



# **Abordagem para a avaliação do desempenho térmico de Data Centers baseada em novos índices (EUED, TWI e PDD) envolvendo elementos psicrométricos**

**Alexandre Fernandes Santos**

Tese para obtenção do Grau de Doutor em  
**Engenharia Mecânica**  
(3<sup>o</sup> ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Miguel de Figueiredo Dinis Oliveira Gaspar

**Outubro de 2021**



Data das provas públicas: 22 de setembro de 2021

Júri das provas de Doutoramento em Engenharia Mecânica pela Universidade da Beira Interior:

Doutor Paulo Jorge dos Santos Pimentel de Oliveira  
Professor Catedrático da Universidade da Beira Interior

Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar  
Professor Associado da Universidade de Coimbra

Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva  
Professor Auxiliar da Universidade da Beira Interior

Doutor Christian Johann Losso Hermes  
Professor Adjunto da Universidade de Santa Catarina, Brasil

Doutor Pedro Miguel de Figueiredo Dinis Oliveira Gaspar  
Professor Auxiliar da Universidade da Beira Interior

Doutor Miguel Alexandre Trigueiros Fernandes Covas  
Professor Auxiliar convidado da Universidade da Beira Interior



# Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Dr. Pedro Dinis Gaspar, pelo conhecimento, sabedoria e arte na transmissão dos conteúdos.

Agradeço a dedicação de minha esposa, Marcia Cordeiro de Oliveira Santos, pelo esforço incansável.

Às minhas filhas, Kantsy e Melanie Cordeiro de Oliveira Santos, pela maravilhosa companhia nesta vida e por toda a eternidade.

Ao professor e amigo Heraldo Souza, pelo apoio na execução das atividades de pesquisa e pela oportunidade de discussão dos resultados.

Aos funcionários da Escola Técnica Profissional, pela ajuda durante a elaboração desta Tese.

Aos meus alunos que, em se dedicando aos estudos e ao trabalho em refrigeração e ar condicionado, investem na certeza de uma carreira sólida, vislumbrando um futuro promissor.

Aos clientes que, entusiasmados e com espírito empreendedor, investem e arriscam talento e tempo na arte do negócio, contribuindo social e ambientalmente para um mundo melhor, movimentando diversas cadeias e riquezas, razão pela qual o meu trabalho existe. Que os resultados deste estudo possam efetivamente auxiliar na tomada de decisão para a seleção da cidade onde se localizar um Data Center.

Aos leitores, com a expectativa que o documento aqui estruturado possa motivá-los a desenvolver novos estudos e assim confirmar tais resultados, no sentido de elaborar sua própria visão acerca da eficiência eco-energética nos projetos de Data Centers.



## Resumo

Com a ascensão do mercado de Data Centers (DC), os gastos mundiais com infraestrutura de DC devem chegar a 200 bilhões de dólares em 2021, que é um aumento de 6% em relação ao esperado para 2020 [1]. A eficiência energética nestas instalações de elevado consumo de energia é fundamental. Já existem metodologias para mensurar essa eficiência, como seja o índice PUE (*Power Usage Effectiveness*). Porém, este índice, apesar de importante, não reflete de forma integral a eficiência. Nesta tese, são apresentados os valores de PUE para 38 Data Centers a serem localizados em 37 cidades brasileiras e 1 cidade (Chicago) dos Estados Unidos da América, e comparada a eficiência deste índice com um novo criado, o índice de Eficiência no Consumo de Energia em fase de projeto (EUED - *Energy Usage Effectiveness Design*). A métrica do EUED, ao invés de considerar a potência como elemento de comparação, usa a energia. O PUE é apenas mensurado com mais precisão no campo em forma de energia, ou seja, kWh/kWh, de acordo com as condições externas das 8760 horas anuais. Este método possibilita ao Investidor, com os dados do ASHRAE Weather Data Viewer, fazer simulações em múltiplas cidades com o intuito de selecionar o local ideal para localizar um Data Center. Este poderá ainda simular o consumo de energia anual do Data Center, considerando as variações ao longo do ano da temperatura de bolbo seco e temperatura de bolbo húmido coincidentes do ar. Os consumos de energia com a infraestrutura, que consistem no somatório do consumo de energia com os equipamentos de ar condicionado, equipamentos de Tecnologias de Informação, iluminação e outros, nas diferentes cidades simuladas, fornece uma diferença de mais de 1,21% de São Paulo em relação a Curitiba e de 10,61% de Rio de Janeiro em relação a Curitiba. Os índices obtidos com aplicação do índice EUED foram respetivamente, de 1,25 [(kWh/ano)/(kWh/ano)] para Curitiba, 1,26 [(kWh/ano)/(kWh/ano)] para São Paulo e de 1,38 [(kWh/ano)/(kWh/ano)] para Rio de Janeiro, providenciando uma diferença de 16,86% para Curitiba, de 16,19% para São Paulo e de 10,31% para Rio de Janeiro em relação ao PUE COA (*Power Usage Effectiveness - Constant Outdoor Air*). Utilizando um método transparente ao projetar um sistema de energia com baixo impacte ambiental, o TEWI (*Total Equivalent Warming Impact*), corresponde a uma métrica do impacte do aquecimento global dos equipamentos com base no total de emissões diretas e indiretas, relacionadas a uma correlação equivalente dos gases com efeito estufa durante a operação do equipamento e a eliminação dos fluidos refrigerantes no fim da vida útil. Foi constatado que o consumo anual de energia de sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado é aproximado para as duas cidades com condições climáticas similares, mas o TEWI é

extremamente diferente, sendo em Chicago (EUA) de 1.781.566,043 [kg CO<sub>2</sub>/10 anos] e em Curitiba (Brasil) de 667.042,128 [kg CO<sub>2</sub>/10 anos]. Corresponde um gasto anual em Chicago relativamente a Curitiba de mais de 267%. Assim como o TEWI, numa visão holística dos processos, também foi criado o índice de Impacte Total da Água (TWI - *Total Water Impact*), em que os usos direto e indireto de água são utilizados para comparar sistemas de condensação a ar e a água num sistema de refrigeração. Para tal foram simulados chillers de condensação a ar e a água e foi obtido para uma capacidade de 200 TR (Toneladas de refrigeração), um consumo superior de 5% no sistema com condensação a ar e na capacidade de 500 TR, um consumo superior de 25% no sistema de condensação a água. Ou seja, à medida que a potência de refrigeração aumenta, verifica-se uma alteração da melhor eficiência no consumo de sistemas com chillers com condensação a água para sistemas com chillers com condensação a ar. Porém, à medida que surgem novos padrões, a eficiência do chiller está a tornar-se cada vez mais importante, pois chillers de rolamentos magnéticos arrefecidos a água em ambientes com temperatura elevado apresentam baixo valor de NPLV (*Non-standard Part Load Value*), certamente levando no futuro a índices de TWI mais baixos do que os de chillers arrefecidos a ar. De forma a simplificar a visão de eficiência num Data Center, foi criado um novo índice denominado Data Center de Design Perfeito (PDD - *Perfect Design Data Center*). Este índice facilita a visualização de um Data Center perfeito, utilizando uma classificação em ordem crescente. Para tal, foram criadas tabelas qualitativas para classificação de eficiência energética de DC a partir desse índice. Nas 37 cidades simuladas, aquela que apresentou melhor índice PDD, com o valor de 0,803 [(kWh/ano)/(kWh/ano)], foi a cidade de Curitiba e aquela que apresentou o pior índice PDD, com o valor de 0,694 [(kWh/ano)/(kWh/ano)], foi a cidade de Natal. Apesar das simulações terem sido realizadas para as principais 37 cidades brasileiras, este método pode ser replicado para qualquer local do globo, podendo gerar ao Investidor de Data Center, tabelas de decisão com as simulações energéticas. Este método apresenta-se como sendo o único que faz uso da psicrometria para decisão de instalação de um Data Center, fazendo uso de sistemas *free cooling*, adiabáticos ou de ar condicionado com variação do COP de acordo com a admissão do ar no condensador. O impacto dos índices PDD e EUED para um Data Center é equivalente ao IPLV (*Integrated Part Load Value*), para a escolha de um equipamento de ar condicionado.

## **Palavras-chave**

Data Centers, Refrigeração, índices de desempenho, EUED, PUE, TEWI, PDD.

# Abstract

With the rise of the Data Center market, worldwide spending on DC infrastructure is expected to reach 200 billion dollars in 2021, which is a 6% increase compared to what was expected for this year [1]. Energy efficiency in these energy-intensive installations is critical. There are already methodologies to measure this efficiency, such as the PUE (Power Usage Effectiveness) index. However, this index, although important, does not fully reflect efficiency. In this thesis, the PUE values for 38 Data Centers to be located in 37 Brazilian cities and 1 city (Chicago) in the United States of America are presented, and the efficiency of this index is compared with a new one, the Consumption Efficiency index of Energy in design phase (EUED - Energy Usage Effectiveness Design. The EUED metric, instead of considering power as a comparison element, uses energy, only after the project is completed is the PUE measured more accurately in the field in the form of energy, that is, kWh/kWh., according to the external conditions of the 8760 hours per year. This method allows the Investor, with data from ASHRAE Weather Data Viewer, to make simulations in multiple cities in order to select the ideal place to locate a Data Center. It will also be able to simulate the annual energy consumption of the Data Center, considering the variations throughout the year of the coincident dry bulb temperature and the wet bulb temperature of the air. Energy consumption with infrastructure, which consists of the sum of energy consumption with air conditioning equipment, Information Technology equipment, lighting and others, in the different cities simulated, provides a difference of more than 1.21% in São Paulo. Paulo in relation to Curitiba and 10.61% of Rio de Janeiro in relation to Curitiba. The rates obtained by applying the EUED index were, respectively, 1.25 [(kWh/year)/(kWh/year)] for Curitiba, 1.26 [(kWh/year)/(kWh/year)] for São Paulo and 1.38 [(kWh/year)/(kWh/year)] for Rio de Janeiro, providing a difference of 16.86% for Curitiba, 16.19% for São Paulo and 10.31% for Rio January in relation to the PUE COA (Power Usage Effectiveness - Constant Outdoor Air). Using a transparent method when designing an energy system with low environmental impact, the TEWI (Total Equivalent Warming Impact) corresponds to a metric of the global warming impact of equipment based on the total direct and indirect emissions, related to an equivalent correlation greenhouse gases during equipment operation and disposal of refrigerants at end of life. It was found that the annual energy consumption of Heating, Ventilation and Air Conditioning systems is approximate for the two cities with similar climatic conditions, but the TEWI is extremely different, being in Chicago (USA) 1,781,566,043 [kg CO<sub>2</sub>/10 years] and in Curitiba (Brazil) of 667,042.128 [kg CO<sub>2</sub>/10 years]. Corresponds to an annual expense in Chicago relative to

Curitiba of more than 267%. As well as the TEWI, in a holistic view of the processes, the Total Water Impact index (TWI - Total Water Impact) was also created, in which the direct and indirect uses of water are used to compare air and water condensing systems in a refrigeration system. To this end, air and water condensing chillers were simulated and it was obtained for a capacity of 200 TR (Tons of cooling), a consumption higher than 5% in the system with air condensing and a capacity of 500 TR (Tons of cooling), a consumption higher than 25% in the water condensing system. In other words, as the cooling power increases, there is a change in the best efficiency in consumption from systems with water cooled chillers to systems with air cooled chillers. However, as new standards emerge, chiller efficiency is becoming increasingly important as water-cooled magnetic bearing chillers in high temperature environments have a low NPLV (Non-standard Part Load Value) value. certainly leading to lower TWI rates in the future than air-cooled chillers. In order to simplify the vision of efficiency in a Data Center, a new index called Perfect Design Data Center (PDD - Perfect Design Data Center) was created. This index facilitates the visualization of a perfect Data Center, using a classification in ascending order, were created qualitative tables for classification of energy efficiency of DC from this index. In the 37 cities simulated, the one that presented the best PDD index, with the value of 0.803 [(kWh/year)/(kWh/year)], was the city of Curitiba and the one that presented the worst PDD index, with the value of 0.694 [(kWh/year)/(kWh/year)], was the city of Natal. Although the simulations have been carried out for the main 37 Brazilian cities, this method can be replicated anywhere in the world, being able to generate decision tables with the energy simulations for the Data Center Investor. This method is the only one that makes use of psychrometrics to decide to install a Data Center, making use of free cooling, adiabatic or air conditioning systems with COP variation according to the intake of air in the condenser. The impact of the PDD and EUED indexes for a Data Center is equivalent to the IPLV (Integrated Part Load Value), for the choice of air conditioning equipment.

## **Keywords**

Data Centers, Refrigeration, performance indexes, EUED, PUE, TEWI, PDD.

# Índice

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>i</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>iii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>v</b>
<b>Índice</b> .....	<b>vii</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>ix</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>xi</b>
<b>Nomenclatura</b> .....	<b>xv</b>
<b>Lista de Acrónimos</b> .....	<b>xix</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Objetivos e Contribuição da Tese .....	8
1.2.1. Objetivo geral .....	8
1.2.2. Objetivos específicos .....	9
1.3. Visão Geral e Organização da Tese.....	9
<b>2. Estado da Arte</b> .....	<b>1</b>
2.1. Introdução .....	1
2.2. Psicrometria.....	1
2.2.1. Carta ou diagrama psicrométrico .....	2
2.3. Geotermia .....	4
2.4. Eficiência Energética .....	5
2.5. Revisão de Trabalhos Científicos.....	9
2.6. Norma ASHRAE 90.1-2019 .....	26
2.7. Norma ASHRAE 90.4-2019 .....	28
<b>3. Metodologia de criação de índices</b> .....	<b>31</b>
3.1. Introdução .....	31
3.2. Estudos Preliminares.....	32
3.3. Índice Eficiência no Consumo de Energia na fase de Projeto ( <i>Energy Usage Effectiveness Design – EUED</i> ) .....	46
3.3.1. Introdução .....	46
3.3.2. Nota conclusiva .....	64
3.4. Índice Data Center de Design Perfeito ( <i>Perfect Design Data center - PDD</i> ).....	65

3.4.1. Introdução.....	65
3.4.2. Aplicação do novo índice PDD.....	68
3.5. Impacte Total da Água ( <i>Total Water Impact</i> – TWI).....	68
3.5.1. Introdução.....	68
3.5.2. Geração de energia e consumo de água no Brasil, Portugal e EUA.....	71
3.5.3. Índice Impacte Total da Água (TWI - <i>Total Water Impact</i> ) .....	76
3.5.4. Comparação de sistemas com condensação a água e a ar .....	79
3.5.5. Nota conclusiva.....	83
<b>4. Análise e Discussão de Resultados .....</b>	<b>85</b>
4.1. Cálculo da Eficiência no Uso de Energia em projeto (EUED - <i>Energy Usage Effectiveness Design</i> ) .....	85
4.2. Coeficiente de Performance EUED Geotérmico .....	92
4.3. Impacte Ambiental.....	99
4.3.1. Potencial de aquecimento global (GWP - <i>Global Warming Impact</i> ). 100	
4.3.2. Desempenho climático do ciclo de vida (LCCP - <i>Life Cycle Climate Performance</i> ) .....	101
4.3.3. Impacte Total Equivalente para o Aquecimento Global ( <i>Total Equivalent Warming Impact</i> ) .....	102
4.3.3.1.Relevância do impacte total equivalente para o aquecimento global. 103	
4.3.3.2. Contabilização do impacte total equivalente para o aquecimento global.....	103
4.3.4. Apresentação dos cálculos do impacte total equivalente para o aquecimento global .....	105
4.4. Ábaco de Decisão da localização de Data Center .....	113
4.5. Validação de Resultados .....	118
<b>Conclusões .....</b>	<b>127</b>
5.1. Conclusões Gerais .....	127
5.2. Sugestão de Trabalhos Futuros.....	131
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>135</b>
<b>Anexo I.....</b>	<b>147</b>
<b>Anexo II .....</b>	<b>153</b>

# Lista de Figuras

Figura 1 - Distribuição do consumo de energia elétrica num DC típico [17].....	6
Figura 2 – Diagrama ou Carta psicrométrica [26]. .....	3
Figura 3 - Diagrama ou Carta psicrométrica [27].....	3
Figura 4 - Etiqueta PBE [33]. .....	6
Figura 5 – Selo PROCEL [34]. .....	7
Figura 6 – Mapa climático do Brasil: Classificação Köppen [68]. .....	35
Figura 7 – Zoneamento Bioclimático brasileiro [68]. .....	36
Figura 8 – Carta Bioclimática de Givoni [68]. .....	37
Figura 9 – Exemplo de layout de Data Center.....	40
Figura 10 - Diretrizes térmicas ASHRAE de temperatura, humidade, ponto de orvalho e altitude para ambientes de processamento de dados [58]. .....	48
Figura 11 - Classes ambientais para DC da ASHRAE [71]. .....	50
Figura 12 - Simulação da variação da temperatura ao longo do jato de insuflação [72].	51
Figura 13 - Exemplo do diagrama de sistema free cooling (temperatura do ar externo abaixo de 20°C com entalpia inferior a 42,7979 [kJ/kg]. .....	52
Figura 14 - Exemplo do diagrama de sistema evaporativo (temperatura do ar externo entre 15°C a 24°C e entalpia entre 42,7979 [kJ/kg] e 55,82 [kJ/kg]. .....	52
Figura 15 - Exemplo de sistemas evaporativos [73]. .....	53
Figura 16 - Exemplo de tipos de sistemas geotérmicos [74]. .....	55
Figura 17 - Necessidade de horas de chiller por ano para uma temperatura base de 20°C para as classes A2, A3 e A4 de free cooling [75]. .....	56
Figura 18 - Previsão do índice de falhas para sistemas com free cooling a ar [75]. .....	56
Figura 19 - Previsão do índice de falhas para sistemas com free cooling a água [75]. ...	57
Figura 20 – Carta psicrométrica com variação dos casos de estudo .....	62
Figura 21 - Percentagem da localização DC por país [79]. .....	65
Figura 22 - Necessidade global de eletricidade em DC [82]. .....	66
Figura 23 – Consumo mundial de água e distribuição de água. (a) Consumo de água, (b) distribuição da água global, (c) Distribuição de 2,5% de água doce global [88]....	69
Figura 24 – Distribuição de recursos hídricos das regiões do Brasil [89]. .....	70
Figura 25 – Matriz energética dos EUA e água consumida para gerar 1 kWh de eletricidade. (a) Matriz energética dos EUA (ASHRAE), (b) água consumida para gerar 1 kWh de eletricidade [91]. .....	71
Figura 26 – Matriz energética elétrica de Portugal [92]. .....	72
Figura 27 – Matriz energética elétrica do Brasil [93]. .....	72

Figura 28 – Tipos de geração de eletricidade no Brasil, EUA e Portugal. ....	73
Figura 29 – Consumo de água (L/kWhgerado) de eletricidade no Brasil, EUA e Portugal. .....	75
Figura 30 – Nexus Energia- Água [93]. ....	77
Figura 31 – Comparação de (a) sistemas de refrigeração a condensação a ar e (b) a água [99]. ....	79
Figura 32 – Comparação gráfica entre os valores de PUE COA e EUED em cidades brasileiras selecionadas. ....	90
Figura 33 – Comparação gráfica entre os valores de COP PUE COA e COP EUED em cidades brasileiras selecionadas. ....	91
Figura 34 - Ilustração da consideração dos valores da temperatura de admissão de água no evaporador shell and tube e temperatura de condensação [102]. ....	93
Figura 35 – Comparação dos valores de PUE, EUED e EUED geotérmico para as cidades de Curitiba, Londrina e Foz do Iguaçu. ....	98
Figura 36 – Comparação dos valores de COP PUEvent, COP EUED e COP EUED geotérmico. ....	99
Figura 37 – Capacidade instalada nos EUA [112] (■: Hidroenergia renovável; ■: Centrais mix). ....	110
Figura 38 – Capacidade instalada no Brasil [112] (■: Hidroenergia renovável). ....	111
Figura 39 – Gráfico comparativo da energia consumida e TEWI das cidades em estudo. .....	113
Figura 40 – Relação gráfica do PDD das cidades do estudo. ....	115
Figura 41 – Relação gráfica do PDD das cidades do estudo (otimizada). ....	116
Figura 42 – Sala modular do DC para validação de resultados. ....	118
Figura 43 – Unidades de arrefecimento da sala cofre do DC para validação de resultados. .....	119
Figura 44 – Layout da sala cofre do DC para validação de resultados [XX]. ....	119
Figura 45 – Operação dos compressores em 4 etapas com o intuito de melhorar a taxa de eficiência energética [110] (Obs.: Eficiência em BTU/W de acordo com as condições de temperatura de condensação) [114]. ....	122
Figura 46 – Comparação dos valores dos índices para o caso de validação. ....	125
Figura 47 – Erro absoluto dos índices de projeto para os valores em campo. ....	126

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Métricas para Data Centers [48].	19
Tabela 2 -- Métrica TRUE para temperaturas inferiores a 21°C, de cidades em várias localizações do mundo [48].	21
Tabela 3 – Condições de carga a parcial para cálculo do IPLV/NPLV.	28
Tabela 4 - Formato das tabelas de dados e legenda [69].	39
Tabela 5 - Dados das 2 localidades brasileiras como exemplo: Foz de Iguaçu e Manaus [69].	39
Tabela 6 - Característica do equipamento marca Liebert, modelo L99 Dual Fluid [70].	41
Tabela 7 - Cálculos do COP com admissão de ar padrão 35°C [64].	43
Tabela 8 - Cálculo do COP PUE sem ventilador da cidade de Manaus (Eduardo Gomes), com admissão do ar 34,8°C [64].	44
Tabela 9 - Valores de COP e seu PUE para as 37 localidades em estudo.	45
Tabela 10 - Relação entre temperaturas do ar e fator de calor sensível em ambientes de conforto térmico.	47
Tabela 11 - Distribuição do consumo de energia elétrica num DC típico.	59
Tabela 12 - Dados para gráfico psicrométrico.	60
Tabela 13 - Frequência em horas de utilização.	61
Tabela 14 - Cálculos do consumo de energia utilizando as regras do índice EUED para as duas cidades tipo: Foz de Iguaçu e Manaus.	63
Tabela 15 - Resultados finais dos cálculos utilizando as regras do índice EUED.	64
Tabela 16 – Parâmetros dos sistemas com condensação a ar ou a água com potência de 200 TR.	80
Tabela 17 – Parâmetros dos sistemas com condensação a ar ou a água com potência de 500 TR.	81
Tabela 18 - Cálculos do EUED da cidade de Curitiba.	86
Tabela 19 - Cálculos do EUED para a cidade de Curitiba.	87
Tabela 20 – Comparação dos valores de PUE vs. EUED e COP PUE vs. COP EUED em cidades selecionadas.	89
Tabela 21 – Valores médios da temperatura geotérmica (°C) no Paraná ao longo do ano.	92
Tabela 22 – Cálculo do EUED geotérmico e do COP geotérmico de Curitiba.	95
Tabela 23 – Cálculo do COP EUED geotérmico e EUED geotérmico da cidade de Londrina.	96

Tabela 24 - Cálculo do COP EUED geotérmico e EUED geotérmico da cidade de Foz de Iguaçu.....	97
Tabela 25 – Comparação entre os valores de PUE, EUED, EUED GEO, COP PUE, COP EUED e COP EUED GEO.....	97
Tabela 26 – Valores de GWP para determinados fluidos refrigerantes [104]. .....	101
Tabela 27 – Cálculo do COP EUED e EUED para Chicago (EUA).....	106
Tabela 28 – Comparação dos valores de TEWI de Chicago e Curitiba.....	109
Tabela 29 – Comparação dos índices EUED, COP PUE e TEWI para cidades brasileiras e para Chicago (EUA).....	112
Tabela 30 - Tabela com os dados para gerar equação para demonstrar o ábaco.....	114
Tabela 31 – Classificação para localização de implementação de DC.....	115
Tabela 32 – Cidades brasileiras e sua classificação conforme o índice PDD.....	117
Tabela 33 – Características do equipamento de ar condicionado Self 20TR (70,32 kW). .....	121
Tabela 34 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de São Paulo (Congonhas).....	123
Tabela 35 - Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de São Paulo (Congonhas) com FC e adiabático adaptado COP1. ....	123
Tabela 36 - Região Norte (ABNT NBR 16401 -1: 2008). .....	147
Tabela 37 – Região Nordeste (ABNT NBR 1641 – 1: 20 – 08). .....	148
Tabela 38– Região Norte (continuação) e região Centro Oeste (ABNT NBR 16401 – 1: 2008).....	149
Tabela 39 – Região Sudeste (ABNT NBR 16401 – 1: 2008). .....	150
Tabela 40 – Região Sudeste (continuação) ABNT NBR 16401 – 1: 2008. ....	151
Tabela 41 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Rio Branco.....	153
Tabela 42 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Manaus (P. Pelada). .....	153
Tabela 43 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Manaus (Eduardo Gomes).....	154
Tabela 44 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Macapá.....	154
Tabela 45 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Belém. ....	155

Tabela 46 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Santarém. ....	155
Tabela 47 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Porto Velho. ....	156
Tabela 48 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Boa Vista. ....	156
Tabela 49 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de cidade Maceió. ....	157
Tabela 50 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Caravelas. ....	157
Tabela 51 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Salvador. ....	158
Tabela 52 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Fortaleza. ....	158
Tabela 53 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de São Luis. ....	159
Tabela 54 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Fernando de Noronha. ....	159
Tabela 55 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Recife. ....	160
Tabela 56 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Teresina. ....	160
Tabela 57 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Natal. ....	161
Tabela 58 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Aracaju. ....	161
Tabela 59 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Brasília. ....	162
Tabela 60 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Anápolis. ....	162
Tabela 61 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Campo Grande. ....	163
Tabela 62 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Goiânia. ....	163
Tabela 63 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Cuiabá. ....	164

Tabela 64 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Vitória. ....	164
Tabela 65 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Belo Horizonte (T. Neves).....	165
Tabela 66 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Belo Horizonte (Panpulha). ....	165
Tabela 67 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Uberaba.....	166
Tabela 68 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Rio de Janeiro (S. Dumont). ....	166
Tabela 69 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Rio de Janeiro (Galeão). ....	167
Tabela 70 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Campinas. ....	167
Tabela 71 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de São Paulo (Congonhas). ....	168
Tabela 72 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de São Paulo (Guarulhos). ....	168
Tabela 73 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Foz do Iguaçu.....	169
Tabela 74 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Londrina.....	169
Tabela 75 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Porto Alegre. ....	170
Tabela 76 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Florianópolis. ....	170

# Nomenclatura

## Geral:

$A$	Área, [m <sup>2</sup> ];
$a$	Comprimento, [m];
AUPTR	Água usada por TR, em [m <sup>3</sup> ·TR <sup>-1</sup> <sub>evaporação, arraste e purga</sub> ];
$b$	Largura, [m];
$C_f$	Fator de correção;
$C_p$	Calor específico, [J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ];
CTA	Carga térmica anual, [TR·ano <sup>-1</sup> ];
$D$	Diâmetro [m];
$E$	Energia, [J];
$g$	Aceleração da gravidade, {=9,81 m·s <sup>-2</sup> };
Gr	Número de Grashof;
$h$	Coefficiente convectivo de transmissão de calor, [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ];
$H_m$	Altura manométrica, [mH <sub>2</sub> O];
IGR	Índice de caudal específico da região calculada, [m <sup>3</sup> ·kW <sup>-1</sup> <sub>gerado</sub> ];
$K$	Coefficiente de transmissão de calor, [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ];
$L$	Comprimento característico, [m];
$L_{\text{anual}}$	Taxa de fuga [kg·ano <sup>-1</sup> ];
$m$	Massa do sistema, [kg];
$m_{\text{cr}}$	Carga de refrigerante [kg·ano <sup>-1</sup> ];
$n$	Número de renovações por hora, [ren·h <sup>-1</sup> ];
$n_t$	Número de horas por ano com temperatura média abaixo dos 21°C;
$n_v$	Vida operacional do sistema [anos];
$P$	Potência, [W];
$p$	Pressão, [Pa] ou [mH <sub>2</sub> O] {1 mH <sub>2</sub> O = 9806,65 Pa};
$Pr$	Número de Prandtl;
$q$	Taxa total de calor perdido, [W·m <sup>-2</sup> ];
$Q$	Caudal, [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ], Calor [kJ];
$\dot{Q}$	Potência térmica, [W];
$R$	Resistência elétrica, [Ω];
$S$	Taxa de armazenamento de calor, [W·m <sup>-2</sup> ];
$S_e$	Superfície do evaporador, [m];
$T$	Temperatura, [K ou °C];
$\bar{T}$	Temperatura média, [°C];

$t$	Tempo, [s];
TR	Tonelada de refrigeração {1 TR = 3516,85 W};
U	Energia interna, [J];
V	Volume, [m <sup>3</sup> ];
$v$	Velocidade, [m·s <sup>-1</sup> ];
VUE	Vida útil do equipamento, [anos];
W	Trabalho, [kJ].

### ***Índices inferiores:***

$\infty$	Escoamento não perturbado;
$a$	Ar;
$c$	Convectivo, condensação, compressor;
$e$	Evaporação;
$f$	Fonte
frio	Fonte fria
$i$	Índice mudo;
in	Entrada;
out	Saída;
po	Ponto de orvalho;
quente	Fonte quente;
sck	Subarrefecimento;
sh	Sobreaquecimento;
$w$	Água;
$ws$	Vapor saturado.

### ***Simbologia grega:***

$\lambda$	Condutibilidade térmica, [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ];
$\delta$	Espessura, [mm];
$\phi$	Humidade relativa, [%];
$\rho$	Massa específica, [kg·m <sup>-3</sup> ];
$\beta$	Coefficiente de dilatação térmica, [K <sup>-1</sup> ];
$\Delta$	Variação;
$\eta$	Rendimento;
$\nu$	Viscosidade cinemática do ar, [m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ];
$n$	Eficiência;
$\varepsilon$	Emissividade;

$\alpha_{\text{recovery}}$	Factor de recuperação, [%];
$\beta_f$	Fator de emissão indireta [ $\text{kg CO}_2 \cdot \text{kWh}^{-1}$ ].
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann $\{=5,67 \times 10^{-8} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]\}$ ;



## Lista de Acrónimos

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
AC	Antes de Cristo;
AHRTI	<i>The Australian institute of Refrigeration, Air conditioning and Heating;</i>
ANA	Agência Nacional de Águas;
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica;
ANSI	<i>American National Standards Institute;</i>
APREN	Associação Portuguesa de Energias Renováveis;
AIRAH	<i>Australian Institute of Refrigeration, Air Conditioning and heating;</i>
AHRI	<i>Air-conditioning, Heating &amp; Refrigeration Institute;</i>
AR	Relatório de síntese;
ASBRAVA	Associação Sul Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Aquecimento e Ventilação;
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning;</i>
AVAC	Aquecimento, ventilação e ar condicionado;
B2B	Business-to-business;
BCG	Bomba de Calor Geométrico;
BIRD	Banco Internacional para reconstrução e Desenvolvimento;
CFB	Clima oceânico temperado;
CHI	Cidade de Chicago;
COA	<i>Constant Outdoor Air;</i>
CONPET	Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural;
COP	Coeficiente de Performance ( <i>Coefficient Of Performance</i> );
CPE	Eficiência de Energia da Computação;
CPD	Centros de processamento de dados;
CRAC	<i>Computer Room Air Conditioning;</i>
CUE	<i>Carborn Usage Effectiveness;</i>
CWB	Cidade de Curitiba;
DB	<i>Dry Bulb;</i>
DC	Data Center;
DCeP	<i>Data Center Energy Productivity</i> (Produtividade de Energia dos Data Centers);
DCIE	<i>Data Center Infrastructure Efficiency;</i>

EECCAC	<i>Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners;</i>
EEd	Energia Equipamentos de dados;
EER	<i>Energy Efficiency and Rate;</i>
EERE	<i>Energy Efficiency and Renewable Energy;</i>
ELC	Perda elétrica;
ELETRORBRAS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.;
EMPE	<i>Average Weighed Efficiency in Summer;</i>
ENB	Base de Energia;
ENPIs	<i>Energy Performance Indicators;</i>
EOL	<i>End Of Life;</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency;</i>
EPE	Empresa de pesquisa energética;
ERE	<i>Energy Reuse Effectiveness;</i>
ERP	Planeamento de Recursos Empresariais;
EUA	Estados Unidos da América;
EUED	<i>Energy Usage Effecttiness Design</i> (Eficiência no Consumo de Energia);
EVAP	Evaporativo;
FC	<i>Free cooling;</i>
FCS	Fator de Calor sensível;
GEF	<i>Global Environment Facility;</i>
GEO	Geotérmico;
GO	Goiás;
GWP	<i>Global Warming Potential;</i>
HVAC	<i>Heating, Ventilation, and Air Conditioning;</i>
IAEA	Agência Internacional de Energia Atômica;
ICT	<i>Information and Communication Technologies;</i>
IDC	<i>Internet Data Center, International Data Corporation;</i>
IEA	<i>International Energy Agency;</i>
IES	<i>Illuminating Engineering Society of North America;</i>
IEVP	Indicador de Desempenho Energético;
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia;
IoT	<i>Internet of Things;</i>
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas;
IPLV	<i>Integrated Part Load Value;</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization;</i>

LCCP	<i>Life-Cycle Climate Performance;</i>
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design;</i>
MCDA	<i>Multiple-Criteria Decision Analysis;</i>
MCWB	Temperatura de Bolbo húmido coincidente média;
MER	<i>Maximum Efficiency Rate;</i>
MLC	Carga Mecânica;
NBR	Normas Brasileiras;
NPLV	<i>Non-standard Part Load Value;</i>
NRDC	<i>Natural Resources Defense Council;</i>
NREL	National Renewable Energy Laboratory;
NSC	<i>Net Sensible COP;</i>
ONU	Organização das Nações Unidas;
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem;
PC	<i>Personal Computer;</i>
PDC	<i>Private Data Center;</i>
PDD	<i>Perfect Design Datacenter</i> (Datacenter de Design Perfeito);
PEE	Programa de Eficiência Energética;
PNEF	Plano Nacional de Eficiência Energética;
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica;
PROPEE	Programa de Eficiência Energética;
PUE	<i>Power Usage Effectiveness</i> (Eficiência no Consumo de Potência);
RAC	Sistemas de refrigeração e ar condicionado;
RES	<i>Renewable Energy Sources</i> (fontes de energia renováveis);
RFPs	<i>Request for Proposal;</i>
RGR	Reserva Global de Reversão;
RN	Resolução normativa;
SCOP	Coefficiente de operação sensível;
SHI	<i>Supply Heat Index;</i>
TEAG	Temperatura de Entrada de Água gelada;
TEWI	<i>Total Equivalent Warming Impact;</i>
TI	Tecnologia da Informação;
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação;
TRUE	Eficiência no uso da temperatura da região;
TWI	<i>Total Water Impact</i> (Impacte Total da Água);
UBI	Universidade da Beira Interior;
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura;

UPS	<i>Uninterruptible Power Supply;</i>
USA	<i>United States of America;</i>
USP	Universidade de São Paulo;
VRF	Variable Refrigerant Flow.
WUE	<i>Water Usage Effectiveness;</i>
WWF	World Wide Fund for Nature;

# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

Qualquer atividade online, incluindo e-mail, uso da internet, dos média social e realização de negócios, é fornecida mundialmente por quase 7,2 milhões de centros de processamento de dados, vulgo data centers (DC). O seu crescimento exige enormes quantidades de energia e, apesar de algumas melhorias de eficiência, grande parte desta ainda é desperdiçada [1-2].

Na última década, o crescimento da instalação de DC e de servidores tem gerado um aumento significativo do consumo energético. Somente nos Estados Unidos da América (EUA), os DC fizeram uso de 91 TWh, sendo previsto um aumento de 53% (140 TWh) em 2020 [3-4]. Em termos comparativos, em Portugal no ano de 2020, o consumo de energia elétrica total foi de 48,8 TWh, uma queda de 3,1% face a 2019 [5]. As indústrias de equipamentos de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC, ou *Information and Communication Technologies - ICT*) continuam a aumentar a capacidade de armazenamento de dados dos equipamentos e simultaneamente a sua eficiência computacional [6]. Na componente de suporte à operação de DC, vários setores, incluindo as indústrias das TIC, provedores de projetos de infraestruturas físicas, de projetos de layout de DC e operadores, encontram-se focados na redução do consumo de energia indireto de DC, ou seja, de toda a infraestrutura não computacional, especificamente da energia e dos sistemas de arrefecimento [7].

O consumo de energia elétrica dos DC nos EUA acima indicado, equivalente à produção anual de 34 centrais a carvão de grande potência de 500 MW por cada unidade de geração, e prevê-se que o consumo de eletricidade nos DC aumente, custando às empresas americanas US \$13 bilhões anuais em contas de eletricidade e emitindo quase 100 milhões de toneladas de carbono por ano [8].

Apesar da maioria dos média e a atenção do público se concentrar nos maiores DC que operam as denominadas operações de computação em nuvem, empresas que fornecem serviços baseados na Web e na Internet para consumidores e empresas, esses DC representam apenas uma pequena fração do consumo de energia dos DC nos EUA. A grande maioria da energia do DC é consumida em DC corporativos de pequeno, médio e

grande porte, bem como nos DC multilocatários, para os quais um número crescente de empresas terceiriza as suas necessidades de DC.

Esses DC em geral têm conseguido menos progresso do que os seus congêneres na nuvem em grande escala, devido a problemas persistentes e barreiras de mercado, como falta de métricas e transparência, e também devido ao desalinhamento de incentivos.

Grande parte das enormes quantidades de eletricidade que os DC dos EUA consomem para apoiar os negócios e as atividades online, está sendo desperdiçada com servidores que fazem pouco ou nenhum trabalho na maioria das vezes, segundo um relatório divulgado pelo Conselho de Defesa dos Recursos Naturais. Práticas melhoradas de eficiência energética poderiam reduzir o desperdício de energia em pelo menos 40%, economizando mais de US \$3 bilhões por ano [8].

Os DC são projetados com os mais modernos conceitos tecnológicos. Assentam geralmente em cinco blocos construtivos: subestação de entrada, a sala de fornecimento ininterrupto de energia (sala de no-break) e baterias (UPS - *uninterruptible power Supplies*), a sala de geradores, central de ar-condicionado e salas de servidores, existe um bloco fundamental que são as salas de telecomunicações que ligam os DCs ao mundo.

As concessionárias de energia elétrica alimentam as subestações de entrada com alta tensão, o empreendedor de DC providencia a ligação com os transformadores de entrada e adequam os níveis de tensão a níveis para sua distribuição dentro das instalações dos DC.

Para garantir a estabilidade da alimentação elétrica dos sistemas, as salas de no-break e baterias albergam os sistemas elétricos de alimentação e de contingência das salas de servidores, fornecendo energia elétrica em caso de falha no fornecimento de energia, suprimindo a necessidade energética dos servidores instalados. As salas dos geradores são responsáveis por albergar os sistemas elétricos de comutação [8].

As salas dos servidores, onde são instalados todos os equipamentos de TI, necessitam de sistemas de refrigeração com controlo de temperatura e humidade do ar. Nas salas de ar condicionado, os equipamentos estão eletricamente alimentados pelo sistema de entrada e sistemas de fornecimento de energia de backup (geradores). Este sistema refrigera as salas, garantindo uma temperatura e humidade do ar ambiente adequadas aos níveis estabelecidos para as operações, sem oscilações prejudiciais ao funcionamento dos equipamentos.

O crescimento da utilização das tecnologias digitais, como a interação online de serviços e comunicação em tempo real tem aumentado os serviços computacionais. A título de exemplo, a cada minuto são trocadas 204 milhões de mensagens de e-mails, realizadas 5 milhões de procuras no motor de busca Google, efetuados cerca de 1,8 milhões de “LIKES” no Facebook, pelos 2,5 mil milhões de pessoas que estão online no globo e das quais 70% usa a internet diariamente [3]. Estes serviços, entre outros, fizeram crescer exponencialmente a necessidade das tecnologias e com estas a necessidade de armazenar os recursos em DC. A previsão avançada indica que número de DC instalados vai continuar a aumentar atingindo 8,6 milhões [9] em 2020. Os DC são geralmente compostos por mainframes que processam todos os recursos em uso nos sistemas computacionais. A utilização de micro computadores flexibilizou e facilitou a evolução das redes, aumentando em muito as capacidades de processamento e multiplicando as capacidades práticas dos DC com custos menores, distribuídos e compartilhados.

Os DC são geralmente contentores ou edifícios na sua totalidade com construção em betão armado sem janelas, alojando milhares de servidores e bancos de dados (storage) em racks. A energia elétrica consumida pelos DC quadruplicou na última década nos EUA. O Brasil ocupa o décimo lugar no que toca ao consumo energético dos DC. Os DCs em 2016 nos EUA, corresponderam a 1,8% de toda a energia consumida no país. [10-11]. O tráfego de dados da nuvem sofrerá um aumento de 14,1 ZB, sendo de 1,2 ZB por mês, 92% do tráfego total do DC até final de 2020. O tráfego de dados móveis continuou a aumentar, atingindo 10 EB/mês. Globalmente, a necessidade de eletricidade pelos DC em 2018 foi estimada em 198 TWh, ou quase 1% da necessidade mundial de eletricidade [11-12].

Cada vez mais as empresas líderes aderem, voluntariamente, a compromissos de responsabilidade social e preservação do meio ambiente. Essa iniciativa, obrigatoriamente, deve envolver as suas cadeias de fornecedores, pois são responsáveis pelas matérias-primas e componentes que integram os seus produtos e serviços. A necessidade de energia e água nos DC é significativa e deve ser tratada com atenção, tanto para a infraestrutura interna como nas contratações de serviços externos [13].

Segundo estudos do Green Peace, os DC e os equipamentos de computação em geral consomem 1,5% da energia global e emitem cerca de 2% dos gases do efeito estufa (CO<sub>2</sub> e outros gases). Portanto, têm um significativo impacto nas mudanças climáticas. Em muitos países ainda se utiliza o carvão como principal combustível para geração de energia, gerando toneladas de gases e resíduos poluentes [14].

Olhando para o futuro, estimativas globais da procura energética de DC em 2030 prevê um aumento de três para 10 vezes os níveis atuais, com elevadas estimativas finais de somente a procura de eletricidade de DC atingir 13% consumo global de eletricidade. No Brasil, a matriz energética é baseada em geração hídrica (63,09%), térmica (28,35%), eólica (3,29%) e outras fontes renováveis. Face à grande seca de 2014 no Brasil, que reduziu o volume de água dos lagos de reserva das hidroelétricas, a geração de energia por via termelétrica tem vindo a aumentar, e conseqüentemente, aumentando a emissão de gases com efeito de estufa [14].

Empresas que operam no Brasil e usam serviços de processamento de dados no exterior devem considerar a emissão de gases com efeito de estufa na sua conta de poluição ambiental. No Brasil, as empresas que utilizam energia das concessionárias de distribuição, chamados consumidores cativos, devem considerar o aumento do uso das termelétricas na sua conta de poluição. O impacto desta estratégia consiste na necessidade de aumentar as iniciativas para neutralização do carbono, resultando em mais investimentos e despesas.

Nesse contexto, é fundamental o uso de indicadores para medir e avaliar o desempenho e impactes ambientais dos DC. Segue uma recomendação de indicadores para os DC internos e para serem incluídos nas RFPs (*Request for Proposal*) para a contratação de serviços de DC.

Um dos desafios relativos à melhoria do desempenho e eficiência dos DC decorre do calor dissipado pelos servidores, já que o enorme número de equipamentos instalados para aumentar a capacidade de armazenamento, aumentou em muito a potência elétrica e conseqüentemente a dissipação de calor. Para melhorar as condições de dissipação de calor, alguns DC chegaram mesmo a mudar de localização, para locais onde as temperaturas médias do ar são mais baixas, como no Círculo Polar Ártico, para obterem melhor eficiência energética, e conseqüentemente menor consumo de energia face à diminuição da necessidade de arrefecimento [15].

As métricas de eficiência são definidas e padronizadas para comparar a eficiência dos sistemas de um DC, como sejam os custos de operação. Foi também criado um consórcio global de fabricantes de equipamentos de TI, empresas de tecnologias, governos, instituições de ensino e I&D, associações de classes e outros setores da sociedade, onde se discutem, desenvolvem e recomendam as melhores práticas de eficiência energética e de sustentabilidade, como as emissões de CO<sub>2</sub>. Uma dessas métricas denomina-se *Power*

*Usage Effectiveness* (PUE), definida pelo The Green Grid [15] como o instrumento para medir a eficiência energética de um DC. Este parâmetro em fase de projeto é a razão entre a demanda total de potência de um DC e a demanda de potência específica dos equipamentos de TI. O valor ideal de PUE seria 1,0 kW/kW. Já foram relatos casos de DC com PUE = 1,08 kW/kW [17].

OS DC são subdivididos nas seguintes categorias:

- **Data Center Privado:** Denominado como PDC (*Private Data Center*), são operados por instituições, corporações ou agências governamentais, onde se armazenam informações de processamentos internos e utilizados para manter sistemas governamentais.
- **Internet Data Center:** Os IDC (*Internet Data Center*) destinam-se a prover os serviços de telecomunicações, tendo como objetivo prestar serviços de armazenamento, hospedagem de sites e equipamentos de empresas.

Em qualquer tipo de DC (privado ou de Internet), a métrica de PUE tem por pressuposto já ter o projeto pronto. Apenas após a finalização do projeto é que o PUE é mensurado com mais precisão em campo em forma de energia, ou seja, kWh/kWh. Embora a carga térmica da edificação seja importante, a carga dos equipamentos de TI é muito superior às cargas de transmissão de calor. O fator da região onde se instala um DC passa a ser fundamental no ponto de vista das características do ar externo para aproveitar a possibilidade de "*free cooling*" e também a eficiência dos equipamentos é maior quando a admissão do ar é efetuada a temperatura mais baixa na unidade condensadora.

Existem outros fatores que não tangem este trabalho de investigação, como sejam a disponibilidade energética ou o risco sísmico, tendo enfoque exclusivo na área de maior impacto para além dos próprios equipamentos de TI que é a área térmica. Um DC típico com PUE = 2,1 kW/kW tem uma distribuição do consumo de energia elétrica [18] conforme exposto na Figura 1.

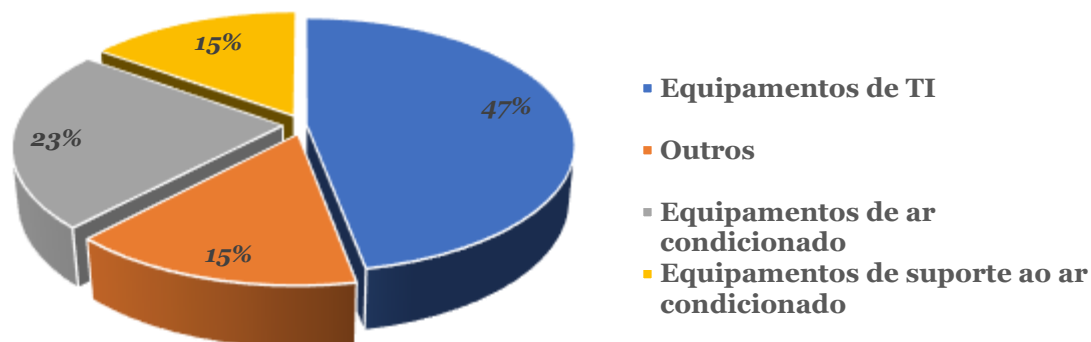


Figura 1 - Distribuição do consumo de energia elétrica num DC típico [18].

Como resultado do crescimento contínuo em tamanho e complexidade de DC, a compreensão de seus aspectos de projeto é relevante, bem como inadequações e desafios existentes ou futuros que teriam que ser resolvidos. Um desses desafios reside na implementação de estratégias de eficiência energética para diminuir a necessidade operacional total de energia. Estas técnicas são capazes de obter uma considerável economia de energia, sendo um pequeno investimento económico. Outro desafio reside na integração de fontes de energia renováveis (RES - *Renewable Energy Sources*) em DC para reduzir a sua dependência de energia da rede e reduzir também as emissões de CO<sub>2</sub>. Todavia, este sistema exige um elevado custo de investimento. Atualmente, estas implementações estão a ser estudadas por diferentes conceitos de energia renováveis. [19]. As soluções técnicas que se aplicam em todos os DC e que combinadas com sistemas atuais de refrigeração e de energias renováveis, visam a redução da necessidade de consumo elétrico. Seguindo essas combinações, podem-se considerar os conceitos seguintes [19]:

- Medidas para alimentação elétrica. Estratégias conhecidas como: UPS modular e UPS bypass que reduzem o consumo elétrico;
- Medidas para as necessidades de refrigeração. Estas medidas incluem o uso de free cooling, contenção de corredor quente/frio para uma melhor gestão do condicionamento de ar, fluxo de ar variável e aumento das temperaturas de trabalho admissão de ar nos equipamentos de TI;
- Medidas para gestão de equipamentos de TI. A consolidação visa concentrar as cargas de trabalho de TI num número mínimo de servidores para manter servidores inativos

no estado inativo. Em seguida, esses servidores no estado inativo podem ser desligados. Por fim, o agendamento de TI visa mover os trabalhos de TI de acordo com as disponibilidades de RES quando for possível.

A questão é que num DC típico, excetuando o consumo elétrico dos equipamentos de tecnologias de informação (47%), dos 53% restantes, o sistema de climatização é responsável por 38% do consumo elétrico total, ou seja, tecnologias de informação e ar condicionado corresponde a cerca de 72% do consumo elétrico da infraestrutura (Figura 1). Como o ênfase deste trabalho não se encontra direcionado à eficiência dos equipamentos de tecnologias de informação, a ideia reside na utilização de um índice que possa auxiliar o investidor no apoio à tomada de decisão de qual o local mais adequado para a instalação de um DC, de acordo com as condições térmicas da região nas 8760 horas anuais.

Segundo Ernest & Young [20], os executivos necessitam de "*aumentar a velocidade da tomada de decisão e a eficiência da execução de projetos para aproveitar janelas de oportunidades*".

Uma questão importante é que o PUE é uma métrica que na fase de projeto é expressa em termos de potência e não de energia. Uma métrica verdadeiramente precisa, reside na criação de um novo índice denominado de Eficiência no Consumo de Energia na fase de Projeto (*Energy Usage Effectiveness Design - EUED*). Para tal, um estudo de anteprojeto usando por base índices naturais pode acelerar a tomada de decisão na localização mais apropriada para a localização de um DC no quesito térmico, i.e., fazendo uso de um índice envolvendo parâmetros psicrométricos. Na correlação, o índice para a tomada de decisão será constituído pelos seguintes parâmetros:

- Temperatura de bolbo seco do ar;
- Temperatura de bolbo húmido do ar;
- Temperatura do solo (geotérmica);

As vantagens desta nova metodologia consistem na alteração na perspectiva em como é são avaliados os índices de desempenho, deixando de residir somente na observação de apenas um ponto tendo como referência o PUE (ênfase na eficiência dos equipamentos das máquinas de climatização em ponto fixo de temperatura de admissão do ar no condensador) para uma visão mais abrangente e global do todo como o EUED (ênfase no

ambiente como um todo), que envolve parâmetros naturais das regiões onde se estuda a possibilidade de instalação do DC, que serão abordadas no decorrer do trabalho, vindo em encontro da visão de Fritjof Capra no livro “A Teia da vida” [21].

*“O novo paradigma pode ser chamado de visão holística do mundo, vendo o mundo como um todo integrado e não como uma coleção dissociada de partes. Também pode ser chamado de visão ecológica, se o termo "ecológico" for usado num sentido muito mais amplo e profundo do que o habitual. A consciência ecológica profunda reconhece a interdependência fundamental de todos os fenómenos e o facto de que, como indivíduos e sociedades, estamos todos inseridos (e, finalmente, dependentes) dos processos cíclicos da natureza” [21].*

Adotar esta visão holística envolvendo elementos psicrométricos são as bases fundamentais para a aplicabilidade deste novo índice de eficiência no sistema de climatização de DC. O EUED faz uso dos dados do ASHRAE *Weather Data Viewer* [22], em particular os dados das cidades e as características geotérmicas dos locais que possuem os dados disponíveis.

## **1.2. Objetivos e Contribuição da Tese**

### **1.2.1. Objetivo geral**

Utilizar conceitos de psicrometria e eficiência energética para criar novos índices destinados à previsão da eficiência de sistemas de climatização (AVAC) para DCs em fase de Projeto, analisando as condições ambientais do ar externo nas 8760 horas anuais.

Possibilitar a comparação da eficiência do sistema AVAC instalado em diferentes localidades, criando tabelas e gráficos de decisão para a escolha dos locais preferenciais para se instalar um DC.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

Na persecução do objetivo principal desta Tese, é necessário atingir um conjunto de objetivos específicos que conjugados completam e facilitam o decurso dos trabalhos.

