 50% dos edifícios comerciais de médio porte e em 33% dos edifícios de grande porte (GOETZLER, 2007).

Bhatia (2014) comenta que a tecnologia VRF permite excepcional eficiência em cargas parciais. Como a maioria dos sistemas de ar condicionado (HVAC) usa suas horas de operação entre 30 – 70% de sua capacidade máxima, o coeficiente de desempenho (COP) do VRF é muito alto e a eficiência energética sazonal destes sistemas é excelente.

2.6 ANÁLISE ENERGÉTICA ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Segundo Brofman (2014), a simulação do desempenho termo-energético de edificações é uma ferramenta cada vez mais utilizada na concepção de prédios mais eficientes energeticamente. Além de permitir prever soluções que são consideradas aliadas da sustentabilidade, pelo seu baixo consumo de energia, a simulação permite que os ganhos de aplicação dessas soluções sejam mensurados de maneira mais precisa.

A utilização de ferramentas computacionais pode ocorrer tanto na fase de projeto quanto durante a construção da edificação, fornecendo como vantagem a possibilidade de se testar soluções mais eficientes sem a necessidade de intervenção na edificação.

De acordo com o RTQ-C (INMETRO,2010), o programa computacional de simulação termo-energética deve possuir, no mínimo, as seguintes características:

- a) ser um programa para a análise do consumo de energia em edifícios;
- b) atender os requisitos da ASHRAE *Standard* 140;
- c) simular 8.760 horas por ano;
- d) simular variações horárias de ocupação, potência de iluminação e equipamentos e sistemas de ar condicionado, definidos separadamente para cada dia da semana e feriados;
- e) simular efeitos de inércia térmica;
- f) permitir a simulação de multizonas térmicas;
- g) deve ter capacidade de simular as estratégias bioclimáticas adotadas no projeto;
- h) caso o edifício proposto utilize sistema de condicionamento de ar, o programa deve permitir modelar todos os sistemas de condicionamento de ar listados na ASHRAE 90.1;
- i) determinar a capacidade solicitada pelo Sistema de Condicionamento de Ar;
- j) produzir relatórios horários do uso final de energia.

2.6.1 Programa Computacional *EnergyPlus*

O *EnergyPlus* é um programa computacional de simulação dinâmica, desenvolvido pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory* em sociedade com outros laboratórios para o Departamento de Energia Norte-Americano (DOE). Ele é utilizado por engenheiros e arquitetos para avaliar a economia de energia proporcionada por diferentes opções de projeto (LAMBERTS; WESTPHAL; BATISTA, 2005).

O programa calcula as temperaturas internas e as cargas de aquecimento e resfriamento e, utilizando arquivos climáticos de dados horários, é capaz de dimensionar sistemas de condicionamento de ar, verificando o consumo de energia resultante.

Em dezembro de 2011, o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) divulgou o *EnergyPlus*, versão 7.0, cujos modelos matemáticos mais refinados permitem modelar uma grande variedade de edifícios residenciais e comerciais utilizando sistemas HVAC. Esta versão apresentou melhorias significativas com relação à anterior, tais como:

- a) aumento de 25 a 40% na velocidade de execução para uma grande variedade de modelos;
- b) melhoria no cálculo da taxa de ventilação, com base nos procedimentos da ASHRAE Standard 62.1;
- c) novo relatório de conforto térmico baseado na ASHRAE Standard 55.1;

Porém, o grande diferencial dessa versão reside na possibilidade de simulação de sistemas com vazão variável de refrigerante (VRF).

Segundo Duarte (2014), devido à grande complexidade, o *EnergyPlus* necessitou de diversos estudos de implementação de sub-rotinas para simulação do VRF até apresentar a versão oficial com o módulo VRF.

2.6.2 Utilização do *EnergyPlus* na Avaliação de Sistemas VRF

Zhou *et al.* (2007) desenvolveram um módulo no programa *EnergyPlus* para modelagem e análise do desempenho do sistema de condicionador de ar VRF. O modelo matemático desenvolvido determina o desempenho da serpentina na condição de carga parcial,

baseado no objeto “aircooledDXcoil” do *EnergyPlus*. A simulação de um sistema *multi-split* (uma condensadora e duas evaporadoras) foi realizada para um dia de projeto de verão, variando-se a temperatura de *set-point* do termostato e o número de unidades internas em funcionamento. O estudo analisou a relação do funcionamento em cargas parciais (PLR) e o desempenho (COP) e, para a simulação estudada, foi observado que os maiores valores de COP ocorreram na faixa de PLR de 0,4 a 0,6.

Os autores realizaram também uma comparação entre o modelo simulado com o sistema de um condicionador de ar *multi-split* VRF e com aparelhos do tipo janela, instalados um para cada zona. O sistema VRF obteve resposta mais flexível e sensível à carga térmica, maior rendimento operacional, maior COP e melhor desempenho em cargas parciais.

Zhou *et al.* (2008) avaliaram o rendimento energético de um sistema VRF, utilizando o programa de simulação *EnergyPlus*, e validaram os resultados ao compará-los com dados experimentais. A edificação utilizada no experimento foi o Laboratório de Termodinâmica da *Shanghai Jiaotong University*, na China. A coleta de dados foi feita durante um período de seis dias e, para tanto, foram instalados 22 termômetros, além de dois higrômetros e dois medidores de potência. Os resultados mostraram que o sistema VRF é capaz de regular a taxa de massa de refrigerante para as diversas unidades evaporadoras existentes, de acordo com a necessidade de refrigeração individual de cada zona.

No estudo, verificou-se que o erro relativo entre o simulado e o medido foi de 28,31% no consumo de energia e de 25,19% na capacidade de refrigeração. O erro médio encontrado para o COP foi de 6,36%, sendo que foi evidenciado que na primeira hora de funcionamento do VRF o erro no COP atingiu 10,17%, o que demonstra que as curvas de desempenho utilizadas pelo programa de simulação não são capazes de refletir com precisão o processo transiente que ocorre durante o início de operação de um VRF. O PLR (*Part Load Ratio*) durante o período de medição variou entre 0,497 e 0,779 e o erro médio encontrado foi de 18,4%. Foi comprovado que o desempenho energético do VRF em carga parcial é melhor que a condição nominal e, como essa condição possui grande possibilidade de se repetir ao longo das horas de utilização do equipamento, existe grande potencial de economia de energia.

Pozza (2011) apresentou uma análise térmica de uma edificação, situada na cidade de Caxias do Sul/RS, desenvolvida com a utilização do *EnergyPlus*, na qual determinou o consumo anual de energia elétrica de toda a edificação, bem como o consumo do sistema HVAC do equipamento do tipo *split* com ciclo reverso com fluxo variável de refrigerante (VRF). O sistema foi simulado adaptando o módulo de simulação de serpentinas de expansão direta com

compressores de velocidade variável para quatro faixas de capacidades do compressor (60, 80, 100 e 120%). Para cada uma delas, foram inseridas as correlações de desempenho da capacidade e potência elétrica de aquecimento e refrigeração para diferentes condições de operação. Os resultados obtidos com o sistema VRF apresentaram uma redução de 32,85% no consumo de energia, quando comparado a um sistema *split* com velocidade fixa.

Kwon *et al.* (2012) compararam o desempenho energético obtido através de simulação com resultados medidos em campo de um condicionador de ar VRF com seis unidades internas acopladas à uma unidade externa, em uma edificação localizada em Maryland, nos EUA. O estudo, realizado com o novo módulo VRF do *EnergyPlus* versão 7.0, mostrou que o erro relativo para o consumo de energia elétrica foi de 7,97% ao dia, 2,40% na semana e 2,22% no mês. Com esse estudo, os autores observaram que, utilizando o novo módulo para VRF do *EnergyPlus*, a diferença entre os dados medidos e simulados foi menor que os resultados obtidos por Zhou *et al.* (2008), quando o novo módulo de VRF não havia sido disponibilizado.

Xavier (2016) avaliou a influência das condições climatológicas sobre o desempenho de um sistema de condicionamento de ar VRF em condições de carga parcial para uma edificação comercial (hotel) em quatro cidades brasileiras: São Paulo/SP, Rio de Janeiro/RJ, Fortaleza/CE e Brasília/DF. A performance dos equipamentos VRF foi analisada em condições de carga plena e parcial e os resultados foram apresentados através do COP (*Coefficient of Performance*) e ICOP (Coeficiente Integrado de Performance). Foi observado que os condicionadores de ar VRF utilizados atingiram seu coeficiente máximo de performance (COP_{\max}) na condição de 50% de PLR contra o COP de 3,4 na condição nominal. Utilizando um indicador de eficiência energética integrado, foi obtido ICOP de 6,8 enquanto o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviço e Públicos, RTQ-C exige ICOP de 3.7.

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a avaliação energética de condicionadores de ar do tipo *Split Hi Wall* aplicado a ambientes residenciais e comerciais de pequeno porte será apresentada neste capítulo, obedecendo às seguintes etapas:

- a) seleção das localidades que representem as diferentes condições climáticas do País, as quais serão utilizadas como base para a simulação dos ambientes;
- b) definição das características construtivas do ambiente que atendam as normas vigentes sobre envoltórias de edificações;
- c) definição das características de ocupação e utilização dos ambientes segundo as recomendações contidas nas normas vigentes;
- d) determinação dos coeficientes utilizados nas curvas que representam o comportamento do condicionador de ar operando em refrigeração, com velocidade fixa e velocidade variável;
- e) utilização do *EnergyPlus* para simulação do comportamento termo-energético dos condicionadores de ar, quando aplicados aos ambientes e localidades definidas.

3.1 SELEÇÃO DAS LOCALIDADES

A análise do comportamento energético proposta foi realizada com base nos resultados obtidos através de simulação de um mesmo ambiente em seis cidades brasileiras. A seleção das cidades foi realizada utilizando-se as seguintes premissas:

- a) a cidade deve possuir relevância no cenário nacional;
- b) cada cidade deve representar uma zona bioclimática brasileira ou um agrupamento;
- c) os arquivos climáticos que representam o comportamento das cidades selecionadas devem ter sido elaborados através do mesmo método;
- d) as cidades selecionadas devem representar diferentes níveis de necessidade de refrigeração, baseados nos valores de grau-dia;
- e) as cidades selecionadas devem representar diferentes climas com pequena, média e grande amplitude térmica.

As capitais representam a localidade de maior relevância política e financeira de cada estado. Por esse motivo, possuem um maior número de informações disponíveis sobre sua condição climática e, assim, foram selecionadas para este estudo somente capitais.

3.1.1 Seleção das Localidades com Base nas Zonas Bioclimáticas Brasileiras

A relação contendo 330 cidades do Brasil cujos climas foram classificados, disponibilizada na NBR 15220 – Parte 3 (ABNT, 2005), foi utilizada para verificar as capitais brasileiras que representam cada uma das zonas bioclimáticas (ZB) existentes no País, conforme disposto na Tab. (3.1). Visto que nas zonas bioclimáticas ZB2 e ZB5 não existem capitais associadas e que existe similaridade entre as características climáticas entre as zonas ZB2 e ZB3, assim como entre as zonas ZB4 e ZB5, foi utilizada a estratégia de agrupamento apresentada no RTQ-C (INMETRO, 2010) e mostrada na Fig. (2.3), para obter-se uma maior representatividade.

Curitiba/PR e Brasília/DF foram selecionadas para o estudo por serem as únicas capitais associadas, respectivamente, à zona bioclimática ZB1 e ao agrupamento ZB4 – ZB5.

Tabela 3.1 - Capitais associadas a cada zona bioclimática brasileira.

Zona Bioclimática	Capital / UF
ZB1	Curitiba / PR
ZB2 - ZB3	Belo Horizonte / MG Florianópolis / SC Porto Alegre / RS São Paulo / SP
ZB4 – ZB5	Brasília / DF
ZB6	Campo Grande / MS Goiânia / GO
ZB7	Cuiabá / MT Teresina / PI
ZB8	Belém / PA Fortaleza / CE João Pessoa / PB Macapá / AP Maceió / AL Manaus / AM Natal / RN Porto Velho / RO Recife / PE Rio Branco / AC Rio de Janeiro / RJ Salvador / BA São Luiz / MA Vitória / ES

Para as zonas ou agrupamentos que possuem mais de uma capital associada, foram utilizados os demais critérios de seleção (disponibilidade de arquivo climático, valores de grau-dia, amplitude térmica).

3.1.2 Disponibilidade de Arquivos Climáticos

O devido conhecimento das condições climáticas externas é de suma importância, pois elas representam informações básicas para o projeto de sistemas condicionadores de ar, podendo colaborar para a redução no consumo de energia. Além disso, permite simulações (energéticas) mais detalhadas das edificações.

Segundo recomendações do RTQ-R e RTQ-C, devem ser utilizados arquivos climáticos disponibilizados pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (www.eere.energy.gov), nos formatos TRY e TMY e extensão *.epw*, contendo dados climáticos das 8.760 horas de um ano. Para selecionar as localidades para este estudo, verificou-se a disponibilidade dos arquivos climáticos no laboratório de referência LABEE (www.labee.ufsc.br), desenvolvidos através das metodologias TRY ou TMY e apresentados na Tab. (3.2). Os arquivos climáticos TMY foram elaborados pelo NCDC (*National Climatic Data Center*) ou pelo projeto SWERA (*Solar and Wind Resource Assessment*).

As capitais Goiânia/GO, Macapá/AP, Teresina/PI e Rio Branco/AC foram excluídas do presente estudo por não possuírem arquivos climáticos disponíveis. Dessa forma, Campo Grande/MS e Cuiabá/MT foram selecionadas para representar as zonas bioclimáticas ZB6 e ZB7, respectivamente.

Como as quatro capitais selecionadas, destacadas em amarelo na Tab. (3.2), possuem em comum arquivos climáticos TMY, elaborados no projeto SWERA, esse tipo foi adotado como padrão para esta pesquisa. Assim, as capitais Maceió/AL, Natal/RN, Porto Alegre/RS, São Luiz/MA e Vitória/ES, cujos arquivos climáticos disponibilizados são TRY, também foram excluídas da seleção.

Tabela 3.2 - Disponibilidade de arquivos climáticos das capitais brasileira.

Fonte: Adaptado de LABEE (2016).

Zona Bioclimática	Capital / UF	Arquivo Climático		
		TRY	TMY NCDC	TMY SWERA
ZB1	Curitiba / PR	Disponível		Disponível
ZB2 - ZB3	Belo Horizonte / MG Florianópolis / SC Porto Alegre / RS São Paulo / SP	Disponível Disponível Disponível	Disponível	Disponível Disponível Disponível
ZB4 - ZB5	Brasília / DF	Disponível	Disponível	Disponível
ZB6	Campo Grande / MS Goiânia / GO			Disponível
ZB7	Cuiabá / MT Teresina / PI			Disponível
ZB8	Belém / PA Fortaleza / CE João Pessoa / PB Macapá / AP Maceió / AL Manaus / AM Natal / RN Porto Velho / RO Recife / PE Rio Branco / AC Rio de Janeiro / RJ Salvador / BA São Luiz / MA Vitória / ES	Disponível Disponível Disponível Disponível Disponível Disponível Disponível Disponível Disponível Disponível Disponível Disponível Disponível	Disponível Disponível	Disponível Disponível Disponível Disponível Disponível Disponível Disponível Disponível Disponível

3.1.3 Análise do Grau-Dia na Seleção das Localidades

A análise foi realizada com base nos valores de Grau-Dia para refrigeração (CDD), apresentados no capítulo 14 da *ASHRAE Handbook Fundamentals* (ASHRAE, 2009), os quais consideram o período de um ano para calcular a soma das diferenças entre a temperatura do ar exterior e uma temperatura base de 18,3°C (65°F). A Tab. (3.3) mostra os valores de CDD calculados pela ASHRAE para as capitais selecionáveis, sendo que no agrupamento ZB2-ZB3 e na zona bioclimática ZB8, cujas representantes ainda não foram definidas, as capitais foram apresentadas em ordem decrescente de CDD. João Pessoa/PA, por não possuir resultado publicado pela ASHRAE, foi excluída da seleção.

Entre as capitais selecionadas até esta etapa, Cuiabá/MT é a capital onde se verifica maior necessidade de refrigeração, seguida de Campo Grande/MS. Curitiba/PR e Brasília/DF, com CDD de baixo valor, representam localidades com menor necessidade de refrigeração.

Tabela 3.3 – CDD das capitais selecionáveis.

Zona Bioclimática	Capital / UF	CDD
ZB1	Curitiba / PR	1085
ZB2 - ZB3	Belo Horizonte / MG Florianópolis / SC São Paulo / SP	2485 2376 2022
ZB4 – ZB5	Brasília / DF	2422
ZB6	Campo Grande / MS	4613
ZB7	Cuiabá / MT	6065
ZB8	Recife / PE Fortaleza / CE Manaus / AM Belém / PA Porto Velho / RO Natal / RN Rio de Janeiro / RJ João Pessoa / PB	6178 6161 6132 6008 5879 5716 4135 -

3.1.4 Amplitude Térmica das Localidades

A amplitude demonstra a estabilidade térmica de cada localidade estudada, sendo que para este estudo foram selecionadas três capitais com grande variação de amplitude térmica, uma capital com média e duas com baixa variação.

A amplitude térmica foi obtida através da diferença entre a máxima e a mínima Temperatura de Bulbo Seco externa (TBSe), registrada no período de um ano, com base nos arquivos climáticos, disponíveis na página eletrônica do LabEEE. A Tab. (3.4) mostra os valores tomados como base para o cálculo e a amplitude térmica anual das capitais selecionáveis, sendo que, no agrupamento ZB2-ZB3 e na zona climática ZB8, as capitais estão dispostas em ordem decrescente de amplitude.

Dentre as capitais já selecionadas, destacadas em amarelo na Tab. (3.4), Curitiba/PR, Campo Grande/MS e Cuiabá/MT apresentam grande variação de amplitude térmica e Brasília/DF com média variação. Logo, a seleção de localidades foi completada com as capitais com menor variação de amplitude térmica nas suas respectivas zonas bioclimáticas: São Paulo/SP no agrupamento ZB2-ZB3 e Fortaleza/CE na zona climática ZB8.

Tabela 3.4 – Amplitude térmica anual das capitais selecionáveis.

Zona Bioclimática	Capital / UF	Mín.TBS_e (°C)	Máx.TBS_e (°C)	Amplitude (°C)
ZB1	Curitiba / PR	-0,10	32,20	32,30
ZB2 - ZB3	Florianópolis / SC	5,10	31,90	26,80
	Belo Horizonte / MG	8,30	34,80	26,50
	São Paulo / SP	8,50	33,80	25,30
ZB4 – ZB5	Brasília / DF	11,20	32,70	21,50
ZB6	Campo Grande / MS	7,00	37,90	30,90
ZB7	Cuiabá / MT	9,60	40,00	30,40
ZB8	Rio de Janeiro / RJ	10,90	37,00	26,10
	Porto Velho / RO	16,80	36,30	19,50
	Manaus / AM	20,60	37,00	16,40
	Recife / PE	18,50	32,10	13,60
	Salvador / BA	20,40	33,90	13,50
	Belém / PA	22,10	34,40	12,30
	Fortaleza / CE	21,00	32,40	11,40

3.1.5 Localidades selecionadas

As localidades selecionadas para este estudo representam variedades significativas do clima brasileiro e colaboram para entender a influência das condições externas sobre a eficiência energética dos condicionadores de ar, operando em refrigeração. A Tab. (3.5) apresenta o resumo dos parâmetros que foram considerados para a seleção.

Tabela 3.5 – Capitais selecionadas e seus parâmetros de seleção.

Zona Bioclimática	Capital / UF	CDD	TBS_e Média (°C)	Amplitude Anual (°C)	Arquivo Climático
ZB1	Curitiba / PR	1085	17,29	32,30	TMY (SWERA)
ZB2 – ZB3	São Paulo / SP	2022	19,57	20,90	TMY (SWERA)
ZB4 – ZB5	Brasília / DF	2422	21,08	21,50	TMY (SWERA)
ZB6	Campo Grande / MS	4613	23,42	30,90	TMY (SWERA)
ZB7	Cuiabá / MT	6065	26,27	30,40	TMY (SWERA)
ZB8	Fortaleza / CE	6161	26,65	11,40	TMY (SWERA)

3.2 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DA ENVOLTÓRIA

Segundo o RTQ-R, a envoltória protege o interior da edificação - quanto mais exposto o interior da edificação, maior a troca térmica permitida entre o interior e o exterior. Sendo assim, envoltórias com maiores trocas térmicas implicam em elevados ganhos de calor em climas mais quentes (radiação solar, temperatura, etc) ou maiores perdas de calor em climas frios (infiltração, diferenças de temperatura, etc) (INMETRO, 2012).

Tavares (2006) e Morishita (2011) concluíram que, devido à impossibilidade de se considerar todas as tipologias existentes, o meio mais eficaz para se realizar estudos relacionados à eficiência energética sobre o setor residencial quando se deseja analisar os contrastes advindos das características da edificação, é através de definição de modelos de natureza empírica que sejam representativos da realidade.

Nesse estudo, uma envoltória com as mesmas características construtivas foi utilizada como base para simular o comportamento energético de um condicionador de ar do tipo *split* nas seis capitais brasileiras selecionadas. A modelagem em 3D foi feita com o aplicativo *Google Sketch Up* e, através do *Legacy Open Studio plug-in*, os dados definidos de cada entidade (parede, teto, piso, janela e porta) foram utilizados na simulação no *EnergyPlus*.

A Fig. (3.1) apresenta a planta baixa e a envoltória modelada em 3D, a qual pretende reproduzir, de forma simplificada, condições próximas das reais para este tipo de edificação, visto que não se trata de uma construção existente, e sim um objeto de simulação.

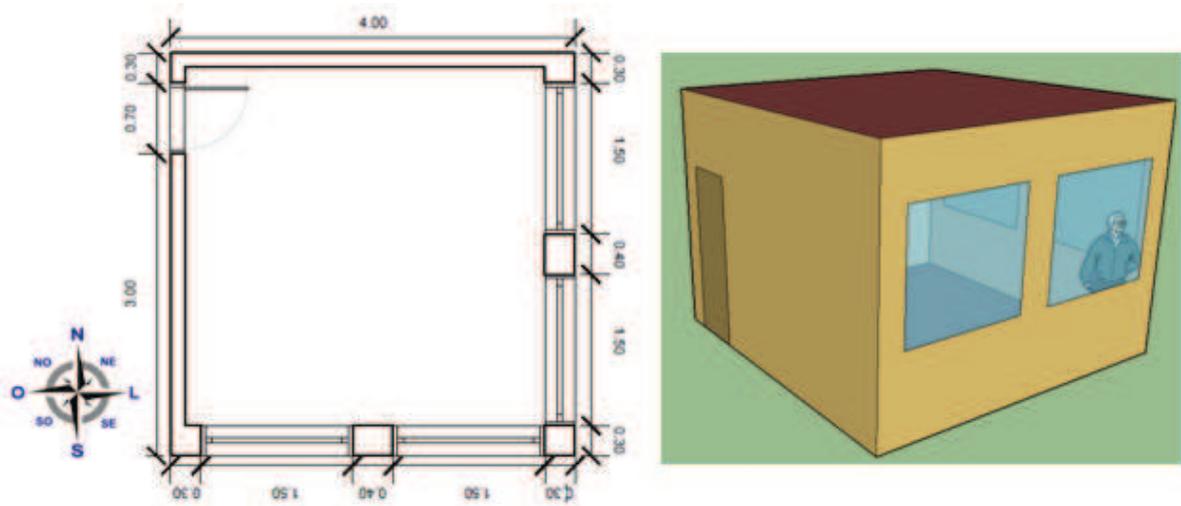


Figura 3.1 – Planta Baixa e modelagem em 3D da envoltória no *SketchUp*.

