



CBCS

Conselho Brasileiro de Construção Sustentável

RT2B.15: Desenvolvimento de arquétipo, modelo de simulação, análise de sensibilidade e equações de *benchmark* para a tipologia de Data Center e Centro de Processamento de Dados

PROJETO: ECV – PRFP 003B/2020

CONVÊNIO DE COOPERAÇÃO TÉCNICO-FINANCEIRA ENTRE A ELETROBRAS E O CBCS, DESTINADO AO DESENVOLVIMENTO DE BENCHMARKS ENERGÉTICOS NO ÂMBITO DO PROCEL

Relatório elaborado pelos colaboradores do CBCS CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL:

Ana Carolina Veloso

Ana Paula Melo

Anderson Letti

Arthur Cursino

Camila Suizu

Clarice Degani

Daniel Amaral

Eduardo Kanashiro

Roberto Lamberts

Kleber Moura

Coordenação Eletrobras/Procel: Elisete Cunha

Publicado em 14/03/2021

Relatório da atividade 2B com a finalidade de descrever o processo de desenvolvimento de arquétipo, o modelo de simulação, a análise de sensibilidade e as equações de *benchmark* para a tipologia de Data Center e Centro de Processamento de Dados.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	1
1. CONTEXTUALIZAÇÃO E METODOLOGIA	2
Metodologia geral adotada para o convênio	3
2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	4
3. CIDADES SELECIONADAS	5
4. DESENVOLVIMENTO DO ARQUÉTIPO	6
4.1. Volumetrias	6
4.2. Iluminação	7
4.3. Equipamentos	8
4.4. Envoltória e entorno	8
4.5. Temperatura de setpoint nos equipamentos de TI	9
4.6. Definição da carga térmica e sistema de condicionamento de ar	9
5. MODELOS DE SIMULAÇÃO	11
5.1. Cenário de simulação	11
5.2. Método de análise dos resultados das simulações	11
6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	12
6.1. Relação entre as variáveis e o consumo de energia	12
6.2. Identificação dos PARÂMETROS SIGNIFICATIVOS	13
7. EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	15
7.1. Avaliação entre o consumo simulado e o consumo calculado	16
8. ESCALAS DE CONSUMO DE ENERGIA	17
8.1. Método para cálculo das escalas	17
8.2. Exemplo de aplicação	18
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	20
REFERÊNCIAS	21

1. CONTEXTUALIZAÇÃO E METODOLOGIA

O Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) é uma organização da sociedade civil, sem fins lucrativos, que tem por objetivo contribuir para a promoção do desenvolvimento sustentável, por meio da geração e disseminação de conhecimento e da mobilização da cadeia produtiva do setor da construção civil, de seus clientes e consumidores.

Dentre outras atuações, o CBCS tem desenvolvido ações de *benchmarking* de consumo energético, desde 2013, quando lançou o projeto Desempenho Energético Operacional (DEO) e desenvolveu uma metodologia de *benchmarking* para agências bancárias, para edifícios de escritórios corporativos e para edifícios públicos administrativos.

Em 2018, o CBCS firmou este convênio de cooperação com a Eletrobras, no âmbito do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL, que inclui o projeto intitulado “Estruturação do setor de edificações por meio de estudos e desenvolvimentos de base de dados com indicadores”. O Convênio firmado também tem total aderência com as atividades do Procel Edifica – Eficiência Energética em Edificações, que coordena tecnicamente o Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações - PBE Edifica, do Inmetro, programa que define classes de desempenho energético para construções novas.

É clara a necessidade de avanços para o desenvolvimento de um programa nacional de gestão energética em edificações existentes e a pertinência do presente convênio. Sendo assim, para melhor entender o consumo energético das edificações em operação, a fim de permitir a gestão destes consumos e operações mais eficientes, a aplicação de *benchmarks* revela-se um excelente ponto de partida.

Deste modo, o objetivo do convênio é desenvolver *benchmarks* e indicadores de desempenho energético para 15 tipologias de edificações em uso e operação, privadas e públicas, visando o futuro desenvolvimento de uma base de dados de consumo energético e de um programa nacional de gestão energética para edificações em uso, semelhante ao já existente para novas construções.

Metodologia geral adotada para o convênio

A metodologia adotada para o convênio teve como ponto de partida o estudo da base de dados do projeto META (Projeto de Assistência Técnica dos Setores de Energia e Mineral) da EPE (Empresa de Pesquisa em Energia Elétrica), detalhado no relatório RT1A.01, a partir do qual obteve-se informações para a caracterização de grande parte das diferentes tipologias alvo.

No transcorrer do convênio, dados de caracterização do estoque para cada tipologia foram obtidos, tratados e analisados – seja por meio de auditorias ou de bancos de dados já existentes – e foram usados para a construção dos arquétipos e a realização de simulações para cada tipologia. As simulações fundamentaram a construção das equações de *benchmark* e os dados de caracterização do estoque disponível foram utilizados para a validação destas equações. O fluxograma do método é apresentado na Figura 1.

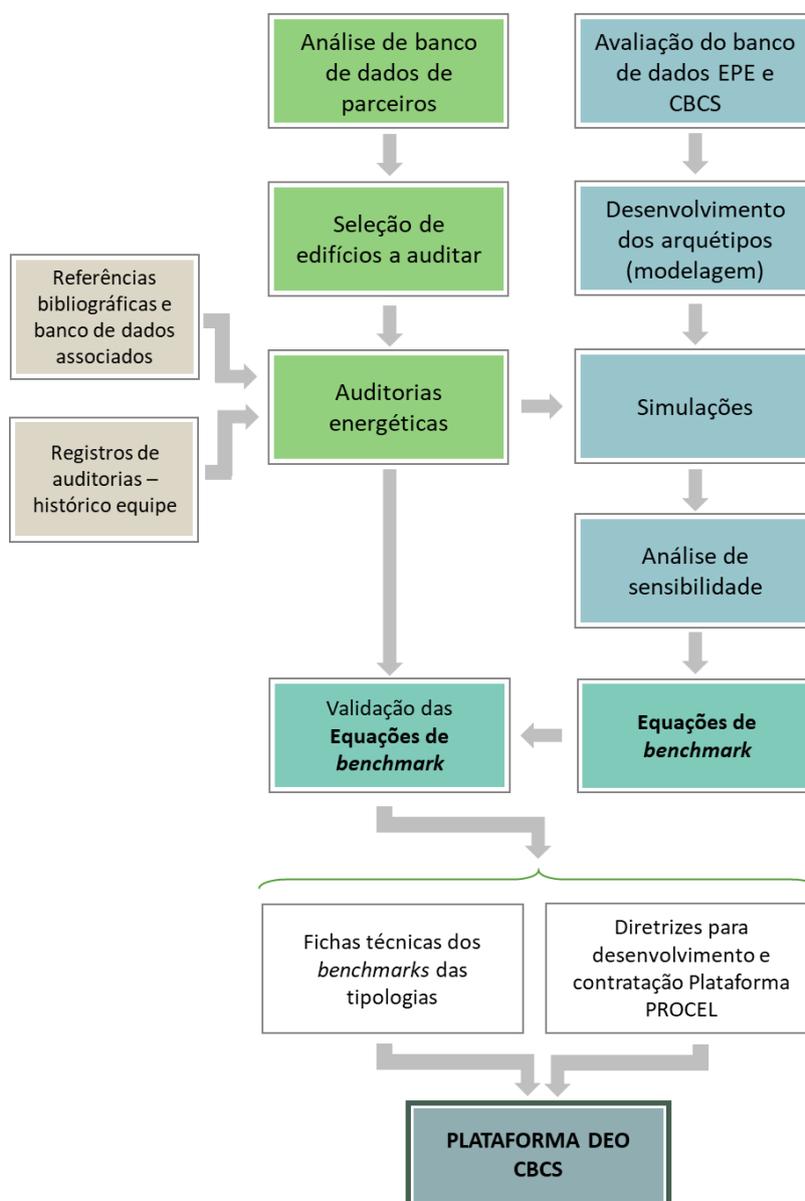


Figura 1 – Método aplicado pelo CBCS para o desenvolvimento dos benchmarks no âmbito deste convênio

2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este relatório apresenta o registro do desenvolvimento do arquétipo, modelo de simulação, análise de sensibilidade e equações de *benchmark* para a tipologia de **Data Center e Centro de Processamento de Dados**.

