



CBCS

Conselho Brasileiro de Construção Sustentável

RT2B.11: Desenvolvimento de arquétipo, modelo de simulação, análise de sensibilidade e equações de *benchmark* para a tipologia de Escola de Ensino Fundamental e Médio

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 18/03/2021

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 Escola de Ensino Fundamental e Médio

Sumário

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	9
4.4. Sombreamento e orientação solar	10
4.5. Envoltória e tipo de vidro.....	11
4.6. Definição da carga térmica e sistema de condicionamento de ar	11
5. MODELO DE SIMULAÇÃO	14
5.1. Cenários de simulação	14
5.2. Método de análise dos resultados das simulações.....	14
6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	16
6.1. ANÁLISE EM Cidades com ghr abaixo de 54 mil.....	17
6.1.1. ambientes Totalmente condicionados	17
6.1.2. ambientes Parcialmente Condicionados (sistema presente em salas administrativas, biblioteca e sala de usos múltiplos).....	19
6.2. ANÁLISE EM Cidades com ghr acima de 54 mil.....	21
6.2.1. ambientes Totalmente condicionados	21
6.2.2. ambientes Parcialmente Condicionados (sistema presente em salas administrativas, biblioteca e sala de usos múltiplos).....	22
6.2.3. Salas de Aula e Salas Administrativas com Ventiladores e Demais Áreas não Equipadas....	23
6.3. ANÁLISE DO IMPACTO DOS PARÂMETROS SIGNIFICATIVOS.....	24
7. EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	31
7.1. Cidades com GHR abaixo de 54 mil.....	31
7.2. Cidades com GHR acima de 54 mil.....	33
7.3. cenário com ventiladores, independentes do ghr da cidade.....	37
7.4. Avaliação entre o consumo simulado e o consumo calculado	38
8. ESCALAS DE CONSUMO DE ENERGIA	39
8.1. Método para cálculo das escalas	39
8.2. Exemplo de aplicação	40
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
REFERÊNCIAS	43

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.

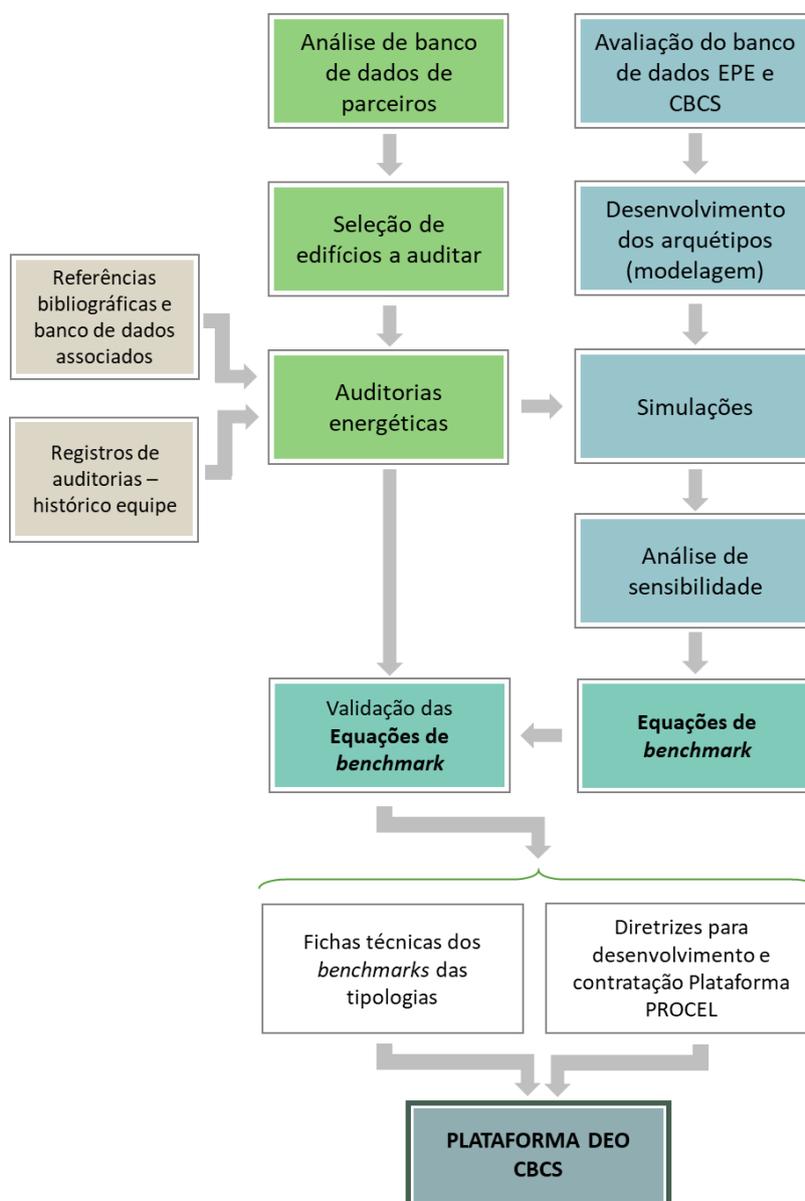


Figura 1 – Método aplicado pelo CBCS para o desenvolvimento dos benchmarks no âmbito deste convênio

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 **Escola de Ensino Fundamental e Médio**.

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, absorvância solar e condicionamento 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.

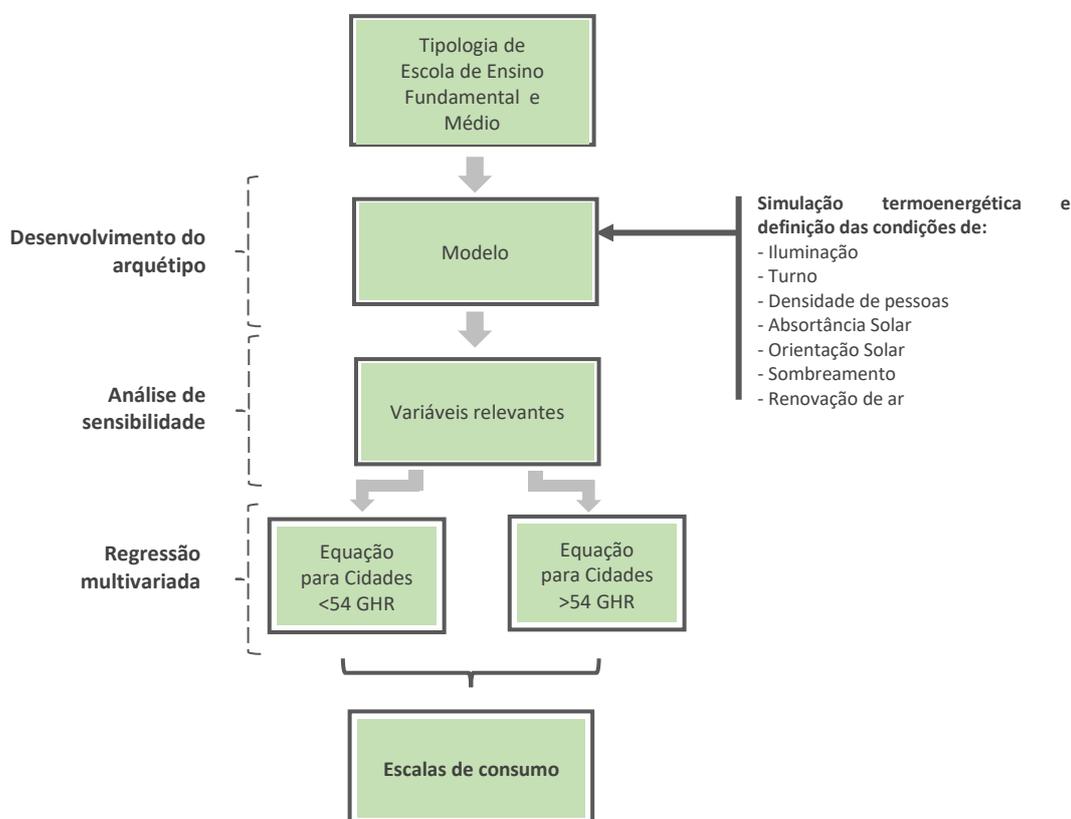


Figura 2 – Fluxograma de desenvolvimento das equações de benchmark e escalas de consumo para a tipologia de Escola de Ensino Fundamental e Médio

3. CIDADES SELECIONADAS

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

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

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

Tabela 1 - Faixas de GHR e cidades representativas

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

4. DESENVOLVIMENTO DO ARQUÉTIPO

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

A tipologia de **Escola de Ensino Fundamental e Médio** constitui-se tipicamente por edifícios de dois andares cuja função principal seja de desenvolvimento de crianças e adolescentes, tanto no quesito acadêmico quanto no pessoal e social. A área bruta da edificação deve incluir todo o espaço dentro do edifício, incluindo salas de aula, salas administrativas, cantina, banheiros, corredores, escadas etc. Este *benchmark* se refere a edifícios independentes, sem edificações mais altas em seu entorno.

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

- A avaliação engloba edifícios independentes, ou seja, expostos à radiação solar em todas as suas faces.
- Definição de um arquétipo representativo das áreas didáticas típicas da maioria das edificações, com salas de aula, sala de informática, sala de usos múltiplos e biblioteca. Há também na área administrativa, as salas de professores, diretoria, vice-diretoria e secretaria, além das áreas comuns como cantina, circulações e instalações sanitárias.

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
Salas de aula	11	574	36,7%
Sala de Informática	1	56	3,6%
Sala de Usos Múltiplos	1	42	2,7%
Biblioteca	1	56	3,6%
Diretoria	1	56	3,6%
Sala dos Professores	1	56	3,6%
Secretaria	1	56	3,6%
Circulação horizontal	2	404	25,8%
Circulação vertical	2	70	4,5%
Cantina	1	56	3,6%
Instalações sanitárias	4	140	8,9%
TOTAL	26	1566	100%

O modelo do edifício foi construído com base em uma edificação de dois pavimentos de dimensões 45,0 m x 17,4 m x 6,0 m (L x C x A), totalizando 1.566 m². A Figura 3 apresenta a volumetria, a planta e a configuração dos ambientes considerados e a Figura 4 as perspectivas do modelo.

