



CBCS

Conselho Brasileiro de Construção Sustentável

RT2B.12: Desenvolvimento de arquétipo, modelo de simulação, análise de sensibilidade e equações de *benchmark* para a tipologia de Universidade e Instituição de Ensino Técnico

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 22/01/2021

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 Universidade e Instituição de Ensino Técnico.

SUMÁRIO

1. CONTEXTUALIZAÇÃO E METODOLOGIA	3
Metodologia geral adotada para o convênio	4
2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	5
3. CIDADES SELECIONADAS	6
4. DESENVOLVIMENTO DO ARQUÉTIPO	7
4.1. Volumetrias.....	8
4.2. Iluminação.....	10
4.3. Ocupação	11
4.4. Sombreamento e orientação solar	13
4.5. Envoltória e tipo de vidro.....	13
4.6. Definição da carga térmica e sistema de condicionamento de ar	14
5. MODELOS DE SIMULAÇÃO.....	16
5.1. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO - Edificação geral.....	16
5.2. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO - Gabinetes dos professores	17
5.3. Método de análise dos resultados das simulações.....	18
6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	19
6.1. análise em Cidades com ghr abaixo de 54 mil	19
6.1.1. Salas de aula	19
6.1.2. SALAS DE ENSINO E PESQUISA COM COMPUTADORES.....	21
6.1.3. Demais áreas	22
6.1.4. Gabinete dos professores.....	23
6.2. análise em Cidades com ghr acima de 54 mil	24
6.2.1. Salas de aula	24
6.2.2. SALAS DE ENSINO E PESQUISA COM COMPUTADORES.....	25
6.2.3. Demais áreas	26
6.2.4. Gabinete dos professores.....	27
6.3. ANÁLISE DO IMPACTO DOS PARÂMETROS SIGNIFICATIVoS	28
6.3.1. Edificação geral.....	28
6.3.2. Gabinetes dos professores	33
7. EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	36
7.1. EDIFICACÃO GERAL	36
7.1.1. Cidades com GHR abaixo de 54 mil	36
7.1.2. Cidades com GHR acima de 54 mil	40
7.1.3. Avaliação entre o consumo simulado e o consumo calculado	42
7.2. Gabinetes dos professores.....	43
7.2.1. Cidades com GHR abaixo de 54 mil	43

7.2.2. Cidades com GHR acima de 54 mil	45
7.2.3. Avaliação entre o consumo simulado e o consumo calculado	46
8. ESCALAS DE CONSUMO DE ENERGIA	47
8.1. Método para cálculo das escalas	47
8.2. Exemplo de aplicação	49
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
REFERÊNCIAS	53

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.

