



CBCS

Conselho Brasileiro de Construção Sustentável

RT2B.08: Desenvolvimento de arquétipo, modelo de simulação, análise de sensibilidade e equações de *benchmark* para a tipologia de Comércio de Pequeno Porte

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 28/02/2021

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 Comércio de Pequeno Porte

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. Ocupação	7
4.4. Sombreamento e orientação solar	8
4.5. Envoltória e Absortância Solar	8
4.6. Definição da carga térmica e sistema de condicionamento de ar	9
5. MODELO DE SIMULAÇÃO	13
5.1. Cenários de simulação	13
5.2. Método de análise dos resultados das simulações	13
6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	15
6.1. análise em Cidades com GHR abaixo de 54 mil	15
6.2. análise em Cidades com GHR acima de 54 mil	16
6.3. análise para cenários sem ar condicionado	17
6.4. ANÁLISE DO IMPACTO dos parâmetros SIGNIFICATIVoS	18
7. EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	23
7.1. Cidades com GHR abaixo de 54 mil	24
7.2. Cidades com GHR acima de 54 mil	25
7.3. Equação para edificações sem sistema de ar condicionado	26
7.4. Avaliação entre o consumo simulado e o consumo calculado	27
8. ESCALAS DE CONSUMO DE ENERGIA	28
8.1. Método para cálculo das escalas	28
8.2. Exemplo de aplicação	29
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
REFERÊNCIAS	32

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 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.

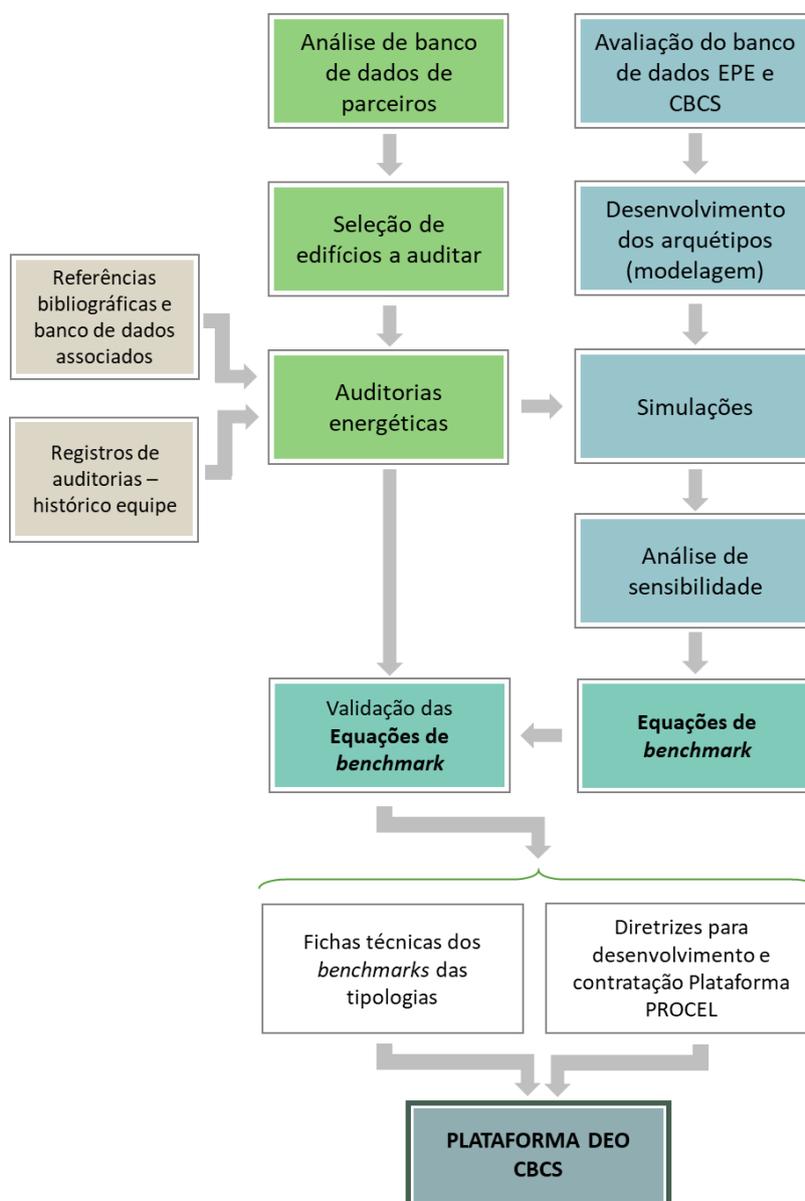


Figura 1 - Método aplicado pelo CBCS para o desenvolvimento dos benchmarks no âmbito deste convênio

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 **Comércio de Pequeno Porte**.

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, entorno, absorvância solar, envoltória, orientação solar, ar condicionado e renovação de ar. 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.

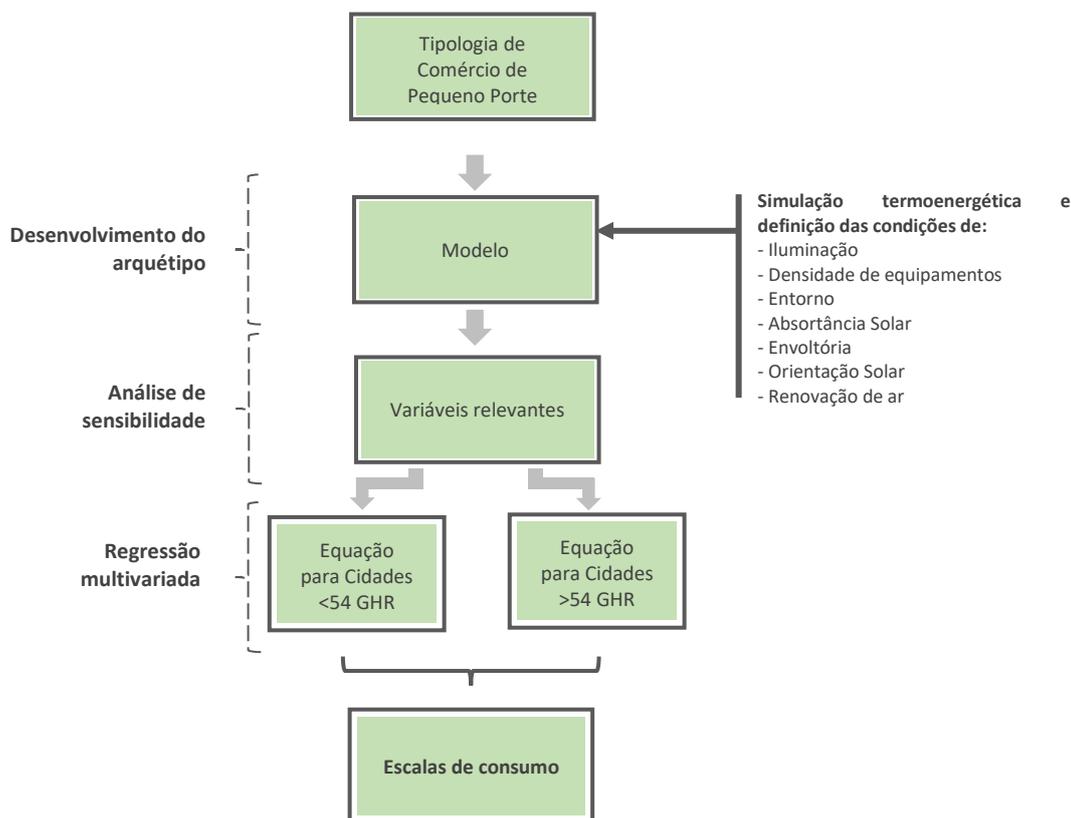


Figura 2 – Fluxograma de desenvolvimento das equações de benchmark e escalas de consumo para a tipologia de Comércio de Pequeno Porte

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 no ar condicionado, 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 ar condicionado. 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 **Comércio de Pequeno Porte** constitui-se tipicamente por lojas térreas, composto por um único salão de vendas ou de atendimento ao público, que é a atividade fim desta tipologia.

Duas fontes de dados principais foram utilizadas para o desenvolvimento do arquétipo desta tipologia: (a) analisaram-se as amostras existentes desta tipologia no projeto META; e (b) refinou-se a caracterização do arquétipo por meio de auditorias energéticas. Além disso, pesquisas virtuais (por meio do *Google Street View* e *Google Maps*) foram efetuadas em diversas localidades no Brasil de forma a dar suporte para alguns entendimentos e dúvidas pontuais durante o processo.