- Escolher as cidades da simulação;
- Definir um índice de eficiência energética de DC, com temperatura de admissão do ar no condensador baseado nos dados da ASHRAE Weather Data Viewer [22] da média de temperatura das 35,1 horas mais quentes do ano, em 37 cidades do Brasil;
- Criar parâmetros metodológicos para determinar um índice baseado em entalpia para as 8760 horas anuais;
- Analisar quais as soluções de climatização mais adequadas para cada parâmetro de acordo com as características de temperatura de Bolbo seco e húmido externas;
- Mensurar o índice Coeficiente de Performance (COP) em cada solução apresentada;
- Criar uma expressão matemática para correlacionar os elementos psicrométricos com a eficiência de um DC;
- Aplicação do índice das 8760 horas para encontrar TEWI de DC;
- Criar uma tabela a partir dos índices para as 37 cidades brasileiras e uma cidade nos Estados Unidos e realizar a análise crítica de resultados;
- Criar um novo índice para avaliação da eficiência energética dos DCs nas cidades em ordem crescente;
- Criar um novo índice para análise de consumo de água direta e indireta em AVAC;
- Gerar uma tabela com os resultados obtidos e realizar a análise crítica de resultados do índice de análise de água;

### **1.3. Visão Geral e Organização da Tese**

O trabalho de pesquisa proposto possui componentes experimentais e analíticas. O trabalho encontra-se dividido em cinco fases:

- (1) O estado da arte com fundamentação teórica;
- (2) Análises experimental e numérica dos dados dos DC atuais com simulações do índice PUE COA em sistemas existentes;

- (3) Metodologia de soluções de eficiência energética e do desempenho térmico de DC baseada em elementos psicrométricos para aplicação de sistema “free cooling”, adiabático e com ciclo de compressão com COPs variados;
- (4) Criação das tabelas dos índices de desempenho térmico, consumo de água e eficiência energética (EUED, TWI e PDD) determinados a partir dos quatro parâmetros naturais;
- (5) Avaliação dos resultados com conclusões teóricas e práticas identificando quais os aspetos inovadores.

Estas cinco fases encontram-se distribuídas por cinco capítulos, visando uma organização geral da tese que siga do geral para o específico, de modo a facilitar a compreensão dos diversos assuntos expostos.

Neste capítulo, é efetuada uma introdução geral ao tema, sendo definido o estudo em causa, referindo-se os problemas subjacentes, os objetivos propostos e as contribuições desta tese.

No Capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica distribuída de acordo com o tipo do trabalho referenciado, conforme este possua uma componente marcadamente numérica ou experimental. Tem por objetivo edificar o contexto do estudo e enquadrá-lo no âmbito de outros trabalhos científicos.

O Capítulo 3 descreve a metodologia de soluções de eficiência energética e de desempenho térmico de DC baseado na psicrometria e dados do ASHRAE WEATHER DATA VIEWER [22], fornecendo as bases para a formulação dos novos índices desenvolvidos no âmbito desta.

O Capítulo 4 inclui as tabelas dos índices de desempenho térmico e eficiência energética para diferentes localizações, a análise e discussão crítica dos resultados comparativos com outros índices hoje utilizados como métricas de eficiência energética e desempenho térmico de infraestruturas de elevado consumo energético.

No Capítulo 5 são apresentadas as contribuições de todo o trabalho desenvolvido. São também apontadas algumas direções para futuro desenvolvimento de trabalhos de investigação.

## **2. Estado da Arte**

### **2.1. Introdução**

O estado da arte do presente estudo, inicia-se com a pesquisa bibliográfica. Esta pesquisa tem o intuito de organizar, analisar as informações dos problemas propostos divulgadas pela comunidade científica e que estão relacionadas ao tema em estudo. A análise do estado da arte é pertinente nos seguintes tópicos:

- Elementos da psicrometria;
- Aplicação de geotermia em sistema de AVAC;
- Eficiência Energética;
- Revisão de trabalhos científicos inclusive com as métricas utilizadas para mensurar a eficiência específica de DC nos âmbitos de energia, água e efeito de estufa, além das normas internacionais pertinentes.

### **2.2. Psicrometria**

Na etimologia, a entalpia vem do Grego, *EN*, “em”, mais *THÁLPOS*, “calor do sol”. Muito usada na química e na termodinâmica, via psicrometria. Pode ser definida a psicrometria como a quantidade de calor para uma transformação e ou variação quer seja sensível ou latente.

A psicrometria, do grego *PSYCHRO* que é arrefecer, é o estudo das misturas de ar e vapor de água, isto é, o estudo do ar húmido (estudo de misturas binárias nas quais um dos componentes é um vapor condensável e o estudo das transferências de massa e de energia associadas a processos envolvendo o ar húmido em condições ambientais [23-24]).

As aplicações da psicrometria, são:

- Controlo de clima, em especial em condicionamento de ar para conforto térmico;

- Condensação em superfícies frias (formação de gotículas de água na superfície de permutadores de calor), etc;
- O arrefecimento evaporativo.

As definições fundamentais e conceitos básicos associados à psicrometria são [24]:

- **Ar seco e húmido:** o ar seco é uma mistura dos vários gases que compõem o ar atmosférico, como o azoto, oxigénio, entre outros, numa mistura homogénea para uma grande faixa de temperaturas. O ar é húmido quando, além da mistura de gases, tem vapor de água, que pode saturar à temperaturas ambiente, e então condensar.
- **Lei de Dalton:** a pressão total de uma mistura de gases é a soma das pressões parciais de cada um dos componentes, é importante ressaltar que esta lei é válida apenas para gases ideais.
- **Pressão parcial:** pressão que cada componente exerceria se, à mesma temperatura, ocupasse sozinho todo o volume da mistura.

O arrefecimento evaporativo é baseado na evaporação da água que absorve calor latente durante o processo de evaporação e pode ser dividido entre direto e indireto [25].

### 2.2.1. Carta ou diagrama psicrométrico

Existem determinadas discrepâncias sobre a invenção do diagrama psicrométrico. No início do século XX, o engenheiro alemão Richard Mollier inventou um método gráfico no qual foram colocadas as propriedades de várias misturas de ar e vapor de água. Este dispositivo adotou diferentes nomes conforme o país no qual foi empregado, diagrama i-x, Diagrama Mollier ou carta psicrométrica. Nos Estados Unidos da América (EUA), o crédito da invenção foi dado a Willis Carrier [23].

Independentemente do crédito da invenção, é um sistema extremamente útil que tem a propriedade de poupar tempo, simplificando as formas de se obter o calor sensível (calor seco) e calor latente (calor húmido).

O diagrama psicrométrico exposto nas Figura 2 e Figura 3 descreve todas as combinações possíveis de temperatura, humidade, massa específica e calor, contidas no ar normalmente em uso [24].

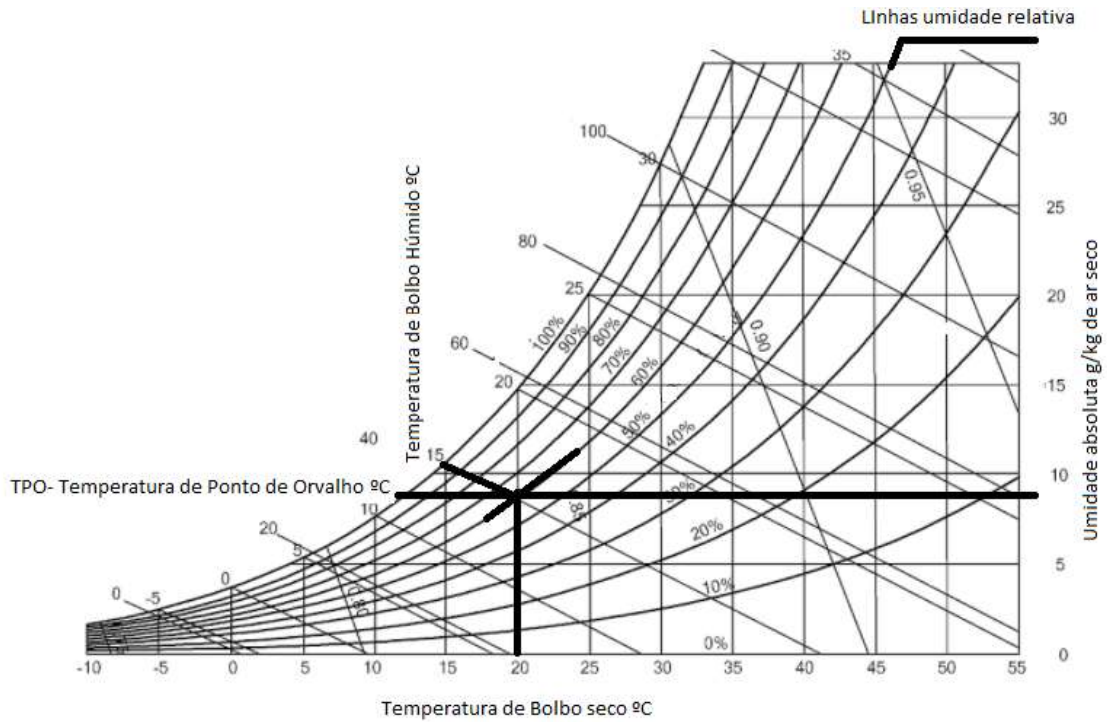


Figura 2 – Diagrama ou Carta psicrométrica [26].

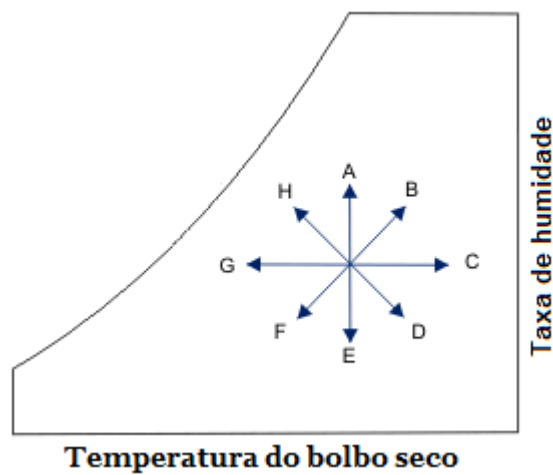


Figura 3 - Diagrama ou Carta psicrométrica, adaptado [27].

Sendo os processos [27]:

**A - Humidificação:** Nesse processo mantém-se a temperatura de bolbo seco constante, adicionando apenas a humidificação;

**B - Aquecimento e humidificação:** Trata-se de aumento de temperatura sensível e acréscimo de humidade absoluta;

**C - Aquecimento sensível:** Quando o ar é aquecido, a sua temperatura de ponto de orvalho permanece constante se não houver presença de água. Qualquer processo de aquecimento, durante o qual apenas se adiciona calor sensível, pode ser representado na carta psicrométrica por uma linha horizontal com uma linha que coincide com a temperatura de ponto de orvalho inicial do ar.

**D - Desumidificação Química:** Redução simultânea da temperatura de bolbo seco e da humidade absoluta.

**E - Apenas Desumidificação:** Ponto onde se mantém a temperatura de bolbo seco e apenas se retira a humidade absoluta;

**F - Arrefecimento e desumidificação:** O ar pode ser arrefecido e desumidificado ao mesmo tempo, desde que entre em intercâmbio com superfície abaixo do ponto de orvalho;

**G - Só arrefecimento sensível:** Quando o ar é arrefecido sem haver condensação, isto é, só com arrefecimento sensível, o estado do ar pode também ser representado por uma linha horizontal coincidindo com a temperatura de ponto de orvalho inicial do ar.

**H - Arrefecimento evaporativo:** ar pode ser arrefecido e humidificado ao mesmo tempo. Neste processo o ar faz intercâmbio com água em processo de evaporação com incremento de humidade e redução de temperatura sensível.

### **2.3. Geotermia**

O calor do interior do solo pode ser utilizado para sistemas de geração de eletricidade, mas, outra forma de utilizar a energia geotérmica consiste em aproveitar a temperatura a um valor aproximadamente constante abaixo da superfície da terra, para utilizar em bombas de calor geotérmicas (BCG) [28].

Assim, a geotermia pode ser descrita como uma ciência e técnicas que estudam e exploram o calor terrestre. A energia geotérmica tem origem no interior do solo terrestre, verificando-se que, em termos médios, a temperatura aumenta, em profundidade, cerca de 33°C por km [29]. Porém, devido à heterogeneidade da crosta terrestre, existem zonas com elevado gradiente geotérmico. O aproveitamento económico deste calor pode ser

realizado na produção de energia elétrica, para aquecimento do ambiente, de águas e em vários processos industriais.

De acordo com o Gabinete de Eficiência Energética e Energia Renovável do Departamento de Energia dos EUA (*Office of Energy Efficiency and Renewable Energy do U.S. Department of Energy - EERE*) [30], uma fonte geotérmica de calor é um mecanismo eficaz para se conseguir atingir eficiência energética, sendo empregado em sistemas de refrigeração de edificações urbanas, com uma economia de energia elétrica variando entre 25% a 50%, quando comparada com sistemas convencionais de ar condicionado e refrigeração.

Os sistemas convencionais de refrigeração requerem uma fonte externa de troca de calor que pode ser: uma torre de arrefecimento com chiller de condensação a água, em que o líquido troca calor e a circulação é feita por intermédio de bombas centrífugas; ou um chiller de condensação a ar, em que uma serpentina de cobre com aletas de alumínio faz a troca de calor com o ar externo. Uma bomba de calor geotérmica, no entanto, é mais simples e funciona como um sistema de ciclo de refrigeração (quente e frio) por intermédio de uma válvula reversível. Pela definição da ASHRAE [31], uma bomba de calor geotérmica consiste num ciclo de compressão de vapor reversível associado a um permutador de calor instalado no solo.

## **2.4. Eficiência Energética**

Em 2001, o Brasil enfrentou o maior racionamento de energia de sua história, conhecido como “apagão”. Esta crise energética deveu-se à falta de planeamento no setor, com falta de investimentos no setor elétrico na distribuição e geração desta energia, como montagem de linhas de distribuição. Adicionalmente, a baixa pluviosidade, dificultou a manutenção dos reservatórios cheios, prejudicando a geração de energias nas centrais hidroelétricas. O racionamento criou no povo brasileiro novos hábitos, como: selos de eficiência energética, diminuição nos gastos com energia, como por exemplo, pela troca de lâmpadas incandescentes por fluorescentes [32].

Em termos de Eficiência Energética, o Brasil possui várias políticas reconhecidas internacionalmente e segue algumas diretrizes internacionais também relacionadas à temática de eficiência, entre as quais:



- **Programa Nacional de conservação de Energia Elétrica – PROCEL**, instituído em 1993, o selo PROCEL destina-se à racionalização do consumo de energia elétrica, combater o desperdício e reduzir os custos e os investimentos setoriais, e desta forma, aumentar a eficiência energética, pela informação prestada ao consumidor no ato da compra de um equipamento elétrico. Foi criado e executado pela Eletrobras, com recursos próprios, da Reserva Global de Reversão (RGR) e de entidades internacionais. No ano de 2019, o PROCEL economizou em torno de 21,600 TWh, além dos benefícios diretos, como, evitar a emissão de 1,6 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes na atmosfera, o que corresponde às emissões de 557 mil veículos durante um ano. Na certificação de edificações comerciais pelo PROCEL no Brasil, o ar condicionado tem um peso de 40%, tendo a iluminação um peso de 20% e a envolvente de 40%. Especificamente, o PROCEL não possui uma linha específica para Data Center. O índice de comparação entre equipamentos de ar condicionado pelo PROCEL é o COP (*Coefficiente de Performance*) que é a relação entre a capacidade térmica (kW) pelo consumo elétrico (kW<sub>in</sub>). Os equipamentos possuem um selo conforme a Figura 5 [33].



Figura 5 – Selo PROCEL [33].

- **Programa de Eficiência Energética – PEE**, conforme dispõe a Lei no 9.991, de 24 de julho de 2000, cujo objetivo reside em mostrar à sociedade a importância e a viabilidade econômica, combatendo o desperdício da energia elétrica e aumentando a eficiência energética dos equipamentos, processos e usos finais da energia [34].

- **Lei 9.991, de 24 de julho de 2000**, relacionada com a realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor elétrico e das outras providências.
- **Lei de Eficiência Energética – Lei nº 10.295; 2001**, dispõe que o poder executivo estabelece os níveis máximos de consumo específico de energia ou mínimos de eficiência energética de máquinas, aparelhos com elevado consumo de energia comercializados e fabricados no país, com bases de indicadores técnicos no artigo 2 da Lei. Desenvolve mecanismos que promovem a eficiência energética nas edificações, previsto no artigo 4 da mesma Lei.
- **ISO 50006: 2004 - Sistemas de gestão de energia - Medir o desempenho energético utilizando linhas de base de energia (ENB) e indicadores de desempenho energético (IEVP) - Princípios gerais e orientações** - fornece orientação para as organizações sobre como estabelecer, usar e manter indicadores de desempenho energético (EnPIs) e linhas de base de energia (ENB) como parte do processo de medição do desempenho energético [35].
- **Power Usage Effectiveness (PUE), 2006**, é uma medida de eficiência em Data Center. Em projeto, a alternativa de mensurar o PUE é uma relação entre potências (kW/kW). Já em fase de operação, o PUE é considerado como uma relação entre energias. Inclusive existe uma metodologia para se realizarem as medições em campo de PUE descritas em 2016 como um padrão global sob ISO/IEC 30134-2: 2016 [36]. Nesta norma ISO, são descritos os métodos de aplicação dos analisadores de energia, assim como os locais onde os mesmos devem ser instalados. Além da norma ISO, foi elaborada a norma Europeia EN 50600-4-2. Nesta norma EN é enfatizada a importância de monitorizar o índice PUE em tempo real nas 8.760 horas, como um código de conduta para Data Centers na Comunidade Europeia [37].
- **Lei nº 11.465, de 28 março de 2007**, descreve a obrigação das concessionárias e permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica aplicarem, no mínimo, 0,50% de sua receita operacional líquida em programas de eficiência energética no uso final.
- **Lei nº 12.212, de 20 de janeiro de 2010**, que impõe que as concessionárias e permissionárias de distribuição de energia elétrica deverão aplicar, no mínimo, 60% dos recursos de seus programas de eficiências para unidades consumidoras beneficiadas pela tarifa social.

- **Plano Nacional de Eficiência Energética – PNEF, 2012**, criado pelo Ministério das Minas e Energia do Plano Nacional de Eficiência Energética, que tem por objetivo cumprir a determinação estabelecida no Planejamento Energético Nacional, que requer anualmente 10% de economia de energia até 2030, em torno de 106 TWh. Organiza ações para conseguir alcançar a meta estipulada.
- **RN/ANEEL nº 556, de 18 de junho de 2013**, aprova os procedimentos do programa de eficiência Energética – PROPEE.
- **ISO 17741, 2016**, descreve as regras técnicas gerais de medição, cálculo e verificação das economias de energia de projetos de *retrofits* ou novos projetos [38].
- **Norma ANSI/ASHRAE/IES 90.1 - 2019**, norma de energia para edifícios, exceto edifícios residenciais. Trata-se de uma norma do *American National Standards Institute* (ANSI) publicado pela ASHRAE e em parceria pela *Illuminating Engineering Society* (IES) que explicita os requisitos mínimos necessários para projetos de eficiência energética para edificações, exceto para edifícios residenciais. A norma original, ASHRAE 90, foi inicialmente publicada em 1975, havendo várias revisões a partir dessa versão. Em 1999, a ASHRAE votou para estabelecer o padrão de manutenção contínua da norma, devido às mudanças rápidas na tecnologia dos equipamentos e por sua vez às mudanças de eficiências elétricas no tempo. A norma foi renomeada ASHRAE 90.1 em 2001. Desde então, foi atualizada em 2004, 2007, 2010, 2013, 2016 e 2019 para se adequar às tecnologias mais recentes e eficientes, e às mudanças nas metodologias de parâmetros da AHRI para equipamentos [39].

## 2.5. Revisão de Trabalhos Científicos

Um DC é uma instalação que centraliza servidores, equipamentos de processamento, físicos ou virtuais, para o processamento, armazenamento, gestão e disseminação de dados de um negócio específico. Hoje, o sistema de ar condicionado de um DC deve ser capaz de suportar 24 horas/7 dias, 365 dias/ano. Com o rápido crescimento das bases de informações das indústrias e comércios, os DC tornaram-se um fenômeno crescente nos setores públicos e privados. Tais instalações são amplamente usadas para hospedagem na web, bases de informações de depósito central do governo, organizações, unidades de pesquisa: intranet, setor financeiro, processamento de transações e outras atividades. Os DC são instalações que hospedam servidores de TI e sistemas de armazenamento de

dados. O arrefecimento garante que estes sistemas informáticos funcionem de forma confiável. A quantidade de ar de arrefecimento que cada servidor recebe, é determinada pela sua taxa de geração de calor. Portanto, a chave para garantir a confiabilidade do equipamento é assegurar que o ar refrigerado seja distribuído corretamente ao longo do DC. As densidades médias de energia nos DC estão em rápido crescimento e deverão atingir nos próximos anos até 3 kW/m<sup>2</sup>. Com o passar dos anos, os proprietários dos edifícios onde são instalados os DC e quem os utiliza, os profissionais de TI e fabricantes de equipamentos de DC, estão cada vez mais preocupados com a dissipação de calor e com o consumo energético elétrico do sistema de ar condicionado de salas de computação (CRAC - *Compute Room Air Conditioning*). A falta de informações sobre os locais das instalações, os pontos quentes e pontos frios da instalação, levam ineficiência na operação de todo sistema. Nota-se que, com a evolução dos processadores de computação nas suas respectivas gerações, aumento significativo nas memórias e acessórios, o fluxo de calor produzido aumentou drasticamente [40].

A passagem de dados de papéis para informação digital, a procura por mais processamento e meios de armazenamento de dados, aumentaram significativamente em todos os setores de atividades. O crescimento das comunicações na Internet, o aumento do uso de transações eletrônicas nos mercados financeiros, comerciais e de serviços, ou armazenamento de registos médicos eletrônicos, informações do governo, computação em nuvem, correspondem a um quadro computacional em crescimento em que aplicações, dados e recursos de TI são servidos aos utilizadores através da rede de comunicação que conduzem a evolução dos DC nos próximos anos.

Este tipo de instalações são de elevado consumo de energia. Um DC consome cerca de 25 a 50 vezes mais do que um escritório normal com a mesma área. Com base nas estimativas de tendências atuais, os DC nos EUA devem consumir atualmente (2020) aproximadamente 73000 TWh [41].

Organizações, como o Green Grid, a *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning* (ASHRAE) e a Agência de Proteção Ambiental dos EUA, adotaram a métrica de energia (PUE) para avaliação da eficiência energética das infraestruturas dos DC, o resultado é sempre superior ou igual a um, onde será mais eficiente o DC. Algumas organizações, por exemplo, Comissão Européia usam o inverso do PUE, denominada a métrica como DCiE (*Data Center infrastructure Efficiency*). Trata-se de uma métrica para avaliar a eficiência do consumo de energia pela infraestrutura de um DC, mensurando a eficiência de forma inversa ao PUE. Os DC devem ser cada vez mais

eficientes e mais ecológicos, o que exige reduzir a energia necessária para executar infraestruturas informáticas, garantindo a longevidade dos sistemas e garantir o consumo de energia com base em fontes de energia renovável.

A métrica *Carbon Usage Effectiveness* (CUE) [42] aborda as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) associadas com as operações de DC. A métrica *Water Usage Effectiveness* (WUE) [43] aborda o uso de água em DC, incluindo a água utilizada para humificação e água evaporada no local decorrente da energia produzida ou do arrefecimento do DC e seus sistemas de suporte. Um dos ênfases desta tese reside na criação de índices que possam abordar não apenas as emissões de dióxido de carbono e a água usadas no DC de forma direta, como também de forma indireta, analisando as emissões de dióxido de carbono e o consumo de água derivado da alimentação de energia no DC.

O Green Grid desenvolveu também a métrica *Energy Reuse Effectiveness* (ERE), para medir o benefício de reutilizar a energia produzida num DC em outras infraestruturas externas, e a métrica *Compute Power Efficiency* (CPE) que permite quantificar a eficiência total de um DC, levando em consideração o facto de que nem toda a energia elétrica entregue ao equipamento de TI é transformada por esse equipamento num produto de trabalho útil [44].

Com os negócios crescentes, uma operadora de telecomunicações portuguesa considerou a construção de um novo DC em Portugal com 12.000 m<sup>2</sup> de espaço e 40 MW de energia elétrica. A instalação, em termos de eficiência energética, significa que o DC deve ter um PUE igual ou inferior a 1,25. Este é o maior DC construído em Portugal e o seu projeto poderá ser usado como referência não apenas em termos de eficiência energética, mas também de sustentabilidade, tendo sido encontrado o local mais satisfatório para atingir os objetivos económicos, ambientais e de riscos [45].

Conforme Covas et al. [44], a maior complexidade dos DC reside nas infraestruturas técnicas e organizacionais que garantem o melhor desempenho e a maior confiabilidade nos modernos e rigorosos sistemas de informações e comunicações. Propuseram uma abordagem de análise de decisão multicritério (MCDA – *Multi-Criteria Decision Analysis*), método este que auxilia a tomada de decisões complexas, identificando os locais mais sustentáveis para instalações de DC, tendo como consideração as dimensões técnica, social, económica e ambiental. Foram efetuadas avaliações dos DC em Portugal com base em pesquisas publicadas e entrevistas, para estimar a perda potencial de oportunidade em termos de economia de energia devido à sua localização. Avaliando o

desempenho ambiental dos DC, foi levada a cabo uma revisão de literatura para compilar as métricas usadas. Estas métricas encontram-se apresentadas na Tabela 1 [44].

O PUE foi adotado como um guia métrico para avaliar a eficiência dos DC. No entanto, o uso da métrica PUE mostrou algumas preocupações entre os analistas e os especialistas projetistas de DC, uma vez que concluíram que não promovia práticas de eficiência energética.

Considere-se dois DC em dois locais diferentes com os mesmos sistemas (TI, distribuição de energia, geradores, UPS, etc...), mas com diferentes sistemas de arrefecimento. Estando um dos DC localizado num clima mais quente, estes apresentam o mesmo valor de PUE. Este resultado significa que as suas infraestruturas de refrigeração (todas as demais sendo iguais) estão a usar as mesmas quantidades de energia, o que, à luz da métrica PUE, podem ser consideradas igualmente eficientes. No entanto, um DC localizado num clima muito frio, como no Ártico, aproveitando o arrefecimento gratuito externo, comparativamente a um DC localizado num clima mais ameno como o Portugal, seria mais eficiente no que toca ao consumo de energia.

Porém, as empresas proprietárias nunca consideraram construir um DC no Ártico, dado que apresentaria restrições ao nível da implantação de recursos humanos especializados para operação e manutenção e de visitas de clientes [44].

Todavia, o tráfego mundial de dados em redes móveis cresceu 82% entre o primeiro trimestre de 2018 e o primeiro trimestre deste ano, alcançando agora 28 EB/mês, informa o relatório Ericsson Mobility Report [46], Em 2025, 90% das assinaturas são previstas serem de banda larga móvel. Estima-se que haverá 8,9 mil milhões assinaturas móveis até o final de 2025, dos quais cerca de 90% serão para banda larga móvel. Assinaturas associadas a smartphones representam cerca de 70% de todas as assinaturas de telefone móvel. O número de previsão de assinaturas de smartphones atingirá 7,4 mil milhões em 2025, ou 83% de todas as assinaturas móveis. Assinaturas para banda larga fixa deverão mostrar um crescimento limitado de cerca de 2% ao ano até 2025, assinaturas para PCs móveis, tablets e routers devem apresentar um crescimento moderado, atingindo cerca de 330 milhões em 2025 [46].

O principal grupo de comunicação brasileiro dedicado às Tecnologias da Informação e Comunicação (ICT – *Information and Communication Technologies*) teve uma expansão atribuída à crescente migração dos sistemas corporativos de TI para a nuvem. Os sistemas baseados em nuvem têm a capacidade de expandir-se de maneira rápida e

eficiente para suportar mais cargas de trabalho do que os sistemas fixos dos tradicionais DC. Com taxas mais altas de virtualização de DC, os operadores em nuvem poderão oferecer uma variedade maior de serviços para empresas e consumidores com desempenho otimizado. De acordo com a análise realizada pela Cisco, a nuvem dominará e excederá o crescimento do DC tradicional, quando 92% da carga de trabalho será processada pelo DC da nuvem e 8% pelos DC tradicionais [47].

Até 2022, o crescimento nos gastos corporativos de TI para ofertas baseadas na nuvem será mais rápido que o crescimento nas ofertas tradicionais de TI (sem nuvem), tornando a computação em nuvem uma modalidade mais apreciada nos mercados de TI desde os inícios dos dias da era digital. A TI da empresa Gartner previu que os gastos com sistemas de DC devem ser de US \$ 195 mil milhões em 2019, mas de US \$ 190 mil milhões até 2022. Por outro lado, os gastos com serviços de infraestrutura de sistemas em nuvem crescerão de US \$ 39,5 mil milhões em 2019 a US \$ 63 mil milhões até 2021 [48].

Pela primeira vez, a Cisco também quantificou e analisou o impacto dos DC de hiperescala, que devem crescer para 485 DC em 2020. Espera-se que o tráfego de hiperescala de DC cresça cinco vezes nos próximos cinco anos. Essas infraestruturas serão responsáveis por 47% dos servidores instalados [47].

Com o crescimento dos DC, um dos principais desafios é melhorar o desempenho e a eficiência, em grande parte devido ao calor dissipado pelos servidores, enquanto o enorme número de equipamentos instalados para aumentar a capacidade de armazenamento também aumenta consideravelmente a energia elétrica e, conseqüentemente, a dissipação de calor. Para melhorar a dissipação de calor, alguns DC até mudaram-se para lugares onde a temperatura média do ar é mais baixa, lugares como o Círculo Polar Ártico ou a Suécia, para obter melhor eficiência energética no processo de arrefecimento e o calor excedente aproveitado para aquecimento dos escritórios, quantidade de produção de energia elétrica. No caso do DC da Google, foram empregados 2 mil funcionários de 50 empresas para concluir a sua construção na Finlândia. As operadoras de DC foram isentas de quase todos os impostos sobre a energia, com isso, reduzindo drasticamente os custos operacionais e melhorando a competição com outras empresas nórdicas. No entanto no ano passado, 2019, a agência tributária da Suécia, modificou esse incentivo, provocando custos mais altos [48].

Sendo assim, As métricas de eficiência são definidas e padronizadas para comparar a eficiência dos sistemas DC e seus custos operacionais. Um consórcio global de

fabricantes de equipamentos de TI, empresas de tecnologia, governo, instituições de ensino, pesquisa e desenvolvimento, associações de classe e outros setores da sociedade foi criado para discutir, desenvolver e recomendar as melhores práticas de eficiência energética, juntamente com as emissões de CO<sub>2</sub>. Vale a pena reforçar que uma dessas métricas consiste na Eficiência no Uso de Energia (PUE), definida pelo The Green Grid, como um instrumento para medir a eficiência energética de um DC [47]. O inverso do PUE, DCiE, é outra métrica usada. O DCiE traduz a Eficiência de infraestrutura de um Data Center, sendo que, umas das áreas de pesquisa em computação em nuvem, como custo, afetam o uso eficiente de energia. DciE é uma métrica comum usada para calcular a eficiência energética de um DC. A diferença entre PUE e DCiE, é que o DciE é expresso em porcentagem ao invés de um quociente. Quanto maior a porcentagem, mais eficiente é o DC. Outras métricas, como o CUE, o WUE, o ERE, o CPE, visam permitir a comparação de outros parâmetros. A Tabela 2 compila as principais métricas usadas para avaliação do desempenho, em diferentes facetas, de DC [49].

A alimentação de energia num DC típico, são projetadas para a infraestrutura de TI e para o sistema de refrigeração preparado para remover o calor gerado nos equipamentos de TI. Esta fornecimento de energia varia conforme a especificação do DC e do sistema de refrigeração instalado. O consumo do sistema de arrefecimento, pode ser reduzido, utilizando no local disponível economizadores do ar ou da água. Dependendo da configuração dos economizadores e das condições climáticas locais, o uso de energia do sistema de refrigeração varia [50]. Um economizador pode ser construído simplificadaamente, como um conjunto de dampers, que permitem a mistura de ar externo (de renovação) com ar de recirculação, quando o primeiro possui características favoráveis à sua utilização na insuflação. O ar externo em condições de temperatura e humidade do ar favoráveis (baixos valores de temperatura e de humidade do ar), pode diminuir a carga térmica sobre o sistema de refrigeração quando comparado com o ar de recirculação. Assim sendo, este poderá estar em condições que exijam maior trabalho do sistema para sua adequação às características do ar no ambiente climatizado [51]. Khalaj et al. [52], comparou o uso de energia de vários economizadores de ar com um sistema de arrefecimento convencional em todo o mundo para encontrar o economizador de ar mais eficiente em cada local e a melhor localização com uso mínimo de energia de arrefecimento.

Os DC tem economizadores diretos de ar que distribuem diretamente o ar ambiente, após o ajuste da sua humidade e níveis de contenção de acordo com o padrão ASHRAE. No entanto, os economizadores indiretos de ar utilizam o ar ambiente frio para arrefecer o

ar de retorno do DC e redistribuí-lo no DC. Neste processo, humidificador, desumidificador, filtros, rodas de calor, tubos de calor, arrefecedores evaporativos diretos e ou indiretos, dependem do tipo de economizadores a ser utilizados. Como o consumo de energia, o desempenho térmico e o custo de arrefecimento final dependem muito das condições climáticas locais, os economizadores acima mencionados foram simulados com arrefecedores a ar e a água.

Um sistema de energia renovável tipicamente converte a energia do vento, luz do sol, ondas do mar, queda de água, biomassa e calor geotérmico, em eletricidade utilizável ou energia térmica [53]. A maioria dessas fontes pode ser extraída direta ou indiretamente, são denominadas energias renováveis. A crescente procura por fontes de energia baratas e limpas, potenciou a sua aplicação em aspetos técnicos e económicos em várias regiões. No entanto, a integração e a colocação em grande escala desses recursos na rede elétrica pode ter impactos técnicos, económicos, ambientais e sociais substanciais. O desenvolvimento de um sistema de energia sustentável, pode basear-se nos impactos energéticos e económicos da energia eólica e solar, face a serem promissoras fontes renováveis de energia consideradas em DC [50], especificamente a energia renovável tem grande impacto na análise de TEWI (Total Equivalent Warming Impact), ou seja, além da questão da eficiência energética um DC atualmente também deve estar focado na sustentabilidade um dos temas importantes dessa tese.

As baterias são um também um meio eficiente de armazenar o excedente de energia fornecido por módulos fotovoltaicos e turbinas eólicas. Esse excedente de energia pode ser armazenado em bancos de baterias e extraído quando o total de energia gerada pelas fontes de energia renováveis sejam insuficientes [50].

A localização ideal para um DC sustentável, depois de selecionar o economizador de ar ideal para cada local e com um gerador de energia solar e bateria, pode ser mais independente da rede elétrica Esta condição é determinada pelo cálculo da potência total instalada em cada infraestrutura do DC.

O crescimento de instalações de DC está a resultar num aumento significativo no consumo elétrico em TI e sistemas de refrigeração. Este elevado consumo de energia é uma das principais preocupações no design e operação destas instalações. Khalaj et al. [52] propõem a integração de um sistema de refrigeração baseado num economizador com geração híbrida de energia (solar e eólica) e um sistema de armazenamento em

baterias, sendo assim mais sustentável e com menor utilização de energia da rede elétrica.

Conforme Lajevardi et al. [53], com o crescimento da indústria de TI, aumentou substancialmente o consumo de energia. Aos longos de anos, diversas métricas foram sugeridas para superar os desafios de eficiência energética e da gestão do desempenho térmico. Foi monitorizado durante 6 semanas a gestão do desempenho térmico de DC.

Apesar do desenvolvimento de várias métricas para avaliar a eficiência dos DC, nenhuma métrica foi proposta para avaliar simultaneamente o impacto do nível central e do nível do rack (isto é, da infraestrutura e dos equipamentos de TI) das mudanças na eficiência energética.

A métrica mais usual existente (PUE), é limitada pelo facto das cargas relativas à infraestrutura e às TI aparecerem no numerador da expressão. Assim, se forem efetuados melhorias no uso de energia do equipamento de TI sem mudanças simultâneas no uso de energia da infraestrutura, o valor métrico da PUE na verdade aumentará. Devido aos desafios e limitações das métricas existentes, trabalhos futuros a serem desenvolvido devem concentrar-se no desenvolvimento de uma métrica para avaliar mais eficientemente a eficiência energética e o impacto das mudanças nos DC. Isso permitiria que os tomadores de decisão de nível avaliassem os resultados com base numa única métrica, em vez de exigir a medição, a análise e a avaliação de um conjunto de métricas. Tal abordagem seria mais direta e efetiva em termos de tempo e potencialmente reduziria o efeito da avaliação de resultados métricos concorrentes. Esses DC representam, portanto, uma carga de energia significativa, que, por sua vez, deve ser gerida por meio de novas tecnologias e estratégias de controlo [52]. É precisamente neste ponto que a presente Tese pretende contribuir, apresentando um novo índice de análise da eficiência energética de DC, conforme será devidamente expostos nos capítulos subsequentes.

A eficiência de um DC através da métrica PUE. Um  $PUE = 2,0$  indica que o equipamento de TI utiliza cerca de 50% da energia de infraestrutura medida e o restante é usado para refrigeração e outros recursos de suporte. Outras métricas foram propostas para as avaliações de desempenho ao nível das rack, como por exemplo o SHI (*Supply Heat Index*), que é uma métrica que foi introduzida como um parâmetro adimensional que ajuda a quantificar a quantidade de calor infiltrado no ar arrefecido fornecido a um rack. Esta métrica consiste na relação entre o aumento de entalpia devido à infiltração de calor na entrada do rack e aumento de entalpia na saída do rack, com uma análise detalhada

para desenvolver a relação composta entre os parâmetros de geometria e a carga de alimentação. Uma correlação entre a métrica SHI e a eficiência energética geral do DC ainda não foi documentada, visto que é uma questão específica de construção do rack. O trabalho técnico torna-se necessário para tornar essa e outras métricas utilizáveis para análise de energia de DC. Por exemplo, as variáveis usadas para calcular a métrica PUE podem ser difíceis de medir se o DC estiver num prédio de uso misto. Além disso, a métrica é simples e não fornece a base técnica necessária para uma análise de engenharia adequada. Por exemplo, se todos os servidores em um DC estiverem inativos e não produzirem e os recursos de arrefecimento forem bem provisionados, a energia consumida pelo arrefecimento e outros recursos de suporte será de apenas 20% da energia de TI, valor perfeito de PUE seria 1,2. Neste exemplo, a métrica PUE dá a indicação de que o DC está muito bem otimizado, no entanto, o DC está a desperdiçar energia, já que nenhum trabalho está a ser realizado [54].

Foi criado um memorando público que aborda o acordo alcançado pela Força - Tarefa de Harmonização de Métricas Globais sobre abordagens padrão e convenções de relatórios para produtividade de energia de DC (DCeP - *Data Center Energy Productivity*). Os proprietários e operadores de DC, avaliam e melhoram o desempenho de seus equipamentos com as métricas de eficiência energética. Este acordo recomenda quantificar o trabalho útil [55].

Um sistema termodinâmico como um servidor na escala local e como um DC na escala global. As métricas de eficiência energética abrangem a relação entre a potência dinâmica (a potência proporcional à utilização do sistema) e a energia total consumida pelo sistema. A amostra para um único servidor e para um DC foram apresentados para determinar a métrica de eficiência de energia para cada caso. Os resultados dessa análise mostram que a eficiência aumenta com o aumento da utilização da CPU e é maior para um servidor com vários processadores do que para um servidor com um único processador. Isso ocorre porque o potencial de processamento ocioso, que não está sendo usado, tende a reduzir a eficiência geral do servidor, portanto, consolidar os processadores na mesma plataforma de servidor minimizaria esse efeito [55].

O estudo de caso do DC é conduzido para um cenário de DC hipotético, onde a energia estimada dos recursos de arrefecimento é calculada usando o sistema chiller. O trabalho nessas métricas de desempenho energético é necessário para desenvolver métodos padronizados para avaliação e classificação de servidores heterogêneos e DC com base na sua utilização efetiva e consumos de energia [54].

A Green Grid [16] já aborda o que é o sistema de arrefecimento gratuito que tem conexão com redução do PUE, incluindo uma redução média de 2,0 de PUE até 1,5 usando o arrefecimento gratuito. O PUE pode ser calculado usando medições de energia (kWh) ou potência (kW). As medições de energia são mais precisas porque as medições de potência apenas consideram o fluxo de energia no momento exato da medição, enquanto que as medições de energia acumulam o fluxo de energia ao longo do tempo. As estimativas de PUE que usam amostras baseadas em energia refletem com mais precisão o uso de energia a longo prazo e são agora as preferidas pelo setor. A maioria dos sistemas de monitoração pode ser configurada para apresentar dados de energia.

A Tabela 1 descreve então as várias métricas usadas em DC. Estas métricas destinam-se à medição do desempenho em vários aspetos.

Tabela 1 – Métricas para Data Centers [48].

<b>Métrica</b>	<b>Sigla</b>	<b>Unidade</b>	<b>Definição</b>
<i>Power Usage Effectiveness</i> (Eficiência no uso de energia)	PUE	(kW)/(kW)	$\frac{\text{Potência de Energia total da instalação}}{\text{Potência de Energia dos equipamentos TI}}$
<i>Data Center Infrastructure Efficiency</i> (Eficiência da infraestrutura do Data Center)	DCiE	%	$\frac{1}{PUE} \cdot 100$
<i>Carbon Usage Effectiveness</i> (Eficiência no uso de carbono)	CUE	kgCO <sub>2</sub> /kWh	$\frac{\text{CO}_2 \text{ emitido (kgCO}_2 \text{ eq)}}{\text{Consumo de Energia TI (kWh)}} \cdot PUE$
<i>Water Usage Effectiveness</i> (Eficiência no uso da água)	WUE	m <sup>3</sup> /kWh	$\frac{\text{Uso anual de água no local}}{\text{Consumo de Energia TI}}$
<i>Energy Reuse Effectiveness</i> (Eficiência na reutilização de energia)	ERE	kW/kW	$\left(1 - \frac{\text{Reutilização de energia}}{\text{Total de energia}}\right) \cdot PUE$
<i>Compute Power Efficiency</i> (Eficiência de energia de computação)	CPE	kW/kW	$\frac{\text{Utilização do equipamento TI}}{PUE}$
<i>Power Overhead Multiplier</i> (Multiplicador de sobrecarga de energia)	SI-POM	kWh/kWh	$\frac{\text{Consumo de energia DC no medidor}}{\text{Consumo total de hardware ligados TI}}$
<i>Hardware Power Overhead Multiplier</i> (Hardware Multiplicador de sobrecarga de energia)	H-POM	kW/kW	$\frac{\text{Carga de máquinas ligadas em AC}}{\text{Carga de computadores}}$
<i>Deployed Hardware Utilization Ratio</i> (Taxa de Utilização de Hardware Implantada)	DH-UR	%	$\frac{\text{Nº servidores rodando aplicações}}{\text{Total de servidores realmente implantado}}$
<i>Temperature of the region usage effectiveness</i> (Eficiência no uso da temperatura da região)	TRUE	kW/kW	$\frac{\text{TI Consumo Energia + Iluminação + outros}}{\text{Energia Equipamentos TI}} + Cf$ $\cdot \frac{\text{Consumo de Energia dos sistemas refrigeração}}{\text{Energia Equipamentos TI}}$

Onde:

$$\text{Eficiência Energética instalada (\%)} = \frac{\text{Carga de TI}}{\text{Potência total consumida pelo DC}} \quad (1)$$

$$\text{Utilização da instalação (\%)} = \frac{\text{Carga TI atual usado}}{\text{Potência da instalação}} \quad (2)$$

$$\text{TI utilização (\%)} = \text{Média de utilização da CPU} \quad (3)$$

$$\text{TI Eficiência energética (\%)} = \frac{\text{Carga de processamento da CPU}}{\text{Energia total consumida da CPU}} \quad (4)$$

$$\text{Eficiência da instalação} = \text{Eficiência energética da instalação (\%)} \cdot \text{Utilização da instalação (\%)} \quad (5)$$

$$\text{Eficiência de ativos de TI} = \text{Utilização de TI (\%)} \cdot \text{Eficiência energética de TI (\%)} \quad (6)$$

Nesta perspectiva, o PUE não aparenta ser totalmente justo. A métrica PUE, em certo momento, penaliza DC em países com climas mais quentes. Se o clima for levado em consideração, pode-se considerar que o DC localizado no clima mais frio é menos eficiente, não sendo capaz de lucrar com um melhor potencial de arrefecimento gratuito (free cooling), para usar menos energia para na infraestrutura de arrefecimento. Levando esta consideração em linha, foi desenvolvida uma métrica que leva um DC a ter resultados satisfatórios com o potencial de free cooling da região em que está localizado. Um dos problemas da métrica da PUE é que esta não possui um fator de ajuste geográfico. Isso significa que, como a energia do sistema de arrefecimento normalmente representa uma parcela significativa do consumo de energia da instalação, os DC construídos de forma idêntica, teriam um PUE diferente se, por exemplo, um estivesse localizado em Miami, enquanto o outro estivesse localizado em Montana. Ainda assim, o PUE fornece uma métrica uniforme e simples que é de fácil entendimento e de monitorização da eficiência, independentemente da localização [56].

Foi desenvolvida uma métrica denominada *Temperature of the Region Usage Effectiveness* (TRUE), para considerar o uso eficiente do potencial de arrefecimento do ar e o impacto no uso de energia num DC local. O sistema de arrefecimento representa mais de  $\frac{1}{3}$  do consumo de energia, mas o tipo de sistema e a sua eficiência dependem das condições de temperatura da localização onde se encontra instalado o DC. A métrica

TRUE é, portanto, um fator de correção para a métrica PUE que tenta incorporar o impacto das condições de temperatura sobre a eficiência, usando um fator de correção que descreve o número de horas por ano em que a temperatura da região onde o DC está localizado tem uma média valor que permite o uso de sistemas free cooling (ver Tabela 2) [47].

Tabela 2 -- Métrica TRUE para temperaturas inferiores a 21°C, de cidades em várias localizações do mundo [47].

Região	Localização	PUE				
		1,25	1,43	1,67	2,00	2,50
Sul da Europa	Portugal - Lisboa	1,193	1,33	1,52	1,77	2,16
	Itália - Roma	1,194	1,33	1,52	1,77	2,16
	Espanha - Madrid	1,206	1,35	1,55	1,82	2,24
Norte da Europa	Alemanha - Berlin	1,237	1,41	1,64	1,95	2,42
	Rússia - Moscou	1,239	1,41	1,64	1,96	2,43
	Grã-Bretanha - Londres	1,244	1,42	1,65	1,98	2,46
	Finlândia - Helsinki	1,247	1,42	1,66	1,99	2,48
Outros	Japão - Tóquio	1,181	1,31	1,48	1,72	2,08
	Africa do Sul - Johannesburg	1,183	1,32	1,49	1,73	2,1
	Brasil - São Paulo	1,194	1,33	1,52	1,78	2,16
	Canadá - Ottawa	1,227	1,39	1,61	1,91	2,36
	Austrália - Canberra	1,242	1,42	1,65	1,97	2,45

O arrefecimento pode ser usado apenas em zonas climáticas onde as condições externas de temperatura e humidade do ar são apropriadas. Para a ASHRAE e para a Comissão Europeia, os DC devem ser projetados para operar em temperaturas do ar entre 18°C e 27°C, para maximizar a eficiência energética [57].

Seguindo estas recomendações e considerando temperaturas de "entrada" até 25°C, e sendo a temperatura usual obtida pela tecnologia de refrigeração free cooling de 4°C, estabelece-se 21°C como o limite superior para a temperatura do ar exterior que permite o uso desta tecnologia de arrefecimento. Não se estabelece nenhum limite para os níveis de humidade, porque dependendo da tecnologia de arrefecimento free cooling (direta ou indireta), essa restrição pode ser gerida facilmente. A métrica TRUE é definida da seguinte Equação 20 [57]:

$$PUE = \frac{\text{Total Facility Power}}{\text{IT EquipamentPower}} \rightarrow \frac{W_{total}}{W_{Ti}} \rightarrow \frac{W_{Ti} + W_{ilumi} + W_{outros} + W_{Ac}}{W_{Ti}} \quad (19)$$

Obs.: A definição em fase de projeto do PUE é uma relação entre potências.

$$TRUE = \frac{\text{IT Eq.Power} + \text{Lighting Power} + \text{Others(e.g.UPS)}}{\text{IT Equipament Power}} + C_f \times \frac{\text{Cooling System Power}}{\text{IT Equipment Power}} \quad (20)$$

$$C_f = \frac{1}{8760} \sum_{t=-\infty}^{21} n_T \quad (21)$$

Onde:

$C_f$ : Fator de Correção;

$n_t$ : Número de horas por ano com temperatura média abaixo dos 21°C;

8760 h: Número total de horas por ano.

Não requerendo fórmulas matemáticas complexas e sendo de fácil entendimento, tornam o PUE uma métrica com sucesso em termos de aplicabilidade. Objetivando manter uma forma direta e fácil de calcular a métrica, é definida a métrica TRUE simplificada dada pela Equação 22.

$$TRUE = 1 + C_f \cdot (PUE - 1) \quad (22)$$

O fator de correção,  $C_f$ , abrange todo o sistema de infraestrutura elétrica do DC (por exemplo, iluminação, que pode representar 3% do consumo de energia na DC), mesmo que o desempenho não seja influenciado pela temperatura externa. Todos os cálculos são baseados nesta versão simplificada do TRUE.

Na Figura 6, pode-se observar o impacto da região climática sobre a métrica TRUE. Por exemplo, um DC em Lisboa com uma PUE de 1,25 tem melhor TRUE (1,193) do que um DC com um PUE de 1,25 em Londres (TRUE= 1,24). Isso significa que um DC em Londres

que tem a mesma infraestrutura de TI que um em Lisboa e tem o mesmo PUE não está realmente aproveitando totalmente sua localização em termos de potencial de "free cooling".

A métrica poderia ser um estímulo para as organizações procurarem o uso efetivo dos recursos naturais para maximizar a eficiência operacional e reduzir o impacto no meio ambiente, e na realidade ser um facilitador para o desenvolvimento de DC mais sustentáveis. No entanto, ainda não leva em consideração outras questões, como as emissões de carbono associadas ao consumo de eletricidade ou ao uso de água [57].

Covas et al. [47] apresentaram uma metodologia para analisar e apoiar o processo de decisão para identificar regiões para a localização de DC sustentáveis usando ferramentas MCDA. A análise foi baseada no método de ultrapassagem (ELECTRE TRI) através do pacote de software IRIS devido à natureza dos dados. Para o estabelecimento de um DC sustentável, quatro itens foram definidos e analisados: fator de risco; fator social; fator económico e fator ambiental. Cada componente compreende vários critérios. No total, 49 critérios foram estabelecidos. Destes, 14 não foram utilizados, uma vez que não poderão ser avaliados ao nível de localidade (a avaliação exigiria a definição de uma determinada área). Dos 35 critérios avaliados, 6 pertencem ao fator risco, 10 ao fator social, 14 ao fator económico e 5 ao fator ambiental. Para cada fator foram definidas quatro categorias, onde C1 é o menos preferido (pior categoria) e C4 é o mais preferido (melhor categoria). A metodologia é aplicada a um estudo de caso em Portugal, com base num estudo anterior sobre análise de pesquisa para localizar um DC sustentável em Portugal usando dados geográficos sistemas de informação [58], que já tinha identificado um conjunto de 62 localidades para instalar um DC sustentável. Os resultados mostraram que existem 18 localidades das 62 que têm potencial para alcançar a categoria C3 (muito bom). Entre estes, é possível identificar regiões com potencial para alcançar a melhor categoria C4 (excelente) apenas no risco, dimensão económica e social. Em relação à dimensão ambiental, a categoria máxima que pode ser alcançada é C3 (muito bom). Geograficamente, estas regiões potenciais estão localizadas a norte de Lisboa e perto do litoral e mesmo que a solução final não esteja localizada nesses locais, estas as soluções podem, no entanto, constituir um "cenário base" com o qual qualquer outra alternativa deve ser comparada. O trabalho realizado tem algumas limitações. Muitos dos dados relevantes estavam disponíveis apenas em nível municipal, e não nível local. Alguns dos dados referem-se a valores já com algum tempo, podendo requer atualização de dados. E enquanto os julgamentos relativos aos pesos dos critérios foram do tipo

ordinal (requerendo apenas comparações), valores precisos foram fixados para os restantes parâmetros do modelo [47].

Os autores usaram um caminho original para abordar a seleção do local para a instalação de um DC ao avaliar separadamente as diferentes dimensões de sustentabilidade. Esta nova abordagem contribuiu para uma empresa de telecomunicações ter uma melhor visão do impacto das estratégias que podem desenvolver na identificação de possíveis regiões para localizar um DC. Se a empresa optar por ter uma estratégia focada principalmente na minimização do risco, as regiões a serem analisadas para localizar o DC poderiam ser diferentes em comparação com uma estratégia focada, por exemplo, para maximizar a componente económica. Os resultados encontrados neste estudo são deveras interessantes, pois fornecem uma visão das localidades portuguesas, onde poderia ser apropriado localizar um DC. Também fornece uma metodologia para resolver este tipo de problema noutras regiões do mundo, se necessário. Considerando os resultados, as localidades devem ser estudadas em detalhes para identificar uma área específica, possivelmente em direta negociação com os governantes dos respetivos municípios. Neste caso, existem outros critérios que deve ser considerados e que não foram avaliados no estudo devido à falta de informação ao nível das localidades. Estes incluem o custo do terreno ou atividades vizinhas, e devem ser analisados e avaliados com precisão na seleção de um local específico. Usando esses resultados, uma análise posterior pode ser conduzida para identificar e avaliar locais precisos dentro das localidades para implantar um DC. O modelo desenvolvido facilitará o processo de seleção do DC [47].