O ambiente modelado possui 16 m², construído entre andares em um prédio. As paredes externas voltadas para o Leste e Sul, expostas ao sol e ao vento, possuem as mesmas dimensões e igual área de 7,8 m². Em cada uma dessas paredes, existem duas janelas com área de 2,1 m², cuja razão entre a área de janela e a área de parede (*Window to Wall Ratio* - WWR) corresponde a 35%. A parede voltada para o Norte, com área de 12 m², divide o ambiente estudado de outro ambiente condicionado, por isso foi considerada adiabática. A parede frontal do ambiente, voltada para o Oeste possui área de 10,53 m² e nela está posicionada uma porta de madeira com 1,47 m² de área, a qual permite o acesso a um corredor não condicionado.

Os materiais utilizados na envoltória, cujas propriedades físicas estão dispostas na Tab. (3.6), foram selecionados com base no modelo três de edificação multifamiliar para família de média renda, definido por Tavares (2006). A estrutura é construída em concreto armado. As paredes externas possuem espessura total de 0,25 m, sendo constituídas de blocos cerâmicos, com 0,20 m de espessura, com reboco interno e externo de 0,025 m de espessura. As paredes internas são constituídas de blocos cerâmicos de 0,09 m de espessura e reboco interno e externo de 0,025 m de espessura, totalizando 0,14 m de espessura. Teto e piso são constituídos de laje armada em blocos cerâmicos, com espessura de 0,090 m, e reboco em ambas as faces de 0,025 m de espessura.

Tabela 3.6 – Propriedades físicas dos materiais utilizados na envoltória.

Material	L m	κ W/(m K)	ρ kg/m ³	C _p J/(kg K)	α		
					Térmica	Solar	Visível
Bloco cerâmico (parede ext.)	0,200	0,89	1920	790			
Bloco cerâmico (parede int.)	0,090	0,89	1920	790			
Bloco cerâmico (teto e piso)	0,090	0,89	1920	790			
Vigas Concreto (teto e piso)	0,090	1,95	2240	900			
Reboco (paredes, teto e piso)	0,025	0,72	1856	840	0,90	0,30	0,30

Fonte: Adaptado de ENERGYPLUS (2015c).

As janelas localizadas nas paredes externas Oeste e Sul são construídas em esquadrias de alumínio e utilizam vidro do tipo CLEAR, com espessura de 3 mm, cujas características estão dispostas na Tab. (3.7). Além disso, possuem proteção interna de cortinas.

Tabela 3.7 – Propriedades termo físicas do vidro tipo CLEAR.

Fonte: Adaptado de ENERGYPLUS (2015c).

Propriedade	Valor	Unidade
Transmitância Solar	0,837	
Transmitância Visível	0,898	
Refletância Solar (face externa)	0,075	
Refletância Solar (face interna)	0,075	
Refletância Visível (face externa)	0,081	
Refletância Visível (face interna)	0,081	
Emissividade (face externa)	0,840	
Emissividade (face interna)	0,840	
Condutividade Térmica	0,900	W/(m K)

3.3 CARACTERÍSTICAS DE OCUPAÇÃO E UTILIZAÇÃO

Considerando-se que o condicionador de ar do tipo *Split Hi Wall* pode ser utilizado tanto para uma aplicação residencial quanto para uma aplicação comercial, o estudo buscou identificar a influência das características de ocupação e utilização no seu desempenho energético nessas aplicações.

Para analisar o comportamento térmico e energético do condicionador de ar *Split Hi Wall* operando em um ambiente residencial, foi realizada a simulação em uma sala de estar de um apartamento de uma edificação multifamiliar, habitado por uma família de renda média composta por quatro pessoas, nas seis capitais selecionadas.

A análise do comportamento em um ambiente comercial foi feita em um escritório de pequeno porte, onde trabalham três pessoas, com envoltória de características idênticas às da sala de estar, através de simulação nas mesmas capitais selecionadas. As características de ocupação e utilização usadas na simulação de ambos os ambientes estão descritas a seguir.

3.3.1 Padrão de Ocupação

Segundo o RTQ-R, o padrão mínimo de ocupação de um ambiente deve ser de duas pessoas. Para a simulação computacional, deve ser modelado um padrão de ocupação dos

ambientes para os dias de semana e outro para os finais de semana. O padrão também é representado pela porcentagem das pessoas disponíveis no horário (INMETRO, 2012).

A Tab. (3.8) apresenta o padrão de ocupação utilizado na simulação da Sala de Estar, considerando que no período entre 22h e 10h do dia seguinte o ambiente não é ocupado, assim como das 12h às 13h, o período de almoço.

Tabela 3.8 – Padrão de ocupação da Sala de Estar.

Até	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h
Segunda a Sexta	0%	0%	0%	25%	25%	25%	25%	25%	100%	50%	50%
Sáb., Dom. Feriados	25%	75%	0%	75%	50%	50%	50%	25%	25%	50%	50%

Fonte: Adaptado de RTQ-R, INMETRO (2012).

No escritório, a ocupação acontece de segunda a sexta, em horário comercial e aos sábados pela manhã, conforme mostra a Tab. (3.9). Como se tratam de três ocupantes, considera-se que, na primeira e última hora de expediente e no horário de almoço, o número de ocupantes varia entre um e três, por isso foi utilizado um valor médio (50%).

Tabela 3.9 – Padrão de ocupação do escritório.

Até	08h	09h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
Segunda a Sexta	50%	100%	100%	100%	50%	50%	100%	100%	100%	100%	100%	50%
Sáb., Dom. Feriados	50%	100%	100%	100%	100%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

3.3.2 Taxa Metabólica

No caso de ambientes de permanência prolongada, segundo o RTQ-C, deve-se considerar nos modelos o mesmo número de pessoas, praticando as mesmas atividades, com o mesmo calor dissipado (INMETRO, 2010).

Durante o período de ocupação, as quatro pessoas desempenham o mesmo tipo de atividade quando se encontram na sala de estar. Segundo o RTQ-R, o calor produzido por uma pessoa sentada e assistindo TV é de 60 W/m² e, considerando que a área de pele de uma pessoa média equivale a 1,8 m², a taxa metabólica utilizada para a simulação das pessoas na sala de estar foi de 108 W.

Seguindo a recomendação da NBR16401 – Parte 1, para atividade moderada em trabalhos de escritório, foi utilizada taxa metabólica de 130 W.

3.3.3 Iluminação

Os valores de potência dissipada pela iluminação que serão adotados na simulação seguirão as recomendações da NBR 16401, parte 1, dispostos na Tab. (3.10), sendo que na sala de estar da residência, a qual utiliza lâmpadas fluorescentes compactas, a taxa de dissipação utilizada foi de 9 W/m², enquanto que no escritório a taxa de dissipação utilizada foi de 16 W/m².

Tabela 3.10 - Taxa típica de dissipação de calor pela iluminação.

Fonte: Adaptado da NBR16401-Parte 1, ABNT (2008).

Local	Tipo de Iluminação	Nível de Iluminação (Lux)	Potência Dissipada (W/m²)
Escritórios e Bancos	Fluorescente	500	16
Residências	Fluorescente compacta	150	9

Para simulação da Sala de Estar, foi utilizado o padrão de uso da iluminação recomendado pelo RTQ-R. A iluminação é ligada todos os dias das 16h às 22h e nos sábados, domingos e feriados também é ligada das 10h às 12h.

No escritório, as luzes começam a ser ligadas a partir das 7h e são desligadas às 19h de segunda a sexta. Aos sábados, a iluminação é acionada das 7h às 13h.

3.3.4 Equipamentos Elétricos

Na sala de estar, além da iluminação, foi considerada uma taxa de dissipação térmica de 235 W, devido à utilização de um televisor, do tipo LCD de 29” (135 W), um notebook (50 W) e um equipamento de som (50 W).

Para o escritório, foi considerada uma taxa de dissipação térmica de 565 W, levando em conta as taxas típicas de dissipação de calor de computadores, monitores e impressoras indicados na NBR16401, parte 1 (2008), dispostos na Tab. (3.11).

Tabela 3.11 – Dissipação dos equipamentos elétricos utilizados no escritório.

Equipamento	Quantidade	Dissipação	
		Unitária	Total
Computadores	3	65 W	195 W
Monitores	3	70 W	210 W
Impressoras	1	160 W	160 W
TOTAL			565 W

3.3.5 Renovação de Ar

A ANVISA, Agência Nacional de Vigilância Sanitária, através da Resolução RE nº 9, de janeiro de 2003 (ANVISA, 2003), a qual atualiza a Resolução RE nº 176, apresenta padrões referenciais de qualidade do ar interior em ambientes climatizados artificialmente. Segundo essa resolução, a taxa de renovação de ar deverá ser, no mínimo, de 27 m³/h por pessoa.

Para a sala de estar, que é ocupada por, no máximo, quatro pessoas, a taxa de renovação de ar utilizada foi de 108 m³/h (0,03 m³/s). Já para o escritório, onde trabalham três pessoas, foi de 81 m³/h (0,0225 m³/s).

3.4 CARACTERÍSTICAS DO CONDICIONADOR DE AR

O condicionador de ar utilizado neste estudo, um sistema *Split Hi Wall* formado por uma unidade evaporadora (interna) modelo 42LVQA009515LC e uma unidade condensadora (externa) modelo 38LVQA009515MC, possui capacidade nominal de 2640 W (9000 Btu/h). As unidades ilustradas na Fig. (3.2) são fabricadas pela Midea Carrier.



Figura 3.2 - Unidades evaporadora e condensadora do sistema *Split Hi Wall*.

Fonte: CARRIER (2015).

O equipamento utiliza, em seu sistema frigorífico, um compressor do tipo rotativo *inverter*, o qual opera em velocidade variável, dispositivo de expansão do tipo capilar e R410A como refrigerante. O controle de funcionamento é feito através de sensores de temperatura e a lógica de funcionamento da ventilação da unidade interna prevê que o motor do ventilador se mantém ligado quando o compressor desliga, diferente da unidade externa cujo motor do ventilador desliga junto com o compressor.

3.4.1 Curvas de Desempenho do Condicionador de Ar

A simulação do comportamento de um condicionador de ar depende diretamente do conhecimento do seu desempenho mediante as diversas condições de funcionamento.

A determinação dos coeficientes utilizados nas curvas que representam o comportamento do condicionador de ar, operando em refrigeração, com velocidade fixa e velocidade variável, foi realizada com base em resultados de ensaios realizados no Calorímetro Psicrométrico #1 do Laboratório da Engenharia de Produto da Midea Carrier - Canoas/RS, apresentados no Apêndice A. A incerteza total na medição de capacidade do Calorímetro é inferior a $\pm 2\%$, enquanto que a incerteza na medição de potência é de $\pm 0,5\%$.

Para análise do funcionamento do sistema com o compressor operando com frequência fixa de 52 Hz, foram realizados testes com três diferentes temperaturas de bulbo úmido no ambiente interno (17 °C, 19,4 °C e 22 °C) e quatro diferentes temperaturas de bulbo seco no ambiente externo (25 °C, 30 °C, 35 °C e 40 °C). Para velocidade variável, foram realizados testes com temperaturas de ambiente interno e externo conforme norma AHRI Standard 210/240 (AHRI, 2008) (TBS_i de 26,7 °C e TBU_i de 19,4 °C e TBS_e de 35 °C) e com o compressor operando com frequência de 40, 44, 48, 52, 56 e 60 Hz. Para realização desses testes, foi utilizado um sistema de controle eletrônico que fixa a frequência do compressor, nos valores pré-estabelecidos.

A potência elétrica do equipamento foi corrigida pelas seguintes curvas: CAPFT, EIRFT e EIRFPLR, conforme a Eq. (3.1), proposta na *EnergyPlus Engineering Reference* (ENERGYPLUS, 2015b):

$$POT = \left[\frac{CAP \cdot CAPFT}{COP} \right] EIRFT \cdot EIRFPLR \quad (3.1)$$

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 Eq. (3.2):

$$CAPFT = a + [b TBU_i] + [c TBU_i^2] + [d TBS_e] + [e TBS_e^2] + [f TBU_i TBS_e] \quad (3.2)$$

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 e a capacidade do equipamento operando em refrigeração. O EIR é o inverso do COP.

A curva biquadrática EIRFT é representada pela Eq. (3.3):

$$EIRFT = g + [h TBU_i] + [i TBU_i^2] + [j TBS_e] + [k TBS_e^2] + [l TBU_i TBS_e] \quad (3.3)$$

onde EIRFT é o fator de correção do EIR em função das temperaturas de operação; g a l são os coeficientes da equação.

As curvas CAPFT e EIRFT foram utilizadas nas simulações dos condicionadores de ar com velocidade fixa e variável.

Denomina-se PLR a relação entre a capacidade apresentada em relação à capacidade nominal.

O comportamento do EIR em função das cargas parciais, apresentado pelo equipamento, foi representado pelas curvas EIRLowPLR, quando o PLR for menor que um ($PLR < 1$) e EIRHiPLR, quando o PLR for maior que um ($PLR > 1$).

O EIRFPLR foi calculado através da Eq. (3.4), segundo as referências de engenharia do *EnergyPlus*):

$$EIRFPLR = \left[\frac{POT}{POT_{nom} COP_{nom}} \right] \quad (3.4)$$

sendo que EIRFPLR é o fator de correção do EIR em função cargas parciais; POT é a potência consumida em refrigeração; POT_{nom} é potência nominal em refrigeração; e o COP_{nom} é o coeficiente de *performance* nominal.

As curvas EIRLowPLR, representada pela Eq. (3.5), e EIRHiPLR, representada pela Eq. (3.6), são do tipo cúbica:

$$EIRLowPLR = m + [nPLR] + [o PLR^2] + [p PLR^3] \quad (3.5)$$

$$EIRHiPLR = q + [r PLR] + [s PLR^2] + [t PLR^3] \quad (3.6)$$

onde EIRLowPLR é o fator de correção do EIR em função do PLR quando $PLR < 1$; m a p são os coeficientes desta equação; EIRHiPLR é o fator de correção do EIR em função do PLR quando $PLR > 1$; q a t são os coeficientes desta equação; e o PLR é a razão entre a capacidade apresentada e a capacidade nominal.

As curvas EIRLowPLR e EIRHiPLR foram utilizadas somente nas simulações de condicionadores com velocidade variável.

A fração de carga parcial (PLF) indica a perda de eficiência devido ao número de vezes que o compressor cicla. O PLF do condicionador de ar de velocidade fixa e expansão direta foi calculado utilizando-se a equação típica Eq. (3.7), segundo a referência de engenharia do *EnergyPlus*:

$$PLF = 0,85 + 0,15(PLR) \quad (3.7)$$

Os coeficientes das curvas de desempenho foram obtidos utilizando-se como ferramenta a “Regressão” do suplemento Análise de Dados do *Excel (Microsoft)*, com base nos dados obtidos nos testes de calorímetro, para o modo refrigeração.

3.5 PROGRAMA DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O programa utilizado para a simulação termo energética dos ambientes residencial e comercial propostos foi o *EnergyPlus*, através do qual é possível analisar as cargas térmicas

internas e externas para o dimensionamento do sistema de condicionamento de ar, bem como o consumo energético das edificações, ao longo das 8.760 horas do ano (ENERGYPLUS, 2015).

Foram realizadas 36 simulações, sendo que para cada uma das seis capitais selecionadas foram efetuadas:

- a) duas simulações para determinar a carga térmica dos ambientes residencial (sala de estar) e comercial (escritório);
- b) duas simulações para verificar o comportamento do condicionador de ar operando em velocidade fixa para a sala de estar e para o escritório;
- c) duas simulações para verificar o comportamento do condicionador de ar operando em velocidade variável para a sala de estar e para o escritório.

3.5.1 Modelagem dos Ambientes

A modelagem em 3D dos ambientes foi realizada através do aplicativo *Google Sketch Up* que, acoplado ao *Legacy Open Studio plug-in*, programa criado pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável do DOE, torna possível a interface com o *EnergyPlus* e permite que informações importantes possam ser inseridas no momento da modelagem. Os arquivos do tipo “idf” (*Input Data File*), gerados através deste acoplamento, serviram como base para a simulação no *EnergyPlus*.

O balanço de energia, em regime transiente, da zona térmica estudada, é obtido pelo *EnergyPlus* através do algoritmo *Conduction Transfer Function* (CTF), representado na equação diferencial ordinária Eq.(3.8). Esse modelo de algoritmo é tradicional em simulação e já vem sendo utilizado desde o *software* BLAST (ENERGYPLUS, 2015b):

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{si}} \dot{Q} + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_{c,si} A_{si} (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (3.8)$$

onde 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 i 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 i 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.

3.5.2 Dados de Entrada

Para realização de cada simulação no *EnergyPlus*, foram inseridos no arquivo “idf” os seguintes dados de entrada:

- a) arquivo climático, no formato “epw”, de cada uma das capitais selecionadas;
- b) dias de projeto, definidos segundo metodologia contida no *ASHRAE Fundamentals Handbook* (2009). Para as simulações de equipamentos que operaram somente em refrigeração foram utilizados os quatro dias de projeto de verão, cujas condições de temperatura de bulbo seco, bulbo úmido, temperatura do ponto de orvalho e entalpia representam frequências de ocorrências anuais de 1%, ou seja, apenas 88 das 8.760 horas que contêm um ano são superiores as condições destes dias. Segundo a NBR 16401, parte 1, a utilização de 1% é adequada para projetos comerciais e residenciais, que não possuem alta exigência;
- c) características termo físicas dos materiais selecionados nas edificações, tais como: condutividade, calor específico, absorvância solar. As características, apresentadas na seção 3.2 deste trabalho foram selecionadas obedecendo aos requisitos contidos nas normas vigentes;
- d) calendário de ocupação e utilização de iluminação, equipamentos elétricos, e ar condicionado, em regime horário, para cada dia da semana. As características, apresentadas na seção 3.3, foram selecionadas obedecendo aos requisitos contidos nas normas vigentes;
- e) características de funcionamento do sistema HVAC utilizados. O *EnergyPlus* possui modelos, testados e com as características registradas. Para simular a operação dos

condicionadores de ar com velocidade fixa, foi utilizado o modelo PTAC (*Packaged Terminal Air Conditioner*) para refrigeração e para velocidade variável foi usado o modelo Terminal Unit: *Variable Refrigerant Flow*, desenvolvido para sistemas com uma unidade condensadora e diversas unidades evaporadoras, porém, neste caso, foi simulado com apenas uma unidade evaporadora;

- f) set-point de temperatura para controle do funcionamento do condicionador de ar, fixado em 23°C, operando em modo refrigeração;
- g) para dimensionamento da capacidade do condicionador de ar necessário para cada 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.

3.5.3 Dados 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), comportamento da envoltória, desempenho energético do condicionador de ar (capacidade, potência elétrica, COP).

Já o *Output Variable EnergyPlus* 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 apresenta os valores obtidos para as 8.760 horas da simulação. Foram solicitados para análise os valores de temperatura de bulbo seco externa e interna, umidade relativa 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 (RTF).

De posse desses dados, foi possível analisar o comportamento termo energético dos ambientes ao longo de um ano típico, bem como calcular os valores horários de COP e PLR.

3.5.4 Indicador de Eficiência Energética

O indicador definido para representar o desempenho dos condicionadores de ar do tipo *Split Hi Wall*, com velocidade fixa e variável, mediante as diversas situações de operação foi o Coeficiente de Eficiência Energética Integrado (ICEE), expresso em W/W, o qual foi obtido com base nos valores das simulações e a aplicação da Eq. (3.9):

$$ICEE = \frac{\sum(CAP)}{\sum POT} \quad (3.9)$$

onde $\sum CAP$ é o somatório da capacidade total de refrigeração em um intervalo de tempo considerado (energia útil) e $\sum POT$ é a potência elétrica do condicionador de ar operando em refrigeração no mesmo intervalo de tempo (energia consumida).

3.6 CODIFICAÇÃO DAS SIMULAÇÕES E CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Devido ao grande número de simulações realizadas, foi criada uma codificação para identificação dos ambientes com a finalidade de facilitar a representação em gráficos e tabelas. O código é formado por quatro letras, sendo as duas primeiras referentes às seis cidades selecionadas (BR-Brasília, CG-Campo Grande, CB-Cuiabá, CT-Curitiba, FZ-Fortaleza, SP-São Paulo), a terceira identificando o ambiente (S-Sala ou E-Escritório) e a quarta letra indica a velocidade de rotação do compressor do condicionador de ar (F-Fixa ou V-Variável), conforme mostra a Tab. (3.12).

Tabela 3.12 – Codificação das simulações.

CÓDIGO	CIDADE	AMBIENTE	VELOCIDADE
BRSF	BRASÍLIA	SALA ESTAR	FIXA
BRSV	BRASÍLIA	SALA ESTAR	VARIÁVEL
BREF	BRASÍLIA	ESCRITÓRIO	FIXA
BREV	BRASÍLIA	ESCRITÓRIO	VARIÁVEL
CGSF	CAMPO GRANDE	SALA ESTAR	FIXA
CGSV	CAMPO GRANDE	SALA ESTAR	VARIÁVEL
CGEF	CAMPO GRANDE	ESCRITÓRIO	FIXA
CGEV	CAMPO GRANDE	ESCRITÓRIO	VARIÁVEL
CBSF	CUIABÁ	SALA ESTAR	FIXA
CBSV	CUIABÁ	SALA ESTAR	VARIÁVEL
CBEF	CUIABÁ	ESCRITÓRIO	FIXA
CBEV	CUIABÁ	ESCRITÓRIO	VARIÁVEL
CTSF	CURITIBA	SALA ESTAR	FIXA
CTSV	CURITIBA	SALA ESTAR	VARIÁVEL
CTEF	CURITIBA	ESCRITÓRIO	FIXA
CTEV	CURITIBA	ESCRITÓRIO	VARIÁVEL
FZSF	FORTALEZA	SALA ESTAR	FIXA
FZSV	FORTALEZA	SALA ESTAR	VARIÁVEL
FZEF	FORTALEZA	ESCRITÓRIO	FIXA
FZEV	FORTALEZA	ESCRITÓRIO	VARIÁVEL
SPSF	SÃO PAULO	SALA ESTAR	FIXA
SPSV	SÃO PAULO	SALA ESTAR	VARIÁVEL
SPEF	SÃO PAULO	ESCRITÓRIO	FIXA
SPEV	SÃO PAULO	ESCRITÓRIO	VARIÁVEL

De acordo com o parâmetro a ser analisado, foram realizadas delimitações, como forma de reduzir as variáveis e tornar as conclusões mais assertivas. A Tab. (3.13) apresenta os limites utilizados em cada condição de operação, bem como o número total de horas analisadas em cada condição. O período analisado representa o somatório das horas, de cada uma das condições, nas 24 simulações realizadas.