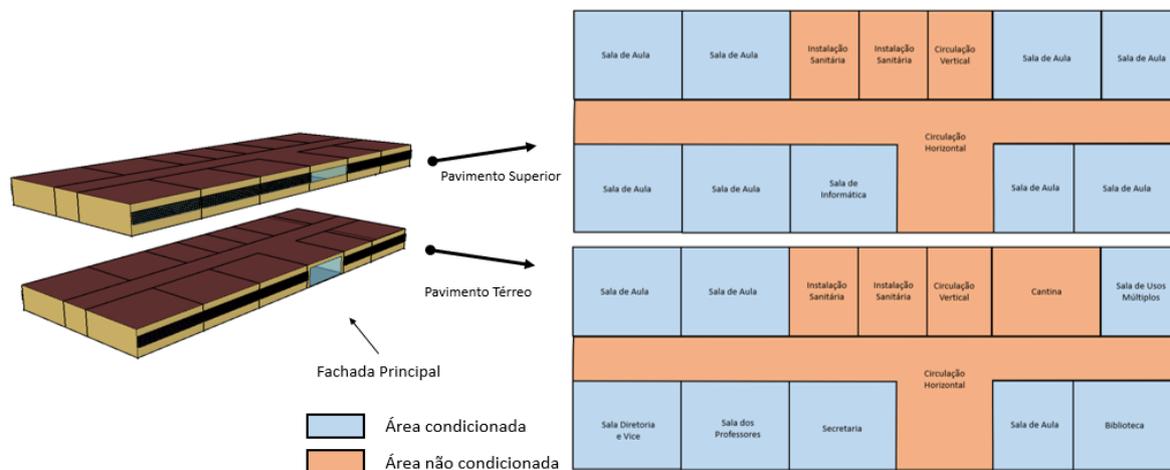


Figura 3 – Volumetria e configuração da planta do arquétipo

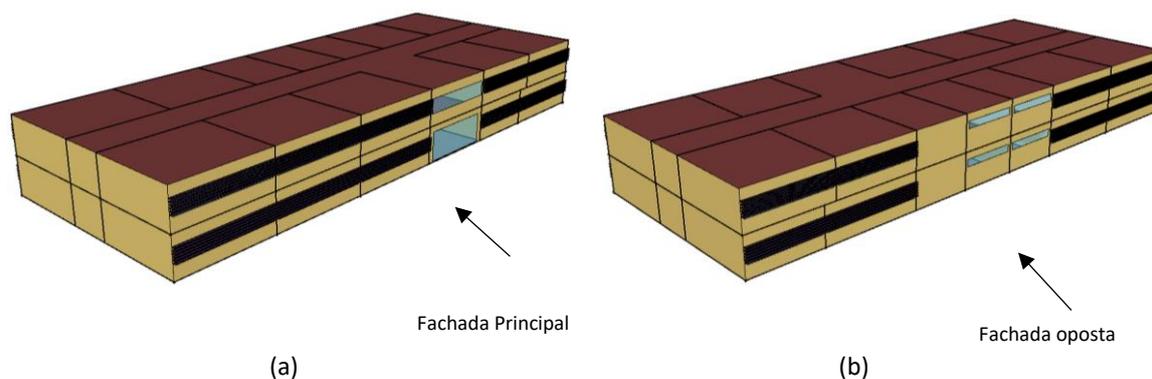


Figura 4 – Perspectiva da volumetria da edificação (a) frente e lateral esquerda; (b) fundos e lateral direita

4.2. ILUMINAÇÃO

No levantamento dos dados do projeto META foi identificada uma predominância significativa de sistemas de iluminação à base de lâmpadas fluorescentes, 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 9,9 W/m² e um cenário menos eficiente (ILUM01) representando as lâmpadas fluorescentes com DPI de 16,32 W/m². Esses valores correspondem, respectivamente, a uma classe A e classe D, para ambientes de sala de aula, 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.

Quanto ao regime de funcionamento, os sistemas de iluminação permanecem totalmente acesos nos ambientes de permanência prolongada ao longo de todo o período de ocupação. As áreas de circulação e instalações sanitárias não são continuamente ocupadas, no entanto também permanecem iluminadas enquanto há alguma ocupação na edificação.

A Figura 5 ilustra o cronograma de operação da iluminação, considerando o ambiente e os turnos manhã, tarde e noite, para as salas de aula, salas administrativas e biblioteca, salas de informática e salas de uso múltiplo (SUM).

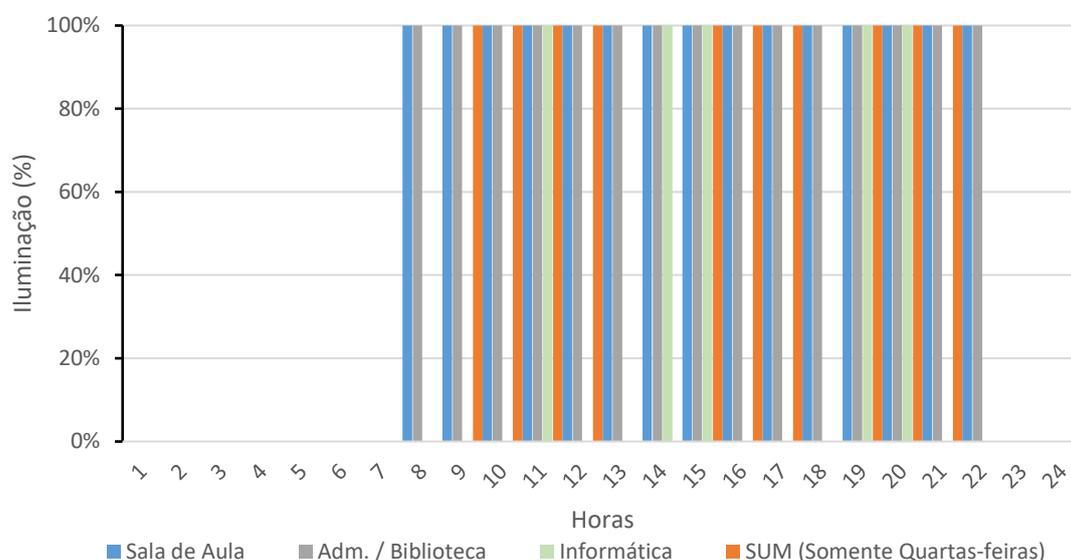


Figura 5 – Cronograma adotado para Iluminação – para TURN01 – manhã, tarde e noite

A Figura 6 ilustra o cronograma de operação da iluminação, considerando o ambiente e os turnos manhã e tarde, para as salas de aula, salas administrativas e biblioteca, salas de informática e salas de uso múltiplo (SUM).

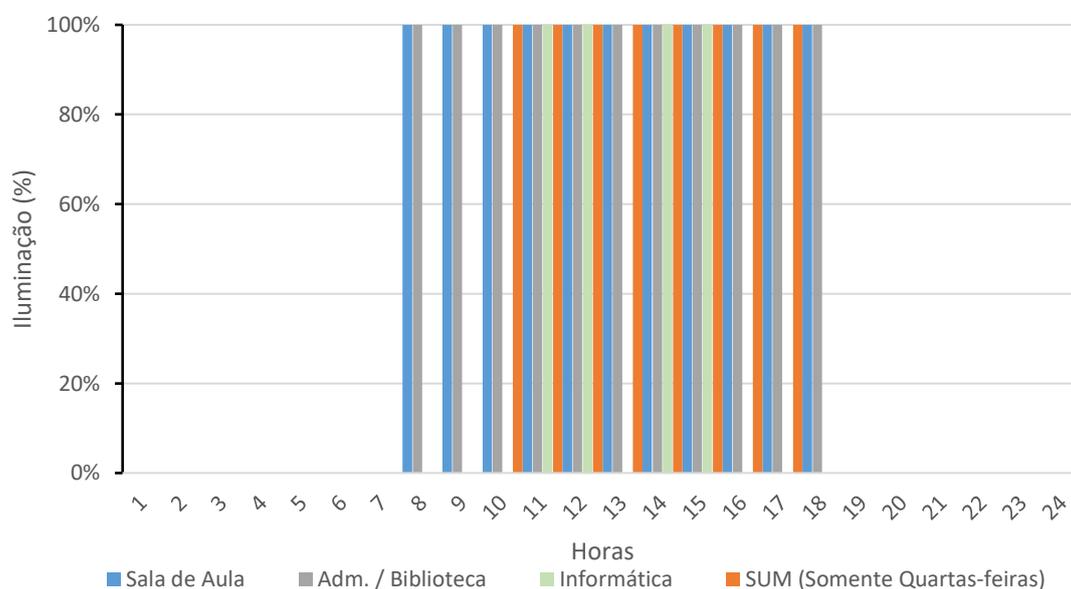


Figura 6 – Cronograma adotado para Iluminação para TURN02 – manhã e tarde

4.3. OCUPAÇÃO

O horário de funcionamento desta tipologia será uma variável de entrada da simulação e foi definido de acordo com turnos oferecidos pela instituição de ensino. A **Figura 7** mostra a variável TURN01, a qual contempla o ensino nos períodos da manhã, da tarde e da noite com início das atividades às 7h00 e término às 22h00. Apesar da análise do banco de dados e auditorias terem identificado maior parte das escolas com funcionamento apenas nos períodos da manhã e tarde, entendeu-se como relevante, especialmente para o Ensino Médio de jovens e adultos, considerar aulas noturnas. A Figura 8 mostra a variável TURN02, com aulas no período da manhã e da tarde, mantendo o início das atividades às 7h00 porém com término às 18h00.

Foi considerado período de férias de verão de 15 de dezembro até 31 de janeiro. Para o período de férias de inverno foi considerado o período de 1 de julho até 15 de julho.

Nas auditorias realizadas foi observado que a densidade de ocupação nas escolas também varia, e, portanto, considerou-se este dado como um possível cenário a ser variado, onde nas salas de aula há uma ocupação variada de alunos com 1m² por aluno (PESS01), 2m² por aluno (PESS02) e 4m² por aluno (PESS03). Em todos os casos foi considerado também um professor por sala.

Para os demais ambientes, foram definidas as seguintes ocupações e cargas de tomada:

- na sala da diretoria e vice há três pessoas, três computadores e uma impressora;
- na secretaria há três pessoas, três computadores e uma impressora;
- na sala dos professores há duas pessoas, três computadores de uso compartilhado e uma impressora;
- na biblioteca há um funcionário e uma frequência média de um aluno a cada 10m², totalizando 5 alunos, além de três computadores de uso compartilhado;
- na sala de usos múltiplos foi definida uma ocupação com 1m² por pessoa (totalizando 42 pessoas), além de um projetor e um computador. Este ambiente é ocupado uma vez por semana, pelo período de três horas a cada turno;
- na sala de informática foi considerada uma ocupação com 1,5m² por pessoa (totalizando 37 pessoas), com um computador por pessoa e um projetor. Estas salas são utilizadas todos os dias por duas horas a cada turno; e
- na cantina há um forno elétrico e uma estufa aquecida, que funcionam por duas horas a cada turno e uma geladeira e um freezer com funcionamento contínuo.