Sempre se têm preocupações com o custo e o meio ambiente, e como mais uma solução iniciaram-se muitas iniciativas energéticas "verdes ou energias limpas". A Energia Verde é produzida a partir de recursos renováveis, reduzindo os prejuízos ambientais. Entretanto, não significa, que esta geração de energia verde esteja livre de impactos na natureza, pois na realidade apenas lançam níveis mínimos de poluentes. Por exemplo, a locomoção de veículos com biocombustível é menos prejudicial ao meio ambiente. Entre outros tipos de energia verde estão [47]:

- Energia eólica – Utilização do vento para produzir energia mecânica, com hélices construídas em torres a elevada altura. Essa energia é transformada em energia elétrica;

- Energia Hidráulica – Aproveitamento do movimento das águas de rios e altura de queda (energia cinética e energia potencial respetivamente) em centrais hidroelétricas;
- Energia Solar – Utilização de painéis solares para captar a energia do sol para gerar energia elétrica;
- Energia Geométrica – Utilização da energia térmica do subsolo, onde se encontra vapor de água conduzido para turbinas em centrais geotérmicas;
- Energia Mare motriz – Geração de energia elétrica a partir do movimento das ondas do mar.

Todas essas formas de energia são soluções que podem ser utilizadas numa alternativa para DC gerarem a sua própria energia a partir de fontes renováveis. Estas perspetivas estão a ser implementadas por alguns DC de pequeno e médio porte alimentados por energia solar e/ou eólica. A Apple construiu uma central fotovoltaica de 42 MWh juntamente com uma central eólica, obtendo 1.700 MW, no DC da Carolina do Norte [55]. A empresa Apple relatou que todos os seus DC estão agora com consumo de energia equivalente às infraestruturas de energia renovável montadas, incluindo as instalações na Califórnia, Texas, Irlanda e Alemanha. Os DC que hospedam infraestrutura de informática para serviços como iTunes, Siri, Maps e App Store obtêm 100% de energia a partir de uma combinação de energia renovável que a empresa compra e a partir da capacidade de geração instalada no local [56].

A solução de apoio à alimentação dos sistemas por via de energia solar captada por painéis fotovoltaicos é também uma solução possível. Adicionalmente, o excesso da energia solar captada mas não utilizada poderá ser armazenado em baterias por meio de um controlador de carga. O controlador também pode se conectar à rede elétrica, pois o DC deve operar mesmo quando a energia solar não é acessível. O excesso desta energia elétrica produzida poderá ser repassado para ao concessionário elétrica do local [56].

Conforme Goiri [55], a utilização dos incentivos providenciados nos EUA com energia verde, permite melhorar os custos anuais de instalações de painéis solares para os DC, onde, o sistema pode ser amortizado no custo da energia em 10 a 11 anos de operação. Este período é substancialmente mais curto que os 25 anos de vida dos painéis solares, e num futuro mais próximo, os custos da energia irão diminuir a um ritmo mais acelerado. O autor propõem um algoritmo, definido como uma série de instruções passo-a-passo,

numa sequência finita de instruções. Este algoritmo denominado GreenSlot descreve explicitamente várias operações onde agenda os trabalhos para o DC parcialmente alimentado por energia solar. Foram implementadas duas versões do algoritmo: uma denominada de agenda SLURM e outra para o agendador MapReduce de Hadoop. Os resultados demonstraram que os horários da GreenSlot consumiram significativamente mais energia verde e com isso, apresentaram um consumo mais baixo do que um sistema convencional com consumo de energia elétrica da rede. Com a diminuição dos custos, diminui o tempo de amortização do capital aplicado no DC. Assim, o GreenSlot agenda trabalhos de lote paralelos num DC alimentado por uma matriz solar fotovoltaica e apoio da rede elétrica, em função da previsão da quantidade de energia solar que estará disponível no futuro próximo, com o intuito de maximizar o consumo de energia verde enquanto cumpre os prazos de trabalhos. Os resultados das avaliações mostram que o GreenSlot pode aumentar o consumo de energia solar até 117% e diminuir o custo de energia até 39%, em comparação com os programas que agendamento convencionais, ao programar três cargas de trabalho científicas e uma carga de trabalho de processamento de dados. Baseado nesses resultados satisfatórios, concluiu-se que os DC verdes e a programação de energia verde podem ter um papel significativo na construção de um ecossistema de TI mais sustentável [56].

## **2.6. Norma ASHRAE 90.1-2019**

Através de pesquisas, redação de normas, publicação, certificação e educação continuada, a ASHRAE molda o ambiente da construção de edifícios e de equipamentos atualmente. Um padrão de energia recém-publicado para DC apresenta o desempenho baseado numa abordagem que é mais flexível e acomoda as mudanças inovadoras que ocorrem rapidamente no design, construção e operações nesse setor [59].

A norma ASHRAE 90.1-2019 tem uma seção específica para eficiência energética de equipamentos de Data Center, especificamente no capítulo 6 e unidade de eficiência energética de equipamentos de DC são especificados num índice chamado “*Sensible Net COP*”, que corresponde à determinação do coeficiente de desempenho do calor sensível, dado pelo quociente da potência térmica sensível [ $kW_s$ ], pela potência elétrica dos equipamentos [ $kW_{in}$ ]. Os parâmetros para as medições são estabelecidos pela AHRI 1361, um parâmetro importante explorado no decorrer desta Tese é o parâmetro fixo de temperatura de admissão do ar de 35°C, ou seja, em todos os valores de eficiência

energética dos equipamentos de ar condicionado para DC são simulados para uma mesma condição de temperatura de entrada do ar no condensador [39].

Os valores do *Sensible Net COP* num sistema de condensação a ar variam de 1,89 a 2,70 [kW<sub>s</sub>/kW<sub>in</sub>]. Estes índices são úteis para uma mensuração de PUE em potências, pensando apenas na medida das eficiências baseados em tecnologias de equipamentos em carga plena [39]. Todavia, não são úteis para diferenciar os equipamentos de uma região para outra, por exemplo, Lisboa e Covilhã possuem características meteorológicas diferentes.

Provavelmente a AHRI 1361 usou o método de COP de calor sensível pelo fato que a principal componente da carga térmica num Data Center ser a carga sensível, e um valor de COP fixo pelo fato das cargas térmicas num Data Center não possuírem uma amplitude de variação como numa carga térmica de conforto [60].

Mas para ambientes de conforto térmico existe o índice IPLV (*Integrated Part Load Value*), que é uma premissa para adquirir equipamentos em edifícios verdes e em investidores que focam a eficiência energética. O IPLV é uma metodologia em que se mensura o COP em cargas parciais. Os seus parâmetros são descritos na AHRI 550/590-2003. Estes parâmetros encontram-se de acordo com a Equação 23 e descritos na Tabela 3 [61]:

$$\text{IPLV(orNPLV)} = 0,01A + 0,42B + 0,45C + 0,12D \quad (23)$$

Onde:

A: COP 100% Carga, kW/kW;

B: COP 75% Carga, kW/kW;

C: COP 50% Carga, kW/kW;

D: COP 25% Carga, kW/kW.

Tabela 3 – Condições de carga a parcial para cálculo do IPLV/NPLV.

<b>Evaporador (todos os tipos)</b>	<b>IPLV</b>	
100% Carga LWT	44 °F	6,7 °C
Vazão volumétrica	2,4 gpm/ton	5,45 m <sup>3</sup> /h·ton
Fator sujidade ( <i>Fouling Factor</i> )	0,0001 h·ft <sup>2</sup> ·°F/Btu	0,000018 m <sup>2</sup> ·°C/W
<b>Condensador a água</b>		
100% Carga EWT	85 °F	29,4 °C
75% Carga EWT	75 °F	23,9 °C
50% Carga EWT	65 °F	18,3 °C
25% Carga EWT	65 °F	18,3 °C
0% Carga EWT	65 °F	18,3 °C
Vazão volumétrica	3 gpm/ton	6,81 m <sup>3</sup> /h·ton
Fator sujidade ( <i>Fouling Factor</i> )	0,00025 h·ft <sup>2</sup> ·°F/Btu	0,000044 m <sup>2</sup> ·°C/W
<b>Condensador a ar</b>		
100% Carga EDB	95 °F	35,0 °C
75% Carga EDB	80 °F	26,7 °C
50% Carga EDB	65 °F	18,3 °C
25% Carga EDB	55 °F	12,8 °C

## 2.7. Norma ASHRAE 90.4-2019

Em setembro de 2019 foi publicado uma nova norma que estabelece os requisitos mínimos de eficiência energética para DC. A norma ASHRAE 90.4-2019 estava em desenvolvimento há vários anos. No geral, esta norma contém recomendações para o projeto, construção, operação e manutenção de DC. Além disso, a norma concentra-se no uso de energia renovável no local e fora do local. Esta norma aborda explicitamente os requisitos de energia exclusivos dos DC em oposição aos edifícios regulares, integrando assim os aspetos mais críticos e os riscos relacionados à operação dos DC [59].

A norma 90.4 é uma norma de projeto baseada no desempenho que define o valor máximo da componente de carga mecânica (MLC - *mechanical load component*) e da componente de perda elétrica (ELC - *electrical loss component*). Os cálculos do MLC e da ELC são realizados e então comparados com os valores máximos permitidos indicados na norma em função da zona climática. A conformidade com a Norma 90.4 é alcançada quando os valores calculados não excedem os valores de referência. Um caminho de conformidade alternativo é fornecido para permitir trocas entre o MLC e o ELC.

Inicialmente buscou um processo de Green Power (PUE) para estabelecer os critérios na norma, mas a métrica PUE da Green Grid é baseada em dados de consumo de energia medidos, em vez de cálculos de critérios de projeto.

O Comitê de Padrões, que supervisiona todos os padrões da ASHRAE, trabalhará em conjunto com os presidentes da Norma 90.4 e Padrão ANSI/ASHRAE/IES 90.1, Padrão Energético para Edifícios, exceto edifícios residenciais de baixo crescimento, para remover os DC da Norma 90.1. A Norma 90.4 já refere os utilizadores da Norma 90.1 para os requisitos de iluminação, aquecimento de água de serviço e a envolvente dos edifícios [59].

Outros requisitos da Norma 90.4 incluem:

- Uma lista de verificação de conformidade de amostra;
- Diagramas para ilustrar a conformidade;
- Cálculos da amostra.

Observou que a entrada da indústria é vital à medida que a norma avança. A norma agora está sob um processo de manutenção contínua que permite que mudanças sejam feitas de forma contínua através do mecanismo de adendas. Este processo permitirá mudanças frequentes na norma, conforme necessário, para acompanhar as rápidas mudanças tecnológicas na indústria [59].



## **3. Metodologia de criação de índices**

### **3.1. Introdução**

Recursos energéticos são as reservas ou fluxos de energia disponíveis na natureza e que podem ser usados para atender às necessidades humanas, podendo ser classificadas essencialmente como recursos fósseis ou como recursos renováveis. O recurso fóssil corresponde aos estoques de materiais que armazenam energia química, acumulada a partir da radiação solar em épocas geológicas, como é o caso do petróleo, carvão mineral, turfa, gás natural, xisto betuminoso. As reservas de energia fóssil são necessariamente finitas e reduzem-se à medida que são consumidas. Os recursos energéticos renováveis são dados por fluxos naturais, como ocorre na energia solar, nas suas distintas formas, como na energia hidráulica, na energia eólica, na energia das ondas do mar e na energia da biomassa, bem como nos fluxos energéticos dependentes do movimento planetário, por exemplo, a energia talassomotriz, associada à variação do nível do mar nas marés e à energia geotérmica, que na escala das realizações humanas não deve esgotar-se. A utilização inadequada de alguns potenciais energéticos renováveis pode determinar a sua exaustão, como acontece em reservatórios geotérmicos sobre explorados ou nos recursos de biomassa, quando explorados além de sua taxa natural de reposição. Assim, se uma reserva florestal for explorada acima de sua taxa típica de renovação sustentável, esse recurso energético perderá seu caráter de renovabilidade [62].

Pode-se avaliar melhor a importância da energia na sociedade e evidenciar a crescente procura de energia indireta, associada a produtos com elevado consumo em sua produção, aplicando alguns fundamentos da eficiência energética para DC, como [63]:

- Pré diagnóstico energético: Definir o potencial de eficiência energética de uma infraestrutura DC;
- Diagnóstico energético: Estudo detalhado das oportunidades de eficiência energética com definição de um projeto a ser implementado.

Os DC assumem uma importância cada vez maior nas operações de negócios. Com o crescimento cada vez maior da procura por processamento para atender as aplicações pessoais (redes sociais, aplicativos móveis, jogo online, etc.) e de negócios (transações

comerciais entre empresas, B2B, logística, ERP, etc.), os custos com energia e as emissões de gases com efeito de estufa estão a aumentar na mesma proporção. Apesar dos DC utilizarem equipamentos e práticas de processos semelhantes, os indicadores não são consistentes globalmente [64].

Segundo a ASHRAE TC 9.9 [31] acredita-se que métricas e índices podem ajudar os proprietários assim como os operadores de DC, num entendimento e melhoria da eficiência energética dos DC atuais e tomarem melhores decisões para implantação de futuros DC.

A medida de eficiência mais utilizada atualmente para definir a localização para instalação de um DC é o PUE. Com isso, verificou-se a necessidade de ter um índice que se aplica no momento do desenvolvimento no projeto, aplicado antes da construção. Analisando o uso e consumo de energia, identificando áreas com uso significativo de energia e identificando oportunidades de melhoria, um índice como o EUED (*Energy Usage Effectiveness Design*) facilitará a visão no projeto. O EUED irá mensurar de forma precisa os impactos que a temperatura e humidade geram na medida da eficiência de um DC [31]. A partir da criação do índice EUED, foi redefinido e encontrado um novo índice, o Perfect Design Data center (PDD), que mensura a eficiência de DC em ordem crescente. Advém do cálculo inverso do EUED que determina o COP. Para facilitar a sua classificação, é elaborada uma tabela de valores para indicar se a localização é adequada, muito adequada ou excelente, para a instalação de um DC. Por último foi desenvolvido um índice para construções com certificação, em relação à quantidade de água consumida durante a vida de utilização dos equipamentos. Estes índices são apresentados de forma detalhada de seguida.

### **3.2. Estudos Preliminares**

A componente de análise dos sistemas de climatização e energéticos dos DC será realizada por via experimental e numérica. A etapa experimental reside na medição das grandezas físicas relevantes ao estudo, fundamentalmente no que toca ao desempenho térmico e eficiência energética de DC. A etapa numérica servirá para analisar as relações entre dados externos e os parâmetros de desempenho como o COP (*Coefficient of Performance*) e o PUE.

Como ênfase do PUE é na potência elétrica em fase de projeto, para um cálculo básico de PUE, a métrica desenvolve-se como a Equação 19.

Em que a Energia Total integra a energia consumida por: Equipamentos de dados; Ar condicionados; Iluminação; Perdas de nobreaks; Perdas dos inversores; e Outros. O sistema de refrigeração tem uma potência elétrica baseada no COP.

Para efeito de simulação de PUE entre várias localizações, foram consideradas 37 localidades distribuídas pelo Brasil, tendo por base um DC de alta densidade usando como modelo um DC projetado pela ETP - projeto instalado em Andaraí (bairro) na cidade do Rio de Janeiro. As cidades, localizadas em diferentes estados do Brasil, selecionados de acordo com disponibilidade de dados na NBR 16401 e ASHRAE Weather Data Viewer para determinar e comparar os valores do PUE, são:

- Rio Branco - Acre;
- Manaus - Amazonas;
- Macapá - Amapá;
- Belém - Pará;
- Santarém - Pará;
- Porto velho - Rondônia;
- Boa vista - Roraima;
- Maceió - Alagoas;
- Caravelas - Bahia;
- Salvador - Bahia;
- Fortaleza - Ceará;
- São Luis - Maranhão;
- Fernando de Noronha - Pernambuco;
- Recife - Pernambuco;
- Teresina - Piauí;
- Natal - Rio grande do Norte;
- Aracaju - Sergipe;
- Brasília - Distrito Federal;
- Anápolis - Goiás;
- Goiânia - Goiás;
- Campo Grande - Mato Grosso do Sul;

- Cuiabá - Mato grosso;
- Vitória - Espírito Santo;
- Belo Horizonte - Minas Gerais;
- Uberaba - Minas Gerais;
- Rio de Janeiro - Rio de Janeiro;
- Campinas - São Paulo;
- São Paulo - São Paulo;
- Guarulhos - São Paulo;
- Curitiba - Paraná;
- Foz do Iguaçu - Paraná;
- Londrina - Paraná;
- Porto Alegre - Rio Grande do Sul;
- Florianópolis - Santa Catarina.

Como resultante dos dados fornecidos pelas normas ABNT NBR 15220-3: 2005, Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social e ABNT NBR 15575:2013, Edificações Habitacionais – Desempenho. Como representado na Figura 15, o país foi dividido conforme as médias mensais das variações de temperaturas máximas e mínimas, juntamente com a humidade relativas do ar. São 37 localidades nas seguintes cidades apresentadas neste projeto, e cada cidade é enquadrada a uma classificação de zona bioclimática (Figura 6 e 7) [65-66]:



Figura 6 – Mapa climático do Brasil: Classificação Köppen [68].

Legenda:

**Quente (Temperatura média > 18°C em todos os meses do ano):**

- Superhúmido sem seca/subseca.
- Húmido com 1 a 3 meses secos.
- Semi-húmido com 4 a 5 meses secos.
- Semi-árido com 6 a 8 meses secos.
- Semi-árido com 9 a 11 meses secos.

**Subquente (Temperatura média entre 15°C e 18°C em pelo menos um mês):**

- Superhúmido sem seca/subseca.
- Húmido com 1 a 3 meses secos.
- Semi-húmido com 4 a 5 meses secos.

**Mesotérmico Brando (Temperatura média entre 10°C e 15°C):**

- Superhúmido sem seca/subseca.
- Húmido com 1 a 3 meses secos.
- Semi-húmido com 4 a 5 meses secos.

**Mesotérmico mediano (Temperatura média < 10°C):**

- Húmido com 1 a 3 meses secos.

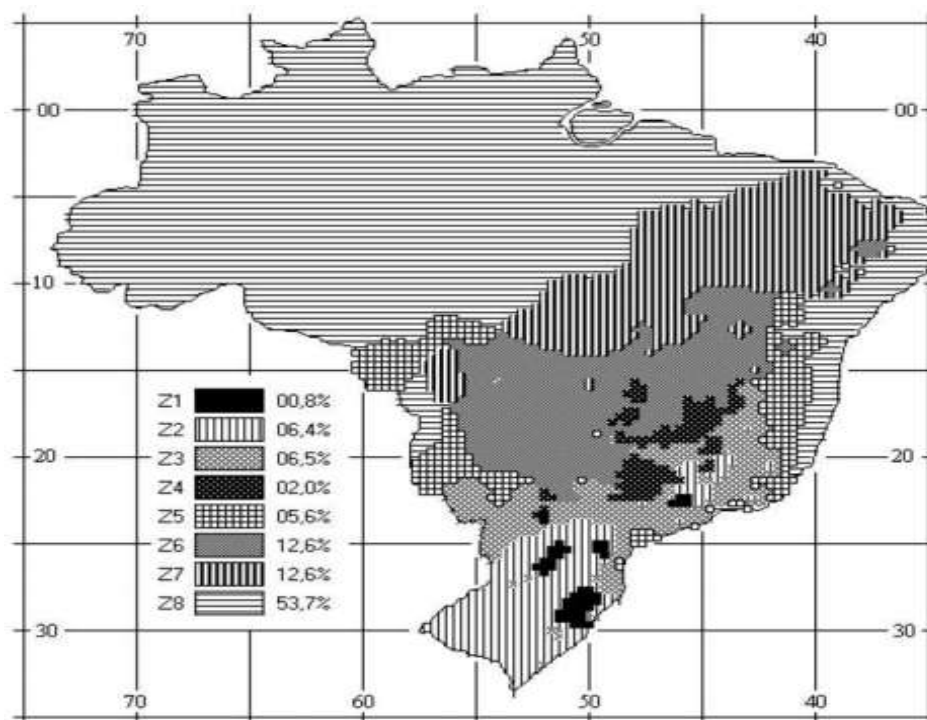


Figura 7 – Zoneamento Bioclimático brasileiro [68].

- **Zona 1:** Maringá, Curitiba, Guarapuava, Castro (Paraná); Palmas, São Joaquim, Lajes (Santa Catarina); Campos de Jordão (São Paulo); Caxias (Rio Grande do Sul); Poços de caldas (Minas Gerais);
- **Zona 2:** Ponta Grossa, Jaguaraíva, Rio Negro (Paraná); Itajubá, São João del rei, Três Corações (Minas Gerais); Porto União, Laguna, Urussanga, Xanxerê (Santa Catarina); Alegrete, Bagé (Rio Grande do Sul);
- **Zona 3:** Porto Alegre, Rio Grande, Iraí (Rio Grande do Sul); Paranaguá, Campo Mourão, Foz do Iguaçu, Guaíra, Jacarezinho, Londrina (Paraná); Chapecó, Canburiú, Florianópolis, (Santa Catarina); Muriaé, Pompeu, Ubá, Uberaba, Viçosa, Belo Horizonte (Minas Gerais); Petrópolis, Resende, Rio de Janeiro (Rio de Janeiro); Avaré, Bariri, São Paulo, Campinas, Guarulhos (São Paulo); Presidente Murtinho, Cuiabá, Diamantino (Mato Grosso); Dourados (Mato Grosso do Sul);
- **Zona 4:** Brasília (Distrito Federal); Oliveira, Pirapora, Pitangui, Sete Lagoas (Minas Gerais); Ipameri, Luziânia (Goiás); Franca, Jaú, Limeira, Limoeiro, Ribeirão Preto, São Carlos (São Paulo);
- **Zona 5:** Santos, Iguape, Juquiá (São Paulo); Xerém, Niteroi, Macaé (Rio do Janeiro); Araçatuba (São Paulo); São Francisco do Sul (Santa Catarina); Ivinhema (Mato Grosso do Sul); Teófilo Ottoni, Pedra azul, Governador Valadares (Minas Gerais); Vitória da conquista (Bahia);Água Branca (Alogoas);

- **Zona 6:** Goiânia, Anápolis, Pirenópolis, Formosa, Catalão (Goiás); Campo Grande (Mato Grosso do Sul); Caetitê, Irecê (Bahia); Montes Claros, Coxim (minas Gerais); Triunfo (Pernanbuco); Andradina, Presidente Prudente (São Paulo);
- **Zona 7:** Teresina, Floriano (Piauí); Mossoró (Rio Grande do Norte); Cuiabá (Mato Grosso); Petrolina (Pernanbuco); São Gonçalo (Paraíba); Monte Azul (Minas Gerais); Paulo Afonso, Barreiros (Bahia); Imperatriz (Maranhão); Sobral (Ceará);
- **Zona 8:** Vitória (Espírito Santo); Rio de Janeiro (Rio de Janeiro); Rio Branco (Acre); Manaus (Amazonas); Macapá (Amapá); Belém (Pará); Santarém (Pará); Porto Velho (Rondônia); Boa Vista (Roraima); Fernando de Noronha (Pernanbuco); Salvador (Bahia); Caravelas (Bahia); Aracaju (Sergipe); Recife (Pernanbuco); Maceió (Alagoas); São Luiz (Maranhão); Natal (Rio Grande do Norte); Fortaleza (Ceará);

O sistema de oito zonas climáticas apresentado na Figura 8, desenvolvido a partir da carta bioclimática Givoni [68], permite obter as zonas de aquecimento de conforto.

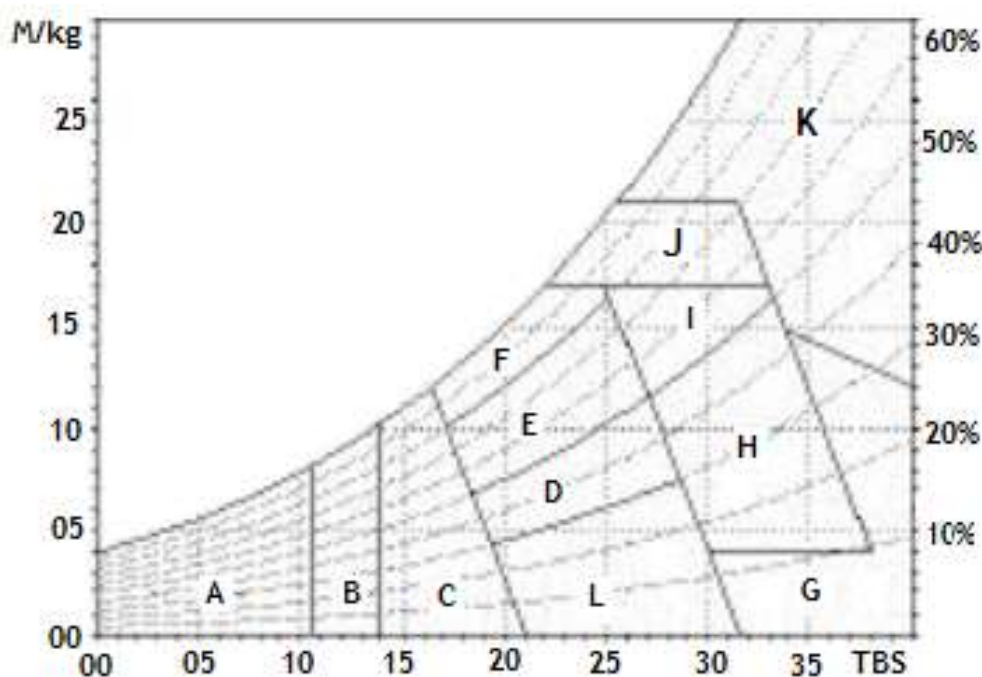


Figura 8 – Carta Bioclimática de Givoni [68].

Legenda:

- A – Zona de aquecimento artificial (aquecimento).
- B – Zona de aquecimento solar da edificação.

- C – Zona de massa térmica para aquecimento.
- D – Zona de conforto térmico (baixa umidade).
- E – Zona de conforto térmico pleno.
- F – Zona de desumidificação (renovação de ar).
- G + H – Zona de arrefecimento evaporativo.
- H + I – Zona de massa térmica de refrigeração.
- I + J – Zona de ventilação.
- K – Zona de refrigeração artificial.
- L - Zona de umidificação do ar.

Para o desenvolvimento deste estudo foram utilizados dados climáticos de 37 cidades brasileiras, para diversas frequências de ocorrências e objetivos de cálculos. Foram utilizados os critérios estabelecidos pela norma ABNT 16401-1. 2008 [67]:

- Frequência de ocorrência:
  - a) 0,4% a 99,6% - obrigatória para projetos críticos, exigindo uma probabilidade mínima de a capacidade calculada ser inferior à necessária para garantir as condições internas, opcional para sistemas comerciais ou residencial de alta exigências, neste caso usa-se 0,4%;
  - b) 1% e 99% - adequada para projetos comerciais ou residenciais;
  - c) 2% - adotar somente em situação onde se admita ultrapassar com maior frequência, as condições internas de temperatura e umidade relativa prevista no projeto.
  
- Objetivo do cálculo e dados a adotar:
  - a) Dimensionamento de sistemas de arrefecimento/humidificação (cargas térmicas sensíveis e latentes por zona e total do sistema): TBS e TBUc;
  - b) Verificação de se a carga total de arrefecimento do sistema não ultrapassa a determinada com as condições indicadas em “a”, no caso de altas taxas de ar exterior: TBU e TBSc;
  - c) Dimensionamento de sistemas de arrefecimento evaporativo e torres de arrefecimento: TBU e TBSc;

- d) Dimensionamento de sistemas de baixa umidade: TPO, w e TBS;
- e) Dimensionamento de sistemas de aquecimento e humidificação: TBS e TPO, w e TBSc;
- f) Utiliza-se a altitude.

Nas Tabela 4 e Tabela 5, apresentam-se como exemplo, os parâmetros para duas das 37 localidades utilizadas.

Tabela 4 - Formato das tabelas de dados e legenda [67].

Estado	Cidade		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s	
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc		TBS	TPO	w	TBSc	
ΔTmd	1%								99,6%					
	2%								99%					

Legenda	
Pr atm	Pressão atmosférica padrão no local (kPa)
Período	Período das observações meteorológicas (ano inicial/ano final)
Extrem. anuais	Media das temperaturas extremas anuais e desvio-padrão (s)
Mês > Q	Mês no período com a maior média das temperaturas máximas
ΔTmd	Varição média da temperatura diária no mês mais quente
Mês > F	Mês no período com a menor média das temperaturas mínimas
Frequência anual	Porcentagem do total das horas do ano em que as temperaturas de projeto indicadas serão provavelmente ultrapassadas
TBS, TBU, TPO	Temperaturas (máx. ou mín.) de projeto, de bulbo seco, bulbo úmido e ponto de orvalho
TBSc, TBUc	Temperaturas de projeto coincidentes, de bulbo seco, bulbo úmido
w	Umidade absoluta (g/kg de ar seco)

Tabela 5 - Dados das 2 localidades brasileiras como exemplo: Foz de Iguaçu e Manaus [67].

AM	Manaus		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s	
	Eduardo Gomes		3,15S	59,98W	84m	100,32	82/01		33,0	36,7	1,4	20,2	1,1	
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Set	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Fev	TBS	TPO	w	TBSc	
	1%	34,8	25,9	27,3	31,5	26,2	21,8	29,3		22,0	19,2	14,1	28,9	
ΔTmd	1%	34,0	25,9	27,0	31,3	26,0	21,6	29,2	99,6%	22,8	20,2	15,1	28,8	
	2%	33,2	25,8	26,7	30,8	25,5	21,0	28,7	99%					

PR	Foz de Iguaçu		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s	
			25,52S	54,58W	243m	98,44	85/01		29,4	37,2	0,9	0,1	1,9	
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Jan	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jul	TBS	TPO	w	TBSc	
	1%	35,1	23,6	26,1	31,6	24,6	20,1	28,7		3,4	1,1	4,2	6,3	
ΔTmd	1%	34,1	23,7	25,6	31,1	24,0	19,5	28,2	99,6%	5,8	3,1	4,9	8,0	
	2%	33,1	23,5	25,1	30,6	23,5	18,9	27,7	99%					

Para efeito de comparação entre as cidades, numa fase de projeto, mas usando características mais específicas das cidades (ainda comparando potências), é usado um DC de alta densidade de 414 m<sup>2</sup>, com 28,8 m × 14,4 m, e com uma dissipação de calor dos

equipamentos (347,3 kW de calor sensível, ou seja, 0,84 kW/m<sup>2</sup>), somados à carga térmica interna de 48 kW, iluminação (8 kW ao todo), pessoas e outros (40 kW de perdas em Nobreak e outros). Para tal, foram selecionados 8 equipamentos, 4 efetivos e de 4 reserva, de 30 TR “*dual Fluid*”, de elevado caudal, conforme desenho exposto na Figura 9 e descrição das características expressas na Tabela 6.

É importante ressaltar que este DC encontra-se envolto de ambiente climatizado com temperatura de conforto em todas as suas divisões. Este facto faz com que não haja variação de transmissão de calor pelo fator cidade vs. calor em termos de carga térmica de transmissão externa de calor.

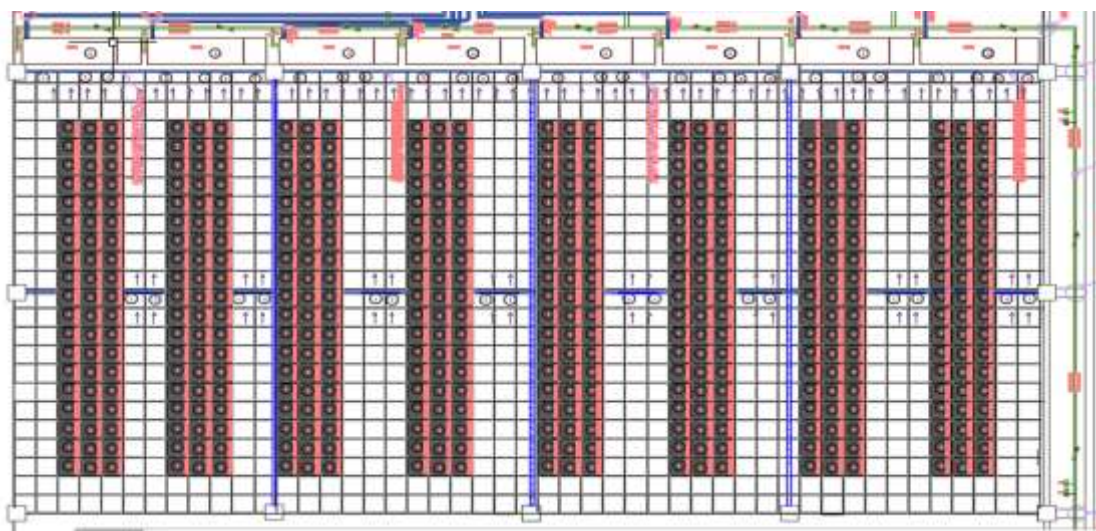


Figura 9 – Exemplo de layout de Data Center [69]

Obs.: A insuflação ocorre por placas perfuradas no piso, nos corredores frios, e o retorno é do tipo plenum.

O equipamento *dual fluid* possui as características expostas na Tabela 6:

Tabela 6 – Características técnicas do equipamento marca Liebert, modelo L99 Dual Fluid [70].

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
Capacidade de refrigeração total	kW	104,6
EER		3,4
Número de compressores	Nº	2
Caudal de ar	m <sup>3</sup> /h	21100
Nível de pressão sonora	dB(A)	66,9
Largura	mm	2550
Profundidade	mm	890
Peso líquido	kg	1000
Potência motor ventilador Cond.	kW	2,2
Potência do exaustor da exaustão	kW	0,55
Potência dos compressores	kW	23,4
Potência motor ventilador EVap.	kW	4,6

Ou seja, para a potência de refrigeração aproximada de 30 TR (104,6 kW, para cada um dos oito equipamentos, sendo 4 efetivos e 4 de reservas), possui a EER (*Energy Efficiency rate*) nominal de 3,4 kW/kW (na condição de expansão direta, tendo em vista um consumo nominal total do equipamento de 30,86 kW, para a condição de admissão de ar no condensador de 35 °C). Ou seja, o consumo nominal do ar condicionado para atender a carga térmica supracitada será de 123,44 kW, portanto, o PUE será determinado a partir da Equação 19.

$$PUE = \frac{(347,3+123,44+8+40)}{(347,3)} = 1,50 \text{ kW/kW}$$

Este valor de PUE = 1,50 kW/kW é um valor excelente, visto que um DC típico conforme já citado anteriormente apresenta um PUE a rondar 2,1 kW/kW o consumo de energia elétrica de um DC padrão.

O rendimento dos equipamentos de ar condicionado baseou-se numa temperatura de entrada do ar no condensador de 35 °C (norma AHRI 1361). Para estabelecer uma comparação entre as cidades, foi feita uma simulação usando por base o software CoolPack para determinar a eficiência isentrópica do compressor. Para tal foram descontadas as potências dos ventiladores do evaporador e condensador. Ou seja, da condição do catálogo para um EER de 3,4 kW/kW que conta com os ventiladores do condensador e evaporador, desconta-se a potência dos ventiladores (7,36 kW), pelo que o valor do COP<sub>compressor</sub> = 104,6 kW/23,5 kW, ficará em 4,5 kW/kW (específico do compressor).

Para simular qual o valor do COP nas diferentes localidades da fração horária anual em que se necessita de equipamento com ciclo de compressão, serão utilizados os seguintes parâmetros/dados:

- Capacidade Frigorífica (*Cooling capacity*) = 104,5 kW;
- Temperatura de Evaporação ( $T_e$ ) = 5°C (É importante ressaltar que a temperatura de evaporação mais alta atende a New ASHRAE CLASS que permite internamente temperaturas de bolbo seco entre 18°C a 27°C), e humidade relativa abaixo de 60%;
- Temperatura de Condensação ( $T_c$ ) = 46°C (segundo o fabricante Liebert foi aconselhado um diferencial (*approach*) de 11°C da temperatura de admissão de ar no condensador. Como neste caso foi considerado uma temperatura de admissão de ar de 35°C, foram somados 11°C para considerar  $T_c = 46°C$ );
- Eficiência Isentrópica = 0,91;
- Temperatura de Sobreaquecimento ( $\Delta T_{sh(k)}$ ) = 8 °C;
- Temperatura de Subarrefecimento ( $\Delta T_{sc(k)}$ ) = 3 °C;
- Fluido Refrigerante (*Refrigerant*) = HFC 410 A;
- Temperatura de Sobreaquecimento inútil (*unusefull superheat*) = 0,5 K.

Estes dados foram inseridos na Figura 13. A Equação 33 utilizada para determinar o PUE destas localidades vem:

PUE (genérico) = Energia Total (equipamentos de dados + ar condicionado + Iluminação + perdas de nobreak e inversores e outros)/(Energia Equipamentos de dados);

PUE Específico cada cidade = (347,3 kW (equipamentos dados) + 48 kW (iluminação, perdas nobreaks e outros) + (7,36 kW ventiladores x 4 conjuntos) + ( razão do COP simulado na cidade/COP nominal com admissão do ar a 35°C) x (94 kW consumo nominal do compressor na condição de COP de 35 °C))/(347,3 kW (Equipamentos de dados)).

Dados de Entrada:

Potência Frigorífica (kW) (Cooling Capacity) = 104,5 kW.

Na Tabela 7 são apresentados os cálculos do COP, segundo a AHRI, a temperatura padrão em teste de equipamentos de admissão do ar no condensador é de 35°C [59-60].

Tabela 7 - Cálculos do COP com admissão de ar padrão 35°C [63].

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Temperatura de evaporação, $T_e$	5°C
Temperatura de condensação, $T_c$	46°C
Sobreaquecimento	8°C
Subarrefecimento	3°C
Fluido refrigerante	HFC 410 A
Capacidade Frigorífica	104,5 kW
Eficiência Isentrópica	0,91
COP	4,511 kW/kW

Tabela 8 - Cálculo do COP PUE sem ventilador da cidade de Manaus (Eduardo Gomes), com admissão do ar 34,8°C [63].

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Temperatura de evaporação, $T_e$	5°C
Temperatura de condensação, $T_c$	45,8°C
Superaquecimento	8°C
subarrefecimento	3°C
Fluido refrigerante	HFC 410 A
Capacidade Frigorífica	104,5 kW
Eficiência Isentrópica	0,91
COP	4,542 kW/kW

O resultado do COP exposto na Tabela 8 é superior ao exposto na Tabela 7, pelo facto da menor temperatura de admissão do ar no condensador, que reflete uma menor relação de compressão na cidade de Manaus, do que na característica padrão da AHRI que é de 35°C na admissão do condensador.

Replicando o uso do COOLPACK em todas as cidades descritas, com o uso da NBR 16401-2008 para admissão do ar no condensador, foram obtidos os seguintes resultados descritos na Tabela 9 [63].

Tabela 9 - Valores de COP e seu PUE COA para as 37 localidades em estudo.

<b>CIDADES</b>	<b>TE [°C]</b>	<b>TC [°C]</b>	<b>Capacidade [kW]</b>	<b>Gás</b>	<b>COP PUE [kW/kW]</b>	<b>PUE COA [kW/kW]</b>	<b>COP PUE VENTILADOR [kW/kW]</b>
Rio Janeiro (Galeão)	5	49,1	104,5	410A	4,069	1,519	3,122
Cuiabá	5	49,0	104,5	410A	4,082	1,518	3,130
Teresina	5	48,9	104,5	410A	4,096	1,517	3,138
Boa Vista	5	47,2	104,5	410A	4,333	1,501	3,275
Manaus (P. Pelada)	5	47,0	104,5	410A	4,362	1,499	3,292
Campo Grande	5	46,8	104,5	410A	4,392	1,497	3,309
Porto velho	5	46,5	104,5	410A	4,436	1,494	3,334
Rio Branco	5	46,4	104,5	410A	4,451	1,494	3,342
Foz do Iguaçu	5	46,1	104,5	410A	4,496	1,491	3,368
Goiânia	5	46,0	104,5	410A	4,511	1,490	3,376
Manaus (Ed. Gomes)	5	45,8	104,5	410A	4,542	1,488	3,393
Porto Alegre	5	45,8	104,5	410A	4,542	1,488	3,393
São Luis	5	45,1	104,5	410A	4,651	1,482	3,454
Recife	5	45,1	104,5	410A	4,651	1,482	3,454
Macapá	5	45,0	104,5	410A	4,667	1,481	3,463
Santarém	5	45,0	104,5	410A	4,667	1,481	3,463
Vitória	5	45,0	104,5	410A	4,667	1,481	3,463
Rio janeiro (S. Dumont)	5	45,0	104,5	410A	4,667	1,481	3,463
Londrina	5	44,9	104,5	410A	4,683	1,480	3,471
Uberaba	5	44,6	104,5	410A	4,731	1,478	3,498
Belém	5	44,1	104,5	410A	4,812	1,473	3,542
Campinas	5	44,1	104,5	410A	4,812	1,473	3,542
B. Horizonte Pampulha	5	44,0	104,5	410A	4,829	1,472	3,551
Salvador	5	43,7	104,5	410A	4,879	1,470	3,578
Maceió	5	43,6	104,5	410A	4,896	1,469	3,587
Fortaleza	5	43,2	104,5	410A	4,964	1,466	3,623
Natal	5	43,2	104,5	410A	4,964	1,466	3,623
Florianópolis	5	43,2	104,5	410A	4,964	1,466	3,623
Aracajú	5	43,1	104,5	410A	4,982	1,465	3,633
Brasília	5	43,1	104,5	410A	4,982	1,465	3,633
B. Horizonte (T. Neves)	5	43,1	104,5	410A	4,982	1,465	3,633
São Paulo (Congonhas)	5	43,0	104,5	410A	4,999	1,464	3,642
São Paulo (Guarulhos)	5	43,0	104,5	410A	4,999	1,464	3,642
Caravelas	5	42,8	104,5	410A	5,034	1,462	3,661
Anápolis	5	42,7	104,5	410A	5,051	1,461	3,670
F. de Noronha	5	42,1	104,5	410A	5,159	1,456	3,726
Curitiba	5	41,9	104,5	410A	5,195	1,455	3,745

O valor mais elevado de PUE COA, foi obtido no Rio de Janeiro-RJ Galeão (PUE COA = 1,519) e o valor mais baixo foi determinado em Curitiba-PR (PUE COA = 1,455 kW/kW), conforme indicado na Tabela 9.

Usando a mesma tecnologia de refrigeração, a variação entre a cidade de maior e menor PUE COA foi de apenas 4%.

O COP PUE ventilador é o  $Q_{\text{refrigerico}}$  (kW), dividido pela potência do compressor com características de condensação das cidades, acrescido da potência do ventilador do condensador e do evaporador. Como se pode verificar, a diferença do COP EUED com os ventiladores inclusos foi apenas 16,5%, sendo a cidade de Curitiba a que apresenta o melhor resultado e a cidade do Rio de Janeiro o pior resultado.

### **3.3. Índice Eficiência no Consumo de Energia na fase de Projeto (*Energy Usage Effectiveness Design* – EUED)**

#### **3.3.1. Introdução**

A criação de ábacos de índices de desempenho térmico e eficiência energética, trata-se da determinação sistematizada a partir da relação de parâmetros psicrométricos como a temperatura de bolbo seco, a temperatura de bolbo húmido, a temperatura geotérmica e comportamento do ar face a essas variáveis), e do comportamento de índice de eficiência energética em cada condição. Para tal será criado um novo índice de eficiência energética, denominado Eficiência no Consumo de Energia na fase de Projeto (*Energy Usage Effectiveness Design* – EUED), que pretende associar o conceito de psicrometria à tomada de decisão relativa à localização de infraestruturas com consumos elevados de energia, em particular de DC.

Os elementos basilares na criação desses ábacos são o diagrama psicrométrico, o conceito de temperatura efetiva e o diagrama de entalpia de fluido refrigerante, além de dados de temperatura geotérmica disponível.

Inicialmente, e no âmbito deste trabalho, os ábacos são específicos para DC, onde o caudal de insuflação é mais alto, devido ao elevado fator de calor sensível, acima de 90%, diferente dos ambientes de conforto térmico onde o caudal e temperatura de insuflação é mais baixo, conforme Tabela 10 [55]. Nesta tabela é apresentada a relação entre o fator de calor sensível (FCS) e temperaturas do ar (TPO: Temperatura de Ponto de Orvalho [°C]; TBH: Temperatura de Bolbo Húmido [°C]; TEAG: Temperatura de Entrada de Água Gelada [°C]) em ambientes de conforto térmico.

Tabela 10 - Relação entre temperaturas do ar e fator de calor sensível em ambientes de conforto térmico.

<b>FCS (3 filas)</b>	<b>TPO (serpentina) [°C]</b>	<b>TBH (saída) [°C]</b>	<b>TEAG [°C]</b>
64 %	9,3	12,4	6,4
72%	12,2	14,4	10
95%	15	16,5	13,5

A atual orientação da ASHRAE [31] vai no sentido de aumentar a temperatura de bolbo seco interna em DC (ver Tabela 10 e priorizar um elevado fator de calor sensível, facto este que facilita o desenvolvimento de um novo índice baseado em 4 elementos naturais. A temperatura de bolbo seco do ar para a classe mais elevada (Classe A1) está definida como aceitável entre 15°C a 32°C e recomendada de 18°C a 27°C. Isto é, segundo a ASHRAE, uma temperatura de bolbo seco de 25°C seria um valor que daria ainda uma margem de 2°C abaixo do limite máximo do recomendável (ver Figura 10 e diagrama psicrométrico na Figura 10). Em entrevista com o responsável da Climatização do DC do maior Banco do Brasil, o Banco do Brasil no Rio de Janeiro, a temperatura interna de 25°C seria uma temperatura de boa margem para trabalhar dentro do DC [31].

Especificações Ambientais do Equipamento								
Classes (a)	Operações de Produtos (b)(c)					Produto desligado (c)(d)		
	Temperatura	Faixa Humidade	Ponto de	Máxima	Taxa máxima	Temperatura	Humidade	Ponto de
	Bolbo Seco (°C) (e)(g)	Não Condensado (h) (i)	Orvalho Maximo (°C) (j)	Elevação (m) (k)	de mudança (°C/hr) (l)	Bolbo Seco (°C) (m)	Relativa (%) (n)	Orvalho Maximo (°C) (o)
<b>Recomendado</b> (Aplica-se a todas Classes A; Os datacenters individuais podem optar por expandir o intervalo com base na análise descrita neste documento)								
A1 PARA A4	18 para 27	5,5°C PO para HR 60% HR e 15°C POP						
ADMISSÍVEL								
A1	15 para 32	20 p/80% HR	17	3050	{5/20}	5 para 45	8 para 80	27
A2	10 para 35	20 p/80% HR	21	3050	{5/20}	5 para 45	8 para 80	27
A3	5 para 40	(-12 °C PO & 8% HR) para 85% HR	24	3050	{5/20}	5 para 45	8 para 80	27
A4	5 para 45	(-12 °C) PO & 8% HR) para 90% HR	24	3050	{5/20}	5 para 45	8 para 80	27
B	5 para 35	8% HR para 80% HR	28	3050	NA	5 para 45	8 para 80	29
C	5 para 40	8% HR para 80% HR	28	3050	NA	5 para 45	8 para 80	29

Figura 100 - Diretrizes térmicas ASHRAE de temperatura, humidade, ponto de orvalho e altitude para ambientes de processamento de dados [57].

Na Figura 11 são indicadas as especificações ambientais dos equipamentos para ambientes de processamento de dados:

- Classes A1, A2, B e C na publicação de 2008 foram renomeadas para classes 1, 2, 3, e 4. Essas classes foram simplesmente renomeadas para evitar confusão com classes A1 e A4. O envelope recomendado, é idêntico ao publicado na versão 2008. Na Figura 11 encontra-se o envelope considerado no diagrama psicrométrico para cada uma destas classes.
- Os equipamentos de processamento de dados do DC devem estar ligados e ativos.
- Unidades de fitas magnéticas, precisam de um ambiente estável e mais restritivo (similar aos requisitos para a classe A1). Requisitos típicos para classe A1:
  - Temperatura mínima do ar de 15°C;
  - Temperatura máxima do ar de 32°C;
  - Humidade relativa do ar mínima de 20%;
  - Humidade relativa do ar máxima 80%;
  - Temperatura de ponto de orvalho máxima de 22°C;
  - Taxa de variação da temperatura do ar menor de 5°C por hora;
  - Taxa de variação da humidade do ar menor a 5% por hora.

- Os equipamentos e os produtos são retirados da embalagem original e instalados, mas não em uso, por exemplo, durante uma reparação, manutenção ou atualização tecnológica.
- Classes A1 e A2 – Variação máxima permitida de temperatura de bolbo seco: 1°C/300 m acima de 950 m.
- Classe A3 – Variação máxima permitida de temperatura de bolbo seco: 1°C/175 m acima de 950 m.
- Classe A4 – Variação máxima permitida de temperatura de bolbo seco: 1°C/125 m acima 950 m.
- Taxa de variação da temperatura de 5°C/h para DC empregando unidades de fitas e 20°C/h em DC empregando unidades de discos.
- Com disquetes na unidade, a temperatura mínima do ar é 10°C.
- O nível mínimo de humidade para classes A3 e A4 são superiores (maior nível vapor saturado) -12°C de ponto de orvalho e 8% de humidade relativa. Estes parâmetros cruzam-se aproximadamente em 25°C. Abaixo desta interseção (-25°C) do ponto de orvalho (-12°C), representa o nível mínimo de humidade, enquanto que acima a humidade relativa (8%) é mínima.
- Nível de humidade mais baixo do que 0,5°C da temperatura de ponto de orvalho, mas não inferior a -10°C ou 8% de humidade de relativa, podem ser aceitáveis, se medidas de controlo adequadas forem implementadas para limitar a geração de eletricidade estática com pessoal e equipamentos do DC. Todo o pessoal e mobiliário móvel/equipamentos devem ser ligados à terra através de um sistema de controlo de eletricidade estática.

Os seguintes itens são considerados os requerimentos mínimos:

- Materiais condutivos;
- Pavimentação condutiva;
- Calçado condutivo em todo pessoal que entrar no DC, incluindo visitantes;
- Todos os mobiliários/equipamento conterão materiais condutores ou dissipadores de eletricidade estática.
- Durante a manutenção em qualquer hardware eletrónico, para uma boa execução das tarefas, deve ser utilizada por qualquer pessoa que estiver manuseando o equipamento uma pulseira de segurança contra eletricidade estática, para assim prevenir a queima de equipamentos eletrónicos.

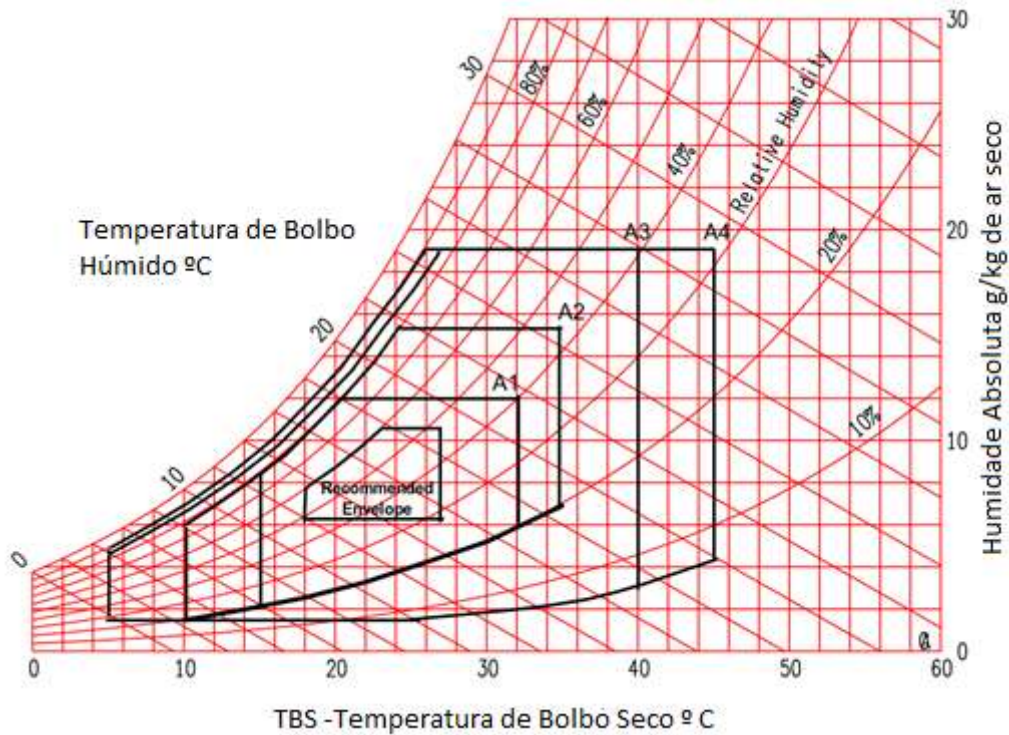


Figura 11 - Classes ambientais para DC da ASHRAE [71].