Tabela 3.13 - Delimitação das condições de operação.

Parâmetro	Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4
TBS _e	Indiferente	Indiferente	25 °C < TBS _e ≤ 30 °C	Indiferente
TBS _i	Indiferente	TBS _i ≥ 20 °C	TBS _i ≥ 20 °C	TBS _i ≥ 20 °C
T _{op}	Indiferente	Indiferente	Indiferente	22,5 °C < T _{op} < 25,5 °C
UR _i	Indiferente	Indiferente	Indiferente	35% < UR _i < 65%
PLR	Indiferente	PLR ≥ 0,15	PLR ≥ 0,15	PLR ≥ 0,15
Ocupação	Indiferente	Indiferente	1 pessoa na Sala e 3 pessoas no Escritório	Indiferente
Período analisado	79176 h	67931 h	9453 h	45588 h

4 RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os principais resultados obtidos nas simulações realizadas para os ambientes descritos na seção 3.2, com características de ocupação e utilização residencial (sala de estar) e comercial (escritório), nas localidades de Brasília/DF, Campo Grande/MS, Cuiabá/MT, Curitiba/PR, Fortaleza/CE e São Paulo/SP, sendo climatizadas artificialmente por condicionador de ar do tipo *Split Hi Wall*.

No estudo de carga térmica, serão mostrados os valores considerados como referência para o dimensionamento dos condicionadores de ar, os quais foram definidos pela taxa de aquecimento nas salas de estar e escritório das seis cidades selecionadas. Embora esta pesquisa não tenha como foco de estudo indicadores de conforto humano, a análise sobre o dimensionamento dos equipamentos foi complementada pela verificação da quantidade de horas que cada ambiente apresentou temperatura acima do *set-point* e da temperatura operativa, seguindo recomendações da ASHRAE 90.1 e NBR 16401 – Parte 2, respectivamente.

O desempenho energético dos condicionadores de ar com velocidade fixa e variável instalados nas salas e escritórios das seis cidades selecionadas será apresentado neste capítulo, com base no ICEE. Será mostrada também a influência das condições climáticas, como temperatura e umidade relativa do ar, sobre o funcionamento dos condicionadores de ar e, por consequência, no seu desempenho energético.

Os resultados mostrarão o quanto a aplicação de novas tecnologias, como a *inverter*, pode contribuir com o aumento no desempenho dos condicionadores de ar, e também a influência da operação em carga parcial e do tempo de compressor funcionando sobre a eficiência energética.

Além de apresentar as condições que, em conjunto, garantem os maiores índices de desempenho, neste capítulo será apresentada ainda uma proposta de utilização de um coeficiente capaz de expressar com maior fidelidade a eficiência energética de condicionadores de ar com tecnologias diferentes, sujeitos a condições climáticas e perfis de utilização distintos.

4.1 ESTUDO DE CARGA TÉRMICA

O estudo de carga térmica foi realizado através de 12 simulações. Em cada cidade selecionada, foi verificada a necessidade de refrigeração para cada um dos ambientes, sala de estar e escritório.

A simulação foi realizada no modo “autosize” de capacidade do *EnergyPlus*, somente para os dias de projeto das cidades selecionadas, utilizando-se as condições dos respectivos arquivos climáticos, do tipo TMY. Foram utilizadas as curvas de desempenho do condicionador de ar com base nos resultados obtidos nos testes de laboratório.

Embora os ambientes possuam envoltórias com as mesmas características construtivas, a análise mostra que a necessidade de refrigeração varia de acordo com a localidade, com o tipo de ambiente, com suas características de ocupação e utilização.

A taxa de remoção de calor selecionada para representar a carga térmica de cada ambiente foi o maior valor apresentado no seu respectivo dia de projeto. Para esta seleção, foram excluídas as primeiras horas de operação, visto que, segundo Zhou *et al.* (2008), as curvas de desempenho utilizadas pelo programa de simulação não são capazes de refletir com precisão o processo transiente que ocorre durante o início de operação. A Tab. (4.1) mostra as condições em que cada ambiente necessita a maior taxa de remoção de calor, no seu dia de projeto.

Tabela 4.1 – Máxima taxa de remoção de calor no dia de projeto.

Cidade	Ambiente	Dia de Projeto	Dia da Semana	Horário	TBS _e (°C)	Taxa de remoção de calor (W)
BRASÍLIA	SALA	21/10	Sábado	das 12h às 13h	26,6	1758
BRASÍLIA	ESCRITÓRIO	21/10	Sábado	das 09h às 10h	24,8	1808
C.GRANDE	SALA	21/11	Terça	das 14h às 15h	32,6	2504
C.GRANDE	ESCRITÓRIO	21/11	Terça	das 14h às 15h	32,6	2635
CUIABÁ	SALA	21/10	Sábado	das 11h às 12h	32,2	2565
CUIABÁ	ESCRITÓRIO	21/10	Sábado	das 09h às 10h	28,0	2873
CURITIBA	SALA	21/02	Terça	das 14h às 15h	27,4	1310
CURITIBA	ESCRITÓRIO	21/02	Terça	das 13h às 14h	28,4	1721
FORTALEZA	SALA	21/12	Quinta	das 14h às 15h	31,0	2712
FORTALEZA	ESCRITÓRIO	21/12	Quinta	das 11h às 12h	31,1	2814
SÃO PAULO	SALA	21/02	Terça	das 14h às 15h	31,0	1789
SÃO PAULO	ESCRITÓRIO	21/02	Terça	das 14h às 15h	31,0	2198
					Média	2223

Utilizando-se a Eq. (3.2), foi calculada a capacidade que o condicionador de ar proposto apresenta em cada uma das temperaturas externas (TBS_e) dispostas na Tab. (4.1). Para esse cálculo, considerou-se que a temperatura interna pretendida seria de 23°C e a umidade relativa ideal seria de 50%, que determinam a TBU_i como sendo 16°C . O gráfico da Fig. (4.1) mostra a comparação entre a carga térmica, ou seja, taxa de aquecimento do ambiente e a taxa de remoção de calor, que é a capacidade que o equipamento apresenta quando opera nas condições de temperatura interna e externa para a sala de estar, de cada uma das localidades estudadas.

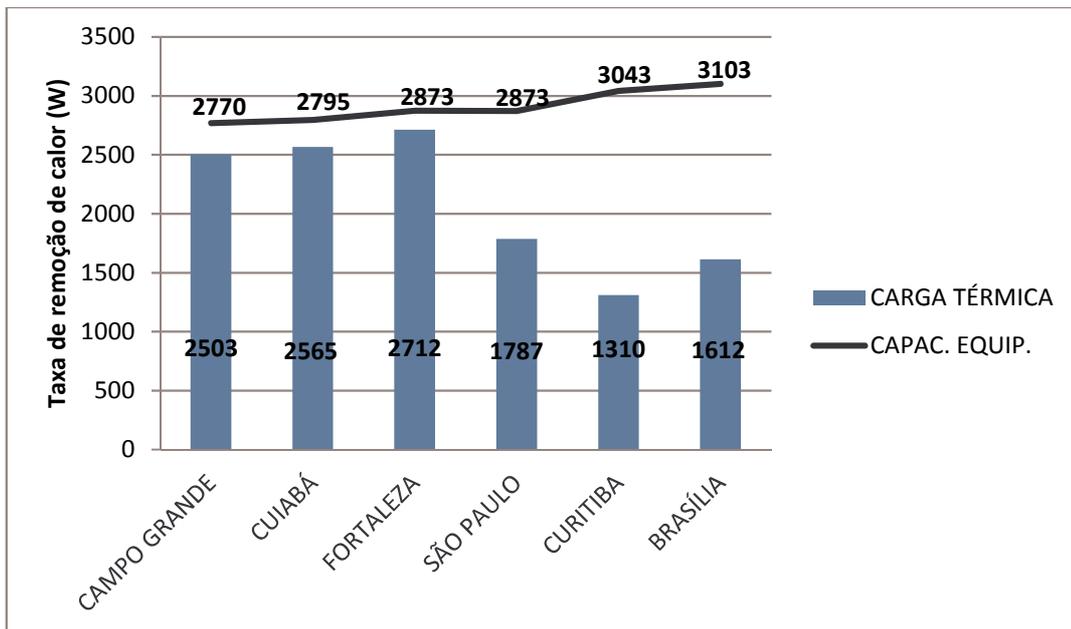


Figura 4.1 – Comparação entre a capacidade do condicionador de ar e necessidade de refrigeração nas salas de estar das capitais selecionadas.

Assim como nas salas, a taxa de aquecimento nos escritórios de todas as localidades é inferior à capacidade dos equipamentos, como mostra o gráfico da Fig. (4.2).

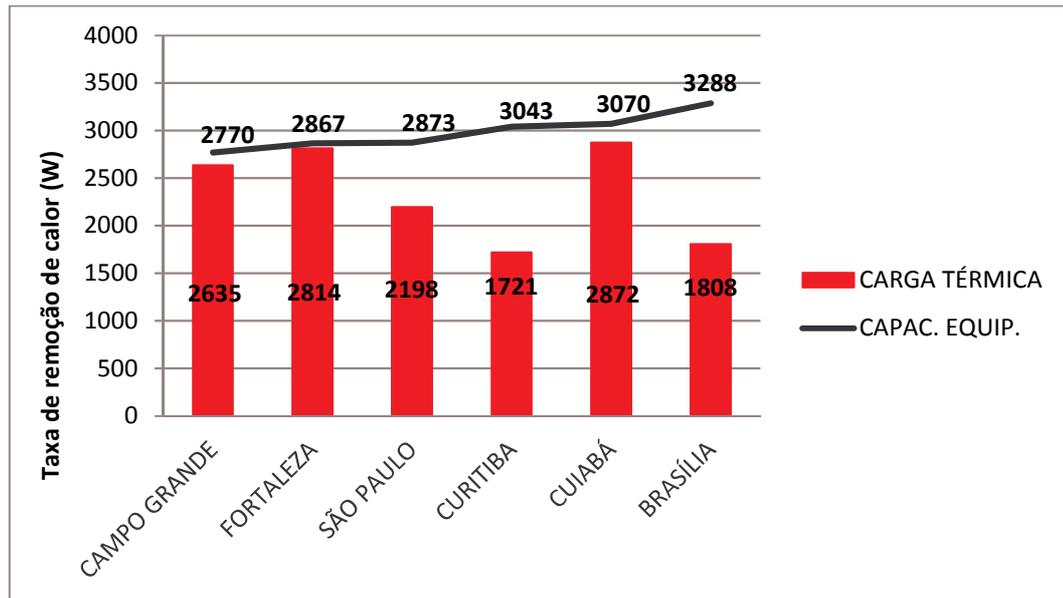


Figura 4.2 - Comparação entre a capacidade do condicionador de ar e necessidade de refrigeração nos escritórios das capitais selecionadas.

A ASHRAE 90.1 (2010) recomenda que o tempo em que a temperatura do ambiente fique acima da temperatura de controle (set point), com tolerância de 0,2 °C, não deva ultrapassar 300 horas. O gráfico da Fig. (4.3) mostra a quantidade máxima de horas que cada ambiente apresentou temperatura superior a 23,2 °C, durante o período de ocupação, em um ano. Os ambientes de Cuiabá e o escritório de Fortaleza apresentaram quantidade de horas acima do limite recomendado por esta norma.

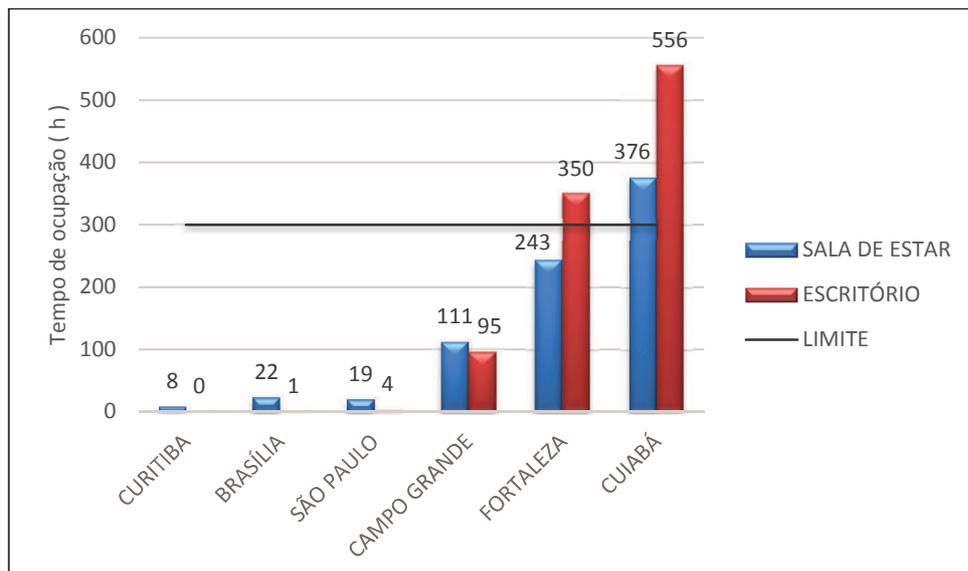


Figura 4.3 – Tempo de ocupação com temperatura acima de 23,2 °C.

Segundo a ASHRAE 55 (2004), conforto térmico é o estado mental que expressa a satisfação do ser humano com o ambiente térmico que o circunda. O conforto térmico depende de variáveis humanas, como o metabolismo e a vestimenta utilizada; variáveis ambientais, como a temperatura do ar, a temperatura radiante do meio, a velocidade e a umidade relativa do ar, e outras variáveis como idade, raça, hábitos alimentares, altura, sexo etc. Porém, por se tratar de um estudo com ênfase na eficiência energética de condicionadores de ar, dentre essas diversas variáveis, foram analisadas apenas a temperatura operativa e a umidade relativa no interior dos ambientes estudados.

Segundo a NBR 16401 – Parte 2, a temperatura operativa (T_{op}) indica a temperatura uniforme de um ambiente imaginário, no qual uma pessoa trocaria a mesma quantidade de calor por radiação e convecção que no ambiente não uniforme real. Essa norma estipula como parâmetros ambientais suscetíveis de produzir sensação aceitável de conforto, para refrigeração, temperatura operativa nos ambientes entre 22,5 °C e 25,5 °C e umidade relativa de 65% ou temperatura operativa entre 23,0 °C e 26,0 °C para umidade relativa de 35%.

O condicionador de ar do tipo split utilizado é controlado com base na temperatura do ar do ambiente interno (TBS_i), não havendo controle de umidade. As simulações realizadas mostram que a umidade relativa no interior dos ambientes se manteve entre 35% e 65% durante 89% das horas de operação. Logo, a temperatura operativa dos ambientes não deveria ultrapassar 25,5 °C. O gráfico da Fig. (4.4) mostra o percentual de tempo em que os ambientes simulados apresentam temperatura operativa acima de 25,5 °C, em relação ao tempo de operação na condição 1.

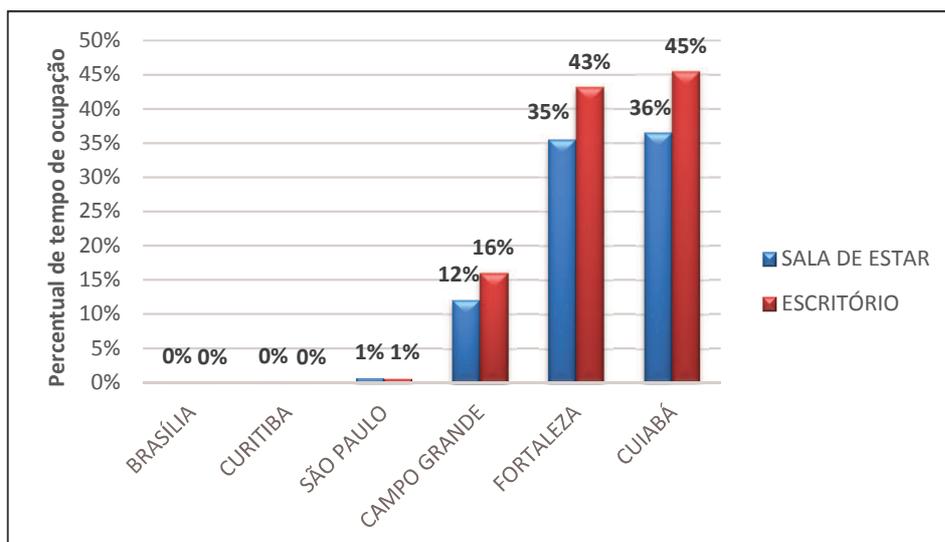


Figura 4.4 – Percentual de tempo em que o ambiente apresentou temperatura operativa acima de 25,5 °C, na condição 1.

Como o controle do funcionamento dos condicionadores de ar é feito pela temperatura do ar ambiente (T_{BSi}) e não pela temperatura operativa, mesmo que o set-point de 23 °C seja atingido, a troca de calor por radiação e convecção continua acontecendo. Desse modo, para que a temperatura não ultrapasse 25,5° C, como estratégia o set-point pode ser reduzido. A Tab. (4.2) mostra a redução no número de horas desconfortáveis, à medida que o set-point do condicionador de ar é reduzido de 23 °C para 22 °C.

Tabela 4.2 – Redução do número de horas com T_{op} acima de 25,5 °C, provocado pela redução do *set-point* em Campo Grande, Fortaleza e Cuiabá.

Cidade	Ambiente	Horas com $T_{op} > 25,5$ °C		
		Set-Point 23 °C	Set-Point 22 °C	Redução
CAMPO GRANDE	SALA DE ESTAR	393 h	116 h	70%
CAMPO GRANDE	ESCRITÓRIO	532 h	123 h	77%
FORTALEZA	SALA DE ESTAR	1156 h	383 h	67%
FORTALEZA	ESCRITÓRIO	1438 h	494 h	64%
CUIABÁ	SALA DE ESTAR	1189 h	535 h	55%
CUIABÁ	ESCRITÓRIO	1514 h	640 h	58%

Analisando-se os três fatores: taxa máxima de remoção de calor no dia de projeto, horas com temperatura acima de 23,2 °C (*set-point*) e quantidade de horas com temperatura operativa acima de 25,5 °C, é possível classificar os condicionadores de ar com capacidade nominal de 2640 W como:

- a) adequadamente dimensionados para os ambientes de Campo Grande;
- b) subdimensionados para os ambientes de Cuiabá e Fortaleza;
- c) superdimensionados para os ambientes de São Paulo, Brasília e Curitiba.

4.2 DESEMPENHO ENERGÉTICO DOS CONDICIONADORES DE AR

Para realização deste estudo, foram feitas 24 simulações, sendo que, em cada uma das seis capitais selecionadas, a mesma envoltória foi utilizada com aplicação residencial (sala de estar) e comercial (escritório). A climatização de cada um desses ambientes foi realizada utilizando-se condicionadores de ar com tecnologias de funcionamento diferentes, um com compressor com velocidade fixa e o outro com velocidade variável.

Foram descartados da análise os resultados obtidos em condições que não refletem a prática normal de utilização de condicionadores de ar nos tipos de ambientes simulados, tais como: temperatura do ambiente interno (TBS_i) menor que 20 °C e PLR menor que 0,15 (15%). Nos casos de baixa temperatura no ambiente interno, os condicionadores de ar não são ligados no modo refrigeração.

O funcionamento dos condicionadores de ar do tipo *split* é controlado por sistemas eletrônicos, com proteções que evitam o seu funcionamento em condições de carga parcial muito baixa. No sistema cujo compressor opera com velocidade fixa, existe a limitação do número de ciclos de operação do compressor por hora e, nos equipamentos que utilizam compressor com velocidade variável, existe um limite mínimo de rotação do mesmo. Desta forma, para melhor representar a realidade, a análise do desempenho energético foi realizada na condição 2, cujas delimitações estão descritas na Tab. (3.13).

O Coeficiente de Eficiência Energética (CEE), indicador de desempenho para condicionadores de ar adotado pelo INMETRO relaciona a taxa de calor absorvida pelo condicionador de ar e a taxa de energia elétrica utilizada pelo mesmo (W/W), medido em regime permanente, com o equipamento operando em condições de temperaturas recomendadas na Portaria nº 007, de 04 de janeiro de 2011 do INMETRO. (INMETRO, 2011), mostradas na Tab. (4.3).

Tabela 4.3 – Temperaturas de teste para determinação do CEE.

Fonte: INMETRO (2011, p.26).

Parâmetro	Ambiente Interno	Ambiente Externo
TBS	26,7 °C	35,0 °C
TBU	19,4 °C	23,9 °C

Os testes, realizados em laboratório sob as condições apontadas na Tab. (4.3), indicaram que o condicionador de ar utilizado neste estudo absorveu calor correspondente a 2640 W e utilizou energia elétrica igual a 800 W, resultando CEE de 3,30 W/W, em condição de plena carga.

Durante as horas de operação na condição 2, considerando-se todas as simulações realizadas, verificou-se que temperaturas externas (TBS_e) iguais ou superiores a 35 °C representam apenas 1,1% das horas de operação analisadas. O gráfico da Fig. (4.5) mostra que

a faixa de temperatura externa entre 25 °C e 30 °C foi a que apresentou maior incidência, faixa esta que se encontra abaixo da temperatura utilizada para determinação do CEE.

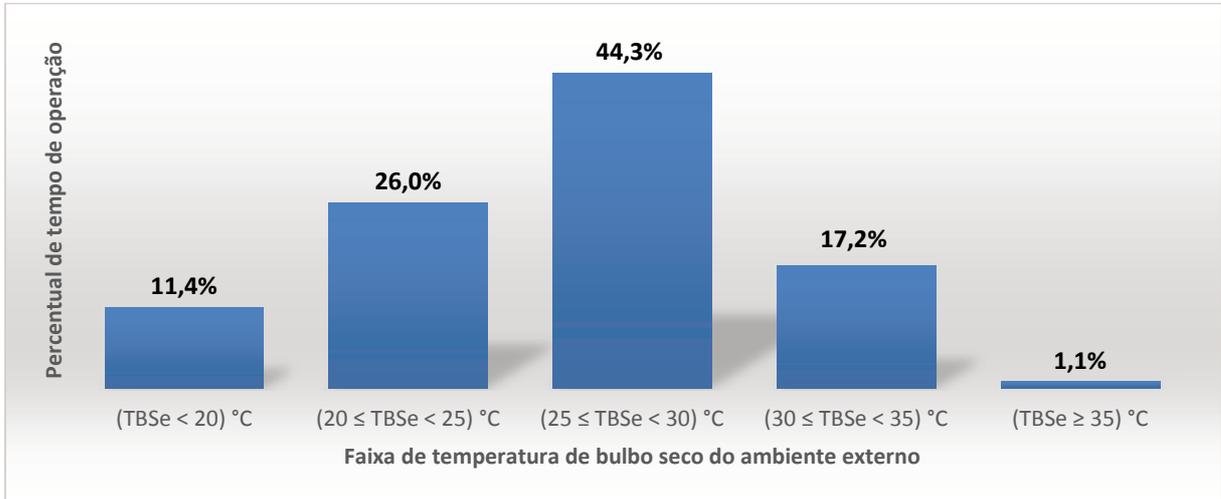


Figura 4.5 – Distribuição das horas de operação em função da temperatura do ambiente externo (TBS_e).

