



CBCS

Conselho Brasileiro de Construção Sustentável

RT2B.07: Desenvolvimento de arquétipo, modelo de simulação, análise de sensibilidade e equações de *benchmark* para a tipologia de Comércio de Varejo de Grande 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 08/03/2021

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 Comércio de Varejo de Grande 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	8
4.4. Sombreamento e orientação solar	9
4.5. Envoltória e tipo de cobertura	9
4.6. Definição da carga térmica e SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE ar	9
5. MODELO DE SIMULAÇÃO	12
5.1. Cenários de simulação	12
5.2. Método de análise dos resultados das simulações	12
6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	14
6.1. análise em Cidades com ghr abaixo de 54 mil	14
6.2. análise em Cidades com ghr acima de 54 mil	15
6.3. análise do impacto DOS PARÂMETROS SIGNIFICATIVOS	16
7. EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	22
7.1. Cidades com GHR abaixo de 54 mil	22
7.2. Cidades com GHR acima de 54 mil	23
7.3. Avaliação entre o consumo simulado e o consumo calculado	24
8. ESCALAS DE CONSUMO DE ENERGIA	25
8.1. Método para cálculo das escalas	25
8.2. Exemplo de aplicação	26
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
REFERÊNCIAS	30

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.

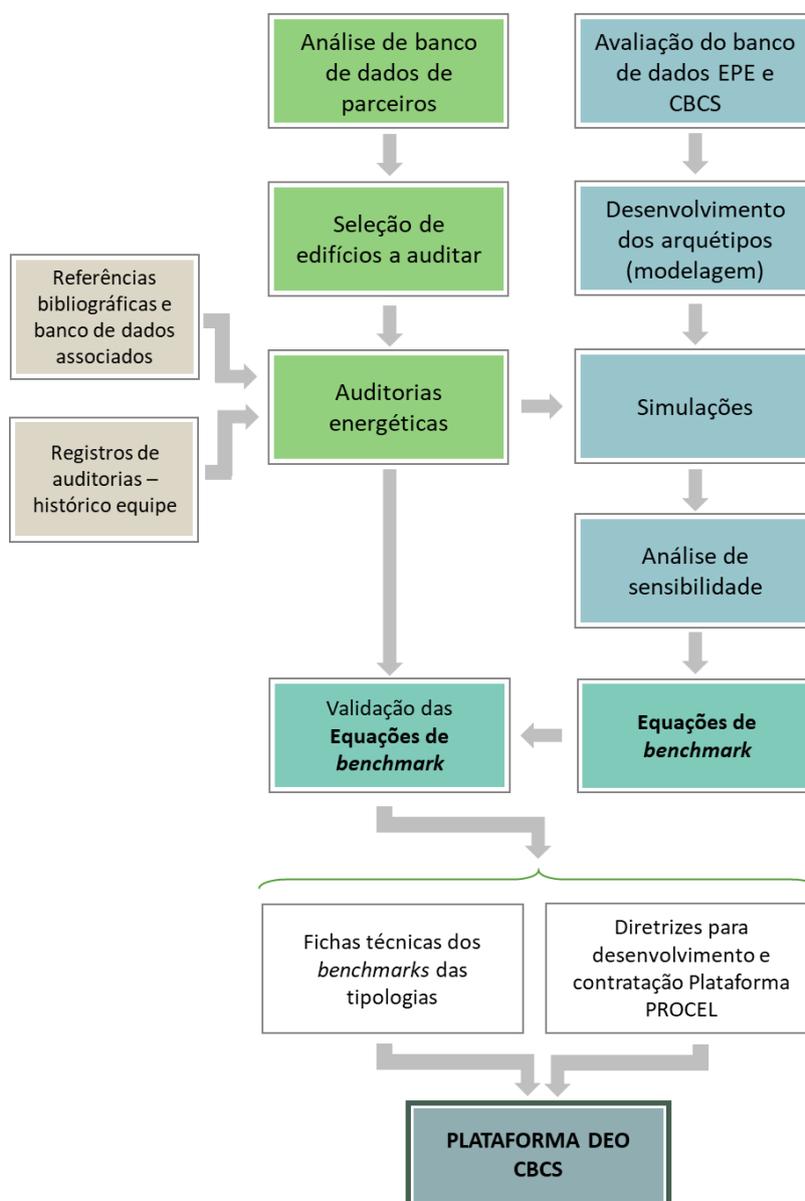


Figura 1 - Método aplicado pelo CBCS para o desenvolvimento dos benchmarks no âmbito deste convênio

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 **Comércio de Varejo de Grande 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, ocupação, sombreamento, orientação, envoltória e ar condicionado. 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.

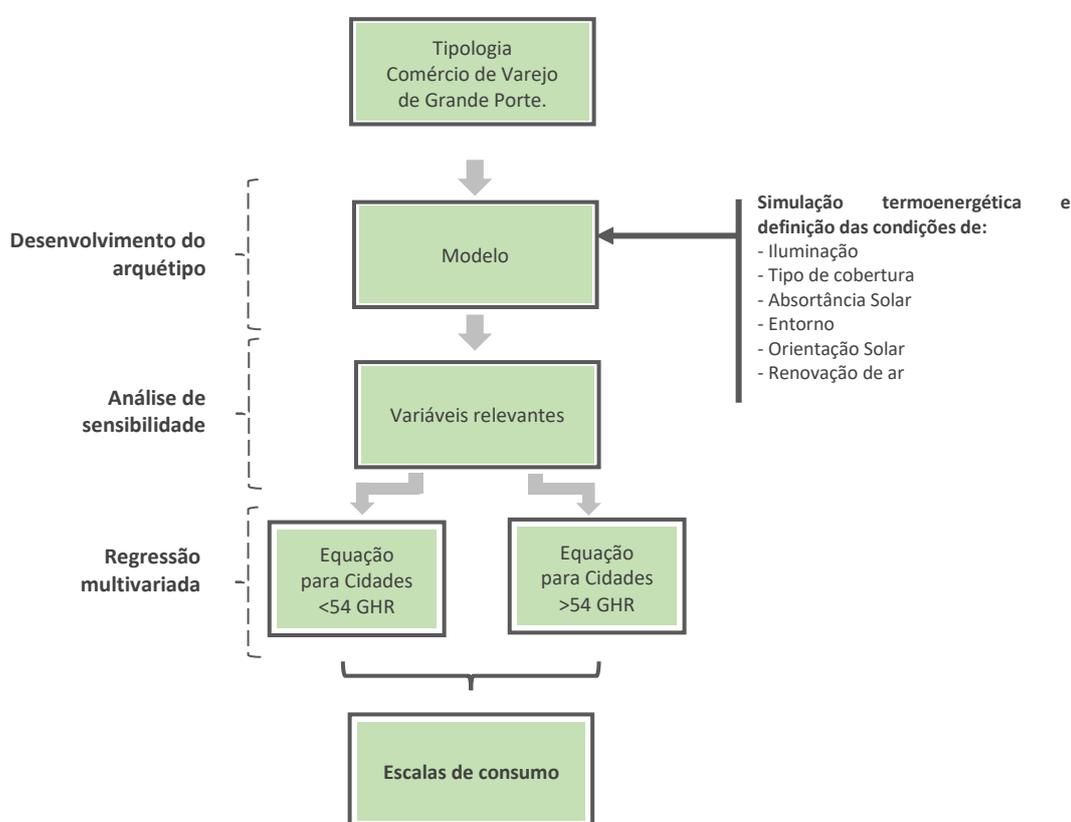


Figura 2 – Fluxograma de desenvolvimento das equações de benchmark e escalas de consumo para a tipologia de Comércio de Varejo de Grande Porte

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 Varejo de Grande Porte** constitui-se tipicamente por lojas térreas composto por área de vendas, ou de atendimento ao público, que é a atividade fim desta tipologia, e há também uma área de depósito, uma sala administrativa e uma área para os funcionários. Além das divisões internas citadas anteriormente, a área de vendas foi subdividida em quatro zonas térmicas.