Para contemplar a tipologia no âmbito do presente convênio foi definido o arquétipo que representa as áreas de uso típico da maioria destas edificações. Dessa forma, o ambiente considerado neste arquétipo é: Área de Vendas.

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

4.1. VOLUMETRIAS

No que tange a configuração dos ambientes na edificação, a volumetria definida é constituída pela configuração física dos ambientes, conforme observado com maior frequência na prática. A Tabela 2 sintetiza os ambientes considerados nesta tipologia.

Tabela 2 – Áreas dos ambientes considerados

Ambiente	Quantidade	Área total (m ²)	Percentual na área total
Área de Vendas	1	200	100%
TOTAL	1	200	100%

O modelo possui um único pavimento de dimensões 10 m x 20 m x 3,2 m (L x C x A) sem divisões internas físicas, porém separadas em quatro zonas térmicas ilustradas na Figura 3 totalizando 200 m². A Figura 3 apresenta a planta e configuração do ambiente considerado e a Figura 4 as perspectivas do modelo.

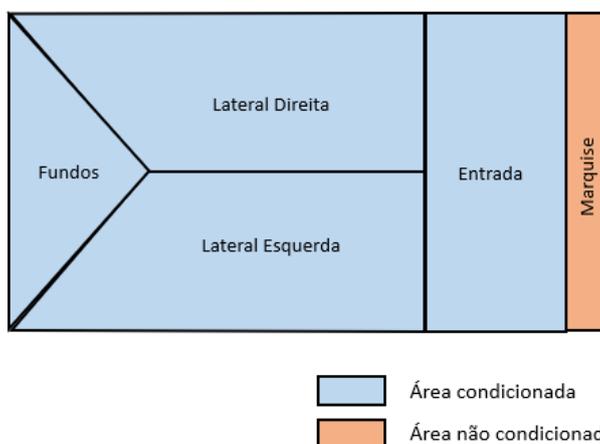


Figura 3 – Configuração da planta do arquétipo

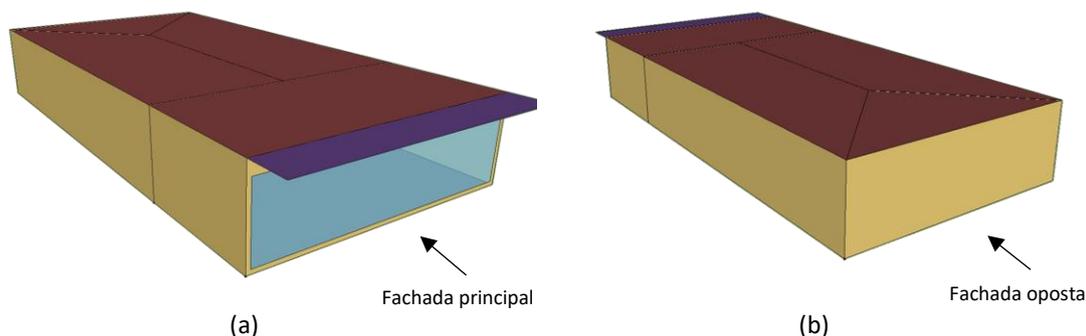


Figura 4 – Perspectiva da volumetria da edificação (a) frente e lateral direita; (b) fundos e lateral esquerda

4.2. ILUMINAÇÃO

No levantamento dos dados do projeto META foi identificado uma predominância significativa de sistemas de iluminação à base de lâmpadas fluorescentes em 91% das situações levantadas. Entretanto, com a evolução e disponibilização de diferentes tipos de lâmpadas de LED considerou-se que este seria um cenário mais eficiente. Portanto foram definidos dois cenários: um cenário mais eficiente (ILUM02), representando as lâmpadas tipo LED com densidade de potência de iluminação (DPI) de 11,4 W/m², e um cenário menos eficiente (ILUM01), representando as lâmpadas fluorescentes com DPI de 21,9 W/m². Esses valores correspondem, respectivamente, a uma classe A e classe D para edifícios com função de Comércio segundo a Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas - INI-C (CB3E, 2020).

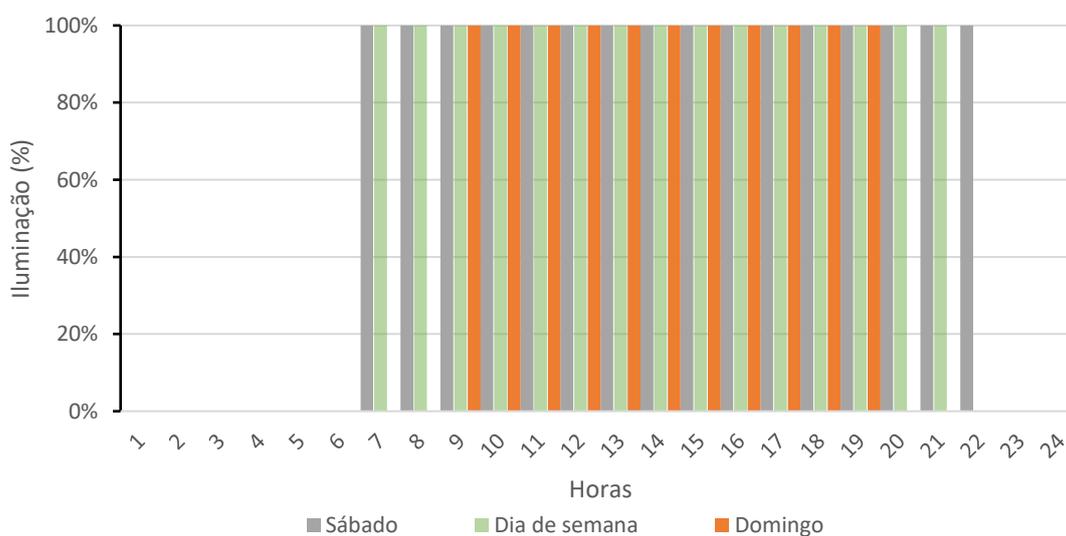
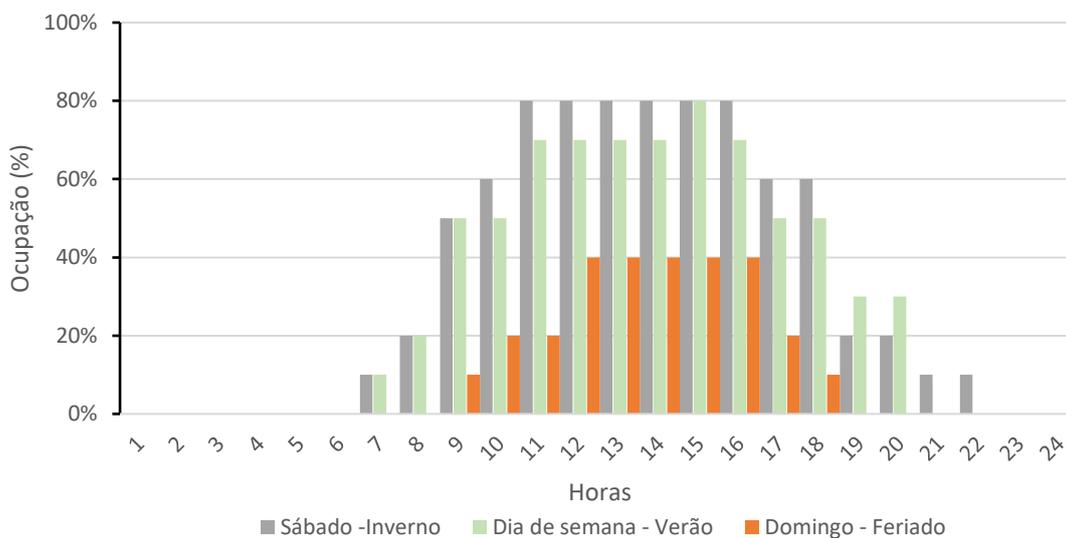


Figura 5 – Cronograma adotado para Iluminação da Área de Vendas

4.3. OCUPAÇÃO

O horário de funcionamento desta tipologia foi definido conforme tabela “Retail Occupancy” da norma “ASHRAE 90.1 – Users Manual”, sendo de segunda a sexta das 7:00h as 21:00h, aos sábados das 7:00h as 22:00h e aos domingos das 9:00h as 19:00h.

