



CBCS

Conselho Brasileiro de Construção Sustentável

RT2B.10: Desenvolvimento de arquétipo, modelo de simulação, análise de sensibilidade e equações de *benchmark* para a tipologia de Escola de Ensino Infantil

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

Clarice Degani

Ana Paula Melo

Daniel Amaral

Anderson Letti

Eduardo Kanashiro

Arthur Cursino

Roberto Lamberts

Camila Suizu

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 Infantil.

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. Turno e ocupação dos ambientes	9
4.4. Veneziana e orientação solar	10
4.5. Envoltória e absortância solar.....	10
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.....	16
6.1.1. Cenário com SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR	16
6.2. Cidades com GHR acima de 54 mil.....	19
6.2.1. Cenário com SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR	19
6.3. Todas as Cidades.....	22
6.3.1. Cenário com ventilador	22
6.4. ANÁLISE DO IMPACTO DOS PARÂMETROS SIGNIFICATIVOS.....	23
7. EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	27
7.1. Cidades com GHR abaixo de 54 mil.....	27
7.1.1. Análise dos PARÂMETROS - Cenário com CONDICIONAMENTO DE AR.....	27
7.2. Cidades com GHR acima de 54 mil.....	29
7.2.1. Análise dos parâmetros - Cenário com SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR	29
7.3. Todas as Cidades.....	31
7.3.1. Análise dos parâmetros - Cenário com ventilador	31
7.4. Avaliação entre o consumo simulado e o consumo calculado	32
8. ESCALAS DE CONSUMO DE ENERGIA	33
8.1. Método para cálculo das escalas	33
8.2. Exemplo de aplicação	34
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	35

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.

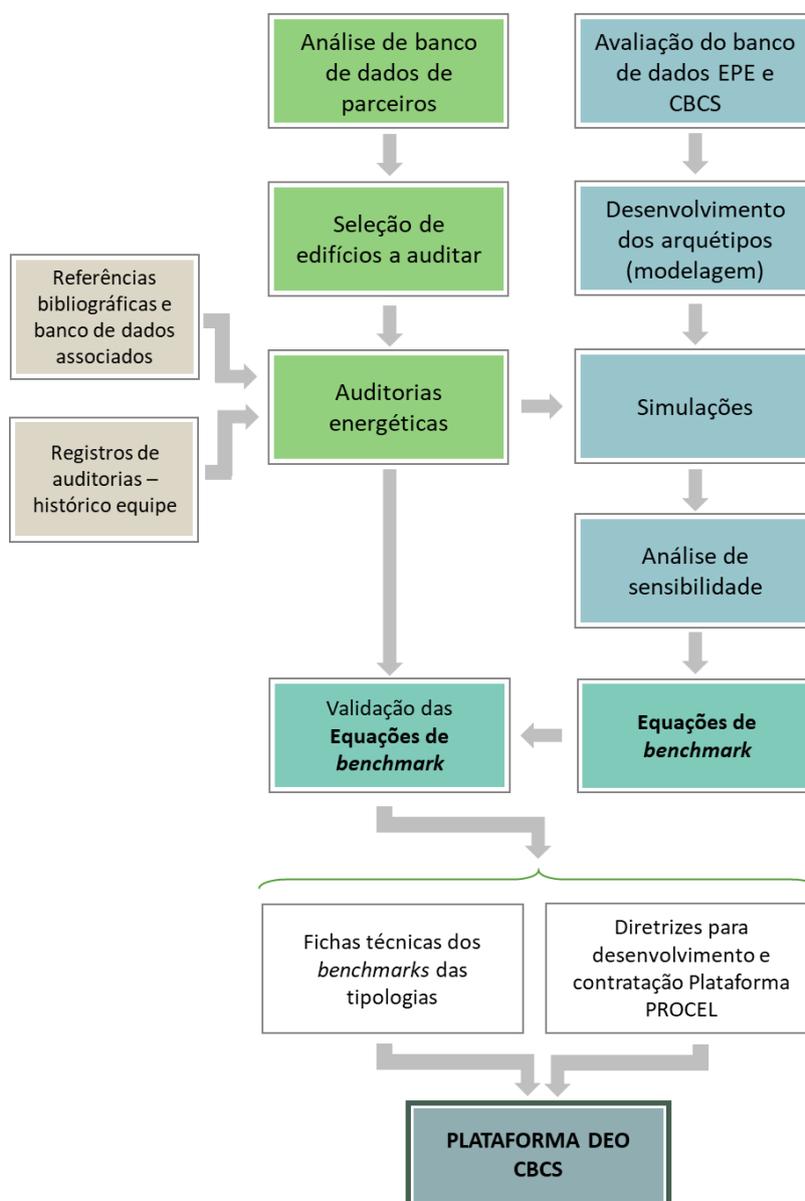


Figura 1 - Método aplicado pelo CBCS para o desenvolvimento dos benchmarks no âmbito deste convênio

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 Infantil**.

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

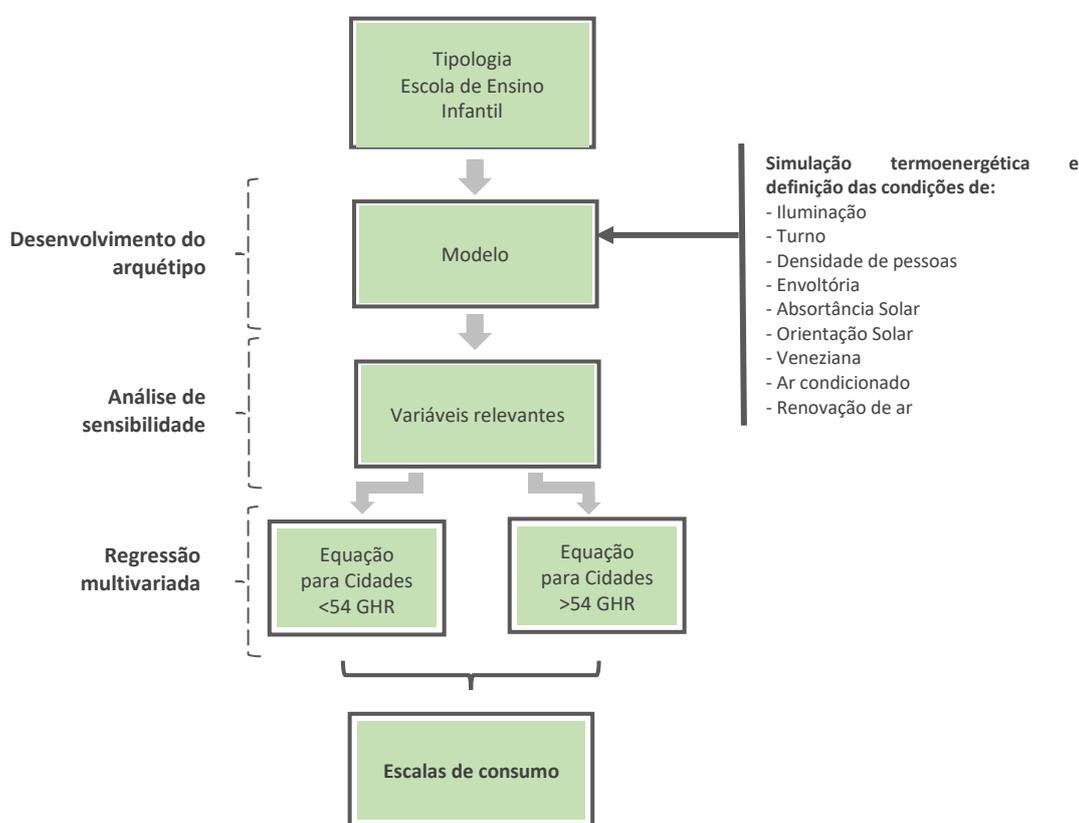


Figura 2 – Fluxograma de desenvolvimento das equações de benchmark e escalas de consumo para a tipologia de Escola de Ensino Infantil

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 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 **Escola de Ensino Infantil** constitui-se tipicamente por edifícios de um ou dois andares cuja função principal seja educacional e assistencial de crianças entre zero e seis anos de idade. A área bruta da edificação deve incluir todo o espaço dentro do edifício, incluindo salas de aula, salas administrativas, cozinha, banheiros, corredores e escadas.

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

- A avaliação engloba edifícios isolados, ou seja, expostos à radiação solar em todas as suas faces.
- Para contemplar a tipologia no âmbito do presente convênio foi definido um arquétipo que representa as áreas didáticas típicas da maioria das edificações, que são basicamente as salas de aula.
- Há também as salas dos professores e as secretarias, além das áreas comuns como a cozinha, as de circulação e as 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
Sala Aula	7	234,67	50,54%
Sala dos Professores	1	16,81	3,62%
Secretaria	1	12,30	2,65%
Cozinha	1	35,38	7,62%
Corredor	2	93,91	20,22%
Escada	2	17,16	3,70%
Instalação Sanitária	4	54,12	11,65%
TOTAL	18	464,35	100%

O modelo possui um pavimento térreo de dimensões 19,85 m x 15,30 m x 3,00 m (L x C x A) e um meio pavimento superior com dimensões 10,50 m x 15,30 m x 3,00 m (L x C x A), totalizando 464,35m². A Figura 3 representa a volumetria, a planta com as divisões internas da edificação e a configuração dos ambientes considerados e a Figura 4 as perspectivas do modelo.