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, os ambientes considerados neste arquétipo são: área de vendas, administração, depósito e área dos funcionários.

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	1320	66,0%
Administração	1	90	4,5%
Depósito	1	510	25,5%
Área dos funcionários	1	80	4,0%
TOTAL	4	2000	100%

O modelo do edifício foi construído com base em uma edificação de pavimento único, com dimensões 50 m x 40 m x 4 m (L x C x A), totalizando 2000 m². A Figura 3 apresenta a planta e configuração dos ambientes considerados e a Figura 4 as perspectivas do modelo.

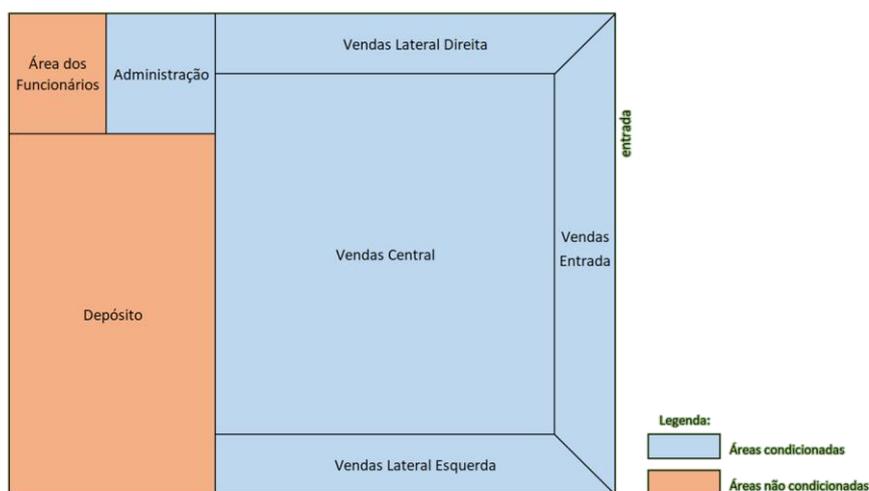


Figura 3 – Configuração da planta do arquétipo

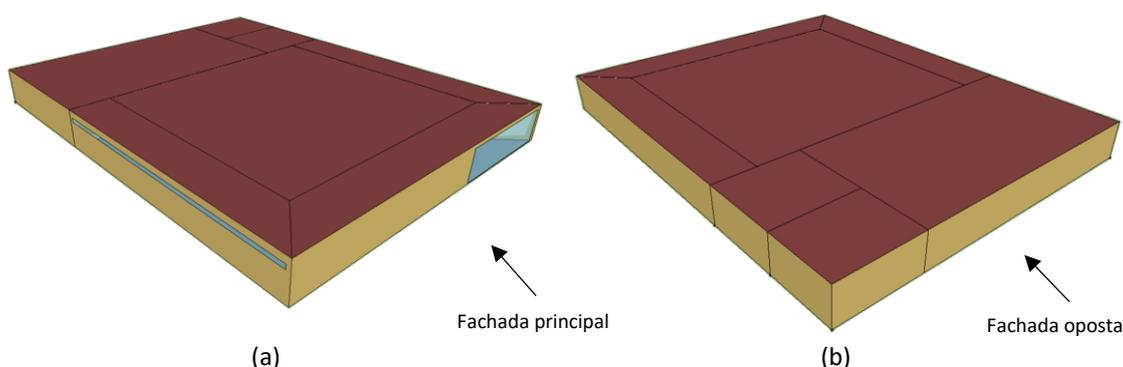


Figura 4 – Perspectiva da volumetria da edificação (a) frente e lateral esquerda e (b) fundos e lateral direita

4.2. ILUMINAÇÃO

No levantamento dos dados do projeto META foi identificada uma predominância significativa de sistemas de iluminação à base de lâmpadas fluorescentes. 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 para a área de vendas em ambientes comerciais: um cenário menos eficiente (ILUM01) representando as lâmpadas fluorescentes com densidade de potência instalada de 28,96 W/m² e um cenário mais eficiente (ILUM02) representando as lâmpadas tipo LED com densidade de potência instalada de 13,15 W/m². Esses valores correspondem, respectivamente, às classes D e A, segundo a Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas - INI-C (CB3E, 2020). A DPI dos demais ambientes foi dimensionada de acordo com o tipo de atividades exercida.

A Figura 5 ilustra o cronograma de operação da iluminação para cada tipo de ambiente.

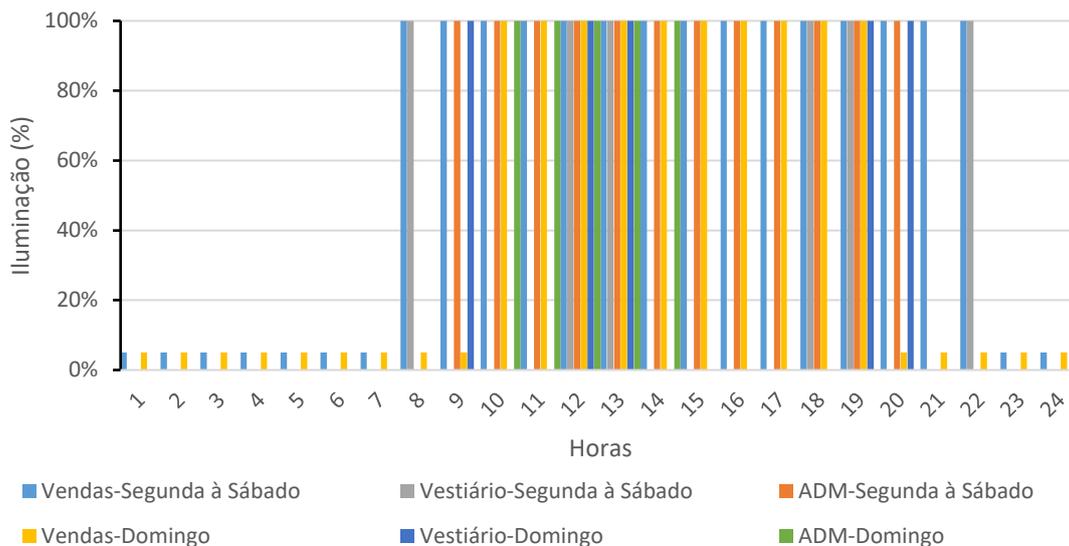


Figura 5 – Cronograma adotado para Iluminação

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. Desta forma, conforme ilustrado na

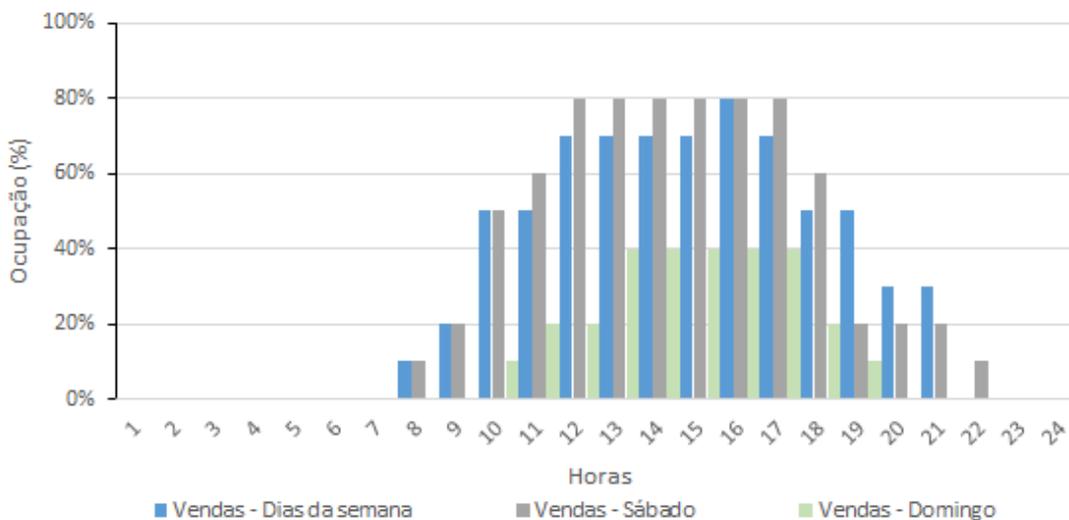


Figura 6, foram modelados a ocupação, a iluminação e o uso dos equipamentos e sistemas de condicionamento de ar.