Incluem-se neste relatório todos os processos, métodos e valores adotados para desenvolver o arquétipo e estabelecer os cenários de simulação. Variações nos cenários foram consideradas nos parâmetros de iluminação, densidade de equipamentos, sombreamento, absorvância solar, tipo de ar condicionado e setpoint praticado. Uma análise de sensibilidade foi realizada com os resultados das simulações, identificando as principais variáveis relativas a esta tipologia. Então, estas variáveis preponderantes foram utilizadas – aliadas aos resultados das simulações – para construir um modelo de regressão multivariada, dando origem à equação de *benchmark* para esta tipologia. Por fim, apresenta-se a definição das escalas de consumo, que estabelecem os limites para definição do consumo operacional como eficiente, típico ou ineficiente. A Figura 2 apresenta o fluxograma das etapas conduzidas neste relatório.

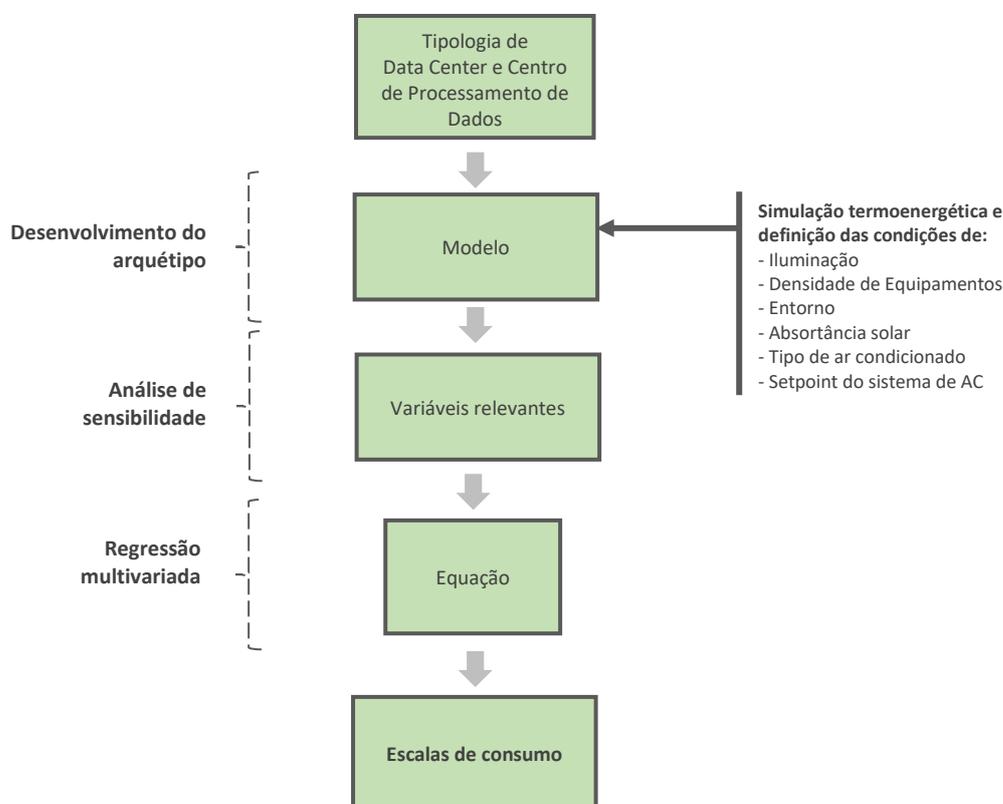


Figura 2 – Fluxograma de desenvolvimento das equações de benchmark e escalas de consumo para a tipologia de Data Center e Centro de Processamento de Dados

3. CIDADES SELECIONADAS

O Brasil possui um grande território com ampla variação climática. Para representar esta variedade de condições climáticas e seu impacto no consumo energético das edificações, especialmente pelos sistemas de condicionamento de ar, utilizou-se uma análise do graus-hora de resfriamento (GHR) para um grupo de 413 cidades. O GHR é um indicador de desempenho térmico que representa a somatória total anual da diferença entre a temperatura operativa horária e uma temperatura de base (RTQ, 2017). Esta abordagem foi baseada na metodologia para *benchmarking* de agências bancárias, desenvolvida pelo CBCS em 2014 e publicado por Borgstein e Lamberts (2014). Neste caso, foi adotada a temperatura de base de 15°C para cálculo do GHR.

A partir da análise do GHR para as 413 cidades, foram determinadas oito faixas de GHR que variam de 10.000 em 10.000 graus-hora. Então, uma cidade populosa e com arquivo climático disponível, foi selecionada como representativa de cada faixa.

Esta estratificação foi necessária para adequar a representatividade do clima no desempenho do sistema de condicionamento de ar. A Tabela 1 apresenta as faixas de GHR e as cidades representativas.

Tabela 1 - Faixas de GHR e cidades representativas

Faixa de GHR	Cidade	UF	Latitude	Longitude	Altitude	GHR
entre 0 e 10.000	Campos do Jordão	SP	-22,74	-45,59	1.642	3.495
entre 10.001 e 20.000	São Paulo	SP	-23,85	-46,64	792	14.172
entre 20.001 e 30.000	Porto Alegre	RS	-30,03	-51,23	47	23.954
entre 30.001 e 40.000	Campinas	SP	-22,82	-47,06	640	31.412
entre 40.001 e 50.000	Rio de Janeiro (Vila Militar)	RJ	-22,86	-43,41	45	45.016
entre 50.001 e 60.000	Vitória	ES	-20,32	-40,34	9	54.061
entre 60.001 e 70.000	Recife	PE	-8,05	-34,88	10	63.550
entre 70.001 e 80.000	Fortaleza	CE	-3,8	-38,53	41	71.394

4. DESENVOLVIMENTO DO ARQUÉTIPO

O arquétipo é uma edificação representativa de uma tipologia, constituído de parâmetros extraídos das principais características do estoque de edificações estudado. Dessa forma, o arquétipo é uma abstração do estoque de uma tipologia de edificação sintetizado em um modelo representativo.

A tipologia de **Data Center e CPD** refere-se a edifícios especificamente projetados e equipados para atender às necessidades de equipamentos de computação de alta densidade, como racks de servidores, utilizados para armazenamento e processamento de dados. Normalmente, essas instalações exigem fontes de alimentação ininterrupta e sistemas de resfriamento dedicados. As funções do *data center* podem incluir serviços corporativos tradicionais, serviços corporativos sob demanda, computação de alto desempenho, instalações de internet e/ou instalações de hospedagem, etc.