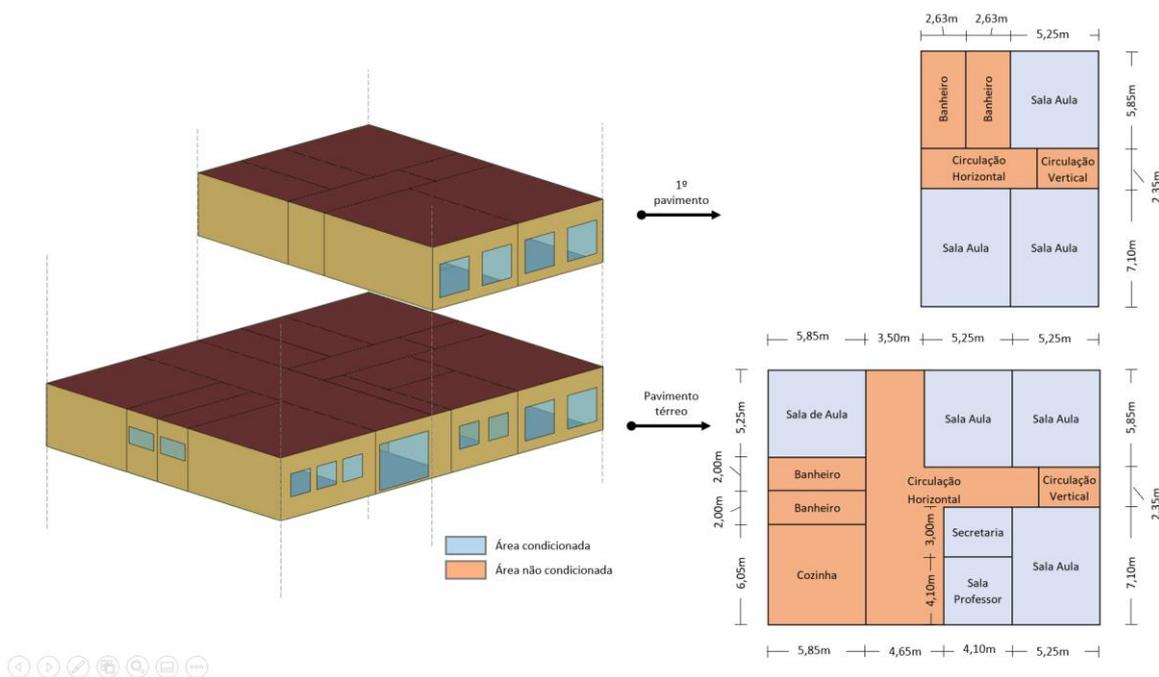


Figura 3 – Volumetria e configuração da planta do arquétipo

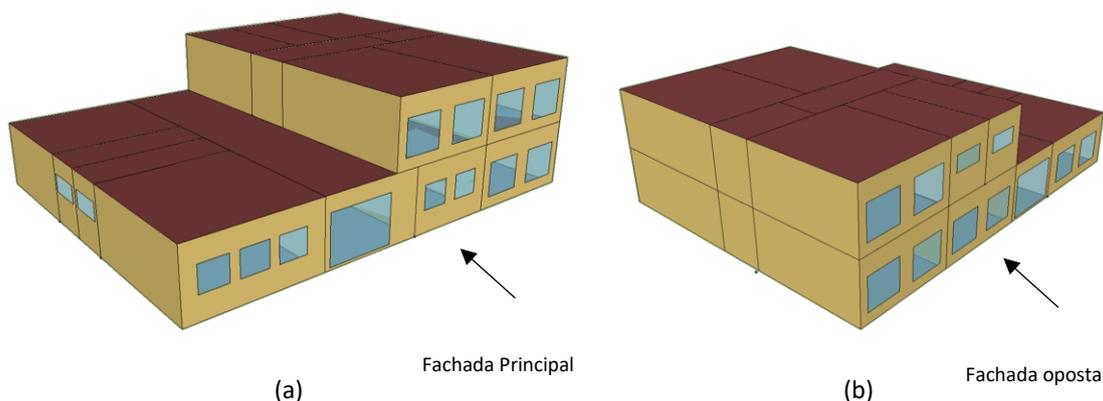


Figura 4 – Perspectiva da volumetria da edificação (a) frente e lateral esquerda; (b) fundos e lateral direita

4.2. ILUMINAÇÃO

No levantamento dos dados do projeto META foi identificado uma predominância significativa de sistemas de iluminação à base de lâmpadas fluorescentes, em 91% das situações levantadas. Entretanto, com a evolução e disponibilização de diferentes tipos de lâmpadas de LED considerou-se que este seria um cenário mais eficiente. Portanto, foram definidos dois cenários: um cenário mais eficiente (ILUM02) representando as lâmpadas tipo LED com densidade de potência de iluminação (DPI) de 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 atividade exercida em cada zona.

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 e tarde.

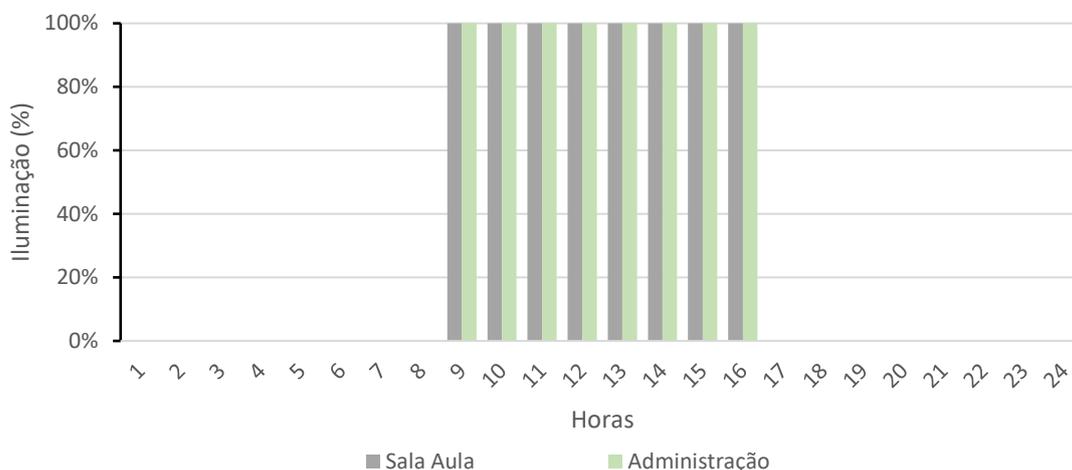


Figura 5 – Cronograma adotado para Iluminação – para TURN01 – manhã e tarde

A Figura 6 ilustra o cronograma de operação da iluminação, considerando o ambiente e o turno da manhã.

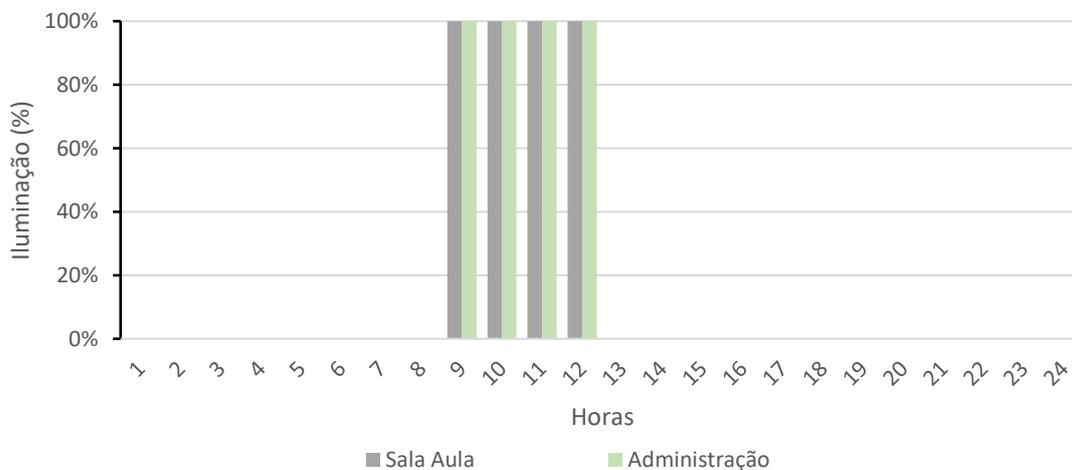


Figura 6 – Cronograma adotado para Iluminação para TURN02 – manhã

4.3. TURNO E OCUPAÇÃO DOS AMBIENTES

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. O TURN01 contempla o ensino no período integral com início das atividades às 8h00 e término às 16h00. No TURN02 só há aulas no período da manhã, mantendo o início das atividades às 8h00 porém com término às 12h00.

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 das creches também variam, portanto, considerou-se este dado como um possível cenário a ser variado, onde nas salas de aula há uma ocupação variada de crianças com 1m² por criança (PESS01), 2m² por criança (PESS02) e 4m² por criança (PESS03). Em todos os casos foram considerados também mais dois profissionais adultos por sala.

Não foram considerados equipamentos de tomada nas salas de aula. Há no entanto, a utilização de chuveiros elétricos para dar banho nas crianças e foi considerado que elas tomam banho apenas em casos de grande necessidade e banhos de cinco minutos por dia a cada dez crianças.

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

- na secretaria há duas pessoas, dois computadores e uma impressora;
- na sala dos professores há apenas uma pessoa, um computador e uma impressora; e
- na cozinha há uma geladeira e um freezer de funcionamento ininterrupto e um forno elétrico que é utilizado em média por 30 minutos diários.

Considerando as ocupações máximas definidas anteriormente, as Figura 7 e Figura 8 apresentam os perfis de ocupação de acordo com cada ambiente e turno avaliado.