As densidades de cargas de equipamentos de tomada foram definidas conforme a “Table 1. Default Tenant Receptacle Load, by Occupancy Type”. Na área de vendas, por exemplo, foram considerados 14,53 W/m² e na área administrativa 16,15W/m².

Segundo a ABNT NBR 16401-3 de 2008, a densidade de ocupação máxima esperada em uma edificação típica de comércio é de 15 pessoas a cada 100m², tendo sido adotada esta densidade ao invés das

densidades maiores identificadas na análise de estoque e auditorias, considerando assim um perfil de ocupação mais distribuído.

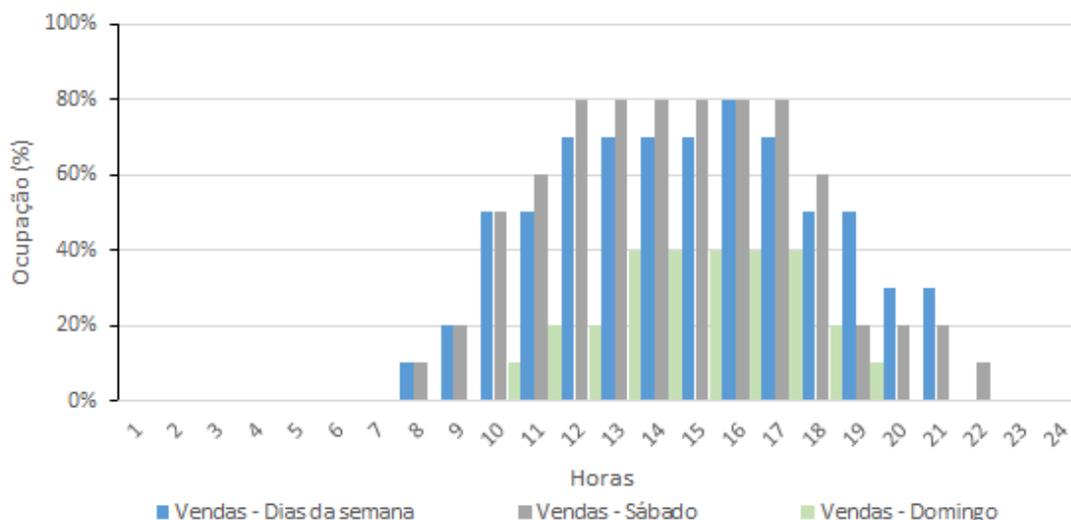


Figura 6 – Cronograma adotado para a ocupação das áreas de vendas

4.4. SOMBREAMENTO E ORIENTAÇÃO SOLAR

No levantamento realizado para o desenvolvimento do arquétipo percebeu-se a existência de duas situações bem distintas em relação ao entorno. O primeiro cenário (ENTO01) é de edificações isoladas onde suas fachadas e cobertura estão expostas ao clima externo. No segundo cenário (ENTO02) as edificações ocupam parte de uma edificação maior, muitas vezes com múltiplos pavimentos, e assim, apenas a fachada frontal e uma das laterais ficam expostas ao clima externo e neste caso, as demais superfícies em contato com o interior da edificação maior foram consideradas como adiabáticas.

Em ambos os casos, foram consideradas edificações localizadas em pavimento térreo e em contato direto com o solo. A temperatura do solo foi considerada através do objeto *GroundDomain: Slab* do *EnergyPlus*.

Foram considerados também quatro cenários de orientação solar considerando as principais direções, sul (ORIE01), oeste (ORIE02), norte (ORIE03) e leste (ORIE04).

4.5. ENVOLTÓRIA E TIPO DE COBERTURA

Para definir os cenários que representam diferentes tipos de cobertura, sob o ponto de vista térmico, foi utilizado, no cenário menos isolante (COBE01), uma cobertura de laje de concreto com transmitância térmica de 4,48 W/m².K e, no mais isolante (COBE02), uma cobertura de telha sanduíche que possui 0,58 W/m².K de transmitância térmica, conforme ilustrado na Figura 7.

Quanto à retenção de calor proveniente da radiação solar incidente foram simulados dois cenários: o primeiro onde o valor da absorvância à radiação solar das paredes e coberturas são iguais a 0,7 (ASOL01), equivalente à uma pintura mais escura e o segundo, equivalente à uma pintura na cor branca (ASOL02), onde o valor da absorvância é 0,3.

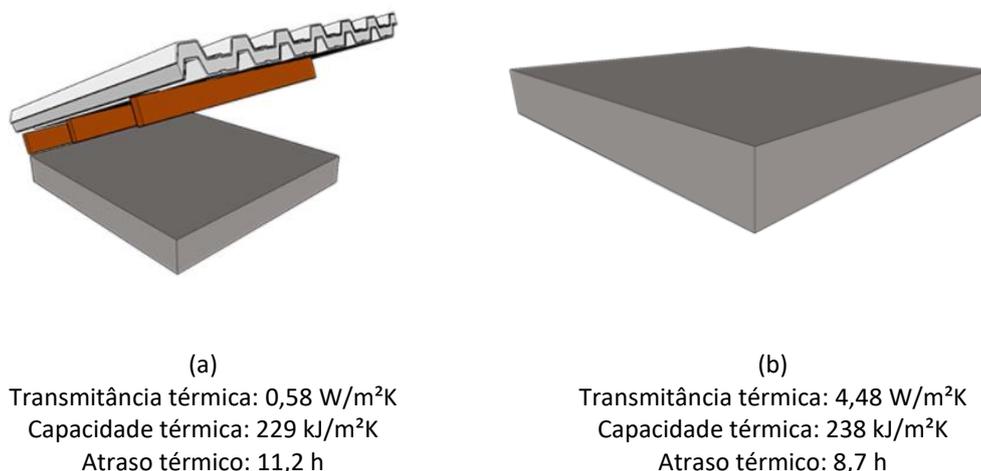


Figura 7 – Elementos construtivos de referência para a Cobertura

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.

Variável	Cenário
Iluminação	ILUM01
Tipo de Cobertura	COBE01
Absortância Solar	ASOL01
Entorno	ENTO01
Orientação Solar	ORIE02
Renovação de ar	RENO01

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 ($P \text{ [kW]} = \text{vazão [l/s]} \times 0,0017$), e para vazão variável ($P \text{ [kW]} = \text{vazão [l/s]} \times 0,0024$), conforme recomendação da ASHRAE 90.1-2010 (ASHRAE, 2011).

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

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 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.