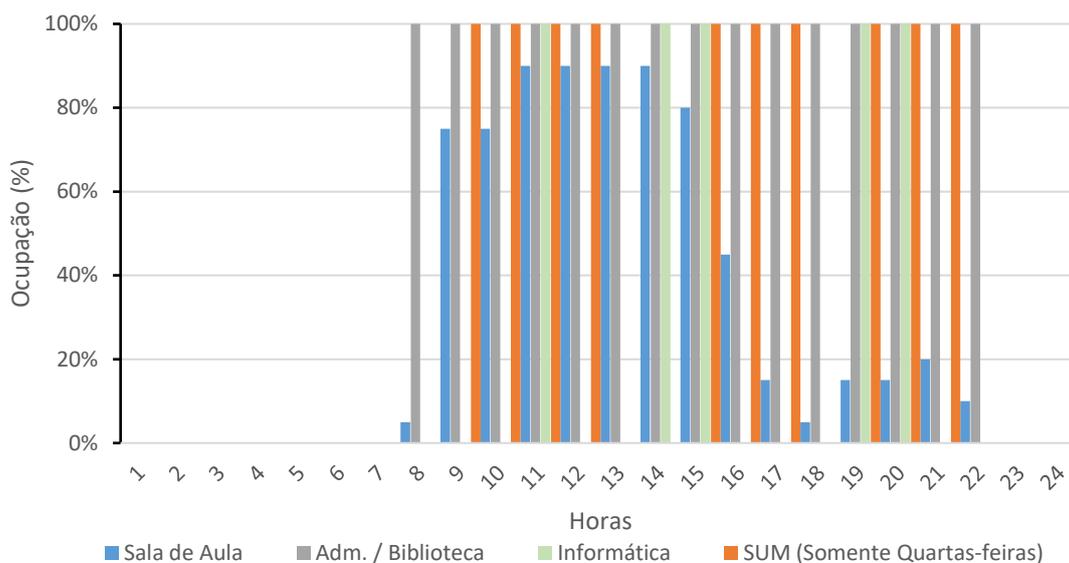


Figura 7 – Cronograma adotado para ocupação para TURN01 – manhã, tarde e noite

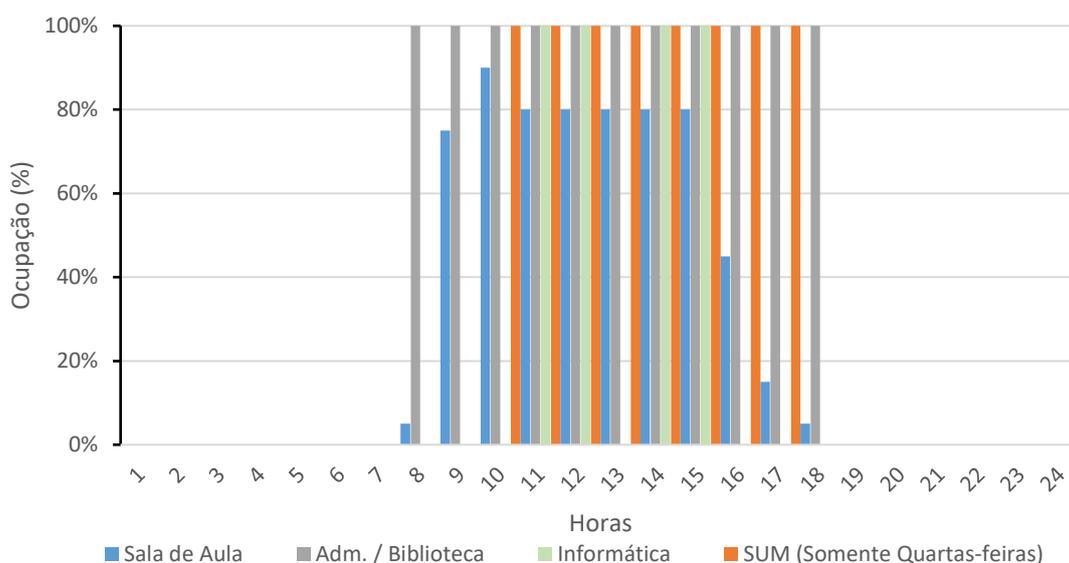


Figura 8 – Cronograma adotado para ocupação para TURN02 – manhã e tarde

4.4. SOMBREAMENTO E ORIENTAÇÃO SOLAR

Para o sombreamento das fachadas envidraçadas foram considerados brises horizontais de 20 cm de projeção e 20 cm de espaçamento entre as aletas por toda a extensão, com extensão de 20 cm em relação as bordas laterais das janelas (SOMB02) e também um cenário sem brise (SOMB01).

Pela simetria do arquétipo desenvolvido, foram considerados apenas dois cenários de orientação solar considerando a fachada principal orientada a sul (ORIE01) e a leste (ORIE02).

4.5. ENVOLTÓRIA E TIPO DE VIDRO

Para definir os cenários que representam a eficiência da envoltória da edificação, foi verificado que há um certo padrão na construção dos edifícios com maiores variações na cor do acabamento externo o que influencia diretamente na absorvância das superfícies. Assim, foi determinada uma envoltória com transmitância térmica das paredes igual a $2,55 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e da cobertura de $1,01 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ para ambos os casos, porém com um material mais escuro (ASOL01) para o caso menos eficiente com absorvância de 0,7 e no caso mais eficiente um material claro (ASOL02) com absorvância de 0,3.

O vidro considerado foi do tipo simples incolor de 3 mm, com valor de transmitância térmica de $5,8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e fator solar de 0,87.

A Figura 9 apresenta os elementos construtivos de referência para parede e cobertura.

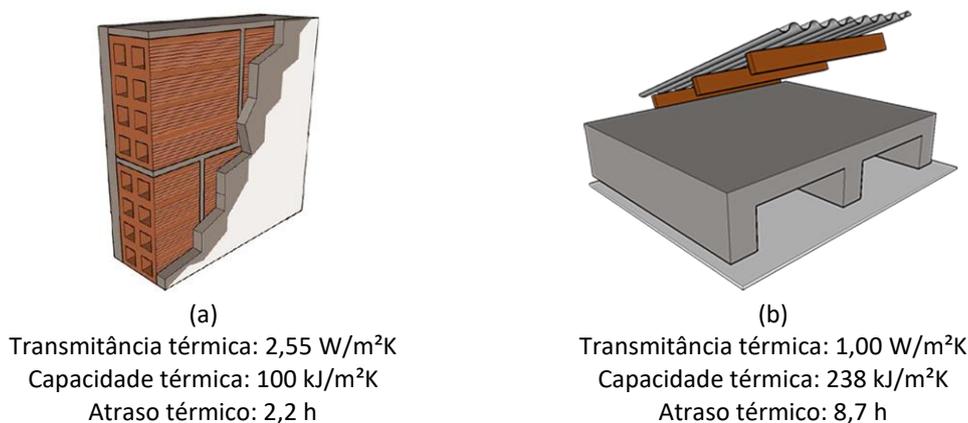


Figura 9 – Elementos construtivos de referência para (a) Paredes e (b) Cobertura

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 (

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

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
Turno	TURN01
Densidade de pessoas	PESS01
Absortância Solar	ASOL01
Orientação Solar	ORIE02
Sombreamento	SOMB01
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 condicionamento de ar foi mantida com o padrão do *EnergyPlus* (3 W/W no modo de refrigeração e 2,75 W/W no modo de aquecimento). Com relação à eficiência dos ventiladores, utilizaram-se os coeficientes para vazão constante ($P [kW] = \text{vazão [l/s]} \times 0,0017$), 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 condicionamento de ar do arquétipo. Esta seleção foi feita tendo como base equipamentos existentes no mercado, sendo escolhido o equipamento de capacidade superior a carga térmica definida. O equipamento foi modelado na simulação termoenergética do arquétipo.

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

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

Tabela 4 – Carga térmica por cidade representativa

Cidade	UF	Zona Bioclimática	Carga Térmica (TR)
Campos do Jordão	SP	1	83.0
São Paulo	SP	3	98.6
Porto Alegre	RS	3	118.3
Campinas	SP	3	102.2
Rio de Janeiro (Vila Militar)	RJ	8	117.0
Vitória	ES	8	112.8
Recife*	PE	8	119.5
Fortaleza	CE	8	99.3

* Cidade selecionada

Percebe-se que, dentre as cidades selecionadas como representativas, a cidade com maior carga térmica foi Recife, com 119.5 TR. Dessa forma, o arquivo climático de Recife foi selecionado como referência para dimensionamento do sistema de condicionamento de ar considerado no arquétipo.

Para esta tipologia foram simulados sistemas individuais tipo split, com EER nominal médio de 3,26 W/W em todos os espaços de permanência prolongada. No entanto, raramente tais edificações possuem um sistema de condicionamento de ar para todos os ambientes de permanência prolongada ou sequer têm este tipo de equipamento. Para contemplar estes casos, também foram realizadas simulações em um cenário parcialmente condicionado, com salas de aula e de informática equipadas com ventiladores de parede e, apenas a parte administrativa, bibliotecas e salas de usos múltiplos, equipadas com sistemas individuais tipo split com EER nominal médio de 3,37 W/W (salas administrativas) e EER nominal médio de 3,24 W/W (biblioteca e salas múltiplo uso), tendo sido considerado no cenário simulado um valor EER nominal médio igual para estes três tipos de ambiente de 3,35 W/W. Também foi adotado um terceiro cenário, somente com ventiladores de parede em todos os ambientes de permanência prolongada.

A renovação de ar em ambientes condicionados artificialmente é obrigatória por lei e definida em norma técnica. Na prática, no entanto é comum encontrar edificações que não contam com tal sistema de renovação de ar e, por vezes, quando possuem, não operam adequadamente. Assim, foram considerados dois cenários: um sem renovação de ar (RENO02) e outro com renovação de ar (RENO01) com a vazão apropriada de acordo com o tipo de ambiente, conforme Nível 2 da norma ABNT NBR 16401-3. Nas salas de aula, por exemplo, foi utilizada uma renovação de ar de acordo com a ocupação (6,3 L/s.pessoa) mais uma parcela referente a área da zona (0,8L/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, 388 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	Iluminação com DPI 16,32 W/m ² PBE classe D
	ILUM02	Iluminação com DPI 9,9 W/m ² PBE classe A
Turno	TURN01	Aulas nos períodos manhã, tarde e noite
	TURN02	Aulas nos períodos manhã e noite
Densidade de pessoas	PESS01	Alta densidade de alunos (1,0m ² /aluno)
	PESS02	Média densidade de alunos (2,0m ² /aluno)
	PESS03	Baixa densidade de alunos (4,0m ² /aluno)
Absortância Solar	ASOL01	Absortância solar $\alpha = 0,7$
	ASOL02	Absortância solar $\alpha = 0,3$
Orientação solar	ORIE01	Fachada principal orientada a Sul
	ORIE02	Fachada principal orientada a Leste
Sombreamento	SOMB01	Sem brise
	SOMB02	Com brise
AVAC	Total_Split	Sistema Split em todos os ambientes de permanência prolongada (EER = 3,26W/W)
	Parcial_Split	Sistema split somente nas salas administrativas, bibliotecas e salas de usos múltiplos (EER = 3,35 W/W)
	Ventilador	Salas de aula e salas administrativas equipadas com ventilador de parede
Renovação de ar	RENO01	Com renovação de ar (ABNT NBR 16401-3, Nível 2)
	RENO02	Não tem

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 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 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: laboratórios de ciências, salões esportivos, sala de artes, piscina aquecida, salas de apoio psicológico e refeitório, nos quais pode haver cargas especiais instaladas, não foi modelada no arquétipo. Neste caso, como trata-se de um consumo muito particular de cada caso, definiu-se que essas cargas devem ser analisadas separadamente da 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), turno (TURN), densidade de pessoas (PESS), sombreamento (SOMB), orientação solar (ORIE), absortância (ASOL), 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 sistema de condicionamento de ar para manter as condições locais de conforto.

6.1. ANÁLISE EM CIDADES COM GHR ABAIXO DE 54 MIL

6.1.1. AMBIENTES TOTALMENTE CONDICIONADOS

Por meio das Figura 10 e Figura 11, verifica-se que os parâmetros com variações mais significativas são o GHR, GDA, ILUM, TURN, SOMB e PESS. As variações dos parâmetros ASOL, ORIE e RENO tiveram um impacto pequeno no cálculo do consumo de energia. No entanto, o parâmetro ASOL, devido às variações de absorvância encontradas no banco de dados META e nas auditorias, foi mantido nas análises para o desenvolvimento das equações de *benchmark* desta tipologia.

A variação do parâmetro AVAC não foi analisada, todos os ambientes foram simulados com o mesmo sistema tipo split.