Figura 7 - Cronograma adotado para ocupação para TURN01 – manhã e tarde

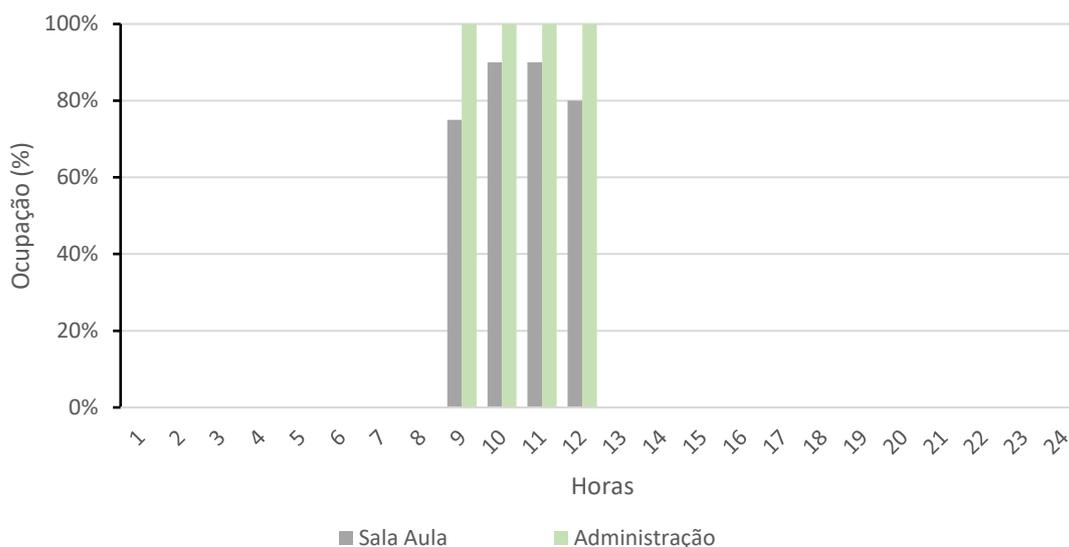


Figura 8 – Cronograma adotado para ocupação para TURN02 – manhã

4.4. VENEZIANA E ORIENTAÇÃO SOLAR

Neste tipo de edificação, é comum utilizar janelas com folhas tipo veneziana (VENE02) para reduzir o ganho de carga térmica no interior dos ambientes. Neste cenário, durante a ocupação da sala, 50% da área da janela permite a passagem da luz solar enquanto os outros 50% ficam bloqueados pelas folhas da janela. Nos horários não ocupados, a passagem de luz solar fica totalmente bloqueada pela veneziana visando minimizar o acúmulo de carga térmica neste período. Um outro cenário (VENE01) prevê uma janela simples, sem este tipo de bloqueio, com 100% da área da janela exposta à radiação solar direta e seu ganho de carga térmica.

Os impactos na carga térmica interna podem ser diferentes a depender da orientação da incidência solar na edificação. Assim, o arquétipo foi simulado variando a orientação de sua fachada de entrada nas quatro orientações principais: Sul (ORIE01), Oeste (ORIE02), Norte (ORIE03) e Leste (ORIE04).

4.5. ENVOLTÓRIA E ABSORTÂNCIA SOLAR

Para definir os cenários que representam a eficiência da envoltória da edificação, foi adotado um cenário menos eficiente (ENVO01), considerando transmitância térmica da parede igual a 3,85 W/m².K e da cobertura igual a 2,09 W/m².K e, um outro cenário, mais eficiente (ENVO02), onde os materiais utilizados na construção da edificação são mais isolantes, minimizando as oscilações de temperatura interior em função das condições climáticas externas que muitas vezes são indesejadas nos ambientes internos, tendo neste caso transmitância térmica das paredes igual a 2,55 W/m².K e da cobertura de 1,01 W/m².K.

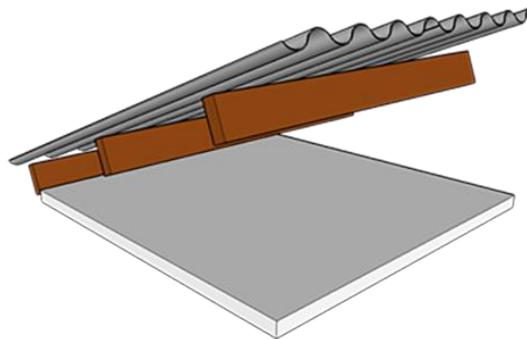
Quanto à retenção de calor proveniente da radiação solar incidente foram simulados dois cenários: o primeiro onde o valor da absorvância à radiação solar das paredes e coberturas são iguais a 0,7 (ASOL01), equivalente ao concreto aparente mais escuro e o segundo, equivalente à uma pintura na cor branca,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

A Figura 9 apresenta os elementos construtivos de referência para paredes e coberturas.



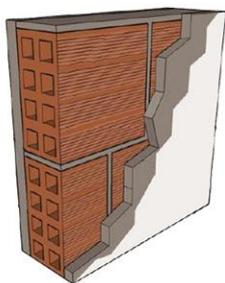
(a)

Transmitância térmica: 3,85 W/m²K
Capacidade térmica: 358 kJ/m²K
Atraso térmico: 4,0 h



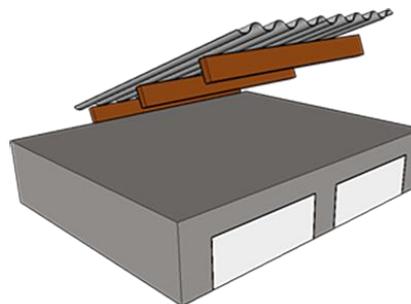
(b)

Transmitância térmica: 2,09 W/m²K
Capacidade térmica: 36 kJ/m²K
Atraso térmico: 1,6 h



(c)

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



(d)

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

Figura 9 - Elementos construtivos de referência para: Cenário ENVO01 (a) Paredes e (b) Cobertura e Cenário ENVO02 (c) Paredes e (d) 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 *EnergyPlys*, 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, tipos de iluminação, ocupação, turnos, 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.

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

Tabela 3 – Cenário considerado para cálculo de carga térmica.

Variável	Cenário
Iluminação	ILUM01
Turno	TURN01
Densidade de pessoas	PESS01
Absortância Solar	ASOL01
Envoltória	ENVO01
Orientação Solar	ORIE02
Veneziana	VENE01
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 ($P \text{ [kW]} = \text{vazão [l/s]} \times 0,0017$), e para vazão variável ($P \text{ [kW]} = \text{vazão [l/s]} \times 0,0024$), conforme recomendação da ASHRAE 90.1-2010 (ASHRAE, 2011).

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 Biolimática	Carga Térmica (TR)
Campos do Jordão	SP	1	20,4
São Paulo	SP	3	28,3
Porto Alegre*	RS	3	34,9
Campinas	SP	3	29,5
Rio de Janeiro (Vila Militar)	RJ	8	34,0
Vitória	ES	8	33,2
Recife	PE	8	34,4
Fortaleza	CE	8	29,7

* Cidade selecionada

Percebe-se que, dentre as cidades selecionadas como representativas, a cidade com maior carga térmica foi Porto Alegre, com 34,9TR. Dessa forma, o arquivo climático de Porto Alegre 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 3,43W/W em todos os espaços de permanência prolongada. No entanto, raramente tais edificações possuem um sistema de ar condicionado para todos os ambientes de permanência prolongada ou sequer têm este tipo de equipamento. Para este caso, foram simulados cenários onde as salas de aula e as salas administrativas são equipadas apenas com ventiladores de parede que operam durante a ocupação das salas.

A renovação de ar em ambientes condicionados artificialmente é obrigatória por lei e definida em norma técnica. Na prática, entretanto 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 (6,3L/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, 6240 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

Variável	Cenário	Dado utilizado
Iluminação	ILUM01	Iluminação com DPI PBE classe D (16,32W/m ²)
	ILUM02	Iluminação com DPI PBE classe A (9,9W/m ²)
Turno	TURN01	Aulas nos períodos manhã e tarde
	TURN02	Aulas somente no período da manhã
Densidade de pessoas	PESS01	Alta densidade de crianças (1m ² por criança)
	PESS02	Média densidade de crianças (2m ² por criança)
	PESS03	Baixa densidade de crianças (4m ² por criança)
Absortância Solar	ASOL01	Absortância solar $\alpha = 0,7$
	ASOL02	Absortância solar $\alpha = 0,3$
Envoltória	ENVO01	$U_{parede} = 3,85 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$; $U_{cobertura} = 2,09 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
	ENVO02	$U_{parede} = 2,55 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$; $U_{cobertura} = 1,01 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
Orientação solar	ORIE01	Fachada principal orientada a Sul
	ORIE02	Fachada principal orientada a Oeste
	ORIE03	Fachada principal orientada a Norte
	ORIE04	Fachada principal orientada a Leste
Veneziana	VENE01	Janela simples sem barreiras opacas
	VENE02	Janela tipo veneziana
AVAC	Split_Total	Sistema Split nas salas de aula e salas administrativas (EER = 3,43W/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 renovação

Notas:

U = Transmitância térmica.

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).

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*).

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	

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.

Também para a análise, o consumo de energia foi dividido em dois conjuntos de acordo com o tipo de zona: 1- salas de aula e salas administrativas e 2- demais áreas (cozinha, corredores e banheiros). Cabe ressaltar que para esta análise e desenvolvimento da equação de regressão o consumo energético dos chuveiros elétricos, por estar diretamente relacionado à quantidade de crianças nas salas de aula, foram incorporados no consumo energético das salas de aula.

Os cenários para as análises dos impactos dos parâmetros no consumo de energia também foram divididos em duas categorias: 1 – com salas de aula e salas administrativas com equipamentos de condicionamento de ar e 2 – salas de aula e salas administrativas equipadas com ventiladores axiais de parede. As demais áreas em ambas as categorias não possuem qualquer sistema de ventilação forçada.

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), veneziana (VENE), orientação solar (ORIE), envoltória (ENVO), absorvância solar (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 ar condicionado para manter as condições locais de conforto.

6.1. ANÁLISE EM CIDADES COM GHR ABAIXO DE 54 MIL

6.1.1. CENÁRIO COM SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR

Para analisar este cenário foi necessário dividir os ambientes em dois conjuntos diferenciados pela utilização, ou não, de aparelhos de condicionamento de ar durante o período em que estão ocupados.

SALAS DE AULA E SALAS ADMINISTRATIVAS COM SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR

Por meio das Figura 10 e Figura 11, verifica-se que os parâmetros com variações mais significativas são o GHR, GDA, ILUM, PESS e TURN. As variações dos parâmetros ENVO, ASOL, VENE, ORIE e RENO tiveram um impacto pequeno no cálculo do consumo de energia e, portanto, serão retiradas das análises da equação de regressão.