A Tabela4 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	83,5
São Paulo	SP	3	89,8
Porto Alegre*	RS	3	101,1
Campinas	SP	3	90,2
Rio de Janeiro (Vila Militar)	RJ	8	100,6
Vitória	ES	8	91,0
Recife	PE	8	95,0
Fortaleza	CE	8	83,9

* Cidade selecionada

Percebe-se que, dentre as cidades selecionadas como representativas, a cidade com maior carga térmica foi Porto Alegre, com 101,1 TR. Dessa forma, o arquivo climático de Porto Alegre foi selecionado como referência para dimensionamento do sistema de condicionamento de ar considerado no arquétipo.

Como cenário menos eficiente para a variável AVAC foram considerados sistemas individuais tipo *Rooftop* com Volume de Ar Constante (RT-VAC) para cada zona térmica, que resultou em um EER nominal médio de 3,28 W/W. Já para o cenário mais eficiente, também foram utilizados sistemas individuais tipo *Rooftop*, porém com Volume de Ar Variável (RT-VAV) de insuflamento e que também resultou em um EER médio de 3,28 W/W. Um terceiro cenário foi avaliado considerando um sistema central de água gelada (*Chiller-UTA-VAV*), com EER nominal de 3,0 W/W, que supre a demanda de resfriamento das Unidades de Tratamento de Ar de cada zona térmica. Este sistema central apresentou um rendimento intermediário em relação aos dois sistemas individuais citados anteriormente.

A renovação de ar em ambientes condicionados artificialmente é obrigatória pela Lei 13.589/18, com valores definidos na norma técnica ABNT NBR 16401-3. Para esta tipologia foram considerados dois cenários de acordo com as recomendações desta norma. O cenário RENO01, com maior taxa de renovação de ar, atende ao nível 3 da norma com 5,7 L / s.pessoa e mais uma parcela de 0,9 L/s.m², conforme a área condicionada. Já o cenário RENO02, corresponde ao nível 1 da norma, com menor intensidade e parcelas de 3,8 L / s.pessoa e 0,6 L / s.m².

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, 1.152 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 as simulações

Parâmetro	Cenário	Dado utilizado
Iluminação	ILUM01	DPI = 28,96 W/m ²
	ILUM02	DPI = 13,15 W/m ²
Tipo de Cobertura	COBE01	Laje concreto: $U_{cobertura} = 4,48 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
	COBE02	Telha sanduíche: $U_{cobertura} = 0,58 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
Absortância Solar	ASOL01	Absortância solar $\alpha = 0,7$
	ASOL02	Absortância solar $\alpha = 0,3$
Condição de entorno	ENTO01	Edificação exposta
	ENTO02	Edificação dentro de outra
Orientação solar	ORIE01	Frente orientada a Sul
	ORIE02	Frente orientada a Oeste
	ORIE03	Frente orientada a Norte
	ORIE04	Frente orientada a Leste
AVAC	RT-VAC	Rooftop individual – Volume de Ar Constante (EER=3,28 W/W)
	RT-VAV	Rooftop individual – Volume de Ar Variável (EER=3,28 W/W)
	Chiller-UTA-VAV	Chiller resfriado a ar – Volume de Ar Variável (EER=3,0 W/W)
Renovação de ar	RENO01	Nível 3 da ABNT NBR 16401-3
	RENO02	Nível 1 da ABNT NBR 16401-3

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

Uma vez determinados os cenários de cada tipologia, foram gerados de forma paramétrica as combinações desses cenários entre si somando um total de 384 modelos que foram simulados para as 8 cidades selecionadas para representar as zonas bioclimáticas brasileiras. Os resultados das simulações foram compilados em um banco de dados com os consumos anuais totais e consumos desagregados pelo uso final. A partir desses dados foi gerada uma análise de sensibilidade para identificar quais variáveis construtivas possuem maior impacto no consumo energético da edificação.

Os resultados obtidos nas simulações mostraram um consumo significativo de aquecimento nas cidades mais frias, consumo este que em Campos do Jordão, a cidade mais fria analisada, por vezes chega a ultrapassar o consumo de resfriamento. Portanto, as análises e equações foram divididas em dois grupos: 1- para cidades que apresentam Graus-dia de Aquecimento (GDA) e conseqüentemente 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 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 podem 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), tipo de cobertura (COBE), absorvância solar (ASOL), condição de entorno (ENTO), orientação solar (ORIE), tipo de sistema de condicionamento de ar (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 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 ar condicionado para manter as condições locais de conforto.

6.1. ANÁLISE EM CIDADES COM GHR ABAIXO DE 54 MIL

Por meio das Figuras 8 e 9, verifica-se que os parâmetros com variações mais significativas são o GHR, GDA, AVAC e ILUM. As variações dos parâmetros COBE, ASOL, ENTO, ORIE e RENO tiveram um impacto pequeno no cálculo do consumo de energia.