Segundo a ABNT NBR 16401-3 de 2008, a densidade de ocupação máxima esperada em uma edificação típica de comércio de pequeno porte é de 15 pessoas a cada 100m², totalizando para este arquétipo 30 pessoas. Já a ocupação horária da edificação, assim como horários de funcionamento da iluminação, dos equipamentos e dos sistemas de AVAC foram baseados também na tabela “Retail Occupancy” da ASHRAE.



(a) Ambiente 1

Figura 6 – Cronograma adotado para ocupação da Área de Vendas.

4.4. SOMBREAMENTO E ORIENTAÇÃO SOLAR

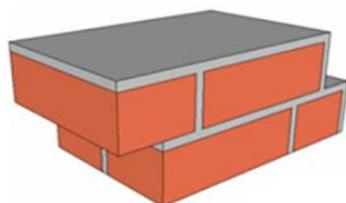
O arquétipo possui uma marquise com avanço de 1,5 m na fachada principal para realizar o sombreamento no interior da edificação, apesar da análise do banco de dados indicar que 58% da amostra não possui elementos de sombreamento e, também, não haver marquise nos três edifícios auditados. A adoção da marquise se deu em função das imagens pesquisadas por meio do *Google Street View* e *Google Maps*, as quais apontaram grande incidência de marquises, toldos ou algum elemento de sombreamento na entrada das lojas.

De qualquer modo, a orientação da fachada pode permitir diferentes impactos da luz solar na carga térmica da edificação. Assim, o arquétipo foi simulado variando a orientação de sua fachada de entrada nas quatro orientações principais: Sul (ORIE01), Oeste (ORIE02), Norte (ORIE03) e Leste (ORIE04).

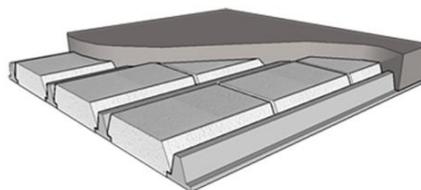
4.5. ENVOLTÓRIA E ABSORTÂNCIA SOLAR

Para definir dois cenários que representem uma situação de envoltória mais eficiente e uma menos eficiente foram considerados os valores apresentados nos Requisitos Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviço e Públicos, RTQ-C (INMETRO, 2010). Para o cenário menos eficiente (ENVO01) foi considerada a transmitância térmica da parede igual a 3,70 W/m².K

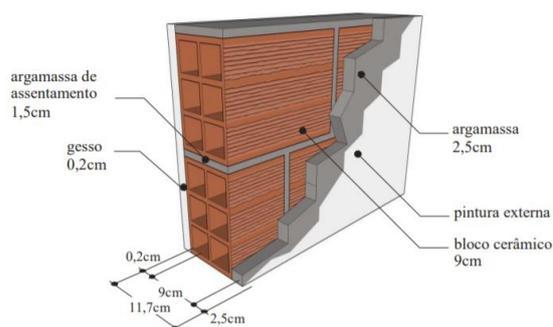
e da cobertura igual a 2,00 W/m².K. Para o cenário mais eficiente (ENVO02), onde os materiais utilizados na construção da edificação são mais isolantes, minimizando as oscilações de temperatura interior em função das condições climáticas externas, que muitas vezes são indesejados nos ambientes internos, foi determinado uma envoltória com transmitância térmica das paredes igual a 2,55 W/m².K e da cobertura de 1,01 W/m².K. Em ambos os cenários, foi considerado um vidro simples incolor, com valor U de 5,7 W/m².K e fator solar de 0,87.



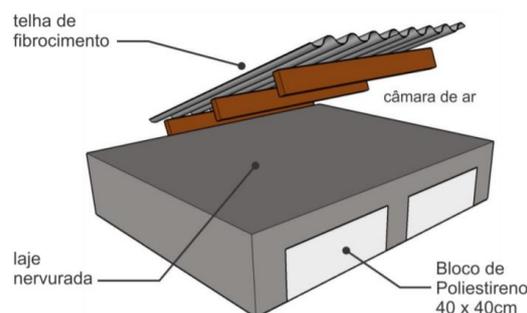
(a)
Transmitância térmica: 3,70 W/m²K
Capacidade térmica: 142 kJ/m²K
Atraso térmico: 2,3 h



(b)
Transmitância térmica: 2,00 W/m²K
Capacidade térmica: 132 kJ/m²K
Atraso térmico: 2,5 h



(c)
Transmitância térmica: 2,55 W/m²K
Capacidade térmica: 100 kJ/m²K
Atraso térmico: 2,2 h



(d)
Transmitância térmica: 1,01 W/m²K
Capacidade térmica: 238 kJ/m²K
Atraso térmico: 8,7 h

Figura 7 – Elementos construtivos de referência para: Cenário ENVO01 (a) Paredes e (b) Cobertura e Cenário ENVO02 (c) Paredes e (d) Cobertura

Como a absorvância está relacionada à cor e esta característica se apresenta amplamente variável no estoque de edificações, foram definidos dois cenários de variação para esta propriedade: o primeiro onde o valor da absorvância à radiação solar das paredes e coberturas são iguais a 0,7, equivalente ao concreto aparente mais escuro, e o segundo equivalente à uma pintura na cor branca, onde o valor da absorvância é 0,3.

Em ambos os casos foram consideradas unidades localizadas em pavimento térreo e em contato direto com o solo. A simulação da temperatura do solo foi considerada por meio do objeto *GroundDomain:Slab* do EnergyPlus.

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, diversos turnos, diversos sombreamentos, todas as orientações, 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 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.

Parâmetro	Cenário
Iluminação	ILUM01
Densidade de equipamentos	EQUI01
Entorno	ENTO01
Absortância Solar	ASOLB01
Envoltória	ENVO01
Orientação Solar	ORIE01
Renovação de ar	8,5 trocas de ar por hora (equivalente ao pico de infiltração de ar em RENO02)

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 ar condicionado 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 ($P [kW] = \text{vazão [l/s]} \times 0,0017$), e para vazão variável ($P [kW] = \text{vazão [l/s]} \times 0,0024$), 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 ar condicionado do arquétipo. Esta seleção foi feita tendo com 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.

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

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	13,6
São Paulo	SP	3	14,9
Porto Alegre*	RS	3	15,9
Campinas	SP	3	15,1
Rio de Janeiro (Vila Militar)	RJ	8	15,3
Vitória	ES	8	13,9
Recife	PE	8	14,0
Fortaleza	CE	8	12,9

* Cidade selecionada

Percebe-se que, dentre as cidades selecionadas como representativas, a cidade com maior carga térmica foi Porto Alegre, com 15,9 TR. Dessa forma, o arquivo climático de Porto Alegre foi selecionado como referência para dimensionamento do sistema de ar condicionado considerado no arquetipo.

Como cenário menos eficiente para a variável de AVAC foram considerados sistemas individuais tipo Split Convencional para cada zona térmica, com EER nominal médio de 3,40 W/W. Como cenário mais eficiente foram considerados sistemas individuais Split com tecnologia Inverter, resultando em um EER nominal médio de 3,27 W/W.

Cabe ressaltar que o sistema split convencional opera ligando seu compressor em capacidade nominal conforme a necessidade de regular a temperatura no ambiente e desligando-o após atingir a temperatura desejada, permitindo portanto uma certa variação na temperatura do ar. Assim, sua eficiência é praticamente constante durante os períodos de operação do compressor. Já a tecnologia inverter permite que o compressor opere com velocidade variável a cargas parciais onde possui maior eficiência, o que mantém a temperatura do ar mais constante com consumo menor de energia quando comparado ao sistema convencional.

Para a simulação mais precisa da tecnologia inverter seriam necessárias informações mais detalhadas em relação a eficiência dos compressores a cargas parciais que, pela legislação vigente, ainda não são obrigatoriamente aferidas e fornecidas pelos fabricantes. Desta forma, nas condições analisadas para esta tipologia, como poderá ser observado no Capítulo 5 a seguir, os resultados obtidos na comparação das simulações entre o sistema split convencional e o sistema split inverter não apresentaram grande diferença no consumo de energia, uma vez que as eficiências a cargas totais de ambos os sistemas considerados nesta análise são similares.