O primeiro passo para desenvolver um estudo sobre a criação de um novo índice de eficiência energética de DC, reside na determinação da temperatura padrão de insuflação de ar. Segundo a ASHRAE, a temperatura do ar interna do DC deve ser preferencialmente definida entre 18°C e 27°C, e com uma temperatura de ponto de orvalho correspondente de 5,5°C a 15°C, respetivamente. Para tal, assumindo que é aceitável neste intervalo uma temperatura do ar interna de até 25°C, foi elaborada uma simulação para caudal,  $C$ , de 1 TR (considerando que 90% corresponde a calor sensível, i.e., o Calor sensível total de 1 TR será  $3.024 \text{ kcal/h} \times 0,9 = 2.721,26 \text{ kcal/h}$ ) e com  $\Delta T = 8^\circ\text{C}$ , correspondendo à diferença entre a temperatura padrão de ar de retorno exposta na norma ASHRAE 90.1-2019 entre as classes 1 a 3 variam de 24°C a 35°C, foi utilizado um valor de 28°C que está dentro no intermédio das condições estipuladas e a temperatura de insuflação de ar (20°C) [71].

$$C = \frac{Q_{\text{sen,tot}}}{0,288 \times \Delta T} = \frac{2.721,26}{0,288 \times (28 - 20)} = 1.181,1 \text{ [m}^3\text{/h/TR]} \quad (24)$$

Uma simulação realizada com o software TROX (dados oriundos do Laboratório Trox em Neukirchen, Vluyn) com grelha de insuflação (ver Figura 12), pode-se prever a uma distância de insuflação de 8 metros, um  $\Delta T$  de insuflação na extremidade de apenas 1,2°C, ou seja, com uma insuflação de 20 °C, temperatura de insuflação para free cooling indicado na Thermal Guidelines - 3ª edição [72], é prevista uma temperatura de 21,2°C na extremidade.

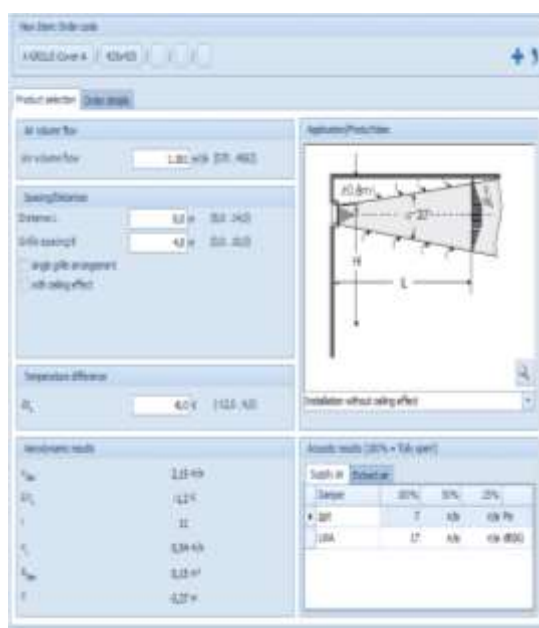


Figura 12 - Simulação da variação da temperatura ao longo do jato de insuflação [72].

Diferente do PUE, formulado em termos de potência na fase de projeto, o índice criado neste estudo, o EUED, incorpora 8.760 horas por ano (24 horas/dia × 7 dias/semana × 52 semanas/ano), sendo a sugerida pela ISO 50006, a utilização de uma métrica de energia ao invés de uma métrica de potência, como no caso dos edifícios comerciais em que a métrica de energia específica é dada em [kWh/m<sup>2</sup>] [72].

A partir da obtenção das soluções citadas na etapa anterior, as alternativas tecnológicas às quais serão dadas ênfase serão:

**Free cooling:** Alternativa na qual o ar externo é inserido internamente para climatizar o recinto e uma extração é ativada para expulsar o calor, mas sempre mantendo uma equação positiva entre a entrada e saída de ar. Um exemplo dos equipamentos e funcionamento do sistema do tipo free cooling é apresentado na Figura 13.

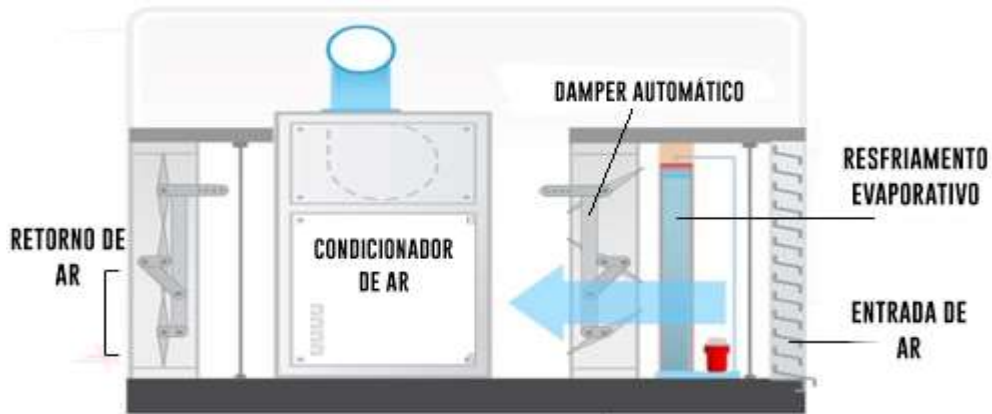


Figura 13 - Exemplo do diagrama de sistema free cooling (temperatura do ar externo abaixo de 20°C com entalpia inferior a 42,7979 [kJ/kg]).

O valor de 20°C de insuflação de ar já é um parâmetro ajustado aos equipamentos modernos de DC [71], especificamente é um parâmetro da ASHRAE de menor taxa de falha. Já o valor da entalpia estipulado é baseado na temperatura de bolbo seco com uma temperatura de ponto de orvalho de 12 °C. A sugestão da ASHRAE 90.1-2019 é considerar este valor como 11°C. Neste sentido foi usado um diferencial de 1°C com objetivos de minimizar efeitos de carga eletrostática e também de aumentar a amplitude do uso do free cooling.

**Sistema Evaporativo:** A solução do sistema evaporativo é adequada quando a temperatura de bolbo húmido é baixa, propondo-se um sistema que conduza o valor da temperatura de bolbo seco para um valor o mais próximo possível da temperatura de bolbo húmido. Um exemplo dos equipamentos e funcionamento do sistema do tipo evaporativo é apresentado na Figura 14.

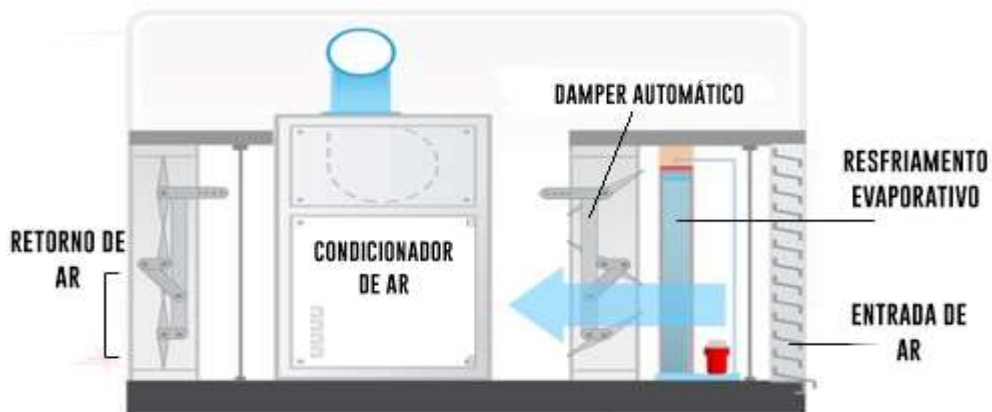


Figura 14 - Exemplo do diagrama de sistema evaporativo (temperatura do ar externo entre 15°C a 24°C e entalpia entre 42,7979 [kJ/kg] e 55,82 [kJ/kg]).

Os sistemas evaporativos que serão abordados nesta opção serão os sistemas diretos e indiretos, conforme Figura 15. Nos sistemas evaporativos diretos, a água é evaporada no fluxo de ar através de um projeto para fornecer arrefecimento adiabático. Nos sistemas evaporativos indiretos, a água evaporada é usada para arrefecer a circulação de ar, limpando quando passa por um permutador de calor (e assim mantendo constante o ar tratado e limpo). Para evitar insuflação de ar em temperaturas extremamente baixas, seja no sistema de free cooling ou evaporativo, a automação do sistema deve possuir modulação inteligente para abrir o retorno proporcionalmente em dias frios e reduzir a exaustão do ar externo insuflando de forma a manter a insuflação constante com temperatura constante.

O controlo de humidade é muito importante em DC. No contexto pandémico atual, sabe-se que a humidade extremamente baixa pode ser um acelerador de transmissão de COVID 19, além de aumentar a carga eletrostática. A sugestão de aumentar em apenas 1°C a temperatura de ponto de orvalho poderá ser benéfico para o Data Center. Ainda que os DC sejam locais com poucos recursos humanos, estão expostas a estes riscos as equipas de operação dos conteúdos do DC, usualmente a trabalhar em formato open space, e as equipas de manutenção. No âmbito da humidificação adiabática e no contexto da pandemia, fornece as melhores práticas de projeto de HVAC para minimizar o risco de infeção em ambientes internos. É usado um fluido refrigerante em vez de ar, numa abordagem evaporativa indireta para arrefecer o líquido [73].



Figura 15 - Exemplo de sistemas evaporativos [73].

Sistema Geotérmico: De acordo com o EERE [30], uma fonte geotérmica de calor é um mecanismo eficaz para obter eficiência energética, podendo ser empregue em sistemas de refrigeração de edifícios urbanos, com uma economia de energia elétrica variando entre 25% a 50%, em comparação com sistemas convencionais de ar condicionado e refrigeração. A economia de energia em sistemas de DC será provavelmente maior, visto que para uma temperatura inferior a 16°C, pode-se pensar num sistema geotérmico direto de climatização. Os sistemas geotérmicos são divididos em: Loop verticais; Loop horizontais; Loop lagoas ou Lagos e loop aberto, conforme exposto na Figura 16 [74]. Em detalhe, cada um destes sistemas considera:

- **Loop Vertical:** Este sistema ocupa menor espaço, mas, é maior em comprimento e está enterrado profundamente no chão. É usado para complexos habitacionais de vários andares, escolas e para grandes edifícios comerciais. Para o sistema vertical, os orifícios de aproximadamente de 4 polegadas de diâmetro, são perfurados a cerca de 6 m de distâncias e 100 a 400 m de profundidade. Nestes furos encontram-se dois tubos conectados na parte inferior com uma curvatura em U para formar um laço. Os loop vertical são conectados a um tubo horizontal (coletor), colocados em valas e conectados à bomba de calor do edifício. São tipicamente os sistemas mais caros.
- **Loop Horizontal:** Esta instalação é mais económica, ocupando mais espaço em largura do que o sistema vertical e mais na superfície do subsolo. O layout de instalação mais comum usa dois tubos, um enterrado a 2 m e outro a 4 m, ou dois tubos colocados lado a lado a 5 m no chão, numa vala de 2 m de largura. Deve-se garantir que haja espaço suficiente disponível para sua instalação. Na instalação suburbana, é o sistema mais viável.
- **Loop Lagoas ou Lagos:** Este sistema possui uma fonte de água próxima à sua instalação. Os canos subterrâneos vêm do prédio para a água. Os tubos têm a forma de bobinas concêntricas para que a água não congele. As bobinas devem ser colocadas apenas numa fonte de água que atenda aos critérios mínimos de volume, profundidade e qualidade.
- **Loop Aberto:** este sistema precisa de alimentação contínua de água limpa que possa ser aproveitada para absorver o calor da água abaixo da terra. Portanto, os corpos de água são usados para a troca de calor entre os fluidos. Esta opção é prática apenas quando existe um suprimento adequado de água relativamente limpa e todos os códigos e regulamentos locais relacionados à descarga de águas subterrâneas são cumpridos.

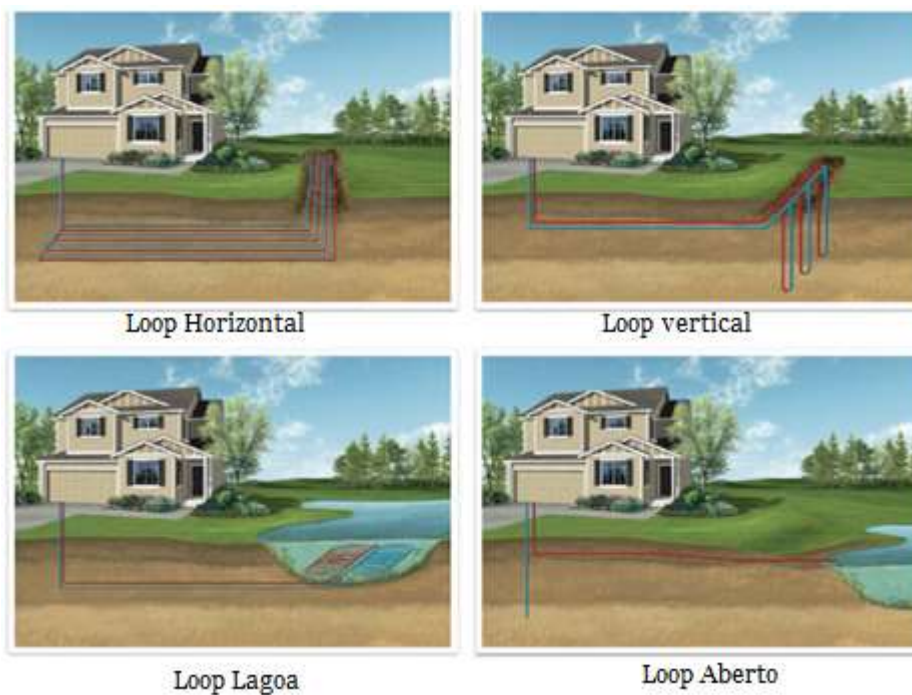


Figura 16 - Exemplo de tipos de sistemas geotérmicos [74].

Existem tabelas que permitem avaliar as possibilidades de free cooling, como por exemplo as expostas na publicação da ASHRAE, *Thermal Guidelines for Data Processing Environments* [31], inclusive com nível de falha dos equipamentos ao incluir exclusivamente free cooling, seja com ar ou com torres de arrefecimento com permutadores de calor indiretos. Segundo Ganesh [50], o free cooling é uma solução para *green DC*, o que significa na prática usar a temperatura baixa externa para arrefecer os servidores. Além disso, também já existe uma tabela de número de horas de necessidade de geração de água gelada por número de horas anuais estimadas para várias cidades. Todavia, não é incluída a possibilidade de uso de sistemas evaporativo direto e indireto com uma aproximação de temperatura mais real (é usado uma aproximação de 9 a 12°C para o sistema adiabático indireto), nem a opção de sistema evaporativo direto, e não possuem nenhuma simulação com variação do COP em qualquer uma das soluções tecnológicas (free cooling; sistema evaporativo; refrigeração arrefecida à água geotérmica e refrigeração arrefecida a ar convencional). Nas Figura 17, Figura 18 e Figura 19 são apresentadas para a necessidade de horas de chiller por ano para uma temperatura base de 20°C para as classes A2, A3 e A4 de free cooling e das previsão dos índices de falhas para sistemas com free cooling a ar e a água, respetivamente [47].

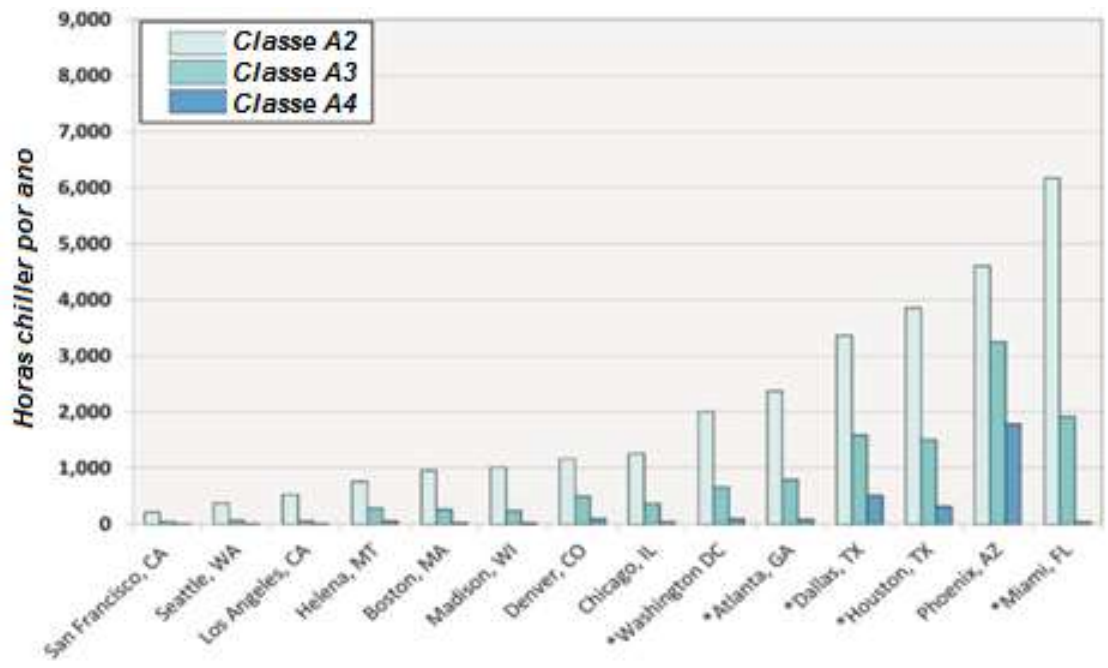


Figura 17 - Necessidade de horas de chiller por ano para uma temperatura base de 20°C para as classes A2, A3 e A4 de free cooling [75].

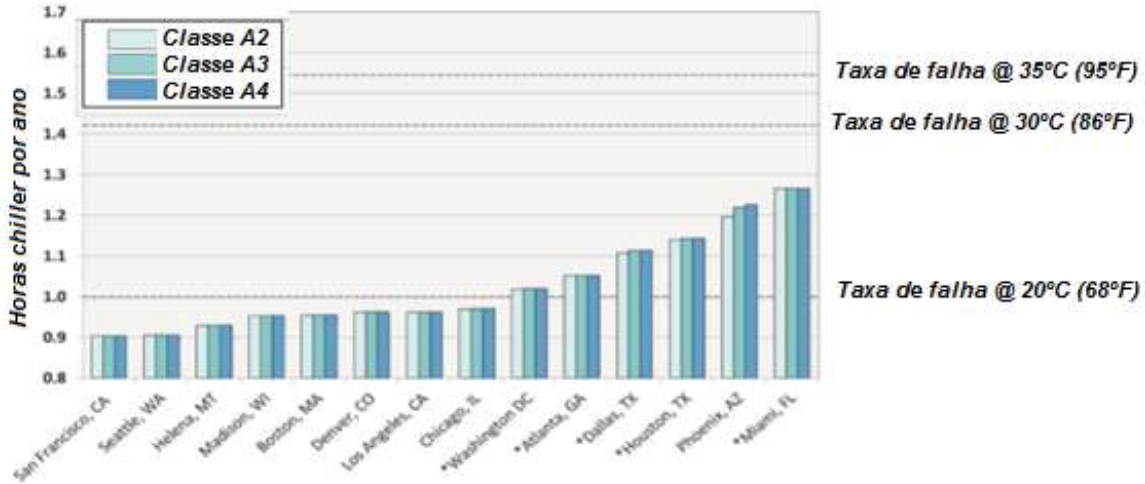


Figura 18 - Previsão do índice de falhas para sistemas com free cooling a ar [75].

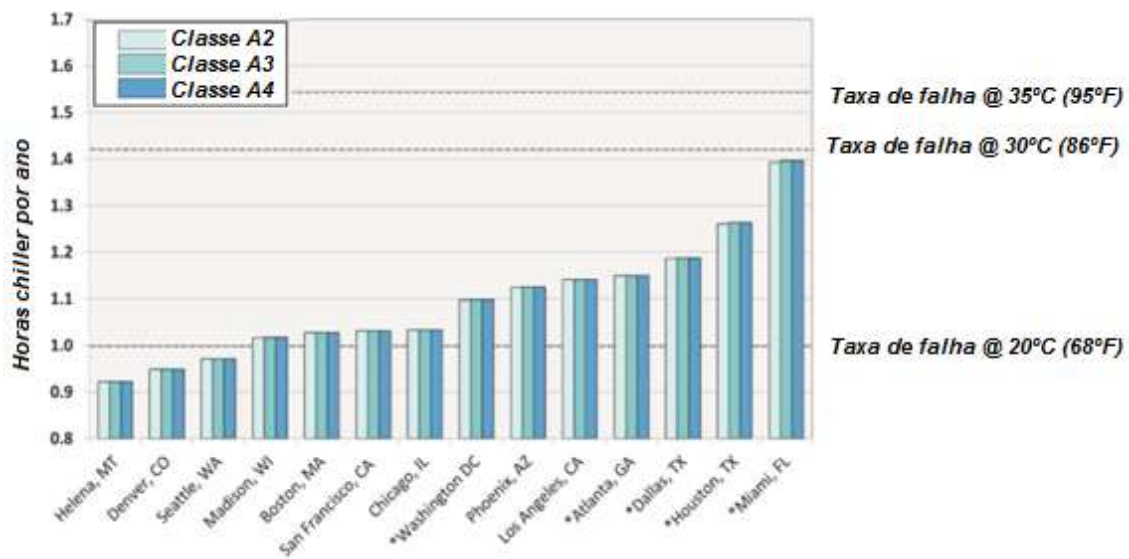


Figura 19 - Previsão do índice de falhas para sistemas com free cooling a água [75].

A métrica EUED usa os valores anuais da temperatura de bolbo seco associada com a temperatura de bolbo húmido coincidente (dados oriundos do ASHRAE *Weather Data Viewer*, mesma fonte para basear o método da ASHRAE), classificada como [22]:

- Free cooling – Sistema que permite usar as características entálpicas do ar externo para climatizar um recinto;
- Evaporativo – Arrefecimento adiabático direto ou indireto, que consiste em arrefecer o ar ambiente fazendo uso da temperatura de bolbo húmido;
- Sistema para condensação geotérmica (*ground source*) como opção de banho térmico para condensar o fluido refrigerante;
- COP – Coeficiente de performance, que é utilizado para avaliar a relação entre a capacidade de refrigeração obtida e o trabalho gasto para obtê-la.

Considerando por base uma temperatura média de insuflação de ar de 20°C (essa faixa de insuflação de ar é indicada na Thermal Guidelines [31], na metodologia EUED foram especificados com os seguintes fatores (usando uma altitude de 163 m correspondente à média entre as duas cidades do estudo para exemplo inicial, Foz do Iguaçu e Manaus). As situações consideradas são:

- Quando a temperatura do ar externo estiver abaixo de 20°C e a entalpia for inferior a 42,7979 kJ/kg, será apenas usado o free cooling;
- Quando a temperatura estiver entre 15°C a 24°C e a entalpia de 42,7979 kJ/kg a 55,8233 kJ/kg, será usado o sistema Evaporativo;
- Quando a temperatura estiver acima de 20°C e a entalpia acima de 55,8233 kJ/kg, será usado o sistema com ciclo de compressão, nas seguintes condições:
  - Temperatura de admissão de ar entre 24°C e 27°C, denominado COP1 (somado a condição de temperatura acima de 20°C e a entalpia acima de 55,8233 kJ/kg);
  - Temperatura de admissão de ar entre 27,1°C e 30°C, denominado COP2;
  - Temperatura de admissão de ar entre 30,1°C e 33°C, denominado COP3;
  - Temperatura de admissão de ar acima de 33,1°C em qualquer condição, denominado COP4;
  - Se a temperatura geotérmica estiver disponível, esta será usada para determinar o COP, com um diferencial de 4°C da temperatura geotérmica.

Para simular as condições de COP1, COP2, COP3 e COP4 foi utilizado o software CoolPack (iniciado pela condição 4 para simular um coeficiente isentrópico padrão para conseguir identificar o COP com a variação nas temperaturas de condensação). Para efeito de temperatura de condensação, foi usada como padrão a média de temperatura de admissão de ar para cada situação somada a 11°C (importante ressaltar que esse valor justifica-se com uma margem de segurança de 10% ao valor sugerido pela AHRI 210/240-2017 [76], que é de 10°C de diferencial. Foi usada essa segurança para os resultados serem mais conservadores), com as condições apresentadas na Tabela 11, assumindo o fluido refrigerante R410A. Os resultados obtidos com o software apresentam-se descritos abaixo para os casos COP4 a COP1 por ordem decrescente. Para sistemas com condensação a água geotérmica, será somado o valor de 6°C. Esse valor foi determinado via a aplicação do software de simulação da Bitzer, fabricante de condensadores a água.

Para todos os casos de estudo são considerados ventiladores com potência global de 7,36 kW. Na Tabela 11 são apresentados os valores de COP para cada um dos casos de estudo COP1 a COP4, tendo em consideração a potência dos ventiladores.

No caso de estudo COP4, o valor do COP sem os ventiladores atinge 4,829 kW/kW. Considerando os ventiladores, o COP=  $104,5 \text{ kW} / (21,64 \text{ kW dos compressores} + 7,36 \text{ kW dos ventiladores}) = 3,633 \text{ kW/kW}$ .

O COP do caso de estudo COP3 sem ventiladores é de 5,087. O valor do COP com os ventiladores é de  $(104,5 \text{ kW} / (20,54 \text{ kW dos compressores} + 7,36 \text{ kW dos ventiladores})) = 3,745 \text{ kW/kW}$ .

No caso de estudo COP2, o COP sem considerar os ventiladores é de 5,768 kW/kW. Com os ventiladores é previsto um COP de  $(104,5 \text{ kW} / (18,12 \text{ dos compressores} + 7,36 \text{ kW dos ventiladores})) = 4,101 \text{ kW/kW}$ .

No caso de estudo COP1, o COP de 6,338 kW/kW sem os ventiladores decresce para  $(=104,5 \text{ kW} / 16,49 \text{ kW dos compressores} + 7,36 \text{ dos ventiladores}) = 4,381 \text{ kW/kW}$  com ventiladores.

Sendo que, a métrica serve para qualquer fluido refrigerante, apresentam-se aqui os resultados para o fluido refrigerante R410A por ser o mais usado. As fórmulas são baseada em COP de acordo com as temperaturas de admissão do ar no condensador.

Tabela 11 - Distribuição do consumo de energia elétrica num DC típico.

<b>Casos</b>	<b>Potência do equipamento base [kW]</b>	<b>Temperatura de condensação [°C]</b>	<b>Temperatura de evaporação [°C]</b>	<b>COP [kW/kW]</b>
COP1	104,5	36,5	5	4,381
COP2	104,5	39,5	5	4,101
COP3	104,5	42,5	5	3,745
COP4	104,5	44,0	5	3,633

A partir dos COP obtidos pelo software CoolPack e dos dados base da metodologia do sistema de entalpia para DC, foi elaborado um sistema de ampla abrangência psicrométrica para todos os pontos possíveis de temperatura do ar externo, seja para free cooling, sistema evaporativo ou sistema de refrigeração com COP variável, de acordo com a Tabela 12 e exposto na Figura 20.

Obs: A eficiência do sistema free cooling é a razão da carga térmica total rejeitada (395,3 kW) pela potência dos ventiladores (descontando os ventiladores do motor do condensador, ver tabela 6) que nesse caso é de 20,61 kW (referente aos quatro equipamentos), nesse caso 19,18 kW/kW, a conta do sistema evaporativo é análoga ao free cooling com o diferencial das bombas de água ao qual foram selecionadas 04 bombas EC 1269-3 Munters de 737 W de potência cada, que somadas a potencia dos ventiladores gerou uma potência total de 23,558 kW, resultando numa eficiência de 16,78 kW/kW para o sistema adiabático. Em ambas as situações está incluído a potência dos ventiladores dos exaustores conforme Tabela 6.

Tabela 12 - Dados para gráfico psicrométrico.

<b>Sistema</b>	<b>Carga Térmica Total [kW]</b>	<b>COP [kW/kW]</b>	<b>Potência [kW]</b>
Free cooling	395,3	19,180	20,610
Evaporativo	395,3	16,780	23,558
COP 1	395,3	4,381	90,231
COP 2	395,3	4,101	96,391
COP 3	395,3	3,795	105,554
COP 4	395,3	3,633	108,808

Utilizando o software *ASHRAE Weather Data Viewer* [22], foi definido como método, a associação da frequência da ocorrência dos valores de temperatura de bolbo seco com as temperaturas de bolbo húmido coincidentes. Em cada ponto determinou-se a entalpia associada a essa relação. Na Tabela 13 são apresentadas as frequências acumuladas para cada sistema para as duas cidades tipo, Foz de Iguaçu e Manaus, localizadas nas Zona 3 e Zona 8, em termos climáticos, de acordo com a Tabela 5, respetivamente. Com o mesmo software da ASHRAE, selecionando conforme proposto o índice EUED, foram

classificadas as frequências em horas trabalhadas das duas cidades, Foz de Iguaçu e Manaus.

Tabela 13 - Frequência em horas de utilização.

<b>Sistema</b>	<b>Foz de Iguaçu [h]</b>	<b>Manaus [h]</b>
Free cooling	2.069,852	0
Evaporativo	2.851,659	4,840
COP1	2.327,090	2.685,691
COP2	842,435	4.565,469
COP3	529,063	1.127,669
COP4	139,902	376,328

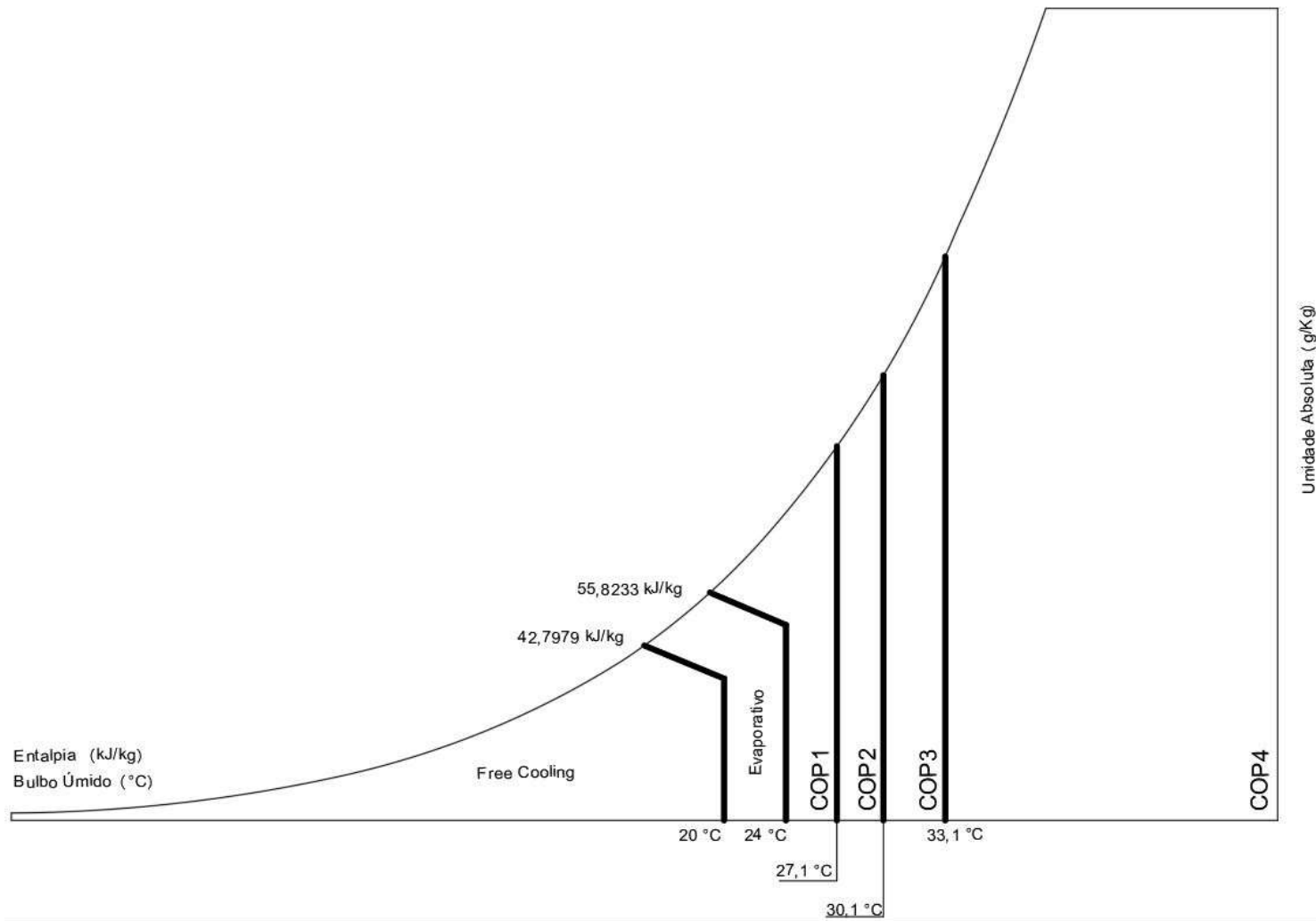


Figura 20 – Carta psicrométrica com variação dos casos de estudo

Nota-se que existem diferenças nos valores da frequência de operação dos diferentes sistemas entre as cidades, i.e., entre as localizações. Na cidade de Foz do Iguaçu, o sistema Evaporativo apresenta uma maior frequência, 2.851,659 horas, quando a temperatura se encontra entre 15°C a 24°C e a entalpia de 42,7979 kJ/kg a 55,8233 kJ/kg. A cidade de Manaus ficou apenas com 4,840 horas de frequência de utilização. Com o sistema free cooling, que entra em funcionamento quando a temperatura se encontra abaixo de 20°C e a entalpia inferior a 42,797 kJ/kg, obtiveram-se 2.069,77 horas de frequência em Foz do Iguaçu enquanto que em Manaus nem sequer foi utilizado. O principal aspeto para utilizar a cidade de Manaus e Foz de Iguaçu, consiste em que Manaus apresenta valores máximos de temperatura e humidade próximos ao longo das 8.760 h, enquanto que Foz de Iguaçu apresenta valores da temperatura do ar muito mais baixos que impactam fortemente no número de horas de free cooling e a viabilidade evaporativa.

Esta nova métrica, o EUED, coloca o fator geográfico na tomada de decisão para a localização de implementação de um DC. De acordo com a Tabela 14, constata-se que com as regras propostas no EUED, onde se classificam 6 níveis: Free cooling; Evaporativo; COP1; COP2; COP3; e COP 4, as cidades de Foz de Iguaçu no Paraná e Manaus no Amazonas tem consumos de energia de ar condicionado diferentes, conforme a temperatura e entalpia. Num período de 8.760 horas, o consumo de um DC instalado em Manaus é 8,7% superior ao consumo de um DC instalado em Foz do Iguaçu. Nesta tabela também se verifica que quanto maior o COP, menor é o consumo de energia.

Tabela 14 - Cálculos do consumo de energia utilizando as regras do índice EUED para as duas cidades tipo: Foz de Iguaçu e Manaus.

<b>Sistema</b>	<b>Energia Foz<sub>ar</sub> [kWh/ano]</b>	<b>Energia Manaus<sub>ar</sub> [kWh/ano]</b>	<b>Equipamento [kWh/ano]</b>	<b>Iluminação [kWh/ano]</b>	<b>Outros [kWh/ano]</b>
Free cooling	42.659,684	0	3.042.348	70.080	420.480
Evaporativo	67.178,828	114,037			
COP1	222.197,714	242.331,355			
COP2	86.050,239	440.070,743			
COP3	59.414,320	119.030,154			
COP4	16.265,627	40.947,633			
<b>Total</b>	<b>493.776,940</b>	<b>842.493,922</b>			

Os consumos de energia com a infraestrutura, dados pelo somatório do consumo de energia com equipamentos de ar condicionado, equipamentos de TI, iluminação e outros, entre as duas cidades apresentam a diferença já citada (8,7% superior em Manaus em relação a Foz do Iguaçu). Os índices EUED expostos na Tabela 15, foram respetivamente, de 1,316 [(kWh/ano)/(kWh/ano)] para Foz do Iguaçu e 1,438 [(kWh/ano)/(kWh/ano)] para Manaus (Eduardo Gomes), dando uma diferença de 13,30% para Foz do Iguaçu e de 3,48% para Manaus em relação ao PUE desta mesmas cidades exposto na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados finais dos cálculos utilizando as regras do índice EUED.

Parâmetro	Foz do Iguaçu	Manaus
Energia consumida infraestrutura do DC [kWh/ano]	4.026.684,940	4.375.401,922
EUED [(kWh/ano)/(kWh/ano)]	1,316	1,438
Diferença EUED - PUE COA por ano (%)	13,30%	3,48%

### 3.3.2. Nota conclusiva

O índice EUED proposto é um índice mais confiável que o índice PUE para analisar a eficiência energética em novos DC, pelo facto de usar energia em vez de potência para comparação entre sistemas.

Entre as cidades seleccionadas, Manaus e Foz de Iguaçu, prevê-se uma diferença no consumo de energia na infraestrutura do DC de 8,66% superior em Foz de Iguaçu. Os valores da EUED são, respetivamente, 1,316 [(kWh/ano)/(kWh/ano)] para Foz de Iguaçu e 1,438 [(kWh/ano)/(kWh/ano)] para Manaus, fornecendo uma diferença em relação ao PUE COA de 13,30% na Foz de Iguaçu e de 3,48% para Manaus, conforme exposto na Tabela 15.

### 3.4. Índice Data Center de Design Perfeito (*Perfect Design Data center - PDD*)

#### 3.4.1. Introdução

Os EUA abrigam 38% dos DC do mundo, de acordo com a Synergy Research (Figura 21). As maiores construções novas, em percentagem, ocorreram nas regiões Europa e Ásia-Pacífico. China, Japão, Reino Unido, Alemanha and Austrália [77].

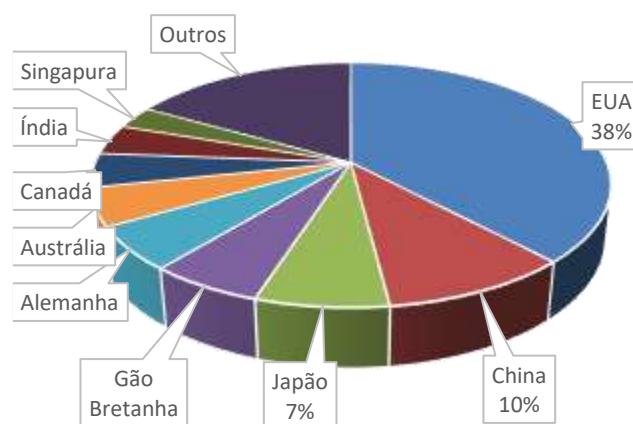


Figura 21 - Percentagem da localização DC por país [77].

Com o nível de acessos simultâneos executados a todo instante, é necessária uma grande quantidade de servidores para que os sistemas possam ter o seu funcionamento correto e os utilizadores tenham respostas às suas solicitações no tempo adequado. E isso passa também pelo crescimento dos DCs [78]. Assim, é estimado que caso não haja ações de eficiência energética, o consumo poderá chegar a 198 TWh [79], conforme exposto na Figura 22.

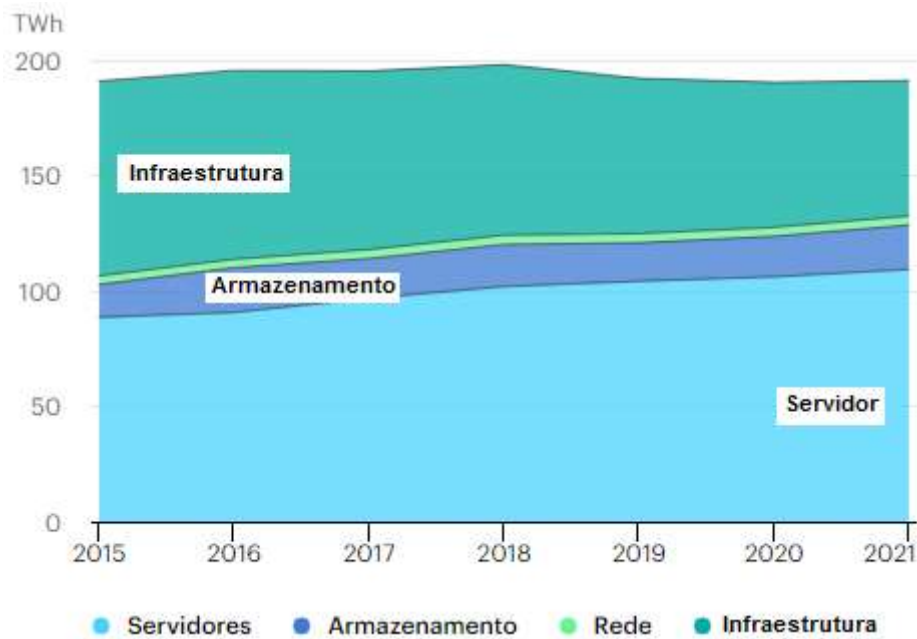


Figura 22 - Necessidade global de eletricidade em DC [79].

PUE é uma medida de quão eficientemente o DC e a infraestrutura de TI utilizam sua energia. DCiE é uma métrica de melhoria de desempenho usada para calcular a eficiência energética da estrutura de um DC. Portanto, as medições de desempenho de baixa PUE e alta DCiE ajudam muito a reduzir drasticamente os custos de energia associados à operação de um data center [80].

De origem a métrica DCE (*Data Center Efficiency*) já existia sendo o inverso do PUE, mas para evitar confusões devido as semelhanças nas siglas foi modificado para DciE (*Data center infrastructure Efficiency*). [81].

Como exposto anteriormente, usa-se o PUE para medir a eficiência energética desses grandes conglomerados de máquinas. Porém, tanto o PUE como o DCiE, em fase de projeto não contam com simulação que envolva variação de COP, free cooling, e sistema adiabático nas 8760 horas, algumas vezes é simulado horas de free cooling, mas, a vantagem do EUED é o uso do sistema adiabático e COP variável.

A métrica de COP para salas de processamento de dados de Data Centers segundo a ASHRAE 90.1 de 2019 para as eficiências de equipamentos para DC, usam uma métrica chamada Sensible Net COP ou SCOP (COP referente a calor sensível) [39]. Os valores de

COP variam de 2,7 a 1,89 kW/kW usam os métodos da AHRI 1361 de 2017, com temperatura constante de admissão do ar no condensador de 35 °C [60].

As métricas de medição de eficiência existentes em DC não possuem variação de COP no tempo, conforme verificado na citada norma da AHRI, talvez pelo facto da carga térmica constante. A questão é que mesmo com carga térmica constante, há grande variação do COP no tempo, pois para o mesmo compressor existem duas variáveis importantes para a variação de COP: a temperatura de evaporação relacionada a carga térmica do recinto (nesse caso constante), e a variação da temperatura do ar externa, que tem grande influência no COP e que não é considerada nessa métrica [60].

O EUED considera a variação no COP da temperatura de admissão do ar externo no condensador, além de mesmo método utilizar sistemas de free cooling e evaporativo.

Assim, como o EUED é mais abrangente que o PUE, da mesma forma o inverso DCiE está para o PDD (Perfect Design Data center).

O PDD (Perfect Design Data center) é um índice que prioriza a eficiência em ordem crescente e é de fácil interpretação. Trata-se é uma redefinição de EUED. Sabendo que o EUED vem pela Equação 25:

$$EUED = \frac{E_{DC} \text{ [kWh/ano]}}{E_{TI} \text{ [kWh/ano]}} \quad (25)$$

Onde:

EUED: Eficiência no Uso de Energia em projeto, [(kWh/ano)/(kWh/ano)];

$E_{TI}$ : Energia consumida anualmente pelos equipamentos específicos de processamento de dados (tecnologias de comunicação, TI), [kWh/ano];

$E_{DC}$ : Energia total consumida anualmente pelo DC, [kWh/ano].

Os índices EUED e PDD, propostos, são uns índices que trabalhem com 8.760 horas em comparação com o PUE COA, que é uma métrica que considera a potência como elemento de comparação.

### 3.4.2. Aplicação do novo índice PDD

O PDD (*Perfect Design Data center*) é um índice que prioriza a eficiência em ordem crescente e é de fácil interpretação, conforme exposto na Equação 26.

Em termos de escala, para gerar um ábaco de decisão torna-se mais simples usar o PDD, que consiste na inversão do valor do EUED, conforme Equação 26 e 27:

$$PDD = \frac{E_{TI} \text{ [kWh/ano]}}{E_{DC} \text{ [kWh/ano]}} \quad (26)$$

Onde:

PDD: Perfect Design Data center, [(kWh/ano)/(kWh/ano)];

Ou,

$$PDD = 1/EUED \quad (27)$$

## 3.5. Impacte Total da Água (*Total Water Impact – TWI*)

### 3.5.1. Introdução

Segundo o Fundo Mundial para a Natureza (WWF - *World Wide Fund for Nature*) [82], existem aproximadamente 1386 milhões de quilómetros cúbicos de água na terra. Menos de 3% dessa água é água doce e, dessa quantidade, mais de dois terços encontram-se em calotes polares e icebergs. Ainda, segundo o Ministério de Meio Ambiente Brasileiro [83], a água doce não está distribuída uniformemente pelo globo. A sua distribuição depende essencialmente dos ecossistemas que compõem o território de cada país. Segundo o Programa Hidrológico Internacional da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO - *United Nations Educational, Scientific and*

*Cultural Organization*), na América do Sul encontra-se 26% do total de água doce disponível no planeta e apenas 6% da população mundial, enquanto que o continente asiático possui 36% do total de água e abriga 60% da população mundial (ver Figura 23) [84]. O consumo diário de água varia muito em todo o mundo. Além da disponibilidade do local, o consumo médio de água está fortemente relacionado ao desenvolvimento e aos níveis económicos dos países. Cada pessoa precisa diariamente de pelo menos 40 litros de água para consumir, higiene e cozinhar. No entanto, dados da ONU [85] indicam que um europeu, que possui 8% da água doce do mundo no seu território, consome em média 150 litros de água por dia. Um indiano consome apenas 25 litros por dia. Segundo as estimativas da UNESCO para 2025, com base na taxa atual de crescimento populacional e na falha em estabelecer o consumo sustentável de água, esta situação conduzirá a um consumo humano de até 90%, deixando apenas 10% para outros seres vivos do planeta [84].

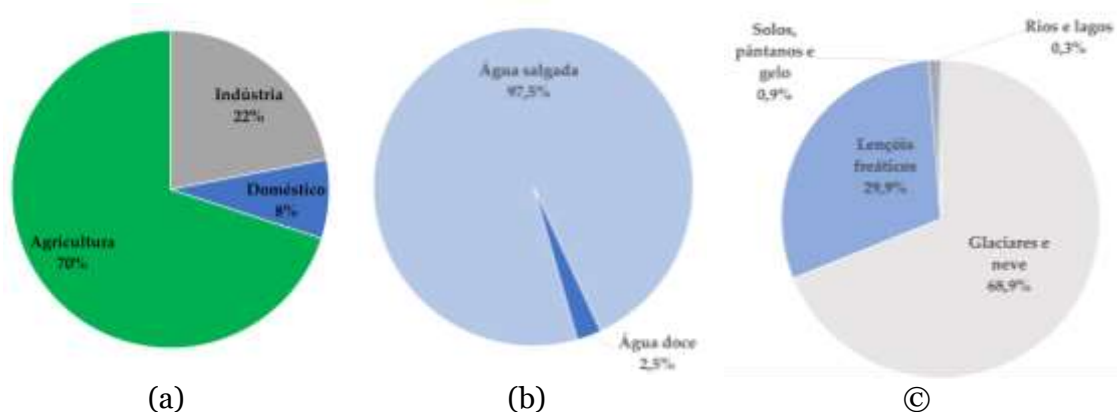


Figura 23 – Consumo mundial de água e distribuição de água. (a) Consumo de água, (b) distribuição da água global, (c) Distribuição de 2,5% de água doce global [86].

O Brasil, com uma área de aproximadamente 8.514.876 km<sup>2</sup> [86] e mais de 211 milhões de habitantes, é hoje o sexto país do mundo em população e o quinto em extensão territorial como em população. Em função das suas dimensões continentais, o Brasil apresenta grandes contrastes relacionados não somente ao clima, vegetação original e topografia, mas também à distribuição da população e ao desenvolvimento económico e social, entre outros fatores. De maneira geral, o Brasil é um país privilegiado quanto ao volume de recursos hídricos, pois abriga 13,7% da água doce do mundo. Porém, a disponibilidade desses recursos não é uniforme. Como indicado na Figura 24, mais de

73% da água doce disponível no país encontra-se na bacia Amazônica, que é habitada por menos de 5% da população.

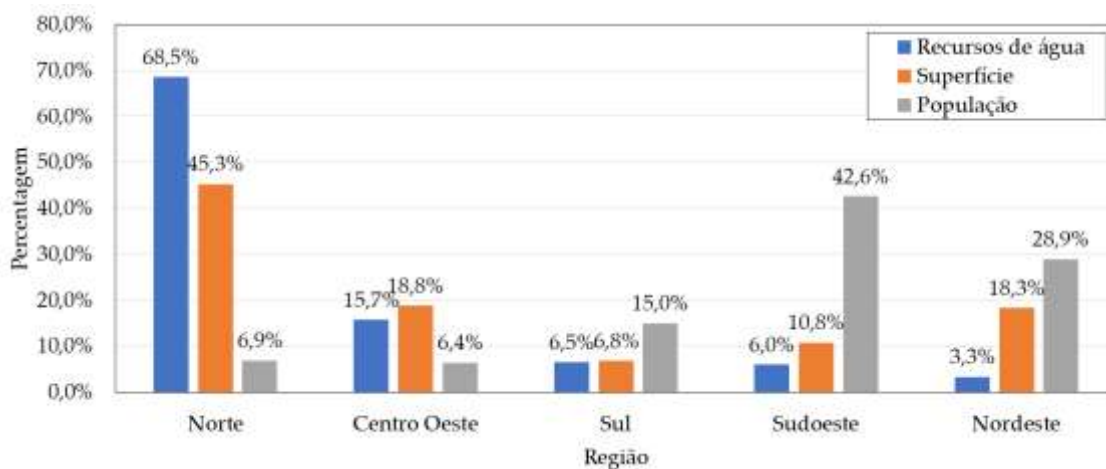


Figura 24 – Distribuição de recursos hídricos das regiões do Brasil [87].

Apenas 27% dos recursos hídricos brasileiros estão disponíveis para as demais regiões, onde residem 95% da população do país. Não só a disponibilidade de água não é uniforme, mas a oferta de água tratada reflete os contrastes no desenvolvimento dos estados brasileiros. Enquanto na região Sudeste, 87,5% dos domicílios são atendidos por rede de distribuição de água, no Nordeste a porcentagem é de apenas 58,7%.

O Brasil registra também elevado desperdício: de 20% a 60% da água tratada para consumo perde-se na distribuição, dependendo das condições de conservação das redes de abastecimento. Além dessas perdas de água no caminho entre as estações de tratamento e o consumidor, o desperdício também é significativo nas habitações, envolvendo, por exemplo, o tempo necessário para tomar banho, a própria forma como se toma banho, a utilização de descargas sanitárias que consomem muita água, a lavagem da louça com água corrente, no uso da mangueira como vassoura na limpeza de calçadas, na lavagem de carros etc. [88].

Segundo a IEA (*International Energy Agency*), existem mais de 500 milhões de ares condicionados no mundo, e existem 2,8 mil milhões de pessoas vivendo nos locais mais quentes do Mundo e apenas 8% tem ar condicionado. Os números de equipamentos de ar condicionados irão aumentar de 1,6 mil milhões em 2018 para 5,6 mil milhões em 2050. Para tal, serão vendidos 10 novos aparelhos de ar condicionados a cada segundo.

A capacidade de alimentação elétrica para ar condicionado em 2050, será o equivalente à procura elétrica dos EUA, da União Europeia e Japão nos dias de hoje. Devido à importância da eficiência energética e do uso da água nos sistemas de climatização, o índice apresentado nesta seção permite realizar um balanço destes dois preciosos recursos [81]. Segundo a Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA) [88], os sistemas AVAC encontram-se entre os principais consumidores de água doce. A capacidade de toneladas de refrigeração instalada no Brasil chegará a 60 milhões de toneladas de refrigeração até 2029. Conhecendo a importância e a relação entre os sistemas AVAC e o consumo de água, é proposto um índice para relacionar o consumo direto e indireto de água nos sistemas de ar condicionado.

### 3.5.2. Geração de energia e consumo de água no Brasil, Portugal e EUA

A água encontra-se presente em mais de 70% da biosfera. É um recurso essencial para as centrais de geração de energia. Uma pesquisa realizada nos EUA pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL - *National Renewable Energy Laboratory*) acerca do consumo de água, pretendeu definir os fatores relacionados às tecnologias de geração de eletricidade. Estes dados não foram encontrados para outros países. A matriz energética dos EUA e o consumo de água por kWh gerado por diferentes fontes de energia são apresentados na Figura 25 [89].