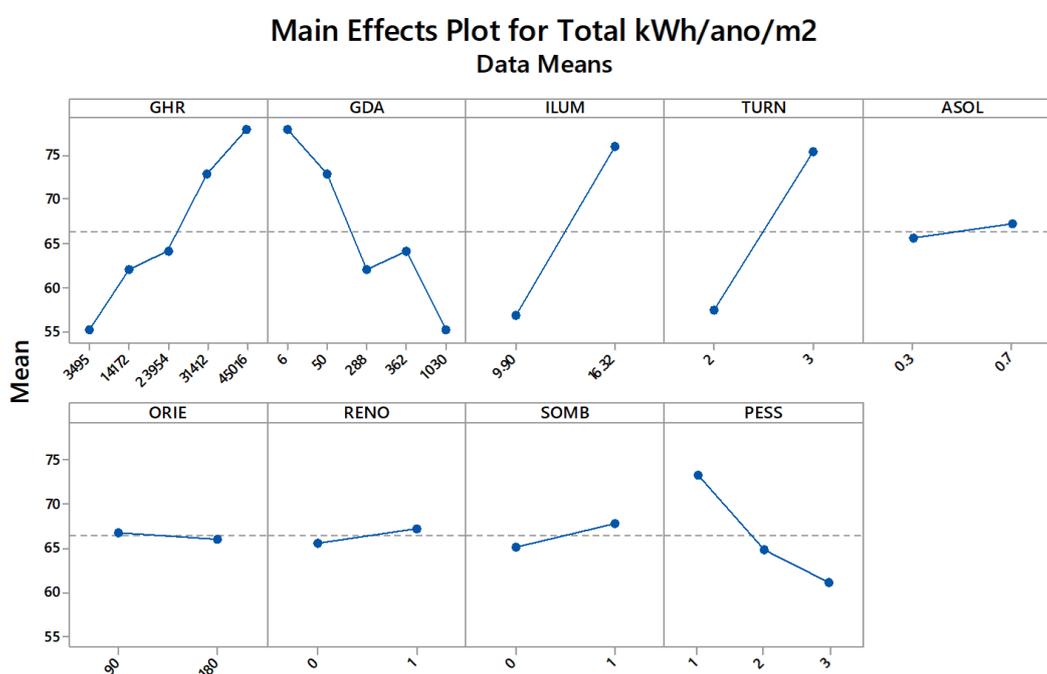


Figura 10 - Efeito dos parâmetros no consumo de energia

Interaction Plot for Total kWh/ano/m2 Data Means

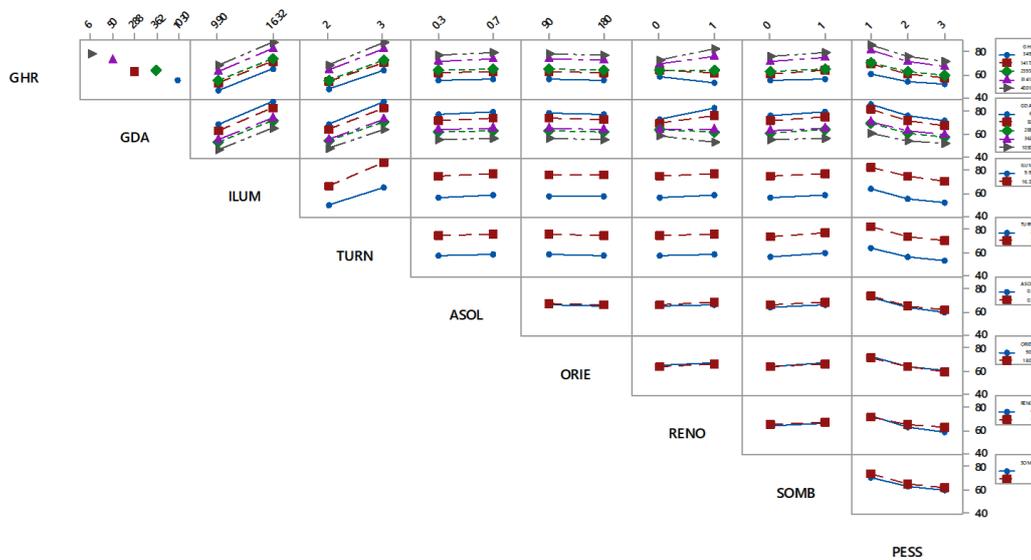


Figura 11 - Interação entre os parâmetros

6.1.2. AMBIENTES PARCIALMENTE CONDICIONADOS (SISTEMA PRESENTE EM SALAS ADMINISTRATIVAS, BIBLIOTECAS E SALAS DE USOS MÚLTIPLOS)

Por meio das Figura 12 e Figura 13, verifica-se que os parâmetros com variações mais significativas são GHR, GDA, ILUM e TURN. As variações dos parâmetros ASOL, ORIE, RENO, SOMB e PESS não tiveram impacto significativo no cálculo do consumo de energia. Sendo assim, essas são retiradas das análises da equação de regressão dos cenários parcialmente condicionados para cidades com GHR menores que 54 mil.

A variação do parâmetro AVAC não foi analisada, todos os ambientes condicionados foram simulados com o mesmo sistema tipo split.

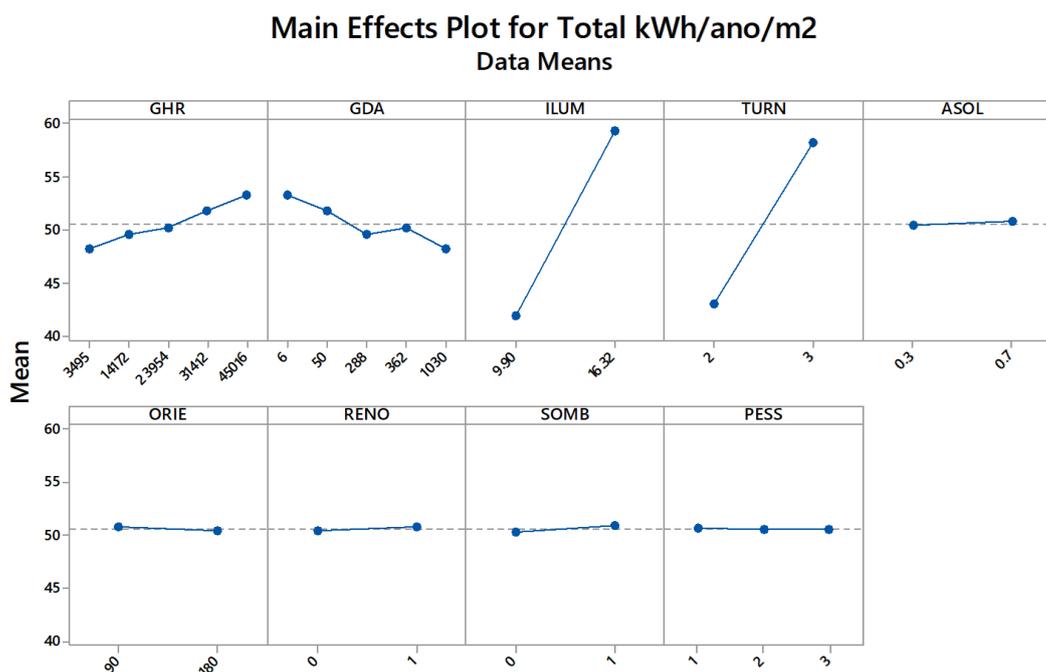


Figura 12 - Efeito dos parâmetros no consumo de energia

Interaction Plot for Total kWh/ano/m2 Data Means

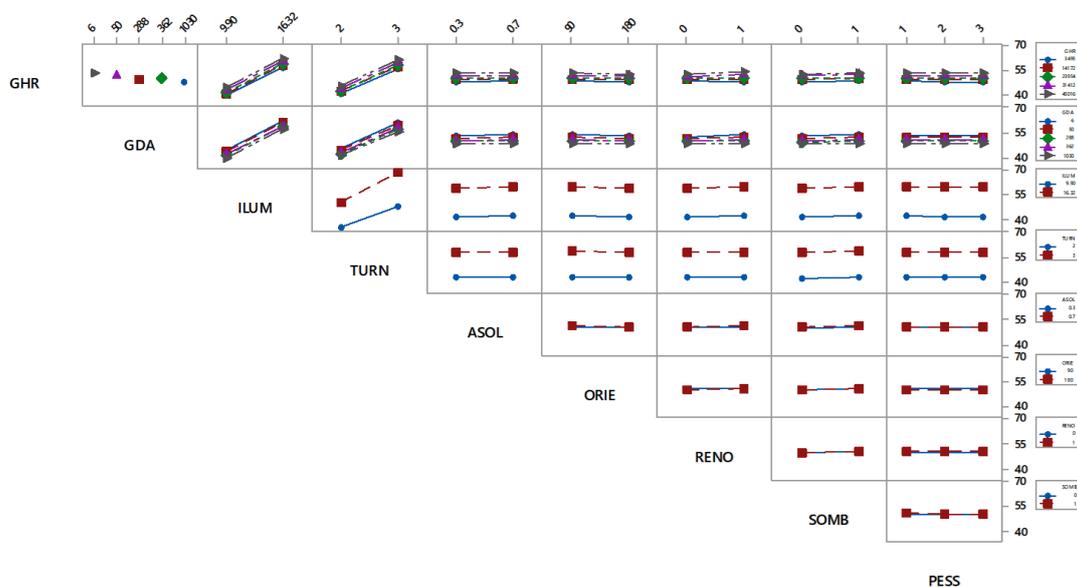


Figura 13 - Interação entre os parâmetros

6.2. ANÁLISE EM CIDADES COM GHR ACIMA DE 54 MIL

6.2.1. AMBIENTES TOTALMENTE CONDICIONADOS

Por meio das Figura 14 e Figura 15, verifica-se que todos os parâmetros têm variações significativas. Assim, serão incluídos na equação GHR, ILUM, TURN, ASOL, ORIE, RENO, SOMB e PESS.

A variação do parâmetro AVAC não foi analisada, todos os ambientes foram simulados com o mesmo sistema tipo split.