Main Effects Plot for Sala+Adm_Total kWh/m²/ano Data Means

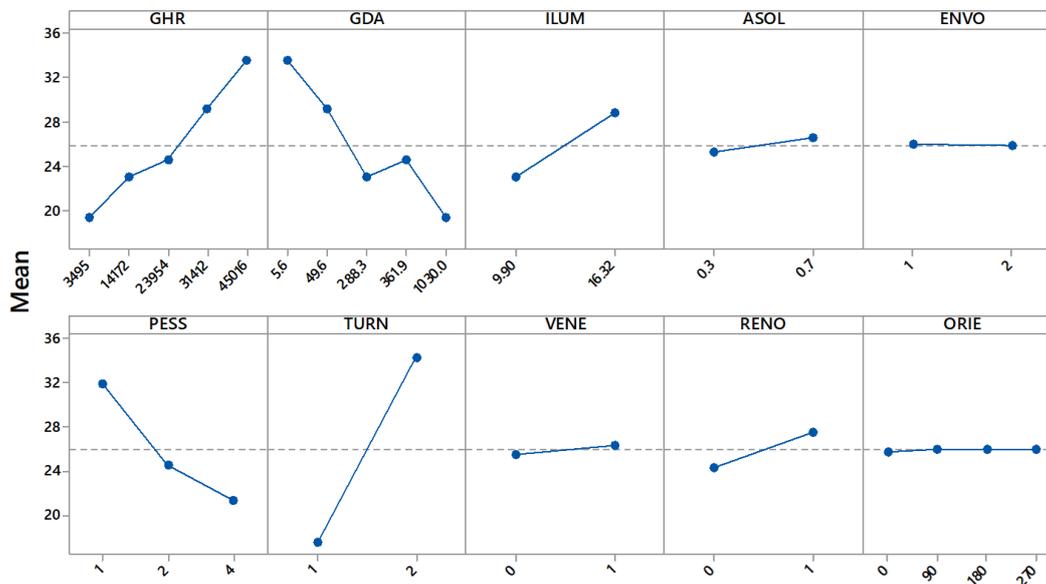


Figura 10 - Efeito dos parâmetros no consumo de energia

Interaction Plot for Sala+Adm_Total kWh/m²/ano Data Means

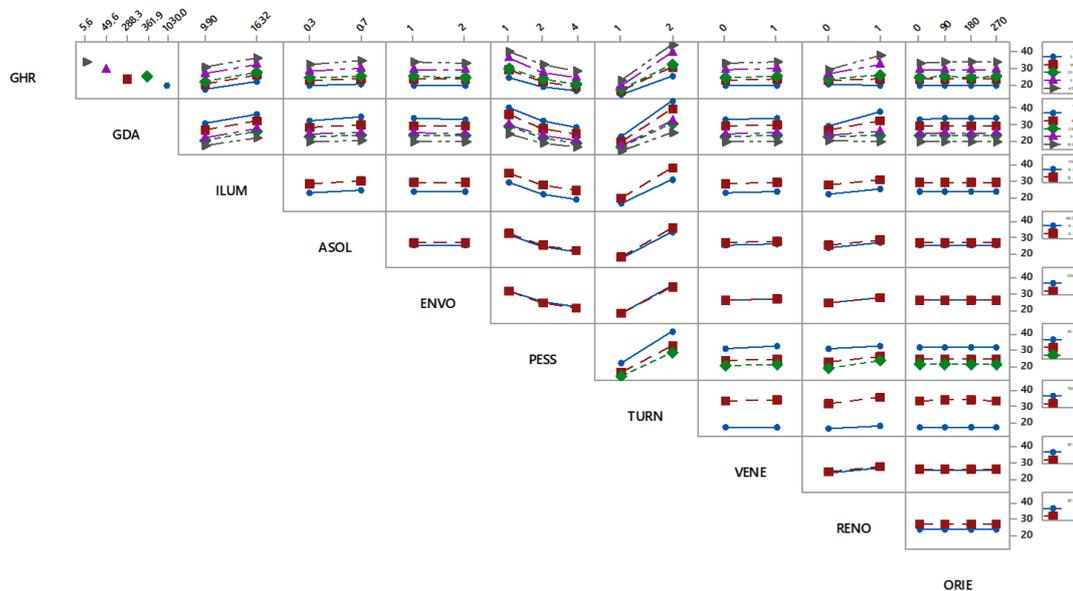


Figura 11 - Interação entre os parâmetros

ÁREAS NÃO CONDICIONADAS

Apesar de ser o cenário com sistema de condicionamento de ar, nem todos os ambientes possuem este aparelho. São os casos da cozinha, corredores e banheiro. Por meio das Figura 12 e Figura 13, verificamos que, nestas áreas, os parâmetros com variações mais significativas são a ILUM e o TURN. A variação dos parâmetros GHR, GDA, PESS, ENVO, ASOL, VENE, ORIE e RENO não tiveram impacto no cálculo do consumo de energia. Sendo assim, essas são retiradas das análises da equação de regressão das áreas não condicionadas para cidades com GHR menores que 54 mil, para as áreas não condicionadas da edificação com sistema de condicionamento de ar.

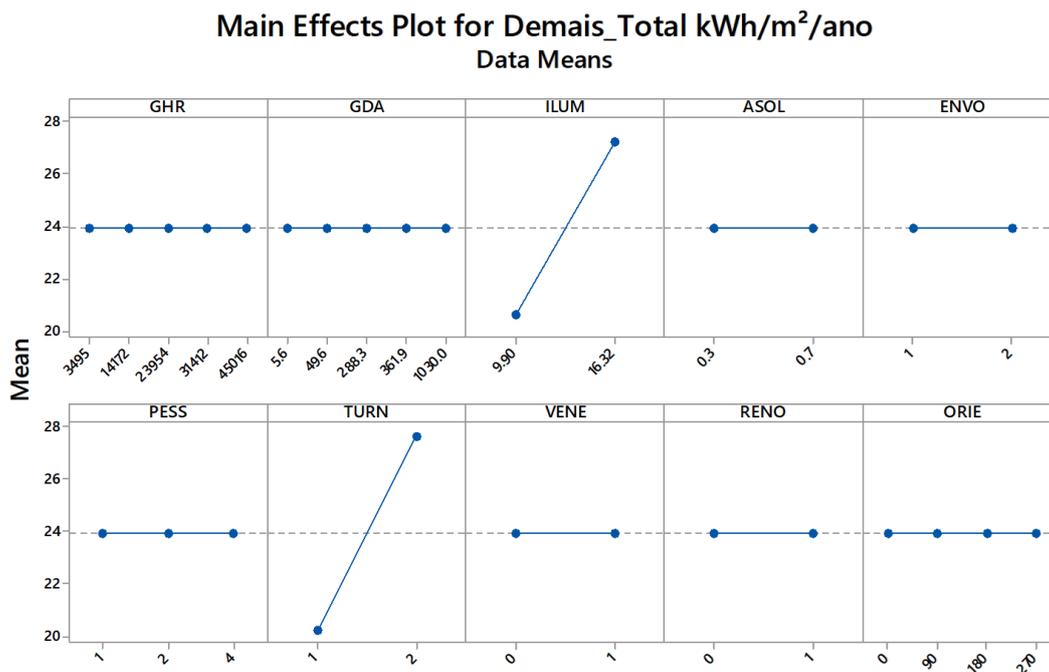


Figura 12 - Efeito dos parâmetros no consumo de energia

Interaction Plot for Demais_Total kWh/m²/ano
Data Means

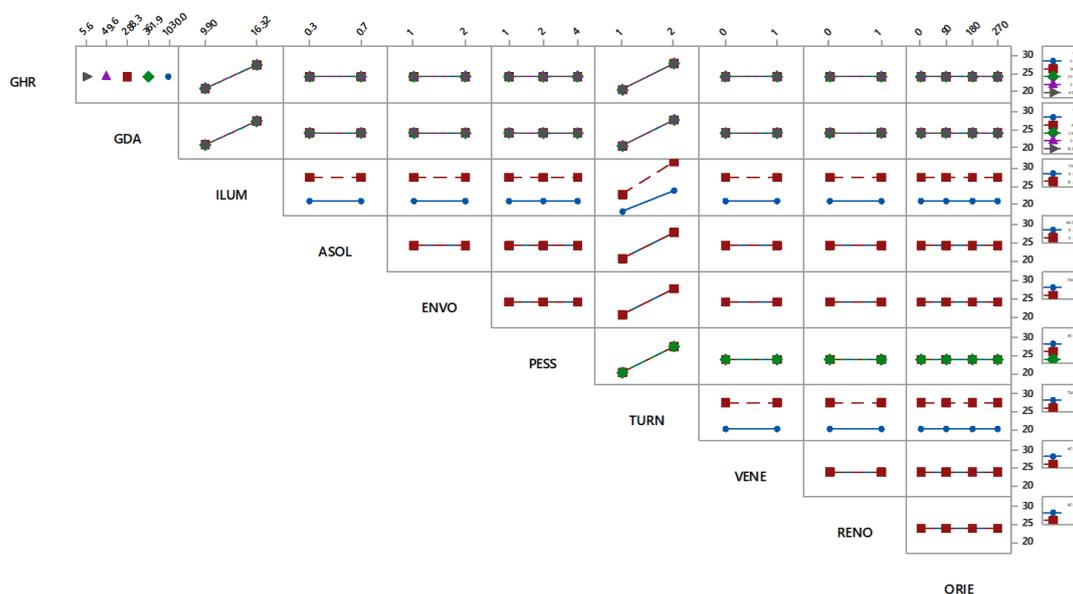


Figura 13 - Interação entre os parâmetros

6.2. CIDADES COM GHR ACIMA DE 54 MIL

6.2.1. CENÁRIO COM SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR

Seguindo a mesma divisão feita para as cidades com GHR abaixo de 54mil, para analisar este cenário os ambientes também foram divididos em dois conjuntos diferenciados pela utilização, ou não, de aparelhos de condicionamento de ar durante o período em que estão ocupados.