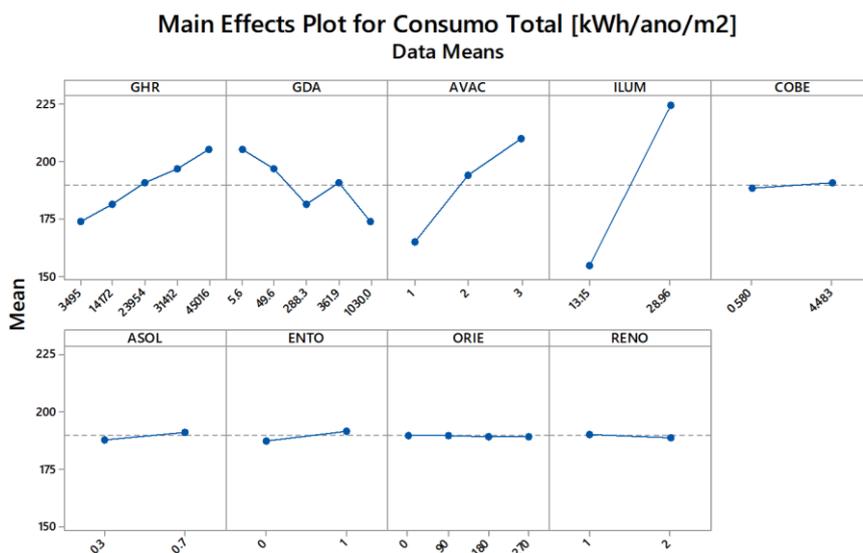


Figura 8 - Efeito do parâmetro no consumo de energia

Interaction Plot for Consumo Total [kWh/ano/m²]
Data Means

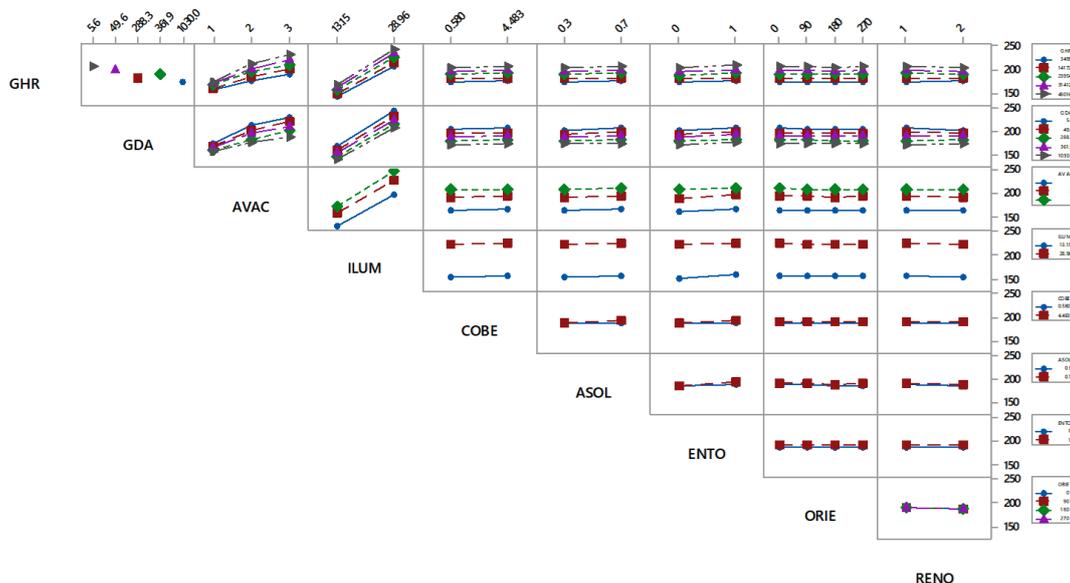


Figura 9 - Interação entre os parâmetros

6.2. ANÁLISE EM CIDADES COM GHR ACIMA DE 54 MIL

Por meio das Figuras 10 e 11, verifica-se que os parâmetros com variações mais significativas são o GHR, AVAC e ILUM. Também apresentam variações relevantes os parâmetros COBE, ASOL, ENTO e RENO. As variações do parâmetro ORIE tiveram um impacto pequeno no cálculo do consumo de energia.

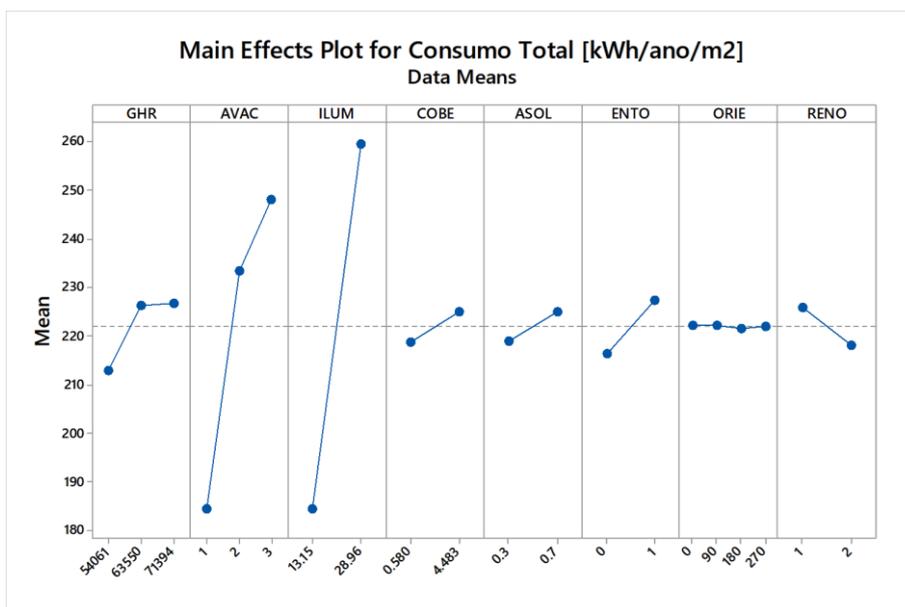


Figura 10 - Efeito do parâmetro no consumo de energia

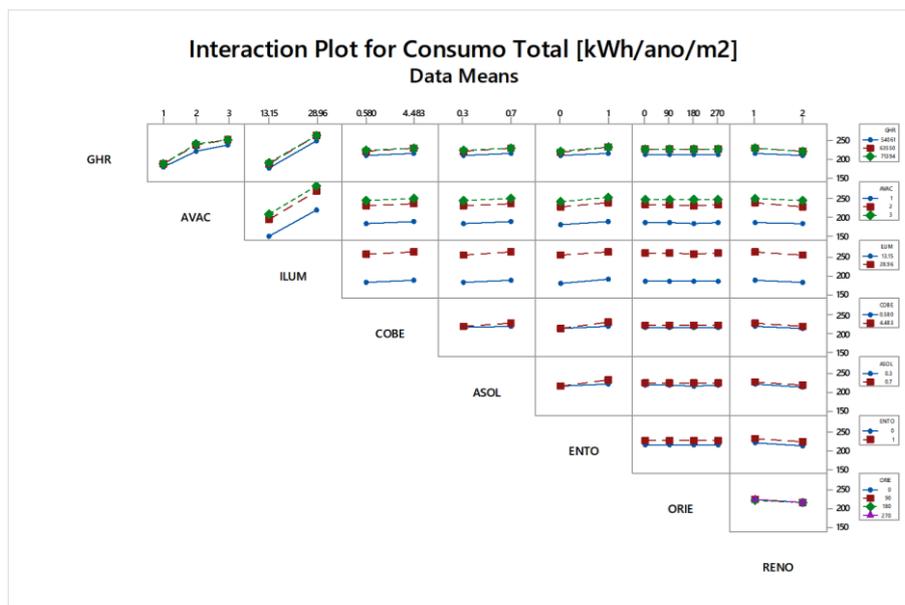


Figura 11 - Interação entre os parâmetros

6.3. 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, AVAC, ENTO, COBE, ASOL 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 condicionamento de ar. A Tabela 7 ilustra o impacto no sistema de ar condicionado ao substituir o sistema de iluminação no padrão PBE classe D (28,96 W/m²) para um PBE classe A (13,15 W/m²). Além do impacto no consumo de energia no sistema de ar condicionado, este parâmetro possui um impacto significativo no consumo de energia da edificação como um todo e por isso será utilizada para balizar a eficiência energética do usuário final na equação de benchmark.

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

Modelo base	AVAC: Sistema Rooftop VAV (EER = 3,28 W/W)		
	Iluminação:	Parâmetro Analisado	
	Entorno:	Parcialmente adiabático	
	Tipo de Cobertura:	Laje Concreto - Ucob: 4,48 W/m ² .K	
	Absortância Solar:	α : 0,7	
	Orientação:	Norte	
	Renovação:	ABNT NBR 16401-3 (Nível 3)	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Varição no consumo de AVAC
	Parâmetro Analisado: Iluminação		
	PBE classe D (28,96 W/m ²)	PBE classe A (13,15 W/m ²)	
Campos do Jordão	25,21	20,60	-18,3%
São Paulo	32,38	25,94	-19,9%
Porto Alegre	36,78	30,97	-15,8%
Campinas	43,68	34,64	-20,7%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	49,11	39,23	-20,1%
Vitória	53,81	43,11	-19,9%
Recife	60,55	48,72	-19,5%
Fortaleza	62,82	50,24	-20,0%

A condição de entorno, ou seja, se a edificação se encontra inserida em outra edificação ou se ela está exposta ao ambiente externo, apresentou uma diferença significativa no consumo de ar condicionado, passando de 30% na maioria dos casos, como pode ser observado na Tabela 8. Portanto, esse parâmetro também foi selecionado como fator na equação de *benchmark*.

Tabela 8 - Impacto do entorno no consumo do sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC: Sistema Rooftop VAV (EER = 3,28 W/W)		
	Iluminação:	PBE classe A (13,15 W/m ²)	
	Entorno:	Parâmetro Analisado	
	Tipo de Cobertura:	Laje Concreto - Ucob: 4,48 W/m ² .K	
	Absortância Solar:	α : 0,3	
	Orientação:	Leste	
	Renovação:	ABNT NBR 16401-3 (Nível 3)	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Varição no consumo de AVAC
	Parâmetro Analisado: Entorno		
	Faces expostas	Parcialmente adiabático	
Campos do Jordão	37,10	22,58	-39,2%
São Paulo	36,21	26,45	-27,0%
Porto Alegre	50,32	31,79	-36,8%
Campinas	45,90	34,38	-25,1%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	53,13	38,33	-27,9%
Vitória	61,11	42,20	-30,9%
Recife	82,26	48,48	-41,1%
Fortaleza	74,14	49,98	-32,6%

A Tabela 9 ilustra a variação no consumo de energia elétrica no sistema de condicionamento de ar de uma edificação em relação a constituição de sua cobertura, se em material menos isolante (laje de concreto) ou mais isolante (telha sanduíche). A variação no consumo do sistema de ar condicionado foi significativa, com redução de consumo de mais de 20% na maioria das cidades analisadas.