Foi considerado também um cenário onde as edificações não possuem sistema de ar condicionado e são utilizados ventiladores de parede na tentativa de obter algum conforto térmico ao longo do dia.

Para minimizar a infiltração de ar externo no ambiente condicionado durante o acesso das pessoas ao interior da edificação, ou durante a sua saída, utiliza-se o recurso de portas automáticas (identificado pelo cenário (RENO02) que são acionadas somente quando um cliente se aproxima da porta, permitindo a troca de ar somente durante o período em que a porta fica aberta. De acordo com as características da edificação simulada e baseado nas orientações no Capítulo 16 do “Handbook of Fundamentals 2017” da

ASHRAE, estima-se que as aberturas das portas permitem na média cerca de 4,4 trocas de ar por hora na zona da entrada da loja, com picos de 8,5 trocas horárias de ar nos períodos de maior movimento.

Por outro lado, manter as portas sempre abertas pode ser mais atrativo para o consumidor e, conseqüentemente, ao proprietário do estabelecimento, por não haver um bloqueio ao seu acesso. Estima-se, no entanto, que este cenário (identificado por RENO01), baseado em Gil-Lopez (2013), permite cerca de 13,8 trocas de ar por hora na zona da entrada, que a depender do clima externo pode resultar em um grande aumento no consumo de energia pelo sistema de ar condicionado. Uma alternativa para que as portas possam ficar sempre abertas, porém sem sobrecarregar o sistema de ar condicionado, é a utilização da cortina de ar (RENO03), que apesar de reduzir a infiltração de ar no ambiente interno, possui um consumo constante de energia para manter a barreira de ar em operação. Ainda baseado em Gil-Lopez (2013), esta alternativa permite apenas 0,6 troca de ar por hora.

5. MODELO DE SIMULAÇÃO

5.1. CENÁRIOS 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, 1.158 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, consumos desagregados por uso final e por ambiente. A Tabela 5 apresenta a síntese das características dos cenários adotados nas simulações termoenergéticas para esta tipologia.

Tabela 5 – Cenários adotados para simulações

Parâmetro	Cenário	Dado utilizado
Iluminação	ILUM01	Iluminação com DPI PBE classe D (21,9 W/m ²)
	ILUM02	Iluminação com DPI PBE classe A (11,4 W/m ²)
Equipamentos de tomada	EQUI01	Densidade de potência instalada de 40 W/m ²
	EQUI02	Densidade de potência instalada de 20 W/m ²
	EQUI03	Densidade de potência instalada de 3 W/m ²
Entorno	ENTO01	Paredes e coberturas expostas
	ENTO02	Paredes e coberturas adiabáticas
Absortância	ASOL01	Equivalente ao concreto aparente (α : 0,7)
	ASOL02	Equivalente a pintura na cor branca (α : 0,3)
Envoltória	ENVO01	Uparede = 3,85 W/m ² .K; Ucobertura = 2,09 W/m ² .K
	ENVO02	Uparede = 2,55 W/m ² .K; Ucobertura = 1,01 W/m ² .K
Orientação Solar	ORIE01	Fachada principal orientada a Sul
	ORIE02	Fachada principal orientada a Oeste
	ORIE03	Fachada principal orientada a Norte
	ORIE04	Fachada principal orientada a Leste
AVAC	Split Convencional	Sistema Split Convencional (EER = 3,40W/W)
	Split Inverter	Sistema Split Inverter (EER = 3,27W/W)
	Ventilador	Ventilador axial de parede
Renovação de ar	RENO01	Sem barreira (13,8ach)
	RENO02	Porta automática (4,4ach)
	RENO03	Com cortina de ar (0,6ach)

Notas:

U = Transmitância térmica;

SHGC = *Solar Heat Gain Coefficient*, em português: coeficiente de ganho de calor solar.

5.2. MÉTODO DE ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Os resultados obtidos nas simulações mostraram um consumo significativo de aquecimento nas cidades mais frias, chegando a superar o consumo de resfriamento em alguns cenários em Campos do Jordão, a cidade mais fria em análise. Portanto, as análises e equações foram divididos em dois grupos: 1- para cidades que apresentam Graus-dia de Aquecimento (GDA), como mostra a Tabela 6, e consequentemente consumo com aquecimento; e Graus-hora de Resfriamento (GHR): 2- para cidades que só apresentam Graus-hora de Resfriamento (GHR).

Tabela 6 – Graus Hora de Resfriamento (GHR) para as cidades adotadas

Cidade	UF	Latitude	Longitude	Altitude	GHR	Grupo
Campos do Jordão	SP	-22,74	-45,59	1.642	3.495	<54.000 GHR
São Paulo	SP	-23,85	-46,64	792	14.172	
Porto Alegre	RS	-30,03	-51,23	47	23.954	
Campinas	SP	-22,82	-47,06	640	31.412	
Rio de Janeiro (Vila Militar)	RJ	-22,86	-43,41	45	45.016	>54.000 GHR
Vitória	ES	-20,32	-40,34	9	54.061	
Recife	PE	-8,05	-34,88	10	63.550	
Fortaleza	CE	-3,8	-38,53	41	71.394	

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.

Além disso, a contribuição dos ambientes não considerados, que pode possuir cargas especiais, não foi modelada no arquétipo. Neste caso, como trata-se de um consumo muito particular de cada caso, definiu-se que essas cargas entrariam de forma isolada na equação de *benchmarking*, conforme seus perfis de carga e de utilização.

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), equipamentos de tomada (EQUI), entorno (ENTO), Absortância (ASOL) orientação solar (ORIE), envoltória (ENVO), tipo de sistema de ar condicionado (AVAC) e renovação de ar (RENO). Além disso, a carga térmica, influenciada pela cidade (GHR, GDA) também foi um parâmetro analisado.

Assim, para as equações de *benchmark*, foram consideradas 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 ar condicionado para manter as condições locais de conforto.

6.1. ANÁLISE EM CIDADES COM GHR ABAIXO DE 54 MIL

Por meio das Figura 8 e Figura 9, verifica-se que os parâmetros com variações mais significativas são o GHR, GDA, ILUM e EQUI, relevância também identificada nas análises das auditorias realizadas e reportadas no relatório RT2A.08. As variações dos parâmetros AVAC, ENTO, RENO, ENVO, ASOL e ORIE tiveram um impacto pequeno no cálculo do consumo de energia.