SALAS DE AULA E SALAS ADMINISTRATIVAS COM SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR

Por meio das

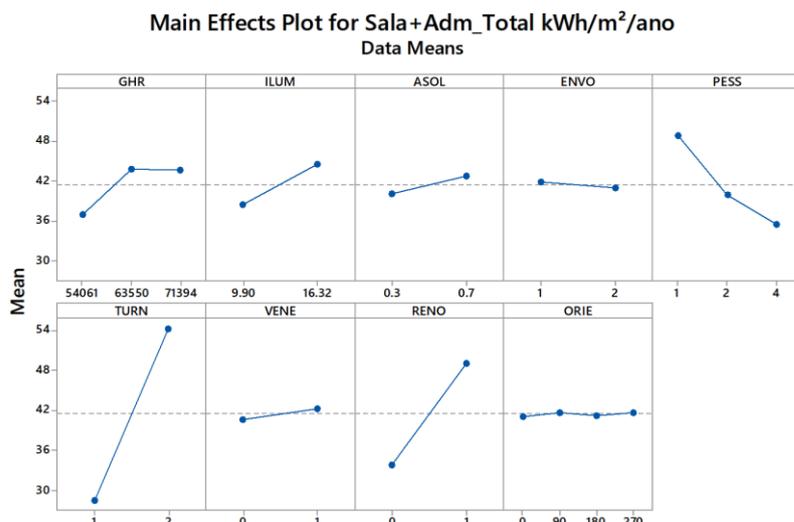


Figura 14 e Figura 15, verifica-se que os parâmetros com variações mais significativas são o GHR, ILUM, PESS, TURN e RENO. As variações dos parâmetros ENVO, ASOL, VENE e ORIE tiveram um impacto pequeno no cálculo do consumo de energia e, portanto, serão retiradas das análises da equação de regressão.

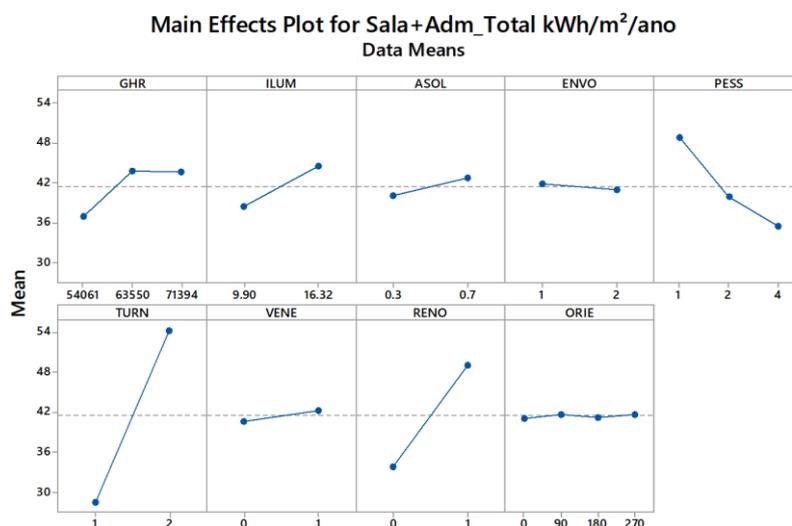


Figura 14 - Efeito dos parâmetros no consumo de energia

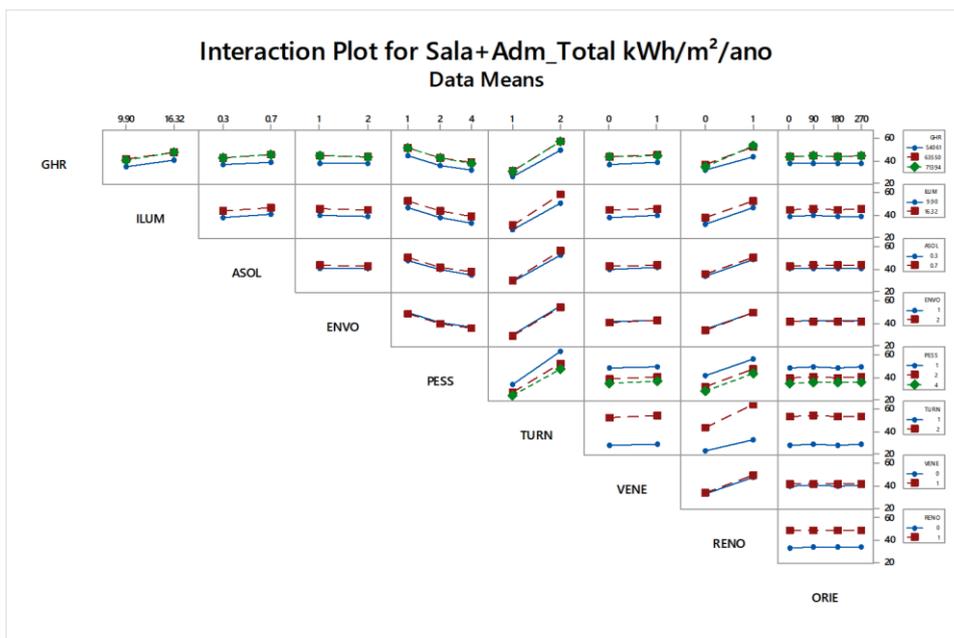


Figura 15 - Interação entre os parâmetros

ÁREAS NÃO CONDICIONADAS

Por meio das

Figura 16 e Figura 17 verificamos que, assim como no grupo de cidades com GHR menores que 54mil, os parâmetros com variações mais significativas são o ILUM e TURN. As variações dos parâmetros GHR, PESS, ENVO, ASOL, VENE, ORIE e RENO não tiveram impacto no cálculo do consumo de energia nesta seção. Sendo assim, estas serão retiradas das análises da equação de regressão das áreas não condicionadas para cidades com GHR maiores que 54 mil.

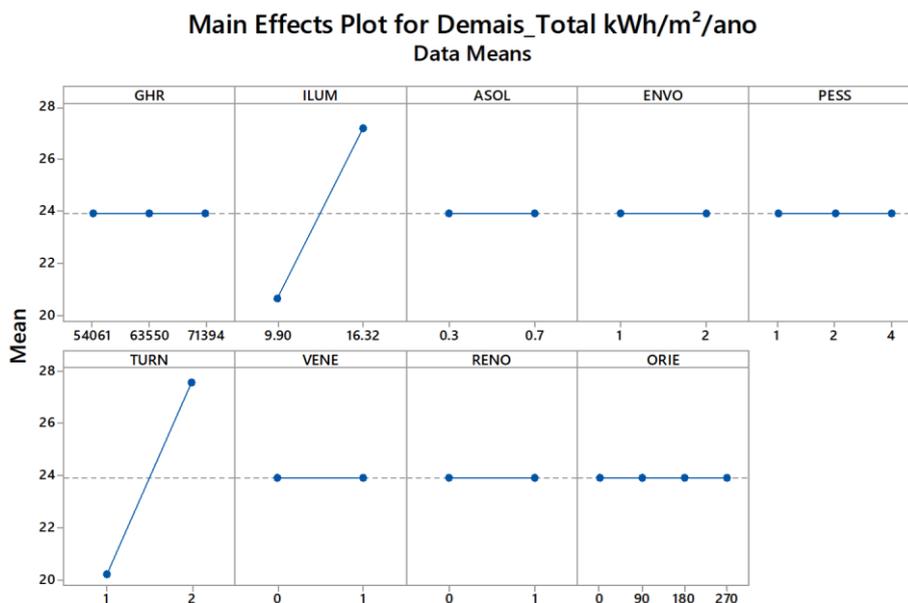


Figura 16 - Efeito dos parâmetros no consumo de energia

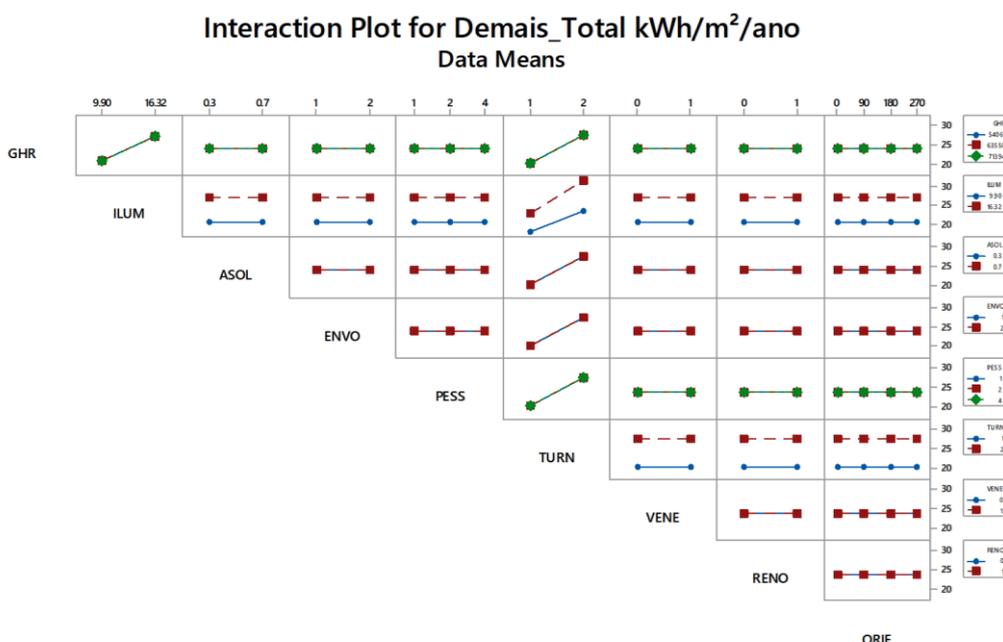


Figura 17 - Interação entre os parâmetros

6.3. TODAS AS CIDADES

6.3.1. CENÁRIO COM VENTILADOR

Neste cenário, os ambientes administrativos e de sala de aula são equipados com ventiladores de parede na busca de um conforto térmico durante sua ocupação. Já os demais ambientes (cozinha, corredores e banheiros) continuam sem equipamentos instalados para esta finalidade. Nesta situação a divisão entre ambientes com ventilação forçada e os ambientes sem ventilação não foi necessária para a análise dos parâmetros relevantes para o consumo de energia.