Tabela 9 – Impacto do tipo de cobertura no consumo do sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC:	Sistema Rooftop VAV (EER = 3,28 W/W)	
	Iluminação:	PBE classe A (13,15 W/m ²)	
	Entorno:	FACES EXPOSTAS	
	Tipo de Cobertura:	Parâmetro Analisado	
	Absortância Solar:	α : 0,7	
	Orientação:	Leste	
	Renovação:	ABNT NBR 16401-3 (Nível 3)	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m ²]		Variação no consumo de AVAC
	Parâmetro Analisado: Cobertura		
	Laje Concreto	Telha Sanduíche	
Campos do Jordão	36,64	27,05	-26,2%
São Paulo	35,98	29,61	-17,7%
Porto Alegre	49,92	37,04	-25,8%
Campinas	45,89	38,20	-16,7%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	53,14	42,47	-20,1%
Vitória	61,25	47,55	-22,4%
Recife	82,42	56,94	-30,9%
Fortaleza	73,91	56,17	-24,0%

A Tabela 10 ilustra o impacto da absortância solar na variação no consumo de energia do sistema de condicionamento de ar de uma edificação com acabamento das fachadas em cores mais escuras (α : 0,7) em relação aos de acabamento mais claros (α : 0,3), que retém menos calor proveniente da radiação solar.

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

Modelo base	AVAC: Sistema Rooftop VAV (EER = 3,28 W/W)		
	Iluminação: PBE classe A (13,15 W/m ²)		
	Entorno: Faces Expostas		
	Tipo de Cobertura: Laje Concreto - Ucob: 4,48 W/m ² .K		
	Absortância Solar: Parâmetro Analisado		
	Orientação: Sul		
	Renovação: ABNT NBR 16401-3 (Nível 1)		
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Varição no consumo de AVAC
	Parâmetro Analisado: absortância solar		
	α : 0,7	α : 0,3	
Campos do Jordão	38,04	38,85	2,1%
São Paulo	36,42	33,02	-9,3%
Porto Alegre	48,87	42,34	-13,3%
Campinas	43,64	36,75	-15,8%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	49,74	40,66	-18,2%
Vitória	56,17	44,76	-20,3%
Recife	75,11	54,78	-27,1%
Fortaleza	66,66	53,36	-20,0%

Outro item que também impacta no consumo de energia do sistema de ar condicionado é a renovação do ar interno da instalação. Este item é obrigatório por lei (nº 13.589, de 4 de janeiro de 2018) e deve ser utilizado em todas as instalações. A norma ABNT NBR 16401 estabelece como Nível 1 uma vazão mínima de ar exterior para garantir que o ar não contenha poluentes em concentrações prejudiciais à saúde e ao bem-estar dos ocupantes. Já o Nível 3 recomenda uma vazão maior que segundo estudos apresenta evidências de redução de reclamações e de manifestações alérgicas. A Tabela 11 aponta o impacto dessas diferentes taxas de renovação do ar interno no consumo do sistema de condicionamento de ar.

Tabela 11 – Impacto do sistema de renovação de ar no consumo do sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC: Sistema Rooftop VAV (EER = 3,28 W/W)		
	Iluminação: PBE classe A (13,15 W/m ²)		
	Entorno: Faces Expostas		
	Tipo de Cobertura: Laje Concreto - Ucob: 4,48 W/m ² .K		
	Absortância Solar: α : 0,7		
	Orientação: Leste		
	Renovação: Parâmetro Analisado		
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Varição no consumo de AVAC
	Parâmetro Analisado: Renovação de ar		
	Nível 3	Nível 1	
Campos do Jordão	37,10	38,04	2,5%
São Paulo	36,21	36,42	0,6%
Porto Alegre	50,32	48,87	-2,9%
Campinas	45,90	43,64	-4,9%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	53,13	49,74	-6,4%
Vitória	61,11	56,17	-8,1%
Recife	82,26	75,11	-8,7%
Fortaleza	74,14	66,66	-10,1%

O próprio sistema de condicionamento ambiental possui diversas tecnologias com eficiências energéticas distintas e impactam no consumo de energia total de uma edificação. A Tabela 12 ilustra a diferença no consumo de energia dos sistemas de expansão direta tipo *Rooftop* de volume de insuflamento de ar constante (RT VAC) e outro de volume de ar variável (RT VAV). Já na

Tabela 13, a comparação é feita entre o sistema Rooftop VAV e um sistema central de água gelada (Chiller UTA VAV). Para os cenários analisados para esta tipologia e em ambas as comparações, o sistema *Rooftop* VAV é o que apresenta maior eficiência.

Tabela 12 - Impacto dos sistemas RT-VAC e RT-VAV no consumo do sistema AVAC

Modelo base	AVAC: Parâmetro Analisado		Variação no consumo de AVAC
	Iluminação: PBE classe D (28,96 W/m ²)		
	Entorno: Adiabático		
	Tipo de Cobertura: Laje Concreto - Ucob: 4,48 W/m ² .K		
	Absortância Solar: α: 0,7		
	Orientação: Norte		
	Renovação: ABNT NBR 16401-3 (Nível 3)		
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m ²] Parâmetro Analisado: AVAC		Variação no consumo de AVAC
	RT - VAC	RT - VAV	
Campos do Jordão	65,83	25,21	-61,7%
São Paulo	80,15	32,38	-59,6%
Porto Alegre	87,43	36,78	-57,9%
Campinas	101,20	43,68	-56,8%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	110,50	49,11	-55,6%
Vitória	118,06	53,81	-54,4%
Recife	128,60	60,55	-52,9%
Fortaleza	131,29	62,82	-52,2%

Tabela 13 – Impacto dos sistemas Chiller UTA VAV e RT-VAV no consumo do sistema AVAC

Modelo base	AVAC: Parâmetro Analisado		Variação no consumo de AVAC
	Iluminação: PBE classe A (13,15 W/m ²)		
	Entorno: Adiabático		
	Tipo de Cobertura: Laje Concreto - Ucob: 4,48 W/m ² .K		
	Absortância Solar: α: 0,7		
	Orientação: Norte		
	Renovação: ABNT NBR 16401-3 (Nível 3)		
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m ²] Parâmetro Analisado: AVAC		Variação no consumo de AVAC
	Chiller UTA VAV	RT - VAV	
Campos do Jordão	45,96	20,60	-55,2%
São Paulo	53,08	25,94	-51,1%
Porto Alegre	65,45	30,97	-52,7%
Campinas	70,44	34,64	-50,8%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	82,46	39,23	-52,4%
Vitória	92,22	43,11	-53,2%
Recife	106,30	48,72	-54,2%
Fortaleza	110,63	50,24	-54,6%

7. EQUAÇÃO DE REGRESSÃO

Para o desenvolvimento das equações para predição do consumo de energia da tipologia de **Comércio de Varejo de Grande 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, 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*.

O modelo estatístico do *benchmarking* foi segmentado em cidades com necessidade tanto de aquecimento (GHR menores que 54.000) quanto resfriamento ambiental e aquelas com demanda apenas de resfriamento (GHR maiores ou iguais a 54.000). Em suma, foram construídas 2 equações para esta tipologia.