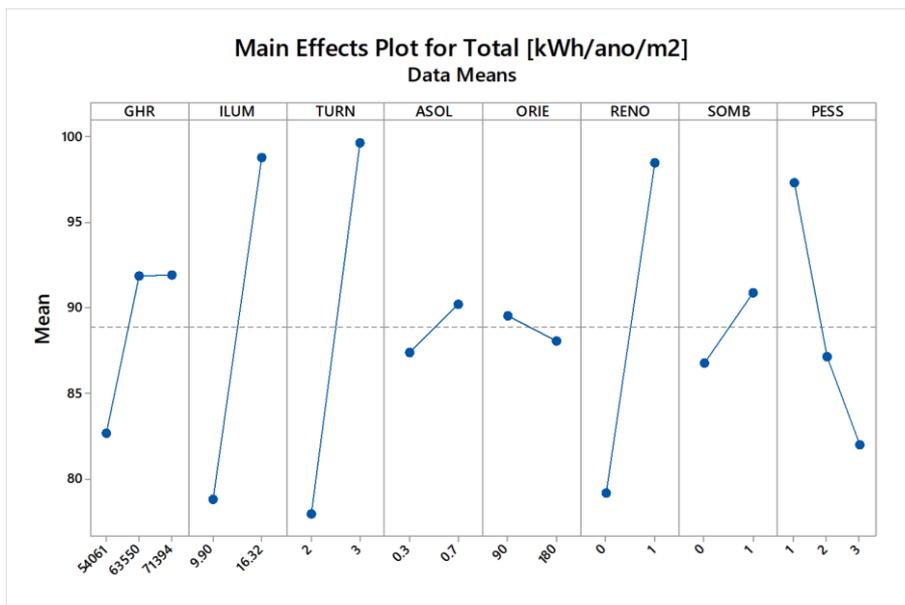


Figura 14 - Efeito dos parâmetros no consumo de energia

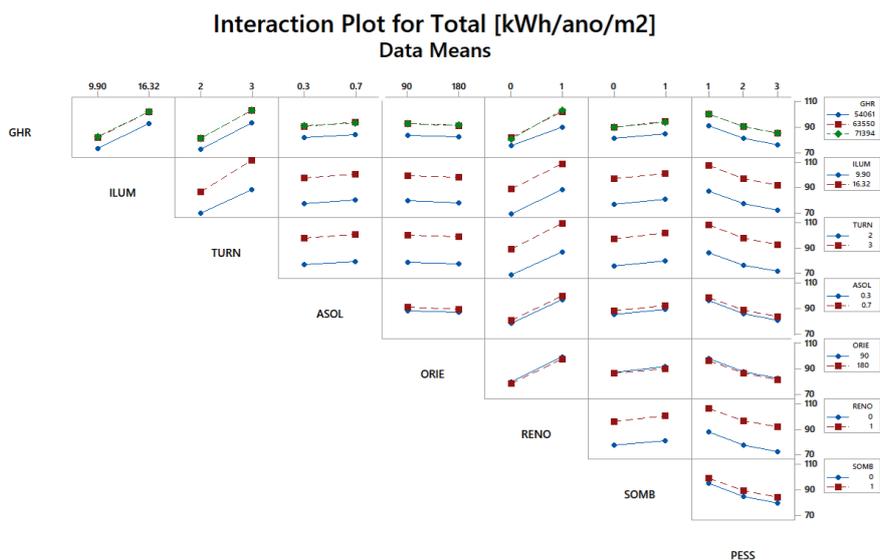


Figura 15 - Interação entre os parâmetros

6.2.2. AMBIENTES PARCIALMENTE CONDICIONADOS (SISTEMA PRESENTE EM SALAS ADMINISTRATIVAS, BIBLIOTECAS E SALAS DE USOS MÚLTIPLOS)

Por meio das Figura 16 e Figura 17, verifica-se que os parâmetros com variações mais significativas são o GHR, ILUM, TURN e RENO. As variações dos parâmetros SOMB é ligeiramente maior que as de ASOL, ORIE e PESS e foi considerada nas análises da equação de regressão dos cenários parcialmente condicionados para cidades com GHR maiores que 54 mil.

A variação do parâmetro AVAC não foi analisada, todos os ambientes condicionados foram simulados com o mesmo sistema tipo split.

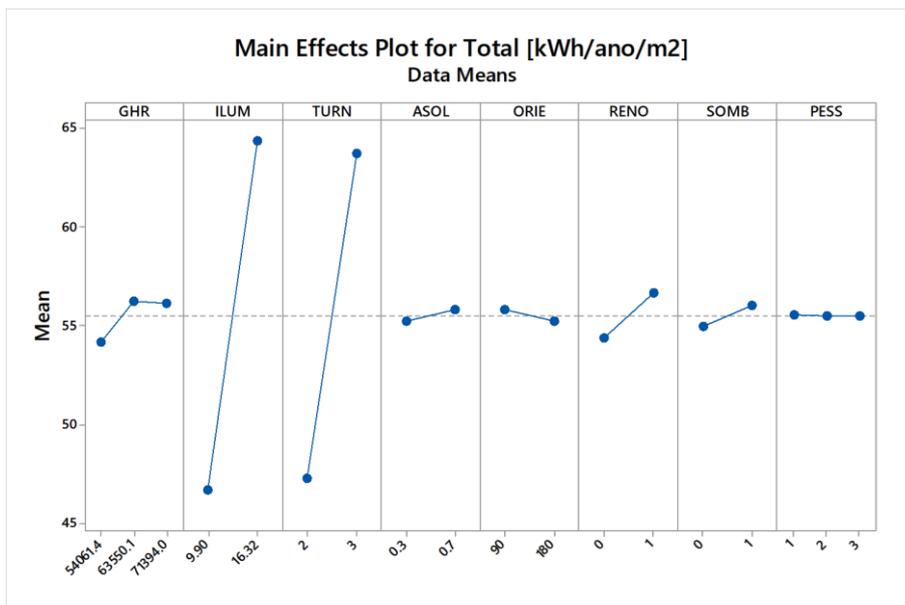


Figura 16 - Efeito dos parâmetros no consumo de energia

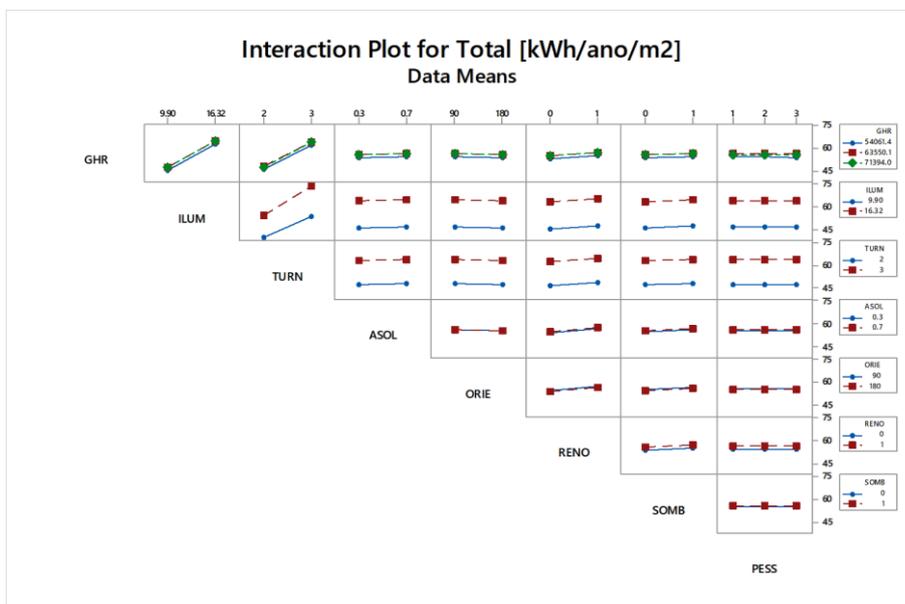


Figura 17 - Interação entre os parâmetros

6.2.3. SALAS DE AULA E SALAS ADMINISTRATIVAS COM VENTILADORES E DEMAIS ÁREAS NÃO EQUIPADAS

Por meio das Figura 18 e Figura 19, verifica-se que os parâmetros com variações mais significativas são o ILUM e TURN. As variações dos parâmetros GHR, GDA, ASOL, ORIE, RENO, SOMB e PESS tiveram um impacto pequeno no cálculo do consumo de energia e assim serão retiradas das análises da equação de regressão dos cenários não condicionados.

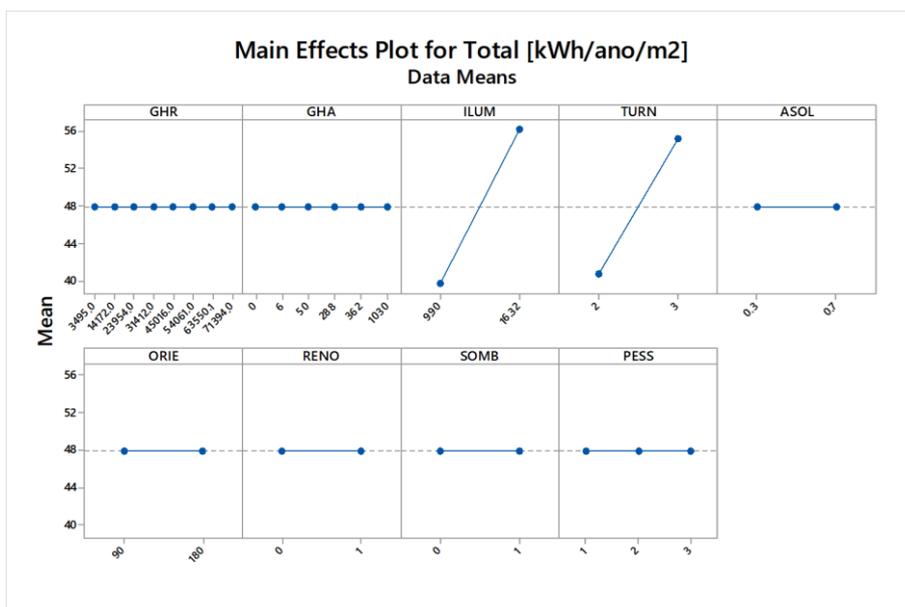


Figura 18 - Efeito dos parâmetros no consumo de energia

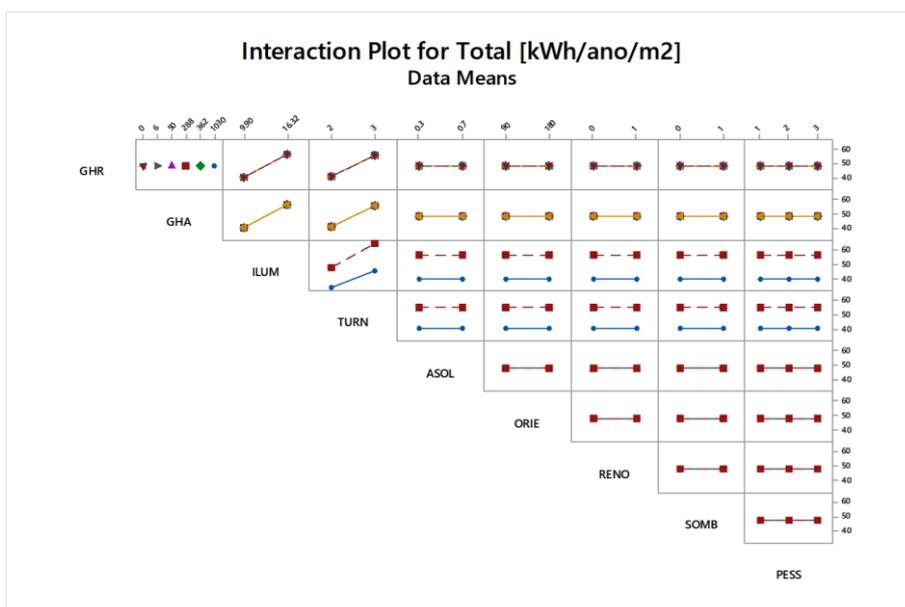


Figura 19 - Interação entre os parâmetros

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, TURN, ASOL, SOMB, PESS, ORIE, RENO e proporção de áreas condicionadas.