Duas fontes de dados principais foram utilizadas para o desenvolvimento do arquétipo desta tipologia: (a) arquivo modelo “2ZoneDataCenterHVAC_wEconomizer.idf” do software EnergyPlus v.9.2 e (b) refino da caracterização do arquétipo por meio de auditorias energéticas.

Para a construção do *benchmarking* desta tipologia foram adotadas as seguintes condições de contorno:

- Foram consideradas duas áreas principais: uma dedicada aos equipamentos de TI e outra para o abrigo das baterias.
- Ambas as salas possuem o piso elevado sob os quais se encontram trocadores de calor que insuflam o ar frio para os equipamentos.
- As salas não possuem ocupação humana permanente.
- Não há aberturas envidraçadas nesta tipologia.

Nas seções seguintes, registra-se a composição das volumetrias e as variáveis que compõem o modelo de simulação.

4.1. VOLUMETRIAS

O modelo do edifício da tipologia de **Data Center e CPD** foi elaborado com base no arquivo de exemplo do Energy Plus que possui apenas um pavimento de dimensões 15,24 m x 32,24 m x 4,57 m (L x C x A), totalizando 491,34 m². A configuração das áreas nestes dois ambientes é proveniente do exemplo do Energy Plus e as cargas internas consideradas se basearam nas auditorias realizadas. A Tabela 2 sintetiza essa caracterização.

Tabela 2 – Áreas dos ambientes considerados

Ambiente	Quantidade	Área total (m ²)	Percentual na área total
Sala de TI	1	259	52,75%
Sala de Bateria	1	232	47,25%
TOTAL	2	491	100%

A Figura 3 apresenta a volumetria, a planta e a configuração dos ambientes considerados, e a Figura 4 a perspectiva do modelo.

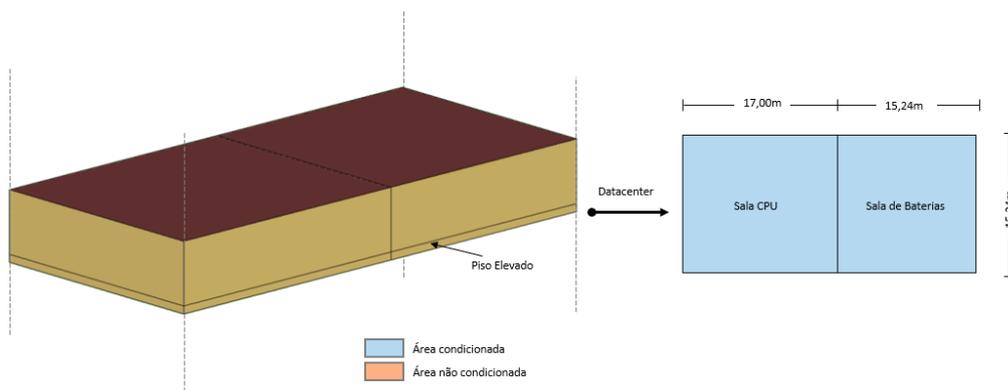


Figura 3 – Volumetria e configuração da planta do arquétipo

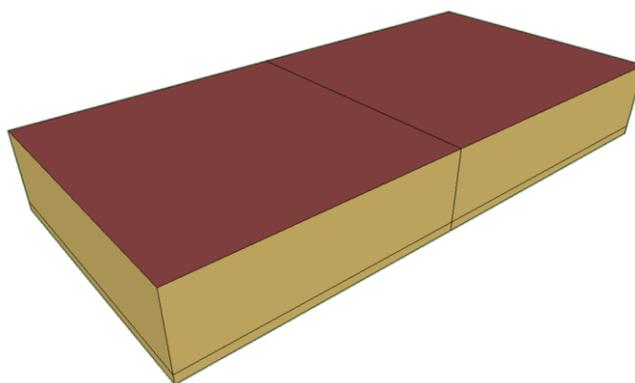


Figura 4 – Perspectiva da volumetria da edificação

4.2. ILUMINAÇÃO

Em relação à iluminação artificial foram definidos dois cenários: um cenário mais eficiente (ILUM02) representando as lâmpadas tipo LED com densidade de potência de iluminação (DPI) de 8,46 W/m² e um cenário menos eficiente (ILUM01) representando as lâmpadas fluorescentes com DPI de 11,52 W/m². Esses valores correspondem, respectivamente, a uma classe A e classe D, com valores determinados para este tipo de ambiente presente no arquétipo de acordo com seu uso, segundo a Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas - INI-C (CB3E, 2020).

A Figura 5 apresenta o perfil de utilização do sistema de iluminação para a edificação da tipologia de **Data Center e CPD**.

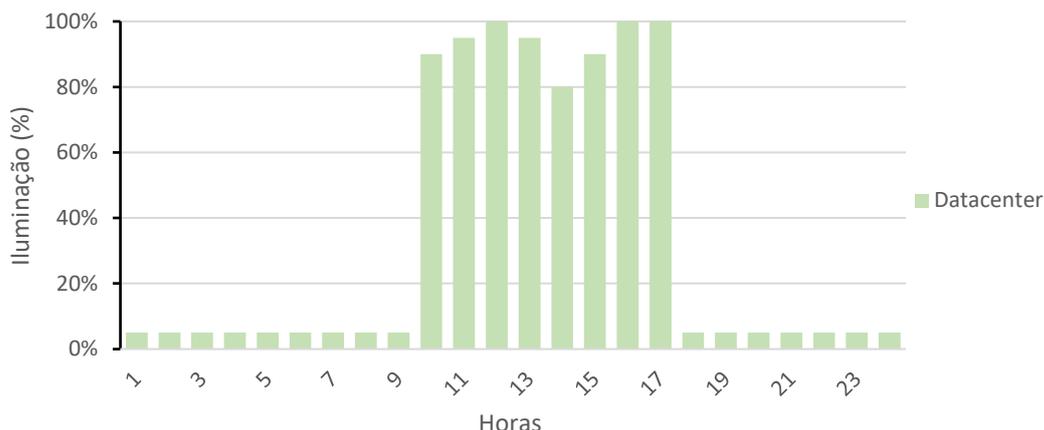


Figura 5 - Cronograma adotado para iluminação

4.3. EQUIPAMENTOS

Para avaliar o impacto dos equipamentos de TI em instalações de Data Center e CPD foram criados três cenários de densidades de potência de servidores instalados: o cenário (EQUI01) de alta densidade com 1400 W/m² de potência instalada, o cenário (EQUI02) de média densidade com 1050 W/m² e o cenário (EQUI03) de baixa densidade com 700 W/m². Estes equipamentos possuem o funcionamento ininterrupto ao longo de todo o dia, porém seu consumo de energia se dá em função da quantidade de acessos remotos aos servidores e foi adotado o cronograma ao longo do dia, ilustrado na Figura 6 a seguir:

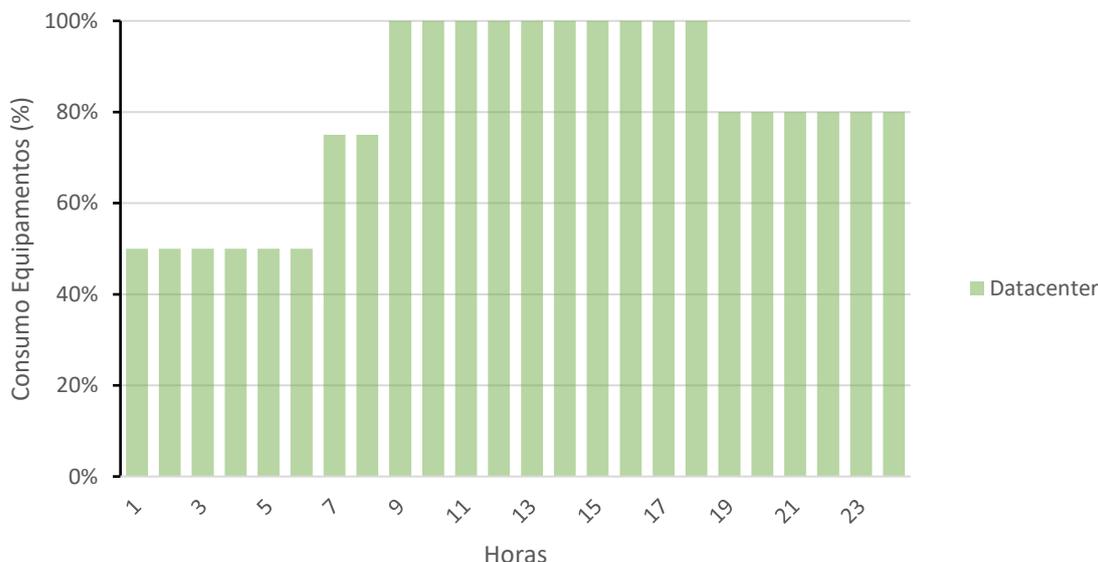
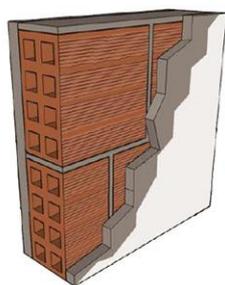


Figura 6 - Cronograma adotado para o uso dos equipamentos

4.4. ENVOLTÓRIA E ENTORNO

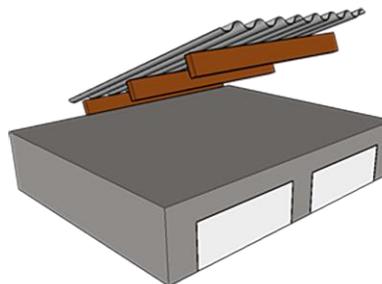
Para definir os cenários que representam a eficiência da envoltória da edificação, foram adotadas propriedades fixas para as transmitâncias das paredes e coberturas de 2,50 W/m².K e 1,00 W/m².K, respectivamente em todos os cenários e variando apenas a absorvância solar.

A Figura 7 apresenta os elementos construtivos de referência para paredes e coberturas adotadas nesta tipologia.



(a)

Transmitância térmica: 2,5 W/m²K
Capacidade térmica: 100 kJ/m²K
Atraso térmico: 2,2 h



(b)

Transmitância térmica: 1,0 W/m²K
Capacidade térmica: 238 kJ/m²K
Atraso térmico: 8,7 h

Figura 7 - Elementos construtivos de referência para (a) paredes e (b) cobertura.

Como a absorvância está relacionada à cor, e esta característica ser amplamente variável no estoque de edificações, foram definidos dois cenários de variação para esta propriedade. O primeiro cenário considera cores mais escuras nas fachadas e cobertura resultando em uma absorvância de 0,7 (ASOL01), e o segundo cenário considera cores mais claras, com absorvância de 0,3 (ASOL02).

Outra variação considerada foi a caracterização do entorno. Há edificações dedicadas para o funcionamento de Data Centers e CPDs, identificadas como sendo o cenário (ENTO01), para estas, as fachadas e cobertura estão totalmente expostas ao ambiente externo. Já o cenário (ENTO02) considera que estas instalações se encontram no interior de outra edificação e portando sua condição de contorno foi definida por uma temperatura de *setpoint* do sistema de condicionamento de ar das salas adjacentes de 25 °C.

4.5. TEMPERATURA DE SETPOINT NOS EQUIPAMENTOS DE TI

Os equipamentos de TI produzem muito calor que precisa ser extraído pelo sistema de condicionamento de ar, pois a temperatura de operação dos servidores impacta tanto na vida útil das máquinas, quanto na eficiência de sua operação. É muito comum que tais salas sejam condicionadas a baixas temperaturas, situação representada neste estudo pelo cenário (SETP01), onde foi definida uma temperatura de *setpoint* de 18 °C. E há também o cenário (SETP02) onde a temperatura de *setpoint* do sistema de condicionamento de ar foi definida em 25,5 °C que, apesar de mais elevada, ainda garante um ótimo desempenho dos equipamentos, segundo seus fabricantes, porém com menor consumo energético para o sistema de condicionamento de ar.

4.6. DEFINIÇÃO DA CARGA TÉRMICA E SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR

Uma etapa preliminar de simulação termoenergética do arquétipo foi realizada, utilizando o ambiente de simulação *EnergyPlus*, versão 9.2. O modelo foi simulado utilizando arquivos climáticos do tipo INMET¹ para as oito cidades representativas. Essa etapa preliminar de simulação foi feita considerando diversas combinações de todos os cenários de variáveis que contribuem para carga interna (ou seja, vários tipos de iluminação, diferentes densidades de equipamentos, aspectos construtivos e de entorno distintos, entre outros).

A partir dessa etapa de simulação preliminar, foram identificados os cenários nos quais as variáveis mais impactaram os resultados de carga térmica total da simulação. Então, uma segunda rodada de simulação

¹ Disponível em: http://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html

foi realizada, considerando apenas esse cenário único (Tabela 3). O objetivo dessa segunda rodada de simulações preliminares foi identificar a carga térmica de resfriamento (em Toneladas de Resfriamento, TR) para cada cidade representativa.

Tabela 3 – Cenário considerado para cálculo de carga térmica

Variável	Cenário
Iluminação	ILUM01
Equipamentos	EQUI01
Entorno	ENTO01
Absortância Solar	ASOL01
Temperatura de <i>setpoint</i>	SETP01

Nas simulações da segunda rodada preliminar foram consideradas a vazão de ar, a capacidade de refrigeração e aquecimento no modo *autosize*, com um superdimensionamento de 25% no modo aquecimento e de 15% no modo refrigeração. A eficiência dos equipamentos de condicionamento de ar foi mantida com o padrão do *EnergyPlus* (3 W/W no modo de refrigeração e 2,75 W/W no modo de aquecimento). Com relação à eficiência dos ventiladores, utilizaram-se os coeficientes para vazão constante ($P [kW] = \text{vazão [l/s]} * 0,0017$), e para vazão variável ($P [kW] = \text{vazão [l/s]} * 0,0024$), conforme recomendação da ASHRAE 90.1-2010 (ASHRAE, 2011).

Após as simulações, selecionou-se a cidade com maior carga térmica para o dimensionamento do sistema de condicionamento de ar do arquétipo. Esta seleção foi feita tendo como base em equipamentos existentes no mercado, sendo escolhido o equipamento de capacidade superior a carga térmica definida. O equipamento foi modelado na simulação termoenergética do arquétipo.

Esta abordagem foi adotada com a finalidade de simular um sistema real e existente no mercado, sendo definidas e fixadas no modelo de simulação as características do sistema, como: capacidade de refrigeração, eficiência de refrigeração, capacidade de aquecimento, eficiência de aquecimento, vazão e potência do ventilador. Dessa forma, o arquétipo pode representar de forma mais realista o que ocorre no estoque real de edificações – diferentemente do que aconteceria se fosse utilizada uma simulação no modo *autosize* em todos os casos, o que supriria a demanda de carga térmica, variando os parâmetros do sistema.

A Tabela 4 apresenta a carga térmica para as 8 cidades selecionadas como representativas e a cidade selecionada para dimensionamento do sistema.