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

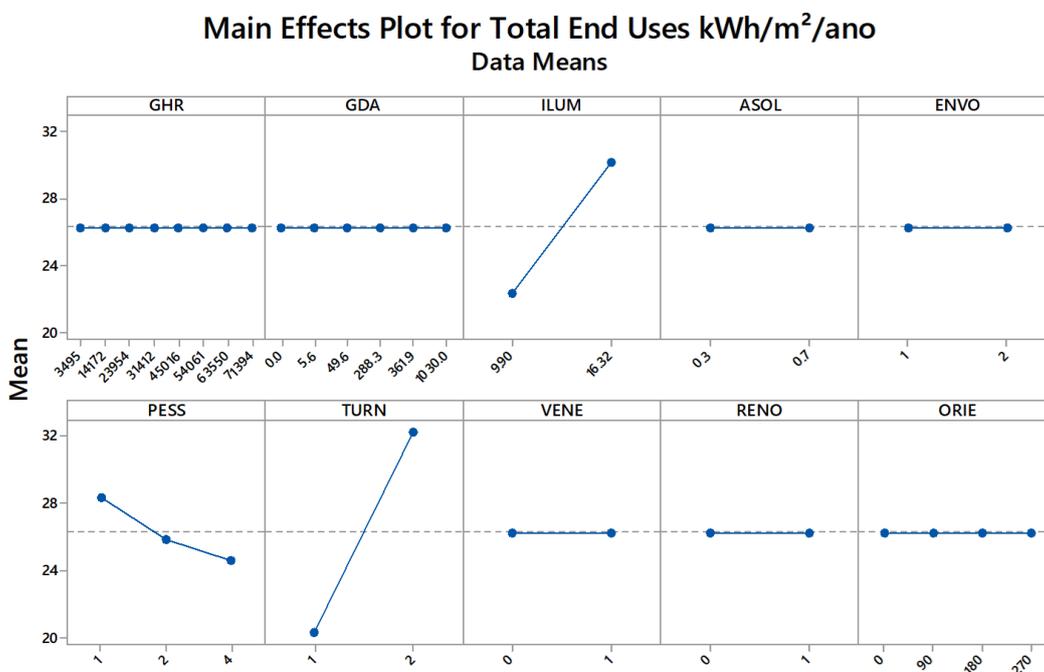


Figura 18 - Efeito dos parâmetros no consumo de energia

Interaction Plot for Total End Uses kWh/m²/ano Data Means

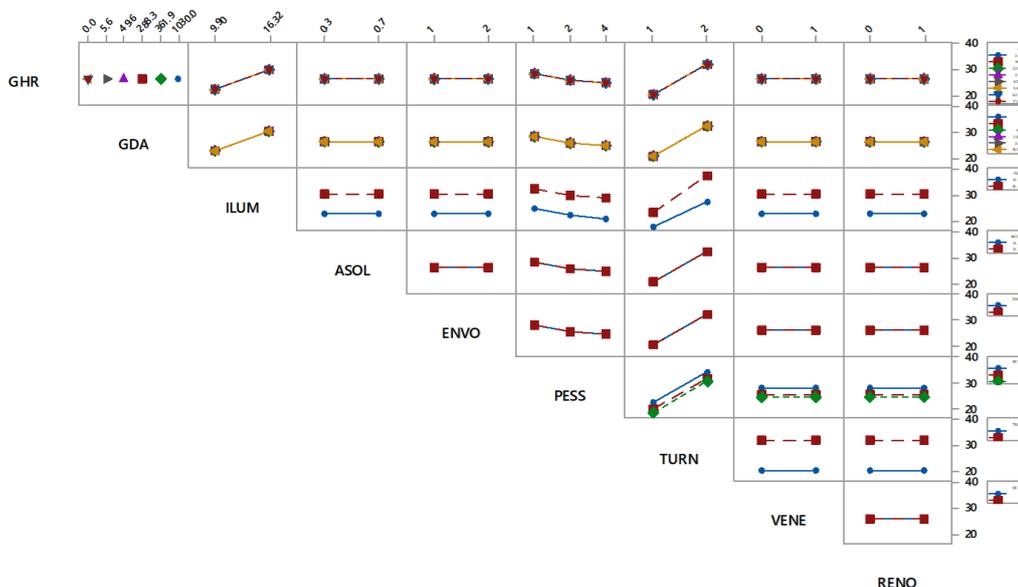


Figura 19 - Interação entre os parâmetros

6.4. ANÁLISE DO IMPACTO DOS PARÂMETROS SIGNIFICATIVOS

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

O sistema de iluminação, além do consumo próprio de energia elétrica, também aumenta a carga térmica dentro da edificação, o que influencia no consumo de energia do sistema de condicionamento de ar. A

Tabela 7 ilustra o impacto no consumo de energia do sistema de ar condicionado ao substituir o sistema de iluminação no padrão PBE classe D (16,32W/m²) para um PBE classe A (9,9W/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 utilizado para balizar a eficiência energética do usuário final na equação de *benchmark*.

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, também, deverá ser incluída como parâmetro de entrada para o cálculo da equação de *benchmark*. A Tabela 8 mostra a diferença no consumo de energia pelos sistemas de ar condicionado de acordo com a quantidade de turnos oferecidos.

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

Modelo base	AVAC:	Split individual (EER=3,43/W)	
	Iluminação:	Parâmetro analisado	
	Turno:	manhã e tarde	
	Densidade de pessoas:	1 m ² por criança (sala de aula)	
	Envoltória:	Upar: 2,55 / Ucob: 1,01 W/m ² K	
	Absortância Solar:	α: 0,3	
	Veneziana:	Somente vidro	
	Orientação Solar:	Fachada principal orientada a norte	
	Renovação de ar:	ABNT 16401 - nível 2	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Varição no consumo de AVAC
	Parâmetro analisado: Iluminação		
	PBE classe D	PBE classe A	
Campos do Jordão	7,9	7,1	-9,8%
São Paulo	17,4	16,2	-7,1%
Porto Alegre	19,9	18,7	-5,7%
Campinas	32,9	31,2	-5,1%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	39,4	37,6	-4,5%
Vitória	45,9	44,2	-3,8%
Recife	56,5	54,8	-3,2%
Fortaleza	58,3	56,5	-3,1%

Tabela 8 - Impacto dos turnos no consumo do sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC:	Split individual (EER=3.43 W/W)	
	Iluminação:	PBE classe D (16,32W/m ² , ref. Sala de aula)	
	Turno:	Parâmetro analisado	
	Densidade de pessoas:	1 m ² por criança (sala de aula)	
	Envoltória:	Upar: 3,85 / Ucob: 2,09 W/m ² K	
	Absortância Solar:	α: 0,7	
	Veneziana:	Somente vidro	
	Orientação Solar:	Fachada principal orientada a norte	
	Renovação de ar:	ABNT 16401 - nível 2	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Varição no consumo de AVAC
	Parâmetro analisado: Turno		
	manhã e tarde	manhã	
Campos do Jordão	9,5	4,0	-57,4%
São Paulo	19,2	7,7	-59,8%
Porto Alegre	21,8	9,2	-57,9%
Campinas	35,3	14,0	-60,4%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	42,3	19,8	-53,2%
Vitória	49,6	23,9	-51,8%
Recife	62,5	31,2	-50,1%
Fortaleza	62,6	31,5	-49,7%

A densidade de crianças 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 crianças na sala de aula (variação de 1m²/criança para 4m²/criança), explica uma redução significativa no consumo dos sistemas AVAC, como pode ser observado na Tabela 9 e, portanto, também será um parâmetro de entrada que irá balizar o consumo de energia na equação de *benchmark*.

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

Modelo base	AVAC:	Split individual (EER=3.43 W/W)	
	Iluminação:	PBE classe A (9,9W/m ² , ref. Sala de aula)	
	Turno:	manhã e tarde	
	Densidade de crianças:	Parâmetro analisado	
	Envoltória:	Upar: 2,55 / Ucob: 1,01 W/m ² K	
	Absortância Solar:	α: 0,3	
	Veneziana:	Janela veneziana	
	Orientação Solar:	Fachada principal orientada a sul	
	Renovação de ar:	ABNT 16401 - nível 2	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m ²]		Variação no consumo de AVAC
	Parâmetro analisado: Densidade de crianças		
	1m ² por criança	4m ² por criança	
Campos do Jordão	6,6	6,1	-8,3%
São Paulo	15,2	9,2	-39,7%
Porto Alegre	17,8	12,8	-28,0%
Campinas	29,7	18,8	-36,9%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	36,0	24,2	-32,8%
Vitória	42,4	29,8	-29,7%
Recife	52,7	39,8	-24,5%
Fortaleza	54,6	41,5	-24,1%

O próprio sistema de condicionamento ambiental possui diversas tecnologias com eficiências energéticas distintas que impactam no consumo de energia total de uma edificação. Nesta tipologia, no entanto, não é comum ter equipamentos de condicionamento de ar, mas sim ventiladores de teto ou de parede. A Tabela 10 ilustra a diferença no consumo de energia dos sistemas Split, que mantêm as condições de conforto no ambiente, e dos ventiladores, que somente fazem o ar circular sem necessariamente prover o conforto desejado. Este parâmetro também será utilizado para balizar a eficiência energética do usuário final na equação de *benchmark*.