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 consumo de energia do sistema de condicionamento de ar ao substituir o sistema de iluminação no padrão PBE classe D (16,32 W/m²) para um PBE classe A (9,9 W/m²). Além do impacto no consumo de energia no sistema de condicionamento de ar, 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:	Split individual (EER=3,26W/W), edificação totalmente condicionada	
	Iluminação:	Parâmetro analisado	
	Turno:	manhã, tarde e noite	
	Densidade de pessoas:	1 m ² por aluno (sala de aula)	
	Absortância Solar:	α: 0,3	
	Orientação Solar:	Fachada principal orientada a sul	
	Sombreamento:	sem brise	
	Renovação de ar:	ABNT 16401 - nível 2	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Variação no consumo de AVAC
	Parâmetro analisado: Iluminação		
	PBE classe D	PBE classe A	
Campos do Jordão	13,76	11,37	-17,3%
São Paulo	26,68	23,17	-13,1%
Porto Alegre	29,06	25,84	-11,1%
Campinas	46,32	42,14	-9,0%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	53,57	49,27	-8,0%
Vitória	61,26	56,99	-7,0%
Recife	73,79	69,49	-5,8%
Fortaleza	76,11	71,80	-5,7%

Há também uma variação no consumo de energia dependendo da quantidade de turnos oferecidos pela instituição. Tal variação se deve principalmente ao tempo de operação da edificação e deverá ser incluída como parâmetro de entrada para o cálculo da equação de *benchmark*. A Tabela 8 a seguir mostra a diferença no consumo de energia pelos sistemas de condicionamento de ar de acordo com a quantidade de turnos oferecidos.

Tabela 8 – Impactos dos turnos no consumo do sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC:	Split individual (EER=3,26W/W), edificação totalmente condicionada	
	Iluminação:	PBE classe D (16,32 W/m ² , ref. Sala de aula)	
	Turno:	Parâmetro analisado	
	Densidade de pessoas:	4 m ² por aluno (sala de aula)	
	Absortância Solar:	α : 0,3	
	Orientação Solar:	Fachada principal orientada a leste	
	Sombreamento:	com brise	
	Renovação de ar:	ABNT 16401 - nível 2	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Variação no consumo de AVAC
	Parâmetro analisado: Turno		
	manhã, tarde e noite	manhã e tarde	
Campos do Jordão	7,26	6,16	-15,1%
São Paulo	14,68	11,71	-20,2%
Porto Alegre	18,24	14,97	-17,9%
Campinas	28,93	23,46	-18,9%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	35,40	29,03	-18,0%
Vitória	42,32	34,87	-17,6%
Recife	53,92	44,69	-17,1%
Fortaleza	56,52	46,87	-17,1%

A densidade de alunos presentes nas salas de aula também possui grande impacto no consumo do sistema de condicionamento de ar. A carga térmica oriunda das pessoas que ocupam um ambiente pode ser bem significativa quando a densidade é alta. Uma quantidade 75% menor de alunos na sala de aula (variação de 1m² por aluno para 4 m² por aluno), causa uma redução significativa no consumo dos sistemas AVAC, como pode ser observado na Tabela 9 e, portanto, também será uma variável de entrada que irá balizar o consumo de energia na equação de *benchmark*.

Tabela 9 – Impacto da densidade de pessoas no consumo do sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC:	Split individual (EER = 3,26 W/W), edificação totalmente condicionada	
	Iluminação:	PBE classe D (16,32 W/m ² , ref. Sala de aula)	
	Turno:	manhã, tarde e noite	
	Densidade de pessoas:	Parâmetro analisado	
	Absortância Solar:	α: 0,3	
	Orientação Solar:	Fachada principal orientada a sul	
	Sombreamento:	sem brise	
	Renovação de ar:	ABNT 16401 - nível 2	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m ²]		Variação no consumo de AVAC
	Parâmetro analisado: Densidade de pessoas		
	1m ² por aluno	4m ² por aluno	
Campos do Jordão	13,76	7,95	-42,2%
São Paulo	26,68	16,82	-36,9%
Porto Alegre	29,06	20,27	-30,2%
Campinas	46,32	32,33	-30,2%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	53,57	38,97	-27,2%
Vitória	61,26	46,21	-24,6%
Recife	73,79	58,27	-21,0%
Fortaleza	76,11	60,32	-20,8%

A

Tabela 10 ilustra a variação no consumo de energia do sistema de condicionamento de ar de um edifício com acabamento das fachadas em cores mais claras (α : 0,3) em relação aos de acabamento mais escuros (α : 0,7), que retem mais calor proveniente da radiação solar.

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

Modelo base	AVAC:	Split individual (EER = 3,26 W/W), edificação totalmente condicionada	
	Iluminação:	PBE classe A (9.9 W/m ² , ref. Sala de aula)	
	Turno:	manhã, tarde e noite	
	Densidade de pessoas:	1 m ² por aluno (sala de aula)	
	Absorvância Solar:	Parâmetro analisado	
	Orientação Solar:	Fachada principal orientada a sul	
	Sombreamento:	Com brise	
	Renovação de ar:	ABNT 16401 - nível 2	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Varição no consumo de AVAC
	Parâmetro analisado: absorvância solar		
	α : 0,7	α : 0,3	
Campos do Jordão	10,94	9,50	-13,2%
São Paulo	22,27	20,59	-7,5%
Porto Alegre	25,07	23,35	-6,9%
Campinas	40,93	38,61	-5,7%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	47,99	45,63	-4,9%
Vitória	55,93	53,14	-5,0%
Recife	69,10	65,22	-5,6%
Fortaleza	70,84	68,06	-3,9%

A orientação solar das fachadas permite que diferentes quantidades de calor penetrem no interior da edificação que resulta em consumos diferenciados nos sistemas de condicionamento de ar ilustrados na

Tabela 11 a seguir.

Tabela 11 – Impacto da orientação solar no consumo do sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC:	Split individual (EER = 3,26 W/W), edificação totalmente condicionada	
	Iluminação:	PBE classe A (9,9 W/m ² , ref. Sala de aula)	
	Turno:	manhã, tarde e noite	
	Densidade de pessoas:	4 m ² por aluno (sala de aula)	
	Absortância Solar:	α : 0,3	
	Orientação Solar:	Parâmetro analisado	
	Sombreamento:	sem brise	
	Renovação de ar:	ABNT 16401 - nível 2	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Varição no consumo de AVAC
	Parâmetro analisado: Orientação Solar		
	Fachada a Sul	Fachada a Leste	
Campos do Jordão	7,24	8,13	12,4%
São Paulo	14,14	15,07	6,6%
Porto Alegre	17,98	19,10	6,2%
Campinas	28,36	29,26	3,2%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	34,74	35,98	3,6%
Vitória	41,85	43,56	4,1%
Recife	53,87	56,90	5,6%
Fortaleza	55,86	57,99	3,8%

A utilização de brises nas janelas reduz a quantidade de radiação direta no interior das edificações, reduzindo a carga térmica e consequentemente o consumo de energia dos sistemas de condicionamento de ar. A tabela 12 ilustra o impacto desta medida em relação a um cenário sem qualquer sistema de proteção das janelas.

Tabela 12 – Impacto do uso de brises nas janelas no consumo do sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC:	Split individual (EER = 3,26 W/W), edificação totalmente condicionada	
	Iluminação:	PBE classe A (9.9 W/m ² , ref. Sala de aula)	
	Turno:	manhã e tarde	
	Densidade de pessoas:	1 m ² por aluno (sala de aula)	
	Absortância Solar:	α : 0,3	
	Orientação Solar:	Fachada principal orientada a leste	
	Sombreamento:	Parâmetro analisado	
	Renovação de ar:	ABNT 16401 - nível 2	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Varição no consumo de AVAC
	Parâmetro analisado: sombreamento		
	sem brise	com brise	
Campos do Jordão	10,64	8,55	-19,6%
São Paulo	20,44	17,78	-13,0%
Porto Alegre	22,99	20,36	-11,4%
Campinas	36,83	33,28	-9,6%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	43,43	39,66	-8,7%
Vitória	50,47	46,19	-8,5%

Recife	62,30	56,76	-8,9%
Fortaleza	63,45	58,84	-7,3%

Outro item que também impacta no consumo de energia do sistema de condicionamento de ar é a renovação do ar interno da instalação. Este item é obrigatório por lei (nº 13.589, de 4 de janeiro de 2018) e deveria ser utilizado em todas as instalações. No entanto, como possível forma de economia de energia muitas pessoas desligam a renovação de ar, ou sequer instalam um sistema para este fim, em detrimento da salubridade do local, estando sujeito a penalidades em caso de fiscalização. A Tabela 13 mostra que nos climas mais frios, a utilização da renovação de ar propicia um consumo anual de energia do sistema AVAC muito menor. 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 o desligamento da renovação de ar reduz de forma significativa o consumo de energia elétrica. Este parâmetro servirá de calibração para o consumo do usuário final, que poderá avaliar sua instalação de acordo com o seu padrão de utilização, mas terá uma sinalização sobre a não conformidade com a legislação vigente.

Tabela 13 – Impacto da presença de renovação de ar no consumo do sistema AVAC

Modelo base	AVAC: Split individual (EER = 3,26 W/W), edificação totalmente condicionada		
	Iluminação: PBE classe A (9.9W/m², ref. Sala de aula)		
	Turno: manhã, tarde e noite		
	Densidade de pessoas: 1 m² por aluno (sala de aula)		
	Absortância Solar: α: 0,3		
	Orientação Solar: Fachada principal orientada a sul		
	Sombreamento: com brise		
	Renovação de ar: Parâmetro analisado		
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Variação no consumo de AVAC
	Parâmetro analisado: Renovação de ar		
	com renovação	sem renovação	
Campos do Jordão	9,50	21,23	123,4%
São Paulo	20,59	27,11	31,7%
Porto Alegre	23,35	27,90	19,5%
Campinas	38,61	33,71	-12,7%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	45,63	37,12	-18,7%
Vitória	53,14	39,45	-25,8%
Recife	65,22	45,35	-30,5%
Fortaleza	68,06	44,99	-33,9%

O próprio sistema de condicionamento ambiental possui diversas tecnologias com eficiências energéticas distintas e que impactam no consumo de energia total de uma edificação. Nesta tipologia, no entanto, não é comum ter grandes variações nos tipos de sistemas de condicionamento de ar, mas sim na quantidade de ambientes condicionados. A Tabela 14 apresenta as diferenças no consumo de energia em um cenário onde todos os ambientes de sala de aula e administrativos são condicionados por sistemas Split e de outro cenário onde as salas de aula são equipadas apenas com ventiladores de parede e somente as salas administrativas, as bibliotecas e as salas de usos múltiplos são equipadas com sistemas de condicionamento de ar do tipo Split. Há ainda um terceiro cenário onde nenhum dos ambientes possuem sistema AVAC e todos são equipados apenas com ventiladores de parede. A comparação do cenário somente com ventiladores com o cenário totalmente condicionado é apresentado na Tabela 15.

Este parâmetro tem impactos bastante significativos e também será utilizada para balizar a eficiência energética do usuário final na equação de *benchmark*.