Tabela 4 – Carga térmica por cidade representativa

Cidade	UF	Zona Bioclimática	Carga Térmica (TR)
Campos do Jordão	SP	1	110,6
São Paulo	SP	3	112,3
Porto Alegre*	RS	3	113,1
Campinas	SP	3	112,4
Rio de Janeiro (Vila Militar)	RJ	8	113,1
Vitória	ES	8	112,6
Recife	PE	8	112,9
Fortaleza	CE	8	112,4

* Cidade selecionada

Percebe-se que, dentre as cidades selecionadas como representativas, as cidades com maiores cargas térmicas foram Porto Alegre e Rio de Janeiro, com 113,1 TR. Dessa forma, o arquivo climático de Porto

Alegre foi selecionado como referência para dimensionamento do sistema de condicionamento de ar considerado no arquétipo.

Dois cenários para os tipos de sistema de condicionamento de ar foram considerados nas simulações. O primeiro cenário considera sistemas de expansão direta tipo *Self-contained* para cada zona térmica, com EER (*Energy Efficiency Ratio*) médio de 3,9 W/W. O segundo cenário considerou um sistema central de água gelada com condensação a ar, com um EER médio de 3,3 W/W.

5. MODELOS DE SIMULAÇÃO

5.1. CENÁRIO DE SIMULAÇÃO

As simulações foram realizadas utilizando-se uma abordagem paramétrica, considerando as variações dos cenários apresentados e as oito cidades representativas (capítulo 3). No total, 768 casos foram simulados. Foi utilizado o programa de simulação EnergyPlus (versão 9.2). Os resultados das simulações foram compilados em um banco de dados com os consumos anuais totais e consumos desagregados por uso final. A Tabela 5 apresenta a síntese das características dos cenários adotados nas simulações termoenergéticas para esta tipologia.

Tabela 5 – Cenários adotados para as simulações

Parâmetro	Cenário	Dado utilizado
Iluminação	ILUM01	Iluminação com DPI PBE classe D (11,52W/m ²)
	ILUM02	Iluminação com DPI PBE classe A (8,46W/m ²)
Equipamentos	EQUI01	Alta densidade de equipamentos (1400W/m ²)
	EQUI02	Média densidade de equipamentos (1050W/m ²)
	EQUI03	Baixa densidade de equipamentos (700W/m ²)
Entorno	ENTO01	Fachadas expostas ao ambiente
	ENTO02	Tipologia no interior de uma edificação maior
Absortância	ASOL01	Fachada com acabamento em cor escura ($\alpha=0,7$)
	ASOL02	Fachada com acabamento em cor clara ($\alpha=0,3$)
AVAC	Expansão Direta	Self-contained (COP 3,9W/W)
	Chiller a Ar	Chiller com condensação a ar (COP 3,3W/W)
Setpoint	SETP01	Setpoint do sistema AVAC: 18°C
	SETP02	Setpoint do sistema AVAC: 25,5°C

5.2. MÉTODO DE ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Duas análises principais foram realizadas: (a) efeito de cada parâmetro no consumo de energia (*main effects plot for total end uses*) e (b) interação entre os parâmetros (*interaction plot for total end use*).

A partir da análise do efeito do parâmetro no consumo de energia foram escolhidos aqueles com o maior impacto no consumo de energia. Esses parâmetros serviram como fatores no modelo estatístico de regressão multivariada para o desenvolvimento da equação de regressão.

6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Os resultados das simulações foram utilizados na análise de sensibilidade, com o objetivo de identificar os impactos dos diferentes parâmetros no consumo energético total do modelo.

O objetivo da análise de sensibilidade é quantificar a influência dos parâmetros no modelo e, a partir daqueles mais significativos, utilizá-los na modelagem estatística da equação de *benchmark*. Utilizou-se como critério para definir se um parâmetro teve impacto ou não no consumo final, se a alteração desta foi maior ou igual a 10%. Por exemplo, se a variação de um parâmetro causou uma variação no resultado da simulação maior que 10%, esse parâmetro foi considerado significativo.

É importante mencionar que os parâmetros que os usuários tenham dificuldade para levantar ou identificar, ou que tenham pouco impacto no consumo final da edificação, não foram considerados nas equações. Essa definição é importante para tornar o uso da ferramenta de *benchmarking* fácil e acessível.

Os parâmetros analisados foram: iluminação (ILUM), densidade de equipamentos (EQUI), condições do entorno (ENTO), absortância solar (ASOL), tipo de sistema de condicionamento de ar (AVAC) e temperatura de *setpoint* (SETP). Além disso, a carga térmica influenciada pela cidade (GHR, GDA) também foi um parâmetro analisado.

Assim, para as equações de *benchmark*, foram considerados somente os parâmetros cuja variação apresentou impacto significativo no consumo energético total do edifício. Esses parâmetros podem apresentar um consumo direto, por meio do seu uso efetivo (potência e funcionamento), ou um consumo indireto, por exemplo, a carga térmica interna gerada no uso dos ambientes aumenta a necessidade de funcionamento do sistema de condicionamento de ar para manter as condições locais de conforto.

6.1. RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS E O CONSUMO DE ENERGIA

Por meio da Figura 8 e Figura 9, verifica-se que os parâmetros com variações mais significativas são o AVAC, EQUI e SETP. As variações dos parâmetros ILUM, ENTO e ASOL tiveram um impacto pequeno no cálculo do consumo de energia, assim como as variáveis climáticas GHR e GDA. Sendo assim, estas foram retiradas das análises da equação de regressão da tipologia de **Data Center e Centro de Processamento de Dados**.