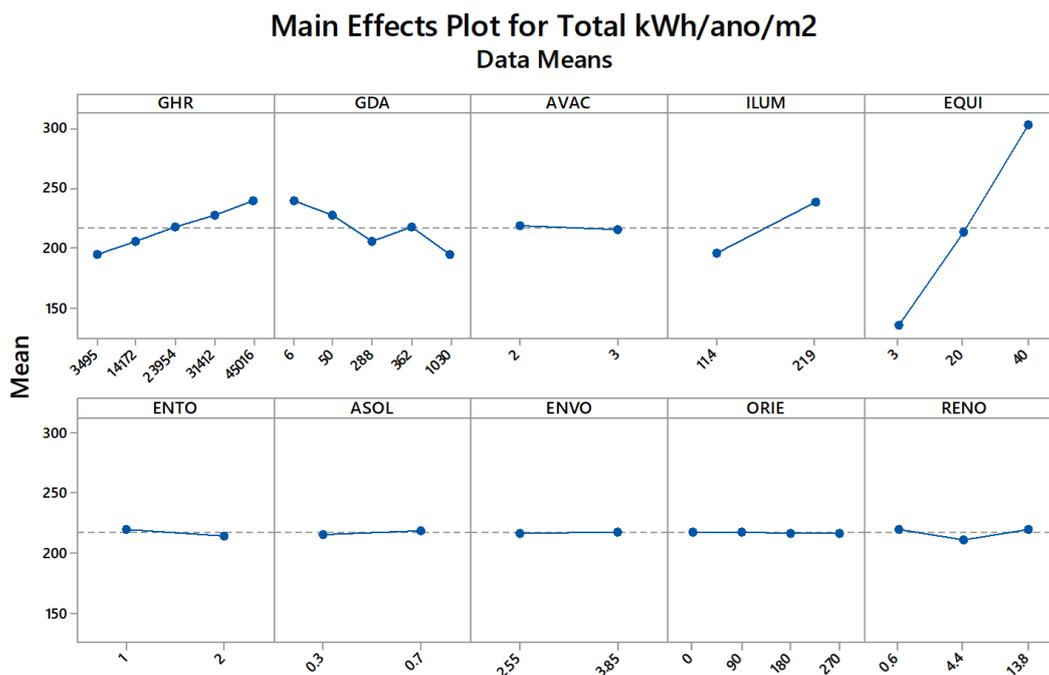


Figura 8 - Efeito do parâmetro no consumo de energia

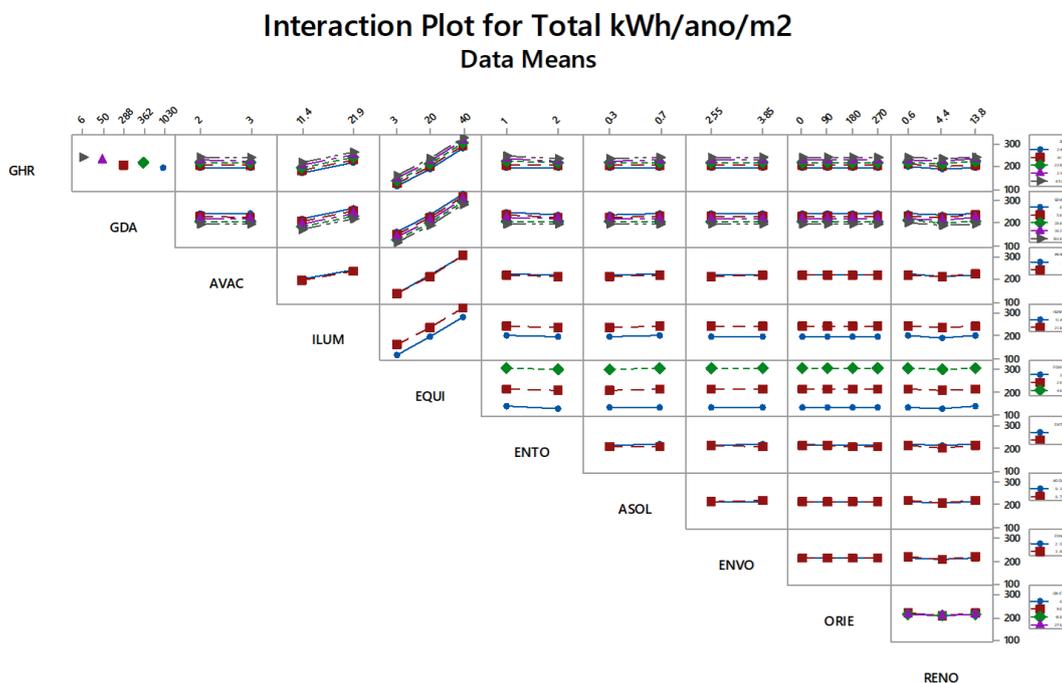


Figura 9 - Interação entre os parâmetros

6.2. ANÁLISE EM CIDADES COM GHR ACIMA DE 54 MIL

Por meio da Figura 10 e Figura 11, verifica-se que os parâmetros com variações mais significativas são o GHR, GDA, ILUM e EQUI, relevância também identificada nas análises das auditorias realizadas e reportadas no relatório RT2A.08. As variações dos parâmetros AVAC, ENTO, RENO, ENVO, ASOL e ORIE tiveram um impacto pequeno no cálculo do consumo de energia. Entretanto, optou-se por incluir na equação de *benchmarking* para cidades com GHR acima de 54 mil, os parâmetros ENTO e RENO, pois ao serem analisados pelo método de identificação de impactos, detalhado no item 6.4 a seguir, eles apresentaram alguma relevância.

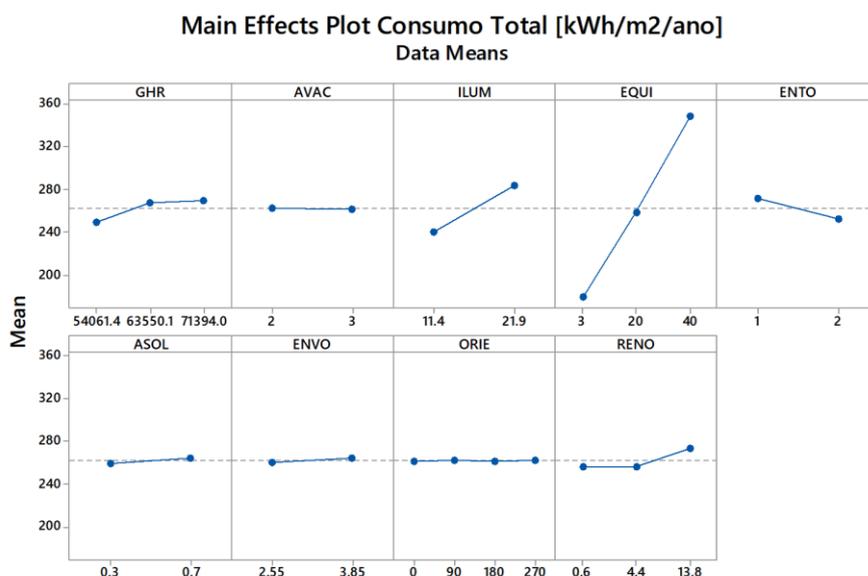


Figura 10 - Efeito do parâmetro no consumo de energia.

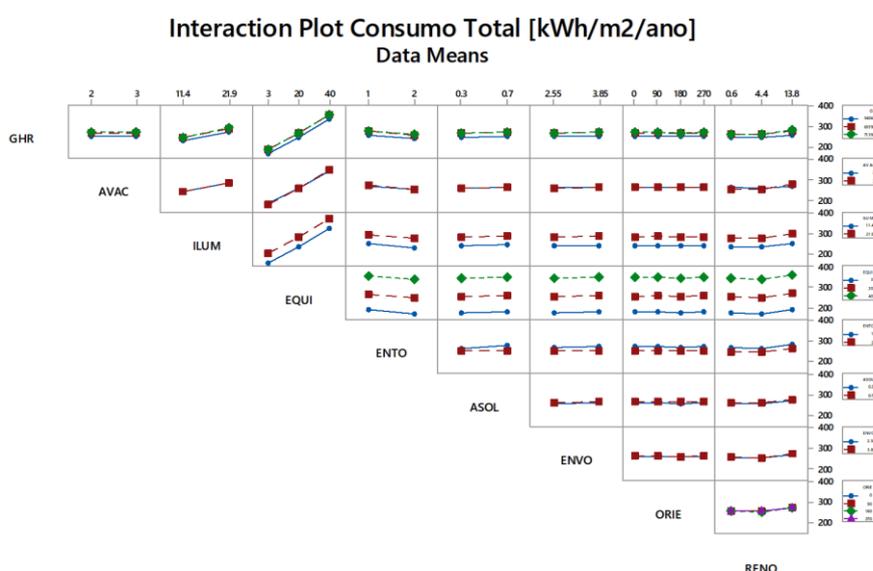


Figura 11 - Interação entre os parâmetros

6.3. ANÁLISE PARA CENÁRIOS SEM AR CONDICIONADO

Pela análise da Figura 12 e Figura 13 verificamos que os parâmetros com variações mais significativas são o ILUM e EQUI. As variações do parâmetro GHR não tiveram impacto no cálculo do consumo de energia e, sendo assim, foi retirado das análises da equação de regressão.