Tabela 14 – Impacto da proporção de áreas condicionadas no consumo dos sistemas de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC: Parâmetro analisado		
	Iluminação:	PBE classe D (16,32 W/m ² , ref. Sala de aula)	
	Turno:	manhã e tarde	
	Densidade de pessoas:	1 m ² por aluno (sala de aula)	
	Absortância Solar:	α : 0,7	
	Orientação Solar:	Fachada principal orientada a sul	
	Sombreamento:	com brise	
	Renovação de ar:	ABNT 16401 - nível 2	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m ²]		Variação no consumo de AVAC
	Parâmetro analisado: AVAC		
	Totalmente condicionado	Parcialmente condicionado	
Campos do Jordão	11,02	4,53	-58,9%
São Paulo	21,14	5,91	-72,0%
Porto Alegre	23,49	6,54	-72,2%
Campinas	37,77	8,33	-77,9%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	44,09	9,64	-78,1%
Vitória	50,85	10,67	-79,0%
Recife	62,07	12,70	-79,5%
Fortaleza	63,58	12,72	-80,0%

Tabela 15 – Impacto da presença ou não de sistemas de condicionamento de ar nos ambientes no consumo do sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC: Parâmetro analisado		
	Iluminação:	PBE classe D (16,32 W/m ² , ref. Sala de aula)	
	Turno:	manhã e tarde	
	Densidade de pessoas:	1 m ² por aluno (sala de aula)	
	Absortância Solar:	α : 0,7	
	Orientação Solar:	Fachada principal orientada a sul	
	Sombreamento:	sem brise	
	Renovação de ar:	ABNT 16401 - nível 2	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m ²]		Variação no consumo de AVAC
	Parâmetro analisado: AVAC		
	Totalmente condicionado	Apenas ventilador de parede	
Campos do Jordão	14,00	4,39	-68,6%
São Paulo	24,38	4,39	-82,0%
Porto Alegre	26,74	4,39	-83,6%
Campinas	41,78	4,39	-89,5%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	48,50	4,39	-90,9%

Vitória	55,88	4,39	-92,1%
Recife	68,64	4,39	-93,6%
Fortaleza	68,91	4,39	-93,6%

7. EQUAÇÃO DE REGRESSÃO

Para o desenvolvimento das equações para predição do consumo de energia da tipologia de **Escola de Ensino Fundamental e Médio**, 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). Tendo sido elaboradas 5 equações para esta tipologia.

7.1. CIDADES COM GHR ABAIXO DE 54 MIL

Análise dos parâmetros – Edificação totalmente condicionada

Candidate terms: ILUM, TURN, PESS, SOMB, ASOL, logGHR, logGDA

	----Step 1----		-----Step 2-----		-----Step 3----		-----Step 4----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	27.18		-17.78		2.76		14.98	
ILUM	2.993	0.000	2.993	0.000	2.9926	0.000	2.9926	0.000
TURN			17.986	0.000	17.986	0.000	17.986	0.000
logGDA					-9.806	0.000	-9.806	0.000
PESS							-6.110	0.000
logGHR								
SOMB								
ASOL								
S	13.7820		10.4408		6.93008		4.80165	
R-sq	32.74%		61.44%		83.03%		91.86%	
R-sq (adj)	32.67%		61.36%		82.98%		91.83%	
R-sq (pred)	32.46%		61.20%		82.88%		91.77%	
Mallows' Cp	9330.88		4943.56		1643.56		294.74	
	-----Step 5-----		-----Step 6-----		-----Step 7----			
	Coef	P	Coef	P	Coef	P		
Constant	-24.27		-25.61		-27.70			
ILUM	2.9926	0.000	2.9926	0.000	2.9926	0.000		
TURN	17.986	0.000	17.986	0.000	17.986	0.000		
logGDA	-6.715	0.000	-6.715	0.000	-6.715	0.000		
PESS	-6.110	0.000	-6.110	0.000	-6.110	0.000		
logGHR	7.720	0.000	7.720	0.000	7.720	0.000		
SOMB			2.688	0.000	2.688	0.000		
ASOL					4.178	0.000		
S	4.49138		4.28648		4.20583			
R-sq	92.89%		93.53%		93.78%			
R-sq (adj)	92.85%		93.49%		93.73%			
R-sq (pred)	92.79%		93.43%		93.67%			
Mallows' Cp	139.94		43.90		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	253717	36245.2	2049.02	0.000
ILUM	1	88592	88591.6	5008.27	0.000
TURN	1	77643	77642.9	4389.32	0.000
PESS	1	23895	23894.6	1350.81	0.000
SOMB	1	1734	1734.2	98.04	0.000
ASOL	1	670	670.4	37.90	0.000
logGHR	1	2774	2773.7	156.80	0.000
logGDA	1	8861	8861.0	500.93	0.000
Error	952	16840	17.7		
Lack-of-Fit	232	5934	25.6	1.69	0.000
Pure Error	720	10906	15.1		
Total	959	270557			

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4.20583	93.78%	93.73%	93.67%

Equação de Regressão

Total kWh/ano/m2 = (-27.70 + 7.720 logGHR - 6.715 logGDA + 2.9926 ILUM + 17.986 TURN + 4.178 ASOL + 2.688 SOMB - 6.110 PESS)

Análise dos parâmetros – Edificação parcialmente condicionada

Candidate terms: logGHR, logGDA, ILUM, TURN

	-----Step 1-----		-----Step 2-----		-----Step 3-----		-----Step 4-----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	14.91		-23.263		-18.778		-27.22	
ILUM	2.7213	0.000	2.7213	0.000	2.7213	0.000	2.7213	0.000
TURN			15.269	0.000	15.269	0.000	15.2688	0.000
logGDA					-2.1405	0.000	-1.476	0.000
logGHR							1.660	0.000
S		7.98711		2.32252		1.57742		1.53510
R-sq		54.52%		96.16%		98.23%		98.33%
R-sq(adj)		54.47%		96.15%		98.22%		98.32%
R-sq(pred)		54.33%		96.13%		98.21%		98.31%
Mallows' Cp		24978.20		1236.58		57.44		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	132118	33029.4	14016.17	0.000
logGHR	1	128	128.3	54.44	0.000
logGDA	1	428	428.0	181.64	0.000
ILUM	1	73254	73253.7	31085.47	0.000
TURN	1	55952	55952.4	23743.62	0.000
Error	955	2250	2.4		
Lack-of-Fit	15	1906	127.0	346.25	0.000
Pure Error	940	345	0.4		
Total	959	134368			

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.53510	98.33%	98.32%	98.31%

Equação de Regressão

Total kWh/ano/m² = (-27.22 + 1.660 logGHR - 1.476 logGDA + 2.7213 ILUM + 15.2688 TURN)

EQUAÇÕES PARA CIDADES COM GHR MENORES QUE 54 MIL

CONSUMO_TotalmenteCondicionado [kWh/m²/ano] = -27,70 + 7,720 logGHR – 6,715 logGDA + 2,9926 ILUM + 17,986 TURN + 4,178 ASOL + 2,688 SOMB – 6,110 PESS

CONSUMO_ParcialmenteCondicionado [kWh/m²/ano] = -27,22 + 1,660 logGHR – 1,476 logGDA + 2,7213 ILUM + 15,2688 TURN

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)

TURN – Turno (2- manhã/tarde, 3- manhã/tarde/noite)

ASOL – Absortância da envoltória (0,3 – cores claras; 0,7 – cores escuras)

SOMB – Uso de elemento de sombreamento nas aberturas (0 – com brise, 1 – sem brise)

PESS – Densidade de Alunos em sala de aula (m² por aluno)

7.2. CIDADES COM GHR ACIMA DE 54 MIL

Análise dos parâmetros – Edificação totalmente condicionada

Candidate terms: logGHR, ILUM, TURN, ASOL, ORIE, RENO, SOMB, PESS

	----Step 1----		----Step 2----		----Step 3----		----Step 4----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	34.59		-6.22		-15.88		-0.52	
TURN	21.70	0.000	21.70	0.000	21.697	0.000	21.697	0.000
ILUM			3.113	0.000	3.113	0.000	3.1128	0.000
RENO					19.332	0.000	19.332	0.000
PESS							-7.683	0.000
logGHR								
SOMB								
ASOL								
ORIE								
S	16.3488		12.9376		8.57842		5.83296	
R-sq	30.65%		56.64%		80.97%		91.22%	
R-sq(adj)	30.52%		56.49%		80.87%		91.16%	
R-sq(pred)	30.16%		56.19%		80.70%		91.06%	
Mallows' Cp	12903.79		7854.34		3129.28		1140.42	
	----Step 5----		----Step 6----		----Step 7----		----Step 8----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	-384.9		-387.0		-390.5		-388.3	
TURN	21.697	0.000	21.697	0.000	21.697	0.000	21.697	0.000
ILUM	3.1128	0.000	3.1128	0.000	3.1128	0.000	3.1128	0.000
RENO	19.332	0.000	19.332	0.000	19.332	0.000	19.332	0.000
PESS	-7.683	0.000	-7.683	0.000	-7.683	0.000	-7.683	0.000
logGHR	80.14	0.000	80.14	0.000	80.14	0.000	80.14	0.000
SOMB			4.137	0.000	4.137	0.000	4.137	0.000
ASOL					6.993	0.000	6.993	0.000
ORIE							-0.01625	0.000
S	4.26210		3.72379		3.45069		3.37415	
R-sq	95.32%		96.43%		96.94%		97.08%	
R-sq(adj)	95.28%		96.40%		96.90%		97.04%	
R-sq(pred)	95.22%		96.35%		96.86%		96.99%	
Mallows' Cp	345.48		131.03		34.06		9.00	

↳ to enter = 0.15, α to remove = 0.15

Análise de variância

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	214757	97.08%	214757	26844.6	2357.92	0.000
logGHR	1	9073	4.10%	9073	9073.0	796.94	0.000
ILUM	1	57510	26.00%	57510	57510.1	5051.45	0.000
TURN	1	67792	30.65%	67792	67791.7	5954.54	0.000
ASOL	1	1127	0.51%	1127	1126.8	98.97	0.000
ORIE	1	308	0.14%	308	308.1	27.06	0.000
RENO	1	53817	24.33%	53817	53817.0	4727.06	0.000
SOMB	1	2464	1.11%	2464	2464.2	216.45	0.000
PESS	1	22666	10.25%	22666	22665.7	1990.86	0.000
Error	567	6455	2.92%	6455	11.4		
Total	575	221212	100.00%				

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3.37415	97.08%	97.04%	96.99%

Equação de Regressão

Total kWh/ano/m2 = (-388.3 + 80.14 logGHR + 3.1128 ILUM + 21.697 TURN + 6.993 ASOL - 0.01625 ORIE + 19.332 RENO + 4.137 SOMB - 7.683 PESS)

Análise dos parâmetros – Edificação parcialmente condicionada

Candidate terms: logGHR, ILUM, TURN, RENO, SOMB

	-----Step 1-----		-----Step 2-----		-----Step 3-----		-----Step 4-----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	19.39		-21.757		-22.898		-106.41	
ILUM	2.755	0.000	2.7547	0.000	2.7547	0.000	2.7547	0.000
TURN			16.459	0.000	16.459	0.000	16.459	0.000
RENO					2.282	0.000	2.282	0.000
logGHR							17.41	0.000
SOMB								
S		8.52565		2.17639		1.85296		1.63996
R-sq		51.91%		96.87%		97.74%		98.23%
R-sq(adj)		51.83%		96.86%		97.72%		98.22%
R-sq(pred)		51.58%		96.84%		97.70%		98.20%
Mallows' Cp		16818.73		561.30		250.62		74.11
	-----Step 5-----							
	Coef	P						
Constant	-106.95							
ILUM	2.7547	0.000						
TURN	16.459	0.000						
RENO	2.282	0.000						
logGHR	17.41	0.000						
SOMB	1.081	0.000						
S		1.54890						
R-sq		98.42%						
R-sq(adj)		98.41%						
R-sq(pred)		98.39%						
Mallows' Cp		6.00						