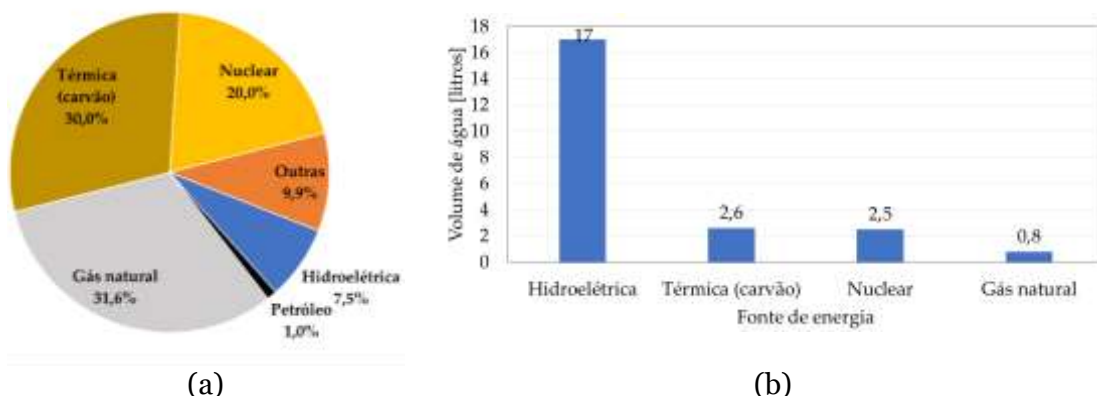


Figura 25 – Matriz energética dos EUA e água consumida para gerar 1 kWh de eletricidade. (a) Matriz energética dos EUA (ASHRAE), (b) água consumida para gerar 1 kWh de eletricidade [89].

Segundo a Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN), os sistemas de energia renovável geraram 17,2 GWh durante o primeiro semestre de 2018, o que representa 61% da produção de eletricidade em Portugal continental (28,2 GWh). Esse resultado é em grande parte impulsionada pelo aumento da disponibilidade de recursos, especialmente água e vento [90]. Nesse período de seis meses, também é de destacar um conjunto de 623 horas não consecutivas (equivalentes a 26 dias) em que apenas a eletricidade renovável foi suficiente para suprir o consumo de eletricidade em Portugal (Figura 26). No Brasil, de acordo com o balanço energético nacional de 2018 [91], a distribuição de geração de energia elétrica tem a distribuição mostrada na Figura 27. A geração de energia hidroelétrica é predominante, com uma parcela de 65,2%. No Brasil, existe um incentivo fiscal para a construção de pequenas hidroelétricas, portanto a participação total de hidroelétricas é muito grande. A parte de centrais solares e eólicas na produção de eletricidade no Brasil ainda são pequenas.

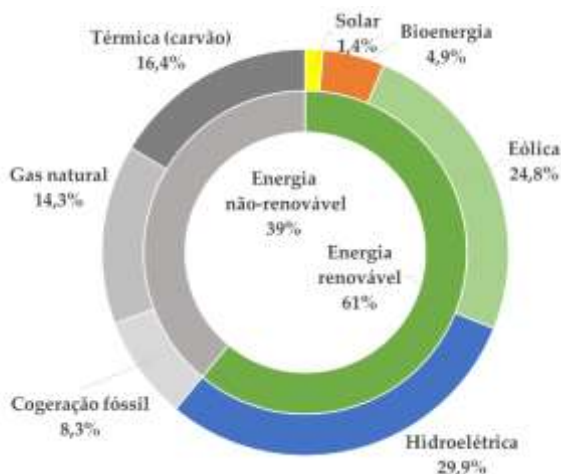


Figura 26 – Matriz energética elétrica de Portugal [90].

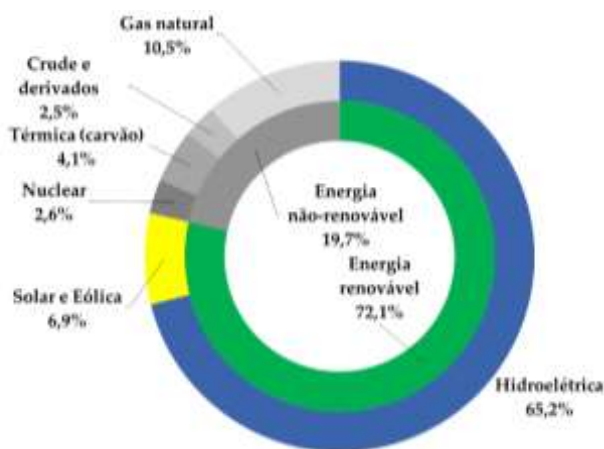


Figura 27 – Matriz energética elétrica do Brasil [91].

A Figura 28 mostra que a fonte de energia hidroelétrica apresenta um valor mais elevado no Brasil, EUA e Portugal, respetivamente. Embora o carvão, a biomassa e o petróleo tenham diferentes taxas de poluição para geração de energia por meio de termoelectricidade, o princípio da transformação de calor por energia e a necessidade de água para a geração de vapor são semelhantes, portanto, são considerados juntos.

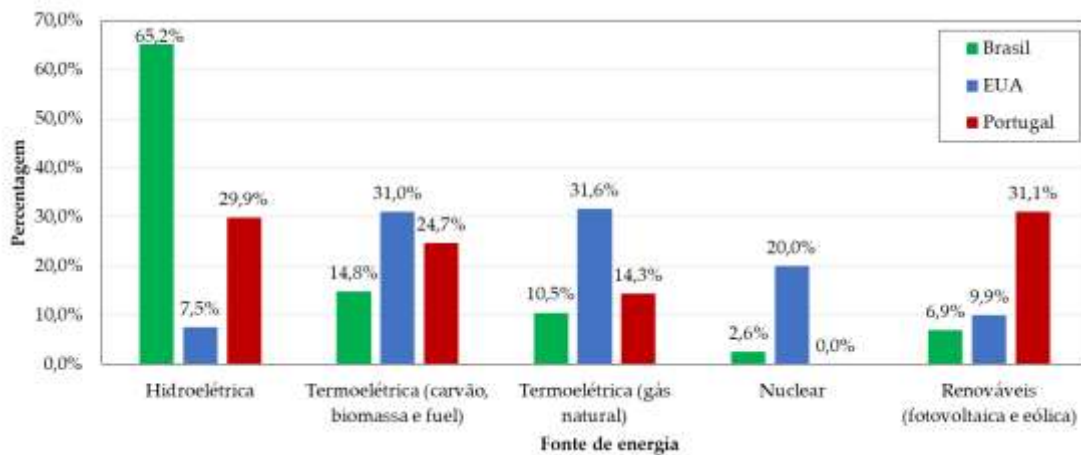


Figura 28 – Tipos de geração de eletricidade no Brasil, EUA e Portugal.

Pela ausência de estudos da quantidade de água usada por kWh gerado em fontes de energia como fotovoltaica e eólica, mesmo sabendo que é necessário de água para limpar as placas fotovoltaicas e as hélices dos sistemas eólicos, será considerado o índice nulo de litros de água por kWh para essas fontes na Equação 32.

$$LAG_{\text{país}} = (\%ghca) + (\%gtca) + (\%gtgnca) + (\%gnca) + (\%goca) \quad (32)$$

Onde:

$LAG_{\text{país}}$ : Litros de água por kWh gerado no país;

$\%ghca$ : % geração hidroelétrica - consumo de água por kWh hidroelétrica;

$\%gtca$ : % geração termoelétrica carvão e petróleo - consumo de água por kWh termoelétrica;

%gtgna: % geração termoelétrica gás natural - consumo de água por kWh termoelétrica;

%gnca: % geração nuclear - consumo de água por kWh nuclear;

%goca: % geração de outras fontes (renovável) - consumo de água por kWh outros.

Assim, a quantidade de litros de água utilizados por kWh gerado em cada país vem:

$$LAG_{\text{Brasil}} = (0,652 \times 16,2) + (0,148 \times 2,49) + (0,105 \times 0,72) + (0,026 \times 2,412) + (0,069 \times 0)$$

$$LAG_{\text{Brasil}} = 11,071 \text{ L/kWh}$$

$$LAG_{\text{EUA}} = (0,075 \times 16,200) + (0,3001 \times 2,490) + (0,316 \times 0,720) + (0,200 \times 2,412) + (0,099 \times 0)$$

$$LAG_{\text{EUA}} = 2,697 \text{ L/kWh}$$

$$LAG_{\text{Portugal}} = (0,299 \times 16,2) + (0,247 \times 2,49) + (0,143 \times 0,72) + (0 \times 2,412) + (0,311 \times 0)$$

$$LAG_{\text{Portugal}} = 5,561 \text{ L/kWh}$$

Devido ao elevado índice de hidroelétricas no Brasil, o consumo de água por kWh gerado é 410,5% superior ao valor médio dos EUA e 50,22% em relação a Portugal, conforme Figura 29.

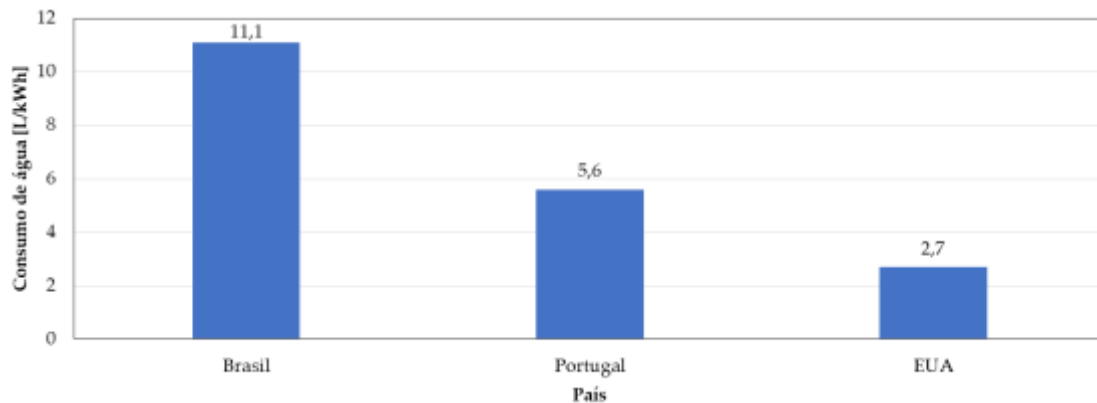


Figura 29 – Consumo de água (L/kWh<sub>gerado</sub>) de eletricidade no Brasil, EUA e Portugal.

Com o rápido desenvolvimento da economia global, o esgotamento dos recursos hídricos está a tornar-se uma questão ambiental da maior preocupação em todo o mundo. O Relatório Mundial sobre o Desenvolvimento da Água das Nações Unidas publicado pela UNESCO [92] indica que a água para usos atuais está a tornar-se escassa e está a conduzir a uma crise hídrica. Os efeitos que um setor pode ter sobre o meio ambiente não são mais visíveis do que na indústria da construção. A construção civil e suas operações baseiam-se fortemente na água do meio ambiente. O crescimento do uso urbano da água causou uma redução significativa dos lençóis freáticos e requer grandes projetos que desviam os influxos para a agricultura. A água usada para a operação de edifícios é uma componente significativa do consumo de água de todas as nações. No entanto, essa não é a única forma de água consumida durante o ciclo de vida de um edifício. A água também é consumida na extração, produção, fabricação e entrega de materiais e produtos no local e no processo real de construção no local, denominado como água “incorporada” [93]. Ilha et al. [94] observaram que as tecnologias e estratégias de conservação da água costumam ser os aspetos mais negligenciados de uma estratégia de projeto para todo o edifício. No entanto, o planeamento para vários usos da água num edifício está a tornar-se cada vez mais uma prioridade, em parte por causa do crescente reconhecimento das economias de água que podem ser alcançadas através da implementação de iniciativas de economia de água.

O LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) já enfatiza a necessidade de reduzir o uso da água e afirma que os edifícios desempenham um papel enorme nesse esforço. Os edifícios são o terceiro maior consumidor de água potável nos EUA. No entanto, a eficiência da água considera apenas 12 dos 110 pontos para as certificações LEED (LEED v 4.1). Esta certificação possui três pré-requisitos (redução do uso de água

externa, redução de uso de água interna, medição de nível no nível da construção) e créditos para redução de uso de água externa, redução de uso de água interna, torre de arrefecimento e uso de água de processo - medição de água. Assim, quase 11% da certificação LEED é sobre eficiência da água. Devido à importância da eficiência da água em grandes edifícios, o uso de sistemas de condensação a água pode parecer impraticável, mas a economia de energia nesses sistemas, associada ao menor espaço e nível de ruído, é essencial [95].

Em simulações, como a temperatura do bolbo húmido é menor que a temperatura do bolbo seco, é normal que os condensadores arrefecidos a água consumam menos energia do que os condensadores arrefecidos a ar, mas perder pontos de eficiência da água em uma certificação LEED não é um desejo do certificador de construção verde.

Portanto, o objetivo incluído nesta secção consiste no desenvolvimento de um índice que possa medir a água diretamente (evaporação no condensador arrefecido a água) e indiretamente (água necessária para a produção da energia elétrica de entrada do sistema) [95].

### **3.5.3. Índice Impacte Total da Água (TWI - *Total Water Impact*)**

O índice de impacte total da água (TWI - *Total Water Impact*) é dado pela quantidade de água necessária holisticamente para os condicionadores de ar durante a vida útil do equipamento (Figura 30). Foi desenvolvido como uma nova métrica para a construção de certificação.



Figura 30 – Nexus Energia- Água [91].

As interdependências entre os sistemas de água e energia são claras e estão a tornar-se mais proeminentes, pois o desenvolvimento geral requer mais recursos, enquanto o uso excessivo e o impacto das mudanças climáticas tornam alguns recursos mais escassos. A nível macro, a água é usada em todas as etapas da produção de energia e geração de eletricidade (incluindo de energia renovável). É necessária energia para extrair, transportar e fornecer água e tratar as águas residuais antes do seu retorno ao meio ambiente. No nível micro, o nexus água-energia é uma consideração importante para a comunidade de AVAC, dedicada ao design de equipamentos e seleção e design de sistemas, bem como nas operações de construção.

Um das formas inteligentes de analisar a eficiência energética de equipamentos de grande porte é dado por indicadores de eficiência, no caso pelo valor de carga não padrão (*Non-standard Part Load Value* – NPLV). Especificamente, o NPLV advém do valor integrado de carga parcial (*Integrated Part Load Value* – IPLV). O IPLV ou NPLV são usados para avaliar a eficiência do chiller em diferentes condições de carga. As fórmulas de cálculo do IPLV e NPLV são as mesmas. A única diferença entre IPLV e NPLV é que o IPLV é calculado conforme a condição especificada em AHRI\_Standard\_550-590, enquanto que o NPLV é calculado conforme a condição do local onde o equipamento é instalado [39].

Especificamente, o TWI simplificado é dado pela Equação 33:

$$\text{TWI} = (\text{CTA} \cdot \text{NPLV} \cdot \text{VUE} \cdot \text{IGR}) + (\text{CTA} \cdot \text{VUE} \cdot \text{AUPTR}) \quad (33)$$

Onde:

TWI: Impacte total da água, [m<sup>3</sup>/ano]

CTA: Carga térmica anual, [TR/ano];

NPLV: Eficiência de carga não padrão, [kW/TR];

VUE: Vida útil equipamento, [anos];

IGR: Índice de caudal específico da região calculada, [m<sup>3</sup>/kW<sub>gerado</sub>];

AUPTR: Água usada por TR, [m<sup>3</sup>/TR<sub>evaporação, arraste e purga</sub>].

A Eficiência de carga não padrão, NPLV, deve possuir a soma rateada por TR da Bomba de Condensação e do Ventilador da Torre. Recordar que 1 TR (tonelada de refrigeração) = 3,5 kW.

O resultado será o impacte total de uso de água de forma holística do período de vida útil do sistema.

Já existe um indicador conhecido como TEWI (*Total Equivalent Warming Impact*), representativo do impacte total do aquecimento equivalente para o aquecimento global, que consiste na soma das emissões diretas e indiretas através de perdas de gás refrigerante e consumo de energia do ciclo de vida. O TWI destina-se a medir o consumo de água direta e indireta no ciclo de vida, portanto, a diferença entre eles é que enquanto o TEWI mede o potencial de aquecimento global (GWP – *Global Warming Potential* - Potencial de Aquecimento Global) o TWI mede o consumo direto e indireto de água do sistema AVAC no ciclo de vida. De acordo com Al-Ghamdi [96], nos “Edifícios Verdes”, é importante incluir características operativas no cálculo dos índices. Tal como o TEWI, o TWI tem vantagens em usar como características da matriz energética nos cálculos.

### 3.5.4. Comparação de sistemas com condensação a água e a ar

Nesta seção são determinados e comparados os valores dos índices de sistemas com condensação a ar e a água. A Figura 31 ilustra o tipo de dispositivos requeridos no caso da utilização de chillers com condensação a ar ou a água.



Figura 31 – Comparação de (a) sistemas de refrigeração a condensação a ar e (b) a água [97].

O sistema refrigerado a ar (Figura 31a) é um projeto baseado na temperatura do bolbo seco:

- Maior área ocupada (mais área de superfície);
- Nível de ruídos mais alto;
- Maior consumo de energia: menor eficiência;
- Sem consumo água no local (arrefecimento evaporativo).

O sistema refrigerado a água (Figura 31b) é um projeto baseado na temperatura do bolbo húmido:

- Menor área ocupada (normalmente requer sala de equipamentos);
- Nível de ruídos baixo;
- Menor consumo de energia: maior eficiência;
- Com consumo água no local (arrefecimento evaporativo).

Para comparar e usar num exemplo, foram selecionados sistemas de condensação a ar e a água para uma potência total de 200 TR com as características e especificações apresentadas na Tabela 16. Foi comparado um chiller com condensação a ar de um fabricante brasileiro (tipo compressor de parafuso Samurai) e um chiller com condensação a água (importado) (modelo RTHD, fabricado nos EUA). As simulações foram realizadas usando a carga térmica anual, a NPLV (já fornecida com cargas parciais dinâmicas).

A média “ASHRAE” do consumo de água por TR também é uma entrada para a simulação do sistema de condensação de água. O período de simulação considerado foi de 1 ano. O ciclo de vida do equipamento foi definido por 15 anos. Os cálculos foram baseados em fórmulas ASHRAE NPLV. Especificamente, a carga térmica foi assumida porque cada sistema possui cargas térmicas diferentes.

Tabela 16 – Parâmetros dos sistemas com condensação a ar ou a água com potência de 200 TR.

<b>Parâmetros</b>	<b>Condensação a ar</b>	<b>Condensação a água</b>
Eficiência do chiller a carga total (kW/TR)	1,4	0,65
Eficiência do chiller a carga parcial NPLV (kW/TR)	1,06	0,36
Potência total do sistema (TR)	200	200
Carga térmica média anual (TR)	150	150
Potência da bomba de condensação (kW <sub>entrada</sub> )	0	6,2664
Potência do ventilador da torre (kW <sub>entrada</sub> )	0	4,1776
Horário de funcionamento no ano (horas/ano)	4380	4380
Carga térmica anual (TR/ano)	657.000	657.000
Necessidade de água (m <sup>3</sup> /kW <sub>gerado na região</sub> )	0,011071	0,011071
Índice de Consumo de Água (m <sup>3</sup> /TR)	0	0,0072
TWI (m <sup>3</sup> )	115.650,987	110.233,694

O TWI para cada opção (arrefecimento a ar e a água), de acordo com a Equação 26, vem:

$$TWI_{\text{condensação água}} = [657.000 \text{ TR/ano} \times 0,36 \text{ kW/TR} \times 15 \text{ anos} \times 0,011071 \text{ m}^3/\text{kW}] + [657.000 \text{ TR/ano} \times 15 \text{ anos} \times 0,0072 \text{ m}^3/\text{TR}]$$

$$TWI_{\text{condensação água}} = 110.233,694 \text{ [m}^3\text{/ano]}$$

$$TWI_{\text{condensação ar}} = [657.000 \text{ TR/ano} \times 1,06 \text{ kW/TR} \times 15 \text{ anos} \times 0,011071 \text{ m}^3\text{/kW}] + [657.000 \text{ TR/ano} \times 15 \text{ anos} \times 0 \text{ m}^3\text{/TR}]$$

$$TWI_{\text{condensação ar}} = 115.650,987 \text{ [m}^3\text{/ano]}$$

Como outro exemplo, sistemas de condensação a ar e a água para uma potência total de 500 TR com NPLV serão comparados, apresentando as características apresentadas na Tabela 17. Os equipamentos de 200 e 500 TR utilizaram a mesma simulação com os dados de consumo de energia dos fabricantes (200 TR) ou ASHRAE 90.1 (500 TR). Novamente, foi estabelecido um ciclo de vida do equipamento igual a 15 anos. Os chillers de 200 e 500 TR possuem diferente eficiência energética, mas, para trocar calor de 1 TR, ambos têm o mesmo consumo de água de evaporação [39].

Tabela 17 – Parâmetros dos sistemas com condensação a ar ou a água com potência de 500 TR.

<b>Parâmetros</b>	<b>Condensação a ar</b>	<b>Condensação a água</b>
Eficiência do chiller a carga total (kW/TR)	1,237	0,585
Eficiência do chiller a carga parcial NPLV (kW/TR)	* 0,745	* 0,38
Potência total do sistema (TR)	500	500
Carga térmica média anual (TR)	290	290
Potência da bomba de condensação (kW <sub>entrada</sub> )	0	15,666
Potência do ventilador da torre (kW <sub>entrada</sub> )	0	10,444
Horário de funcionamento no ano (horas/ano)	4.380	4.380
Carga térmica anual (TR/ano)	1.270.200	1.270.200
Necessidade de água (m <sup>3</sup> /kW <sub>gerado na região</sub> )	0,011071	0,011071
Índice de Consumo de Água (m <sup>3</sup> /TR)	0	0,0072
TWI (m <sup>3</sup> )	166.217,419	221.963,639

Nota: \*Eficiência baseada na ASHRAE 90.1-2019. Especificamente neste caso IPLV=NPLV por não se tratar de uma cidade em específico [39].

O TWI para cada opção (condensação a ar e água), de acordo com a Equação 26 vem:

$$\text{TWI}_{\text{condensação água}} = [1.270.200 \text{ TR/ano} \times 0,38 \text{ kW/TR} \times 15 \text{ anos} \times 0,011071 \text{ m}^3/\text{kW}] + [1.270.200 \text{ TR/ano} \times 15 \text{ anos} \times 0,0072 \text{ m}^3/\text{TR}]$$

$$\text{TWI}_{\text{condensação água}} = 221.963,639 \text{ [m}^3/\text{ano]}$$

$$\text{TWI}_{\text{condensação ar}} = [1.270.200 \text{ TR/ano} \times 0,745 \text{ kW/TR} \times 15 \text{ anos} \times 0,011071 \text{ m}^3/\text{kW}] + [1.270.200 \text{ TR/ano} \times 15 \text{ anos} \times 0 \text{ m}^3/\text{TR}]$$

$$\text{TWI}_{\text{condensação ar}} = 166.217,419 \text{ [m}^3/\text{ano]}$$

Nos sistemas de condensação de ar e a água com capacidades de 200 TR ou 500 TR, o consumo de água por kWh gerado e o índice de consumo de água/TR, Torre (m<sup>3</sup>/TR) apresentam os mesmos valores.

Usando o cálculo do TWI, que visa providenciar um entendimento acerca do consumo de água de forma holística, é determinada a necessidade de equipamentos de ar condicionado durante sua vida útil.

Verificando os resultados do TWI nas Tabelas 16 e 17, especificamente na comparação hipotética dos sistemas com potência de arrefecimento de 200 TR com condensação a ar (brasileiro) e a água (importado dos EUA), o índice TWI é menor no sistema com condensação de água. Ou seja, holisticamente, o consumo de água é menor no sistema arrefecido a água do que no sistema arrefecido a ar.

No sistema com potência de arrefecimento de 500 TR, de acordo com a ASHRAE 90.1 de 2019 [39], considerando chillers arrefecidos a ar e a água, o maior valor do índice TWI foi obtido no chiller arrefecido a água. Chillers de maior potência foram também usados na comparação de cálculos, porque normalmente a norma ASHRAE 90.1 usa ar condicionado do tipo split como referência em pequenos edifícios e não em chillers.

É compreensível que os projetistas estejam preocupados com a eficiência do chiller. Vários fatores, como má manutenção, mau funcionamento, dimensionamento

inadequado etc., afetam essa eficiência. As partes interessadas do setor sabem que qualquer elemento que aprimore qualquer aspecto da eficiência do chiller pode ter um enorme impacto. No caso do sistema com potência de arrefecimento de 500 TR, onde os valores da norma ASHRAE 90.1 foram usados como fonte do valor de NPLV, o valor do índice TWI foi menor no chiller arrefecido a ar [39].

Ou seja, à medida que a potência de refrigeração aumenta, verifica-se uma alteração da melhor eficiência no consumo de ar de sistemas com chillers com condensação a água para sistemas com chillers com condensação a ar. Porém, à medida que surgem novos padrões, a eficiência do chiller está a tornar-se cada vez mais importante, pois chillers de rolamentos magnéticos arrefecidos a água em ambientes com temperatura elevado apresentam baixo valor de NPLV, certamente levando no futuro a índices de TWI mais baixos do que os de chillers arrefecidos a ar [97].

### **3.5.5. Nota conclusiva**

Com o índice TWI é possível obter uma visão holística do consumo de água num espaço de tempo. Com esta metodologia pode-se observar que algumas vezes um sistema com condensação a ar tenha um maior consumo de água do que um sistema com condensação a água.

Ainda não foi considerado o consumo de água para limpar a serpentina do condensador a ar (até por que a limpeza do condensador à água é usada por varejamento) e não foi incluída a água de limpeza das fontes eólicas e solares de energia, por ainda não se encontrar esse valor disponível na literatura científica.

Foram usados dois exemplos simples, mas os valores de NPLV de sistemas com compressores de mancal magnético em chillers com condensação a água são cada vez menores. A mesma metodologia pode ser usada em sistemas com volume de refrigerante variável (*Variable Refrigerant Flow – VRF*) com condensação a água e a ar. Em trabalhos futuros poderão ser simulados sistemas geotérmicos e drycoolers para o TWI.

Entre os indicadores para escolher o melhor sistema de refrigeração e até mesmo para sistemas certificados LEED, o TWI pode ser um indicador de qualidade. Também pode ser considerado um TWI pro rata por TR (resultado dividido pela carga de arrefecimento

durante a vida útil do sistema) para a tomada de decisão. Uma vantagem deste novo índice é usar a mesma fórmula no consumo de água e energia, relacionado pelas características da região em que os sistemas estão localizados. No futuro, poderá fazer parte da avaliação LEED ou AQUA. Portanto, o TWI pro rata pode ser um índice associado às avaliações de água e energia.

## 4. Análise e Discussão de Resultados

### 4.1. Cálculo da Eficiência no Uso de Energia em projeto (EUED - *Energy Usage Effectiveness Design*)

Um sistema convencional de refrigeração reside na utilização de um ciclo normal de entalpia do fluido refrigerante, tendo em consideração o tipo de fluido refrigerante a ser escolhido e as suas temperaturas de evaporação e de condensação.

Os sistemas COP<sub>1</sub>, COP<sub>2</sub>, COP<sub>3</sub> e COP<sub>4</sub> descritos no capítulo anterior, estão relacionados com as temperaturas externas prioritariamente ou com as temperaturas geotérmicas, se houver essa disponibilidade, podendo aumentar ou diminuir as relações de compressão, sendo que o rendimento de Carnot é inversamente proporcional às diferenças nas relações de compressão que são proporcionais às diferenças entre as temperaturas das fontes fria e quente [29].

Especificamente é de seguida detalhada na Tabela 18, a determinação do EUED para a cidade de Curitiba, com base na tabela completa da ASHRAE *Weather Data Viewer*, para as 35 maiores temperaturas de frequências anuais com relação de horas para cada temperatura e ainda com a correlação da temperatura de bolbo húmido coincidente. Na tabela tem-se os dados [22]:

- DBC - (Temperatura de Bolbo seco), [°C];
- MCWBC - (Temperatura de Bolbo húmido coincidente média), [°C];
- FREQ - Frequência, [horas];
- FREE - Free cooling, [horas];
- EVAP - Arrefecimento Evaporativo, [horas];
- COP<sub>1</sub> – Sistema com Coeficiente de Performance 1, [horas];
- COP<sub>2</sub> – Sistema com Coeficiente de Performance 2, [horas];
- COP<sub>3</sub> – Sistema com Coeficiente de Performance 3, [horas];
- COP<sub>4</sub> - Sistema com Coeficiente de Performance 4, [horas];
- Carga<sub>tot</sub> - Carga térmica total, [kW].

Obs.: As unidades horas, são referentes a horas de funcionamento da condição.

Tabela 18 - Cálculos do EUED da cidade de Curitiba.

DBC [°C]	MCWBC [°C]	FREQ [h]	FREE [h]	EVAP [h]	COP1 [h]	COP2 [h]	COP3 [h]	COP4 [h]
	-5	0,040	0,040	708,596	228,265	125,127	30,772	0,509
-4	-4,200	0,202	0,202	692,307	188,027	90,352	12,109	
-3	-3,778	0,364	0,364	628,298	163,450	54,394	3,106	
-2	-2,385	1,577	1,577	479,882			45,987	
-1	-1,554	2,552	2,552	375,065				
0	-0,419	5,303	5,304	306,903				
1	0,465	8,359	8,359	262,835		269,874		
2	1,497	13,524	13,524		579,743			
3	2,498	17,831	17,831					
4	3,506	25,199	25,199	3453,887				
5	4,540	37,259	37,259					
6	5,544	54,420	54,420					
7	6,535	77,485	77,485					
8	7,525	113,397	113,397					
9	8,372	164,978	164,978					
10	9,356	238,103	238,103					
11	10,360	306,158	306,158					
12	11,289	388,147	388,147					
13	12,239	478,672	478,672					
14	13,142	548,471	548,471					
15	14,068	605,509	605,509					
16	14,961	649,414	649,414					
17	15,833	673,033	673,033					
18	16,689	708,596	4410					
19	17,541	692,307						
20	18,179	628,298						
21	18,575	479,882						
22	18,758	375,065						
23	18,908	306,903						
24	19,074	262,834						
25	19,353	228,265						
26	19,565	188,027						
27	19,855	163,455						
28	20,121	125,127						
29	20,271	90,352						
30	20,282	54,395						
31	20,288	30,772						
32	20,251	12,109						
33	20,025	3,106						
34	21,917	0,509						

Sistema	CURITIBA	
	Carga <sub>tot</sub> [kW]	COP (kW/kW)
Free cooling	395,300	19,180
Evaporativo	395,300	16,780
COP 1	395,300	4,381
COP 2	395,300	4,101
COP 3	395,300	3,745
COP 4	395,300	3,633
EUED (kWh/ano/kWh/ano)	1,245	

O cálculo do EUED advém da soma da energia relativa a 3.042.348 [kWh/ano] do consumo dos equipamentos com 70.080 [kWh/ano] do consumo da iluminação +420.480 [kWh/ano] do consumo de outros elementos, ao que acresce o somatório do consumo AVAC [kWh/ano], dividido pelo consumo dos equipamentos [kWh/ano].

O cálculo do COP EUED<sub>ventilador</sub> consiste na carga térmica total multiplicada pelas horas totais do ano (8.760 horas), dividida pela energia consumida pelo AVAC anualmente [kWh/ano].

Usando os dados do ASHRAE *Weather Data Viewer* pode-se verificar que as características da cidade Curitiba com as necessidades de temperatura do DC possibilitam mais horas de free cooling e de sistema evaporativo, somando ao todo 7.863,887 horas dessa opção nesta cidade, Tabela 19 [22].

A Tabela 19 apresenta os resultados comparativos dos diversos sistemas e os resultados do EUED e do COP EUED.

Tabela 19 - Cálculos do EUED para a cidade de Curitiba.

<b>Sistema</b>	<b>Carga térmica total [kW]</b>	<b>COP [kW/kW]</b>	<b>Potência [kW]</b>	<b>Horas [h]</b>	<b>Energia AVAC Anual [kWh]</b>
<b>FREE</b>	395,300	19,18	20,610	4.410,000	90.890,143
<b>EVAP</b>	395,300	16,78	23,558	3.453,887	81.366,013
<b>COP1</b>	395,300	4,381	90,231	579,743	52.310,503
<b>COP2</b>	395,300	4,101	96,391	269,874	26.013,493
<b>COP3</b>	395,300	3,745	105,554	45,987	4.854,091
<b>COP4</b>	395,300	3,633	108,808	0,509	55,362
				Σ	255.489,606
				<b>COP EUED</b>	<b>13,554</b>
<b>EUED</b>	<b>1,245</b>				<b>CURITIBA</b>

As tabelas EUED para as restantes cidades encontram-se no Anexo II, sendo os resultados dos valores resumidos na Tabela 21, contendo a comparação dos valores de PUE COA e EUED, nas cidades propostas.

A Figura 32 apresenta um gráfico comparativo dos valores de PUE COA e EUED.

Conforme a Figura 32, constatou-se que o valor do EUED é menor que o valor do PUE COA, sendo assim o EUED um melhor indicador da eficiência. O COP EUED está acima do COP PUE, sendo COP EUED melhor em eficiência.

Na Tabela 20 também são consideradas as zonas bioclimáticas de cada cidade estudada. Usando as zonas bioclimáticas brasileiras para correlacionar com o COP EUED, pode-se observar que não existe uma linearidade absoluta. Todavia, pode-se verificar que os melhores locais para se instalar um DC são as zonas bioclimáticas de 1 a 4, à exceção da cidade de Anápolis (GO), que se encontra na zona bioclimática seis.

A correlação do COP EUED é muito maior com as zonas bioclimáticas do que o do PUE COA.

As variações de COP EUED no Brasil são 3,33 vezes, ou seja, significativas. Assim, é clara a importância de um índice como o COP EUED para a escolha do local de instalação de um DC. Conforme os resultados expostos na Tabela 20, pode-se verificar que apesar de em muitos casos haver uma correlação, também existem muitos casos que mostram o contrário. Não se pode associar diretamente o conceito de Zonas Bioclimáticas para se instalar um Data Center, visto que cidades de Zona Bioclimática 3, como Foz do Iguaçu, encontra-se logo depois de cidade como Goiânia de Zona Bioclimática 6, ou seja, em geral pode haver correlação, mas existe uma amostragem suficiente para mostrar que a correlação não é direta, ainda que na mesma Zona Bioclimática o COP possa variar bastante. Por exemplo, na mesma Zona 8, existem valores de COP EUED de 5,62 a 4,073 [(kWh/ano)/(kWh/ano)], ou seja, 27,52%, o que se retrata como uma diferença significativa para um Investidor. Desta forma prova-se que o EUED é uma ferramenta interessante para escolher onde instalar um Data Center.

Tabela 20 – Comparação dos valores de PUE vs. EUED e COP PUE vs. COP EUED em cidades selecionadas.

CIDADES	PUE [kWh/ano/kWh/ano]	COP EUED <sub>ventilador</sub> [kW/kW]	EUED [kWh/ano/kWh/ano]	COP PUE <sub>ventilador</sub> [kW/kW]	Zona
Curitiba	1,455	13,553	1,245	3,745	1
São Paulo (Guarulhos)	1,464	11,874	1,257	3,642	3
São Paulo (Congonhas)	1,464	11,481	1,26	3,642	3
B. Horizonte (Pampulha)	1,472	9,941	1,276	3,551	3
Campinas	1,473	9,518	1,280	3,542	3
Porto Alegre	1,488	9,343	1,283	3,393	3
Brasília	1,465	9,314	1,283	3,633	4
Anápolis	1,461	9,072	1,288	3,67	6
B. Horizonte (T. Neves)	1,465	8,916	1,289	3,633	3
Florianópolis	1,466	8,671	1,293	3,623	3
Uberaba	1,478	8,211	1,3	3,498	3
Londrina	1,48	7,497	1,313	3,471	3
Foz do Iguaçu	1,491	7,335	1,316	3,368	3
Goiânia	1,490	5,856	1,355	3,376	6
Rio janeiro (S. Dumont)	1,481	5,629	1,363	3,463	8
Campo Grande	1,497	5,617	1,364	3,309	6
Rio Janeiro (Galeão)	1,519	5,266	1,377	3,122	8
Vitória	1,481	4,758	1,400	3,463	8
F. de Noronha	1,456	4,720	1,402	3,726	8
Caravelas	1,462	4,657	1,406	3,661	8
Cuiabá	1,518	4,607	1,408	3,130	7
Rio Branco	1,494	4,418	1,419	3,342	8
Maceió	1,469	4,374	1,421	3,587	8
Salvador	1,470	4,272	1,428	3,578	8
Porto velho	1,494	4,264	1,428	3,334	8
Aracajú	1,465	4,256	1,428	3,633	8
Fortaleza	1,466	4,225	1,431	3,623	8
São Luís	1,482	4,197	1,432	3,454	8
Manaus (P. Pelada)	1,499	4,193	1,433	3,292	8
Recife	1,482	4,185	1,433	3,454	8
Santarém	1,481	4,17	1,434	3,463	8
Boa vista	1,501	4,116	1,438	3,275	8
Manaus (Ed. Gomes)	1,488	4,110	1,438	3,393	8
Macapá	1,481	4,110	1,438	3,463	8
Belém	1,473	4,106	1,438	3,542	8
Teresina	1,517	4,073	1,441	3,138	7
Natal	1,466	4,073	1,441	3,623	8

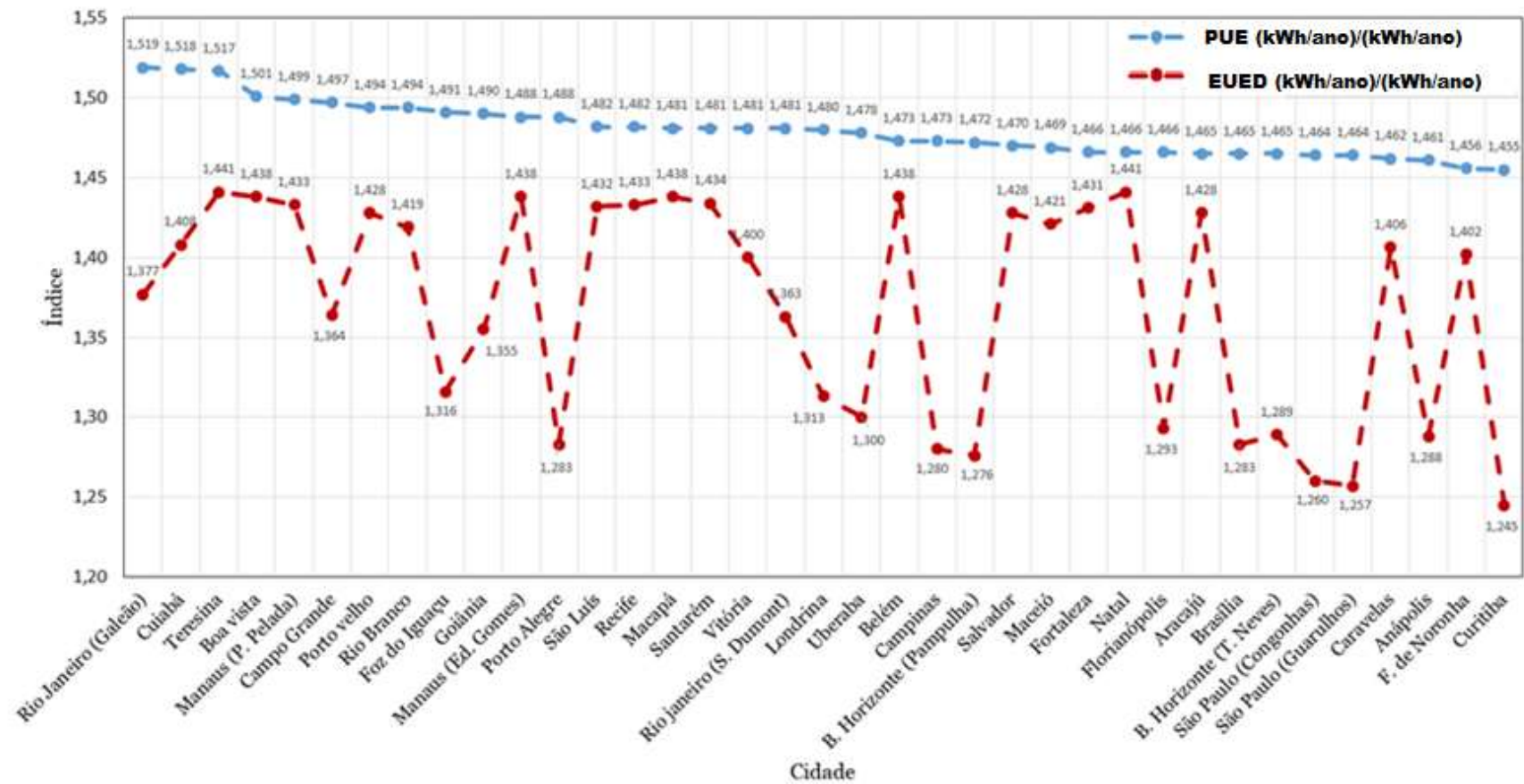


Figura 32 – Comparação gráfica entre os valores de PUE COA e EUED em cidades brasileiras selecionadas.

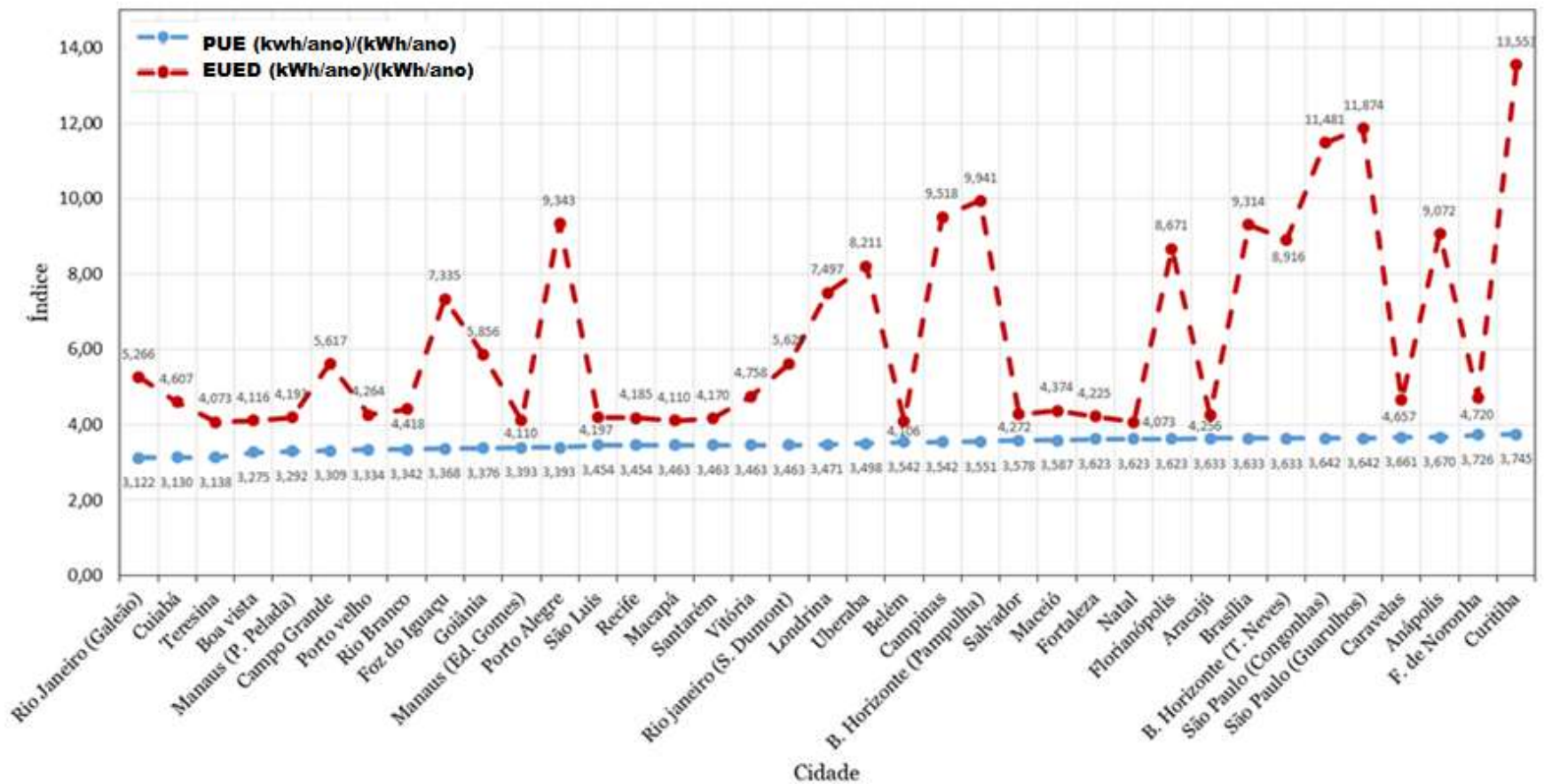


Figura 33 – Comparação gráfica entre os valores de COP PUE COA e COP EUED em cidades brasileiras selecionadas.

## 4.2. Coeficiente de Performance EUED Geotérmico

Uma metodologia optativa para usar os recursos naturais para simulação em DC consiste no uso da geotermia (no sentido de banho térmico para troca de calor) para reduzir as relações de compressão com intuito de aumentar o COP. Conforme Equação 9 exposta no Capítulo 2, quanto menor a diferença entre as fontes quente e fria, maior será a eficiência. São usados os dados de Santos [98], como base para definição das temperaturas geotérmicas a dois metros abaixo da superfície como elemento para gerar um banho térmico e conseqüentemente reduzir a temperatura de condensação. Utilizando em conjunto com os dados disponíveis no ASHRAE *Weather Data Viewer* [22], é possível estudar todas as opções do EUED com geotermia. As cidades estudadas, foram escolhidas por se encontrarem numa região próxima e por possuírem resultados PUE próximos:

- Curitiba;
- Foz do Iguaçu;
- Londrina.

Na Tabela 21 são apresentados os valores médios da temperatura geotérmica para cidades do estado do Paraná (Brasil) ao longo do ano.

Tabela 21 – Valores médios da temperatura geotérmica (°C) no Paraná ao longo do ano.

Cidade	Mês								
	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
Cascavel	22,9	22,5	22	21,9	20	16,3	16	17	16,9
Curitiba	22,1	19,9	21,6	21,7	21	19,6	18,3	18,1	18,3
F. Iguaçu	23,0	21,8	21,7	21,7	21,5	18,5	17,9	17,7	17,7
Guaratuba	22,9	22,7	22,5	21	18,2	18,5	18,8	18,6	19,0
Ipanema	23	22,8	22,5	21,1	18,3	18,4	18,5	18,4	19,1
Londrina	24	21,8	20,9	19,2	17,2	17,6	16,4	16,2	16,3
Maringá	23	22,5	22,3	21,6	20,5	18,5	18,0	17,9	18,0
Pinhais	20,9	19,1	20,8	19,3	16,2	16,1	17,1	17,0	17,3
P. Grossa	21	21,1	20,8	20,6	21,0	18,2	18,1	18,0	18,8
Toledo	23,0	21,8	21,7	21,6	21,5	18,5	17,9	17,8	17,7

Para usar o método de COP geotérmico, é usada a média ponderada da temperatura geotérmica com uma aproximação de 4°C para a entrada de água no condensador, e com uma aproximação da temperatura de condensação de 6°C, conforme dados fornecidos no software livre de dimensionamento de evaporadores shell and tube da Bitzer. Foi considerado o valor do diferencial das temperaturas de admissão de água e da de condensação recomendado pelo software [99]. A Figura 34 mostra a temperatura de condensação resultante no evaporador *shell and tube* para entrada e saída da água do sistema geotérmico.

Dados para a cidade de Curitiba:

- Temperatura média geotérmica= 20,06 [°C];
- Temperatura de entrada de água no condensador= 24,06 [°C];
- Temperatura de condensação= 30,06 [°C];
- COP geotérmico apenas compressor= 8,326 [W/W].

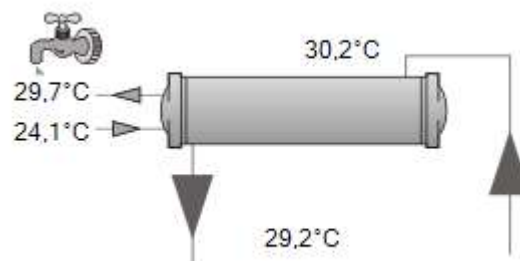


Figura 34 - Ilustração da consideração dos valores da temperatura de admissão de água no evaporador shell and tube e temperatura de condensação [100].

Pode-se verificar que existe um grande acréscimo de COP ao usar o sistema geotérmico com condensação a água como opção para arrefecimento. O valor total do consumo dos ventiladores é de 7,36 kW, sendo que o ventilador do condensador apresenta um consumo de 2,208 kW. Para a seleção do condensador utilizado um  $\Delta T$  entre a saída e entrada do ar no condensador indicado pela AHRI 551/591 [100] (5,6 °C). Com essa variação de temperatura, o caudal de água de condensação será de aproximadamente 20 m<sup>3</sup>/h. Segundo a Bitzer [99], o caudal de água de condensação é de 20 m<sup>3</sup>/h para um equipamento com uma potência de arrefecimento de 30 TR. Importante ressaltar que é

utilizada a mesma potência de arrefecimento de 30 TR (105 kW) do equipamento com condensação a ar nos cálculos de EUED anteriores. A altura manométrica deste sistema é perto de 15 m<sub>H<sub>2</sub>O</sub>. Com estes dados e admitindo um rendimento de 45%, valor conforme norma AHRI e constante na fórmula do software da Bitzer, pela Equação 34, a potência da bomba de água para o sistema geotérmico vem:

$$P = \frac{\rho \cdot Q_{cau} \cdot Hm}{75 \cdot \eta} \cdot 0,736 \quad (34)$$

Onde:

- $P$ : Potência da bomba, [kW];
- $\rho$ : Massa específica da água, [kg/m<sup>3</sup>];
- $Q$ : Caudal, [m<sup>3</sup>/s];
- $Hm$ : Altura manométrica, [m<sub>H<sub>2</sub>O</sub>];
- $\eta$ : Rendimento, [%].

$$P = \left( \frac{1000 \cdot \frac{20}{3600} \cdot 15}{75 \cdot 0,45} \right) \cdot 0,736 = \mathbf{1,63 \text{ kW}}$$

Pode indicar-se que o consumo da bomba equivale ao consumo de um ventilador do condensador. Ou seja, pode-se usar o padrão de cálculo anterior. Assim, o cálculo do EUED da cidade de Curitiba, associando os dados do ASHRAE *Weather Data Viewer* com a média ponderada dos dados geotérmicos virá tal como exposto na Tabela 22 [22].

Tabela 22 – Cálculo do EUED geotérmico e do COP geotérmico de Curitiba.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
<b>FREE</b>	395,300	19,180	20,610	4.410,000	90.890,143
<b>EVAP</b>	395,300	16,780	23,558	3.453,887	81.366,013
<b>COP1</b>	395,300	8,320	47,512	896,113	42.576,124
				Σ	214.832,281
				<b>COP EUED</b>	<b>16,119</b>
<b>EUED</b>	<b>1,232</b>			<b>Geotérmico</b>	<b>CURITIBA</b>

Para o cálculo do sistema geotérmico exposto na Tabela 22, as faixas de condensação encontram-se apenas nas faixas dos sistemas com COP1 e de sistemas de condensação a ar.

O procedimento de cálculo do EUED geotérmico consistiu na identificação do regime de operação (sistema) para geotérmico (Free cooling, evaporativo e COP1), calcular o novo COP para o sistema COP1, e proceder aos cálculos para o EUED geotérmico (Equação 24):

EUED Geotérmico = (3.042.348 [kWh/ano] do consumo dos Equipamentos) + (70.080 [kWh/ano] do consumo da Iluminação) + (420.480 [kWh] do consumo de outras fontes) + o somatório da energia AVAC Anual kWh) / consumo dos equipamentos [kWh/ano].

$$EUED = \frac{E_{Equip} + E_{Illum} + E_{outros} + \sum E_{AVAC}}{E_{Equip}}$$

O cálculo do COP EUED geotérmico consiste na carga térmica total multiplicada pelo número de horas totais do ano (8.760 horas) dividido pela Energia AVAC Anual em kWh.

A seguir apresentam-se os dados das cidades de Foz de Iguaçu e de Londrina.

Temperaturas geotérmicas da cidade de Londrina:

- Temperatura média geotérmica= 18,84°C;
- Temperatura de entrada de água no condensador= 22,84°C;
- Temperatura de condensação= 28,84°C;
- COP geotérmico apenas compressor= 8,824 W/W.

Na Tabela 23 são apresentados os resultados dos cálculos do EUED geotérmico e do COP EUED geotérmico para a cidade de Londrina.

Tabela 23 – Cálculo do COP EUED geotérmico e EUED geotérmico da cidade de Londrina.