7.1. CIDADES COM GHR ABAIXO DE 54 MIL

Análise dos parâmetros – Comércio de varejo de grande porte

Candidate terms: logGHR, logGDA, ILUM, AVAC

	-----Step 1-----		-----Step 2-----		-----Step 3-----		-----Step 4-----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	96.78		51.87		-61.97		1.80	
ILUM	4.4158	0.000	4.4158	0.000	4.4158	0.000	4.4158	0.000
AVAC			22.454	0.000	22.454	0.000	22.454	0.000
logGHR					26.818	0.000	15.191	0.000
logGDA							-6.879	0.000
S		22.5655		13.1457		8.05570		7.43077
R-sq		70.55%		90.01%		96.25%		96.81%
R-sq(adj)		70.53%		90.00%		96.24%		96.80%
R-sq(pred)		70.49%		89.98%		96.23%		96.79%
Mallows' Cp		15771.70		4085.56		339.83		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	3210431	802608	14535.69	0.000
logGHR	1	21476	21476	388.94	0.000
logGDA	1	18598	18598	336.83	0.000
ILUM	1	2339520	2339520	42370.07	0.000
AVAC	1	645376	645376	11688.13	0.000
Error	1915	105739	55		
Lack-of-Fit	25	66819	2673	129.79	0.000
Pure Error	1890	38920	21		
Total	1919	3316170			

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
7.43077	96.81%	96.80%	96.79%

Equação de Regressão

Consumo Total [kWh/ano/m²] = 1.80 + 15.191 log_GHR - 6.879 log_GDA + 22.454 AVAC + 4.4158 ILUM

EQUAÇÃO FINAL PARA CIDADES COM GHR ABAIXO DE 54 MIL

Consumo Final [kWh/m²/ano] = 1,80 + 15,191 logGHR – 6,879 logGDA + 22,454 AVAC + 4,4158 ILUM

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

AVAC – Tipo de sistema de condicionamento de ar (1 – Rooftop VAV, 2 – Chiller UTA VAV, 3 – Rooftop VAC);

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

7.2. CIDADES COM GHR ACIMA DE 54 MIL

Análise dos parâmetros – Comércio de varejo de grande porte

Stepwise Selection of Terms

Candidate terms: log_GHR, AVAC, ILUM, COBE, ASOL, ENTO, RENO

	-----Step 1-----		-----Step 2-----		-----Step 3-----		-----Step 4-----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	122.22		58.60		-508.4		-513.9	
ILUM	4.741	0.000	4.7413	0.000	4.7413	0.000	4.7413	0.000
AVAC			31.814	0.000	31.814	0.000	31.814	0.000
log_GHR					118.21	0.000	118.21	0.000
ENTO							11.002	0.000
RENO								
COBE								
ASOL								
S	29.6512		14.2626		13.0078		11.7879	
R-sq	61.55%		91.11%		92.61%		93.94%	
R-sq(adj)	61.51%		91.10%		92.59%		93.92%	
R-sq(pred)	61.41%		91.07%		92.57%		93.89%	
Mallows' Cp	8470.54		1077.54		703.90		374.24	
	-----Step 5-----		-----Step 6-----		-----Step 7-----			
	Coef	P	Coef	P	Coef	P		
Constant	-502.4		-506.5		-514.1			
ILUM	4.7413	0.000	4.7413	0.000	4.7413	0.000		
AVAC	31.814	0.000	31.814	0.000	31.814	0.000		
log_GHR	118.21	0.000	118.21	0.000	118.21	0.000		
ENTO	11.002	0.000	11.002	0.000	11.002	0.000		
RENO	-7.696	0.000	-7.696	0.000	-7.696	0.000		
COBE			1.621	0.000	1.621	0.000		
ASOL					15.26	0.000		
S	11.1442		10.6958		10.2526			
R-sq	94.59%		95.02%		95.43%			
R-sq(adj)	94.56%		94.99%		95.40%			
R-sq(pred)	94.54%		94.96%		95.37%			
Mallows' Cp	213.97		108.11		8.00			

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	7	2509107	358444	3409.96	0.000
log_GHR	1	39486	39486	375.64	0.000
AVAC	1	777338	777338	7395.00	0.000
ILUM	1	1618290	1618290	15395.17	0.000
COBE	1	11338	11338	107.86	0.000
ASOL	1	10734	10734	102.11	0.000
ENTO	1	34864	34864	331.67	0.000
RENO	1	17056	17056	162.26	0.000
Error	1144	120254	105		
Lack-of-Fit	280	120027	429	1636.25	0.000
Pure Error	864	226	0		
Total	1151	2629360			

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
10.2526	95.43%	95.40%	95.37%

Equação de Regressão

Consumo Total [kWh/ano/m²] = -514.1 + 118.21 log_GHR + 31.814 AVAC + 4.7413 ILUM + 1.621 COBE + 15.26 ASOL + 11.002 ENTO - 7.696 RENO

EQUAÇÃO FINAL PARA CIDADES COM GHR ACIMA DE 54 MIL

Consumo Final [kWh/m²/ano] = -514,1 + 118,21 logGHR + 31,814 AVAC + 4,7413 ILUM + 1,621 COBE + 15,26 ASOL + 11,002 ENTO – 7,696 RENO

Onde:

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

AVAC – Tipo de sistema de condicionamento de ar (1 – Rooftop VAV, 2 – Chiller UTA VAV, 3 – Rooftop VAC)

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

COBE – Tipo de cobertura (valores entre 0,58 e 4,48 W/ m².K, sendo 0,58 W/m².K – Telha Sanduíche e 4, 48 W/m².K – Laje Concreto)

ASOL – Absortância da envoltória (valores entre 0,3 e 0,7, sendo α: 0,3 – cor clara, α: 0,7 – cor escura)

ENTO – Condição de entorno (0 – parcialmente adiabático, sendo expostas a fachada principal e uma de suas laterais, 1 – exposto)

RENO – Renovação de ar (1 – renovação conforme nível 3 da NBR 16401-3, 2 – renovação conforme nível 1 da NBR 16401-3)

7.3. 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 12 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 96,63%, logo a equação de *benchmark* tem boa representatividade do modelo para a tipologia de **Comércio de Varejo de Grande Porte**.

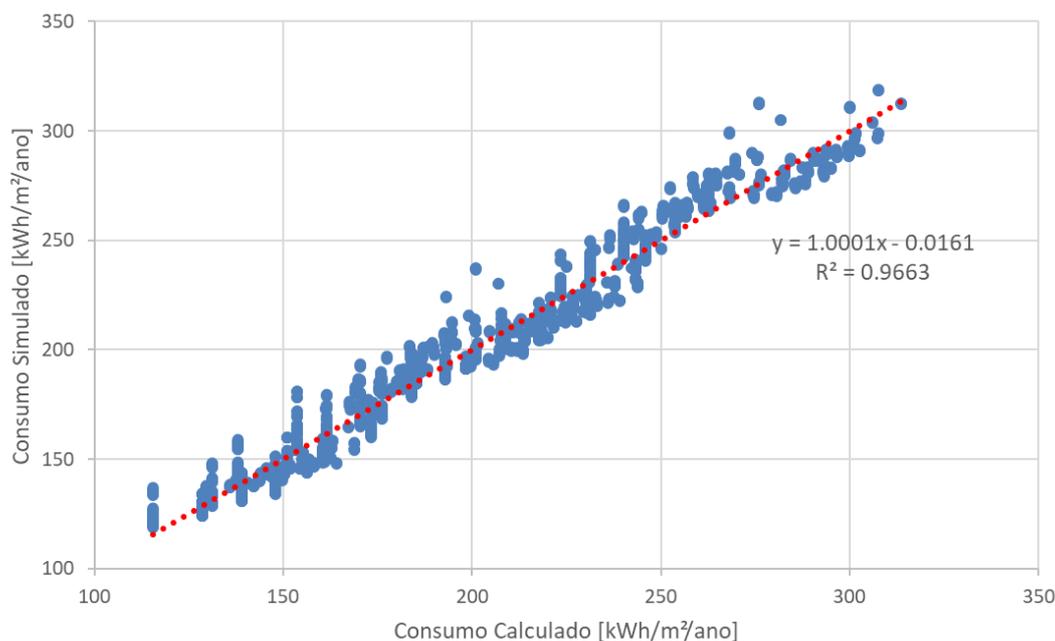


Figura 12 – Comparação entre o EUI simulado e o predito pela equação

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 14.