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 artificialmente condicionadas. 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 11 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 10 – Impacto do tipo de equipamentos do sistema AVAC no consumo de energia do sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC: Parâmetro analisado		
	Iluminação:	PBE classe D (16,32W/m ² , ref. Sala de aula)	
	Turno:	manhã e tarde	
	Densidade de crianças:	1 m ² por criança (sala de aula)	
	Envoltória:	Upar: 3,85 / Ucob: 2,09 W/m ² K	
	Absortância Solar:	α: 0,7	
	Veneziana:	Somente vidro	
	Orientação Solar:	Fachada principal orientada a norte	
	Renovação de ar:	ABNT 16401 - nível 2	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m ²] Parâmetro analisado: AVAC		Variação no consumo de AVAC
	Sistema split	Ventilador	
Campos do Jordão	9,5	3,0	-68,0%
São Paulo	19,2	3,0	-84,2%
Porto Alegre	21,8	3,0	-86,1%
Campinas	35,3	3,0	-91,4%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	42,3	3,0	-92,8%
Vitória	49,6	3,0	-93,9%
Recife	62,5	3,0	-95,1%
Fortaleza	62,6	3,0	-95,2%

Tabela 11 – Impacto da presença ou não de renovação de ar no consumo do sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC: Split individual (EER=3.43 W/W)		
	Iluminação: PBE classe D (16,32W/m ² , ref. Sala de aula)		
	Turno: manhã e tarde		
	Densidade de crianças: 1 m ² por criança (sala de aula)		
	Envoltória: Upar: 2,55 / Ucob: 1,01 W/m ² K		
	Absortância Solar: α: 0,3		
	Veneziana: Somente vidro		
	Orientação Solar: Fachada principal orientada a sul		
	Renovação de ar: Parâmetro analisado		
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m ²] Parâmetro analisado: Renovação de ar		Variação no consumo de AVAC
	Com renovação	Sem renovação	
Campos do Jordão	8,1	15,0	86,8%
São Paulo	17,6	19,7	12,2%
Porto Alegre	20,0	20,2	0,9%
Campinas	33,1	24,8	-24,9%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	39,6	28,3	-28,6%
Vitória	46,2	30,3	-34,4%
Recife	56,7	35,2	-37,9%
Fortaleza	58,5	34,4	-41,2%

7. EQUAÇÃO DE REGRESSÃO

Para o desenvolvimento das equações para predição do consumo de energia da tipologia de **Escola de Ensino Infantil**, 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). Além dessas, uma terceira equação, destinada às instalações que não possuem sistemas de condicionamento de ar e é válida para qualquer cidade. Em suma, foram construídas 3 equações para esta tipologia.

7.1. CIDADES COM GHR ABAIXO DE 54 MIL

7.1.1. ANÁLISE DOS PARÂMETROS - CENÁRIO COM CONDICIONAMENTO DE AR

SALAS DE AULA E SALAS ADMINISTRATIVAS COM SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR

Análise dos parâmetros

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

	-----Step 1-----		-----Step 2-----		-----Step 3-----		-----Step 4-----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	0.906		-47.66		-40.14		-51.840	
TURN	16.700	0.000	16.700	0.000	16.700	0.000	16.700	0.000
logGHR			11.440	0.000	11.440	0.000	11.440	0.000
PESS					-3.2194	0.000	-3.2194	0.000
ILUM							0.8920	0.000
logGDA								
S	8.11125		6.79565		5.48208		4.67450	
R-sq	51.46%		65.94%		77.84%		83.89%	
R-sq(adj)	51.45%		65.92%		77.82%		83.88%	
R-sq(pred)	51.41%		65.89%		77.79%		83.85%	
Mallows' Cp	10550.73		6261.66		2736.28		944.39	
	-----Step 5-----							
	Coef	P						
Constant	-9.36							
TURN	16.700	0.000						
logGHR	3.695	0.000						
PESS	-3.2194	0.000						
ILUM	0.8920	0.000						
logGDA	-4.583	0.000						
S	4.18947							
R-sq	87.07%							
R-sq(adj)	87.05%							
R-sq(pred)	87.02%							
Mallows' Cp	6.00							

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	5	452955	90591	5161.39	0.000
logGHR	1	2541	2541	144.78	0.000
logGDA	1	16505	16505	940.39	0.000
PESS	1	61912	61912	3527.39	0.000
ILUM	1	31486	31486	1793.88	0.000
TURN	1	267737	267737	15254.21	0.000
Error	3834	67293	18		
Lack-of-Fit	54	36482	676	82.88	0.000
Pure Error	3780	30811	8		
Total	3839	520248			

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4.18947	87.07%	87.05%	87.02%

Equação de Regressão

Consumo_Sala+Adm kWh/m²/ano = -9.36 + 3.695 logGHR - 4.583 logGDA + 0.8920 ILUM - 3.2194 PESS + 16.700 TURN

ÁREAS NÃO CONDICIONADAS

Análise dos parâmetros

Candidate terms: ILUM, TURN

	-----Step 1-----		-----Step 2-----	
	Coef	P	Coef	P
Constant	10.561		-0.5330	
ILUM	1.0199	0.000	1.01988	0.000
TURN			7.3963	0.000
S		3.79291		0.838402
R-sq		42.71%		97.20%
R-sq(adj)		42.69%		97.20%
R-sq(pred)		42.65%		97.20%
Mallows' Cp		74713.90		3.00

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	2	93673.4	46836.7	66631.88	0.000
ILUM	1	41156.4	41156.4	58550.86	0.000
TURN	1	52517.0	52517.0	74712.90	0.000
Error	3837	2697.1	0.7		
Lack-of-Fit	1	2697.1	2697.1	*	*
Pure Error	3836	0.0	0.0		
Total	3839	96370.5			

Resumo do Modelo

S R-sq R-sq(adj) R-sq(pred)

0.838402 97.20% 97.20% 97.20%

Equação de Regressão

Consumo_Demais kWh/m²/ano = -0.5330 + 1.01988 ILUM + 7.3963 TURN

EQUAÇÕES PARA CIDADES COM GHR MENORES QUE 54 MIL

$$\text{CONSUMO_TOTAL_Cenário Salas e Adm Com AC [kWh/m}^2\text{/ano]} = ((-9,36 + 3,695*\log\text{GHR} - 4,583*\log\text{GDA} + 0,8920*\text{ILUM} - 3,2194*\text{PESS} + 16,7*\text{TURN})*(\text{ÁREA}_{\text{SalaAula}} + \text{ÁREA}_{\text{Administração}}) + (-0,533 + 1,01988*\text{ILUM} + 7,39638*\text{TURN}) * \text{ÁREA}_{\text{Demais}}) / \text{ÁREA}_{\text{Total}}$$

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)

PESS – Densidade de alunos em sala de aula (m² por criança)

TURN – Turno (1- manhã, 2- manhã/tarde)

ÁREA_{SalaAula} – Área total de salas de aula

ÁREA_{Administração} – Área total de salas administrativas

ÁREA_{Demais} – Área total dos demais ambientes

ÁREA_{Total} – Área interna total (somatória das áreas acima)

7.2. CIDADES COM GHR ACIMA DE 54 MIL

7.2.1. ANÁLISE DOS PARÂMETROS - CENÁRIO COM SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR

SALAS DE AULA E SALAS ADMINISTRATIVAS COM SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR

Análise dos parâmetros

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

	-----Step 1-----		-----Step 2-----		-----Step 3-----		-----Step 4-----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	2.882		-4.759		4.834		-7.640	
TURN	25.722	0.000	25.722	0.000	25.722	0.000	25.722	0.000
RENO			15.282	0.000	15.282	0.000	15.282	0.000
PESS					-4.111	0.000	-4.1113	0.000
ILUM							0.9515	0.000
logGHR								
S		11.1239		8.08284		6.24672		5.44886
R-sq		57.23%		77.43%		86.52%		89.75%
R-sq (adj)		57.21%		77.41%		86.51%		89.73%
R-sq (pred)		57.15%		77.37%		86.48%		89.71%
Mallows' Cp		10948.91		4694.04		1878.37		880.75
	-----Step 5-----							
	Coef	P						
Constant	-284.67							
TURN	25.722	0.000						
RENO	15.282	0.000						
PESS	-4.1113	0.000						
ILUM	0.9515	0.000						
logGHR	57.76	0.000						
S		4.63682						
R-sq		92.58%						
R-sq (adj)		92.56%						
R-sq (pred)		92.54%						
Mallows' Cp		6.00						

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	5	616540	123308	5735.22	0.000
logGHR	1	18850	18850	876.75	0.000
ILUM	1	21492	21492	999.63	0.000
PESS	1	60580	60580	2817.66	0.000
TURN	1	381094	381094	17725.21	0.000
RENO	1	134524	134524	6256.88	0.000
Error	2298	49407	22		
Lack-of-Fit	66	42467	643	206.94	0.000
Pure Error	2232	6940	3		
Total	2303	665947			

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4.63682	92.58%	92.56%	92.54%

Equação de Regressão

Sala+Adm_Total kWh/m²/ano = -284.67 + 57.76 logGHR + 0.9515 ILUM - 4.1113 PESS + 25.722 TURN + 15.282 RENO

ÁREAS NÃO CONDICIONADAS

Análise dos parâmetros

Candidate terms: ILUM, TURN

	-----Step 1-----		-----Step 2-----	
	Coef	P	Coef	P
Constant	12.838		-0.5330	
TURN	7.396	0.000	7.3963	0.000
ILUM			1.01988	0.000
S		3.38084		0.838620
R-sq		54.49%		97.20%
R-sq(adj)		54.48%		97.20%
R-sq(pred)		54.42%		97.19%
Mallows' Cp		35113.20		3.00

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	2	56204.0	28102.0	39958.29	0.000
ILUM	1	24693.8	24693.8	35112.20	0.000
TURN	1	31510.2	31510.2	44804.37	0.000
Error	2301	1618.3	0.7		
Lack-of-Fit	1	1618.3	1618.3	*	*
Pure Error	2300	0.0	0.0		
Total	2303	57822.3			

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.838620	97.20%	97.20%	97.19%

Equação de Regressão

$$\text{Demais_Total kWh/m}^2/\text{ano} = -0.5330 + 1.01988 \text{ ILUM} + 7.3963 \text{ TURN}$$