<b>Sistema</b>	<b>Carga térmica total [kW]</b>	<b>COP [kW/kW]</b>	<b>Potência [kW]</b>	<b>Horas [h]</b>	<b>Energia AVAC Anual [kWh]</b>
<b>FREE</b>	395,300	19,180	20,610	1.631,256	33.620,212
<b>EVAP</b>	395,300	16,780	23,558	2.054,839	48.407,506
<b>COP1</b>	395,300	8,820	44,819	5.073,904	227.405,259
				Σ	309.432,977
				<b>COP EUED</b>	<b>11,191</b>
<b>EUED</b>	<b>1,263</b>			<b>Geotérmico</b>	<b>LONDRINA</b>

Temperaturas geotérmicas da cidade de Foz de Iguaçu:

- Temperatura média geotérmica= 20,17°C;
- Temperatura de entrada de água no condensador= 24,17°C;
- Temperatura de condensação= 30,17°C;
- COP geotérmico apenas compressor= 8,326 W/W.

Na Tabela 24 são apresentados os resultados dos cálculos do EUED geotérmico e do COP EUED geotérmico para a cidade de Foz do Iguaçu.

Tabela 24 - Cálculo do COP EUED geotérmico e EUED geotérmico da cidade de Foz de Iguaçu.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
FREE	395,300	19,180	20,610	2.069,853	42.659,685
EVAP	395,300	16,780	23,550	2.851,659	67.178,828
COP 1	395,300	8,270	47,790	3.838,489	183.476,966
				Σ	293.315,479
				<b>COP EUED</b>	<b>11,806</b>
<b>EUED</b>	<b>1,258</b>			<b>Geotérmico</b>	<b>FOZ de IGUAÇU</b>

Na Tabela 25 é apresentada a comparação dos valores de PUE, EUED, EUED geotérmico, COP EUED e COP EUED geotérmico para as cidades de Curitiba, Londrina e Foz de Iguaçu.

Tabela 25 – Comparação entre os valores de PUE, EUED, EUED GEO, COP PUE, COP EUED e COP EUED GEO.

Parâmetro/Cidades	Curitiba	Londrina	Foz do Iguaçu
PUE [kWh/ano/kWh/ano]	1,455	1,480	1,491
EUED [kWh/ano/kWh/ano]	1,245	1,313	1,316
EUED geo [kWh/ano/kWh/ano]	1,232	1,263	1,258
COP PUE <sub>vent</sub> [kWh/ano/kWh/ano]	3,745	3,471	3,368
COP EUED [kWh/ano/kWh/ano]	13,553	7,497	7,335
COP EUED <sub>geo</sub> [kWh/ano/kWh/ano]	16,119	11,191	11,806

Na Figura 35 é apresentada graficamente a comparação dos valores de PUE, EUED e EUED geotérmico. É assim demonstrado que o EUED geotérmico é o melhor resultado, proporcionando resultados satisfatórios para as instalações de novos DC. Esses resultados foram baseados nas mesmas expressões de cálculo e nos processos de comparação dos sistemas com condensação a ar, usando na condensação à água geotérmica o  $\Delta T$  sugerido pelo AHRI 551/591 [100].

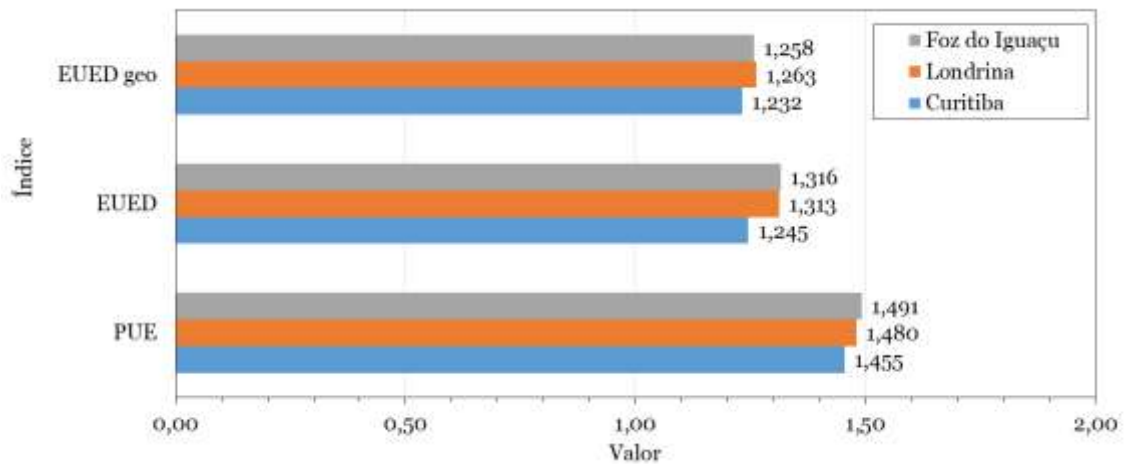


Figura 35 – Comparação dos valores de PUE, EUED e EUED geotérmico para as cidades de Curitiba, Londrina e Foz do Iguaçu.

Na Figura 36 são comparados os valores dos índices  $COP_{PUE_{vent}}$ ,  $COP_{EUED}$  e  $COP_{EUED_{geotérmico}}$  para as cidades de Curitiba, Londrina e Foz do Iguaçu. Os resultados indicam que os COPs  $EUED_{geotérmico}$  são valores maiores nas cidades comparadas, em relações aos COPs  $EUED$  e nos  $COP_{PUE_{vent}}$  determinados nos cálculos. Com estas relações, é facilitado o modo de se obter resultados satisfatórios nas instalações de novos DC, ou seja, mapear as possibilidades geotérmicas pode ser muito útil na tomada de decisão de que cidade se instalar um DC. Devido a menores relações de compressão (temperatura de água na admissão no condensador mais baixa), os valores do  $EUED_{geotérmico}$  foram 36,53% melhores na cidade Curitiba do que da segunda melhor cidade, no caso de Foz de Iguaçu.

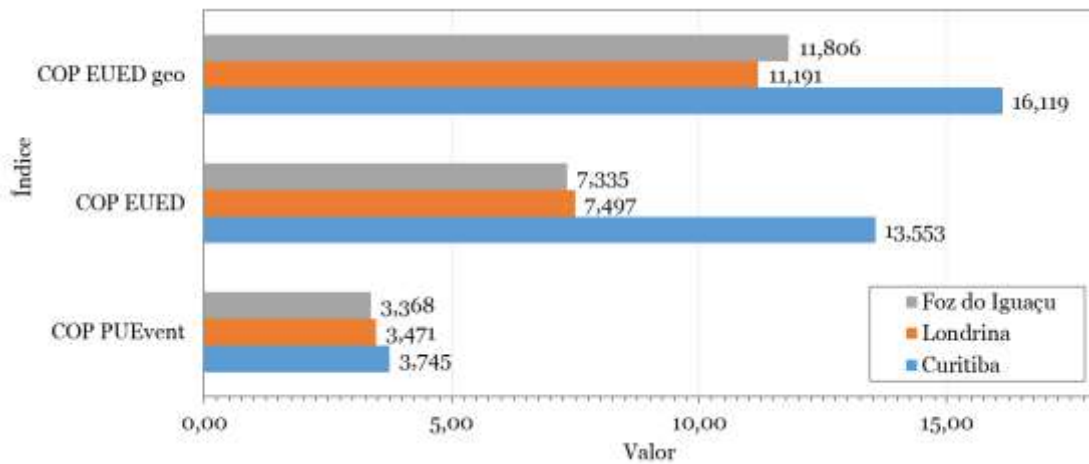


Figura 36 – Comparação dos valores de COP PUEvent, COP EUED e COP EUED geotérmico.

### 4.3. Impacte Ambiental

Preocupações ambientais sempre foram a força motriz nos esforços para otimizar os projetos ecológicos, aumentando a eficiência energética, pela pesquisa de novos refrigerantes e uso eficiente dos sistemas antigos, sendo então importante para todos os sistemas de refrigeração. As variações climáticas sofrem da influência humana, pelo que é muito importante criar métodos transparentes e fáceis de usar ao projetar um sistema de energia com baixo impacte ambiental. Três métricas ambientais são utilizadas no processo de seleção de refrigerantes: Potencial de aquecimento global (GWP – *Global Warming Potential*); Impacte total do aquecimento equivalente para o aquecimento global (TEWI - *Total Equivalent Warming Impact*) e; Desempenho climático do ciclo de vida (LCCP - *Life-Cycle Climate Performance*). Apesar de todas estas métricas terem um objetivo semelhante na quantificação do impacte dos refrigerantes no aquecimento global, o seu uso pode levar a conclusões diferentes [101].

### **4.3.1. Potencial de aquecimento global (GWP - *Global Warming Impact*)**

O potencial de aquecimento global (GWP – *Global Warming Potential*) é talvez a métrica ambiental mais usada. É o índice que compara o impacto do aquecimento global da emissão de um gás de efeito estufa em relação ao impacto da emissão de quantidade igual de CO<sub>2</sub>. O impacto é estimado durante um determinado tempo. Um horizonte temporal de 100 anos é o mais adotado e normalmente assumido quando nenhuma informação no horizonte temporal é fornecida. O GWP é uma métrica fácil de usar. Quanto menor o GWP, menor a contribuição de uma substância para o aquecimento global [100].

Os valores para GWP seguem de acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, especificamente conhecido como Relatório de Síntese AR4 2007, ouve outra metodologia no AR2 de 1996 que não possuía a mesma gama de fluidos refrigerantes [101].

Na EN 378-1-2008 [40] o GWP é definido por:

*“O GWP é um índice que descreve as características radioativas da mistura de gases de efeito estufa, que representam os efeitos combinados dos diferentes tempos de permanência desses gases na atmosfera e a sua eficiência relativa na absorção da radiação infravermelha de saída. Este índice aproxima o efeito de aquecimento integrado no tempo de um determinado gás de efeito estufa na atmosfera de hoje, em relação ao Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)” [40].*

Já na AIRAH (*Australian Institute of Refrigeration, Air Conditioning and Heating*), no manual (Methods of calculating Total Equivalent Warning Impact-TEWI-2012), define GWP:

*“Um índice que compara o impacto climático de uma emissão de um gás de efeito estufa em relação à emissão da mesma quantidade de CO<sub>2</sub>” [102].*

Os valores de GWP são determinados como sendo o potencial de aquecimento climático de um gás com efeito de estufa por comparação com o do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), calculado em termos de relação entre os potenciais de aquecimento de um quilograma

de gás com efeito de estufa e de um quilograma de CO<sub>2</sub> num período de 100 anos [102]. Valores de GWP para determinados fluidos refrigerantes são expostos na Tabela 26 [102].

Tabela 26 – Valores de GWP para determinados fluidos refrigerantes [102].

<b>Relatório de Síntese IPCC</b>	<b>AR2 1996</b>	<b>AR4 2007</b>
CO <sub>2</sub>	1	1
HFC 32	650	675
HFC 134 A	1300	1430
HFC 407 C	1526	1714
HFC 404 A	3260	3922
HFC 410 A	1725	2088
R290 (Propano)	3	3

### **4.3.2. Desempenho climático do ciclo de vida (LCCP - *Life Cycle Climate Performance*)**

O desempenho climático do ciclo de vida (LCCP - *Life-Cycle Climate Performance*) é uma métrica holística para quantificar o efeito dos refrigerantes nas emissões na vida útil do sistema (Equação 35). No entanto, na prática, o LCCP é mais complexo que o TEWI e a contribuição de outras emissões contabilizadas são insignificantes (Equação 35) [103].

$$\text{LCCP} = \text{TEWI} = \text{GWP}(\text{Indireto}) + \text{GWP}(\text{direto}) \quad (35)$$

Onde,

GWP(indireto): consumo de energia de produtos químicos, produção e transporte, fabricação componentes/montagem e fim de vida).

GWP(direto): emissões de refrigerante químico incluindo produtos de reação atmosférica, vazamento de fabricação e fim de vida).

O LCCP difere do TEWI na medida em que inclui especificamente alguns itens excluídos do TEWI. Estes itens são:

- As emissões de fugas diretas durante a fabricação de equipamentos e fluidos;
- As emissões de gases com efeito de estufa associadas à sua energia incorporada. As emissões e a energia incorporada para a produção de R-134A e de R-404A, representaram cerca de 1% do valor GWP, consideravelmente menor que a incerteza em um cálculo de LCCP para equipamentos estacionários.

O Instituto de Tecnologia de Ar Condicionado, Aquecimento e Refrigeração (AHRTI) desenvolveu uma metodologia padrão para calcular o LCCP de equipamentos de refrigeração e ar condicionado estacionário [102].

### **4.3.3. Impacte Total Equivalente para o Aquecimento Global (*Total Equivalent Warming Impact*)**

O Impacte total equivalente para o aquecimento global (TEWI - *Total Equivalent Warming Impact*) é uma métrica do impacte do aquecimento global de equipamentos com base no total de emissões, relacionadas a gases de efeito estufa durante a operação do equipamento e a eliminação dos fluidos operacionais no fim da vida útil. O TEWI leva em conta tanto as emissões de fugas diretas, emissões indiretas produzidas através da energia consumido na operação dos equipamentos. O TEWI é medido em unidades de massa em kg de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>) [101].

O TEWI é calculado como a soma de duas componentes, são elas:

1. Refrigerante libertado durante a vida útil do equipamento, incluindo perdas não recuperadas sobre a disposição final;
2. O impacto das emissões de CO<sub>2</sub> dos combustíveis fósseis utilizados para gerar energia para operar o equipamento ao longo da sua vida.

#### **4.3.3.1. Relevância do impacte total equivalente para o aquecimento global**

A necessidade de controlar as emissões de gases com efeito de estufa, conforme estabelecido no Protocolo de Quioto, requer uma cuidadosa consideração contínua na avaliação de atividades de consumo de energia. Muitas atividades podem resultar na emissão de mais de um dos gases com efeito de estufa. O TEWI é uma metodologia para cálculo do total de emissões relevantes de gases com efeito de estufa para aplicações específicas, neste caso, de refrigeração e ar condicionado [104].

É importante notar que o maior impacte no aquecimento global da refrigeração estacionária e do ar condicionado consiste na geração de eletricidade para alimentar os equipamentos.

Aproximadamente 45.000 GWh, ou 21,9% de toda a eletricidade produzida na Austrália em 2006 resultou em cerca de 7% (incluindo ar condicionado móvel e refrigeração) de todas as emissões de gases com efeito de estufa, i.e. 40 MT de CO<sub>2</sub>. Na comparação entre países, o Brasil é o sexto maior emissor de poluentes, atrás de China, Estados Unidos, Índia, Indonésia e Rússia. "É uma vergonha para o Brasil, porque, diferentemente dos países que têm um gigantesco desafio tecnológico para diminuir suas emissões, como setor de energia, aqui nós precisamos diminuir o desmatamento", comentou Ricardo Abramovay, pesquisador da Universidade de São Paulo (USP). Segundo o Seeg (Sistema de Emissões de Gases de Efeito Estufa), as emissões decorrentes da alta de 8,5% no desmatamento da Amazônia no ano passado foram em parte compensadas por uma redução de cerca de 10% na destruição do Cerrado, área fito e biogeográfica do Brasil.

No geral, as emissões brutas de gases de efeito estufa do Brasil mantiveram o patamar observado no ano anterior: 1,939 bilhão de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, contra 1,932 bilhão em 2017 [105-106].

#### **4.3.3.2. Contabilização do impacte total equivalente para o aquecimento global**

Os cálculos do TEWI dependem de vários padrões de desempenho e uso, propriedades dos refrigerantes e geração de eletricidade e sua eficiência. Os valores utilizados estão

sujeitos a considerável incerteza. Em particular, os valores de GWP do refrigerante são sujeitos a amplos níveis de incerteza. É importante avaliar, portanto, que pequenas diferenças no TEWI podem não ser significativas.

Recomendações sobre a análise de sensibilidade (ou seja, limites superior e inferior) e validade das comparações são incluídas e é importante ter em atenção estas considerações para que o TEWI seja uma ferramenta de design útil. Deve-se enfatizar que a comparação de valores de TEWI, para ser de valor real, deve relacionar sistemas de ciclo de funcionamento e função iguais. Há pouco propósito prático em comparar, por exemplo, os valores de TEWI de um arrefecedor doméstico e de um expositor de supermercado [105].

Os cálculos do TEWI para vários setores da indústria representam a tecnologia atual e as melhores práticas do setor para novas instalações fixas, e no caso em particular desta Tese, de DC. Os fatores estão sujeitos a alterações e são atualizados apropriadamente. Portanto, é importante usar, as propriedades atuais dos refrigerantes e dos fatores indiretos de emissão [101].

O método TEWI é simples e direto de calcular. Os princípios são facilmente aplicados em outras aplicações, incluindo ar condicionado, instalações de refrigeração e armazenamento a frio.

A metodologia para se calcular o impacto do aquecimento total equivalente (TEWI) é para os sistemas de refrigeração e ar condicionado (RAC), que operam com base nos princípios de compressão de vapor e alimentados por rede elétrica, eletricidade conectada à rede é dada pela Equação 36:

$$\text{TEWI} = \text{GWP}(\text{direto; fuga refrigerante incl. EOL}) + \text{GWP}(\text{indireto; operação}) \quad (36)$$

Onde:

EOL: Fugas de fluido refrigerante incluindo final de vida, (EOL - *End Of Life*).

$$\text{TEWI} = (\text{GWP} \times m \times L_{\text{anual}} \times n_v) + \text{GWP} \times m \times (1 - \alpha_{\text{recovery}}) + (E_{\text{anual}} \times \beta_f \times n_v)$$

Onde:

GWP: Potencial de Aquecimento Global do refrigerante, relativo a CO<sub>2</sub> (GWP CO<sub>2</sub> = 1);

$L_{\text{anual}}$ : Taxa de fuga, [kg/ano];

$n_v$ : Vida operacional do sistema, [anos];

$m$ : Carga de refrigerante, [kg/ano];

$\alpha_{\text{recovery}}$ : Fator de recuperação, [%];

$E_{\text{anual}}$ : Consumo de energia por ano, [kWh/ano];

$\beta_f$ : Fator de emissão indireta, [kg CO<sub>2</sub>/kWh].

A equação de cálculo do TEWI pode ser encontrada, entre outros, na norma EN 378-1: 2008, Sistema de Refrigeração e Caldeiras de Calor e Requisitos Ambientais, Anexo B. Quando gases com efeito de estufa podem ser emitidos por isolamento (ou seja, expositores) ou outros componentes no sistema de arrefecimento ou aquecimento, o potencial de aquecimento global desses gases deve ser adicionado à expressão [40].

O método objetiva o fornecimento de estimativas preditivas para os valores de TEWI de novos sistemas que podem ser comparados confiavelmente, mesmo quando diferentes estimadores os prepararam. A análise de sensibilidade é recomendada para calcular os valores de TEWI do limiar inferior e superior, o que fornece uma banda determinada.

#### **4.3.4. Apresentação dos cálculos do impacto total equivalente para o aquecimento global**

No decorrer desta Tese foi apresentada uma metodologia aplicada no desenvolvimento do projeto de DC, determinando um PUE COA para fazer a comparação de eficiência com

o EUED em 37 localidades brasileiras selecionadas pela ABNT NBR 16401-01-2008 [69]. Para tal foram usados os dados da própria ABNT para o cálculo do PUE COA.

Os dados do ASHRAE *Weather Data Viewer* version 5.0 de 2013 [22] das 37 cidades foram utilizados para determinar o EUED. Nesta etapa, foi acrescentada a cidade de Chicago (EUA), com a comparação dos dados de bolbo seco e de bolbo húmido, ou seja, da aplicação de vários sistemas apresentada na Tabela 27.

Tabela 27 – Cálculo do COP EUED e EUED para Chicago (EUA).

<b>Sistema</b>	<b>Carga térmica total [kW]</b>	<b>COP [kW/kW]</b>	<b>Potência [kW]</b>	<b>Horas [h]</b>	<b>Energia AVAC Anual [kWh]</b>
<b>FREE</b>	395,300	19,180	20,610	6.581,153	135.637,631
<b>EVAP</b>	395,300	16,780	23,558	1.177,678	27.743,519
<b>COP1</b>	395,300	4,381	90,231	467,365	42.170,621
<b>COP2</b>	395,300	4,101	96,391	378,886	36.521,254
<b>COP3</b>	395,300	3,745	105,554	121,687	12.844,580
<b>COP4</b>	395,300	3,633	108,808	33,230	3.615,712
					258.533,316
				<b>COP EUED</b>	<b>13,394</b>
<b>EUED</b>	<b>1,246</b>			<b>Geotérmico</b>	<b>CHICAGO</b>

Conforme a Equação 31 é calculado o TEWI, para as cidades de Chicago, EUA e de Curitiba, Brasil (de acordo com Tabela 28).

Assumindo que serão os mesmos equipamentos de climatização, as emissões diretas de kg CO<sub>2</sub>, quer sejam realizadas em Curitiba ou em Chicago, apresentarão os mesmos valores. É claro que a questão do trato de qualificação técnica nas questões da manutenção pode alterar estes valores, visto que a prática de recolha de fluido refrigerante pode ser diferente entre um país e outro. Porém, ainda não existem dados para comparar níveis de reciclagem de fluido refrigerante em diferentes países. Apenas se pode afirmar que ambos países são participantes do Protocolo de Montreal e de Kigali.

Para a questão de fugas anuais (operações normais, perdas catastróficas e serviços de manutenção), foi utilizado o valor recomendado pela AIRAH no Methods of calculating

Total Equivalent Warming Impact-TEWI-2012, de 12,5% para um sistema centralizado. Utilizou-se para ambas as comparações entre as cidades, 70% para taxa de recuperação de fluidos refrigerantes ao final da vida útil, valor esse sugerido para equipamento com carga de fluido refrigerante com carga menor que 100 kg [102].

Os valores para GWP de acordo com o IPCC [101].

O Data Center onde foram realizadas as simulações do PUE COA e EUED possui 04 equipamentos efetivos de precisão com capacidade nominal de potência térmica de 104,6 kW (ver Figura 9), foi considerado uma carga de fluido refrigerante de 33,17 kg por equipamento, o que é sugerido pelo fabricante, questões específicas de comprimento de tubo de cobre entre unidade evaporadora e condensadora podem influenciar em carga adicional, mas, para efeito de comparação foi utilizado a carga interna sugerida do equipamento, assim os índices de TEWI para Curitiba e Chicago apresentam os seguintes valores, conforme a equação 35:

#### **CO<sub>2</sub> Direto – CURITIBA (CWB):**

$$\text{CO}_2 \text{ Direto CWB} = (2.088 \times (4 \times 33,17) \times 0,125 \times 10) + (132,689 \times (1 - 0,7) \times 2.088)$$

$$\text{CO}_2 \text{ Direto CWB} = 346.320 + 83.116,80$$

$$\text{CO}_2 \text{ Direto CWB} = 429.436,8 \text{ [kg CO}_2\text{/10 anos]}$$

#### **CO<sub>2</sub> Indireto – CURITIBA (CWB):**

$$\text{CO}_2 \text{ Indireto CWB} = 255.489,60 \text{ [Energia consumida CWB]} \times 10 \text{ [anos]} \times 0,093 \text{ [Fator de emissão de CO}_2\text{]}$$

$$\text{CO}_2 \text{ Indireto CWB} = 237.605,328 \text{ [kg CO}_2\text{/10 anos]}$$

Onde, 0,093 é o valor médio do fator de emissão CO<sub>2</sub>, [kg CO<sub>2</sub>/kWh] [99 -106].

#### **TEWI – CURITIBA (CWB):**

$$\text{TEWI}_{\text{CWB}} = \text{CO}_2 \text{ Direto}_{\text{CWB}} + \text{CO}_2 \text{ Indireto}_{\text{CWB}}$$

$$\text{TEWI}_{\text{CWB}} = 429.436,8 + 237.605,328$$

$$\text{TEWI}_{\text{CWB}} = 667.042,128 \text{ [kg CO}_2\text{/10 anos]}$$

### **CO<sub>2</sub> Direto – CHICAGO (CHI):**

$$\text{CO}_2 \text{ Direto}_{\text{CHI}} = \text{CO}_2 \text{ Direto}_{\text{CWB}} = 429.436,8 \text{ [kg CO}_2\text{/10 anos]}$$

### **CO<sub>2</sub> Indireto CHI (CHICAGO).**

O fator de emissão de CO<sub>2</sub> para a cidade de Chicago foi calculado pela média do fator de emissão de CO<sub>2</sub>, conforme dados [101-107], em que o fator de emissão no estado de Illinois para a cidade de Chicago, é de 1,155 [lbCO<sub>2</sub>/kW] que convertidos, providencia o valor de 0,523 [kgCO<sub>2</sub>/kW] utilizado de seguida.

$$\text{CO}_2 \text{ Indireto}_{\text{CHI}} = 258.533,316 \times 10 \times 0,523 \text{ [kg CO}_2\text{/kW}_{\text{gerado}}]$$

$$\text{CO}_2 \text{ Indireto}_{\text{CHI}} = 1.352.129,243 \text{ [kg CO}_2\text{/10 anos]}$$

### **TEWI – CHICAGO (CHI):**

$$\text{TEWI}_{\text{CHI}} = \text{CO}_2 \text{ Direto}_{\text{CHI}} + \text{CO}_2 \text{ Indireto}_{\text{CHI}}$$

$$\text{TEWI}_{\text{CHI}} = 429.436,8 + 1.352.129,243$$

$$\text{TEWI}_{\text{CHI}} = 1.781.566,043 \text{ [kg CO}_2\text{/10 anos]}$$

Na Tabela 28 é apresentada a comparação dos valores de TEWI calculados para as duas cidades. Para realização destes cálculos foi adotada uma vida útil de 10 anos (conforme *ASHRAE Equipment Life Expectancy chart* [108], para os sistemas com todos os fluidos. A emissão de fluidos na atmosfera pode ser dividida em 4 categorias:

- Fugas durante a operação diária;
- Perdas significativas acidentais;
- Perdas durante os planos de manutenção da central;
- Perdas no fim da vida útil da central (descarte).

Estas emissões anuais, com fugas e perdas, são de 12,5% num sistema centralizado. Considera-se 70% para as taxas de recuperação dos fluidos refrigerantes ao final da vida útil, valor sugerido para sistema com carga de refrigerantes menor do que 100 kg. Foram usados os valores de GWP de acordo com o IPCC [101].

Tabela 28 – Comparação dos valores de TEWI de Chicago e Curitiba.

<b>Cidade</b>	<b>Energia consumida anual [kW]</b>	<b>TEWI [kg CO<sub>2</sub>/10 anos]</b>
Chicago	258.533,320	1.781.566,043
Curitiba	255.489,600	667.042,128

De acordo com a Tabela 28, constata-se que mesmo com consumo de energia anual dos sistemas AVAC para as duas cidades é similar, porém os valores de TEWI são extremamente diferentes. A diferença de valores de TEWI corresponde um gasto anual cerca de 270% superior em Chicago do que em Curitiba. O valor de TEWI é tão díspar, porque a rede de transmissão de energia no Brasil, energia interligada e predominantemente hidrelétrica. A energia hidroelétrica é energia proveniente de água corrente de rios. Há mais de 2.000 anos, os antigos gregos usavam a energia hidráulica para operar as rodas para moer grãos. Hoje, está entre os meios mais eficientes em termos de custo de geração de eletricidade e é frequentemente o método preferido quando disponível. Na Noruega, por exemplo, 99% da eletricidade vem da energia hidroelétrica. A maior central hidroelétrica do mundo é a barragem das Três Gargantas de 22,5 GW na China. Produz 80 a 100 TWh/ano, o suficiente para abastecer entre 70 milhões a 80 milhões de domicílios [109].

Projetos de micro hidroelétricas de pequena escala podem fazer uma grande diferença para comunidades em locais remotos. O princípio de funcionamento básico da energia hidroelétrica é o uso de água corrente para movimentar as turbinas. Centrais hidroelétricas consistem em duas configurações básicas: com barragens e reservatórios, ou sem estes. As barragens hidroelétricas com um grande reservatório podem armazenar

água em períodos curtos ou longos para atender à procura de pico. As instalações também podem ser divididas em barragens menores para diferentes propósitos, como uso noturno ou diurno, armazenamento sazonal ou centrais reversíveis com armazenamento bombeado, tanto para bombeamento quanto para geração de eletricidade. A energia hidroelétrica sem barragens e reservatórios significa produzir em uma escala menor, tipicamente de uma instalação projetada para operar em um rio sem interferir no seu fluxo (barragens fio-de-água). Por essa razão, muitos consideram a hidro energia de pequena escala uma opção mais ecológica [110]. As figuras seguintes mostram a capacidade de energia instalada em 2017 nos EUA, em que dos 83.908 MW instalados, ainda tem quase de 12.000 MW de energia misturada, não limpas (sujas ou poluentes), como: carvão mineral e vegetal, energia nuclear, petróleo e gás natural (Figura 37). Nota-se que no Brasil, dos 100.319 MW instalados, não se tem nenhuma energia suja e poluente (Figura 38).

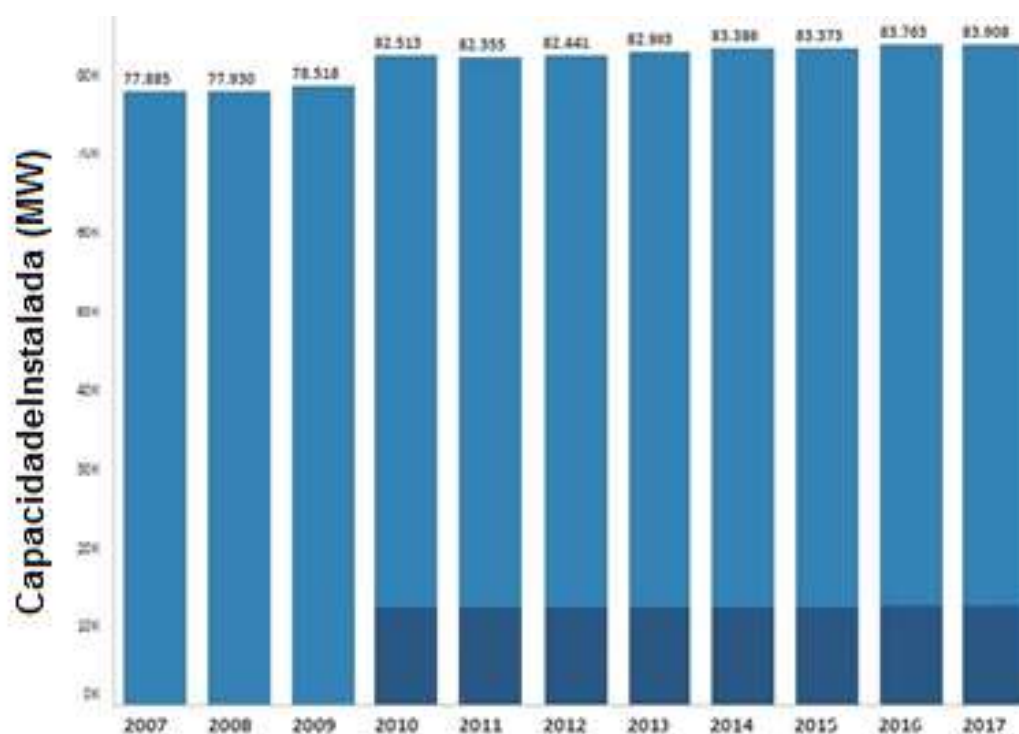


Figura 37 – Capacidade instalada nos EUA [109] (■: Hidroenergia renovável; ■: Centrais mix).

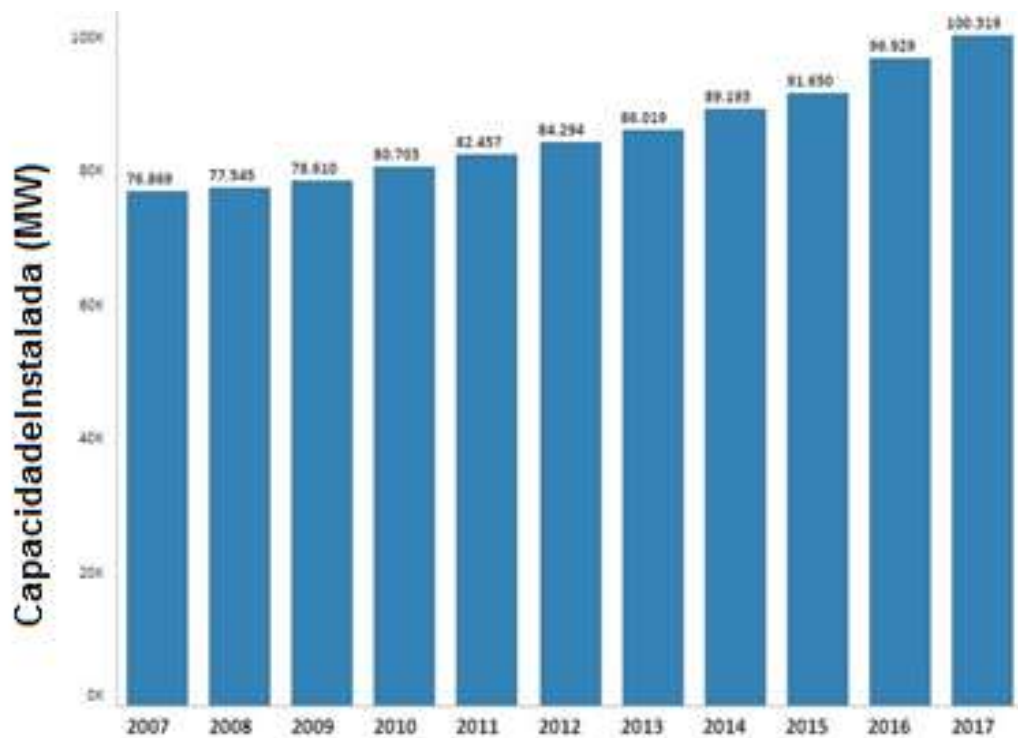


Figura 38 – Capacidade instalada no Brasil [109] (■: Hidroenergia renovável).

Este procedimento foi estendido às restantes cidades analisadas para potencial instalação de uma infraestrutura de DC. Na Tabela 29 é apresentado um resumo dos valores dos índices EUED, COP PUE e TEWI para as cidades brasileiras e para Chicago.

Tabela 29 – Comparação dos índices EUED, COP PUE e TEWI para cidades brasileiras e para Chicago (EUA).

CIDADES	EUED [(kWh/ano)/ (kWh/ano)]	COP PUE <sub>vent</sub> [kW/kW]	Energia consumida [kWh]	TEWI [kg CO <sub>2</sub> /10 anos]
Curitiba	1,277	3,745	255.489,60	667.042,128
S. Paulo (Guarulhos)	1,26	3,642	291.630,596	700.653,254
S. Paulo (Congonhas)	1,263	3,642	301.622,819	709.946,022
B. Horizonte (Panpulha)	1,28	3,551	348.349,544	753.401,876
Campinas	1,285	3,542	363.816,334	767.785,991
Porto Alegre	1,288	3,393	370.609,956	774.104,059
Brasília	1,288	3,633	371.766,371	775.179,525
Anápolis	1,291	3,669	381.720,289	784.436,669
B. Horizonte (T. Neves)	1,294	3,633	388.363,404	790.614,766
Florianópolis	1,298	3,623	399.362,507	800.843,932
Uberaba	1,306	3,471	421.726,973	821.642,885
Londrina	1,32	3,471	461.875,695	858.981,196
Foz do Iguaçu	1,316	3,367	472.083,44	868.474,399
Goiânia	1,366	3,376	591.273,701	979.321,342
Rio Janeiro (S. Dumont)	1,374	3,462	615.215,506	1.001.587,221
Campo Grande	1,375	3,309	616.472,432	1.002.756,162
Rio Janeiro (Galeão)	1,389	3,122	657.507,928	1.040.919,173
Vitória	1,414	3,462	727.716,966	1.106.213,578
F. de Noronha	1,417	3,726	733.645,097	1.111.726,74
Caravelas	1,42	3,675	743.619,998	1.121.003,398
Cuiabá	1,423	3,129	751.551,894	1.128.380,061
Rio Branco	1,434	3,357	783.834,786	1.158.403,151
Maceió	1,437	3,587	791.658,211	1.165.678,936
Salvador	1,443	3,578	810.643,547	1.183.335,299
Porto velho	1,444	3,331	811.992,305	1.184.589,644
Aracajú	1,444	3,633	813.599,993	1.186.084,793
Fortaleza	1,447	3,623	819.672,165	1.191.731,913
São Luis	1,449	3,454	824.973,425	1.196.662,085
Manaus (P. Pelada)	1,449	3,28	825.842,617	1.197.470,434
Recife	1,449	3,454	827.426,702	1.198.943,633
Santarém	1,451	3,462	830.414,61	1.201.722,387
Boa Vista	1,455	3,275	841.340,549	1.211.883,511
Manaus (E. Gomes)	1,455	3,393	842.493,922	1.212.956,147
Macapá	1,455	3,477	842.493,922	1.212.956,147
Belém	1,455	3,541	843.271,716	1.213.679,496
Teresina	1,458	3,138	850.121,267	1.220.049,578
Natal	1,458	3,623	850.121,267	1.220.049,578
Chicago (EUA)	1,246	3,477	258.533,316	1.781.566,043

Por outro lado, na Figura 39 é apresentado o gráfico comparativo da previsão da energia consumida e do índice de impacte total equivalente para o aquecimento global. Aqui é visualmente perceptível a enorme diferença entre os valores de TEWI para sistemas AVAC com consumos aproximadamente iguais, instalados em cidades diferentes, Curitiba e Chicago.

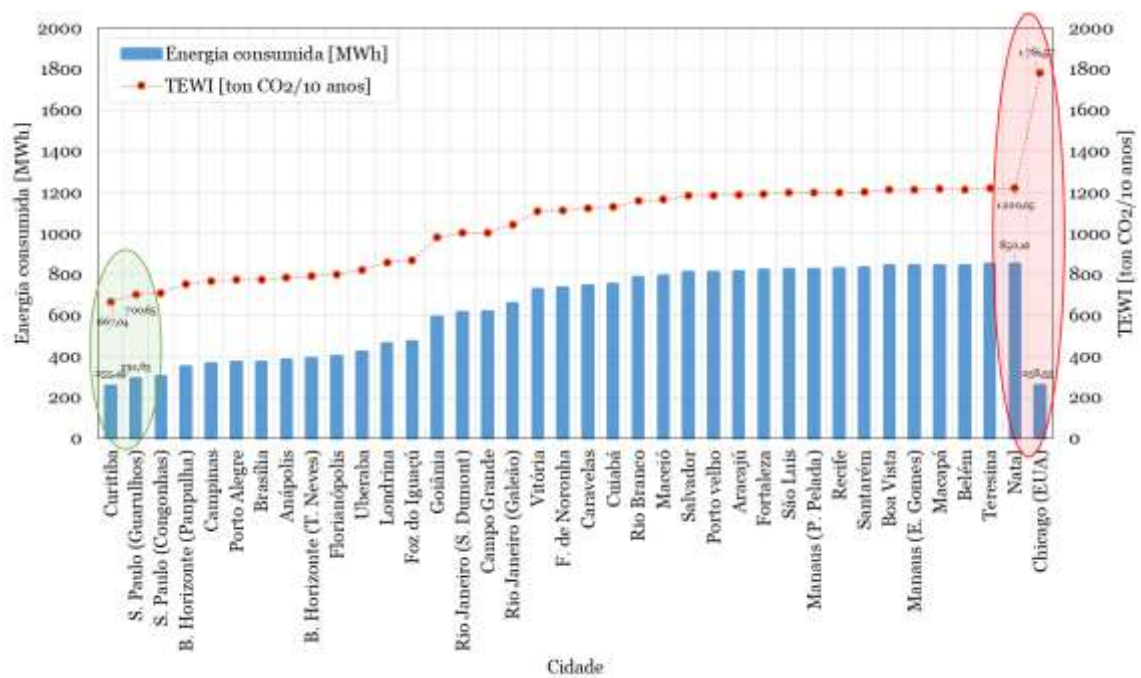


Figura 39 – Gráfico comparativo da energia consumida e TEWI das cidades em estudo.

#### 4.4. Ábaco de Decisão da localização de Data Center

Para gerar um gráfico de decisão onde instalar um DC, sabe-se da importância da decisão da cidade e suas correlações já citadas por via do índice COP EUED. Para tal, foi criado um gráfico onde foi elaborada a correlação entre os índices da climatização correlacionados com o PDD. Este gráfico tem como propósito facilitar a sua utilização pelos investidores em DC. Este ábaco encontra-se exposta na Tabela 30 e pode ser visualizado na Figura 40.

Tabela 30 - Tabela com os dados para gerar equação para demonstrar o ábaco.

<b>Cidades</b>	<b>PDD [kWh/ano/kWh/ano]</b>	<b>COP EUED [kW/kW]</b>
Curitiba	0,803	13,553
São Paulo (Guarulhos)	0,796	11,874
São Paulo (Congonhas)	0,794	11,481
B. Horizonte (Pampulha)	0,784	9,941
Campinas	0,781	9,518
Porto Alegre	0,779	9,343
Brasília	0,779	9,314
Anápolis	0,776	9,072
B. Horizonte (T. Neves)	0,776	8,916
Florianópolis	0,773	8,671
Uberaba	0,769	8,211
Londrina	0,762	7,497
Foz do Iguaçu	0,760	7,335
Goiânia	0,738	5,856
Rio janeiro (S. Dumont)	0,734	5,629
Campo Grande	0,733	5,617
Rio Janeiro (Galeão)	0,726	5,266
Vitória	0,714	4,758
F. de Noronha	0,713	4,720
Caravelas	0,711	4,657
Cuiabá	0,710	4,607
Rio Branco	0,705	4,418
Maceió	0,704	4,374
Porto velho	0,700	4,272
Salvador	0,700	4,264
Aracajú	0,700	4,256
Fortaleza	0,699	4,225
São Luís	0,698	4,197
Manaus (P. Pelada)	0,698	4,193
Recife	0,698	4,185
Santarém	0,697	4,170
Boa vista	0,695	4,116
Manaus (Eduardo Gomes)	0,695	4,110
Macapá	0,695	4,110
Belém	0,695	4,106
Teresina	0,694	4,073
Natal	0,694	4,073

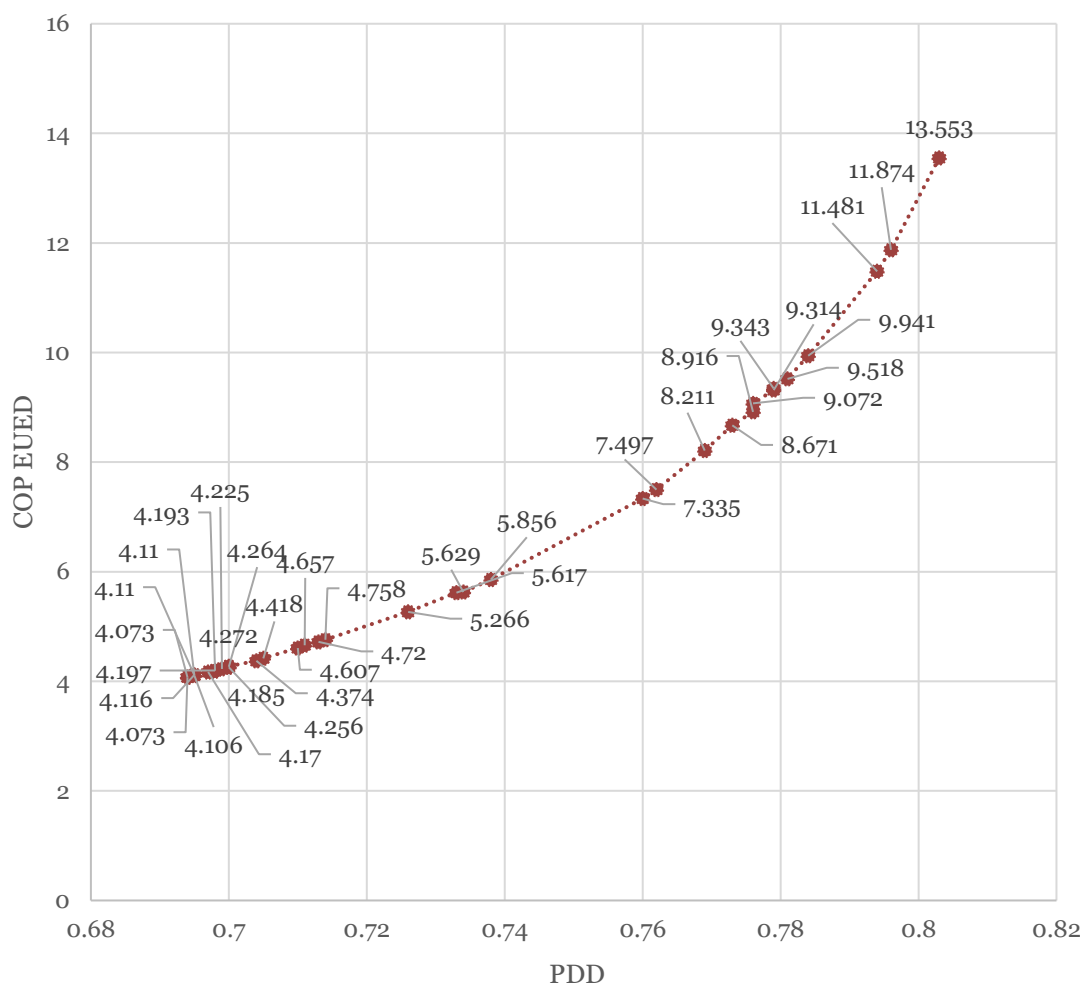


Figura 40 – Relação gráfica do PDD das cidades do estudo.

Conforme o valor do índice PDD, encontra-se a classificação definida na Tabela 31 e exposta na Figura 41. Na Figura 41 estão apresentadas as cidades brasileiras analisadas neste estudo, conforme a classificação do índice PDD, para desenvolvimento do projeto de construção de DC.

Tabela 31 – Classificação para localização de implementação de DC.

Índice	Condições para COP EUED	Classificação para DC
PDD	15,1 a 20	Muito elevado
PDD	>10,1 a 15	Elevado
PDD	>5 a 10	Médio
PDD	0 a 5	Baixo

A classificação do PDD correlacionada com o COP EUED foi elaborada pela divisão em intervalo de 5 kW/kW, atendendo a todos COPs EUED das principais cidades brasileiras, conforme exposto na Figura 41.

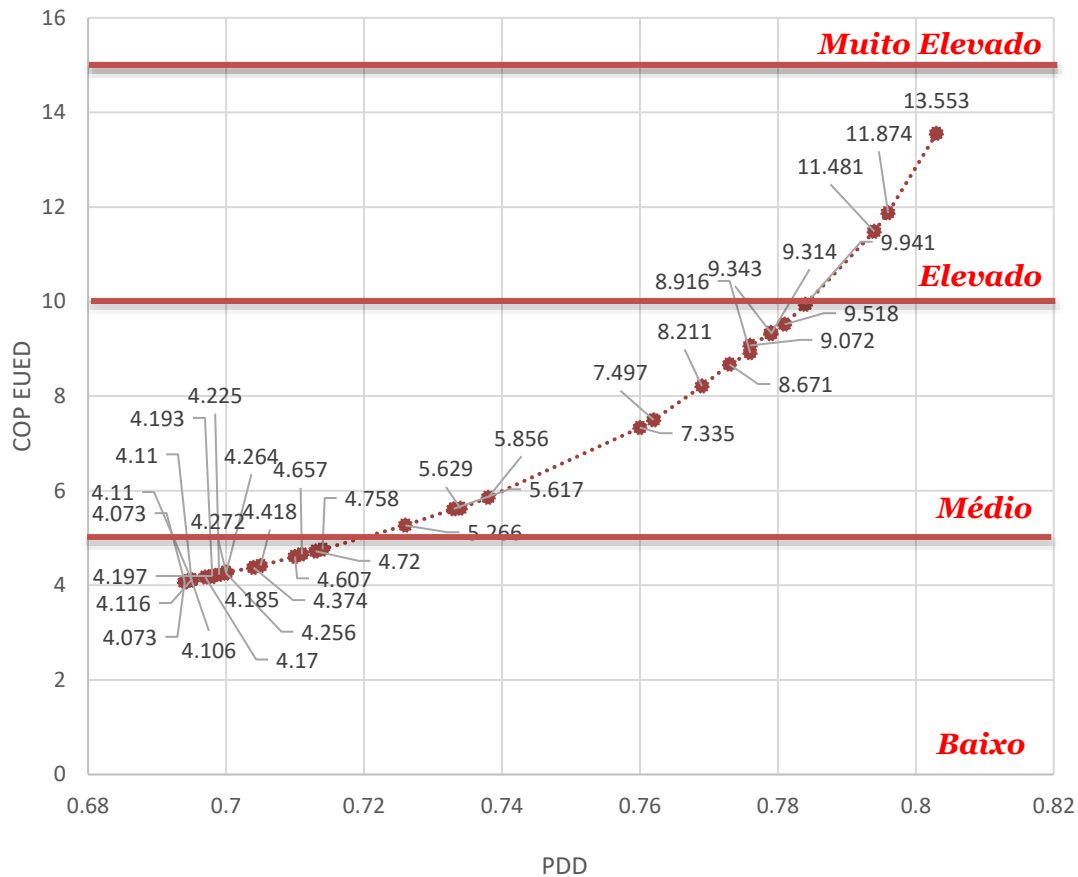


Figura 41 – Relação gráfica do PDD das cidades do estudo (otimizada).

Na Tabela 32 é realizada a classificação das cidades brasileiras quanto à localização de DC em função da relação PDD vs. COP EUED. Verifica-se pela relação entre estes dois índices que as melhores cidades brasileiras para instalar um DC são Curitiba e São Paulo. Por outro lado, as piores localizações para a instalação de uma edificação com as características de um DC são: Natal, Teresina e Belém. Para possuir os valores elevados, é ideal que o número de horas somadas de free cooling e sistema evaporativo seja superior a 7.288,011 horas. Recordar que estes índices consideram que a instalação do DC nestas localidades é acompanhado pela classificação conforme o índice do PDD apresentado na Tabela 32.

Tabela 32 – Cidades brasileiras e sua classificação conforme o índice PDD.

<b>Cidades</b>	<b>PDD [kWh/ano/kWh/ano]</b>	<b>COP EUED [kW/kW]</b>	<b>Classificação</b>
Curitiba	0,803	13,553	Elevado
São Paulo (Guarulhos)	0,796	11,874	Elevado
São Paulo (Congonhas)	0,794	11,481	Elevado
B. Horizonte (Pampulha)	0,784	9,941	Médio
Campinas	0,781	9,518	Médio
Porto Alegre	0,779	9,343	Médio
Brasília	0,779	9,314	Médio
Anápolis	0,776	9,072	Médio
B. Horizonte (T. Neves)	0,776	8,916	Médio
Florianópolis	0,773	8,671	Médio
Uberaba	0,769	8,211	Médio
Londrina	0,762	7,497	Médio
Foz do Iguaçu	0,760	7,335	Médio
Goiânia	0,738	5,856	Médio
Rio janeiro (S. Dumont)	0,734	5,629	Médio
Campo Grande	0,733	5,617	Médio
Rio Janeiro (Galeão)	0,726	5,266	Médio
Vitória	0,714	4,758	Baixo
F. de Noronha	0,713	4,720	Baixo
Caravelas	0,711	4,657	Baixo
Cuiabá	0,710	4,607	Baixo
Rio Branco	0,705	4,418	Baixo
Maceió	0,704	4,374	Baixo
Porto velho	0,700	4,272	Baixo
Salvador	0,700	4,264	Baixo
Aracajú	0,700	4,256	Baixo
Fortaleza	0,699	4,225	Baixo
São Luís	0,698	4,197	Baixo
Manaus (P. Pelada)	0,698	4,193	Baixo
Recife	0,698	4,185	Baixo
Santarém	0,697	4,170	Baixo
Boa vista	0,695	4,116	Baixo
Manaus (Eduardo Gomes)	0,695	4,110	Baixo
Macapá	0,695	4,110	Baixo
Belém	0,695	4,106	Baixo
Teresina	0,694	4,073	Baixo
Natal	0,694	4,073	Baixo

## 4.5. Validação de Resultados

Com intuito de validar o método de aferição do desempenho energético com base no índice EUED, assim como com o índice PDD, foi elaborada uma validação dos resultados com um Data Center existente. Por questões de confidencialidade, a denominação da empresa, tal como a localização do DC não são divulgadas. Todavia, pode se indicar que a cidade simulada para a aplicação dos índices de desempenho foi São Paulo. Foi realizada os cálculos dos índices para uma da Sala Cofre do DC. Trata-se de uma sala modular com 200 m<sup>2</sup> de área construída, criada para proteção física de equipamentos eletrônicos envolvidos no processo de armazenamento de dados, projetada para assegurar extinção de princípio de incêndio, a penetração de poeiras, o efeito de campos eletromagnéticos, ataque contra vandalismo, furto e roubo e suportar explosão externa.

A insuflação de ar é realizada pelo pavimento (tipo *down-flow*), com a distribuição e detalhe apresentados na Figura 42.