Tabela 14 – Parâmetros para Escala de Consumo de Energia em função do GHR

Parâmetro	Cenário	Parâmetros significativos de acordo com a cidade	
		GHR < 54mil	GHR ≥ 54mil
Cidade		GHR < 54mil	GHR ≥ 54mil
Iluminação	W/m²	x	x
Tipo de Ar Condicionado	RT – VAC		
	RT – VAV	x	x
	Chiller UTA – VAV		
Tipo de cobertura	Laje concreto		x
	Telha sanduíche		
Absortância solar	Pintura escura α: 0,7		
	Pintura clara α: 0,3		x
Entorno	Adiabático		x
	Exposto		
Renovação de ar	Nível 1		x
	Nível 3		

A escala de eficiência é definida por meio do cálculo dos consumos mínimo e máximo obtidos pela simulação do arquétipo utilizando os cenários fixos adotados no desenvolvimento da equação de *benchmark*. A Tabela 15 apresenta a definição do cenário utilizado para determinar os consumos mínimos e máximos.

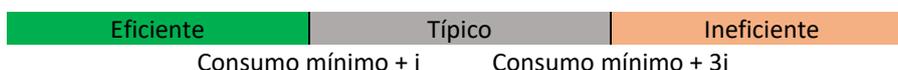
Tabela 15 – Cenários para o cálculo de consumo mínimo e máximo para a tipologia de Comércio de Varejo de Grande Porte

Parâmetros		Limite Mínimo	Limite Máximo
Cidade	GHR	Parâmetro fixo	
	GDA		
Iluminação	W/m ²	13,15	28,96
Tipo de ar condicionado	-	RT VAV	RT VAC
Tipo de cobertura	Ucob [W/m ² .k]	0,58	4,483
Absortância solar	-	0,3	0,7
Entorno	-	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 a um comércio de varejo de grande porte localizado na cidade de São Paulo - SP, com GHR = 14172, GDA = 288,8, DPI de 5,22 W/m² e ar condicionado tipo RT VAC. **O consumo previsto foi de 138,98 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 16.

Tabela 16 – Exemplo de Escala de Eficiência – Comércio de Varejo de Grande Porte em São Paulo.

Previsão de consumo de energia		Mínimo	Máximo
VARIÁVEIS	ILUMINAÇÃO DPI (W/m ²)	13,15	28,96
	AR CONDICIONADO -	RT VAV	RT VAC
	TIPO DE COBERTURA W/m ² K	0,580	4,483
	ABSORTÂNCIA SOLAR -	0,3	0,7

Previsão de consumo de energia		Mínimo	Máximo
FIXOS	SÃO PAULO	GHR=14172 GDA=288,8	Consumo geral: 129,09
	ENTORNO	Sem entorno	Consumo geral: 243,81
	RENOVAÇÃO DE AR	0 – não tem	[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:

$$i = \frac{(243,81) - (129,09)}{5} = 22,94$$



Considera-se nesse exemplo, portanto, que a edificação analisada apresenta consumo operacional inferior ao consumo mínimo da faixa típica (**138,98 < 152,0 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 Varejo de Grande Porte**.

Os parâmetros com maior impacto no consumo de energia desta tipologia foram: graus-hora de resfriamento (GHR); graus-dia de aquecimento (GDA); tipo de sistema de condicionamento de ar (AVAC); iluminação (ILUM); condição de entorno (ENTO); tipo de cobertura (COBE); absortância solar (ASOL); e a intensidade de renovação do ar interno (RENO).

As variações de orientação solar apresentaram pouco impacto no consumo final e este parâmetro, portanto, não foi incluído na equação de *benchmark* proposta para esta tipologia.

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 condicionamento de ar, uma vez que cidades mais quentes tendem a apresentar um maior consumo para resfriamento. Verifica-se que as cidades que apresentam GDA também tem um impacto no consumo por aquecimento, portanto foi necessário dividir em duas equações para ter uma melhor correlação das equações de regressão nas cidades que apresentavam essa característica.

A iluminação artificial, além do impacto direto no consumo geral da edificação, tem impacto no consumo do sistema de condicionamento de ar, 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 o consumo para resfriamento.

A transmitância térmica dos elementos da cobertura também tem grande impacto na carga térmica da edificação, permitindo que mais ou menos calor seja trocado com o meio externo, e que consequentemente reflète no consumo do sistema de ar condicionado. Por sua vez, a absortância solar das fachadas e cobertura também possui impacto significativo ao reter maior ou menor quantidade de calor da radiação solar que será transmitido ao interior da edificação. E, ainda neste sentido, as condições do entorno da edificação também exercem influência, uma vez que edificações totalmente expostas ao ambiente externo permitem maior troca de calor com o meio, enquanto as lojas inseridas em uma edificação maior ficam mais protegidas dessa variação do clima externo.

A renovação de ar também reflète as condições do meio externo no interior da edificação alterando a carga térmica a ser resolvida pelo sistema de ar condicionado. Para climas mais quentes, quanto maior a taxa de renovação desse ar maior será o consumo de energia pelo sistema de condicionamento de ar. Para climas mais amenos, no entanto, a renovação de ar pode até auxiliar na redução de consumo energético a depender das condições da entalpia do ar externo.

O próprio sistema de condicionamento ambiental e suas diversas tecnologias impactam diretamente em seu consumo energético. Sistemas de expansão direta tipo *rooftop* com volume constante de ar de insuflamento possuem menor controle sobre a faixa de eficiência de operação. Já os sistemas *rooftop* com volume de ar variável permitem que os equipamentos atuem em estágios mais adequados à demanda térmica e em faixas de operação de maior eficiência energética.

Considerando o uso de sistemas centrais de água gelada, os quais possuem elevada eficiência energética no condicionamento ambiental de grandes espaços, percebeu-se que, para a faixa de carga térmica avaliada nesta tipologia, em torno de 100 TR, ele ainda não representa uma vantagem no consumo total de energia ao ser comparado com os sistemas *rooftop* VAV.

Com a previsão do consumo de energia em relação ao consumo simulado, verificou-se que as equações têm um R² acima de 96,63%, logo os modelos regressivos empregados foram representativos para prever o consumo de energia para a tipologia de **Comércio de Varejo de Grande Porte**.

A Tabela 17 resume os parâmetros estudados e identifica os considerados significativos para o desenvolvimento das equações de *benchmark* para esta tipologia.

Tabela 17 -Parâmetros analisados e sua relevância para a equação de benchmark da tipologia de Comércio de Varejo de Grande Porte

Parâmetros analisados	Parâmetros na equação para GHR < 54 mil	Parâmetros na equação para GHR > 54 mil
Clima GHR	✓	✓
Clima GDA	✓	
AVAC	✓	✓
Iluminação	✓	✓
Entorno		✓
Tipo de Cobertura		✓
Absortância Solar		✓
Renovação do Ar Interno		✓
Orientação solar		

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.