O gráfico da Fig. (4.6) mostra que em 93% das horas de operação os condicionadores estudados operam em carga parcial, ou seja, abaixo da sua capacidade nominal, sendo que a faixa de PLR com maior representatividade se localiza entre 0,6 e 0,8, com 26% das horas de operação, na condição.

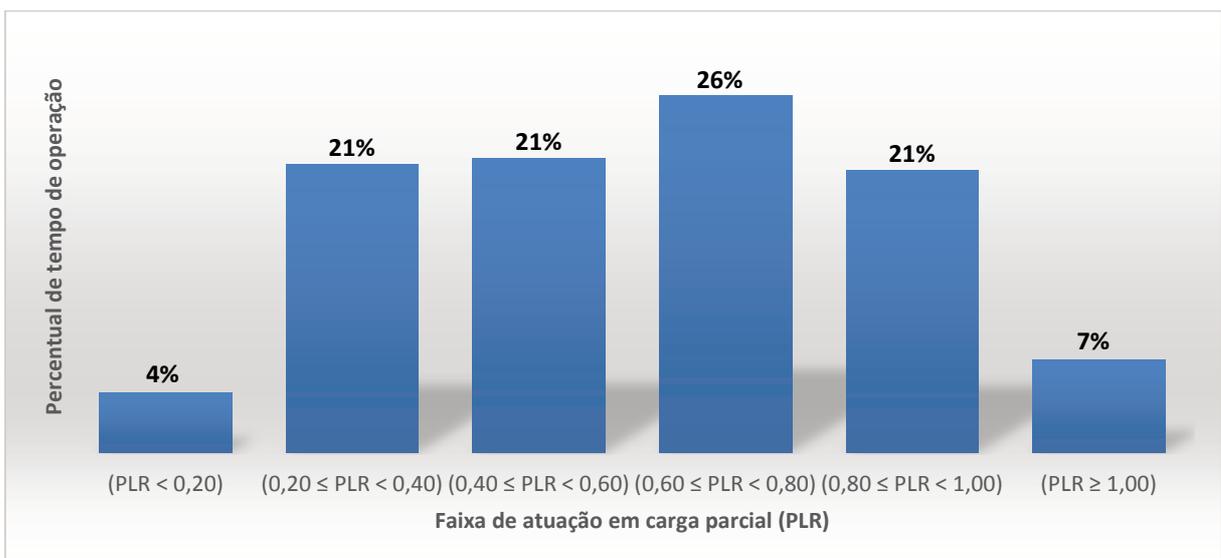


Figura 4.6 - Distribuição das horas de operação segundo a faixa de PLR.

Dessa forma, este estudo propõe a utilização de um indicador de eficiência energética integrado (ICEE) como forma de avaliar o desempenho energético dos condicionadores de ar, ao longo de um ano, considerando todas as condições de cargas parciais ou plenas. Para determiná-lo, foi calculado o quociente entre o somatório dos valores de energia útil (calor absorvido no evaporador) e a energia elétrica utilizada, aplicando-se a Eq. (3.9), com dados obtidos nas simulações realizadas na condição 2.

Os resultados, apresentados a seguir, reforçam que o desempenho de um condicionador de ar depende dos fatores climáticos do ambiente externo, das características construtivas (envoltória), das características de utilização do ambiente interno e das tecnologias empregadas no equipamento condicionador de ar. Considerando-se que as características construtivas foram mantidas em todos os ambientes e os condicionadores de ar com velocidade fixa e variável possuem o mesmo CEE, foram verificados valores diferentes de ICEE para ambientes com características semelhantes em localidades diferentes. Do mesmo modo, ambientes com características de utilização diferentes em uma mesma localidade, ou ainda ambientes com características semelhantes, em uma mesma localidade, atendidos por condicionadores de ar com tecnologia diferente.

O condicionador de ar estudado, cujo compressor opera com velocidade fixa, quando instalado em ambiente com características residenciais (sala de estar), apresenta ICEE que varia entre 3,43 W/W e 3,83 W/W. O cálculo integrado da eficiência energética mostra que o equipamento pode apresentar valores que superam o CEE_{nom} de 4% até 16%. O mesmo condicionador de ar, com velocidade fixa, quando instalado em ambiente com características comerciais (escritório), apresentou melhor desempenho em todas as cidades estudadas, como mostrado no gráfico da Fig. (4.7). Para a aplicação comercial, o ICEE do equipamento pode superar o CEE, no mínimo em 10% e no máximo em 18%. Com exceção de Fortaleza, percebe-se que, para uma mesma cidade, existe diferença de desempenho do condicionador de ar quanto ao padrão de utilização, sendo que o padrão do escritório proporciona maior eficiência energética ao condicionador de ar. Nas cidades com temperaturas externas mais baixas, como Brasília, São Paulo e Curitiba, a diferença de desempenho devido ao padrão de utilização é maior.

O condicionador de ar que utiliza a tecnologia *inverter*, cujo compressor opera com velocidade variável, apresenta ICEE, em média, 36% maiores que o CEE, quando instalados nas salas e 40% maiores nos escritórios. A variação pode chegar a 50%, como é o caso do equipamento instalado no escritório em Brasília, com ICEE de 4,95 W/W. A relação do

desempenho em função do padrão de utilização tem comportamento semelhante ao apresentado pelo condicionador de ar com velocidade fixa. Ou seja, nas cidades com temperaturas externas mais baixas, a diferença no desempenho é maior e, com exceção de Fortaleza e Cuiabá, o mesmo condicionador, quando instalado nos escritórios, apresenta maior eficiência energética.

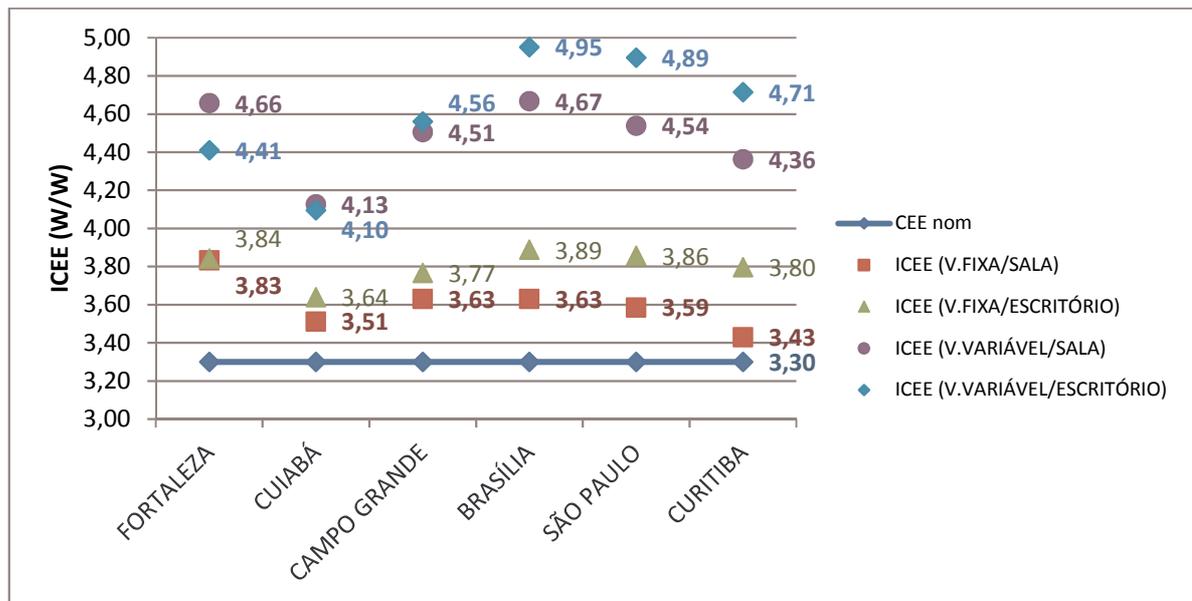


Figura 4.7 – Valores de ICEE obtidos nas simulações dos condicionadores de ar com velocidade fixa e variável, das salas e escritórios das capitais selecionadas.

Nas simulações realizadas, o ICEE calculado sempre foi superior ao CEE_{nom} do equipamento, fato que assegura ao proprietário do condicionador de ar que o produto adquirido atinge eficiência energética, no mínimo, igual ao valor nominal. A menor variação registrada foi de 4% com o condicionador de ar de velocidade fixa instalado na sala de estar de Curitiba, o qual apresentou ICEE de 3,43 W/W. O condicionador de ar com velocidade variável, instalado no escritório em Brasília, apresentou ICEE de 4,95 W/W, 50% maior que o CEE nominal do equipamento. O menor valor de ICEE registrado em condicionador de ar com velocidade variável no escritório em Cuiabá (4,10 W/W) supera o maior valor obtido com condicionador de ar com velocidade fixa obtido no escritório de Brasília (3,89 W/W), reforçando a superioridade, em termos de eficiência energética, proporcionada pelos condicionadores que utilizam a tecnologia *inverter*.

Segundo o INMETRO (2017), um condicionador de ar, com velocidade fixa ou variável (*inverter*), que apresente CEE nominal de 3,30 W/W recebe classificação “A” e, por

consequência, o Selo PROCEL. Porém, utilizando um coeficiente integrado de eficiência energética, é possível verificar a grande diferença entre ambos.

Considerando-se o somatório da energia útil durante as 34.676 horas do condicionador de ar operando com velocidade fixa nas salas e escritórios das seis cidades selecionadas e o somatório da energia elétrica consumida durante este período nos mesmos ambientes, o valor do ICEE obtido foi de 3,72 W/W, representando uma variação média de 13% em relação ao CEE nominal do condicionador de ar utilizado. Utilizando-se o mesmo método, durante as 33.255 horas do condicionador operando com velocidade variável resultaram ICEE de 4,47, 36% maior que o CEE_{nom} e 20% superior ao condicionador com velocidade fixa.

4.3 INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS SOBRE O ICEE

O desempenho térmico de uma edificação está diretamente relacionado às condicionantes climáticas, como temperatura do ar, umidade e radiação. Reforça-se que o conhecimento dessas condições é de suma importância, pois representam requisitos básicos para o projeto de sistemas de ar condicionado, cálculos simplificados do consumo de energia e para simulações mais detalhadas de energia em edificações. (GOULART; LAMBERTS; FIRMINO, 1998). A seguir, serão apresentados os resultados das análises realizadas sobre a influência da temperatura e umidade do ar externo sobre a eficiência energética dos condicionadores.

4.3.1 Influência da temperatura do ambiente externo sobre o ICEE

A temperatura do ambiente externo produz significativa influência sobre a eficiência energética de um sistema de climatização, visto que a mesma incide sobre a carga térmica do ambiente a ser condicionado, sobre a capacidade do sistema em remover calor e sobre o consumo de energia do mesmo.

A demanda de remoção de calor do ambiente (carga térmica) cresce à medida que a temperatura externa aumenta, pois quanto maior a diferença entre esta temperatura e a temperatura do ambiente interno maior será a potência térmica transferida por convecção das superfícies das paredes externas (Sul e Leste) e a taxa de calor devido à infiltração de ar externo, como pode ser visto na Eq. (3.8).

Porém, a capacidade do sistema de climatização diminui à medida que a temperatura externa aumenta, pois com o aumento da razão de compressão, a frequência de rotação do compressor diminui, com isso, a taxa de massa do refrigerante decresce e a capacidade de refrigeração, que é o produto do efeito de refrigeração pela taxa de vazão, diminui (STOECKER; JONES, 1983).

Considerando-se que, durante o período de operação, o motor de ventilação da unidade interna é mantido em funcionamento com consumo constante de energia elétrica, a variação no consumo de energia do condicionador de ar depende do consumo na unidade externa, fortemente influenciado pelo funcionamento do compressor. O trabalho mecânico do compressor está diretamente relacionado à diferença entre a entalpia específica da entrada e saída do compressor. Para uma mesma faixa de pressão de saturação de evaporação, que é influenciada pela temperatura do ambiente interno, a variação de entalpia depende da pressão de saturação de condensação, que é definida pela temperatura do ambiente externo.

Considerando-se o mesmo padrão de ocupação e o condicionador de ar com a mesma tecnologia de compressor, o ICEE depende do número de horas que o condicionador de ar opera em cada faixa de temperatura externa. O gráfico da Fig. (4.8), que mostra os valores de ICEE obtidos pelos condicionadores de ar com velocidade variável, instalados nos escritórios das seis capitais selecionadas, indica que, independentemente da localidade, os equipamentos apresentaram os maiores valores de ICEE em temperaturas externas na faixa entre 20 °C e 25 °C e os valores diminuem à medida que a temperatura externa aumenta, mas também diminuem sob temperaturas externas abaixo de 20 °C. Esse comportamento foi verificado também nos condicionadores de velocidade fixa dos escritórios assim como nos equipamentos com velocidade fixa e *inverter* instalados nas salas.

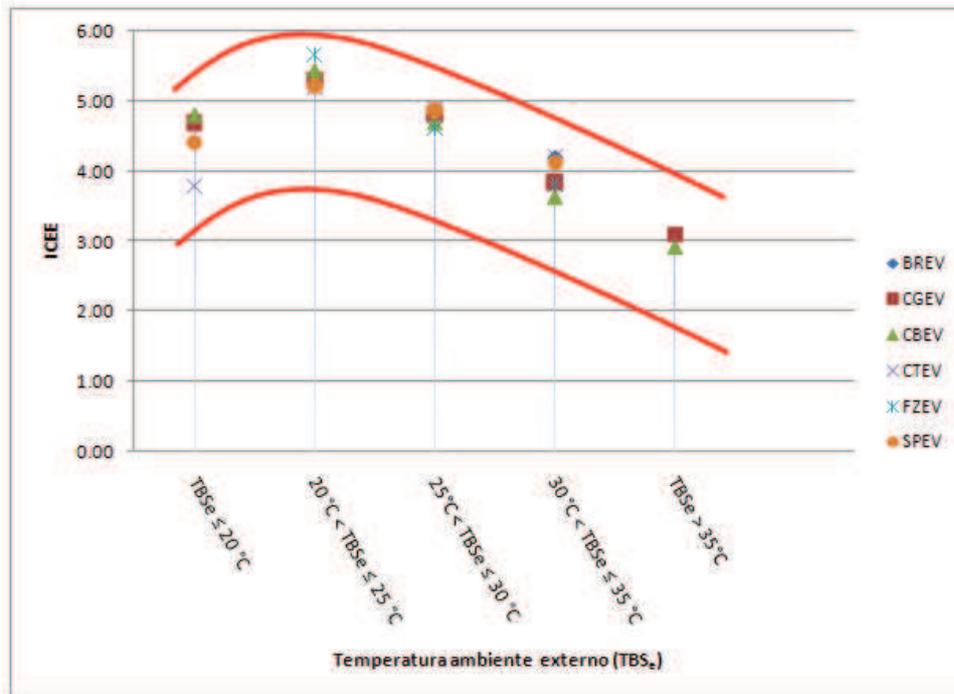


Figura 4.8 - Comportamento do ICEE em função da temperatura do ambiente externo dos condicionadores de ar com velocidade variável instalados nos escritórios.

Neste estudo, a temperatura externa foi analisada por faixas. A Tab. (4.4) mostra o ICEE, calculado através do somatório do calor removido dividido pelo somatório do consumo de energia elétrica, durante as horas de operação de cada tipo de condicionador de ar utilizado, por faixa de temperatura do ambiente externo, identificada pelo índice (i), nas cidades simuladas. O Apêndice B apresenta o detalhamento do calor removido, consumo de energia elétrica, ICEE dos ambientes simulados em cada faixa de temperatura do ambiente externo (TBS_e) e horas de operação, agrupados segundo o tipo de condicionador de ar utilizado, os quais foram utilizados como base para formação da Tab. (4.4) e da Tab. (4.5).

Tabela 4.4 – Resultados de ICEE obtidos por faixa de temperatura do ambiente externo dos equipamentos de velocidade fixa e variável.

Índice (i)	Faixa TBS _e	ICEE (W/W)	
		V.Fixa	V. Variável
1	TBS _e ≤ 20 °C	3,36	3,93
2	20 °C < TBS _e ≤ 25 °C	4,01	5,18
3	25 °C < TBS _e ≤ 30 °C	3,85	4,76
4	30 °C < TBS _e ≤ 35 °C	3,41	3,83
5	TBS _e > 35 °C	2,87	2,95

Para ambos os tipos de condicionadores de ar, com velocidade fixa e variável, os maiores valores de ICEE foram obtidos na faixa de temperatura externa entre 20 °C e 25 °C, sendo que o equipamento com velocidade fixa apresentou ICEE 22% superior ao CEE_{nom} (3,30 W/W) enquanto que, com velocidade variável, o ICEE foi 57% superior. Cabe salientar que o CEE_{nom} é obtido com temperatura externa de 35°C.

Xavier (2016) verificou que, para a aplicação em um hotel, sistemas sofisticados de condicionamento de ar que utilizam tecnologia VRF apresentaram o seu ponto de $COP_{m\acute{a}x}$ dentro de uma faixa de temperatura do ar externo entre 26 °C a 28 °C, onde o $COP_{m\acute{a}x}$ identificado foi de 7,7 (W/W).

De acordo com suas características climáticas, do tipo de ambiente e da tecnologia empregada, os condicionadores de ar apresentaram quantidades diferentes de horas de operação em cada faixa de temperatura do ambiente externo, nas cidades selecionadas, como mostra a Tab. (4.5).

Tabela 4.5 – Horas de operação por faixa de temperatura externa nas simulações realizadas.

Código	OPER₁	OPER₂	OPER₃	OPER₄	OPER₅	OPER
BRSF	165	1208	1271	142	0	2786
BRSV	119	1049	1176	142	0	2486
BREF	301	1448	1297	118	0	3164
BREV	254	1389	1292	118	0	3053
CGSF	111	868	1307	702	6	2994
CGSV	89	781	1291	699	6	2866
CGEF	182	884	1486	681	5	3238
CGEV	160	853	1486	681	5	3185
CBSF	58	288	1334	1292	192	3164
CBSV	49	266	1328	1289	192	3124
CBEF	118	406	1377	1229	159	3289
CBEV	104	396	1377	1229	159	3265
CTSF	609	804	408	28	0	1849
CTSV	578	732	397	28	0	1735
CTEF	1071	993	421	28	0	2513
CTEV	944	934	419	28	0	2325
FZSF	0	64	2531	667	0	3262
FZSV	0	64	2531	664	0	3259
FZEF	0	125	2448	763	0	3336
FZEV	0	125	2448	763	0	3336
SPSF	592	922	589	111	0	2214
SPSV	516	809	562	111	0	1998
SPEF	935	1170	668	94	0	2667
SPEV	758	1105	666	94	0	2623

A influência da temperatura externa sobre o ICEE, pode ser analisado através do cálculo da média ponderada do ICEE segundo o tempo de operação em cada faixa de temperatura, utilizando-se a Eq. (4.1):

$$ICEE_{TBSe} = \sum_{i=1}^{NTBSe} \left[\left(\frac{OPER_i}{OPER} \right) ICEE_i \right] \quad (4.1)$$

onde o $ICEE_{TBSe}$ é a média ponderada do coeficiente de eficiência energética integrado de cada localidade; i é o índice que representa cada faixa de temperatura externa; $ICEE_i$ é o coeficiente de eficiência energética integrado obtido pelo equipamento segundo a faixa i ; $OPER$ é o somatório das horas de operação total do equipamento em um ano; $OPER_i$ é o somatório das horas de operação segundo a faixa i .

A Tab. (4.6) apresenta a comparação entre o $ICEE_{TBSe}$, calculado através da aplicação da Eq. (3.9), e o $ICEE_{sim}$, o qual significa o valor de ICEE obtido na simulação de cada ambiente, apresentado no Apêndice B. Os resultados estão dispostos em ordem decrescente de ICEE, agrupados segundo o tipo de ambiente e tecnologia empregada no condicionador de ar. Na comparação entre o $ICEE_{TBSe}$ e o $ICEE_{sim}$ de cada ambiente, foi verificada variação máxima de 9%, indicando que a quantidade de horas que o equipamento opera em cada faixa de temperatura externa é de extrema importância sobre o ICEE.

Brasília é a capital que apresentou os maiores valores de ICEE, pois em 88% de suas horas de operação a temperatura externa registrada ficou entre 20° C e 25° C (44%) e de 25° C a 30° C (44%), faixas em que os condicionadores de ar apresentaram as melhores performances.

Tabela 4.6 – Comparação e o $ICEE_{TBSe}$ e o $ICEE_{sim}$

Velocidade	Cidade	Sala de Estar			Escritório		
		$ICEE_{TBSe}$ (W/W)	$ICEE_{sim}$ (W/W)	VAR. (%)	$ICEE_{TBSe}$ (W/W)	$ICEE_{sim}$ (W/W)	VAR. (%)
Fixa	BRASÍLIA	3,87	3,63	7	3,86	3,89	-1
	C.GRANDE	3,78	3,63	4	3,77	3,77	0
	FORTALEZA	3,77	3,83	-2	3,76	3,84	-2
	S.PAULO	3,76	3,59	5	3,74	3,86	-3
	CURITIBA	3,75	3,43	9	3,70	3,80	-3
	CUIABÁ	3,62	3,51	3	3,64	3,64	0
Variável	BRASÍLIA	4,85	4,67	4	4,85	4,95	-2
	S.PAULO	4,67	4,54	3	4,67	4,89	-5
	CURITIBA	4,65	4,36	7	4,58	4,84	-5
	C.GRANDE	4,62	4,51	3	4,63	4,56	2
	FORTALEZA	4,58	4,65	-2	4,57	4,41	4
	CUIABÁ	4,29	4,13	4	4,35	4,10	6

4.3.1.1 Comportamento do ICEE em baixas temperaturas externas

Existe uma tendência de aumento de eficiência energética à medida que temperatura externa é reduzida. Porém, em temperaturas abaixo de 20 °C, foi observada uma significativa redução nos valores de ICEE. O gráfico da Fig. (4.9) apresenta os valores de ICEE das 4 simulações realizadas em Brasília e mostra que, independente do padrão de utilização ou do tipo de tecnologia utilizada pelo condicionador de ar, a mesma tendência foi verificada. Comportamento similar foi observado nas simulações realizadas nas demais capitais.

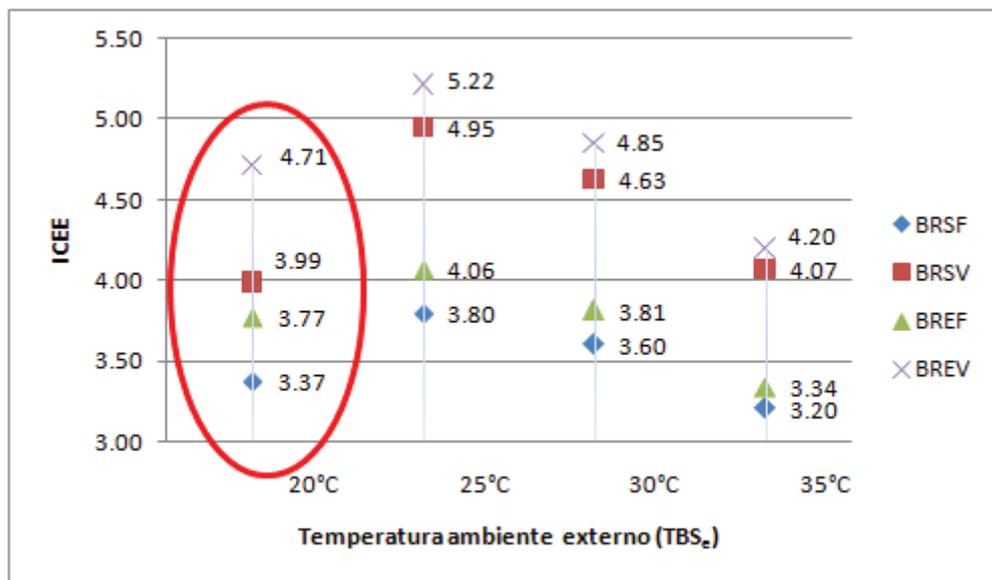


Figura 4.9 - Comportamento do ICEE com temperatura externa até 20°C.