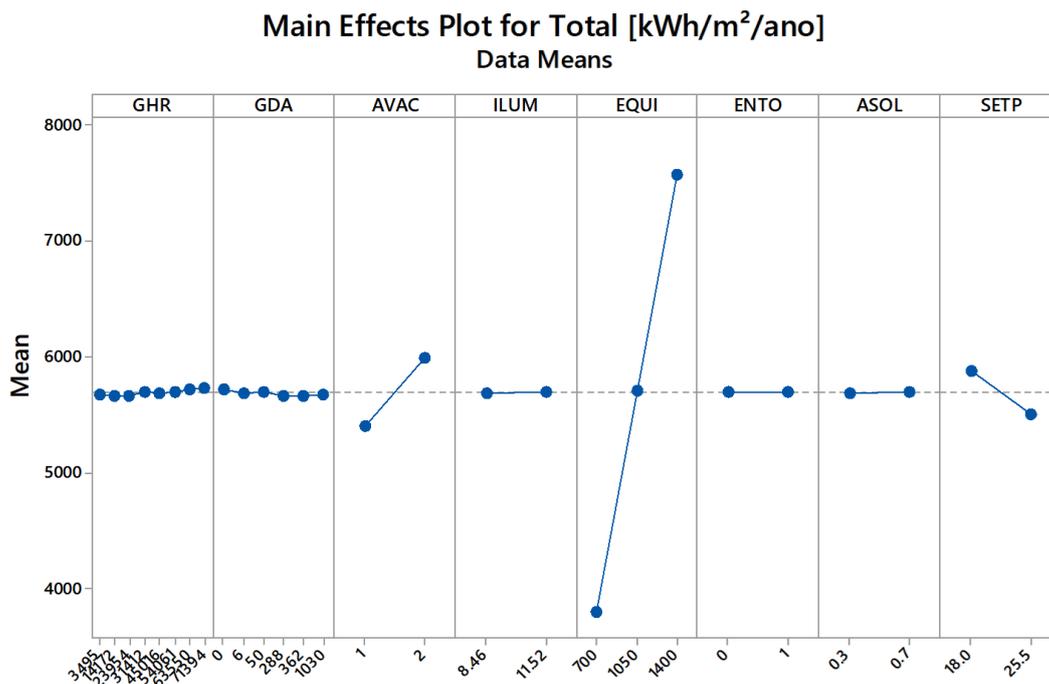


Figura 8 - Efeito dos parâmetros no consumo de energia

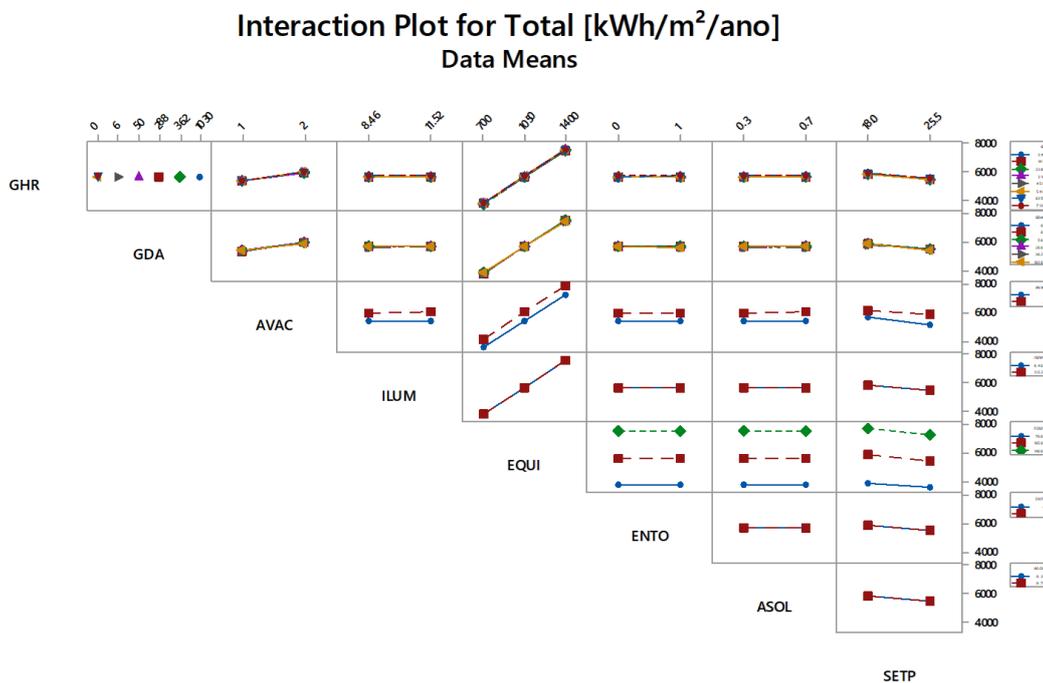


Figura 9 - Interação entre os parâmetros

6.2. ANÁLISE DO IMPACTO DOS PARÂMETROS SIGNIFICATIVOS

Uma vez identificados os parâmetros que apresentaram maior impacto no consumo anual de energia desta tipologia, verificou-se o percentual de variação que uma alteração nesses parâmetros causa no resultado final da simulação. Foram eles: AVAC, EQUI e SETP.

Os equipamentos de TI instalados na edificação de tipologia de **Data Center e Centro de Processamento de Dados**, além do consumo próprio de energia elétrica, também aumentam a carga térmica dentro da edificação, o que influencia no consumo de energia do sistema de condicionamento de ar. Verifica-se através da Tabela 6 que uma densidade de equipamentos 25% menor demanda cerca de 33% menos energia para o sistema AVAC.

Tabela 6 – Impacto da densidade de equipamentos no consumo do sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC:	Expansão direta (COP 3.9W/W)	
	Iluminação:	PBE classe A (8,15W/m ²)	
	Equipamento:	Parâmetro analisado	
	Entorno:	Ambientes adjacentes a 25°C	
	Absortância:	Fachadas em cores claras (α : 0.3)	
	Setpoint:	Temperatura de setpoint 25,5°C	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m ²]		Variação no consumo de AVAC
	Parâmetro analisado: Equipamentos		
	Densidade: 1400W/m ²	Densidade: 1050W/m ²	
Campos do Jordão	1262,92	827,82	-34,5%
São Paulo	1184,02	786,13	-33,6%
Porto Alegre	1129,73	759,28	-32,8%
Campinas	1201,69	801,82	-33,3%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	1147,78	772,55	-32,7%
Vitória	1156,03	779,42	-32,6%
Recife	1169,09	789,23	-32,5%
Fortaleza	1190,20	803,72	-32,5%

O próprio sistema de condicionamento ambiental possui diversas tecnologias com eficiências energéticas distintas que impactam no consumo de energia total de uma edificação. A Tabela 7 ilustra a diferença no consumo de energia dos sistemas de expansão direta tipo self-contained e um sistema central de água gelada com chiller com condensação a ar. Este parâmetro também será utilizado para balizar a eficiência energética do usuário final na equação de *benchmark*.

Tabela 7 - Impacto do tipo de sistema AVAC no consumo do sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC:	Parâmetro analisado	
	Iluminação:	PBE classe A (8,15W/m ²)	
	Equipamento:	Densidade: 1050 W/m ²	
	Entorno:	Ambientes adjacentes a 25°C	
	Absortância:	Fachadas em cores claras (α : 0.3)	
	Setpoint:	Temperatura de setpoint 25,5°C	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m ²]		Variação no consumo de AVAC
	Parâmetro analisado: AVAC		
	Chiller (COP 3,3 W/W)	Expansão direta (COP 3,9 W/W)	
Campos do Jordão	1348,47	827,82	-38,6%
São Paulo	1413,35	786,13	-44,4%
Porto Alegre	1481,34	759,28	-48,7%
Campinas	1449,72	801,82	-44,7%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	1497,27	772,55	-48,4%
Vitória	1508,41	779,42	-48,3%
Recife	1519,86	789,23	-48,1%

Fortaleza	1533,94	803,72	-47,6%
-----------	---------	--------	--------

Outro fator que também impacta no consumo de energia é a temperatura do ar de insuflamento nos equipamentos de TI. Verifica-se através da **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** que temperaturas de *setpoint* mais altas, dentro da faixa permitida pelos fabricantes de equipamentos de TI, podem reduzir o consumo de energia do sistema AVAC em mais de 40% em relação ao setpoint de 18°C.

Tabela 8 – Impacto da temperatura de setpoint do sistema AVACA no consumo do sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC:	Expansão direta (COP 3.9 W/W)	
	Iluminação:	PBE classe A (8,15W/m ²)	
	Equipamento:	Densidade: 1050 W/m ²	
	Entorno:	Ambientes adjacentes a 25°C	
	Absortância:	Fachadas em cores claras (α : 0.3)	
	Setpoint:	Parâmetro analisado	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Varição no consumo de AVAC
	Parâmetro analisado: Temperatura de setpoint		
	Setpoint: 18°C	Setpoint: 25.5°C	
Campos do Jordão	1404,52	827,82	-41,1%
São Paulo	1359,15	786,13	-42,2%
Porto Alegre	1323,80	759,28	-42,6%
Campinas	1377,41	801,82	-41,8%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	1340,41	772,55	-42,4%
Vitória	1348,70	779,42	-42,2%
Recife	1360,76	789,23	-42,0%
Fortaleza	1378,16	803,72	-41,7%

7. EQUAÇÃO DE REGRESSÃO

Para o desenvolvimento das equações para predição do consumo de energia da tipologia de **Data Center e Centro de Processamento de Dados**, utilizou-se um modelo estatístico de regressão linear multivariada. Para teste da qualidade do modelo, avaliou-se o coeficiente de determinação (R^2). Quanto mais próximo de 1,00, mais o modelo consegue prever valores próximos aos valores utilizados para construí-lo.