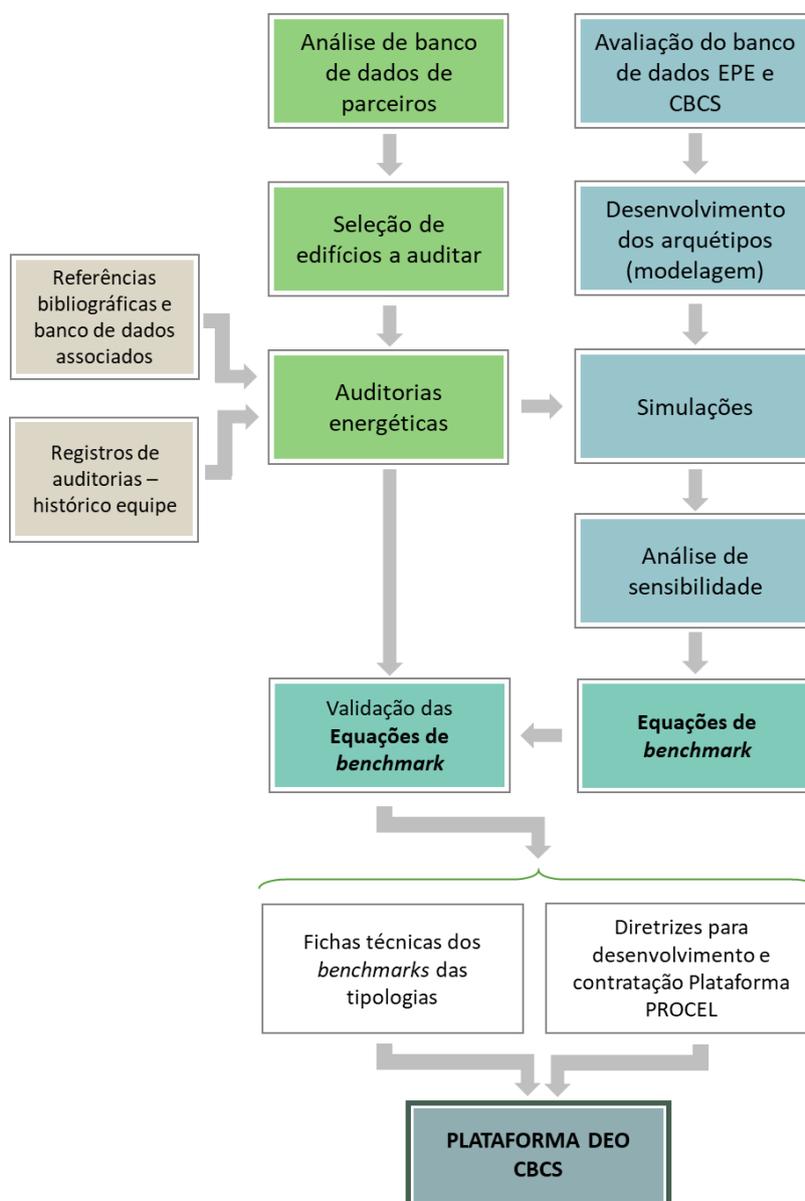


Figura 1 - Método aplicado pelo CBCS para o desenvolvimento dos benchmarks no âmbito deste convênio

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 **Universidade e Instituição de Ensino Técnico**.

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

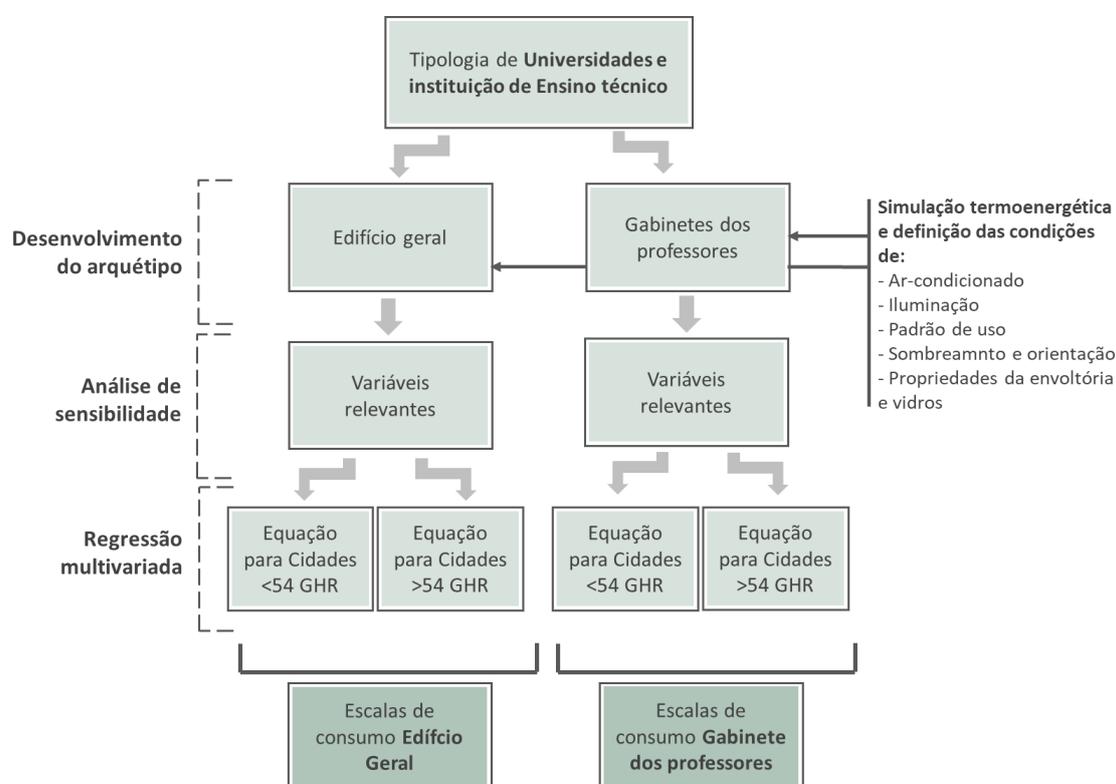


Figura 2 – Fluxograma de desenvolvimento das equações de benchmark e escalas de consumo para a tipologia de Universidade e Instituição de Ensino Técnico

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 **Universidade e Instituição de Ensino Técnico** constitui-se tipicamente por edifícios de múltiplos andares cuja função principal é o ensino superior. Neste conceito, incluem-se faculdades, institutos federais, escolas técnicas e universidades públicas e privadas.