EQUAÇÕES PARA CIDADES COM GHR MAIORES OU IGUAIS A 54 MIL

$$\text{CONSUMO_TOTAL_Cenário Salas e Adm Com AC [kWh/m}^2/\text{ano]} = ((-284,67 + 57,76*\log\text{GHR} + 0,9515*\text{ILUM} - 4,1113*\text{PESS} + 25,722*\text{TURN} + 15,282*\text{RENO})*(\text{ÁREA}_{\text{SalaAula}} + \text{ÁREA}_{\text{Administração}}) + (-0,5330 + 1,01988*\text{ILUM} + 7,3963*\text{TURN})*\text{ÁREA}_{\text{Demais}})/\text{ÁREA}_{\text{Total}}$$

Onde:

- GHR – Graus-hora de resfriamento da cidade onde se localiza a edificação
- ILUM – Densidade de potência de iluminação instalada (W/m²)
- PESS – Densidade de alunos em sala de aula (m² por criança)
- TURN – Turno (1- manhã, 2- manhã/tarde)
- RENO – Renovação de ar (0- sem renovação, 1- com renovação)
- ÁREA_{SalaAula} – Área total de salas de aula
- ÁREA_{Administração} – Área total de salas administrativas
- ÁREA_{Demais} – Área total dos demais ambientes
- ÁREA_{Total} – Área interna total (somatória das áreas acima)

7.3. TODAS AS CIDADES

7.3.1. ANÁLISE DOS PARÂMETROS - CENÁRIO COM VENTILADOR

Análise dos parâmetros

Candidate terms: ILUM, TURN, PESS

	-----Step 1-----		-----Step 2-----		-----Step 3-----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	10.409		-7.429		-4.7207	
ILUM	1.2121	0.000	1.21214	0.000	1.21214	0.000
TURN			11.8923	0.000	11.8923	0.000
PESS					-1.1608	0.000
S	6.26184		1.96044		1.32155	
R-sq	27.86%		92.93%		96.79%	
R-sq(adj)	27.85%		92.93%		96.79%	
R-sq(pred)	27.82%		92.92%		96.78%	
Mallows' Cp	131754.69		7375.87		4.00	

α to enter = 0.15, α to remove = 0.15

Análise de variância

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	323126	107709	61671.51	0.000
ILUM	1	93018	93018	53259.85	0.000
TURN	1	217230	217230	124380.82	0.000
PESS	1	12878	12878	7373.87	0.000
Error	6140	10723	2		
Lack-of-Fit	8	10723	1340	*	*
Pure Error	6132	0	0		
Total	6143	333850			

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.32155	96.79%	96.79%	96.78%

Equação de Regressão

Total kWh/ano/m2 = -4.7207 + 1.21214*ILUM + 11.8923*TURN - 1.1608*PESS

EQUAÇÃO FINAL PARA CENÁRIO SOMENTE COM VENTILADOR

CONSUMO_TOTAL_Cenário Sem AC [kWh/m²/ano] = -4,7207 + 1,21214*ILUM + 11,8923*TURN – 1,1608*PESS

Onde:

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

PESS – Densidade de alunos em sala de aula (m² por criança)

TURN – Turno (1- manhã, 2- manhã/tarde)

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 94,89%, logo a equação de *benchmark* tem boa representatividade do modelo para a tipologia de **Escola de Ensino Infantil**.

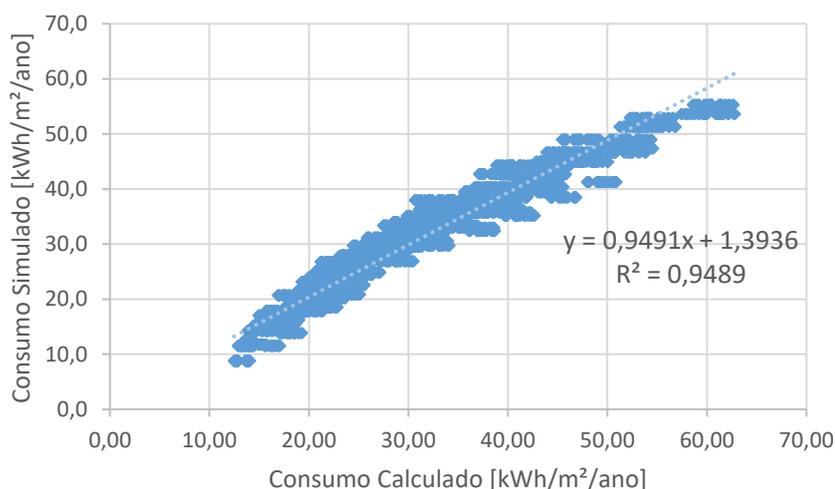


Figura 20 – Comparação entre o EUI simulado e o predito pela equação

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 para a definição das escalas de eficiência e a identificação da faixa de consumo típico de energia, foram consideradas os parâmetros identificados e descritos nos capítulos anteriores e que representam impactos significativos na equação de *benchmark*. Os parâmetros foram considerados de forma diferente em função do GHR da cidade, conforme mostrado na Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros para Escala de Consumo de Energia em função do GHR

Parâmetro	Parâmetros significativos de acordo com a cidade	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	1- manhã	x	x	x
	2- manhã/tarde			
Densidade de Pessoas	m ² /criança	x	x	x
Renovação de ar	0 – não tem		x	
	1 – tem renovação			

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 13 apresenta a definição do cenário utilizado para determinar os consumos mínimos e máximos para esta tipologia.

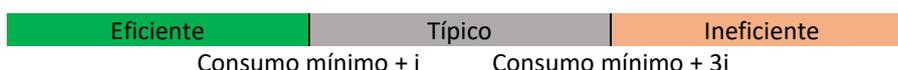
Tabela 13 – Cenários para o cálculo de consumo mínimo e máximo para a tipologia de Escola de Ensino Infantil

	Parâmetros	Limite Mínimo	Limite Máximo
Cidade	GHR	Parâmetro fixo	
	GDA		
Iluminação	W/m ²	9,9	16,32
Turnos	1- manhã	Parâmetro fixo	
	2- manhã/tarde		
Densidade de Pessoas	m ² por criança	Parâmetro fixo	
Renovação de ar	0 – não tem	Parâmetro fixo	
	1 – tem renovação de ar		

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

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

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



8.2. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Para exemplificar a aplicação deste método e calcular as escalas de consumo de uma edificação, será apresentado o cálculo para uma Escola de Ensino Infantil localizada na cidade de Florianópolis, com GHR = 28602, GDA = 148,3, DPI de 5,0 W/m², funcionando sem ar condicionado, com turnos da manhã e da tarde e com uma ocupação de 2,12 m² por criança. **O consumo de energia operacional calculado é 22,66 kWh/m²/ano.**

Realizando o cálculo do consumo desta Escola de Ensino Infantil nos cenários de consumo mínimo e consumo máximo, obtém-se os limites indicados na Tabela 14.

Tabela 14 – Exemplo de Escala de Eficiência – Escola de Ensino Infantil em Florianópolis

	Parâmetros	Mínimo	Máximo	
VARIÁVEIS	ILUMINAÇÃO	DPI (W/m ²)	9,9	16,32
FIXOS	FLORIANÓPOLIS	GHR=28602 GDA=148,3	Consumo geral: 28,60 [kWh/m²/ano]	Consumo geral: 36,39 [kWh/m²/ano]
	DENSIDADE DE PESSOAS	2,12 m ² por criança		
	TURNO	2-manhã e tarde		

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

$$i = \frac{36,39 - 28,60}{5} = 1,6$$



Considera-se nesse exemplo, portanto, que a edificação analisada apresenta consumo operacional inferior ao consumo mínimo da faixa típica (**22,66 kWh/m²/ano < 30,2 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 Infantil**.

Os parâmetros com maior impacto no consumo de energia desta tipologia foram: graus-hora de resfriamento (GHR); graus-dia de aquecimento (GDA); iluminação (ILUM); densidade de crianças (PESS); turnos oferecidos pela instituição (TURN) e a renovação de ar (RENO). Há ainda o impacto da presença ou não de sistema de condicionamento de ar na edificação.

As variações de absortância solar, envoltória, a utilização ou não de janelas tipo veneziana e a orientação solar da fachada da edificação não apresentaram impacto significativo no cálculo do consumo final e portanto não foram incluídas na equação de *benchmark* para a 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 também que as cidades que apresentam GDA também tem um impacto no consumo por aquecimento, portanto foi necessário dividir em duas equações, para os cenários com sistemas de condicionamento de ar, 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 e, para aquelas edificações com sistemas de condicionamento de ar, ela tem impacto no consumo desse sistema, 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 e da tarde, há também o tempo total de funcionamento da edificação que impacta no consumo final de energia. A carga térmica das pessoas, a depender da densidade de ocupação da sala, também tem impacto significativo no consumo de energia dos sistemas de condicionamento de ar. E, ainda, no caso de creches, os turnos implicam na quantidade de banhos utilizando um chuveiro elétrico para aquecer a água, assim como a quantidade de crianças e a necessidade de banhos.

A existência de sistemas de condicionamento de ar também impacta no consumo final da edificação. A utilização de ventiladores de parede possuem um consumo de energia muito menor, porém sem necessariamente manter o conforto térmico das pessoas que permanecem nas salas. A existência ou não de renovação de ar tem um impacto significativo uma vez que a 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 acima de 94%, logo os modelos regressivos empregados foram representativos para prever o consumo de energia para a tipologia de **Escola de Ensino Infantil**.

A Tabela 15 resume os parâmetros estudados e identifica os considerados significativos para o desenvolvimento das equações de *benchmark* para esta tipologia.

Tabela 15 -Parâmetros analisados e sua relevância para a equação de benchmark da tipologia de Escola de Ensino Infantil

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	✓		
Iluminação	✓	✓	✓
Turno	✓	✓	✓
Densidade de pessoas	✓	✓	✓
Renovação do ar interno		✓	
Absortância solar			
Envoltória			
Orientação solar da fachada			
Janelas tipo veneziana			

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.