Em baixas temperaturas externas, a carga térmica dos ambientes é baixa e o condicionador de ar possui um maior rendimento. Desse modo, a temperatura de controle é rapidamente atingida. Com isso, o RTF (*Run Time Fraction*), que representa a fração que o compressor funciona em relação ao tempo que o condicionador de ar está energizado, diminui e a de degradação de energia do sistema é maior, pois o compressor realiza maior número de ciclos por hora. Além disso, o ventilador permanece funcionando mesmo quando o compressor está desligado.

Em 11% das 67.931 horas analisadas na condição 2, a temperatura do ambiente externo se manteve igual ou abaixo de 20 °C, sendo que 2.886 (4%) foram registradas nas simulações das salas de estar e 4.827 (7%) nos escritórios. A utilização do condicionador de ar em

condições de baixa temperatura externa, dependendo do tempo de operação, ocasiona redução no ICEE. Caso o usuário opte por não ligar o equipamento quando a temperatura externa estiver abaixo de 20 °C, poderá obter um aumento de até 7% no ICEE. Nas cidades onde o tempo de operação em baixa temperatura externa atinge até 10% do tempo total de equipamento energizado, o valor de ICEE não foi alterado. Nos ambientes de São Paulo e Curitiba, cujos resultados obtidos são mostrados na Tab. (4.7), foi observado redução no ICEE, devido ao elevado número de horas que os condicionadores de ar operam em baixa temperatura externa e também ao número de horas que o compressor é mantido desligado. Em Curitiba, o equipamento funciona entre 33% e 53% do tempo com temperatura externa abaixo de 20 °C e o número de horas de compressor desligado varia de 555 a 1.375. Por isso, a redução no ICEE atingiu os maiores valores percentuais. Fortaleza não apresentou horas com temperatura abaixo de 20 °C.

Tabela 4.7 – Resultados obtidos em baixa temperatura externa.

Código	TBSe < 20 °C				
	OPER		RTF	Tempo Compressor Desligado	Varição ICEE
	(h)	(%)	(%)	(h)	(%)
CBSF	58	2	16	49	0
CBSV	49	2	16	41	0
CBEF	118	4	25	89	0
CBEV	93	3	35	60	0
CGSF	111	4	10	100	0
CGSV	89	3	9	81	0
CGEF	182	6	22	142	0
CGEV	160	5	24	122	0
BRSF	165	6	13	144	0
BRSV	88	4	12	77	0
BREF	301	10	24	229	0
BREV	254	8	24	193	0
SPSF	592	27	4	568	-3
SPSV	508	25	2	498	-4
SPEF	935	33	19	757	-1
SPEV	758	29	19	614	-1
CTSF	609	33	4	585	-5
CTSV	578	33	4	555	-7
CTEF	1071	43	12	942	-3
CTEV	1545	33	11	1375	-7

Nas cidades analisadas, mas principalmente em São Paulo e Curitiba, destacadas na Tab. (4.7), é possível verificar a grande diferença do RTF entre os ambientes sala e escritório. Essa diferença pode ser atribuída à grande carga interna de pessoas e equipamentos nos escritórios, já que a temperatura externa é baixa e, portanto, não há carga por transmissão nem pela entrada de ar externo.

4.3.2 Influência da umidade relativa do ar externo sobre o ICEE

O ar do ambiente externo, ao passar pelo condensador do condicionador de ar, não troca calor latente, logo a umidade relativa do ar externo não influencia no processo de condensação, porém tem influência no desempenho energético do equipamento à medida que incide na carga latente do ambiente interno. Embora o tipo de condicionador de ar estudado não possua controle de umidade, o ar do ambiente interno, ao entrar em contato com o evaporador, é desumidificado e, quanto maior a umidade contida no ar, maior a demanda de remoção de calor.

A carga latente de um ambiente depende da umidade relativa e da taxa de massa de ar externo que penetra nestes, da quantidade de pessoas e do tipo de atividade realizada no seu interior (taxa metabólica).

Para analisar a influência da umidade relativa do ar externo sobre o ICEE, foram consideradas as horas em que os ambientes estavam sujeitos à mesma taxa de massa de ar externo, a mesma quantidade de pessoas e a mesma taxa metabólica e o condicionador de ar com a mesma tecnologia. Por isso, as salas e os escritórios foram analisados separadamente.

Nas salas de estar, foram consideradas apenas 3.558 horas em que a ocupação foi de uma pessoa, pois estas representam 48% do total de horas das salas submetidas à condição 3. Com a mesma faixa de temperatura externa (25 °C a 30 °C), e mantendo-se as mesmas cargas sensíveis e latentes, as variações na taxa de calor removido e na energia elétrica utilizada pelo condicionador de ar podem ser atribuídas à umidade relativa do ar externo.

A Tab. (4.8) mostra o comparativo entre os dados obtidos nas salas de estar das seis cidades simuladas, que utilizam condicionador de ar com velocidade fixa, ordenadas segundo a média de umidade relativa do ar externo, durante as horas de operação na condição 3. Foi constatado um aumento de 8% no ICEE entre Brasília, que apresentou a menor média de umidade relativa externa (47%) e Fortaleza que tem a maior média (72%). Com a atuação dos condicionadores de ar, a umidade relativa dos ambientes internos foi mantida dentro de uma faixa propícia ao conforto humano, entre 47% e 59%, em média 7% menor que a umidade relativa externa. A capacidade latente dos condicionadores de ar instalados nas salas variou de 30%, em Brasília, a 36% em Fortaleza, representando um aumento de 6%.

Tabela 4.8 – Comparativo entre os valores de ICEE obtidos por condicionadores de ar de velocidade fixa instalados em salas de cidades com diferentes médias de umidade relativa externa.

Cidade	Média UR_e (%)	Média UR_i (%)	ICEE (W/W)	Capacidade Latente (%)
BRASÍLIA	47	47	3,58	30
CURITIBA	54	49	3,62	32
SÃO PAULO	54	45	3,68	33
CAMPO GRANDE	57	52	3,74	33
CUIABÁ	66	56	3,84	34
FORTALEZA	72	59	3,85	36

Nos escritórios, quando submetidos à condição 3, as 5.895 horas com ocupação de três pessoas representam 76% do total de horas de operação, por isso serviram de base para esta análise. Para a mesma média de umidade relativa externa, os escritórios foram mantidos com umidade relativa interna entre 42% e 53%, em média 12% menores que a externa. Embora não tenha apresentado a maior média de umidade relativa externa, Cuiabá apresentou o maior valor de ICEE, 3% maior que Brasília, conforme mostrado na Tab. (4.9). Nos escritórios, os condicionadores de ar operam com capacidade latente entre 25% e 29%, sendo que a diferença entre a capacidade latente do condicionador operando na cidade de menor umidade relativa externa, Brasília e a maior, Fortaleza, foi de 4%.

Tabela 4.9 – Comparativo entre os valores de ICEE obtidos por condicionadores de ar de velocidade fixa instalados em escritórios de cidades com diferentes médias de umidade relativa externa.

Cidade	Média UR_e (%)	Média UR_i (%)	ICEE (W/W)	Capacidade Latente (%)
BRASÍLIA	48	42	3,84	25
CURITIBA	54	45	3,86	27
SÃO PAULO	54	45	3,87	26
CAMPO GRANDE	58	47	3,88	27
CUIABÁ	66	50	3,94	27
FORTALEZA	72	53	3,88	29

Os resultados mostram que o ICEE aumenta à medida que a umidade do ambiente interno é maior e que este aumento depende da relação entre a capacidade latente e sensível do condicionador de ar. Nas salas, onde a faixa de capacidade latente que os condicionadores de ar operam é maior, a variação do ICEE em função da umidade relativa do ar também é maior.

O fator de maior influência sobre a carga latente dos ambientes simulados é a massa de ar úmido que entra no ambiente. As salas de estar utilizam taxa de renovação de ar de 108 m³/h (0,03 m³/s) e nos escritórios a taxa utilizada foi de 81 m³/h (0,0225 m³/s). A Tab. (4.10) apresenta a diferença observada na capacidade latente dos condicionadores de ar com velocidade fixa, instalados nas salas e escritórios, operando na condição 3, onde foram comparadas as horas de operação e capacidade latente do escritório com ocupação de três pessoas e salas com ocupação de uma e três pessoas. Embora o número de horas de operação do condicionador de ar nas salas, enquanto a ocupação é de três pessoas, seja baixo, o que pode provocar alterações no cálculo do percentual de capacidade latente, verificou-se que existe pouca diferença entre a capacidade latente do condicionador de ar das salas quando ocupadas por uma ou três pessoas, reforçando que não foi o número de pessoas que provocou a variação mais significativa. A taxa de renovação de ar das salas de estar, por ser 33% superior à dos escritórios, foi o parâmetro que provocou a maior variação na carga latente, em média de 5%, e conseqüente variação no ICEE.

Tabela 4.10 – Variação da capacidade latente do condicionador de ar com velocidade fixa em função da taxa de renovação de ar das salas e escritórios das cidades selecionadas.

Ambiente	Escritório (3 pessoas - $\dot{m} = 81 \text{ m}^3/\text{h}$)		Sala de Estar (1 pessoa - $\dot{m} = 108 \text{ m}^3/\text{h}$)		Sala de Estar (3 pessoas - $\dot{m} = 108 \text{ m}^3/\text{h}$)	
	<i>OPER</i>	<i>CAP_{lat}</i>	<i>OPER</i>	<i>CAP_{lat}</i>	<i>OPER.</i>	<i>CAP_{lat}</i>
BRASÍLIA	1051	25%	752	30%	119	32%
S. PAULO	542	26%	343	33%	68	32%
C. GRANDE	1149	26%	639	33%	90	31%
CURITIBA	345	27%	263	32%	38	30%
CUIABÁ	990	27%	489	34%	59	32%
FORTALEZA	1818	29%	1072	36%	106	35%
Média		27%		33%		32%

Cabe salientar que o aumento de eficiência energética provocado pelo aumento da umidade relativa externa ocorre devido ao aumento na demanda de remoção de calor, provocado pelo aumento na carga latente e não na redução no consumo de energia. A Tab. (4.11) mostra a variação na taxa de remoção de calor e na potência elétrica dos condicionadores de ar instalados nas salas de estar de Brasília e Fortaleza, promovida pela variação na umidade relativa do ar externo. Para as mesmas condições internas, devido à diferença na temperatura externa entre as duas cidades, mostrada na seção 2.3.1, o aumento na taxa de calor de 109% é justificável, porém a potência elétrica deveria ser proporcional. Como houve o aumento da carga latente e não houve aumento proporcional no trabalho mecânico do compressor, a potência elétrica teve variação 14% menor que a taxa de remoção de calor e, por isso, a eficiência energética aumentou 8%. Na prática, para que uma sala de estar em Fortaleza seja mantida a 23°C, com umidade relativa dentro da faixa de conforto humano, seu condicionador de ar apresentará um consumo de energia elétrica maior que em Brasília, devido à diferença de umidade relativa externa e, por consequência, seu custo operacional será maior, mesmo que sua eficiência energética seja maior.

Tabela 4.11 – Comparativo entre os valores obtidos por condicionadores de ar de velocidade fixa instalados nas salas de Brasília e Fortaleza.

Cidade	Média UR_e (%)	Taxa remoção de calor (W)	Potência elétrica (W)	CEE (W/W)
BRASÍLIA	47	1020	285	3,6
FORTALEZA	72	2135	554	3,9
Varição	25	1115 (109%)	270 (95%)	0,3 (8%)

Nos escritórios, a maior variação do ICEE em função da umidade relativa do ar externo foi verificada entre Brasília e Cuiabá. A Tab. (4.12) mostra que o aumento de umidade relativa do ar externo de 18% provocou um aumento na taxa de remoção de calor na ordem de 44% enquanto o aumento na potência elétrica foi de 40%, o resultado foi um aumento de 3% na eficiência energética.

Tabela 4.12 – Comparativo entre os valores obtidos por condicionadores de ar de velocidade fixa instalados nos escritórios de Brasília e Cuiabá.

Cidade	Média UR_e (%)	Taxa remoção de calor (W)	Potência elétrica (W)	CEE (W/W)
BRASÍLIA	48	1623	423	3,8
CUIABÁ	66	2333	593	3,9
Variação	18	710 (44%)	170 (40%)	0,1 (3%)

Ainda, com os dados obtidos na condição 3, é possível verificar que a umidade relativa predominante de uma localidade, assim como a temperatura, irá influenciar sobre a eficiência energética do equipamento. A Tab. (4.13) mostra a quantidade de horas de operação por faixa de umidade relativa do ar externo e o ICEE obtido em cada agrupamento, utilizando-se um condicionador de ar com velocidade fixa, nas salas de estar simuladas. Em cada cidade, a faixa de umidade relativa predominante foi destacada em amarelo e o ICEE foi considerado o predominante (ICEE_{pred}).

Tabela 4.13 – Quantidade de horas por faixa de umidade relativa do ambiente externo e o respectivo ICEE com a utilização de condicionadores de ar de velocidade fixa nas salas.

Cidade	UR_e ≤ 20%		20% < UR_e ≤ 40%		40% < UR_e ≤ 60%		60% < UR_e ≤ 80%		80% < UR_e ≤ 100%	
	OPER (h)	ICEE (W/W)	OPER (h)	ICEE (W/W)	OPER (h)	ICEE (W/W)	OPER (h)	ICEE (W/W)	OPER (h)	ICEE (W/W)
CUIABÁ			16	3,33	114	3,59	319	3,87	40	4,23
S.PAULO	3	3,22	41	3,20	176	3,60	121	3,87	2	4,28
C.GRANDE			73	3,42	275	3,62	257	3,85	34	4,27
BRASÍLIA	1	3,25	198	3,29	439	3,59	113	3,84	1	3,90
CURITIBA			40	3,29	128	3,57	94	3,77	1	3,91
FORTALEZA					58	3,73	843	3,82	171	4,09

A Tab. (4.14) mostra a comparação entre o ICEE predominante (ICEE_{pred}) obtido pelo condicionador de ar de velocidade fixa, instalado nas salas de estar, em cada cidade selecionada, e o ICEE simulado (ICEE_{sim}) na condição 1. A variação média obtida ficou na ordem de 3%, indicando que o ICEE obtido com a umidade predominante em cada cidade é um bom indicador do desempenho do condicionador de ar.

Tabela 4.14 – Comparação entre o $ICEE_{pred}$ e o $ICEE_{sim}$ dos condicionadores de ar de velocidade fixa instalados nas salas.

Cidade	$ICEE_{pred}$ (W/W)	$ICEE_{sim}$ (W/W)	Variação (%)
CUIABÁ	3,87	3,51	10,3%
SÃO PAULO	3,60	3,59	0,2%
CAMPO GRANDE	3,62	3,63	-0,3%
BRASÍLIA	3,59	3,63	-1,1%
CURITIBA	3,57	3,43	4,1%
FORTALEZA	3,82	3,83	-0,3%

4.4 INFLUÊNCIA DA TECNOLOGIA APLICADA NOS CONDICIONADORES DE AR

Através de tecnologias inovadoras, os condicionadores de ar tornaram-se mais eficientes nas últimas décadas. A sofisticação na fabricação de compressores e a otimização dos controles, proporcionada pela inserção de componentes eletrônicos, são dois dos principais fatores que contribuíram na concepção de novos projetos com elevado padrão tecnológico, que, além de satisfazer as necessidades dos usuários, apresentam viabilidade econômica.

4.4.1 Utilização da tecnologia *inverter*

Para a aplicação residencial e comercial de pequeno porte, a utilização da tecnologia *inverter* proporciona um considerável aumento na eficiência energética, comprovado neste estudo. Utilização de compressores rotativos com velocidade variável, sistemas eletrônicos sofisticados, com alto nível de proteção e controle das principais variáveis, faz com que o consumo de energia seja reduzido.

Além da influência dos fatores climáticos, que fazem com que o mesmo equipamento apresente variações em sua eficiência, também foram analisados neste estudo as influências de características inerentes ao tipo de equipamento utilizado. A atuação em cargas parciais e o tempo que o compressor permanece desligado ao longo do período de operação possuem grande influência nos índices de eficiência energética e esta influência não pode ser percebida quando se utiliza um coeficiente de eficiência energética instantâneo.

4.4.1.1 Influência da atuação em cargas parciais sobre o ICEE

A capacidade nominal de um condicionador de ar, declarada pelo fabricante, é obtida com base em testes de laboratório, realizados em conformidade com a Portaria nº 007, de 04 de janeiro de 2011 do INMETRO. O valor obtido é denominado Capacidade à plena carga (*full load*) e, quando o condicionador de ar opera com capacidade inferior à nominal, diz-se que o mesmo opera em carga parcial (*part load*). O parâmetro PLR (*Part Load Ratio*) representa a relação entre a taxa de calor removido e a capacidade nominal do condicionador de ar.

O PLR varia com a temperatura do ambiente externo, com a carga térmica do ambiente interno, com o dimensionamento e características construtivas do condicionador de ar.

O gráfico disposto na Fig. (4.10) mostra o comportamento do PLR em função da temperatura do ar externo (TBS_e) para o condicionador de ar com velocidade fixa instalado na sala de estar e escritório de Campo Grande. Foi calculado o PLR médio para cada faixa de temperatura ambiente externa, considerando-se a condição 2, ocupação de uma pessoa na sala de estar e três pessoas no escritório e realizada a comparação entre ambos. Os resultados mostram que o PLR é fortemente influenciado pelo aumento da temperatura externa, à medida que esta provoca o aumento na carga térmica e exige maior remoção de calor para que a temperatura do ambiente seja mantida em 23 °C. Também, é possível verificar que quando sujeito às mesmas condições de temperatura e umidade no ambiente externo, o mesmo condicionador de ar opera com PLR maior no escritório, devido ao fato deste apresentar maior carga térmica interna.

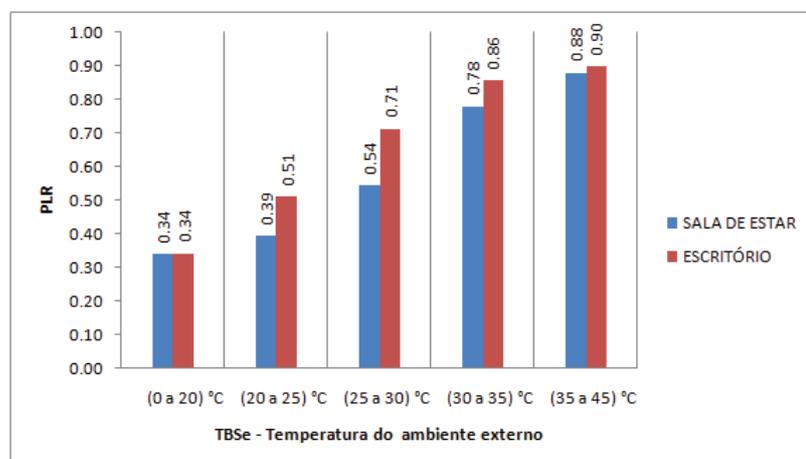


Figura 4.10 – Valores médios de PLR, em cada faixa de TBS_e , para os condicionadores de ar com velocidade fixa instalados na sala de estar e escritório de Campo Grande.

A principal característica dos condicionadores de ar que operam com vazão de refrigerante variável é ser mais eficiente em cargas parciais. Quando a demanda de remoção de calor do ambiente interno é menor, seu compressor opera com velocidade reduzida e, embora o dispositivo de expansão, que neste caso é um tubo capilar, possua uma perda de carga fixa, a vazão mássica de refrigerante nos trocadores de calor é menor. Logo, nas horas em que a temperatura externa é mais baixa, o condensador torna-se mais eficiente e, com a diminuição da relação de compressão, o trabalho mecânico do compressor é menor e a eficiência do condicionador de ar aumenta. Esse comportamento pode ser observado nos gráficos da Fig. (4.11), que mostram a variação do ICEE em função do PLR nos ambientes de Campo Grande, operando na condição 2.

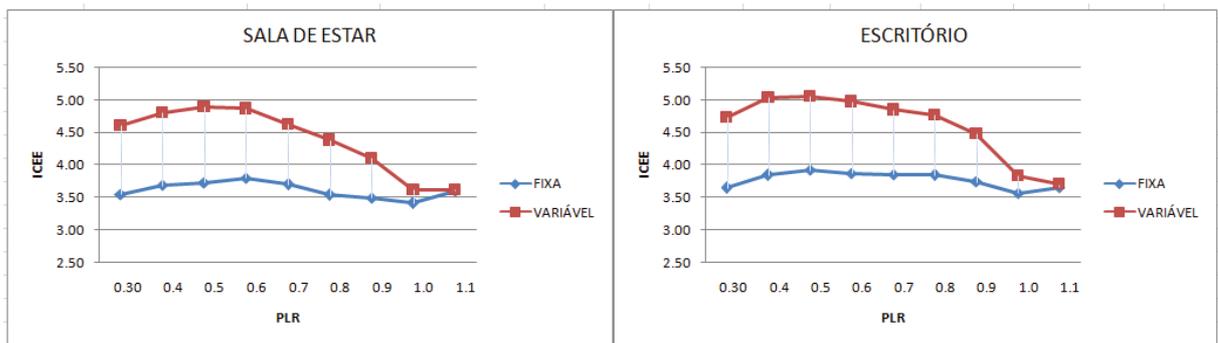


Figura 4.11 – Influência do PLR sobre o ICEE obtido pelos condicionadores com velocidade fixa e variável nos ambientes de Campo Grande.

O condicionador de ar com velocidade variável mostrou-se 24% mais eficiente que o com velocidade fixa em ambos os ambientes, na faixa de PLR entre 0,3 e 0,5, sendo que nesta faixa o escritório atingiu o maior valor de ICEE (5,05 W/W), 53% acima do CEE nominal do equipamento que é de 3,30 W/W.

Os condicionadores de ar com velocidade variável instalados nos escritórios foram os que apresentaram os maiores valores de ICEE. A Tab. (4.15) mostra os valores de ICEE obtidos por faixa de PLR nas seis cidades estudadas, calculados na condição 1, com os valores máximos destacados em amarelo. A faixa de PLR entre 0,4 e 0,6 foi a que apresentou maior quantidade de valores máximos, porém o maior valor foi observado em Fortaleza, na faixa entre 0,6 e 0,7, com ICEE de 5,56 W/W. Esses resultados confirmam os estudos de Bhatia (2014), o qual observou que os maiores valores de COP em sistemas VRF foram apresentados com PLR entre 0,3 e 0,7.