A regressão linear multivariada resulta em uma equação, na qual a variável resposta (ou dependente) é o consumo de energia da edificação e as variáveis explicativas (ou independentes) são os parâmetros utilizados para construir o modelo. Para realizar as análises apresentadas neste capítulo foi utilizada a metodologia de regressão linear múltipla, realizada por meio do *software Minitab*.

Análise dos parâmetros

Candidate terms: AVAC, EQUI, SETP

	-----Step 1-----		-----Step 2-----		-----Step 3-----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	40.4		-841.4		252.2	
EQUI	5.3860	0.000	5.3860	0.000	5.3860	0.000
AVAC			587.9	0.000	587.87	0.000
SETP					-50.280	0.000
S	362.809		212.290		96.8937	
R-sq	94.75%		98.20%		99.63%	
R-sq(adj)	94.74%		98.20%		99.63%	
R-sq(pred)	94.72%		98.19%		99.62%	
Mallows' Cp	9975.75		2910.22		4.00	

α to enter = 0.15, α to remove = 0.15

Análise de variância

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	1913069478	637689826	67923.23	0.000
AVAC	1	66352699	66352699	7067.53	0.000
EQUI	1	1819413238	1819413238	193793.93	0.000
SETP	1	27303541	27303541	2908.22	0.000
Error	764	7172731	9388		
Lack-of-Fit	8	5614608	701826	340.53	0.000
Pure Error	756	1558122	2061		
Total	767	1920242209			

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
96.8937	99.63%	99.63%	99.62%

Equação de Regressão

Consumo [kWh/m²/ano] = 252.2 + 587.87 AVAC + 5.3860 EQUI - 50.280 SETP

EQUAÇÃO FINAL

CONSUMO FINAL [kWh/m²/ano] = 252,2 + 587,87 AVAC + 5,3860 EQUI – 50,280 SETP

Em que:

AVAC – Tipo de sistema de condicionamento de ar (1- Sistema de expansão direta VAV, 2 – Chiller central resfriado a ar)

EQUI – Densidade de potência de equipamentos de TI instalados [W/m²]

SETP – Temperatura de *setpoint* do sistema de condicionamento de ar (valores entre 18°C e 25,5°C)

7.1. AVALIAÇÃO ENTRE O CONSUMO SIMULADO E O CONSUMO CALCULADO

A partir das equações desenvolvidas, foram utilizadas as características de cada modelo e calculado o consumo de energia da edificação. Esse consumo de energia foi comparado com o consumo de energia obtido a partir da simulação computacional e verificada a diferença entre eles.

A Figura 10 apresenta os valores obtidos por meio da equação e por simulação computacional. Objetiva-se verificar a aderência dos pontos na bissetriz do gráfico. Quanto mais aderentes os pontos à bissetriz, melhor a equação consegue representar os valores simulados. A equação presente no gráfico representa esta aderência, apresentando um coeficiente de determinação de 99,63%, logo a equação de *benchmark* tem boa representatividade do modelo para a tipologia de **Data Center e Centro de Processamento de Dados**.

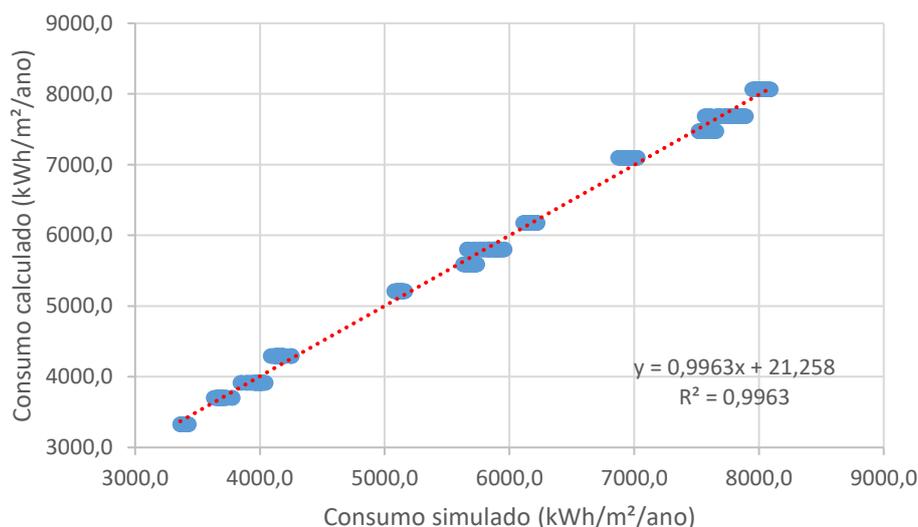


Figura 10 – Comparação entre o EUI simulado e o predito pela equação

8. ESCALAS DE CONSUMO DE ENERGIA

8.1. MÉTODO PARA CÁLCULO DAS ESCALAS

A classificação da eficiência da edificação analisada é feita por meio da comparação entre o consumo operacional da edificação e as escalas de consumo. As escalas de consumo foram definidas a partir dos parâmetros cujas variações representaram impactos significativos na equação de *benchmark* para esta tipologia, identificados e descritos nos capítulos anteriores deste relatório.

Os parâmetros considerados para esta tipologia e que serão inseridos na plataforma de cálculo de *benchmark* são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros para Escala de Consumo de Energia

Variável	Cenário	Parâmetros significativos
AVAC	Sistema de expansão direta	x
	VAV	
	Chiller central resfriado a ar	
Equipamentos	W/m²	x
Setpoint	°C	x

A escala de eficiência é definida por meio do cálculo dos consumos máximo e mínimo, determinados a partir das informações da edificação em análise, considerando o cenário base utilizado para o desenvolvimento da equação de *benchmark*. A Tabela 10 apresenta a definição do cenário utilizado para determinar os consumos mínimos e máximos.

Tabela 10 - Cenários para o cálculo de consumo mínimo e máximo para a tipologia de Data Center e Centro de Processamento de Dados

	Parâmetros	Limite Mínimo	Limite Máximo
AVAC	Sistema de expansão direta VAV Chiller central resfriado a ar	Sistema de expansão direta VAV	Chiller central resfriado a ar
Equipamentos	W/m ²	Parâmetro fixo	
Setpoint	°C	25,5	18

Portanto, a partir da entrada de dados da edificação em análise no cenário de base, a equação de *benchmark* calcula os consumos máximos e mínimos específicos para a condição da edificação em análise.

A faixa de consumo típico é obtida a partir da variável do cálculo posto a seguir, que considera como limite inferior o consumo mínimo acrescido de um coeficiente “i” e, o limite superior, como sendo o consumo mínimo acrescido de três vezes o fator “i”. Dessa forma, a escala é definida, identificando as faixas de consumo consideradas para edificações eficientes, típicas e ineficientes.

$$i = \frac{\text{consumo máximo da edificação} - \text{consumo mínimo da edificação}}{5}$$



8.2. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Para exemplificar a aplicação deste método e calcular as escalas de consumo de uma edificação, será apresentado o cálculo para a um Data Center localizado na cidade de São Paulo, Potência Instalada de Equipamentos de 1.018W/m², tipo de sistema de condicionamento de ar do tipo expansão direta – VAV, com Setpoint de Resfriamento de 22 °C. **O consumo previsto foi de 5.216,86 kWh/m²/ano.**

Realizando o cálculo do consumo deste Data Center nos cenários de consumo mínimo e consumo máximo, obtém-se os limites indicados na Tabela 11.