Análise de variância

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	5	85394.0	17078.8	7118.83	0.000
logGHR	1	428.3	428.3	178.51	0.000
ILUM	1	45039.4	45039.4	18773.43	0.000
TURN	1	39008.0	39008.0	16259.43	0.000
RENO	1	750.2	750.2	312.68	0.000
SOMB	1	168.2	168.2	70.11	0.000
Error	570	1367.5	2.4		
Lack-of-Fit	42	1256.2	29.9	141.88	0.000
Pure Error	528	111.3	0.2		
Total	575	86761.5			

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.54890	98.42%	98.41%	98.39%

Equação de Regressão

Total kWh/ano/m2 = (-106.95 + 17.41 logGHR + 2.7547 ILUM + 16.459 TURN + 2.282 RENO + 1.081 SOMB)

EQUAÇÕES PARA CIDADES COM GHR MAIORES OU IGUAIS A 54 MIL

CONSUMO_TotalmenteCondicionado [kWh/m²/ano] = -388,3 + 80,14 logGHR + 3,1128 ILUM + 21,697 TURN + 6,993 ASOL – 0,01625 ORIE + 19,332 RENO + 4,137 SOMB – 7,683 PESS

CONSUMO_ParcialmenteCondicionado [kWh/m²/ano] = -106,95 + 17,41 logGHR + 2,7547 ILUM + 16,459 TURN + 2,282 RENO + 1,081 SOMB

Onde:

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

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

TURN – Turno (2- manhã/tarde, 3- manhã/tarde/noite)

ASOL – Absortância da envoltória (0.3 – cores claras, 0.7 – cores escuras)

ORIE – Orientação da fachada principal da edificação (180 – norte/sul, 90 – leste/oeste)

RENO – Renovação de ar (0 – não tem, 1 – tem renovação de acordo com nível 2 da NBR 16401-3)

SOMB – Uso de elementos de sombreamento nas aberturas (0 – com brise, 1 – sem brise)

PESS – Densidade de Alunos em sala de aula (m² por aluno)

7.3. CENÁRIO COM VENTILADORES, INDEPENDENTES DO GHR DA CIDADE

Análise dos parâmetros – Somente Ventilador

Candidate terms: ILUM, TURN

	-----Step 1-----		-----Step 2-----	
	Coef	P	Coef	P
Constant	14.075		-22.111	
ILUM	2.5816	0.000	2.5816	0.000
TURN			14.4745	0.000
S	7.35461		1.28269	
R-sq	55.97%		98.66%	
R-sq(adj)	55.94%		98.66%	
R-sq(pred)	55.86%		98.66%	
Mallows' Cp	48899.30		3.00	

Análise de variância

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	185937	92968	56505.50	0.000
ILUM	1	105484	105484	64112.70	0.000
TURN	1	80452	80452	48898.30	0.000
Error	1533	2522	2		
Lack-of-Fit	1	2522	2522	*	*
Pure Error	1532	0	0		
Total	1535	188459			

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.28269	98.66%	98.66%	98.66%

Equação de Regressão

Total kWh/ano/m2 = (-22.111 + 2.5816 ILUM + 14.4745 TURN)

EQUAÇÃO FINAL PARA CENÁRIO SOMENTE COM VENTILADOR

CONSUMO_Ventilador [kWh/m²/ano] = -22,111 + 2,5816 ILUM + 14,4745 TURN

Onde:

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

TURN – Turno (2- manhã/tarde, 3- manhã/tarde/noite)

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 20 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 98,3%, logo a equação de *benchmark* tem boa representatividade do modelo para a tipologia de **Escola de Ensino Fundamental e Médio**.

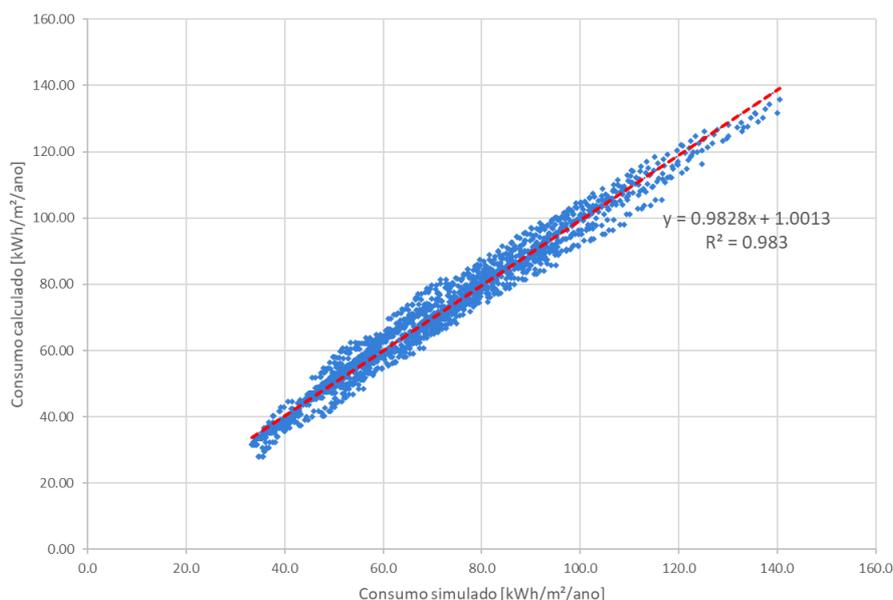


Figura 20 – Comparação entre o EUI simulado e o predito pela equação

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 16.

Tabela 16 – Parâmetros para Escala de Consumo de Energia em função do GHR, para a tipologia de Escola de Ensino Fundamental e Médio

Parâmetro		Parâmetros significativos de acordo com a cidade		
		Tipologia com ar condicionado		Tipologia sem ar condicionado
Cidade		GHR < 54mil	GHR ≥ 54mil	-
Iluminação	W/m ²	x	x	x
Turnos	2- manhã/tarde	x	x	x
	3- manhã/tarde/noite			
Absortância	-	x	x	
Sombreamento	0 - com brise	x	x	
	1 – sem brise			
Pessoas	m ² por aluno	x	x	
Orientação solar	-		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 17 apresenta a definição do cenário utilizado para determinar os consumos mínimos e máximos para esta tipologia.

Tabela 17 – Cenários para o cálculo de consumo mínimo e máximo para tipologia de Escola de Ensino Fundamental e Médio

	Parâmetros	Limite Mínimo	Limite Máximo
Cidade	GHR	Parâmetro fixo	
	GDA		
Iluminação	W/m ²	9,9	16,32
Turnos	2- manhã/tarde	Parâmetro fixo	
	3- manhã/tarde/noite		
Absortância	-	0,3	0,7
Sombreamento	0 - com brise	0	1
	1 – sem brise		
Pessoas	m ² por aluno	Parâmetro fixo	
Orientação solar		Parâmetro fixo	
Renovação de ar	0 – não tem	Parâmetro fixo	
	1 – tem renovação de ar		
AVAC	-	Parâmetro fixo	

Portanto, a partir da entrada de dados da edificação em análise no cenário 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 uma Escola de Ensino Fundamental e Médio localizada na cidade de Florianópolis, com GHR = 28602, GDA =148,3, totalmente condicionada, DPI de 2,3 W/m², funcionando nos turnos manhã e tarde, absortância das paredes de 0,5, com brise nas janelas e uma ocupação de 1,5 m² por aluno. **O consumo de energia operacional calculado é 27,65 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 18.

Tabela 18 – Exemplo de Escala de Eficiência – Escola de Ensino Fundamental e Médio em Florianópolis

Parâmetros		Mínimo	Máximo
ILUMINAÇÃO	DPI (W/m ²)	9,9	16,32
ABSORTÂNCIA	-	0,3	0,7
SOMBREAMENTO	-	0	1
FLORIANÓPOLIS	GHR=28602 GDA=148,3		
PESSOAS	1,5 m ² por pessoa	Consumo geral: 45,1	Consumo geral: 65,9
TURNOS	2 - manhã/tarde	[kWh/m²/ano]	[kWh/m²/ano]
RENOVAÇÃO DE AR	0 – não tem		

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

$$i = \frac{(65,9) - (45,1)}{5} = 4,2$$



Considera-se nesse exemplo, portanto, que a edificação analisada apresenta consumo operacional inferior ao consumo mínimo da faixa típica (**27,65 < 49,2 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 **Escola de Ensino Fundamental e Médio**.

Os parâmetros com maior impacto no consumo de energia desta tipologia foram: graus hora de resfriamento (GHR); graus-dia de aquecimento (GDA); iluminação (ILUM); turnos oferecidos pela instituição (TURN); ocupação de alunos (PESS); absorvância solar (ASOL); orientação da fachada principal (ORIE); sombreamento através de brise nas janelas (SOMB); e a renovação de ar (RENO). O AVAC também é um parâmetro com grande impacto no consumo de energia, por esta razão as equações foram divididas em três categorias: edificação com todos os ambientes condicionados, edificação parcialmente condicionada (salas administrativas, bibliotecas e salas de usos múltiplos) e edificações sem sistema de condicionamento de ar.

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 também 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, têm 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 consumo para resfriamento.

Quanto aos turnos oferecidos pela instituição, além das diferenças climáticas entre os períodos da manhã, da tarde e da noite, há também o tempo total de funcionamento da edificação impacta no consumo final de energia. A carga térmica das pessoas, a depender a densidade de ocupação da sala, também tem impacto significativo no consumo de energia dos sistemas de condicionamento ambiental.

De acordo com as simulações realizadas, uma edificação com suas maiores fachadas orientadas na direção norte-sul possui menor consumo de energia quando comparado àquelas orientadas na direção leste-oeste. O sombreamento através de brises promove uma proteção nas aberturas envidraçadas ao bloquear a incidência direta da radiação solar no interior da edificação, o que também reduz a carga térmica a ser resolvida pelos sistemas de condicionamento de ar. A absorvância solar das fachadas externas também possui impacto significativo ao reter maior ou menor quantidade de calor da radiação solar que será transmitido ao interior da edificação.

A quantidade de sistemas de condicionamento de ar também impacta no consumo final da edificação. Quanto maior o número de ambientes condicionados, maior o consumo de energia assim como o conforto térmico de seus ocupantes. Já a utilização de ventiladores de parede possui um consumo de energia muito menor, porém sem necessariamente manter o conforto térmico das pessoas que permanecem nas salas. A existência ou não de um sistema de renovação de ar interno tem um impacto significativo uma vez que tal renovação representa uma alteração na carga térmica a ser resolvida pelo sistema AVAC.

Com a previsão do consumo de energia em relação ao consumo simulado, verificou-se que as equações têm um R² de acima de 98%, logo os modelos regressivos empregados foram representativos para prever o consumo de energia para a tipologia de **Escola de Ensino Fundamental e Médio**.

A Tabela 19 resume os parâmetros estudados e identifica os considerados significativos para o desenvolvimento das equações de *benchmark* para esta tipologia.

Tabela 19 - Parâmetros analisados e sua relevância para a equação de benchmark da tipologia de Escola de Ensino Fundamental e Médio

Parâmetros analisados	Parâmetros na equação para GHR < 54 mil	Parâmetros na equação para GHR > 54 mil	Parâmetros na equação para cenários sem AC
Clima GHR	✓	✓	
Clima GDA	✓		
AVAC	✓	✓	
Iluminação	✓	✓	✓
Turno	✓	✓	✓
Densidade de pessoas	✓	✓	
Absortância Solar	✓	✓	
Sombreamento	✓	✓	
Orientação Solar da edificação		✓	
Renovação de ar interno		✓	

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.