Tabela 4.15 - Valores de ICEE dos condicionadores de ar com velocidade variável instalados nos escritórios das cidades selecionadas.

Faixa PLR	ICEE (W/W)					
	BRASÍLIA	C.GRANDE	CUIABÁ	CURITIBA	FORTALEZA	S.PAULO
0,15<PLR≤0,30	4,75	4,73	4,78	4,75		4,76
0,30<PLR≤0,40	4,98	5,04	4,97	5,09		5,05
0,40<PLR≤0,50	5,02	5,05	5,01	5,16		5,15
0,50<PLR≤0,60	5,08	4,97	4,86	5,19		5,12
0,60<PLR≤0,70	4,95	4,85	4,73	5,05	5,56	5,03
0,70<PLR≤0,80	4,74	4,77	4,60	4,74	5,14	4,87
0,80<PLR≤0,90	5,04	4,48	4,33	4,72	4,85	4,43
0,90<PLR≤1,00		3,84	3,73		4,23	4,10
1,00<PLR≤1,20		3,70	3,72		3,77	

Xavier (2016), que estudou a eficiência energética de um sistema VRF aplicado em um hotel simulado em quatro capitais brasileiras (São Paulo, Rio de Janeiro, Fortaleza e Brasília), observou que nessas cidades os maiores valores de COP foram apresentados com PLR de 0,5 (50%). Em Fortaleza e no Rio de Janeiro, o COP atingiu 7,5, 67% acima do COP_{nom}, enquanto nas demais cidades os valores de COP foram menores, embora o valor de 6,9, em São Paulo, com PLR de 0,5 supera em 50% o COP de 4,6 na sua condição de Carga Plena (*Full Load*).

Wang *et al* (2009), estudando um sistema VRF de 28 kW, mostraram que, quando as Condições de Carga Parcial (*Part Load Conditions*) variaram entre 0,18 (18%) e 0,65 (65%), os valores de COP (*Coefficient of Performance*) encontrados ficaram entre 1,8 e 4,0. Assim como neste estudo, os maiores valores de COP registrados ficaram no intervalo de PLR entre 0,40 e 0,50. Também foi observado que com PLR abaixo de 0,4 o COP tende a diminuir.

Quando a capacidade do equipamento é superior à demanda de remoção de calor do ambiente, o mesmo opera mais tempo em carga parcial e, quanto mais tempo este operar na faixa de PLR em que o condicionador de ar apresenta a melhor eficiência, maior sua eficiência integrada.

Tomando-se como base Campo Grande, onde a capacidade do condicionador está bem dimensionada para atender à demanda de remoção de calor, observou-se que nos ambientes com demanda inferior (Brasília, São Paulo e Curitiba) a eficiência foi maior, pois houve grande concentração de horas de operação na faixa de PLR entre 0,25 e 0,50, faixa em que o condicionador de ar é mais eficiente. A Tab. (4.16) apresenta as horas de operação e o ICEE por faixa de PLR, das salas de estar onde estão instalados os condicionadores de ar com velocidade fixa e variável, com destaque para as faixas onde se concentram o maior tempo de operação de cada um dos ambientes. Brasília, cujo número de horas de operação na faixa entre

0.25 e 0.50 foi de, em média, 62% do total de horas de operação apresenta os maiores valores de ICEE. Porém em Curitiba, onde a demanda de remoção de calor é menor que Brasília, os condicionadores de ar não apresentam ICEE maior, devido ao grande número de horas em que os seus compressores permanecem desligados (PLR=0), como mostrado na Tab. (4.7), fator que provoca redução no ICEE.

Tabela 4.16 - Comparativo das horas de operação e ICEE entre os condicionadores de ar com velocidade fixa e variável de Campo Grande e das cidades com menor demanda de remoção de calor.

Código	PLR=0	PLR≤0,25		0,25<PLR≤0,50		0,50<PLR≤0,75		0,75<PLR≤1,00		PLR>1,0	
	OPER (h)	OPER (h)	ICEE (W/W)	OPER (h)	ICEE (W/W)	OPER (h)	ICEE (W/W)	OPER (h)	ICEE (W/W)	OPER (h)	ICEE (W/W)
BRSF	99	606	3,48	1776	3,71	302	3,54	3	3,76		
SPSF	607	384	3,50	826	3,78	362	3,70	35	3,59		
CTSF	720	393	3,54	666	3,72	68	3,63	2	3,85		
CGSF	94	229	3,48	1006	3,70	1176	3,71	434	3,47	55	3,63
BRSV	99	685	4,56	1524	4,78	178	4,43				
SPSV	604	356	4,59	729	4,95	289	4,64	20	4,31		
CTSV	720	404	4,68	560	4,92	49	4,60	2	4,69		
CGSV	94	271	4,54	1049	4,84	1063	4,67	345	4,01	44	3,65

Cuiabá, que no estudo de carga térmica apresentou demanda de remoção de calor próxima a Campo Grande, grande número de horas com temperatura superior ao *set-point* e temperatura operativa acima de 25,5 °C concentra as horas de operação na faixa de temperatura externa entre 30 °C e 35 °C, conforme apresentado na Tab. (4.5), faixa em que os condicionadores com velocidade fixa e variável apresentaram baixos valores de CEE. Por isso, os ambientes dessa cidade apresentaram os menores valores de ICEE.

Em Fortaleza, a influência da temperatura externa produz maior efeito sobre o ICEE que a atuação em cargas parciais. Embora a demanda de remoção de calor seja a mais alta entre as cidades estudadas e apresente grande número de horas com temperatura superior ao *set-point* e temperatura operativa acima de 25,5 °C. Fortaleza apresentou altos valores de ICEE, devido à estabilidade da temperatura externa que faz com que os condicionadores de ar operem em 75% das horas na faixa entre 25 °C e 30 °C e com menor número de ciclos (alto RTF).

4.4.1.2 Influência do tempo de compressor desligado sobre o ICEE

O número de ciclos (liga-desliga) efetuados por hora em um sistema de refrigeração influencia a eficiência energética, devido à degradação de energia e também ao consumo de eletricidade do ventilador sem que o sistema efetue remoção de calor.

O condicionador de ar utilizado neste estudo, assim como todos os *split's* da linha residencial, opera em regime de ventilação contínua do motor do ventilador. Em outras palavras, quando o ambiente atinge a temperatura e o compressor desliga, o motor do ventilador é mantido em funcionamento. Com isso, existe o consumo de energia por parte do ventilador sem que haja remoção de calor do ambiente. Assim, em um cálculo de um coeficiente de eficiência energética integrado (ICEE), quanto maior o tempo de compressor desligado, a parcela de consumo de energia aumenta e a eficiência energética diminui.

O RTF representa a fração que o compressor funciona em relação ao tempo que o condicionador de ar está energizado e, assim como o PLR, varia com a temperatura do ambiente externo, com a carga térmica do ambiente interno, com o dimensionamento e características construtivas do condicionador de ar. A Tab. (4.17) mostra os resultados de ICEE e a média de RTF das horas em que os condicionadores de ar foram submetidos à condição 3. É possível perceber que, para uma mesma cidade e utilizando condicionador de ar com a mesma tecnologia, o ICEE dos escritórios é maior do que o das salas, pois estes possuem maior carga térmica interna e exigem dos compressores maior tempo de funcionamento. Da mesma forma, mesmo com temperatura externa dentro da mesma faixa (25 °C a 30 °C), existe diferença de uma cidade para outra na frequência que cada temperatura se repete no ano. Logo, para o mesmo tipo de ambiente, a necessidade de compressor funcionando varia e quanto maior o RTF, menor o coeficiente de degradação e maior o ICEE. Porém, quando um condicionador de ar estiver subdimensionado para o ambiente, seu compressor trabalha mais tempo, mas em uma faixa de PLR em que a eficiência energética é menor, como mostram os resultados nos escritórios de Cuiabá e Fortaleza que utilizam velocidade variável.

Tabela 4.17 – Relação entre o RTF e o ICEE em todos os ambientes estudados.

Cidade	Velocidade Fixa				Velocidade Variável			
	Sala de Estar		Escritório		Sala de Estar		Escritório	
	ICEE (W/W)	RTF	ICEE (W/W)	RTF	ICEE (W/W)	RTF	ICEE (W/W)	RTF
BRASÍLIA	3,58	0,37	3,84	0,57	4,58	0,43	4,85	0,67
CURITIBA	3,62	0,34	3,86	0,57	4,68	0,40	4,92	0,72
SÃO PAULO	3,68	0,42	3,87	0,61	4,70	0,50	4,90	0,77
C. GRANDE	3,74	0,51	3,88	0,69	4,74	0,60	4,81	0,86
CUIABÁ	3,84	0,65	3,94	0,80	4,77	0,80	4,69	0,90
FORTALEZA	3,85	0,74	3,88	0,86	4,73	0,90	4,51	0,99

Os condicionadores que utilizam a tecnologia *inverter*, os quais possuem como característica adaptação da velocidade de rotação de seus compressores a medida que a demanda de remoção de calor varia, operam com RTF maior quando comparado ao de velocidade fixa, em uma mesma cidade e no mesmo tipo de ambiente (mesma carga térmica interna). Esse é mais um motivo para que os mesmos apresentem maior eficiência energética.

Outro aspecto a ser considerado é que a capacidade latente do evaporador é afetada pela operação cíclica do sistema de refrigeração. Enquanto o compressor está ligado, a umidade do ar condensa no evaporador e é retirada do ambiente através da rede de dreno, porém, quando o compressor desliga, se a ventilação operar continuamente, parte da umidade retorna ao ambiente pela corrente de ar (ENERGYPLUS, 2015b).

Shirey e Henderson (2004), a partir de estudo sobre desumidificação em cargas parciais, afirmam que a capacidade latente de uma serpentina de evaporador degrada em condições de carga parcial e tal degradação é mais significativa quando o ventilador opera continuamente.

Uma forma de demonstrar que existe redução na eficiência energética provocada pelo funcionamento do motor do ventilador, que permanece funcionando quando o ambiente atinge a temperatura de controle (*set-point*) e seu compressor desliga, é comparar o valor do ICEE com a utilização das duas estratégias: motor permanecendo ligado (*continuous fan/cycling compressor*) ou ciclando (*cycling fan/cycling compressor*) à medida que o compressor cicla.

A Tab. (4.18) apresenta a comparação do ICEE calculado com as duas estratégias, ainda sob a condição 3, com os escritórios ocupados por três pessoas e as salas por uma pessoa. Pode-se observar que, para uma mesma cidade, as menores variações foram encontradas nos escritórios, pois estes apresentam carga interna maior que a das salas.

Tabela 4.18 - Comparação entre o ICEE obtido com a estratégia *continuous fan* e com *cycling fan* para todos os ambientes simulados.

Código	RTF	Continuous Fan ICEE (Wh/Wh)	Cycling Fan ICEE (Wh/Wh)	Variação (%)
FZSF	0,73	3,83	3,88	1,3
CBSF	0,70	3,51	3,56	1,4
CGSF	0,50	3,63	3,75	3,3
BRSF	0,32	3,63	3,90	7,3
SPSF	0,27	3,59	3,93	9,6
CTSF	0,18	3,43	3,99	16,3
FZEF	0,84	3,84	3,87	0,7
CBEF	0,78	3,64	3,67	0,9
CGEF	0,62	3,77	3,85	2,1
BREF	0,47	3,89	4,04	3,9
SPEF	0,39	3,86	4,07	5,5
CTEF	0,30	3,80	4,11	8,2
FZSV	0,88	4,66	4,69	0,7
CBSV	0,82	4,13	4,17	1,0
CGSV	0,61	4,51	4,66	3,4
BRSV	0,38	4,67	5,12	9,7
SPSV	0,32	4,54	5,11	12,6
CTSV	0,20	4,36	5,37	23,1
FZEV	0,95	4,41	4,42	0,2
CBEV	0,88	4,10	4,12	0,6
CGEV	0,75	4,56	4,64	1,8
BREV	0,57	4,95	5,17	4,5
SPEV	0,48	4,89	5,21	6,4
CTEV	0,36	4,84	5,34	10,5

Na comparação entre as duas estratégias, a maior variação foi obtida na sala de estar de Curitiba, utilizando-se compressor com velocidade variável, quando o RTF apresentado foi de 0,20 (o menor valor da tabela). Significa que, por utilizar a estratégia *continuous fan* em sua lógica de funcionamento, o condicionador de ar apresentou maior consumo de energia e, com a eficiência energética sendo calculada de forma integrada, foi possível verificar uma redução de 23,1%. Se a estratégia *cycling fan* tivesse sido utilizada, o condicionador de ar *inverter* instalado na sala de Curitiba apresentaria o maior valor de ICEE, com 5,37 W/W, operando na condição 3.

A menor variação foi encontrada no escritório de Fortaleza (0,2%), também com a utilização do condicionador de ar *inverter*, pois neste ambiente o compressor apresentou RTF de 0,95. Logo, o tempo de ventilador funcionando com o compressor desligado é muito pequeno e não provoca variação significativa no consumo de energia, mesmo no cálculo integrado.

4.5 CONDIÇÕES FAVORÁVEIS DE OPERAÇÃO

Nas seções anteriores, foram apresentadas análises sobre a influência de alguns fatores capazes de provocar alterações sobre a eficiência energética dos condicionadores de ar do tipo *split*, aplicados a ambientes residenciais e comerciais de pequeno porte. Nesta subdivisão do presente trabalho, serão apresentadas as condições, de forma simultânea, em que os condicionadores de ar apresentaram os maiores valores de eficiência energética e proporcionaram condições de conforto humano recomendadas pela NBR16401-Parte 2.

No Apêndice C, estão dispostas as condições em que foram obtidos os máximos valores de ICEE de cada uma das simulações. Para tanto, foram descartadas as horas em que a temperatura do ambiente interno (TBS_i) permaneceu abaixo de 20 °C, o PLR apresentado foi menor que 15%, a temperatura operativa ficou fora da faixa entre 22,5 °C e 25,5 °C e a umidade relativa do ambiente interno ficou fora da faixa entre 35% e 65%. Esta condição foi denominada condição 4. Os parâmetros considerados foram: a temperatura do ambiente externo (TBS_e), a umidade relativa do ambiente externo (UR_e), a relação de atuação em carga parcial (PLR) e o tempo de compressor funcionando (RTF). Para o cálculo do ICEE, foram agrupadas as horas onde o condicionador de ar apresentou o valor máximo e as demais horas com valor de até 5% em relação ao máximo e os demais parâmetros são médias coincidentes.

Os seis escritórios que utilizaram condicionadores de ar com velocidade variável apresentaram valores de ICEE máximos classificados entre os dez maiores entre as 24 simulações realizadas. As condições de ambiente externo e de operação estão dispostas na Tab. (4.19). O máximo valor de ICEE, de 5,63 W/W (69% maior que o CEE_{nom} de 3,30 W/W) foi obtido pelo condicionador de ar *inverter* instalado em Campo Grande, o qual, no estudo de carga térmica, foi considerado bem dimensionado para atender este ambiente.

A Tab. (4.19) apresenta as médias coincidentes dos principais parâmetros estudados nas horas em que foram atingidos os valores máximos de CEE. É importante salientar que, além de alcançar alto de nível de eficiência, as condições de conforto monitoradas (temperatura operativa e umidade relativa) também foram atendidas nestas horas.

Operar na faixa de temperatura externa entre 20 °C e 25 °C, onde os condicionadores de ar apresentam maior rendimento, é sabidamente favorável. Além disso, a grande diferença entre a umidade relativa externa e interna, em média 22%, indica grande remoção de calor latente durante o processo de desumidificação e conseqüentemente favorece o aumento do ICEE.

Tabela 4.19 - Condições de operação dos condicionadores de ar com velocidade variável instalados nos escritórios e os valores máximos de ICEE obtidos.

Cidade	Ambiente Interno		Ambiente Externo		Condicionador de Ar			
	T _{op} (°C)	UR _i (%)	TBS _e (°C)	UR _e (%)	OPER (%)	PLR	RTF	ICEE (W/W)
CAMPO GRANDE	24,60	62,02	23,54	87,72	1	0,73	0,83	5,58
FORTALEZA	24,99	61,56	24,92	90,92	5	0,80	0,91	5,54
CUIABÁ	24,96	59,43	23,78	86,27	8	0,75	0,87	5,50
SÃO PAULO	24,47	56,34	23,44	76,11	13	0,63	0,74	5,40
BRASÍLIA	24,25	56,24	23,13	75,08	16	0,59	0,69	5,37
CURITIBA	24,16	57,31	23,10	76,73	20	0,56	0,66	5,36
Média	24,57	58,82	23,65	82,14	11	0,68	0,78	5,46

Em um condicionador de ar *inverter*, que tem como principal vantagem a atuação em cargas parciais, quanto mais próximo da faixa de PLR entre 0,4 e 0,5 melhor. Quanto maior o tempo de compressor funcionando (RTF) menor a perda de eficiência, portanto também é melhor.

Os fatores que contribuíram para que o condicionador de ar instalado no escritório de Campo Grande apresentasse o maior valor de ICEE em 1% das horas de operação na condição 4 foram: estar bem dimensionado para o ambiente, operar na faixa de temperatura externa onde este é mais eficiente, operar com alta capacidade latente (38%), PLR relativamente baixo, quando comparado à Fortaleza e Cuiabá. O único fator desfavorável foi o RTF (0,83) que, comparado a Fortaleza e Cuiabá representa maior perda de eficiência.

Nos escritórios de Fortaleza e Cuiabá, cujos condicionadores de ar são subdimensionados para os respectivos ambientes, mesmo sujeitos a condições climáticas próximas de Campo Grande, atuam em uma faixa de PLR onde estes são menos eficientes, e, embora a perda devido ao RTF seja menor, o ICEE resultante é inferior ao de Campo Grande.

Nas cidades de São Paulo, Brasília e Curitiba, onde os condicionadores de ar estão superdimensionados, embora a capacidade latente seja menor, assim como o PLR, a perda de eficiência devido ao tempo de compressor desligado é significativa e faz com que nestas cidades o ICEE seja menor.

Do ponto de vista do usuário, o fator mais relevante é o consumo de energia elétrica que o condicionador de ar representa ao longo do ano e seu respectivo custo. A Tab. (4.20) mostra

o consumo anual de energia dos condicionadores de ar operando na condição 1, relacionado ao coeficiente de eficiência energética, calculado de forma integrada. Em Campo Grande, cujo condicionador de ar está adequadamente dimensionado, o menor consumo anual foi obtido no condicionador de velocidade variável instalado na sala de estar, 26% menor que o com velocidade fixa instalado em um ambiente similar. Nos escritórios da mesma cidade, onde a carga térmica interna é maior, o consumo do *inverter* foi 22% inferior ao do fixo. Em Brasília, São Paulo e Curitiba, onde a demanda de remoção de calor é mais baixa e os condicionadores de ar estão superdimensionados, a redução no consumo de energia proporcionada pela utilização da tecnologia *inverter* foi bastante considerável, podendo chegar a 36%, em Brasília. Considerando os diferentes tipos de ambientes e localidades estudadas, a utilização da tecnologia *inverter* proporcionou redução de, em média, 26% no consumo de energia elétrica.

Tabela 4.20 – Comparativo do consumo de energia elétrica e da eficiência energética dos condicionadores de ar com velocidade fixa e variável, em um ano, nos diferentes ambientes simulados.

Cidade	Ambiente	Velocidade Fixa		Velocidade Variável			
		Consumo anual de energia (kWh)	ICEE (W/W)	Consumo anual de energia (kWh)	ICEE (W/W)	Redução no consumo de energia (%)	Aumento do ICEE (%)
CURITIBA	Sala	271	3,43	184	4,36	32%	27%
	Escritório	576	3,80	390	4,84	32%	27%
SÃO PAULO	Sala	462	3,59	306	4,54	34%	26%
	Escritório	840	3,86	567	4,89	33%	27%
BRASÍLIA	Sala	691	3,63	439	4,67	36%	29%
	Escritório	1100	3,89	762	4,95	31%	27%
C.GRANDE	Sala	1154	3,63	851	4,51	26%	24%
	Escritório	1502	3,77	1168	4,56	22%	21%
CUIABÁ	Sala	1720	3,51	1404	4,13	18%	18%
	Escritório	1960	3,64	1687	4,10	14%	13%
FORTALEZA	Sala	1792	3,51	1430	4,66	20%	33%
	Escritório	2089	3,84	1773	4,41	15%	15%
Média						26%	24%

Nos ambientes de Cuiabá e Fortaleza, os condicionadores de ar considerados subdimensionados para as respectivas demandas de remoção de calor, apresentaram uma redução no consumo de energia menor quando comparado a Campo Grande. No escritório de Cuiabá, foi observada a menor redução no consumo de energia, devido à utilização da tecnologia *inverter*, com 14%.

Considerando-se o mesmo tipo de ambiente (mesmo perfil de utilização) atendido por condicionador de ar com a mesma tecnologia, é possível observar grandes diferenças no consumo de energia entre as cidades, atribuídas às diferenças climáticas. O consumo de energia de um condicionador de ar *inverter* instalado numa sala de estar em Curitiba é aproximadamente oito vezes menor que o mesmo condicionador de ar instalado em uma sala similar em Fortaleza, mesmo que o ICEE em Curitiba seja apenas 7% menor.

4.6 PROPOSTA DE CÁLCULO DO ICEE PARA O BRASIL

Os resultados apresentados neste estudo mostram que a demanda de remoção de calor dos ambientes não varia de forma simples e que, além das condições climáticas, variáveis de utilização incidem sobre a eficiência energética. Existe uma grande diferença entre os resultados obtidos entre os condicionadores que utilizam sistema convencional, com compressor operando com velocidade fixa e os que utilizam compressores com tecnologia *inverter*. Dessa forma, um coeficiente de eficiência energético instantâneo como o CEE, utilizado atualmente pelo INMETRO, mostra-se insuficiente para informar a eficiência mediante as variações climáticas no território nacional e induzir à compra dos equipamentos realmente mais eficientes. A Fig. (4.12), disponibilizada pelo INMETRO (2017) informa que, atualmente, existem 375 condicionadores de ar do tipo *Split Hi Wall* com rotação fixa e 315 com rotação variável que possuem a mesma classificação A, os quais recebem o Selo Procel.

CONDICIONADORES DE AR SPLIT HI-WALL				Data atualização: 24/4/2017			
Classes	Coeficiente de eficiência energética (W/W)		Split Hi-Wall				
			Rotação Fixa		Rotação Variável		
A	3,23	<CEE	375	41,8%	315	91,3%	
B	3,02	<CEE ≤ 3,23	178	19,8%	22	6,4%	
C	2,81	<CEE ≤ 3,02	274	30,5%	8	2,3%	
D	2,60	≤CEE ≤ 2,81	70	7,8%	0	0,0%	
			897 un	345 un			

Figura 4.12 - Quantidades de condicionadores de ar *Split Hi Wall*, com rotação fixa e variável, segundo a classificação energética.

Fonte: INMETRO (2017).

A adoção de um coeficiente de eficiência energética integrado permite a informação mais precisa e, além de influenciar na decisão de compra, pode incentivar a implantação de novas tecnologias que possibilitem a redução no consumo de energia.