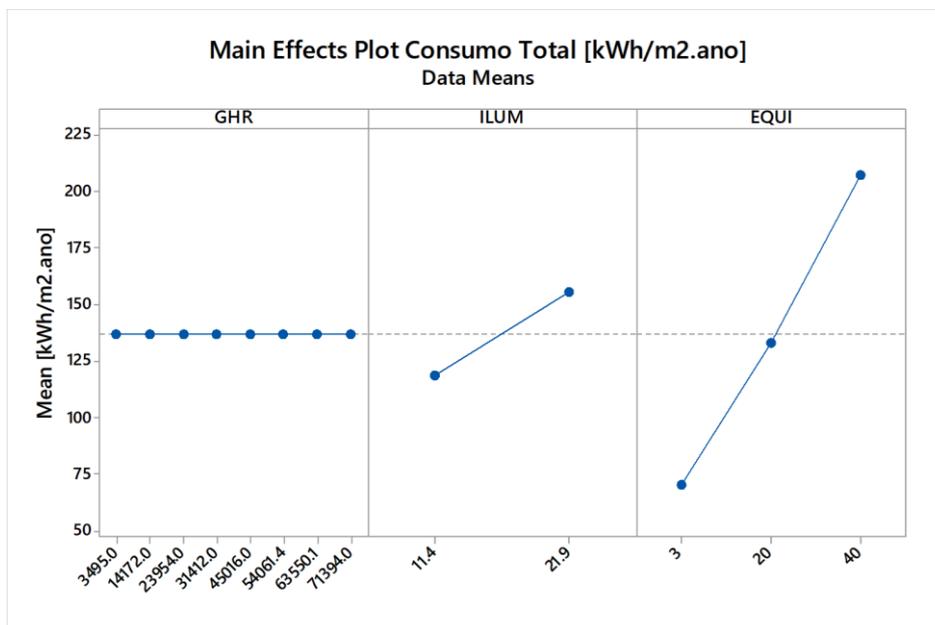


Figura 12- Efeito do parâmetro no consumo de energia

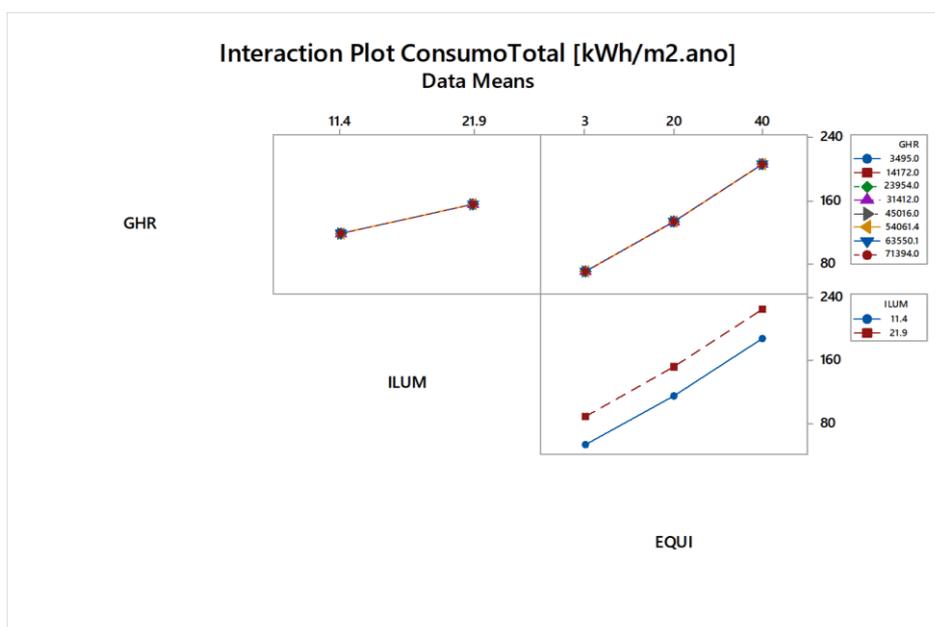


Figura 13 - Interação entre os parâmetros

6.4. 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: ILUM e EQUI, também tendo sido analisados, complementarmente, os parâmetros ENTO e RENO.

O sistema de iluminação, além do consumo próprio de energia elétrica, também aumenta a carga térmica dentro da edificação, influenciando o consumo de energia do sistema de ar condicionado. A Tabela 7 ilustra tal impacto ao substituir o sistema de iluminação no padrão PBE classe D (21,9 W/m²) para um PBE classe A (11,4 W/m²), muitas vezes reduzindo mais de 10% no consumo de energia da edificação considerando apenas o sistema de AVAC. Este parâmetro possui um impacto significativo no consumo de energia da edificação como um todo e por isso será utilizado para balizar a eficiência energética do usuário final na equação de *benchmarking*.

Tabela 7 - Impacto do sistema de iluminação no consumo do sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC:	Sistema split Convencional (EER =3,40W/W)	
	Iluminação:	Parâmetro analisado	
	Equipamentos de tomada:	3 W/m ²	
	Entorno:	Paredes e coberturas adiabáticas	
	Absortância Solar	α: 0,7	
	Envoltória	Upar: 3,85W/m ² .K ; Ucob: 2,09W/m ² .K	
	Orientação Solar:	Oeste	
	Renovação de ar:	Porta automática (4,4ach)	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Varição no consumo de AVAC
	Parâmetro analisado: Iluminação		
	PBE classe D (21,9W/m ²)	PBE classe A (11,4W/m ²)	
Campos do Jordão	38	31	-19,1%
São Paulo	48	40	-15,5%
Porto Alegre	58	50	-13,6%
Campinas	65	57	-12,8%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	75	67	-11,6%
Vitória	84	75	-10,8%
Recife	100	91	-9,3%
Fortaleza	100	90	-9,4%

Assim como o sistema de iluminação, a densidade de potência dos equipamentos de tomada, além do consumo próprio de energia, também introduz carga térmica na edificação, impactando no consumo de energia pelo sistema de condicionamento de ar. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustra tal impacto no consumo energético do sistema de AVAC, para um cenário de alta densidade de potência instalada (40 W/m²) comparado com um de média densidade (20 W/m²) e, a Tabela 9, compara um cenário de alta densidade com um outro de baixa densidade (3 W/m²).

Tabela 8 - Impacto dos equipamentos de tomada (alta e média densidade instalada) no consumo do sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC:	Sistema split convencional (EER =3,40W/W)	
	Iluminação:	PBE classe A (11,4W/m ²)	
	Equipamentos de tomada:	Parâmetro analisado	
	Entorno:	Paredes e coberturas expostas	
	Absortância Solar	α: 0,3	
	Envoltória	Upar: 2,55 W/m ² .K ; Ucob: 1,01 W/m ² .K	
	Orientação Solar:	Oeste	
	Renovação de ar:	Porta automática (4,4ach)	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Varição no consumo de AVAC
	Parâmetro analisado: Equipamentos de tomada		
	40W/m ²	20W/m ²	
Campos do Jordão	57	44	-22,9%

São Paulo	71	55	-22,5%
Porto Alegre	83	67	-19,2%
Campinas	96	78	-19,1%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	109	90	-17,3%
Vitória	120	101	-16,0%
Recife	142	122	-13,6%
Fortaleza	141	122	-14,0%

Tabela 9 - Impacto dos equipamentos de tomada (alta e baixa densidade instalada) no consumo do sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC:	Sistema split convencional (EER =3,40 W/W)	
	Iluminação:	PBE classe A (11,4 W/m ²)	
	Equipamentos de tomada:	Parâmetro analisado	
	Entorno:	Paredes e coberturas expostas	
	Absortância Solar	α: 0,3	
	Envoltória	Upar: 2.55 W/m ² .K ; Ucob: 1.01 W/m ² .K	
	Orientação Solar:	Oeste	
	Renovação de ar:	Porta automática (4,4ach)	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Varição no consumo de AVAC
	Parâmetro analisado: Equipamentos de tomada		
	40 W/m ²	3 W/m ²	
Campos do Jordão	57	36	-35,8%
São Paulo	71	42	-41,3%
Porto Alegre	83	55	-34,5%
Campinas	96	62	-35,6%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	109	74	-32,3%
Vitória	120	84	-29,9%
Recife	142	106	-25,5%
Fortaleza	141	104	-26,1%

O entorno da edificação também causa bastante impacto no consumo de energia da edificação. O fato da edificação estar exposta no ambiente, recebendo os efeitos da radiação solar, ou estar inserida em uma edificação maior ou conjunto de edificações ao seu redor onde suas paredes e cobertura não trocam calor diretamente com o ambiente externo, pode explicar uma grande diferença no consumo energético do sistema de ar condicionado. A Tabela 10, a seguir, mostra a diferença no consumo de energia entre os cenários de uma edificação exposta ao ambiente externo e outra adiabática, tendo somente sua fachada principal exposta.