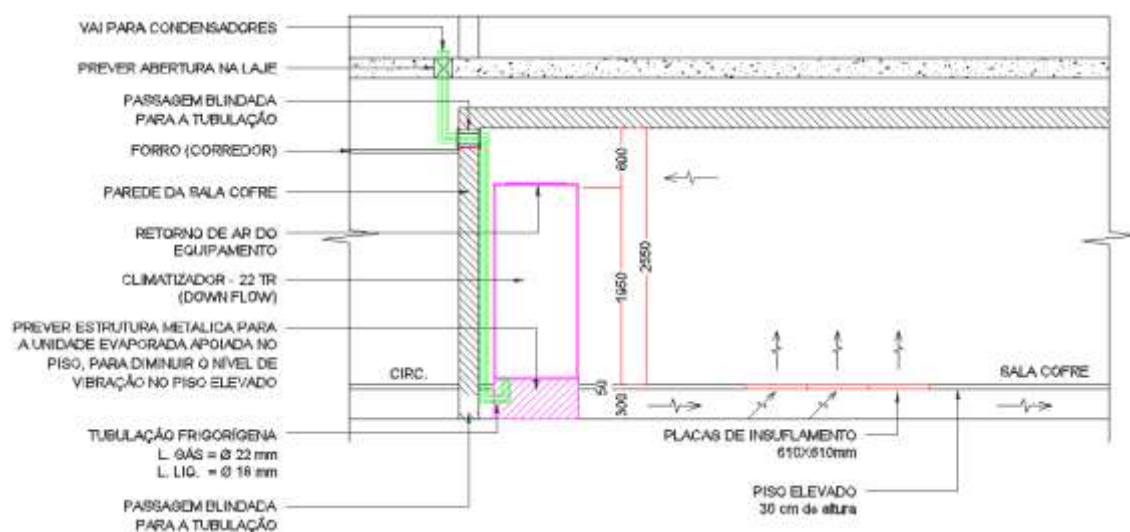


Figura 42 – Sala modular do DC para validação de resultados [69].

A Figura 43 ilustra o retorno do ar pelo teto e a insuflação de ar pelo pavimento (*down-flow*). O equipamento de climatização instalado é de precisão com capacidade de 22 TR.

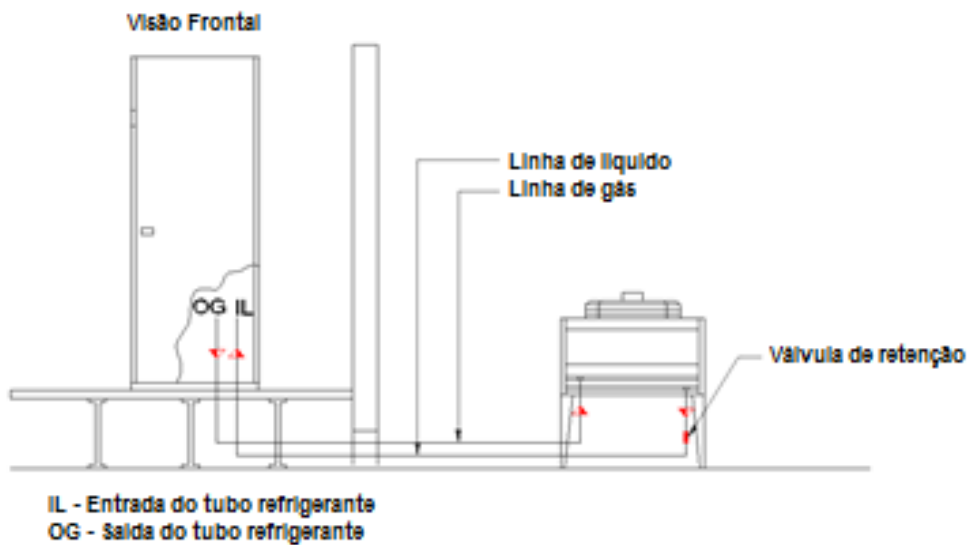


Figura 43 – Unidades de arrefecimento da sala cofre do DC para validação de resultados [69].

As unidades de condensação possuem descarga horizontal. Toda a estrutura é em aço inoxidável. As unidades de condensação encontram-se localizadas nos locais indicados a sombreado na Figura 43. Ao todo encontram-se instaladas na sala cofre do DC, 6 (seis) unidades de arrefecimento, sendo 3 (três) efetivas e 3 (três) reservas, conforme Figura 44.



Figura 44 – Layout da sala cofre do DC para validação de resultados [69].

A sala possui servidores, discos, base de dados (robôs), racks, além dos equipamentos de climatização. As placas indicadas a vermelho na Figura 46 são as placas de insuflação do ar.

Ao todo a distribuição de cargas são:

- Carga elétrica referente a equipamentos de dados = 220 kW;
- Carga elétrica referente a iluminação= 8 kW;
- Carga elétrica referente a ar condicionado= 44 kW x 3 efetivos= 132 kW (com potência do sistema de humidificação e desumidificação);
- Carga elétrica referente a outros sistemas = 2 kW.

$$\text{PUE de projeto} = ((220 \text{ kW} + 8 \text{ kW} + 132 \text{ kW} + 2 \text{ kW})/220 \text{ kW})$$

$$\text{PUE de projeto} = 1,645 \text{ [(kWh/ano)/(kW/ano)]}$$

É importante ressaltar que este valor de PUE de projeto é baseado numa condição de potência máxima do equipamento de ar condicionado (por isso o PUE de Projeto é dado em [(kW/ano)/(kW/ano)]), enquanto que o PUE de campo é dado em unidade de energia [(kWh/ano)/(kWh/ano)], inclusive com a humidificação em série com o funcionamento da máquina. Além disso, os valores de temperatura usados na admissão do ar são baseados na norma AHRI 1361. Nesta norma, a temperatura padrão de admissão do ar no condensador destinada à previsão da eficiência energética dos equipamentos é constante e igual a 35 °C. Também a temperatura de retorno do ar usada em *down-flow* é de bolbo seco com valor de 29 °C. A temperatura de ponto de orvalho é de 11 °C. As especificações técnicas dos equipamentos em catálogo são apresentados na Tabela 33 [60].

Tabela 33 – Características do equipamento de ar condicionado Self 20TR (70,32 kW).

<b>CARACTERÍSTICAS SELF 20 TR (70,32 kW)</b>
Modelo do equipamento: M66 + HBE – 87 – Equipamento Precisão
Potência nominal: 20 TR
Tipo: SELF com condensador remoto
Pressão Estática Disponível: 25 mm.c.a.
Modelo do condensador: HBE 87 – Descarga horizontal
Tipo do compressor: digital scroll (obrigatório)
Fluido refrigerante: ODP zero
Dispositivo de expansão: válvula de expansão termostática
Acessórios: relé de sobrecarga, relé contra falta/inversor fases, pressóstato alta e baixa, filtro secador, válvula de serviço de pressões alta e baixa, acumulação sucção, visor líquido.
Consumo nominal máximo: 44 kW Consumo nominal em operação condições AHRI sem desumidificação e humidificação = 23,70 kW Consumo nominal admissão do ar características em São Paulo a 32°C, com temperatura de condensação a 42°C (108°F) = (6,26 kW dois ventiladores evaporador + 1,43 kW ventilador do condensador + 14,051 kW (compressores) = 21,741 kW
Tensão elétrica: 220 V
Quantidade: 6 (3 efetivos)
Nível de ruído: inferior a 59 dBA

O gráfico exposto na Figura 45 do fabricante Liebert usa a eficiência em BTU/W, usando uma temperatura de evaporação de 45 °F (7,22 °C) e de condensação a 107,6 °F (42 °C). Fazendo uso de um método de interpolação, o resultado específico no compressor será de 17,08 BTU/W, ou seja, na potência de 20 TR (2.400.000 BTU), o consumo de energia será de 14,051 kW para os compressores (somado com o consumo dos ventiladores, o consumo do equipamento será de 21,741 kW).

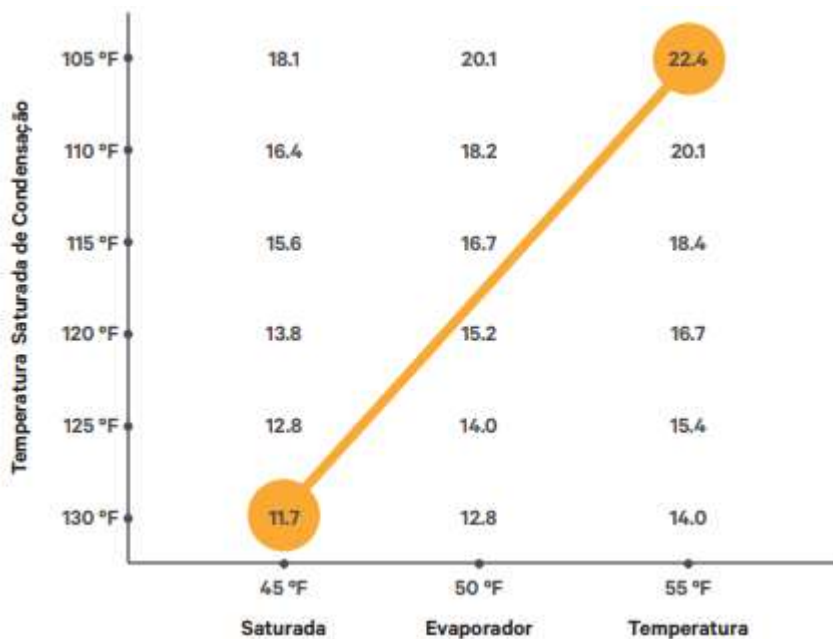


Figura 45 – Operação dos compressores em 4 etapas com o intuito de melhorar a taxa de eficiência energética [110] (Obs.: Eficiência em BTU/W de acordo com as condições de temperatura de condensação) [111].

Na condição de São Paulo da ABNT 16401, considerando a temperatura de admissão do ar do condensador igual a 32 °C para uma temperatura de condensação de 42 °C, o PUE COA será de [63]:

$$\text{PUE COA} = (220 + 8 + 65,223 + 2)/220 = 1,342 \text{ [(kWh/ano)/(kWh/ano)]}$$

Ou seja, quando aplicada a condição de 0,4% das condições da NBR 16401 das temperaturas mais altas (estes mesmos dados encontram-se no ASHRAE *Weather Data Viewer*) [22], e retirado o sistema de desumidificação e humidificação do regime constante), obtém-se para as características específicas das cidades (das 35,1 horas mais quentes do ano), condições diferentes daquelas obtidas usando o consumo do equipamento em condições da AHRI 1361 [60]. Nesse mesmo Data Center, fazendo uso o método do EUED, agora como base nas 8760 horas anuais, com as variações do COP, sistema adiabático e free cooling, são obtidos os valores expostos na Tabela 34.

Tabela 34 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de São Paulo (Congonhas).

Sistema	Carga Térmica Total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC anual [kWh]
Free cooling	220	19,18	11,470	2.574,191	29.526,696
Evaporativo	220	16,78	13,111	4.713,820	61.802,172
COP 1	220	4,14	53,140	906,945	48.195,160
COP 2	220	3,87	56,847	434,482	24699,236
COP 3	220	3,52	62,500	122,639	76.64,943
COP 4	220	3,4	64,706	7,922	512,626
				Σ	172.400,832
				<b>COP EUED</b>	<b>11,179</b>
<b>EUED</b>	<b>1,218</b>			<b>SÃO PAULO (Congonhas)</b>	

Mas, este DC em específico, não possui um sistema que possibilite a utilização de sistema free cooling ou sistema evaporativo, ou seja, para validar o sistema teve que ser realizada uma adaptação do EUED apenas fazendo uso da variação do COP nos COP 1, COP 2, COP 3 e COP 4, colocando todas as horas de free cooling (FC) e de adiabático como COP 1. Deste modo, foram obtidos os seguintes resultados expostos na Tabela 35 para o EUED adaptado.

Tabela 35 - Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de São Paulo (Congonhas) com FC e adiabático adaptado COP1.

Sistema	Carga Térmica Total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC anual [kWh]
FC adap. COP1	220	4,14	53,140	2.574,191	136.792,760
Evap. Adap. COP1	220	4,14	53,140	4.713,820	250.492,860
COP 1	220	4,14	53,140	906,945	48.195,160
COP 2	220	3,87	56,847	434,482	24.699,236
COP3	220	3,52	62,500	122,639	7.664,943
COP4	220	3,4	64,706	7,922	512,625
				Σ	468.357,585
				<b>COP EUED</b>	<b>4,115</b>
<b>EUED</b>	<b>1,315</b>			<b>SÃO PAULO (Congonhas)</b>	

Com intuito de validar o método em campo, foi solicitado ao cliente para colocar um analisador de energia na sala cofre como um todo, e outro específico apenas aos equipamentos de TI, num período de 10 dias (240 horas), dos dias 20 a 29 de Agosto de

2020. No Brasil, este período encontra-se na estação do Inverno, pelo que se o DC possibilitasse fisicamente a utilização de free cooling, os resultados seriam muito positivos, proporcionando uma eficiência elevada no consumo de energia do DC. Porém, ao tratar se de uma sala cofre, instalada no centro do DC, imporia uma dificuldade significativa pela necessidade de instalar tubagem até esta sala.

Os valores de energia adquiridos pelo analisador de energia no período indicado foram:

- Consumo do sistema TI em 240 horas: 40.521 kW/h;
- Consumo de energia DC completo em 240 horas: 51.741 kW/h;

$\text{PUE em energia} = (51.741 / 40.521) = \mathbf{1,277 \text{ [kWh/kWh]}}$

Dos resultados destas análises pode concluir-se:

- 1) Em áreas de DC do tipo sala cofre, o uso dos equipamentos de TI varia ao longo do tempo, pois servidores, discos, robôs, e racks, apesar de possuírem um fator de carga elevado, não apresentam um consumo de energia constante. Esta condição pode ser justificada por haver 1 robô (sistema de base de dados) que impõe variações ao consumo de energia conforme tráfego de dados;
- 2) O método EUED é adaptável, ou seja, mesmo em regime apenas de refrigeração, descartando o sistema free cooling e o sistema evaporativo, ainda assim é possível determinar uma estimativa de consumos anuais. Neste caso, o EUED foi de 1,315 [kWh/kWh], enquanto que em campo, nessas 240 horas, o PUE foi de 1,277 [kWh/ kWh], o que corresponde a uma diferença de 2,9%;
- 3) O PUE COA é muito mais preciso que o PUE de projeto. O PUE de projeto foi de 1,645 [kW/(kW)] e o PUE COA foi de 1,342 [kW/kW], ou seja, como em campo foi obtido um valor de 1,277 [kWh/kWh], entre essas duas opções, o PUE COA teve uma proximidade muito maior do resultado em campo;
- 4) Os testes foram realizados em períodos de inverno, facto que justifica o EUED possuir um valor maior que o PUE em campo;

- 5) Caso o proprietário do DC tivesse a possibilidade de implementar um sistema de free cooling, teria uma economia substancial de energia, visto que o EUED com free cooling e adiabático seria de 1,218 [kWh/kWh];
- 6) Apesar dos índices PUE de projeto e PUE COA serem mensurados em razões de potência, [kW/kW], e que os índices EUED (simulador) e PUE em campo serem mensurados como razões enérgicas, [kWh/kWh], os valores adimensionais e diferenças entre eles são expostos na Figura 46.

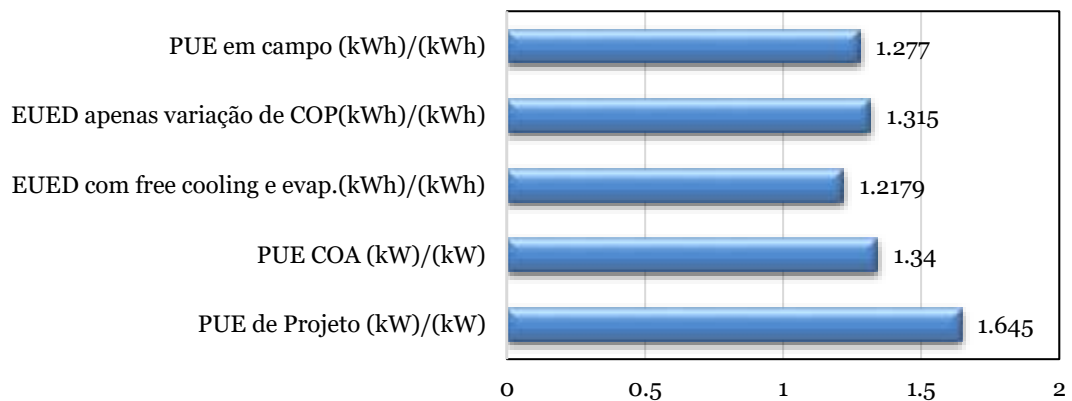


Figura 46 – Comparação dos valores dos índices para o caso de validação.

Quanto aos valores comparativos entre as soluções de DC descritos na Tese com um DC já construído, pode indicar-se que a comparação dos valores de PUE de projeto com o valor determinado no DC apresenta o erro relativo mais elevado, com o valor de 22,3%, fornecendo uma indicação clara de que este índice apresenta fragilidades aquando da previsão da eficiência no uso de energia em fase de projeto. A comparação dos valores em campo de PUE COA apresenta um erro de 4,70%.

Passando à comparação dos valores do EUED de projeto e do DC em operação, verifica-se que quando é comparada a solução inatingível considerando sistema de free cooling ou sistema evaporativo, o erro relativo é de 4,6%. Como pode-se verificar pela análise da Figura 46, o índice de melhor aproximação em fase de projeto com a realidade de campo é o EUED adaptado a apenas variação do COP (erro relativo de 2,9%). Inclusive ao dispensar no método do EUED o uso de free cooling e sistema evaporativo, este índice é preciso para comparação entre equipamentos DC que o atual NSC (*Net Sensible COP*) da

ASHRAE 90.1 de 2019, pois trabalha com temperaturas de condensação variadas ao local de temperatura fixa de admissão do ar no condensador.

Estes resultados reforçam a mais valia dos índices propostos no âmbito deste trabalho.

A Figura 47 expõe os erros absolutos entre os índices, onde a maior assertividade está entre o EUED adaptado para apenas variação do COP, podendo-se observar que o índice mostrou assertividade na maior cidade do Brasil, São Paulo.

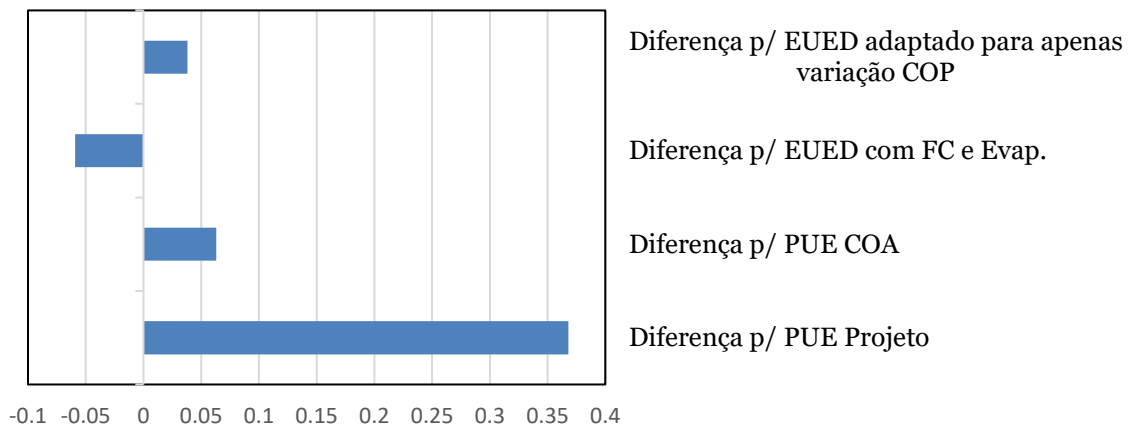


Figura 47 – Erro absoluto dos índices de projeto para os valores em campo.

# Conclusões

## 5.1. Conclusões Gerais

Procurou-se nesta Tese demonstrar um novo método para avaliação do desempenho energético de DC, criando novos índices baseados na correlação do uso da psicrometria e dos conceitos de COP (*Coefficient of Performance*). Com este método foram criados alguns índices:

- Eficiência no Uso de Energia em projeto (EUED – *Energy Usage Effectiveness Design*);
- COP EUED - *Coefficient of performance - Energy Usage Effectiveness Design*;
- Data Center de Design Perfeito (PDD - *Perfect Design Data center*);
- Impacte total do uso de água (TWI - *Total Water Impact*);
- Diagrama Higrotérmico.

O também aplicado o índice de Impacte total do aquecimento equivalente para o aquecimento global (TEWI - *Total Equivalent Warming Impact*) a infraestruturas do tipo DC.

Para fundamentar os índices criados, o diagrama higrotérmico baseado nos 4 elementos, é uma ferramenta interessante para verificar qual o sistema de climatização mais adequado a determinada condição de temperatura e de humidade absoluta do ar. Este diagrama também pode ser útil para sistemas de climatização de recintos para além da esfera de DC.

Para analisar a eficiência energética em novos DC, foram propostos índices que ao invés de considerarem a potência da instalação, usam a energia como elemento de comparação. O estudo do aproveitamento de entalpia é usado como uma nova metodologia para obter os resultados em fase de projeto (EUED). Por outro lado, o PDD é um índice que prioriza a eficiência em ordem crescente e é de fácil interpretação. Trata-se de uma redefinição do EUED. A psicrometria é uma ferramenta essencial para escolher o melhor local para instalar um DC. O consumo de energia com a infraestrutura, dado pela soma do consumo de energia com ar condicionado, equipamentos de TI, iluminação e outros equipamentos, pode ser aplicado a qualquer cidade (região). Com os

valores deste índice foram elaborados uma tabela e gráfico de índices PDD com intuito de gerar classificação para a adequabilidade da localização de um novo Data Center de forma crescente para melhor visualização. Usando esses índices foram feitas simulações em todas as cidades (regiões) significativas do Brasil, (Rio Branco; Manaus (P. Pelada); Manaus (Eduardo Gomes); Macapá; Belém; Santarém; Porto velho; Boa vista; Maceió; Caravelas; Salvador; Fortaleza; São Luis; F. de Noronha; Recife; Teresina; Natal; Aracajú; Brasília; Anápolis; Goiânia; Campo Grande; Cuiabá; Vitória; B. Horizonte (Pampulha); B. Horizonte (T. Neves);Uberaba; Rio janeiro (S. Dumont);Rio Janeiro (Galeão); Campinas; São Paulo (Congonhas); São Paulo (Guarulhos); Curitiba; Foz do Iguaçu; Londrina; Porto Alegre; Florianópolis).

Com as simulações foram encontradas relações entre os índices que permitiram criar um ábaco para a decisão relativa à localização para a implantação de um DC. Com base nestes cálculos, as melhores eficiências no consumo de energia do DC são atingidas se estes forem localizados na cidade de Curitiba com PDD de 0,803 [(kWh/ano)/(kWh/ano)] e na cidade São Paulo com PDD de 0,796 [(kWh/ano)/(kWh/ano)]. As piores cidades para instalar um DC são Natal, com PDD de 0,694 [(kWh/ano)/(kWh/ano)], Teresina com PDD de 0,694 [(kWh/ano)/(kWh/ano)] e Belém com um PDD de 0,695 [(kWh/ano)/(kWh/ano)].

Por outro lado, e face à necessidade de água para os sistemas de climatização nestas instalações, foi proposto o índice TWI. Trata-se de uma ferramenta importante para a escolha entre o sistema com condensação a ar ou a água, seja para instalação num DC ou em outro qualquer tipo de edificação, pois o índice possibilita mensurar a quantidade direta e indireta de consumo de água numa edificação que possua ar condicionado. Nas cidades com dados geotérmicos disponíveis foram feitas simulações com os COP EUED geotérmico.

Além das comparações padrão, foram elaborados cenários envolvendo o índice de índice de impacte total do aquecimento equivalente para o aquecimento global (TEWI), onde, por exemplo, a cidade Curitiba obteve 667.042,128 [kg CO<sub>2</sub>/10 anos], correspondendo à melhor cidade brasileira encontrada. A cidade com pior TEWI é Natal, com um valor de 1.220.049,578 [kg CO<sub>2</sub>/10 anos]. Também foram calculados os valores para a cidade de Chicago nos EUA, cujo TEWI é 1.781.566,043 [kg CO<sub>2</sub>/10 anos]. É importante lembrar que os valores da energia consumida em Curitiba e Chicago são aproximados,

255.489,600 [kW/ano] e 258.533,320 [kW/ano], respectivamente. A análise do EUED associada ao TEWI fornece uma visão eco-energética. Apesar dos valores de energia gastos anuais em Curitiba e Chicago serem próximos, os valores de TEWI em 10 anos são muito diferentes, sendo o valor em Curitiba quase um terço do valor de Chicago. O Rio de Janeiro, cidade mundialmente conhecida pelo calor com altas temperaturas, possui um valor de TEWI inferior ao valor de Chicago, ou seja, em termos de sustentabilidade é mais viável construir um Data Center no Rio de Janeiro que Chicago.

Segundo Masanet et al. [112], o uso de energia de Data Centers está a entrar numa fase crítica. Garantir um futuro de níveis baixos de carbono com uso eficiente da energia não pode esperar mais uma década. Ferramentas como o TEWI associados a EUED podem ser a resposta à necessidade de balancear energia e sustentabilidade em DC.

Lei & Masanet [113] apresentam qualitativamente uma análise estatística para prever o PUE de DC específico à localização e o seu potencial de melhoria. São previstas as mesmas soluções como free cooling, sistema adiabático e geotermia (com ênfase em água oceânica), o que contribui para corroborar as ideias do método inovador desenvolvido nesta Tese. Todavia, quantitativamente, o método do EUED e do PDD são alimentados diretamente com os dados da ASHRAE *Weather Data Viewer* [22], levando a resultado específico de cada cidade. Adicionalmente a metodologia é aberta possuindo índice de COP variado de acordo com as condições externas. Por último, podendo associar-se ao TEWI pode dar uma visão de sustentabilidade na emissão poluente do Data Center, e ainda com o TWI ser uma ferramenta interessante sobre a forma mais sustentável de se escolher entre condensação a ar ou a água. Assim sendo, os resultados expostos nesta Tese, para além da pautada atualidade, configuram-se como um contributo ao conhecimento pela importância crescente dos Data Center, e conseqüentemente do seu consumo de energia.

O método de avaliação pelo índice PDD desenvolvido nesta Tese pode ser usado para o levantamento de um Atlas internacional de decisão para implantação de DC. É importante ressaltar que o método é baseado em princípios psicromodinâmicos, onde a velocidade da tecnologia e melhores índices de COP não interferem no método, apenas sendo necessário atualizar os dados de eficiência dos compressores nas fórmulas.

Atingiu-se portanto o propósito inicial da Tese, demonstrar a possibilidade de usar um método para comparar em fase de projeto as eficiências energéticas em DC, baseado nas

características do ar externo, como temperatura e humidade relativa do ar, e nas 8.760 horas do ano.

O aspeto inovador presente nesta Tese reside na facilidade do investidor no acesso a índices de fácil utilização no momento de decisão da localização de implantação de um DC. Na Tabela 34 encontram-se incluídos os resultados para as principais cidades de Brasil. Adicionalmente, o mesmo método pode ser replicado para qualquer País do mundo. Embora no âmbito desta Tese o caso prático de aplicação resida na localização de DC, estes mapas de soluções de melhor eficiência energética e desempenho térmico poderão ser extrapolados a outros tipos de edifícios.

Pela validação dos resultados dos índices de projeto com os valores obtidos para um DC em operação, verifica-se que o índice de melhor aproximação em fase de projeto com a realidade de campo é o EUED adaptado a apenas variação do COP. Mesmo não considerando neste método de cálculo do EUED o uso de free cooling ou de sistema evaporativo, este índice é preciso para comparação entre equipamentos DC que o atual NSC (*Net Sensible COP*) da ASHRAE 90.1 de 2019, pois trabalha com temperaturas de condensação variadas ao local de temperatura fixa de admissão do ar no condensador.

A ferramenta do ASHRAE *Weather Data Viewer*, guarda os dados higrotérmicos das principais cidades do mundo. O índice EUED dá sentido a esses dados, transformando os dados por intermédio de uma correlação em informação ao investidor para relativamente ao local de instalação de um DC [22].

O método da AHRI 1361 destinado à medida da eficiência energética de equipamentos de DC usa na métrica uma temperatura fixa de admissão de ar. Considerando que a carga térmica é constante, a AHRI considerou que não seria útil um índice de IPLV para equipamentos em DC. Todavia, e apesar da carga térmica ser constante, as variações na temperatura de admissão do ar no condensador geram relações de compressão variáveis que influenciam no COP. A aplicação do método do EUED no uso de equipamentos de climatização usa o COP variado, providenciando mais assertividade, tal como determinado da comparação das simulações de consumo de energia na fase de projeto com os valores determinados no DC já instalado e em operação [60].

O índice EUED privilegia os equipamentos que possuem alto COP em relações de compressão variáveis, além de incentivar o uso de free cooling e de sistema de climatização evaporativo em todas as horas possíveis.

Com os índices TEWI DC e TWI ambos alimentados do consumo de energia anual, é possível mensurar tanto os aspectos diretos como indiretos na questão de efeito estufa e consumo de água, dando uma visão não apenas nas questões pra dentro do DC, como também na questão da fonte de energia que alimenta os DCs.

Assim como o índice IPLV foi um “divisor de águas” para a tomada de decisão na aquisição de equipamento de ar condicionado destinado ao conforto térmico, o EUED pode ser marcante para a tomada de decisão de onde se instalar um DC, usando bases sólidas na ciência baseados nos elementos de psicrometria e dos elementos termodinâmicos dos equipamentos de ar condicionado.

## **5.2. Sugestão de Trabalhos Futuros**

O conjunto de trabalhos desenvolvidos não esgota os assuntos com necessidade de investigação nesta temática, sendo possível estabelecer um conjunto de direções de trabalhos futuros, quer no âmbito desta investigação, quer no que concerne a novas perspectivas que a os resultados obtidos deixam antever para futura investigação.

Poder-se-á desenvolver um trabalho de investigação usando todos os dados de eficiência energética expostos na presente Tese, mas incluindo também com a componente financeira, visto que no Brasil, segundo a ANEEL [110], a energia varia até 2,13 vezes de acordo com a distribuidora de energia elétrica e ou estado, ou seja, uma proposta de trabalho futura poderá consistir num trabalho de investigação que associe a eficiência energética determinada nesta Tese com as simulações nas principais cidades do Brasil, com os valores financeiros desde a implantação até à operação e manutenção dos DC.

O campo das aplicações móveis tem recebido uma elevada atenção nos últimos anos devido ao crescente número de downloads de aplicações para qualquer dispositivo móvel. Com a quarentena decorrente da pandemia de COVID-19, a vida diária sofreu impactos, sendo promovida a vida em ambiente digital, tendo havido um crescimento da

internet no Brasil em torno de 40% a 50%, segundo dados da Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel). Este incremento foi ainda mais elevado para servidores internacionais, apresentando crescimento superior a 50%. Foi registado um fluxo de tráfego de 11 Tb/s em 23 de março de 2020. Este valor é alto e atípico, já que a média de fluxo de tráfego registada durante o ano de 2019 foi de 4,69 Tb/s [112]. No segundo trimestre do ano de 2020, as empresas fabricantes de PCs produziram até 36% mais computadores em relação ao mesmo período de 2019, o que denota a realidade digital imposta pelo confinamento. Os fabricantes de equipamentos já se debatiam com as restrições na cadeia de abastecimento antes que a procura nos EUA aumentasse [113].

Como o enfoque desta Tese residiu em sistemas com grande densidade de dados, uma sugestão de trabalho futuro consistiria na elaboração de um método de medição de eficiência energética apenas para pequenos servidores, cujas vendas incrementaram significativamente durante o confinamento, usando como base apenas a ventilação e sistemas menores de ar condicionado.

A nova era de inovação de software, expõe a computação quântica como impulsionadora. A computação quântica pode permitir que os desenvolvedores ultrapassem limites de desempenho cada vez mais complexos. Na computação quântica, a redução do calor gerado pelo equipamento de computação tradicional é primordial e é o grande desafio, já que estes equipamentos tem que operar um pouco acima de zero absoluto [114].

Reduzindo o calor gerado pelos chips de computação quântica, eles poderão suportar qubits, que são uma versão bidimensional dos bits de computação tradicionais que podem representar simultaneamente "0" e "1" num modelo de computação. Com a redução da resistência também é reduzido o consumo de energia, o que “vai contra o pensamento tradicional do uso de energia do chip num data center” [115]. Reduzindo a temperatura do processador quântico quase para o valor de zero absoluto, é necessário isolá-lo na sua vizinhança para que possa comportar mecanicamente de forma quântica. Em geral, o desempenho aumenta conforme o valor da temperatura é reduzido. O sistema de refrigeração usado para arrefecer o processador é conhecido como diluição frigorífica "seca". Este processo faz uso de hélio líquido em ciclo fechado no qual é reciclado e recondensado usando um cri arrefecedor de tubo de pulso. A refrigeração em circuito fechado elimina a necessidade para reposição no local de hélio líquido e torna o sistema adequado para uso remoto [116]. Qubits, que são definidos usando técnicas litográficas, foram sugeridos para permitir o desenvolvimento de sistemas quânticos escaláveis, podendo estes ser implementados usando tecnologia de fabricação de

semicondutores. No entanto, as principais abordagens de estado sólido funcionam apenas em temperaturas abaixo de 100 mK, onde a potência de arrefecimento é extremamente limitada, e isso afeta severamente as perspectivas práticas da utilização de computação quântica [117]. Os computadores quânticos irão superar os computadores convencionais em várias aplicações importantes, da simulação molecular a algoritmos de pesquisa, uma vez que podem ser escalados para grandes números, normalmente milhões de bits quânticos (qubits). Para a maioria das tecnologias de qubit de estado sólido, por exemplo, aquelas que usam circuitos supercondutores ou spins de semicondutores, o dimensionamento representa um desafio considerável porque cada qubit adicional aumenta o calor gerado, enquanto a potência de arrefecimento dos arrefecedores de diluição é severamente limitada na sua temperatura operacional (menos de 100 mK) [118].

Desenvolver uma aplicação para se calcular facilmente todos os passos para facilitar a visão do resultado do EUED, COP EUED e PDD e outros que possam ser incluídos será benéfico para aplicação de DC quântico.

Já existem computadores quânticos a funcionar a 1,5 K. A tecnologia continua a evoluir neste campo e sabendo que a refrigeração é o maior consumo deste tipo de computadores, um estudo que envolva dados de eficiência energética em servidores quânticos pode certamente ser útil no futuro [119].

Assim como o EUED (simulando as características ambientais em 8.760 horas) gera uma melhoria e visão sistêmica da simulação na área AVAC para instalações do tipo DC (que praticamente possuem carga térmica constante), pode da mesma forma tentar ser desenvolvido um índice EUED para recintos de carga térmica variável. Este poderá ser um estudo significativo de trabalho futuro, pois atualmente é maioritariamente utilizado o IPLV (*Integrated Part Load Value*, AHRI 550/590 de 2015), para comparar equipamentos em cargas parciais. Este índice é baseado nas temperaturas e variações de carga térmica das 29 principais cidades dos Estados Unidos.

No relatório EECCAC (*Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners*) da Comissão da Comunidade Europeia foi considerado que o IPLV não condiz com as características térmicas da Europa. Inclusive dentro da própria Europa, existem entre Europa do Sul e Europa do Norte muitas diferenças de médias anuais de temperatura do ar. Nesse mesmo relatório foi sugerido um modelo exclusivo para a Itália, denominado

de EMPE (*Average Weighed Efficiency in Summer in Italian*), que consiste numa adaptação do IPLV para o regime de temperaturas médias do ar da Itália [120].

A vantagem é que o trabalho futuro poderá adaptar as características da região com o uso de free cooling e sistema adiabático e COP variado em cargas parciais. É claro que esse desenvolvimento deverá criar parâmetros de temperatura de evaporação variável que não é o caso de DC, além das cargas térmicas variáveis que não é o caso de DC, mas a vantagem desse trabalho é que por intermédio de tabelas poderá ser simplificada a tomada de decisão do Investidor na escolha do sistema pela previsão do consumo de energia, reduzindo o tempo de modelação e simulação por via de software como sejam o Energy Plus para pequenas e médias edificações.

Desenvolver um trabalho de investigação usando todos os dados de eficiência energética, aplicando o índice EUED para cada região de forma a mensurar o payback, visto que as simulações se basearam com o pressuposto das tecnologias serem já existentes de free cooling e sistema adiabático, e que numa implantação de uma instalação desta natureza, existem custos financeiros de aporte considerável para aplicar tais tecnologias. Assim, seria relevante analisar a comparação entre a taxa de atratividade vs. taxa interna de retorno para a aplicação da componente financeira aos índices de eficiência energética.

## Referências Bibliográficas

- [1] Datacenterdynamics (2021). Previsões para o mercado de data center. Disponível em <https://www.datacenterdynamics.com/br/opini%C3%B5es/previs%C3%B5es-para-o-mercado-de-data-center/>.
- [2] Mishi, M.R. (2019). Matching geographically distributed microdata centers energy consumption with renewable energy. Master Thesis in Erasmus Mundus Master's Program in Pervasive Computing & Communications for Sustainable Development (PERCCOM), LUT Univery. Lappeenranta, Finlândia.
- [3] NRDC (2014). America's Data Centers are wasting huge amounts of energy. Isseu Brie, iB:14-08-a, Natural Rasoures Defense Council (NRDC), New York, USA.
- [4] Thibodeau, P. (2014). Data centers are the new polluters. ComputerWorld, August 2014.
- [5] REN. (2020). Consumo de energia de Portugal. Disponível em <https://datahub.ren.pt/pt/eletricidade/evolucao-do-consumo/?date=2020-12-31>.
- [6] INE (2011). Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010. Instituto Nacional de Estatística I.P. (INE), Edição 2011, Lisboa, Portugal.
- [7] Steinbrecher, R.A., Schmidt, R. (2011), R. Data Center Environments: ASHRAE's Evolving Thermal Guidelines. ASHRAE Journal, 53(12), 42-49.
- [8] NRDC (2014). Scaling Up Energy Efficiency Across the Data Center Industry: Evaluating Key Drivers and Barriers. Isseu Brie, iB:14-08-a, Natural Rasoures Defense Council (NRDC), New York, USA.
- [9] Villars, R.L. (2019). Worldwide Datacenter census and construction forecast, 2019–2023. Doc # US43797219. International Data Corporation (IDC), Framingham, USA.
- [10] Ayanoglu, E. (2019). Energy Efficiency in Data Centers. IEEE ComSoc Technical Committees Newsletter, November.
- [11] Koomey, J. (2011). Growth in Data center electricity use 2005 to 2010. Analytics Press, Oakland, CA, USA.

- [12] CISCO (2016). Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2015–2020. White Paper, CISCO, San Jose, CA. USA.
- [13] CISCO (2015). Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2014–2019. White Paper FLGD 12352, CISCO, San Jose, CA. USA.
- [14] Greenpeace (2017). Clicking clean: Who is winning the race to build a green internet? Greenpeace Inc. Washington, D.C., USA.
- [15] TECNOBLOG (2016). Novo Data center do Facebook no ártico vai ser resfriado com o clima local. Disponível em <https://tecnoblog.net/81004/datacenter-facebook-artico/>. (acesso em 02 de outubro de 2020)
- [16] The Green Grid (2014). PUE: A comprehensive examination of the metric. ASHRAE datacom series, book 11. The Green Grid Association and ASHRAE TC 9.9, Mission Critical Facilities, Data Centers, Technology Spaces and Electronic Equipment (ISBN 978-1-936504-60-2).
- [17] Zaman, S. k. U., Khan, Atta U. R., Shuja, J., Maqsood, T. (2019). A Systems Overview of Commercial Data Centers: Initial Energy and Cost Analysis.. International Journal of Information Technology and Web Engineering 14(1).
- [18] Rasmussen, N. (2012) Implementing Energy Efficient Data Centers. White Paper 114. Schneider Electric's Data Center Science Center. Schneider-Electric.
- [19] Salom, J., Urbaneck, T., Oró, E. (2017). Advanced Concepts for Renewable Energy Supply of Data Center. River Publishers. Delft, The Netherlands (ISBN: 978-87-93519-42-8).
- [20] EY (2015). Lessons from change: building a better working world. Ernst & Young.
- [21] Capra, F. (2012). A teia da vida, 13ª Edition, Editora Cultrix. São Paulo, Brasil.
- [22] ASHRAE (2016). ASHRAE Weather Data Viewer, version 5.0. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta, GE, USA.
- [23] Oliveira, P.P. (2012). Fundamentos de Termodinâmica Aplicada – Análise Energética e Exergética. Lidel. Lisboa, Portugal.

- [24] Moreira, J. R. S. (1999). Fundamentos e aplicação da psicrometria. Rpa editora. São Paulo, Brasil.
- [25] Sonntag, R.E., Borgnakke, C. (1999). Introduction to Engineering Thermodynamics, 2nd Edition, Wiley.
- [26] Costa, Hudes Natan Oliveira; Fortunato, Valerio Maria. (2007). Renovação de Ar Energeticamente Eficiente em Instalações de Ar Condicionado. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro tecnológico Departamento de Engenharia Mecânica
- [27] Shah, N. (2012). CFD Analisis of direct evaporative cooling zone of air-side economizer for containerized Data Center, Master's Thesis in Mechanical Engineering, University of Texas at Arlington, USA. (Acesso em 4 setembro de 2021).
- [28] Engenhariae arquitetura. Sistemas geotérmicos aplicados ao ar condicionados e refrigeração. Disponível em: <http://www.engenhariae arquitetura.com.br/2018/05/sistemas-geotermicos-aplicados-ao-ar-condicionado-e-refrigeracao>. (Acesso em 12 de março de 2021).
- [29] Egg, J., Howard, B. C. (2011). Geothermal HVAC: Green Heating and Cooling. (The McGraw-Hill Companies, Inc., USA.
- [30] EERE (2015). Geothermal Technologies Program. Geothermal heat pumps. U.S. Department of Energy Geothermal Technologies Program – Geothermal Heat Pumps. U.S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE), Washington, D.C., USA:
- [31] ASHRAE. (2014). Thermal Guidelines for Data Processing Environments, 4rd Edition. ASHRAE Datacom series. ASHRAE Technical Committee (TC) 9.9 - Mission Critical Facilities, Technology Spaces, and Electronic Equipment. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta, GE, USA.
- [32] Sória, A., Filipini, F. A. (2010). Eficiência Energética. Base Editorial, Curitiba, Brasil.
- [33] INMETRO (2016). Etiqueta de Eficiência Energética. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), Brasília, Brasil. Disponível em <http://www2.inmetro.gov.br/pbe/>

[34] PROCEL (2020). Selo Procel de Economia de Energia. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL). Disponível em. <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAFo-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=&params=itemID=%7B329A1A87-3527-4C64-91C7-BA489C167556%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>

[35] Costa, Giulia Ohana de Souza (2020). Sistema de gestão de energia através da iso 50.000: estudo da metodologia voltada para aplicação no setor de saneamento. Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrututa e Território (ilatit) Engenharia de energia. Foz do Iguaçu. Brasil.

[36] ISO (2016). ISO/IEC 30134-2:2016 - Information technology — Data centres — Key performance indicators — Part 2: Power usage effectiveness (PUE). International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland.

[37] CSN EN 50600-4-2. Information technology - Data centre facilities and infrastructures - Part 4-2: Power Usage Effectiveness. European Standard (EN), Brussels, Belgium.

[38] ISO (2016). ISO 17741: 2016 - Sistemas de gestão de energia - Medir o desempenho energético utilizando linhas de base de energia (ENB) e indicadores de desempenho energético (IEVP) - Princípios gerais e orientações. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland.

[39] ASHRAE (2019). ASHRAE Norma 90.1 -2019 - Padrão de energia para edifícios, exceto edifícios residenciais de baixo crescimento (aprovado pela ANSI; co-patrocinado pela IES. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta, GA, USA.

[40] EN (2008). EN 378-1 – 2008 - Refrigerating systems and heat pumps - Safety and environmental requirements - Part 1: Basic requirements, definitions, classification and selection criteria. European Standards, Brussels, Belgium.

[41] Shehabi, A., Smith, S.J., Horner, N., Azevedo, I., Brown, R., Koomey, J., Masanet, E., Sartor, D., Herrlin, M., Lintner, W. (2016). United States Data Center Energy Usage Report. Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-1005775, Berkeley, California, USA.

- [42] The Green Grid (2012). CUE – Carbon Usage Effectiveness. A Green Grid data center sustainability metric. White paper #32. The Green Grid - Information Technology Industry Council (ITI), Washington, D.C., USA.
- [43] The Green Grid (2012). WUE – Water Usage Effectiveness. A Green Grid data center sustainability metric. White paper #35. The Green Grid - Information Technology Industry Council (ITI), Washington, D.C., USA.
- [44] Covas, M.T., Silva, C.A., Dias, L.C. (2013). On locating sustainable Data Centers in Portugal: Problem structuring and GIS-based analysis. *Sustainable Computing: Informatics and Systems* 3(1), 27-35.
- [45] Choa, J., Kimb, B.S. (2011). Evaluation of air management system's thermal performance for superior cooling efficiency in high-density data centers. *Energy and Buildings* 43(9), 2145-2155.
- [46] Ericsson (2019). Ericsson Mobility Report. EAB-19:007381 Uen, Revision A. SE-164 80 Stockholm, Sweden.
- [47] Covas M.T., Silva C.A., Dias L.C. (2015) Multi-Criteria Assessment of Data Centers Environmental Sustainability. In: Bisdorff R., Dias L., Meyer P., Mousseau V., Pirlot M. (eds) *Evaluation and Decision Models with Multiple Criteria. International Handbooks on Information Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [48] Petty, C. (2019). À medida que os gastos passam dos sistemas tradicionais para os serviços em nuvem, há um grande risco e uma grande oportunidade. Gartner.
- [49] Zaidi, T. (2020). Analysis of Energy Consumption on IaaS Cloud Using Simulation Tool. *International Conference on Innovative Advancement in Engineering and Technology (IAET-2020)*, SSRN Electronic Journal. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3553711> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3553711>.
- [50] Ganesh, L., Weatherspoon, H., Marian, T., Birman, K. (2013). Integrated APPROACH to Data Center power management. *IEEE Transactions on Computers* 62(6), 1086-1096.
- [51] Kavanaugh, S., Raffery, K. (2014). *Geothermal Heating and Cooling: Design of Ground Source*, 1st Edition. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta, GA, USA.

- [52] Khalaj, A. H., Abdulla, K., Halgamuge, S. K. (2018). Towards the stand-alone operation of data centers with free cooling and optimally sized hybrid renewable power generation and energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 93, 451-472.
- [53] Lajevardi, B., Haapala, K.R., Junker, J.F. (2015). Real-time monitoring and evaluation of energy efficiency and thermal management of data centers. *Journal of Manufacturing Systems* 37(2), 511-516.
- [54] Patterson, M. K. (2008). The Effect of Data Center temperature on energy efficiency. 2008 11th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, Orlando, FL, 2008, pp. 1167-1174, doi: 10.1109/ITHERM.2008.4544393..
- [55] Goiri, I., Haque, M.E., Le, K., Beauchea, R., Nguyen, T. D., Guitar, J., Torres, J., Bianchini, R. (2015). Matching renewable energy supply and demand in green datacenters. *Ad Hoc Networks* 25(B), 520-534.
- [56] Mission Critical (2017). Data center - Mythology Busters. Magazine. Mission Critical Oct/Nov 2017.
- [57] ASHRAE (2009). Guide Pocket ASHRAE for Air conditioning, Heating, Ventilation, and Refrigeration. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta, GE, USA.
- [58] Covas, M., Silva, C., Dias, L.C. (2010). Search analysis to locate a sustainable data center in Portugal using geographic information systems. Euro XXIV—24th European Conference on Operational Research, Lisbon, 13 July 2010, p. 187.
- [59] ASHRAE. (2019). ASHRAE 90.4-2019 - Standard. Energy Standard for Data Centers- (ANSI Approved). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta, GE, USA.
- [60] AHRI (2017). AHRI Standard 1361 - Standard for Performance Rating of Computer and Data Processing Room Air Conditioners. Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute (AHRI), Arlington, VA, USA.
- [61] AHRI (2015). AHRI\_Standard\_550-590 - Performance Rating of Water-Chilling and Heat Pump Water-Heating Packages Using the Vapor Compression Cycle; Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute (AHRI), Arlington, TX, USA.

- [62] UNIFEI (2012). Eficiência energética: fundamentos e aplicações. 1a. Edição. Elektro. Universidade Federal de Itajubá. Excen. Fupai. Campinas – SP, Brasil.
- [63] Filipini, F. A. (2009). Fundamentos da eficiência energética para Data center. Base Editorial,
- [64] Fagundes, E. M. (2019). Orçamento e custeio para serviços de tecnologia da informação: Guia prático de estratégias para o seu orçamento de TI.
- [65] ABNT NBR 15220:2005 (2005). Estudo do desempenho térmico das edificações. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), São Paulo, Brasil.
- [66] ABNT NBR 15575:2013 (2013). Novos padrões de qualidade para construção de casas e apartamentos. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), São Paulo, Brasil.
- [67] NBR. NBR16401: 2008 (2008). Instalação de Ar condicionado. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), São Paulo, Brasil.
- [68] ABNT NBR 15220-3: 2005 (2005). Cidades classificadas no Zoneamento Bioclimático Brasileiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), São Paulo, Brasil.
- [69] ETP PROJETOS (2021). Projetos de climatização. Curitiba – Paraná – Brasil.
- [70] EMERSONNETWORKPOWER (2016, mar. 02). Característica do equipamento Dual fluid. Disponível em <http://www.emersonnetworkpower.com/en-US/Brands/Liebert/Pages/default.aspx>.
- [71] ASHRAE (1993). Handbook of Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta, GE, USA
- [72] TROX (2016). Software de simulação Trox.
- [73] Santos, A.F., Gaspar, P.D., Hamandosh, A., de Aguiar, E.B., Guerra Filho, A.C., de Souza, H.J.L. (2020). Best practices on HVAC design to minimize the risk of COVID-19 infection within indoor environments. Brazilian Archives of Biology and Technology, 63(e20200335), 1-12..

- [74] PointHeating (2020). Geothermal. Disponível em: <https://www.pointheating.com/geothermal> Acessado em 15/03/2020.
- [75] COOLPACK (2016). Software de simulação Coolpack. collection of simulation models for refrigeration systems. Available online: <https://www.ipu.dk/products/coolpack/> (accessado a 2 de Outubro de 2020).
- [76] AHRI (2017). AHRI 210/240-2017 - Performance Rating of Unitary Air-conditioning & Air-source Heat Pump Equipment. Arlington, VA, USA.
- [77] Srgresearch (2019). Hyperscale Data Center Count Jumps to 510; Another 176 in the Pipeline. Synergy Research Group, Reno, USA. Available online: <https://www.srgresearch.com/articles/hyperscale-data-center-count-jumps-510-mark-us-still-accounts-40> (accessed on 17 Setembro 2020).
- [78] Furukawa (2021). O que est[a gerando o crescimento dos Datacenters. Dispon[ível em <https://furukawabrasil.secure.force.com/pt-br/conexao-furukawa-detalhes/o-que-esta-gerando-o-crescimento-dos-data-centers>. (Acesso em 02 Março de 2021).
- [79] Masanet, E.R. et al. (2018), Global Data Center Energy Use: Distribution, Composition, and Near-Term Outlook, Evanston, IL.
- [80] Datacenterpost. Data center cooling maximizing PUE vs DCiE. Disponível em <https://datacenterpost.com/data-center-cooling-maximizing-pue-and/> (acesso a 30 Março 2021).
- [81] Mission critical magazine. Datacenter power efficiency metrics. Disponível em [https://www.missioncriticalmagazine.com/ext/resources/MC/Home/Files/PDFs/TGG\\_Data\\_Center\\_Power\\_Efficiency\\_Metrics\\_PUE\\_and\\_DCiE.pdf](https://www.missioncriticalmagazine.com/ext/resources/MC/Home/Files/PDFs/TGG_Data_Center_Power_Efficiency_Metrics_PUE_and_DCiE.pdf). (Acesso em 24 de janeiro de 2021).
- [82] WWF (2020). Programa Hidrológico Mundial. World Wide Fund for Nature (WWF). Disponível em: [https://www.wwf.org.br/wwf\\_brasil/wwf\\_mundo/](https://www.wwf.org.br/wwf_brasil/wwf_mundo/) (acesso a 30 Março 2020).
- [83] MMA (2020). Água. Ministério de Meio Ambiente (MMA), Brasília, Brasil. Disponível em: [https://www.mma.gov.br/estruturas/sedr\\_proecotur/\\_publicacao/140\\_publicacao09062009025910.pdf](https://www.mma.gov.br/estruturas/sedr_proecotur/_publicacao/140_publicacao09062009025910.pdf). (acesso a 30 Março 2020).