Tabela 11 - Exemplo de Escala de Eficiência – Data Center em São Paulo.

	Parâmetros	Mínimo	Máximo
VARIÁVEIS	AVAC	1- Sistema de expansão direta – VAV	2- Chiller central resfriado a ar
	SETPOINT	25,5	18
FIXOS	EQUIPAMENTOS	Consumo geral: 5040,88 [kWh/m ² /ano]	Consumo geral: 6005,85 [kWh/m ² /ano]

Então, a partir destes limites calculados, as faixas de consumo eficiente, típico e ineficiente para o cenário descrito são apresentadas a seguir:

$$i = \frac{6005,85 - 5040,88}{5} = 192,99$$



Considera-se nesse exemplo, portanto, que a edificação analisada apresenta consumo operacional inferior ao consumo mínimo da faixa típica (**5.216,86 < 5.233,87 kWh/m²/ano**), sendo classificada como Eficiente.

As escalas de eficiência são ferramentas importantes para a aplicação das equações de *benchmark*, uma vez que permitem a comparação de dados reais de edificações com suas faixas de consumo, viabilizando tanto a detecção de ineficiências quanto a determinação de metas de melhores práticas.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este relatório apresentou o registro do desenvolvimento do arquétipo, modelo de simulação, análise de sensibilidade e equações de *benchmark* para a tipologia de **Data Center e Centro de Processamento de Dados**.

Os parâmetros com maior impacto no consumo de energia desta tipologia foram: densidade de equipamentos (EQUI); tipo de sistema de condicionamento de ar (AVAC) e a temperatura de *setpoint* (SETP).

As variações do sistema de iluminação, absorvência solar, entorno e localização da edificação não apresentaram impacto significativo no consumo final e, portanto, não foram incluídas na equação de *benchmark* proposta para esta tipologia.

Os equipamentos de TI fazem parte da atividade principal desta tipologia e são grandes consumidores de energia elétrica. Além disso são também os responsáveis por quase a totalidade da carga térmica a ser extraída pelo sistema de condicionamento de ar o que também tem grande impacto no consumo final de energia.

O próprio sistema de condicionamento de ar possui diferentes consumos de energia a depender da tecnologia utilizada. Nesta situação, o sistema de expansão direta tipo *self-contained* apresentou um menor consumo de energia em relação ao sistema central de água gelada. Outro fator que também possui grande impacto no consumo de energia é a temperatura de *setpoint* do sistema de condicionamento de ar, sendo que temperaturas de operação mais altas podem representar grandes reduções no consumo de energia, sem prejudicar o funcionamento dos equipamentos de TI.

Com a previsão do consumo de energia em relação ao consumo simulado, verificou-se que as equações têm um R² de acima de 99,63%, logo os modelos regressivos empregados foram representativos para prever o consumo de energia para a tipologia de **Data Center e Centro de Processamento de Dados**.

A Tabela 12 resume os parâmetros estudados e identifica os considerados significativos para o desenvolvimento das equações de *benchmark* para esta tipologia.

Tabela 12 - Parâmetros analisados e sua relevância para a equação de benchmark da tipologia de Data Center e Centro de Processamento de Dados

Parâmetros analisados	Parâmetros na equação
Densidade de equipamentos	✓
AVAC	✓
Temperatura de setpoint	✓
GHR	
GDA	
Iluminação	
Absortância solar	
Entorno	

REFERÊNCIAS

- ASHRAE Procedures for Commercial Building Energy Audits, second edition, ASHRAE 2011
- ASHRAE Standard 90.4P, Proposed Energy Standard for Data Centers and Telecommunications Buildings, public review 2015, ASHRAE
- Borgstein, E. H., and R. Lamberts - Developing energy consumption benchmarks for buildings: Bank branches in Brazil. *Energy and Buildings* 82 (2014) 82–91.
- Borgstein, E.H. - Energia primária em edifícios no Brasil, *Revista Sistemas Prediais, Engenharia e Arquitetura*, January 2014
- CB3E - Proposta de método para a avaliação da eficiência energética com base em energia primária de edificações comerciais, de serviços e públicas. Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações, agosto 2017
- CBCS - Comunicação técnica: Desenvolvimento de benchmarks nacionais de consumo energético de edificações em operação. Conselho Brasileiro de Construção Sustentável, outubro 2014
- CIBSE – TM22: Energy Assessment and Reporting Methodology, Chartered Institute of Building Services Engineers, 2006
- CIBSE – TM46: Energy Benchmarks, Chartered Institute of Building Services Engineers, 2008
- CIBSE - TM47: Operational Ratings and Display Energy Certificates, Chartered Institute of Building Services Engineers, 2009
- CIBSE Guide D - Transportation systems in buildings, Chartered Institute of Building Services Engineers, 2010
- CIBSE Guide F - Energy efficiency in buildings, Chartered Institute of Building Services Engineers, 2012
- CIBSE TM54 - Evaluating Operational Energy Performance of Buildings at the Design Stage, Chartered Institute of Building Services Engineers, 2013
- ECON19 - Energy Efficiency Best Practices Programme, Energy Consumption Guide 19: Energy use in Offices, March 2003
- EN 15603 - Energy performance of buildings — Overall energy use, CO2 emissions and definition of energy ratings, 2008
- EPE - Estudos de Demanda de Energia, Nota técnica DEA 13/14 : Demanda de Energia 2050. Plano Nacional de Energia 2050, Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2014-1
- EPE - Estudos Econômicos, Nota técnica DEA 12/14 : Cenário Econômico 2050. Plano Nacional de Energia 2050, Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2014-2
- Healy, D. - Asset Ratings and Operational Ratings: The relationship between different energy certificate types for UK buildings, Submitted to the University of Cambridge in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Master of Studies in Interdisciplinary Design for the Built Environment, 2011
- Hinge, A., A. Cullen, B. Neely, C. Taylor - Building energy rating schemes around the world: What do we know? ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 2014
- Hong, S.M. and P. Steadman – An Analysis of Display Energy Certificates for Public Buildings, 2008-2012, A report to the Chartered Institute of Building Services Engineers, UCL Energy Institute December 2013
- IEA - Energy Performance Certification of Buildings: A policy tool to improve energy efficiency. International Energy Agency, OECD, Paris, 2010
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). Portaria 372, de 17 de setembro de 2010. Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, De Serviços e Públicos. Rio de Janeiro, 2010.

MENEZES, A.C., A. Cripps, D. Bouchlaghem, R. Buswell, 2013 - Benchmarking small power energy consumption in UK office buildings: a review of data published in CIBSE guide F. Building Services Engineering Research and Technology, 34 (1), pp. 73-86

SARFRAZ, O.; BACH, C. K.; WILLKINS, C. K. ASHRAE RP-1742 – Plug load design factors. ASHRAE Journals, janeiro, 2018.

Standeven, M. and B. Bordass – Landlord's Energy Statement: Guidance and Specification, version 2.3, Usable Buildings Trust, April 2007

YUVENTI, J.; MEHDIZADEH, R. A critical analysis of power usage effectiveness and its use in communicating data center energy consumption. Energy and Buildings 64 (2013) 90-94.