As principais economias do mundo, tais como Austrália, China, União Europeia, Japão, Índia, Coreia, Taiwan e Estados Unidos, utilizam o SEER como coeficiente, pois ele representa melhor a realidade operacional dos sistemas condicionadores de ar, os quais operam em carga parcial na maior parte do ano, além de ser sensível ao clima local, tipologia da edificação e comportamento do usuário.

O cálculo do SEER, normatizado na União Europeia através da BS EN 14.825, considera os dados de temperatura externa de Strasbourg (cidade no leste da França) como referência e a eficiência obtida em carga parcial. Um modelo simplificado é utilizado para o cálculo do SEER nas etiquetas de eficiência energética para condicionadores de ar do tipo *split* na União Europeia, e está representado na Eq. (4.2) e cujos fatores estão dispostos na Tab. (4.21) (CIBSE, 2014).

$$SEER = (A \times EER_A) + (B \times EER_B) + (C \times EER_C) + (D \times EER_D) \quad (4.2)$$

Tabela 4.21 – Fatores utilizados no cálculo do SEER de condicionadores de ar do tipo *Split inverter* nas etiquetas de eficiência energética da União Europeia.

Fonte: CIBSE (2014).

Condição	A	B	C	D
Coefficiente	0,03	0,33	0,43	0,23
Fator de carga	100% da carga	75% da carga	50% da carga	25% da carga
Temperatura externa	35 °C	30 °C	25 °C	20 °C

A proposta para obtenção do valor do ICEE baseia-se no modelo simplificado utilizado pela União Europeia, Eq. (4.2), e prevê a análise dos arquivos climáticos para definição dos coeficientes A, B, C e D, da localidade que se deseja calcular a eficiência energética integrada e utilizar informações do fabricante do condicionador de ar sobre os valores de CEE em plena carga e em cargas parciais.

Utilizando-se os arquivos climáticos TMY elaborados no projeto SWERA, adotados neste estudo, foram calculadas as quantidades de horas com temperatura externa entre 16 °C e 35 °C, nos intervalos entre 35 °C e 30 °C (A), 30°C e 25 °C (B), 25 °C e 20 °C (C) e entre 20 °C

e 16 °C (D), conforme indicado na BS EN 14825, para cada uma das capitais que representam as diferentes zonas bioclimáticas do território brasileiro. Para cada intervalo, foi calculado o somatório de horas em que as respectivas temperaturas externas foram observadas e o resultado foi dividido pelo somatório total de horas entre 16 °C e 35 °C, gerando os coeficientes mostrados na Tab. (4.22). O somatório geral, considerando-se as seis cidades selecionadas, dividido pelo número total de horas no ano, para cada intervalo gerou os coeficientes para o Brasil.

Tabela 4.22 – Coeficientes em função da temperatura externa para as seis cidades selecionadas para representar as oito zonas bioclimáticas brasileiras.

Zona Bioclimática	Cidade	A	B	C	D
ZB1	Curitiba/PR	0,00	0,10	0,33	0,57
ZB2 – ZB3	São Paulo/SP	0,01	0,13	0,37	0,49
ZB4 – ZB5	Brasília/DF	0,00	0,17	0,41	0,42
ZB6	Campo Grande/MS	0,09	0,27	0,46	0,18
ZB7	Cuiabá/MT	0,22	0,35	0,36	0,07
ZB8	Fortaleza/CE	0,09	0,63	0,28	0,00
BRASIL		0,08	0,29	0,37	0,26

Como os valores de CEE com os fatores de carga e temperaturas externas solicitados na Tab. (4.21) não foram fornecidos pelo fabricante do condicionador de ar, os valores utilizados para o cálculo do coeficiente integrado de eficiência energética foram retirados das simulações realizadas nos escritórios localizados em Campo Grande, por considerar-se que os condicionadores de ar instalados nestes ambientes apresentaram a melhor relação entre sua capacidade e a demanda de remoção de calor no estudo de carga térmica.

Os valores de CEE dispostos na Tab. (4.23) são os que melhor representam as condições de PLR e temperatura externa indicadas na Tab. (4.21), para o condicionador de ar com velocidade fixa, instalados no escritório de Campo Grande.

Tabela 4.23 – Valores obtidos na simulação de um condicionador de ar com velocidade fixa instalado em Campo Grande, para as condições A, B, C e D.

Condição	Velocidade Fixa				Velocidade Variável			
	A	B	C	D	A	B	C	D
TBS _e (°C)	35,0	30,0	25,1	20,0	35,0	30,0	25,0	20,0
PLR	1,00	0,75	0,50	0,25	1,00	0,75	0,50	0,25
CEE (W/W)	3,05	3,54	4,00	3,76	3,05	4,46	5,27	4,81

A proposta prevê que, conhecendo-se o comportamento da temperatura externa do local de instalação e de posse dos valores de CEE, dispostos na Tab. (4.22) e Tab. (4.23) respectivamente, do condicionador de ar que será utilizado, é possível calcular o coeficiente integrado de eficiência energética, através da aplicação da Eq. (4.3), não sendo necessário realizar uma simulação.

$$ICEE_{PROP} = (A \times CEE_A) + (B \times CEE_B) + (C \times CEE_C) + (D \times CEE_D) \quad (4.3)$$

Xavier (2016), que utilizou o ICOP como coeficiente de eficiência energético integrado, propôs uma equação similar para calcular o desempenho energético de um sistema VRF, cujos coeficientes foram obtidos somando-se o número horas de funcionamento em cada uma das temperaturas externas e, para cada grupo o valor de COP. A análise e contabilização foram feitas com base nas simulações das cidades de São Paulo/SP, Brasília/DF, Rio de Janeiro/RJ e Fortaleza/CE e os coeficientes obtidos foram: 0,085 (A), 0,208 (B), 0,389 (C) e 0,318 (D).

Embora tenham sido obtidos através de metodologias distintas e tomando como base cidades diferentes, os coeficientes apresentados na Tab. (4.22) para o Brasil se aproximam dos valores apresentados por Xavier (2016). Aplicando-se os coeficientes do referido pesquisador na Eq. (4.3), foram obtidos $ICEE_{prop}$ de 3,75 W/W para o condicionador de ar com velocidade fixa e 4,77 W/W para velocidade variável, enquanto que, utilizando-se os coeficientes da Tab. (4.22) para o Brasil, os valores obtidos foram 3,73 W/W e 4,74 W/W respectivamente. Já, aplicando-se os coeficientes utilizados na União Europeia (Strasbourg), dispostos na Tab. (4.21), os valores obtidos foram 3,84 W/W para velocidade fixa e 4,94 W/W para velocidade variável.

Porém, é possível chegar a valores mais próximos da realidade utilizando-se os coeficientes referentes a cada cidade, mostrados na Tab. (4.22). A Tab. (4.24) apresenta a aplicação da Eq. (4.3), baseada no modelo simplificado utilizado pela União Europeia disposto na Tab. (4.21), para obtenção dos valores de ICEE ($ICEE_{prop}$), dos condicionadores de ar do tipo *Split Hi Wall*, com velocidade fixa e variável, das seis cidades estudadas.

Tabela 4.24 - Aplicação do modelo proposto para cálculo do coeficiente integrado de eficiência energética (ICEE_{prop}).

Cidade	Velocidade	A CEE _A		B CEE _B		C CEE _C		D CEE _D		ICEE _{prop}
			(W/W)		(W/W)		(W/W)		(W/W)	
CURITIBA	Fixa	0,00	3,05	0,10	3,54	0,33	4,00	0,57	3,76	3,82
	Variável	0,00	3,05	0,10	4,46	0,33	5,27	0,57	4,81	4,93
S.PAULO	Fixa	0,01	3,05	0,13	3,54	0,37	4,00	0,49	3,76	3,81
	Variável	0,01	3,05	0,13	4,46	0,37	5,27	0,49	4,81	4,92
BRASÍLIA	Fixa	0,00	3,05	0,17	3,54	0,41	4,00	0,42	3,76	3,82
	Variável	0,00	3,05	0,17	4,46	0,41	5,27	0,42	4,81	4,94
C.GRANDE	Fixa	0,09	3,05	0,27	3,54	0,46	4,00	0,18	3,76	3,75
	Variável	0,09	3,05	0,27	4,46	0,46	5,27	0,18	4,81	4,77
CUIABÁ	Fixa	0,22	3,05	0,35	3,54	0,36	4,00	0,07	3,76	3,61
	Variável	0,22	3,05	0,35	4,46	0,36	5,27	0,07	4,81	4,47
FORTALEZA	Fixa	0,09	3,05	0,63	3,54	0,28	4,00	0,00	3,76	3,62
	Variável	0,09	3,05	0,63	4,46	0,28	5,27	0,00	4,81	4,56
BRASIL	Fixa	0,08	3,05	0,29	3,54	0,37	4,00	0,26	3,76	3,73
	Variável	0,08	3,05	0,29	4,46	0,37	5,27	0,26	4,81	4,74

A Tab. (4.25) mostra a diferença entre os valores de ICEE obtidos nas simulações (ICEE_{sim}) e os valores calculados através da Eq. (4.3), utilizando os coeficientes por cidade e também para o Brasil (ICEE_{prop}). Na maioria dos casos, os valores obtidos através da aplicação da Eq. (4.3) foram superiores aos obtidos nas simulações e podem ser observadas diferenças significativas entre os valores das salas e dos escritórios, como no caso de Curitiba. Essas diferenças devem-se ao fato de a simulação considerar as características de utilização enquanto que a equação relaciona somente a carga com a temperatura externa. Considerando-se os coeficientes por cidade, a menor diferença entre os valores de ICEE obtidos nas simulações e na aplicação do modelo simplificado foi observada no escritório de Brasília, na ordem de -0,2% e a maior variação foi apresentada na sala de Curitiba, quando o valor calculado ficou acima do valor simulado em 11,6%. Utilizando-se os coeficientes obtidos para o Brasil, a menor variação em relação aos valores simulados foi de -1,1%, no escritório de Campo Grande com o condicionador de ar com velocidade fixa e a maior foi de 13,5% no escritório de Cuiabá, com velocidade variável.

Tabela 4.25 - Comparação entre os valores de $ICEE_{prop}$ obtidos através da aplicação da Eq. (4.3), e os valores de $ICEE_{sim}$, obtidos nas simulações.

Código	$ICEE_{sim}$ (W/W)	Por Cidade		Para o Brasil	
		$ICEE_{prop}$ (W/W)	Variação (%)	$ICEE_{prop}$ (W/W)	Variação (%)
FZSF	3,83	3,62	-5,8%	3,73	-2,7%
FZEF	3,84	3,62	-6,1%	3,73	-2,9%
FZSV	4,66	4,56	-2,2%	4,74	1,7%
FZEV	4,41	4,56	3,3%	4,74	7,0%
CBSF	3,51	3,61	2,8%	3,73	5,9%
CBEF	3,64	3,61	-0,8%	3,73	2,4%
CBSV	4,13	4,47	7,6%	4,74	12,9%
CBEV	4,10	4,47	8,3%	4,74	13,5%
CGSF	3,63	3,75	3,2%	3,73	2,7%
CGEF	3,77	3,75	-0,5%	3,73	-1,1%
CGSV	4,51	4,77	5,5%	4,74	4,9%
CGEV	4,56	4,77	4,4%	4,74	3,8%
BRSF	3,63	3,82	5,0%	3,73	2,7%
BREF	3,89	3,82	-1,8%	3,73	-4,3%
BRSV	4,67	4,94	5,5%	4,74	1,5%
BREV	4,95	4,94	-0,2%	4,74	-4,4%
SPSF	3,59	3,81	5,8%	3,73	3,8%
SPEF	3,86	3,81	-1,3%	3,73	-3,5%
SPSV	4,54	4,92	7,7%	4,74	4,2%
SPEV	4,89	4,92	0,6%	4,74	-3,2%
CTSF	3,43	3,82	10,2%	3,73	8,0%
CTEF	3,80	3,82	0,5%	3,73	-1,9%
CTSV	4,36	4,93	11,6%	4,74	8,0%
CTEV	4,84	4,93	1,8%	4,74	-2,1%

Um dos problemas verificados para a aplicação do modelo simplificado se deve ao fato de ele não fazer distinção entre equipamentos que trabalham com a estratégia de motor permanecendo ligado (*continous fan/cycling compressor*) ou ciclando (*cycling fan/cycling compressor*) à medida que o compressor cicla. No relatório desenvolvido pelo Southern California, Edison Design & Engineering Services (2006) sobre a utilização do EER e SEER para previsão do desempenho sazonal em sistemas comerciais, mostra que, para aplicações em pequenos escritórios, a variação do SEER pode ser de -10% a 11% comparando-se as duas estratégias de operação do motor do ventilador, mesmo após os respectivos ajustes às condições climáticas.

Segundo a classificação brasileira (INMETRO), realizada com base em um coeficiente de eficiência energética medida em regime permanente, os condicionadores de ar com velocidade fixa e variável foram classificados como A ($CEE > 3,23$ W/W) e, portanto, receberam

o Selo Procel. Caso fossem utilizados os requisitos mínimos de eficiência energética de condicionadores de ar do tipo *split* e janela segundo a União Europeia, apresentados na Tab. (2.8), e o coeficiente integrado de eficiência energética proposto ($ICEE_{prop}$) seria possível evidenciar a diferença entre as zonas bioclimáticas brasileiras e, sobretudo, a superioridade dos condicionadores de ar que utilizam a tecnologia *inverter*. A Tab. (4.26) mostra a diferença entre a classificação segundo o INMETRO, no Brasil, e na União Europeia, de acordo com as classes mostradas na Tab. (2.8). Os condicionadores de ar utilizados neste estudo, independente da tecnologia aplicada, não atingiram classificação A em nenhuma das cidades, comprovando que existe maior exigência no mercado europeu, fato que induz os fabricantes a implantar tecnologias capazes de proporcionar alto nível de eficiência energética para atuarem neste mercado.

Tabela 4.26 – Comparação entre a classificação energética dos condicionadores de ar com velocidade fixa e variável, segundo a os requisitos do Brasil e da União Europeia.

Cidade	Velocidade	$ICEE_{prop}$	Classificação Energética	
			BRASIL	UE
CURITIBA	Fixa	3,82	A	D
	Variável	4,93	A	B
SÃO PAULO	Fixa	3,81	A	D
	Variável	4,92	A	B
BRASÍLIA	Fixa	3,82	A	D
	Variável	4,94	A	B
C.GRANDE	Fixa	3,75	A	D
	Variável	4,77	A	B
CUIABÁ	Fixa	3,61	A	D
	Variável	4,47	A	C
FORTALEZA	Fixa	3,62	A	D
	Variável	4,56	A	C
BRASIL	Fixa	3,73	A	D
	Variável	4,74	A	B

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Promover o progresso induzido vem se mostrando uma estratégia eficaz na busca de um mercado sustentável de eficiência energética nas principais economias mundiais. Em se tratando dos sistemas de climatização, pode-se observar exemplos de países como Japão, China, além da União Europeia, que, ao adotarem medidas restritivas em relação aos índices mínimos de eficiência energética em seus mercados, induziram os fabricantes a desenvolver tecnologias capazes de garantir o conforto humano aliado à economia de energia e consequente redução dos custos de operação. Neste aspecto, a utilização de indicadores que representem o real potencial de economia de energia pode influenciar o mercado a alterar seu patamar de eficiência energética e sustentabilidade.

O presente estudo buscou mostrar a influência de fatores climáticos, do perfil de utilização e ocupação e do tipo de tecnologia empregada sobre o desempenho térmico e energético de condicionadores de ar do tipo *Split Hi Wall*, com capacidade nominal de 2640 W e CEE nominal de 3,30 W/W. A ferramenta utilizada para obtenção dos dados para análise foi o programa computacional *EnergyPlus*, com a qual foram realizadas 24 simulações.

No intuito de melhor representar a diversidade climatológica do Brasil foram selecionadas seis cidades: Curitiba/PR, São Paulo/SP, Brasília/DF, Campo Grande/MS, Cuiabá/MT e Fortaleza/CE, de diferentes zonas bioclimáticas, com diferentes amplitudes térmicas e diferentes níveis de necessidade de refrigeração. Em todas as simulações foram utilizados arquivos climáticos TMY, elaborados no projeto SWERA.

Uma envoltória com as mesmas características construtivas e com a mesma orientação solar foi utilizada como base para as simulações nas cidades selecionadas, porém diferentes perfis de utilização e ocupação representaram aplicação residencial e comercial para o condicionador de ar.

O estudo da carga térmica, comprova que uma envoltória com as mesmas características construtivas e em uma mesma orientação solar pode apresentar demandas distintas de remoção de calor dependendo da zona climática que este estiver. O *Split Hi Wall*, com capacidade nominal de 2640 W, mostrou-se adequadamente dimensionado para os ambientes de Campo Grande, subdimensionados para os ambientes de Cuiabá e Fortaleza e superdimensionados para os ambientes de São Paulo, Brasília e Curitiba, sendo que na sala de estar de Curitiba foi observada a maior diferença (1733 W) entre a carga térmica (1310 W) e a capacidade do condicionador de ar, na condição de máxima temperatura no seu dia de projeto.

A eficiência energética foi calculada de forma integrada durante um ano de operação, utilizando-se o ICEE como indicador. Os *split's Hi Wall* apresentaram valores de ICEE entre 3,43 W/W e 4,95 W/W, na ordem de 4% e 50% maiores que o CEE_{nom} de 3,30 W/W, respectivamente. Os maiores valores de ICEE foram registrados pelos aparelhos que utilizam a tecnologia *inverter*.

O perfil de utilização e ocupação do ambiente possui baixa influência sobre a eficiência integrada dos condicionadores de ar. As maiores diferenças no valor do ICEE foram observadas nas cidades com as menores médias de temperatura externa. Nos equipamentos com velocidade fixa, a maior diferença (11%) foi constatada entre a sala e o escritório de Curitiba, enquanto nos *inverter's* a maior diferença foi observada nos ambientes de São Paulo (8%).

A influência das condições climáticas de uma localidade pode ser analisada comparando-se os valores de ICEE entre aparelhos com a mesma tecnologia, instalados no mesmo tipo de ambiente, nas diferentes cidades. A maior variação de ICEE foi observada com o condicionador de velocidade variável (*inverter*) entre o escritório de Brasília (4,95 W/W) e o de Cuiabá (4,10 W/W), na ordem de 21%.

Independente da tecnologia, os condicionadores de ar estudados apresentaram os maiores valores de ICEE em temperaturas externas na faixa entre 20 °C e 25 °C, sendo que nos equipamentos com velocidade fixa, a eficiência integrada foi de 4,01 W/W e nos *inverter's* 5,18 W/W. A medida que a temperatura externa atinge valores acima desta faixa o ICEE diminui. Porém, com temperaturas externas abaixo de 20 °C, o ICEE também diminui, devido ao aumento no número de ciclos do compressor e do número de horas que o ventilador permanece funcionando com o compressor desligado.

A demanda de remoção de calor de um ambiente aumenta à medida que a umidade relativa do ar, no seu interior é maior, para a mesma faixa de temperatura. Contudo, o aumento da troca de calor latente no evaporador não provoca aumento proporcional no trabalho mecânico do compressor e o resultado é o aumento do ICEE. Foi observado que quanto maior a capacidade latente maior o desempenho energético, dessa forma, cidades com umidade relativas maiores, demandam maiores taxas de remoção de calor total, porém o desempenho energético dos condicionadores de ar é superior. A maior diferença no ICEE, na ordem de 8%, foi encontrada entre o *split* com velocidade fixa instalado na sala de Fortaleza (UR_e 72%) e aparelho similar instalado em Brasília (UR_e 47%). A taxa de remoção de calor em Fortaleza (2135 W) é 109% superior que em Brasília (1020 W), enquanto que a potência elétrica é 95% superior.

A influência da tecnologia sobre o desempenho energético dos condicionadores de ar pode ser evidenciada comparando-se os valores de ICEE em ambientes similares em uma mesma cidade. Os resultados deste estudo evidenciam a superioridade dos equipamentos que utilizam a tecnologia *inverter*. Nas salas de estar, a maior diferença foi observada em Brasília onde o *split inverter* apresentou ICEE 29% superior ao *split* com velocidade fixa, enquanto nos escritórios da mesma cidade, a maior diferença foi de 27%.

A faixa de PLR entre 0,4 e 0,6 foi a que apresentou a maior quantidade de valores máximos, nos escritórios de Curitiba com ICEE de 5,19 W/W, São Paulo com 5,15 W/W e Brasília com 5,08 W/W, em média 56% maior que o CEE_{nom} do equipamento. Esta grande vantagem da utilização da tecnologia *inverter* sobre os aparelhos convencionais não pode ser percebida com um CEE em regime permanente, com o equipamento operando em carga plena.

O consumo de energia elétrica do condicionador de ar ao longo do ano e o seu respectivo custo são fatores relevantes que interferem na decisão de compra. Em Campo Grande, cujos aparelhos estão adequadamente dimensionados, utilizando a tecnologia *inverter*, pode-se observar uma redução de consumo em relação ao fixo de 26% na sala de estar e 22% no escritório. Nas cidades de Brasília, São Paulo e Curitiba, onde os condicionadores estão superdimensionados, esta redução de consumo é maior que em Campo Grande, podendo chegar a 32% nos ambientes de Curitiba. As diferenças bioclimáticas produzem grande influência sobre o consumo de energia elétrica de um condicionador de ar. Um equipamento *inverter* instalado na sala de Curitiba apresentou um consumo de energia aproximadamente oito vezes maior que o mesmo aparelho instalado em uma sala similar em Fortaleza, embora o ICEE seja apenas 7% menor.

O estudo mostra que a demanda de remoção de calor dos ambientes não varia de forma simples, sofrendo influência das condições climáticas, do perfil de utilização e que é grande a diferença entre a utilização de um condicionador de ar com velocidade fixa e outro que utiliza a tecnologia *inverter*. Dessa forma, o CEE, indicador de eficiência energético utilizado pelo INMETRO, mostra-se insuficiente para informar ao usuário o real desempenho energético dos condicionadores de ar.

A exemplo das principais economias mundiais, o estudo propõe a utilização de um coeficiente de eficiência integrado, o $ICEE_{prop}$, calculado segundo a característica climatológica do local onde o condicionador de ar irá operar e na informação de eficiência energética obtida em condições pré-fixadas de fator de carga e temperatura externa. A aplicação dessa metodologia visa contribuir com profissionais, tais como engenheiros e arquitetos, na

determinação da eficiência energética de condicionadores de ar aplicados a ambientes de pequeno porte, sem a necessidade de utilização de programas de simulação computacionais mais complexos.

Comparando-se os resultados de ICEE simulados ($ICEE_{sim}$) com os valores calculados através do modelo proposto ($ICEE_{prop}$) quando foram utilizados os coeficientes que representam as faixas de temperatura externas por cidade, a menor diferença foi observada no escritório de Brasília, na ordem de 0,2% e a maior na sala de Curitiba, 11,6%. Quando foram utilizados os coeficientes para o Brasil, a menor variação em relação aos valores simulados foi de -1,1%, no escritório de Campo Grande e a maior foi de 13,5% no escritório de Cuiabá. Através da aplicação desta metodologia é possível evidenciar as grandes diferenças no desempenho nas diversas zonas bioclimáticas e, principalmente, na tecnologia empregada em cada condicionador de ar.