Tabela 10 – Impacto da exposição da edificação ao ambiente externo no consumo do sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC:	Sistema split convencional (EER =3,40W/W)	
	Iluminação:	PBE classe A (11,4W/m ²)	
	Equipamentos de tomada:	20 W/m ²	
	Entorno:	Parâmetro analisado	
	Absortância Solar	α: 0,7	

	Envolória	Upar: 3,85 W/m ² .K ; Ucob: 2,09 W/m ² .K	
	Orientação Solar:	Oeste	
	Renovação de ar:	Porta automática (4,4ach)	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m ²]		Variação no consumo de AVAC
	Parâmetro analisado: Entorno		
	Exposto	Adiabático	
Campos do Jordão	56	45	-19,5%
São Paulo	67	55	-17,1%
Porto Alegre	83	65	-21,5%
Campinas	94	74	-21,4%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	108	84	-21,9%
Vitória	122	93	-23,8%
Recife	152	109	-28,7%
Fortaleza	145	109	-25,1%

Outro item que também impacta no consumo de energia do sistema de ar condicionado é a infiltração de ar externo no ambiente condicionado. Em edificações comerciais é inevitável que tal infiltração ocorra, pois é necessário o fluxo de pessoas que irão frequentar o estabelecimento. O impacto desta infiltração para o sistema de ar condicionado é variável de acordo com as condições climáticas da região. A Tabela 11 mostra que nos climas mais frios, a infiltração de ar propicia um menor consumo anual de energia pelo sistema de ar condicionado. Essa redução se dá pela estratégia chamada *free-cooling*, quando a entalpia do ar externo é inferior à do ar interno. Para climas mais quentes, no entanto, tal infiltração tende a aumentar o consumo de energia elétrica no sistema de ar condicionado.

Tabela 10 – Impacto da renovação de ar no consumo do sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC:	Sistema split convencional (EER =3,40W/W)	
	Iluminação:	PBE classe D (11.4W/m ²)	
	Equipamentos de tomada:	40 W/m ²	
	Entorno:	Paredes e coberturas adiabáticas	
	Absortância Solar	α : 0,7	
	Envoltória	Upar: 3.85W/m ² .K ; Ucob: 2.09W/m ² .K	
	Orientação Solar:	Oeste	
	Renovação de ar:	Parâmetro analisado	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m ²]		Variação no consumo de AVAC
	Parâmetro analisado: Renovação de ar		
	Cortina de ar (0,6ach)	Porta automática (4,4ach)	
Campos do Jordão	80	66	-17,0%
São Paulo	92	80	-12,7%
Porto Alegre	98	90	-8,3%
Campinas	106	102	-4,3%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	116	113	-2,7%
Vitória	121	122	0,5%
Recife	133	138	3,6%
Fortaleza	132	139	5,4%

7. EQUAÇÃO DE REGRESSÃO

Para o desenvolvimento das equações para predição do consumo de energia da tipologia de **Comércio de Pequeno Porte**, 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, a 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, realizadas por meio do *software Minitab*.

O modelo estatístico do *benchmarking* foi segmentado em cidades com necessidade tanto de aquecimento (GHR menores que 54.000) quanto resfriamento ambiental e, também, para aquelas com demanda apenas de resfriamento (GHR maiores ou iguais a 54.000). Em suma, foram construídas 3 equações para esta tipologia.

7.1. CIDADES COM GHR ABAIXO DE 54 MIL

Análise das variáveis – Comércio de Pequeno Porte

Candidate terms: logGHR, logGDA, ILUM, EQUI

	-----Step 1-----		-----Step 2-----		-----Step 3-----		-----Step 4-----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	122.337		-40.95		-109.82		-18.19	
EQUI	4.5157	0.000	4.5157	0.000	4.51567	0.000	4.51567	0.000
logGHR			38.467	0.000	38.467	0.000	21.759	0.000
ILUM					4.1364	0.000	4.1364	0.000
logGDA							-9.885	0.000
S		27.8690		23.5575		9.11830		7.94601
R-sq		85.73%		89.80%		98.47%		98.84%
R-sq(adj)		85.72%		89.80%		98.47%		98.84%
R-sq(pred)		85.72%		89.79%		98.47%		98.84%
Mallows' Cp		65073.90		44846.53		1827.66		5.00

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	4	30966478	7741620	122612.05	0.000
logGHR	1	132189	132189	2093.62	0.000
logGDA	1	115208	115208	1824.66	0.000
ILUM	1	2716301	2716301	43020.87	0.000
EQUI	1	26857705	26857705	425373.30	0.000
Error	5755	363366	63		
Lack-of-Fit	25	55705	2228	41.50	0.000
Pure Error	5730	307661	54		
Total	5759	31329844			

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
7.94601	98.84%	98.84%	98.84%

EQUAÇÃO FINAL PARA CIDADES COM GHR MENORES QUE 54 MIL

Consumo Total [kWh/m²/ano] = -18,19 + 21,759 logGHR – 9,885 logGDA + 4,1364 ILUM + 4,51567 EQUI

Onde:

GHR – Graus-hora de resfriamento da cidade onde se localiza a edificação

GDA – Graus-dia de aquecimento da cidade onde se localiza a edificação

ILUM – Densidade de potência de iluminação instalada (W/m²)

EQUI – Densidade de potência de equipamentos instalados (W/m²)

7.2. CIDADES COM GHR ACIMA DE 54 MIL

Análise das variáveis – Comércio de Pequeno Porte

Candidate terms: log_GHR, ILUM, EQUI, ENTO, RENO

	-----Step 1-----		-----Step 2-----		-----Step 3-----		-----Step 4-----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	166.656		96.69		124.85		-701.6	
EQUI	4.5628	0.000	4.5628	0.000	4.5628	0.000	4.5628	0.000
ILUM			4.2020	0.000	4.2020	0.000	4.2020	0.000
ENTO					-18.774	0.000	-18.774	0.000
log_GHR							172.31	0.000
RENO								
S	28.1326		17.4524		14.7126		11.9834	
R-sq	85.75%		94.52%		96.11%		97.42%	
R-sq(adj)	85.75%		94.52%		96.10%		97.41%	
R-sq(pred)	85.74%		94.51%		96.10%		97.41%	
Mallows' Cp	28099.91		8689.26		5176.50		2273.88	
	-----Step 5-----							
	Coef	P						
Constant	-710.1							
EQUI	4.5628	0.000						
ILUM	4.2020	0.000						
ENTO	-18.774	0.000						
log_GHR	172.31	0.000						
RENO	1.3596	0.000						
S	9.30803							
R-sq	98.44%							
R-sq(adj)	98.44%							
R-sq(pred)	98.44%							
Mallows' Cp	6.00							

Análise de variância

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	5	18887316	98.44%	18887316	3777463	43599.79	0.000
log_GHR	1	251655	1.31%	251655	251655	2904.62	0.000
ILUM	1	1681902	8.77%	1681902	1681902	19412.66	0.000
EQUI	1	16452580	85.75%	16452580	16452580	189897.04	0.000
ENTO	1	304517	1.59%	304517	304517	3514.76	0.000
RENO	1	196661	1.03%	196661	196661	2269.88	0.000
Error	3450	298906	1.56%	298906	87		
Lack-of-Fit	102	97718	0.51%	97718	958	15.94	0.000
Pure Error	3348	201189	1.05%	201189	60		
Total	3455	19186222	100.00%				

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
9.30803	98.44%	98.44%	98.44%

EQUAÇÃO FINAL PARA CIDADES COM GHR MAIORES OU IGUAIS A 54 MIL

Consumo Total [kWh/m²/ano] = -710,1 + 172,31 logGHR + 4,2020 ILUM + 4,5628 EQUI – 18,774 ENTO + 1,3596 RENO

Onde:

GHR – Graus-hora de resfriamento da cidade onde se localiza a edificação

ILUM – Densidade de potência de iluminação instalada (W/m²)

EQUI – Densidade de potência de equipamentos instalados (W/m²)

ENTO – Condição de entorno (1 – exposto; 2 – parcialmente adiabático, sendo exposta a fachada principal)

RENO – Renovação de ar (0,6 – cortina de ar; 4,4 – porta automática; 13,8 – sem barreira)

7.3. EQUAÇÃO PARA EDIFICAÇÕES SEM SISTEMA DE AR CONDICIONADO

Análise das variáveis – Comércio de Pequeno Porte

Candidate terms: ILUM, EQUI

	----Step 1----		-----Step 2-----	
	Coef	P	Coef	P
Constant	59.38		0.9449	
EQUI	3.689	0.000	3.689	*
ILUM			3.510	*
S	18.8228			0
R-sq		90.16%		100.00%
R-sq(adj)		89.95%		100.00%
R-sq(pred)		89.28%		100.00%

Análise das variáveis

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	165703	82852	*	*
ILUM	1	16298	16298	*	*
EQUI	1	149406	149406	*	*
Error	45	0	0		
Lack-of-Fit	3	0	0	*	*
Pure Error	42	0	0		
Total	47	165703			

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0	100.00%	100.00%	100.00%

EQUAÇÃO FINAL PARA EDIFICAÇÕES SEM SISTEMA DE AR CONDICIONADO

Consumo Total [kWh/m²/ano] = 0,9449 + 3,510 ILUM + 3,689 EQUI

Onde:

ILUM – Densidade de potência de iluminação instalada (W/m²)

EQUI – Densidade de potência de equipamentos instalados (W/m²)

7.4. 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 14 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 98,81%, logo a equação de *benchmark* tem boa representatividade do modelo para a tipologia de **Comércio de Pequeno Porte**.