- [84] WINS (2020). Water Information Network System (WINS). International Hydrological Programme of United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). Disponível em: <http://ihp-wins.unesco.org/> (acesso a 30 Março 2020).
- [85] UN (2019). World Water Development Report 2019. United Nations (UN), Brussels, Belgium. Available online: <https://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2019/> (acesso a 30 Março 2020).
- [86] IBGE (2017). Anuário Estatístico. Instituto Brasileiros de Geografia e Estatística (IBGE), Rio de Janeiro, Brazil.
- [87] ANA (2013). Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. Agência Nacional de Águas (ANA), Brasília, Brasil.
- [88] ABRAVA (2018). Seminário Brasileiro de Etiquetagem em Eficiência Energética para sistemas AVAC. Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA), São Paulo, Brasil.
- [89] NREL (2020). National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, USA. Disponível em: <https://www.nrel.gov/> (acesso a 30 Março 2020).
- [90] APREN (2018). Boletim Energias Renováveis. Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN), Lisboa, Portugal. Disponível em: <https://www.apren.pt/contents/publicationsreportcarditems/12-boletim-energias-renovaveis-2018.Pdf> (acesso a 30 Março 2020).
- [91] EPE (2020). Balanço Energético Nacional. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020\\_sp.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf) (acesso a 13 Setembro 2019).
- [92] UNESCO (2019). The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind. UNESCO World Water Assessment Programme. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, France.
- [93] Akadiri, P. O., Chinyio, E. A., Olomolaiye, P. O. (2012). Design of a Sustainable Building: A Conceptual Framework for Implementing Sustainability in the Building Sector. *Buildings* 2, 126–152.

- [94] Ilha, M. S. O., Oliveira, L. H., Gonçalves, O. M. (2009). Environmental assessment of residential buildings with an emphasis on water conservation. *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 30, 15–26.
- [95] LEED (2020). *Building Design and Construction. LEED\_v4.1\_BDC\_Rating\_System\_1.2020*. Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), U.S. Green Building Council: Washington, DC, USA.
- [96] Al-Ghamdi, S. G., Bilec, M. M. (2015). Life Cycle Thinking and the LEED Rating System: Global Perspective on Building Energy Use and Environmental Impacts *Environ Sci Technol.* 49(7), 4048-4056.
- [97] ASHRAE (2016). *ASHRAE Energy Water Nexus*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Baltimore, MD, USA.
- [98] Santos, A.F., Souza, H.J.L., Cantão, M.P., Gaspar, P.D. (2016). Analysis of temperatures for geothermal heat pumps application in Paraná (Brazil). *Open Engineering* 6(1), 485–491.
- [99] BITZER. Software Bitzer. BITZER Software v6.13.0 rev2417.
- [100] ANSI/AHRI (2011). *ANSI/AHRI Standard 551/591 (SI). with Addendum 3. Standard for Performance Rating Of Water-Chilling and Heat Pump Water-Heating Packages Using the Vapor Compression Cycle*. American National Standards Institute (ANSI) & Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute (AHRI), Arlington, TX, USA
- [101] IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Switzerland, 151 pp. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/>. Acessado em 03 de Outubro de 2020.
- [102] AIRHA (2012). *Methods of Calculating Total Equivalent Warming Impact (TEWI)*. The Australian Institute of Refrigeration, Air Conditioning and Heating (AIRHA), Victoria, Australia.

- [103] Hwang, Y. (2012). Review of Life Cycle Climate Performance. Analysis and IIR Working Party. IIR Working Party: Life Cycle Climate Performance, Bangkok Climate Change Conference, Bangkok, Thailand 30 August - 5 September, 2012.
- [104] Maykoy, R., Weber, G. C., Maciel, R. (2004). Using the TEWI Methodology to Evaluate Alternative Refrigeration Technologies. Paper 709, International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue University, July 12-15, 2004.
- [105] Antunes, A. H. P., Souza, L. M. P., Panato, V. H., Filho, E. P. B. (2014). Efeito da operação de Drop-in do fluido refrigerante R22 por fluidos alternativos no aquecimento global pela análise de TEWI. 9º Congresso Internacional De Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação (MERCOFRIO 2014), Porto Alegre, Brazil, 25 a 27 de agosto, 2014.
- [106] DW. Desmatamento gera 44 dos gases do efeito estufa emitidos no Brasil. Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/desmatamento-gera-44-dos-gases-do-efeito-estufa-emitidos-no-brasil/a-51123835#:~:text=Brasil%20%C3%A9%20o%20sexto%20maior%20emissor%20do%20planeta.&text=No%20geral%2C%20as%20emiss%C3%B5es%20brutas,contra%201%2C932%20bilh%C3%A3o%20em%202017>. Acessado em 07 de Agosto de 2020.
- [107] Miloslick. State Electricity and Emissions Rates. US Department of Energy, Energy Information Administration. Disponível em: [https://www.miloslick.com/EnergyLogger\\_files/State\\_Electricity\\_and\\_Emissions\\_Rates.pdf](https://www.miloslick.com/EnergyLogger_files/State_Electricity_and_Emissions_Rates.pdf). Acessado em 02/09/2020.
- [108] ASHRAE (2017). ASHRAE Equipment Life Expectancy chart. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta, GE, USA.
- [109] IREMA (2020). Renewable Energy Statistics. International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, United Arab Emirates. Disponível em <https://www.irena.org/hydropower> Acessado em 2/10/2020.
- [110] ANEEL (2020). Relatório ranking de tarifas. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Brasília, Brasil. Disponível em <http://aneel.gov.br/relatorio-ranking-tarifas> Acessado em 07/05/2020.

- [111] Masanet, E.R., Shehabi, A., Lei, N., Smith, S., Kooney, J. (2020). Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science* 367(6481), 984-986.
- [112] VERTIV (2020). Disponível em <https://www.vertiv.com/4a068e/globalassets/products/thermal-management/room-cooling/liebert-liebertds-br-bp-latam--18810-sp-ro814.pdf> Acessado em 31/07/2020.
- [113] Lei, N., Masanet, E. R. (2020). Statistical analysis for predicting location-specific data center PUE and its improvement potential. *Energy* 201, 117556.
- [114] Needleman, S., Tilley, A. (2020). Store shelves stripped of laptops as Coronavirus increases working from home. *The Wall Street journal*. March 18, 2020. Acessado em 05/10/2020.
- [115] ANATEL (2020) Balanço 1º semestre de 2020. Disponível em <https://www.anatel.gov.br/paineis/consumidor> Acessado em 21/03/2020.
- [116] SDXCENTRAL. Is quantum computing the answer to future data center innovation. Disponível em <https://www.sdxcentral.com/articles/news/is-quantum-computing-the-answer-to-future-data-center-innovation/2019/05/> acessado em 27/08/2020.
- [117] DWAVESYS. The D-Wave 2X™ Quantum Computer Technology Overview. Disponível em [https://www.dwavesys.com/sites/default/files/D-Wave%202X%20Tech%20Collateral\\_0915F.pdf](https://www.dwavesys.com/sites/default/files/D-Wave%202X%20Tech%20Collateral_0915F.pdf) Acessado em 27/08/2020.
- [118] Petit, L., Eenink, H. G. J., Russ, W. I. L., Hendrickx, N. W., Philips, S. G. J., Clarke, J. S., Vandersypen, L. M. K., Veldhorst, M. (2020). Universal quantum logic in hot silicon qubits. *Nature* 580, 355–359. Doi.org/10.1038/s41586-020-2170-7. 15/04/2020.
- [119] Yang, G. H., Leon, R. C. C., Hwang, J. C. C., Saraiva, A., Tanttu, T., Huang, W., Lemre, J. C., Chan, K. W., Tan, K. Y., Hudson, F. E., Itoh, K. M., Morello, A., Ladrière, M. P., Laucht, A., Dzurak, A. S. (2020). Operation of a silicon quantum processor unit cell above one kelvin. *Nature* 580, 350–354. Doi.org/10.1038/s41586-020-2171-6. 15/04/2020.
- [120] Adnot, J., Rivière, P., Marchio, D., Holmström, M. (2003). Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners (EECCAC). Report number: DGXVII-4.1031/P/00-009 Affiliation: ARMINES. Paris, France.

# Anexo I

Os dados de projeto para 37 localidades brasileiras, agrupadas por região, são listados nas Tabela 36 a 40.

Tabela 36 - Região Norte (ABNT NBR 16401 -1: 2008).

AC	Rio Branco		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s	
			10,00S	67,80W	143m	99,62	90/01		31,4	37,7	0,6	11,2	1,9	
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Out	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jun	TBS	TPO	w	TBSc	
		35,4	25,1	27,3	31,4	26,2	22,1	28,9		14,0	11,3	8,5	17,2	
ΔTmd	1%	34,8	25,1	26,9	31,3	26,0	21,7	28,7		99,6%	16,1	13,2	9,6	18,7
	2%	33,9	25,2	26,5	31,0	25,3	20,8	28,4		99%	16,1	13,2	9,6	18,7
AM	Manaus		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s	
			3,15S	59,98W	84m	100,32	82/01		33,0	36,7	1,4	20,2	1,1	
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Set	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Fev	TBS	TPO	w	TBSc	
		34,8	25,9	27,3	31,5	26,2	21,8	29,3		22,0	19,2	14,1	28,9	
ΔTmd	1%	34,0	25,9	27,0	31,3	26,0	21,6	29,2		99,6%	22,8	20,2	15,1	28,8
	2%	33,2	25,8	26,7	30,8	25,5	21,0	28,7		99%	22,8	20,2	15,1	28,8
AM	Manaus		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s	
			3,03S	60,05W	2m	101,30	82/01		34,0	37,6	0,9	19,7	1,6	
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Set	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jan	TBS	TPO	w	TBSc	
		36,0	26,5	28,5	32,7	27,8	23,8	30,3		21,8	19,0	13,8	28,3	
ΔTmd	1%	35,1	26,3	28,0	32,0	27,1	22,9	29,3		99,6%	21,9	19,8	14,6	27,9
	2%	34,4	26,1	27,5	31,5	26,9	22,5	29,0		99%	21,9	19,8	14,6	27,9
AP	Macapá		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s	
			0,03N	51,5W	15m	101,34	86/01		30,6	35,0	0,5	20,0	4,1	
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Out	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Mar	TBS	TPO	w	TBSc	
		34,0	26,1	27,5	31,5	26,3	21,8	29,9		22,2	20,9	15,9	28,6	
ΔTmd	1%	33,2	26,0	26,9	31,2	25,8	21,2	29,2		99,6%	22,8	21,8	16,4	27,6
	2%	33,0	26,0	26,5	30,9	25,2	20,4	28,3		99%	22,8	21,8	16,4	27,6
PA	Belém		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s	
			1,38S	48,48W	16m	101,13	82/01		31,2	35,2	1,6	20,9	1,3	
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Nov	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Fev	TBS	TPO	w	TBSc	
		33,1	26,1	28,0	30,3	27,2	23,0	29,5		22,8	20,9	15,6	28,7	
ΔTmd	1%	32,8	25,9	27,6	30,2	27,0	22,8	29,4		99,6%	22,8	21,8	16,4	28,7
	2%	32,1	25,8	27,2	30,1	26,6	22,2	29,0		99%	22,8	21,8	16,4	28,7
PA	Santarem		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s	
			2,43S	54,72W	72m	100,46	82/01		32,0	35,6	1,5	20,8	1,6	
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Out	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Mar	TBS	TPO	w	TBSc	
		34,0	25,5	26,7	30,9	25,7	21,1	28,5		22,6	20,2	15,0	29,3	
ΔTmd	1%	33,2	25,5	26,5	30,7	25,2	20,5	28,2		99,6%	22,9	20,9	15,6	28,6
	2%	33,0	25,5	26,2	30,4	25,1	20,4	28,2		99%	22,9	20,9	15,6	28,6
RD	Porto Velho		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s	
			8,77S	63,92W	88m	100,27	83/01		33,6	N/D	N/D	N/D	N/D	
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Set	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jul	TBS	TPO	w	TBSc	
		35,5	25,7	27,7	32,1	26,8	22,7	29,7		17,6	14,0	10,1	21,3	
ΔTmd	1%	34,8	25,7	27,3	31,7	26,2	21,8	29,1		99,6%	19,2	16,1	11,5	22,7
	2%	34,0	25,7	27,0	31,4	26,0	21,6	28,9		99%	19,2	16,1	11,5	22,7
RO	Boa Vista		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s	
			2,83N	60,70W	140m	99,65	82/01		31,2	N/D	N/D	N/D	N/D	
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Out	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jul	TBS	TPO	w	TBSc	
		36,2	25,1	26,5	32,3	25,2	20,7	27,5		22,5	17,8	12,8	31,8	
ΔTmd	1%	35,7	25,0	26,2	31,9	25,1	20,5	27,3		99,6%	22,9	18,1	13,2	31,5
	2%	35,1	24,8	25,9	31,6	24,8	20,1	27,1		99%	22,9	18,1	13,2	31,5

Tabela 37 – Região Nordeste (ABNT NBR 1641 – 1: 20 – 08).

AL	Maceió		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s	
			9,52S	35,76W	115m	99,95	82/01		31,2	35,3	2,1	17,4	1,9	
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umificação		
Mar	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Ago	TBS	TPO	w	TBSc	
		32,6	25,1	26,7	30,0	26,0	21,6	28,4		19,1	17,4	12,6	24,9	
ΔTmd	1%	32,0	24,8	26,2	29,5	25,2	20,6	27,9		99,6%	19,6	18,1	13,2	24,1
	2%	31,3	24,5	25,9	29,2	25,0	20,4	27,7		99%	19,6	18,1	13,2	24,1
BA	Caravelas		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s	
			17,63S	39,25W	4m	101,28	83/94		30,9	34,6	1,8	14,4	1,0	
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umificação		
Fev	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Ago	TBS	TPO	w	TBSc	
		31,8	25,2	26,2	29,9	25,2	20,3	27,4		16,2	14,8	10,5	20,3	
ΔTmd	1%	31,2	25,1	25,8	29,4	24,9	20,0	27,2		99,6%	17,2	15,8	11,2	20,0
	2%	30,9	25,0	25,6	29,1	24,6	19,6	26,9		99%	17,2	15,8	11,2	20,0
BA	Salvador		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s	
			12,90S	38,33W	6m	101,25	82/01		31,8	34,8	2,2	18,6	1,1	
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umificação		
Fev	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Ago	TBS	TPO	w	TBSc	
		32,7	26,7	27,2	31,1	26,1	21,5	29,6		20,2	17,8	12,8	23,5	
ΔTmd	1%	32,0	26,3	26,8	30,6	25,9	21,2	29,4		99,6%	21,1	18,2	13,1	23,6
	2%	31,2	25,9	26,5	30,2	25,2	20,4	29,0		99%	21,1	18,2	13,1	23,6
CE	Fortaleza		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s	
			3,78S	38,53W	29m	101,03	82/01		32,6	35,0	2,3	20,6	1,5	
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umificação		
Jan	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Ago	TBS	TPO	w	TBSc	
		32,2	25,3	26,7	30,0	26,1	21,6	27,6		22,8	17,2	12,3	29,3	
ΔTmd	1%	32,1	25,3	26,5	29,7	25,8	21,2	27,7		99,6%	23,0	18,6	13,5	28,9
	2%	31,9	25,2	26,2	29,4	25,2	20,4	27,5		99%	23,0	18,6	13,5	28,9
MA	São Luis		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s	
			2,60S	44,23W	53m	100,69	84/01		32,0	35,8	1,8	19,8	3,2	
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umificação		
Nov	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Mar	TBS	TPO	w	TBSc	
		34,1	26,3	27,2	31,7	26,2	21,7	29,3		22,8	20,2	15,0	28,8	
ΔTmd	1%	33,8	26,3	26,9	31,4	25,9	21,3	29,1		99,6%	23,0	21,0	15,7	28,4
	2%	33,1	26,1	26,7	31,1	25,3	20,6	28,3		99%	23,0	21,0	15,7	28,4
PE	Fernando de Noronha		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s	
			3,85S	32,42W	56m	100,65	82/01		30,2	35,0	3,2	19,9	2,5	
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umificação		
Jan	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Ago	TBS	TPO	w	TBSc	
		31,1	25,7	26,6	29,7	25,7	21,1	28,9		22,9	19,8	14,6	25,4	
ΔTmd	1%	30,7	25,6	26,2	29,4	25,2	20,5	28,4		99,6%	23,3	20,2	14,9	25,4
	2%	30,2	25,4	26,1	29,2	25,1	20,4	28,3		99%	23,3	20,2	14,9	25,4
PE	Recife		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s	
			8,07S	34,85W	19m	101,10	82/01		32,2	35,9	1,6	19,7	1,1	
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umificação		
Fev	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jul	TBS	TPO	w	TBSc	
		34,1	27,1	27,7	32,6	26,2	21,7	30,8		21,5	18,8	13,7	25,7	
ΔTmd	1%	33,5	26,7	27,2	32,0	26,0	21,4	30,6		99,6%	21,9	19,2	14,0	25,8
	2%	33,0	26,4	26,9	31,6	25,5	20,7	30,0		99%	21,9	19,2	14,0	25,8
PI	Teresina		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s	
			5,05S	42,82W	69m	100,50	83/01		32,6	39,5	1,4	19,2	2,0	
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umificação		
Out	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Mar	TBS	TPO	w	TBSc	
		37,9	24,7	26,9	32,9	25,4	20,7	28,9		21,8	15,2	10,9	33,2	
ΔTmd	1%	37,2	24,6	26,9	32,7	25,1	20,4	28,8		99,6%	22,3	16,3	11,7	32,5
	2%	36,8	24,6	26,4	32,5	24,9	20,2	28,6		99%	22,3	16,3	11,7	32,5

Tabela 38– Região Norte (continuação) e região Centro Oeste (ABNT NBR 16401 – 1: 2008).

RN		Natal		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s
				5,92S	35,25W	52m	100,70	83/01		29,9	34,7	2,0	18,3	2,7
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Fev	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jul	TBS	TPO	w	TBSc	
ΔTmd	1%	32,2	25,3	26,7	29,7	26,1	21,6	28,1		99,6%	21,0	18,8	11,3	27,2
7,0	2%	31,6	25,1	26,1	29,5	25,1	20,4	27,5		99%	21,6	17,9	12,9	26,4

SE		Aracaju		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s
				10,98S	37,07W	9m	101,22	83/01		29,9	35,4	2,2	18,2	1,3
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Fev	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Ago	TBS	TPO	w	TBSc	
ΔTmd	1%	32,1	25,6	27,3	30,6	26,2	21,7	29,5		99,8%	21,1	18,1	13,0	24,4
5,2	2%	31,1	26,2	26,6	30,0	25,8	21,1	29,3		99%	21,9	18,9	13,7	24,5

Tabela A.5 — Região Centro-Oeste

DF		Brasília		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s
				15,87S	47,93W	1061m	89,21	82/01		28,9	34,2	1,4	7,0	2,7
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Out	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jun	TBS	TPO	w	TBSc	
ΔTmd	1%	32,1	18,0	21,9	26,7	20,8	17,6	23,3		99,6%	9,8	3,0	5,3	24,9
11,3	2%	31,1	18,3	21,5	26,4	20,2	16,9	22,6		99%	11,0	4,7	6,0	23,7

GO		Anápolis		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s
				16,23S	48,79W	1137	88,39	83/01		27,3	N/D	N/D	N/D	N/D
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Set	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jun	TBS	TPO	w	TBSc	
ΔTmd	1%	31,7	20,6	23,8	27,1	23,0	20,5	25,3		99,6%	12,8	5,1	6,2	19,0
10,7	2%	30,7	20,5	23,3	26,7	22,3	19,5	24,8		99%	13,9	6,9	7,1	19,3

GO		Goiânia		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s
				16,63S	49,22W	747m	92,67	82/01		30,2	36,6	1,0	8,2	1,9
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Out	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jun	TBS	TPO	w	TBSc	
ΔTmd	1%	35,0	20,3	24,5	29,8	23,1	19,6	28,0		99,8%	11,9	4,7	5,8	25,7
11,7	2%	34,0	20,7	24,1	29,4	22,9	19,3	25,7		99%	13,2	6,2	6,4	23,8

MS		Campo Grande		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s
				20,47S	54,67W	556m	94,62	82/01		30,0	37,6	2,1	4,6	2,0
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Nov	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jun	TBS	TPO	w	TBSc	
ΔTmd	1%	35,8	22,6	26,2	31,7	24,9	21,4	28,8		99,6%	8,1	2,2	4,7	13,1
10,4	2%	34,8	22,8	25,7	31,1	24,2	20,8	27,8		99%	10,5	4,4	5,5	15,6

MT		Cuiabá		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s
				15,65S	56,10W	182m	99,16	82/01		31,3	N/D	N/D	N/D	N/D
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Out	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jul	TBS	TPO	w	TBSc	
ΔTmd	1%	38,0	23,4	28,4	32,1	27,6	24,1	29,9		99,6%	12,8	7,2	6,4	18,6
10,4	2%	36,9	23,5	27,7	31,2	27,0	23,2	29,5		99%	14,8	9,1	7,3	21,9

Tabela 39 – Região Sudeste (ABNT NBR 16401 – 1: 2008).

SP		São Paulo Congonhas		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s
				23,62S	46,65W	803m	92,04	82/01		28,2	34,3	0,9	5,8	2,5
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Fev	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jul	TBS	TPO	w	TBSc	
		32,0	20,3	23,2	27,8	22,1	18,5	25,3		99,6%	8,8	3,9	5,5	18,4
ΔTmd	1%	31,0	20,4	22,6	27,1	21,2	17,5	24,3		99%	10,0	5,8	6,3	17,4
	8,3	2%	30,0	20,4	22,1	26,7	21,0	17,2	24,0					
SP		São Paulo Guarulhos		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s
				23,43S	46,47W	750m	92,63	88/01		29,0	34,8	1,0	3,4	2,8
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Jan	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jul	TBS	TPO	w	TBSc	
		32,9	22,3	24,9	28,7	24,1	20,8	25,8		99,6%	7,0	3,9	5,5	13,5
ΔTmd	1%	31,8	22,0	24,2	27,9	23,2	19,7	25,1		99%	8,9	6,0	6,3	14,9
	8,9	2%	30,8	21,7	23,7	27,3	22,9	19,3	24,9					
ES		Vitória		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s
				20,27S	40,28W	4m	100,28	82/01		30,6	36,8	1,0	14,3	1,7
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Fev	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Ago	TBS	TPO	w	TBSc	
		34,0	25,5	27,0	30,1	26,2	21,6	28,1		99,6%	16,5	12,8	9,2	21,0
ΔTmd	1%	33,1	25,2	26,6	29,7	26,0	21,3	28,0		99%	17,5	14,0	9,9	21,2
	8,0	2%	32,2	25,0	26,2	29,4	25,2	20,4	27,5					
MG		Belo Horizonte Pampulha		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s
				19,85S	43,95W	785m	92,24	82/01		28,4	N/D	N/D	N/D	N/D
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Fev	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jun	TBS	TPO	w	TBSc	
		33,0	20,7	23,0	28,5	21,9	18,3	24,2		99,6%	11,5	4,9	5,9	22,8
ΔTmd	1%	32,0	20,7	22,6	28,1	21,2	17,5	23,6		99%	12,8	6,8	6,7	21,4
	9,6	2%	31,1	20,7	22,2	27,6	21,0	17,2	23,4					
MG		Belo Horizonte Tancarido Neves		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s
				19,83S	43,93W	917m	90,78	90/01		28,4	34,6	0,9	8,4	1,8
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Fev	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Ago	TBS	TPO	w	TBSc	
		32,1	20,5	23,3	28,2	22,1	18,8	25,1		99,6%	11,1	4,9	6,0	21,2
ΔTmd	1%	31,1	20,8	22,8	27,9	21,2	17,8	24,4		99%	12,2	6,1	6,5	20,3
	9,7	2%	30,2	20,7	22,4	27,5	21,0	17,6	24,2					
MG		Uberaba		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s
				19,78S	47,97W	807m	92,00	83/01		29,7	35,9	1,5	6,7	3,0
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Out	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jun	TBS	TPO	w	TBSc	
		33,6	19,3	23,2	28,4	22,1	18,5	24,8		99,6%	10,5	1,8	4,7	22,8
ΔTmd	1%	32,7	19,6	22,8	28,0	21,6	17,9	24,3		99%	12,7	3,3	5,3	22,6
	10,8	2%	31,8	19,9	22,5	27,7	21,1	17,4	23,9					
RJ		Rio de Janeiro Santos Dumont		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s
				22,90S	43,17W	3m	101,29	84/01		N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Fev	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jul	TBS	TPO	w	TBSc	
		34,0	25,2	26,6	30,8	25,3	20,4	29,1		99,6%	16,1	11,8	8,6	19,5
ΔTmd	1%	32,7	25,0	26,2	30,3	25,0	20,1	28,9		99%	17,0	12,9	9,3	19,5
	6,1	2%	31,8	24,9	25,8	29,9	24,6	19,6	28,4					
RJ		Rio de Janeiro Galeão		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s
				22,82S	43,25W	6m	101,25	82/01		32,4	40,2	2,2	11,6	3,2
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Fev	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jul	TBS	TPO	w	TBSc	
		38,1	25,8	28,1	32,8	27,1	22,9	30,1		99,6%	14,8	9,9	7,6	23,2
ΔTmd	1%	36,2	25,3	27,5	32,0	26,2	21,7	29,3		99%	15,8	11,2	8,3	22,5
	9,8	2%	35,0	25,2	27,0	31,3	26,0	21,4	29,1					
SP		Campinas		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s
				23,00S	47,13W	681m	93,63	82/01		29,4	35,8	1,4	5,5	2,5
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
Fev	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jun	TBS	TPO	w	TBSc	
		33,2	21,9	24,4	29,5	23,1	19,3	26,1		99,6%	8,6	3,9	5,4	16,8
ΔTmd	1%	32,2	21,7	23,8	28,9	22,2	18,4	25,3		99%	10,0	5,9	6,2	17,7
	9,8	2%	31,3	21,5	23,4	28,4	22,0	18,1	25,2					

Tabela 40 – Região Sudeste (continuação) ABNT NBR 16401 – 1: 2008.

SP		São Paulo Congonhas		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s
				23,62S	46,65W	803m	92,04	82/01		28,2	34,3	0,9	5,8	2,5
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
		TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jul	TBS	TPO	w	TBSc	
	0,4%	32,0	20,3	22,2	27,8	22,1	18,5	25,3		99,6%	8,8	3,9	5,5	18,4
ΔTmd	1%	31,0	20,4	22,6	27,1	21,2	17,5	24,3		99%	10,0	5,8	6,3	17,4
8,3	2%	30,0	20,4	22,1	26,7	21,0	17,2	24,0						

SP		São Paulo Guarulhos		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s
				23,43S	46,47W	750m	92,63	88/01		29,0	34,8	1,0	3,4	2,8
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
		TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jul	TBS	TPO	w	TBSc	
	0,4%	32,9	22,3	24,9	28,7	24,1	20,8	25,8		99,6%	7,0	3,9	5,5	13,5
ΔTmd	1%	31,8	22,0	24,2	27,9	23,2	19,7	25,1		99%	8,9	6,0	6,3	14,9
8,9	2%	30,8	21,7	23,7	27,3	22,9	19,3	24,9						

Tabela A.7 — Região Sul

PR		Curitiba		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s
				25,52S	49,17W	908m	90,88	82/01		27,4	32,9	1,0	-1,4	2,0
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
		TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jul	TBS	TPO	w	TBSc	
	0,4%	30,9	20,2	23,2	26,8	22,2	18,9	24,3		99,6%	2,4	-1,2	3,8	6,7
ΔTmd	1%	29,8	20,2	22,6	26,2	21,7	18,3	23,9		99%	4,8	1,7	4,8	9,3
9,5	2%	28,7	20,2	22,0	25,6	21,1	17,6	23,2						

PR		Foz de Iguaçu		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s
				25,52S	54,58W	243m	98,44	85/01		29,4	37,2	0,9	0,1	1,9
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
		TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jul	TBS	TPO	w	TBSc	
	0,4%	35,1	23,6	26,1	31,6	24,6	20,1	28,7		99,6%	3,4	1,1	4,2	6,3
ΔTmd	1%	34,1	23,7	25,6	31,1	24,0	19,5	28,2		99%	5,8	3,1	4,9	8,0
11,1	2%	33,1	23,5	25,1	30,6	23,5	18,9	27,7						

PR		Londrina		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s
				23,33S	51,13W	570m	94,86	84/01		30,2	35,7	1,5	3,9	2,0
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
		TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jul	TBS	TPO	w	TBSc	
	0,4%	33,9	21,7	25,3	28,9	24,4	20,7	26,6		99,6%	7,2	1,2	4,4	13,4
ΔTmd	1%	32,8	21,8	24,7	28,5	23,9	20,2	26,2		99%	9,3	3,8	5,3	15,2
10,0	2%	31,9	21,9	24,2	28,0	23,2	19,3	25,6						

RS		Porto Alegre		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s
				30,00S	51,18W	3m	101,29	82/01		N/D	37,9	1,4	1,6	2,4
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
		TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jul	TBS	TPO	w	TBSc	
	0,4%	34,8	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D		99,6%	4,0	N/D	N/D	N/D
ΔTmd	1%	33,2	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D		99%	5,8	N/D	N/D	N/D
9,7	2%	31,8	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D						

SC		Florianópolis		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s
				27,67S	48,55W	5m	101,26	82/01		30,1	35,2	1,7	3,4	1,9
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação		
		TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jul	TBS	TPO	w	TBSc	
	0,4%	32,2	25,5	26,6	30,1	25,8	21,1	28,5		99,6%	7,5	3,0	4,7	11,3
ΔTmd	1%	31,0	25,2	26,0	29,3	25,0	20,2	27,7		98%	9,2	5,1	5,4	11,8
6,7	2%	29,9	24,6	25,5	28,5	24,5	19,5	27,1						



## Anexo II

Neste anexo encontra-se os as Tabelas 41 a 76, de cálculo do EUED para as cidades brasileiras analisadas ao longo da Tese.

Tabela 41 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Rio Branco.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
FC	395,3	19,18	20,610	94,623	1.950,181
EVAP	395,3	16,78	23,558	440,525	10.377,802
COP1	395,3	4,381	90,230	5.532,864	499.233,286
COP2	395,3	4,101	96,391	1.395,682	134.531,371
COP3	395,3	3,745	105,554	1.014,332	107.066,928
COP4	395,3	3,633	108,808	281,920	30.675,217
				Σ	783.834,786
				<b>COP EUED</b>	<b>4,418</b>
<b>EUED</b>	<b>1,419</b>				<b>RIO BRANCO</b>

Tabela 42 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Manaus (P. Pelada).

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
FC	395,3	19,18	20,610	0,000	0,000
EVAP	395,3	16,78	23,558	2,308	54,362
COP1	395,3	4,381	90,231	5.069,816	457.452,228
COP2	395,3	4,101	96,391	2.344,899	226.027,417
COP3	395,3	3,745	105,554	1.173,398	123.856,961
COP4	395,3	3,633	108,808	169,580	18.451,649
				Σ	825.842,617
				<b>COP EUED</b>	<b>4,193</b>
<b>EUED</b>	<b>1,433</b>				<b>MANAUS P. PELADA</b>

Tabela 43 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Manaus (Eduardo Gomes).

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
FC	395,300	19,180	20,610	0,000	0,000
EVAP	395,300	16,780	23,558	4,841	114,037
COP1	395,300	4,381	90,231	2.685,691	242.331,355
COP2	395,300	4,101	96,391	4.565,470	440.070,743
COP3	395,300	3,745	105,554	1.127,670	119.030,155
COP4	395,300	3,633	108,808	376,329	40.947,633
				Σ	842.493,922
				<b>COP EUED</b>	<b>4,110</b>
<b>EUED</b>	<b>1,438</b>				<b>Manaus (EDUARDO GOMES)</b>

Tabela 44 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Macapá.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
FC	395,3	19,18	20,610	0,000	0,000
EVAP	395,3	16,78	23,558	4,841	114,037
COP1	395,3	4,381	90,231	2.685,691	242.331,355
COP2	395,3	4,101	96,391	4.565,470	440.070,743
COP3	395,3	3,745	105,554	1.127,670	119.030,155
COP4	395,3	3,633	108,808	376,329	40.947,633
				Σ	842.493,922
				<b>COP EUED</b>	<b>4,110</b>
<b>EUED</b>	<b>1,438</b>				<b>MACAPÁ</b>

Tabela 45 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Belém.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
<b>FC</b>	395,300	19,180	20,610	0,000	0,000
<b>EVAP</b>	395,300	16,780	23,558	0,042	0,990
<b>COP1</b>	395,300	4,381	90,231	1.828,055	164.946,381
<b>COP2</b>	395,300	4,101	96,391	5.834,272	562.372,019
<b>COP3</b>	395,300	3,745	105,554	1.069,091	112.846,865
<b>COP4</b>	395,300	3,633	108,808	28,541	3.105,462
				Σ	843.271,716
				<b>COP EUED</b>	<b>4,106</b>
<b>EUED</b>	<b>1,438</b>				<b>BELÉM</b>

Tabela 46 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Santarém.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
<b>FC</b>	395,300	19,180	20,610	0,000	0,000
<b>EVAP</b>	395,300	16,780	23,558	0,163	3,839
<b>COP1</b>	395,300	4,381	90,231	4.565,448	411.942,842
<b>COP2</b>	395,300	4,101	96,391	2.677,726	258.108,989
<b>COP3</b>	395,300	3,745	105,554	1.434,014	151.366,004
<b>COP4</b>	395,300	3,633	108,808	82,649	8.992,936
				Σ	830.414,610
				<b>COP EUED</b>	<b>4,170</b>
<b>EUED</b>	<b>1,434</b>				<b>SANTARÉM</b>

Tabela 47 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Porto Velho.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
FC	395,300	19,180	20,610	21,644	446,076
EVAP	395,300	16,780	23,558	123,161	2.901,398
COP1	395,300	4,381	90,230	5.727,491	516.794,662
COP2	395,300	4,101	96,391	1.510,295	145.579,052
COP3	395,300	3,745	105,554	1.106,976	116.845,835
COP4	395,300	3,633	108,808	270,433	29.425,283
				Σ	811.992,305
				<b>COP EUED</b>	<b>4,265</b>
<b>EUED</b>	<b>1,428</b>				<b>PORTO VELHO</b>

Tabela 48 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Boa Vista.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
FC	395,300	19,180	20,6103	0	0
EVAP	395,300	16,780	23,558	0,442	10,418
COP1	395,300	4,381	90,230	4.244,697	383.001,283
COP2	395,300	4,101	96,391	2.202,074	212.260,392
COP3	395,300	3,745	105,554	1.715,268	181.053,500
COP4	395,300	3,633	108,808	597,519	65.014,955
				Σ	841.340,549
				<b>COP EUED</b>	<b>4,116</b>
<b>EUED</b>	<b>1,438</b>				<b>BOA VISTA</b>

Tabela 49 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de cidade Maceió.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
FC	395,300	19,180	20,610	0,000	0,000
EVAP	395,300	16,708	23,558	257,863	6.074,684
COP1	395,300	4,381	90,231	6.289,659	567.519,373
COP2	395,300	4,101	96,391	1.694,119	163.298,082
COP3	395,300	3,745	105,554	502,607	53.052,260
COP4	395,300	3,633	108,808	15,751	1.713,812
				Σ	791.658,211
				<b>COP EUED</b>	<b>4,374</b>
<b>EUED</b>	<b>1,421</b>				<b>MACEIÓ</b>

Tabela 50 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Caravelas.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
FC	395,300	19,180	20,610	39,615	816,461
EVAP	395,300	16,780	23,558	852,063	20.072,740
COP1	395,300	4,381	90,231	6.188,262	558.370,222
COP2	395,300	4,101	96,391	1.414,533	136.348,406
COP3	395,300	3,745	105,554	263,303	27.792,743
COP4	395,300	3,633	108,808	2,017	219,426
				Σ	743.619,998
				<b>COP EUED</b>	<b>4,657</b>
<b>EUED</b>	<b>1,406</b>				<b>Caravelas</b>

Tabela 51 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Salvador.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
FC	395,300	19,180	20,610	0,201	4,146
EVAP	395,300	16,780	23,558	35,791	843,156
COP1	395,300	4,381	90,231	5.702,766	514.563,671
COP2	395,300	4,101	96,391	2.584,903	249.161,659
COP3	395,300	3,745	105,554	432,183	45.618,658
COP4	395,300	3,633	108,808	4,156	452,258
				Σ	810.643,547
				<b>COP EUED</b>	<b>4,272</b>
<b>EUED</b>	<b>1,428</b>				<b>SALVADOR</b>

Tabela 52 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Fortaleza.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
FC	395,300	19,180	20,610	0,000	0,000
EVAP	395,300	16,780	23,558	0,292	6,875
COP1	395,300	4,381	90,231	5.151,877	464.856,634
COP2	395,300	4,101	96,391	2.839,194	273.673,121
COP3	395,300	3,745	105,554	767,790	81.043,398
COP4	395,300	3,633	108,808	0,847	92,137
				Σ	819.672,165
				<b>COP EUED</b>	<b>4,225</b>
<b>EUED</b>	<b>1,431</b>				<b>FORTALEZA</b>

Tabela 53 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de São Luis.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
<b>FC</b>	395,300	19,180	20,610	0,139	2,855
<b>EVAP</b>	395,300	16,780	23,558	0,997	23,478
<b>COP1</b>	395,300	4,381	90,231	5.190,032	468.299,427
<b>COP2</b>	395,300	4,101	96,391	2.212,646	213.279,478
<b>COP3</b>	395,300	3,745	105,554	1.289,430	136.104,620
<b>COP4</b>	395,300	3,633	108,808	66,756	7.263,566
				Σ	824.973,425
				<b>COP EUED</b>	<b>4,198</b>
<b>EUED</b>	<b>1,432</b>				<b>SÃO LUIS</b>

Tabela 54 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Fernando de Noronha.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
<b>FC</b>	395,300	19,180	20,610	0,221	4,546
<b>EVAP</b>	395,300	16,780	23,558	0,667	15,709
<b>COP1</b>	395,300	4,381	90,231	5.190,032	468.299,427
<b>COP2</b>	395,300	4,101	96,391	2.616,924	252.248,293
<b>COP3</b>	395,300	3,745	105,554	121,881	12.865,021
<b>COP4</b>	395,300	3,633	108,808	1,949	212,102
				Σ	733.645,097
				<b>COP EUED</b>	<b>4,720</b>
<b>EUED</b>	<b>1,402</b>				<b>FERNANDO NORONHA</b>

Tabela 55 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Recife.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
FC	395,300	19,180	20,610	0,000	0,000
EVAP	395,300	16,780	23,558	3,193	75,217
COP1	395,300	4,381	90,231	4.379,035	395.122,666
COP2	395,300	4,101	96,391	3.283,616	316.511,442
COP3	395,300	3,745	105,554	1.025,101	108.203,572
COP4	395,300	3,633	108,808	69,056	7.513,806
				Σ	827.426,702
				<b>COP EUED</b>	<b>4,185</b>
<b>EUED</b>	<b>1,433</b>				<b>RECIFE</b>

Tabela 56 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Teresina.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
FC	395,300	19,180	20,610	0,000	0,000
EVAP	395,300	16,780	23,558	17,047	401,598
COP1	395,300	4,381	90,231	3.927,310	354.363,328
COP2	395,300	4,101	96,391	1.859,599	179.248,831
COP3	395,300	3,745	105,554	1.700,668	179.512,479
COP4	395,300	3,633	108,808	1.255,375	136.595,031
				Σ	850.121,267
				<b>COP EUED</b>	<b>4,073</b>
<b>EUED</b>	<b>1,441</b>				<b>TERESINA</b>

Tabela 57 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Natal.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
<b>FC</b>	395,300	19,180	20,610	0,000	0,000
<b>EVAP</b>	395,300	16,780	23,558	17,047	401,598
<b>COP1</b>	395,300	4,381	90,231	3.927,310	354.363,328
<b>COP2</b>	395,300	4,101	96,391	1.859,599	179.248,831
<b>COP3</b>	395,300	3,745	105,554	1.700,668	179.512,479
<b>COP4</b>	395,300	3,633	108,808	1.255,375	136.595,031
				Σ	850.121,267
				<b>COP EUED</b>	<b>4,073</b>
<b>EUED</b>	<b>1,441</b>				<b>NATAL</b>

Tabela 58 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Aracaju.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
<b>FC</b>	395,300	19,180	20,610	0,000	0,000
<b>EVAP</b>	395,300	16,780	23,558	15,091	355,511
<b>COP1</b>	395,300	4,381	90,231	5.409,565	488.108,011
<b>COP2</b>	395,300	4,101	96,391	2.938,861	283.280,075
<b>COP3</b>	395,300	3,745	105,554	394,640	41.655,831
<b>COP4</b>	395,300	3,633	108,808	1,843	200,566
				Σ	813.599,993
				<b>COP EUED</b>	<b>4,256</b>
<b>EUED</b>	<b>1,429</b>				<b>ARACAJÚ</b>

Tabela 59 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Brasília.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
<b>FC</b>	395,300	19,180	20,610	1.923,465	39.642,636
<b>EVAP</b>	395,300	16,780	23,558	4.384,821	103.296,762
<b>COP1</b>	395,300	4,381	90,231	1.474,722	133.065,007
<b>COP2</b>	395,300	4,101	96,391	805,887	77.680,315
<b>COP3</b>	395,300	3,745	105,554	164,706	17.385,427
<b>COP4</b>	395,300	3,633	108,808	6,399	696,223
				Σ	371.766,371
				<b>COP EUED</b>	<b>9,315</b>
<b>EUED</b>	<b>1,283</b>				<b>BRASÍLIA</b>

Tabela 60 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Anápolis.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
<b>FC</b>	395,300	19,180	20,610	731,898	15.084,417
<b>EVAP</b>	395,300	16,780	23,558	5.487,571	129.275,142
<b>COP1</b>	395,300	4,381	90,231	1.524,969	137.598,777
<b>COP2</b>	395,300	4,101	96,391	817,942	78.842,316
<b>COP3</b>	395,300	3,745	105,554	179,189	18.914,092
<b>COP4</b>	395,300	3,633	108,808	18,432	2.005,545
				Σ	381.720,289
				<b>COP EUED</b>	<b>9,072</b>
<b>EUED</b>	<b>1,287</b>				<b>ANÁPOLIS</b>

Tabela 61 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Campo Grande.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
<b>FC</b>	395,300	19,180	20,610	970,568	20.003,421
<b>EVAP</b>	395,300	16,780	23,558	1.998,555	47.081,583
<b>COP1</b>	395,300	4,381	90,231	3.379,848	304.965,532
<b>COP2</b>	395,300	4,101	96,391	1.216,006	117.212,220
<b>COP3</b>	395,300	3,745	105,554	866,124	91.422,922
<b>COP4</b>	395,300	3,633	108,808	328,898	35.786,753
				Σ	616.472,432
				<b>COP EUED</b>	<b>5,617</b>
<b>EUED</b>	<b>1,364</b>				<b>CAMPO GRANDE</b>

Tabela 62 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Goiânia.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
<b>FC</b>	395,300	19,180	20,610	847,355	17.463,998
<b>EVAP</b>	395,300	16,780	23,558	2.511,264	59.159,875
<b>COP1</b>	395,300	4,381	90,231	3.061,638	276.253,248
<b>COP2</b>	395,300	4,101	96,391	1.441,072	138.906,595
<b>COP3</b>	395,300	3,745	105,554	780,448	82.379,458
<b>COP4</b>	395,300	3,633	108,808	157,254	17.110,527
				Σ	591.273,701
				<b>COP EUED</b>	<b>5,857</b>
<b>EUED</b>	<b>1,356</b>				<b>GOIÂNIA</b>

Tabela 63 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Cuiabá.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
<b>FC</b>	395,300	19,180	20,610	337,250	6.950,725
<b>EVAP</b>	395,300	16,780	23,558	880,126	20.733,847
<b>COP1</b>	395,300	4,381	90,231	3.913,753	353.140,013
<b>COP2</b>	395,300	4,101	96,391	1.616,063	155.774,140
<b>COP3</b>	395,300	3,745	105,554	1.246,665	131.590,558
<b>COP4</b>	395,300	3,633	108,808	766,143	83.362,611
				Σ	751.551,894
				<b>COP EUED</b>	<b>4,608</b>
<b>EUED</b>	<b>1,408</b>				<b>CUIABÁ</b>

Tabela 64 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Vitória.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
<b>FC</b>	395,300	19,180	20,610	32,186	663,355
<b>EVAP</b>	395,300	16,780	23,558	1.186,551	27.952,541
<b>COP1</b>	395,300	4,381	90,231	5.505,201	496.737,302
<b>COP2</b>	395,300	4,101	96,391	1.396,344	134.595,180
<b>COP3</b>	395,300	3,745	105,554	564,790	59.615,929
<b>COP4</b>	395,300	3,633	108,808	74,927	8.152,660
				Σ	727.716,966
				<b>COP EUED</b>	<b>4,758</b>
<b>EUED</b>	<b>1,400</b>				<b>VITÓRIA</b>

Tabela 65 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Belo Horizonte (T. Neves).

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
FC	395,300	19,180	20,610	1.623,377	33.457,818
EVAP	395,300	16,780	23,558	4.479,491	105.526,981
COP1	395,300	4,381	90,231	1.500,897	135.426,762
COP2	395,300	4,101	96,391	889,321	85.722,688
COP3	395,300	3,745	105,554	249,906	26.378,550
COP4	395,300	3,633	108,808	17,008	1.850,606
				Σ	388.363,404
				<b>COP EUED</b>	<b>8,916</b>
<b>EUED</b>	<b>1,289</b>				<b>B. HORIZONTE T NEVES</b>

Tabela 66 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Belo Horizonte (Panpulha).

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
FC	395,300	19,180	20,610	1.616,873	33.323,763
EVAP	395,300	16,780	23,558	5.031,600	118.533,452
COP1	395,300	4,381	90,231	1.334,937	120.452,083
COP2	395,300	4,101	96,391	650,046	62.658,619
COP3	395,300	3,745	105,554	119,089	12.570,372
COP4	395,300	3,633	108,808	7,456	811,256
				Σ	348.349,544
				<b>COP EUED</b>	<b>9,941</b>
<b>EUED</b>	<b>1,276</b>				<b>B. HORIZONTE PAMPULHA</b>

Tabela 67 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Uberaba.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
<b>FC</b>	395,300	19,180	20,610	1.199,684	24.725,490
<b>EVAP</b>	395,300	16,780	23,558	4.478,199	105.496,538
<b>COP1</b>	395,300	4,381	90,231	1.543,845	139.302,004
<b>COP2</b>	395,300	4,101	96,391	1.122,935	108.240,954
<b>COP3</b>	395,300	3,745	105,554	378,027	39.902,279
<b>COP4</b>	395,300	3,633	108,808	37,311	4.059,707
				Σ	421.726,973
				<b>COP EUED</b>	<b>8,211</b>
<b>EUED</b>	<b>1,300</b>				<b>UBERABA</b>

Tabela 68 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Rio de Janeiro (S. Dumont).

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
<b>FC</b>	395,300	19,180	20,610	131,388	2.707,907
<b>EVAP</b>	395,300	16,780	23,558	2.677,084	63.066,239
<b>COP1</b>	395,300	4,381	90,231	4.462,521	402.655,669
<b>COP2</b>	395,300	4,101	96,391	1.151,381	110.982,942
<b>COP3</b>	395,300	3,745	105,554	286,916	30.285,143
<b>COP4</b>	395,300	3,633	108,808	50,710	5.517,607
				Σ	615.215,506
				<b>COP EUED</b>	<b>5,629</b>
<b>EUED</b>	<b>1,363</b>				<b>R. JANEIRO S. DUMONT</b>

Tabela 69 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Rio de Janeiro (Galeão).

<b>Sistema</b>	<b>Carga térmica total [kW]</b>	<b>COP [kW/kW]</b>	<b>Potência [kW]</b>	<b>Horas [h]</b>	<b>Energia AVAC Anual [kWh]</b>
<b>FC</b>	395,300	19,180	20,610	159,515	3.287,599
<b>EVAP</b>	395,300	16,780	23,558	2.131,860	50.221,945
<b>COP1</b>	395,300	4,381	90,231	4.536,432	409.324,685
<b>COP2</b>	395,300	4,101	96,391	1.108,059	106.807,078
<b>COP3</b>	395,300	3,745	105,554	554,971	58.579,443
<b>COP4</b>	395,300	3,633	108,808	269,163	29.287,177
				Σ	657.507,928
				<b>COP EUED</b>	<b>5,267</b>
<b>EUED</b>	<b>1,4</b>				<b>RIO DE JANEIRO GALEÃO</b>

Tabela 70 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Campinas.

<b>Sistema</b>	<b>Carga térmica total [kW]</b>	<b>COP [kW/kW]</b>	<b>Potência [kW]</b>	<b>Horas [h]</b>	<b>Energia AVAC Anual [kWh]</b>
<b>FC</b>	395,300	19,180	20,610	1.950,330	40.196,331
<b>EVAP</b>	395,300	16,780	23,558	4.508,190	106.203,078
<b>COP1</b>	395,300	4,381	90,231	1.199,787	108.257,449
<b>COP2</b>	395,300	4,101	96,391	787,229	75.881,859
<b>COP3</b>	395,300	3,745	105,554	288,423	30.444,259
<b>COP4</b>	395,300	3,633	108,808	26,040	2.833,359
				Σ	363.816,334
				<b>COP EUED</b>	<b>9,518</b>
<b>EUED</b>	<b>1,281</b>				<b>CAMPINAS</b>

Tabela 71 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de São Paulo (Congonhas).

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
<b>FC</b>	395,300	19,180	20,610	2.574,191	53.054,104
<b>EVAP</b>	395,300	16,780	23,558	4.713,820	111.047,266
<b>COP1</b>	395,300	4,381	90,231	906,945	81.834,164
<b>COP2</b>	395,300	4,101	96,391	434,482	41.880,210
<b>COP3</b>	395,300	3,745	105,554	122,639	12.945,054
<b>COP4</b>	395,300	3,633	108,808	7,922	862,021
				Σ	301.622,819
				<b>COP EUED</b>	<b>11,481</b>
<b>EUED</b>	<b>1,260</b>				<b>S. PAULO CONGONHAS</b>

Tabela 72 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de São Paulo (Guarulhos).

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
<b>FC</b>	395,300	19,180	20,610	2.839,680	58.525,829
<b>EVAP</b>	395,300	16,780	23,558	2.627,882	61.907,134
<b>COP1</b>	395,300	4,381	90,231	1.226,521	110.669,650
<b>COP2</b>	395,300	4,101	96,391	453,446	43.708,181
<b>COP3</b>	395,300	3,745	105,554	146,043	15.415,412
<b>COP4</b>	395,300	3,633	108,808	12,907	1.404,392
				Σ	291.630,596
				<b>COP EUED</b>	<b>11,874</b>
<b>EUED</b>	<b>1,257</b>				<b>S. PAULO GUARULHOS</b>

Tabela 73 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Foz do Iguaçu.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
FC	395,300	19,180	20,610	2.069,853	42.659,685
EVAP	395,300	16,780	23,558	2.851,659	67.178,828
COP1	395,300	4,381	90,231	2.327,090	209.974,558
COP2	395,300	4,101	96,391	842,435	81.203,225
COP3	395,300	3,745	105,554	529,063	55.844,702
COP4	395,300	3,633	108,808	139,902	15.222,442
				Σ	472.083,440
				<b>COP EUED</b>	<b>7,335</b>
<b>EUED</b>	<b>1,316</b>				<b>FOZ DO IGUAÇU</b>

Tabela 74 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Londrina.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
FC	395,300	19,180	20,610	1.631,256	33.620,212
EVAP	395,300	16,780	23,558	2.054,839	48.407,506
COP1	395,300	4,381	90,231	2.813,931	253.902,521
COP2	395,300	4,101	96,391	898,518	86.609,158
COP3	395,300	3,745	105,554	328,573	34.682,198
COP4	395,300	3,633	108,808	42,773	4.654,099
				Σ	461.875,695
				<b>COP EUED</b>	<b>7,497</b>
<b>EUED</b>	<b>1,313</b>				<b>LONDRINA</b>

Tabela 75 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Porto Alegre.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
<b>FC</b>	395,300	19,180	20,610	3.017,351	62.187,643
<b>EVAP</b>	395,300	16,780	23,558	1.781,557	41.969,569
<b>COP1</b>	395,300	4,381	90,231	2.031,606	183.312,952
<b>COP2</b>	395,300	4,101	96,391	532,562	51.334,264
<b>COP3</b>	395,300	3,745	105,554	228,550	24.124,367
<b>COP4</b>	395,300	3,633	108,808	70,594	7.681,161
				Σ	370.609,956
				<b>COP EUED</b>	<b>9,344</b>
<b>EUED</b>	<b>1,283</b>				<b>PORTO ALEGRE</b>

Tabela 76 – Comparação do consumo anual de energia de diferentes sistemas AVAC e EUED para a cidade de Florianópolis.

Sistema	Carga térmica total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	Horas [h]	Energia AVAC Anual [kWh]
<b>FC</b>	395,300	19,180	20,610	1.923,651	39.646,470
<b>EVAP</b>	395,300	16,780	23,558	2.205,112	51.947,607
<b>COP1</b>	395,300	4,381	90,231	2.771,494	250.073,382
<b>COP2</b>	395,300	4,101	96,391	474,508	45.738,315
<b>COP3</b>	395,300	3,745	105,554	103,256	10.899,039
<b>COP4</b>	395,300	3,633	108,808	9,721	1.057,694
				Σ	399.362,507
				<b>COP EUED</b>	<b>8,671</b>
<b>EUED</b>	<b>1,293</b>				<b>FLORIANÓPOLIS</b>