Aliado à aplicação do coeficiente integrado de eficiência energética a promoção do progresso induzido exigirá a definição de novos limites para os níveis de classificação energética, forçando os fabricantes a buscar soluções para melhorar o desempenho dos seus equipamentos e garantir vantagens competitivas que os mantenham no mercado.

Com a implementação das medidas apresentadas neste estudo, será possível induzir consumidores e fabricantes a contribuir com a redução no consumo de energia dos condicionadores de ar em todo território nacional. Com a alteração no modelo de classificação energética, a informação disponibilizada nos aparelhos possibilitará ao consumidor, que em geral é leigo nas questões técnicas abordadas no presente estudo, assumir um protagonismo na escolha do condicionador de ar, pois as diferenças mostradas poderão fazê-lo optar por equipamentos com tecnologias que promovem maior desempenho. Por outro lado, o aumento da exigência nos requisitos e da demanda do mercado induzirá os fabricantes a implementar novas tecnologias ou soluções com eficácia comprovada em outros mercados. Por fim, elencam-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- a) realizar estudos similares utilizando arquivos climáticos de outros métodos;
- b) realizar simulações em outras localidades das diferentes zonas bioclimáticas;
- c) estudar a eficiência energética em aquecimento para condicionadores de ar nas zonas bioclimáticas que utilizam este recurso;
- d) realizar um estudo de campo, comparando os valores simulados com os obtidos em condição real de instalação.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **RE nº9, de 16 de janeiro de 2003**. Orientação Técnica sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior em Ambientes Climatizados Artificialmente de Uso Público e Coletivo. Disponível em: <http://portal.anvisa.gov.br/documents/33880/2568070/RE_09_2003.pdf/f4af80d4-8516-4f9c-a745-cc8b4dc15727>. Acesso em: 15 mai. 2017.

AIR CONDITIONING, HEATING AND REFRIGERATION INSTITUTE (AHRI). **ANSI/AHRI Standard 210/240. Performance Rating of Unitary Air-Conditioning & Air-Source Heat Pump Equipment**, 2008. Disponível em: www.ahrinet.org/App_Content/ahri/files/.../AHRI_Standard_210-240_2017.pdf > Acesso em: 26 jan. 2017.

AIR CONDITIONING, HEATING AND REFRIGERATION INSTITUTE (AHRI). **ANSI/AHRI Standard 1230. Performance Rating of Variable Refrigerant Flow (VRF) Multi-Split Air-Conditioning and Heat Pump Equipment**. 2010. Disponível em: <www.ahrinet.org/App_Content/ahri/files/.../VRF_OM.pdf> Acesso em: 8 fev. 2017b.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **90.1 - Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. 2010. Disponível em: <http://www.usalighting.com/stuff/contentmgr/files/1/b90ce247855d0f17438484c003877338/misc/ashrae_90_1_2010.pdf> Acesso em: 15 mai. 2017.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **Fundamentals Handbook - 2009**. Disponível em: <http://www.worldcat.org/title/2009-ashrae-handbook-fundamentals/oclc/525070649> > Acesso em: 06 mar. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220-3: Desempenho Térmico de Edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16401-1: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 3: Projetos das Instalações**. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO (ABRAVA). **Panorama HVAC-R Brasil 2015**. Disponível em: <<http://abrava.com.br/?p=2760>> Acesso em: 03 set. 2016.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN). **Balanço Energético Nacional - 2017**. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/>> Acesso em: 20 mar. 2018.

BHATIA, A. **HVAC variable refrigerante flow systems**. Continuing Education and Development, Inc., 2014. Disponível em:

<<http://www.seedengr.com/Variable%20Refrigerant%20Flow%20Systems.pdf>> Acesso em: 16 set. 2016.

BRASIL. **Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001 – Lei de Eficiência Energética**. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10295.htm>. Acesso em: 16 set. 2016.

BROFMAN, E. G. **Estudo de Cogeração em Hotéis**. 2014. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2014.

CARLO, J. C. **Processamento de arquivos climáticos para simulação do desempenho energético de edificações**. Florianópolis: LabEEE/UFSC, 2005.

CARRIER DO BRASIL. **Split Hi Wall X_Power - Manual de Instalação, Operação e Manutenção**. Disponível em: www.carrierdobrasil.com.br/modelo/descricao/minha-casa/19/inverter-x-power> Acesso em: 12 nov. 2015.

CIBSE Journal. **Evaluating and improving the performance of variable refrigerant flow air conditioning systems**, 2014. Disponível em: <http://www.cibsejournal.com/cpd/modules/201405>> Acesso em: 22 jan. 2018.

DUARTE, V. C. P. **Comparação do Desempenho Energético de Sistemas de Climatização para uma Edificação Comercial em Florianópolis/SC**. 2014. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2014.

ECONOLER *et al.* **Cooling Benchmarking Study** - 2011. Disponível em: <<https://s3.amazonaws.com/clasp-siteattachments/RAC-benchmarking-Report.pdf>> Acesso em: 15 mai. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço Energético Nacional 2017 – Anobase 2016**. Rio de Janeiro, 2017. 296p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Nacional de Eficiência Energética**. Outubro 2011. 156p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Nacional de Energia 2030**. Rio de Janeiro, 2007. 412p.

ENERGYPLUS. **Energy Simulation Software, Version 8.4**. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>. Acesso em: 18 de ago. 2015.

ENERGYPLUS. **EnergyPlus Data Sets**. EnergyPlus™ Documentation, Version 8.4. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>. Acesso em: 18 de ago. 2015c.

ENERGYPLUS. **EnergyPlus Engineering Reference – The Reference to EnergyPlus Calculations**, EnergyPlus™ Documentation, Version 8.4. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>. Acesso em: 18 de ago. 2015b.

GOETZLER, W. **Variable Refrigerant Flow System**. ASHARE Journal, Atlanta, v. 49, p. 24-31, abr. 2007.

GOULART, S.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados Climáticos para Projeto e Avaliação Energética de Edificações para 14 Cidades Brasileiras**. 2. ed. Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC, 1998.

GOULART, S. V. G. **Dados climáticos para avaliação de desempenho térmico de edificações em Florianópolis**. 1993. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 1993.

GOVERNO quer ar-condicionado mais eficiente. **Estado de Minas**, Belo Horizonte, 16 outubro 2017. Disponível em: <https://www.em.com.br/app/noticia/economia/2017/10/16/internas_economia,908810/governo-quer-ar-condicionado-mais-eficiente.shtml> Acesso em: 30 mar. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Portaria 372/2010**. Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C). Rio de Janeiro/RJ, 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Portaria 007/2011**. Requisitos de Avaliação de conformidade para Condicionadores de Ar. Rio de Janeiro/RJ, 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Portaria 372/2010**. Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). Rio de Janeiro, 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Portaria 410/2013**. Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE para Condicionadores de Ar. Rio de Janeiro, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Tabelas de consumo/eficiência energética: Condicionadores de ar Split Hi-Wall**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/condicionadores.asp>> Acesso em: 15 fev. 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2015**. Disponível em: <<http://www.worldenergyoutlook.org/weo2015/>>. Acesso em: 14 ago. 2016.

KWON, L. *et al.* **Modeling of variable refrigerant flow System for the cooling season**. In: International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Indiana: Proceedings, 2012.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (LABEEE). **Arquivos Climáticos para Simulação Energética**. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br>>. Acesso em: 22 set. 2016.

LAMBERTS, R., WESTPHAL, F. S., BATISTA J. O., **Avaliação de desempenho térmico de componentes construtivos utilizando o EnergyPlus**. 2005. Disponível em: www.infohab.org.br/encac/files/2005/ENCAC05_0145_154.pdf> Acesso em: 17 jan. 2017.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O.R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás/Procel, 2014.

LOMBARD, L. P. *et al.* **A review of HVAC systems requirements in building energy regulations**. Energy and Buildings, [S.l], n. 2-3, v. 43, p. 255–268, fev./mar. 2011.

MORISHITA, C. **Impacto do Regulamento para Eficiência Energética em Edificações no Consumo de Energia Elétrica do Setor Residencial Brasileiro**. 2011. 232 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2011.

PEREIRA, C.D., LAMBERTS, R., GHISI, E. **Nota Técnica Referente aos Níveis Mínimos de Eficiência Energética de Condicionadores de Ar no Brasil**. Florianópolis: LabEEE, 2013.

PESSOA, J. L. N.; GHISI, E. **Estado da Arte em Eficiência Energética: Sistemas de Condicionamento de Ar**. Florianópolis: LabEEE, 2015.

POZZA, F. **Análise Térmica e Energética de uma Edificação Residencial Climatizada com Sistema de Vazão de Refrigeração Variável – VRF**. 2001. 279 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2011.

PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM (PBE). **Programa Brasileiro de Etiquetagem**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/qualidade/eficiencia.asp>> Acesso em: 15 mai. 2018.

RAUSTAD, R. **Creating Performance Curves for Variable Refrigerant Flow HeatPump in EnergyPlus**, Florida Solar Energy Center, University of Central Florida, Florida, U.S.A, 2012. Disponível em: <<http://www.fsec.ucf.edu/en/publications/pdf/FSEC-CR-1910-12.pdf>> Acesso em: 13 mar. 2017.

SANTANA, M. V. **Influência de Parâmetros Construtivos no Consumo de Energia de Edifícios de Escritório Localizados em Florianópolis - SC**. 2006. 196 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2006.

SHELLER, C. *et al.* **Análise de Arquivos Climáticos para Simulação de Desempenho Energético de Edificações**. Florianópolis: LabEEE, 2015.

SHAH, N., WAIDE, P.; PHADKE, A. **Cooling the planet: Opportunities for Deployment of Super-efficient Room Air Conditioners**. 2013. Disponível em:

<<https://ies.lbl.gov/publications/cooling-planet-opportunities>> Acesso em: 16 out. 2017.

SHIREY, D.; HENDERSON Jr.; H. **Dehumidification at Part Load**. ASHRAE Journal.

2004. Disponível em:

<<https://pdfs.semanticscholar.org/4016/0516ee665fb91b1127d45d92784cba015349.pdf>>

Acesso em: 12 fev. 2018.

SISTEMA DE ETIQUETAGEM ENERGÉTICA DE PRODUTOS (SEEP). **Regulamento Delegado 626/2011 – União Europeia. Jornal Oficial da União Europeia**, 2011.

Disponível em: <<https://www.seep.pt/pt-PT/Labeling/Paginas/eu-label.aspx>> Acesso em: 15 mar. 2018.

SOUTHERN CALIFORNIA EDISON DESIGN & ENGINEERING SERVICES. **EER & SEER as predictors of commercial seasonal cooling performance**, 2006. Disponível em:

<[http://www.doe2.com/download/deer/SEER%2BProgThermostats/EER-](http://www.doe2.com/download/deer/SEER%2BProgThermostats/EER-SEER_Upgraded_Com_Final-Report_v4.pdf)

[SEER_Upgraded_Com_Final-Report_v4.pdf](http://www.doe2.com/download/deer/SEER%2BProgThermostats/EER-SEER_Upgraded_Com_Final-Report_v4.pdf)>. Acesso em: 21 fev. 2018.

STOECKER W.F., JONES J.W. **Refrigeração e Ar Condicionado**. São Paulo: Mc Gran-Hill do Brasil, 1983.

TAVARES, S. F. T. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. 2006. 225 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2006.

WANG, X. **Modeling and experiment analysis of variable refrigerant flow air-conditioning systems**. Disponível em:

<http://www.ibpsa.org/proceedings/bs2009/bs09_0361_368.pdf> Acesso em: 15 mar. 2018.

XAVIER, A. S. **Influência do perfil climatológico brasileiro no desempenho energético de condicionador de ar com tecnologia VRF em condições de carga parcial para edificação comercial**. 2016. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2016.

ZHOU Y.P. *et al.* **Energy simulation in the variable refrigerant flow air conditioning system under cooling conditions**. Energy and Buildings, [S.l], n. 2, v. 39, p. 212-220, fev. 2007.

ZHOU, Y.P. *et al.* **Simulation and experimental validation of the variable refrigerant volume (VRV) air conditioning system in EnergyPlus**. Energy and Building, [S.l], n. 6, v. 40, p. 1041-1047, 2008.

ANEXO A - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS GERAIS DO X_POWER

CÓDIGOS CARRIER		42LVCA009515LC	38LVCA009515MC	42LVQA009515LC	38LVQA009515MC
CAPACIDADE NOMINAL REFRIGERAÇÃO (BTU/h) - (W)		9.000 - 2.640		9.000 - 2.640	
CAPACIDADE NOMINAL AQUECIMENTO (BTU/h) - (W)		-		10.000 - 2.930	
ALIMENTAÇÃO (V-Ph-Hz)		220-1-60			
CORRENTE A PLENA CARGA	TOTAL (A)	3,60		3,64	
POTÊNCIA A PLENA CARGA	TOTAL (W)	787		800	
EFICIÊNCIA (W / W)		3,35		3,30	
DISJUNTOR (A)		15			
BITOLA MÍN./MÁX. CABO (mm ²) - Ver item Inst. Elétrica		2,5 - Dist. Máx. 50m			
REFRIGERANTE		R410A			
SISTEMA DE EXPANSÃO		Capilar			
CARGA DE GÁS (g) (Até 7,5m)		570		800	
PESO SEM EMBALAGEM (kg)		7,5	25	8,5	27
DIMENSÕES LxAxP (mm)		710x250x195	700x535x235	790x265x195	660x540x255
DISTÂNCIA EQUIVALENTE ENTRE UNIDADES (m)		20			
DESNÍVEL ENTRE UNIDADES (m)		8			
DIÂMETRO DO DRENO (pol)		1"			
COMPRESSOR TIPO		Rotativo			
VENTILADOR	TIPO / QUANTIDADE	Siroco / 1	Axial / 1	Siroco / 1	Axial / 1
	VAZÃO (m ³ /h)	480	-	620	-
DIÂMETRO DAS CONEXÕES	SUCÇÃO (pol)	3/8"			
	EXPANSÃO (pol)	1/4"			
DIÂMETRO DAS LINHAS (Ver item Tubulação de Interligação)	SUCÇÃO (pol)	3/8"			
	EXPANSÃO (pol)	1/4"			

Fonte: CARRIER (2015).

APENDICE A

A1 - Resultados obtidos em Calorímetro com o equipamento operando em velocidade fixa.

Teste	Condições de Teste				Resultados Obtidos			COP
	Freq. Compressor	Amb. Interno		Amb. Externo	Capacidade Total		Potência Total	
	(Hz)	TBS _i (°C)	TBU _i (°C)	TBS _e (°C)	(Btu/h)	(W)	(W)	
1	52	26,72	16,98	39,99	7635,60	2236,46	866,51	2,58
2	52	26,73	16,93	35,03	8457,48	2477,20	801,08	3,09
3	52	26,72	17,01	29,95	9378,72	2747,03	730,00	3,76
4	52	26,71	17,08	24,99	11034,36	3231,96	661,68	4,88
5	52	26,74	19,48	40,02	7933,68	2323,78	872,30	2,66
6	52	26,73	19,47	35,04	8992,08	2633,78	798,03	3,30
7	52	26,71	19,48	29,92	10901,52	3193,06	740,07	4,31
8	52	26,73	19,50	24,84	12183,48	3568,54	669,52	5,33
9	52	26,75	22,02	40,04	9149,76	2679,96	891,28	3,01
10	52	26,73	22,06	35,01	11059,20	3239,24	821,50	3,94
11	52	26,75	22,13	30,05	12269,88	3593,85	748,51	4,80
12	52	26,74	22,03	24,97	13292,64	3893,41	671,09	5,80

A2 - Resultados obtidos em Calorímetro com o equipamento operando em velocidade variável

Teste	Condições de Teste				Resultados Obtidos			COP
	Freq. Compressor	Amb. Interno		Amb. Externo	Capacidade Total		Potência Total	
	(Hz)	TBS _i (°C)	TBU _i (°C)	TBS _e (°C)	(Btu/h)	(W)	(W)	
13	60	26,74	19,55	35,00	10915,56	3197,16	975,55	3,28
14	56	26,73	19,45	34,98	9797,76	2869,76	874,36	3,28
6	52	26,73	19,47	35,04	8992,08	2633,78	798,03	3,30
15	48	26,70	19,39	35,02	8522,28	2496,17	723,83	3,45
16	44	26,73	19,47	35,01	8070,84	2363,95	649,99	3,64
17	40	26,68	19,42	35,01	7538,40	2208,00	580,28	3,81

APENDICE B

B1 – Resultados obtidos nas simulações com condicionador de ar com velocidade fixa, por faixa de temperatura externa.

CIDADE	TBS _e ≤ 20 °C			20 °C < TBS _e ≤ 25 °C			25 °C < TBS _e ≤ 30 °C			30 °C < TBS _e ≤ 35 °C			TBS _e > 35 °C			RESULTADO ANUAL						
	OPER (h)	Calor remov. (Wh)	Energia consum. (kWh)	ICEE	OPER (h)	Calor remov. (Wh)	Energia consum. (kWh)	ICEE	OPER (h)	Calor remov. (Wh)	Energia consum. (kWh)	ICEE	OPER (h)	Calor remov. (Wh)	Energia consum. (kWh)	ICEE	OPER (h)	Calor remov. (Wh)	Energia consum. (kWh)	ICEE		
AMBIENTE																						
FORTALEZA	0	0	0	125	103371	23187	4,30	2448	5091905	1307625	3,88	763	1676185	460833	3,64	0	0	0	3336	6688461	1791845	3,83
BRASÍLIA	165	63886	18888	1208	945701	249150	3,80	1271	1306879	362774	3,60	142	193425	60360	3,20	0	0	0	2786	2505791	691172	3,63
C.GRANDE	111	32779	10361	868	889886	223743	3,98	1307	1881333	500520	3,76	702	1372700	414511	3,31	6	13599	4624	2594	4190297	1153759	3,63
SÃO PAULO	582	79030	32298	922	694066	182618	3,80	589	702662	191374	3,67	111	185443	53858	3,32	0	0	0	2214	1637200	462148	3,59
CUABÁ	58	26223	7487	268	331109	81181	4,08	1334	2414704	628881	3,64	1292	2822027	846035	3,34	192	448937	156666	3164	6942349	1720370	3,51
CURITIBA	609	70945	31443	804	424830	116209	3,59	408	393997	109133	3,61	28	38491	11750	3,28	0	0	0	1849	928263	270335	3,43
SALA DE ESTAR																						
SUB-TOTAL	1535	269663	100477	4215	3385963	878209	3,86	7357	11796580	3100407	3,80	3038	6288271	1849386	3,40	198	462586	161290	16343	22195362	6089228	3,64
BRASÍLIA	301	211054	56015	1448	1859576	457550	4,06	1297	1998430	523901	3,81	118	209831	62911	3,34	0	0	0	3164	4278892	1100377	3,89
SÃO PAULO	935	512004	142165	1170	1420675	351348	4,04	668	1118071	289386	3,85	94	192532	56701	3,40	0	0	0	2667	3238282	839595	3,88
FORTALEZA	0	0	0	64	256451	57020	4,50	2531	5801910	1481382	3,92	667	1969426	559952	3,57	0	0	0	3362	8027787	2089354	3,84
CURITIBA	1071	362344	110669	993	1127008	281574	4,00	471	646617	168483	3,84	28	53528	15961	3,38	0	0	0	2513	2188496	576288	3,80
C.GRANDE	382	118059	31295	884	1190985	289019	4,12	1486	2798327	721539	3,88	681	1519315	455689	3,38	5	11865	3999	3238	5656551	1501541	3,77
CUABÁ	118	85610	22670	406	645006	151375	4,26	1377	3068762	776058	3,95	1229	2955005	877949	3,37	159	379914	132148	3289	7134117	1960099	3,64
SUB-TOTAL	2607	1287070	362834	4965	6499700	1587881	4,09	7780	15427138	3960748	3,90	2817	6918837	2019664	3,43	164	391780	136146	18333	30524325	8067754	3,78
TOTAL	4142	1555733	461291	9180	9885663	2466150	4,01	15137	27218017	7061155	3,85	5855	13206908	3869049	3,41	362	854366	297437	34676	52726887	14157082	3,72

APENDICE C

C1 – Valores máximos de ICEE obtidos em cada simulação, condições climáticas e de operação dos condicionadores de ar utilizados e resultado sobre as condições de conforto humano nos ambientes internos.

VELOCIDADE	AMBIENTE	CIDADE	Amb. Interno		Amb. Externo		Condicionador de Ar			
			T_{op}	UR_i	TBS_e	UR_e	OPER	PLR	RTF	ICEE
			($^{\circ}C$)	(%)	($^{\circ}C$)	(%)				
VELOCIDADE FIXA	SALA DE ESTAR	SÃO PAULO	24.90	60.38	25.57	69.88	1%	0.70	0.60	4.29
		CUIABÁ	25.10	60.41	24.88	88.64	7%	0.68	0.59	4.25
		CURITIBA	24.33	54.60	23.89	76.57	7%	0.44	0.40	4.25
		CAMPO GRANDE	24.80	59.90	23.63	87.25	3%	0.65	0.51	4.23
		FORTALEZA	24.95	62.64	25.21	89.27	4%	0.66	0.57	4.22
		BRASÍLIA	24.03	62.96	24.47	72.12	1%	0.46	0.40	4.13
	ESCRITÓRIO	CAMPO GRANDE	25.21	65.82	24.39	85.84	1%	0.74	0.60	4.52
		CUIABÁ	25.14	58.32	24.55	87.02	2%	0.83	0.70	4.43
		FORTALEZA	25.12	57.46	24.97	89.08	6%	0.84	0.71	4.37
		SÃO PAULO	24.66	50.21	23.63	75.84	11%	0.69	0.60	4.24
		CURITIBA	24.37	50.39	23.26	76.44	12%	0.63	0.56	4.19
BRASÍLIA	24.40	48.87	23.22	74.21	28%	0.63	0.52	4.18		
VELOCIDADE VARIÁVEL	SALA DE ESTAR	CUIABÁ	25.15	62.48	24.86	83.96	8%	0.63	0.73	5.41
		CAMPO GRANDE	24.92	61.77	23.96	82.47	11%	0.54	0.63	5.37
		FORTALEZA	25.13	63.75	25.82	83.04	4%	0.66	0.77	5.35
		SÃO PAULO	24.62	61.68	23.77	78.40	14%	0.47	0.54	5.29
		CURITIBA	24.33	61.87	23.84	75.22	11%	0.42	0.48	5.25
		BRASÍLIA	24.24	60.66	24.07	69.71	14%	0.38	0.56	5.14
	ESCRITÓRIO	CAMPO GRANDE	24.52	67.77	23.53	88.86	2%	0.63	0.68	5.63
		FORTALEZA	24.99	61.54	24.93	91.53	6%	0.81	0.92	5.54
		CUIABÁ	24.96	59.43	23.78	86.27	8%	0.75	0.87	5.50
		SÃO PAULO	24.47	56.34	23.44	76.11	13%	0.63	0.74	5.40
		BRASÍLIA	24.25	56.24	23.13	75.08	16%	0.59	0.69	5.37
CURITIBA	24.16	57.31	23.10	76.73	20%	0.56	0.66	5.36		