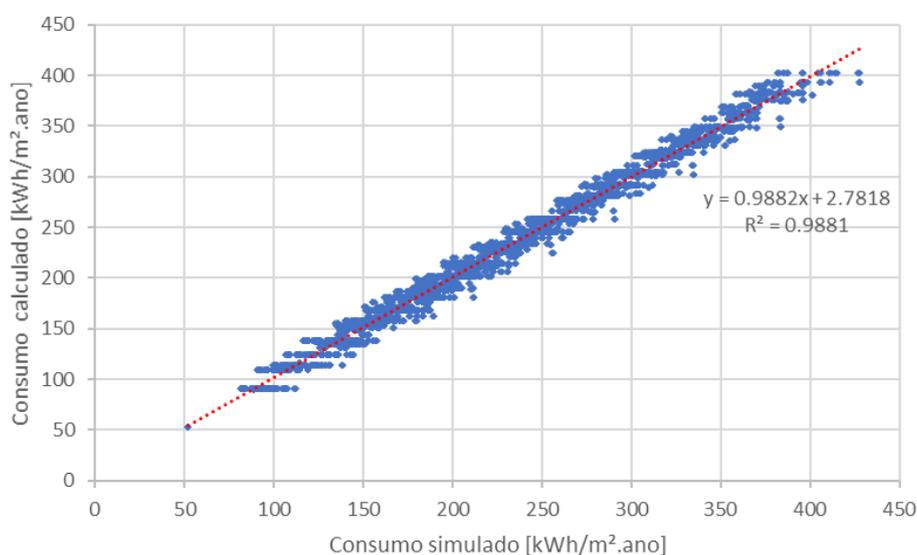


Figura 14 – Comparação entre o EUI simulado e o predito pela equação

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 apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Parâmetros para Escala de Consumo de Energia em função do GHR, para a tipologia de Comércio de Pequeno Porte

Parâmetro	Parâmetros significativos de acordo com a cidade		
	GHR < 54mil	GHR ≥ 54mil	Sem AVAC
Cidade			
Iluminação	DPI(W/m ²)	x	x
Equipamento de tomada		x	x
Entorno		x	
Renovação de Ar		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 apresenta a definição do cenário utilizado para determinar os consumos mínimos e máximos para esta tipologia.

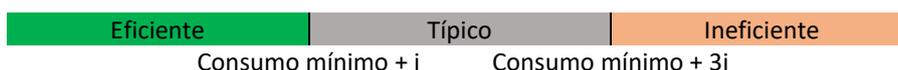
Tabela 13 – Cenários para o cálculo de consumo mínimo e máximo para tipologia de Comércio Pequeno Porte

Parâmetro	Limites do parâmetro	
	Mínimo	Máximo
Cidade	GHR GDA	Parâmetro fixo
Iluminação	DPI	11,4 21,9
Equipamento de tomada	-	Parâmetro fixo
Entorno	Adiabático Exposto	Parâmetro fixo
Renovação de Ar	-	Parâmetro fixo

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 uma tipologia de **Comércio de Pequeno Porte** localizada na cidade de São Paulo, com GHR = 14.172 e GDA = 288, sem condicionamento de ar, 5,3 W/m² de Iluminação e 11,40 W/m² de equipamentos, calcula-se o consumo de energia em 61,65 kWh/m²/ano.

Realizando o cálculo do consumo desta edificação nos cenários de consumo mínimo e consumo máximo, obtém-se os limites indicados na Tabela 12.

Tabela 12 – Exemplo de Escala de Eficiência – Consumo de tipologia de Comércio de Pequeno Porte em São Paulo

Parâmetros		Mínimo	Máximo
VARIÁVEIS	ILUMINAÇÃO	DPI (W/m ²)	
		11,4	21,9
FIXOS	CIDADE	SÃO PAULO (GHR = 14172, GDA = 288)	Consumo geral
	EQUIPAMENTO	11,4 W/m ²	
Consumo calculado (kWh/m²/ano)		83,00	119,86

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

$$i = \frac{119,86 - 83,00}{5} = 7,37$$



Considera-se nesse exemplo, portanto, que a edificação analisada apresenta consumo operacional inferior ao consumo mínimo da faixa típica (**61,65 < 90,37 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 **Comércio de Pequeno Porte**.

Os parâmetros com maior impacto no consumo de energia desta tipologia foram: graus-hora de resfriamento (GHR); graus-dia de aquecimento (GDA); iluminação (ILUM); densidade de potência de equipamentos instalados (EQUI); o entorno da edificação (ENTO) e a renovação de ar (RENO).

As variações de absorvância solar, envoltória e orientação solar da fachada da edificação não apresentaram impacto significativo no consumo final e, portanto, não foram incluídas na equação de *benchmarking* proposta para esta tipologia. A tecnologia do sistema de ar condicionado, nas condições analisadas e pela falta de disponibilidade de dados mais precisos, também não representou impacto significativo nas equações de regressão.

O GHR representa as variações do clima externo de acordo com a localização do modelo e, portanto, tem impacto representativo no consumo do sistema de ar condicionado uma vez que cidades mais quentes tendem a apresentar um maior consumo para resfriamento. Verifica-se também que as cidades que apresentam GDA também tem um impacto no consumo por aquecimento, portanto foram necessárias duas equações para se obter melhor correlação nas equações de regressão nas cidades que apresentam essa característica.

A iluminação artificial além do impacto direto no consumo geral da edificação, têm impacto no consumo do ar condicionado uma vez que parte da energia consumida pelas lâmpadas é dissipada na forma de calor. Logo, quanto maior a densidade de potência de iluminação instalada maior será consumo para resfriamento. A densidade de potência de equipamentos de tomada, além de seu consumo direto de energia, assim como as lâmpadas, também impactam na carga térmica a ser resolvida pelo sistema de condicionamento ambiental.

O entorno da edificação também tem grande impacto na carga térmica da edificação. Em um cenário onde as paredes e cobertura estão expostos ao ambiente externo, espera-se uma carga térmica maior, aumentando o consumo de energia pelo sistema de ar condicionado.

Já a estratégia utilizada para o bloqueio da infiltração do ar externo depende bastante do clima onde a edificação está instalada. Em climas mais frios, onde a entalpia do ar externo for adequada para a climatização do ambiente interno, é preferível sistemas que permitam, de forma controlada, uma maior infiltração deste ar externo, se favorecendo do processo de *free-cooling*. Já em climas mais quentes, é desejável minimizar tal infiltração, reduzindo assim a carga térmica sobre o sistema de ar condicionado.

Com a previsão do consumo de energia em relação ao consumo simulado, verificou-se que as equações têm um R^2 de acima de 98,81%, logo os modelos regressivos empregados foram representativos para o cálculo do consumo de energia para a tipologia de **Comércio de Pequeno Porte**.

A Tabela 13 resume os parâmetros estudados e identifica os considerados significativos para o desenvolvimento das equações de *benchmark* para esta tipologia.

Tabela 13 – Parâmetros analisados e sua relevância para a equação de benchmark da tipologia de Comércio de Pequeno Porte

Variáveis analisadas	Variáveis na equação para GHR < 54.061	Variáveis na equação para GHR > 54.061	Variáveis na equação sem sistema AVAC
Clima GHR	✓	✓	
Clima GDA	✓		
Iluminação	✓	✓	✓
Equipamentos	✓	✓	✓
Entorno		✓	
Renovação de ar interno		✓	
AVAC			
Envoltória			
Absortância			
Orientação Solar da edificação			

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.
- 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.