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 expostos à radiação solar em todas as suas faces.
- Foi considerada a área bruta da edificação como todo o espaço interno ao edifício, independente se com ocupação permanente ou não, incluindo: circulações horizontais e verticais, salas de aula, salas de ensino e pesquisa com computadores, gabinetes de professores, diretoria, secretaria, biblioteca, auditório, escritórios, cantina, instalações de manutenção, depósitos, banheiros e poços de elevadores.
- Foram encontradas variações de uso nas unidades de ensino com finalidades de pesquisa, contemplando laboratórios com diferentes intensidades de consumo de energia. Também há diferenças entre as universidades públicas e particulares. As universidades públicas apresentam maior frequência de gabinetes de professores e maior diversidade de tipos de laboratórios.
- Outras particularidades – como diferenças entre unidades com muitas salas individuais de professores; medição de consumo independente de cantinas e lanchonetes, mesmo internas à edificação – foram consideradas no arquétipo como área de circulação não condicionada.

Para contemplar a tipologia no âmbito do presente convênio foi definido o arquétipo que representa as áreas de uso típico da maioria destas edificações. Dessa forma, os ambientes considerados neste arquétipo são: salas de aula, salas de ensino e pesquisa com computadores, sala dos professores, gabinetes dos professores, diretoria, secretaria, biblioteca e auditório. Além destas, há também as áreas de circulação horizontal e vertical, hall, recepção, lanchonete, depósitos e instalações sanitárias.

Durante a etapa de caracterização desta tipologia, percebeu-se que o uso de energia em laboratórios específicos pode apresentar notória variação. Por exemplo, é comum a presença de equipamentos especiais para a finalidade do laboratório (como prensas mecânicas, pontes rolantes, centrífugas de alta rotação, microscópios eletrônicos, entre outros). Além disso, a modelagem do ambiente em si pode apresentar especificidades difíceis de serem generalizadas na simulação, como capelas para produtos químicos e alta taxa de renovação de ar. Dessa forma, laboratórios específicos não foram incluídos na composição deste arquétipo.

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, identificou-se que os gabinetes dos professores possuem uma condição térmica diferente dos demais ambientes, especialmente pelo tipo e padrão de uso do ar-condicionado. Notou-se que muitas universidades possuem um elevado número de gabinetes de professores, caracterizados por serem salas individuais que ocupam parte significativa do total da edificação. Portanto, esses ambientes podem representar uma parcela considerável no consumo de energia. Essa característica é notada principalmente nas instituições de ensino públicas.

Dessa forma, foram definidas duas volumetrias separadas: (a) uma contendo a configuração da edificação geral (salas de aula, salas de ensino e pesquisa com computadores (laboratórios de informática), sala de professores, diretoria, secretaria, biblioteca, auditório, banheiros e hall) e (b) outra contendo apenas os gabinetes dos professores. Cabe ressaltar que a sala de professores é um ambiente de uso coletivo, modelada como uma sala administrativa, diferente dos gabinetes de professores, que são salas individuais. A Tabela 2 sintetiza essa definição.

Tabela 2 – Áreas dos ambientes considerados

Volumetria	Ambiente	Quantidade	Área total (m ²)	Percentual na área total
Edifício geral	Salas de aula	10	1860	55%
	Laboratório de informática	1	160	5%
	Biblioteca	1	180	5%
	Auditório	1	160	5%
	Diretoria	1	44	1%
	Secretaria	1	44	1%
	Sala de professores	1	65	2%
	Depósito	1	65	2%
	Instalações sanitárias	6	329	10%
	Circulação horizontal	5	329	10%
	Circulação vertical	5	166	5%
Gabinete dos professores	Gabinete dos professores	5	120	100%

O modelo da Edificação geral foi construído com base em uma edificação de cinco pavimentos de dimensões 16,2 m x 42 m x 3,2 m (L x C x A), totalizando 3.402m². A Figura 3 apresenta a volumetria, a planta e a configuração dos ambientes considerados e a Figura 4 as perspectivas do modelo.

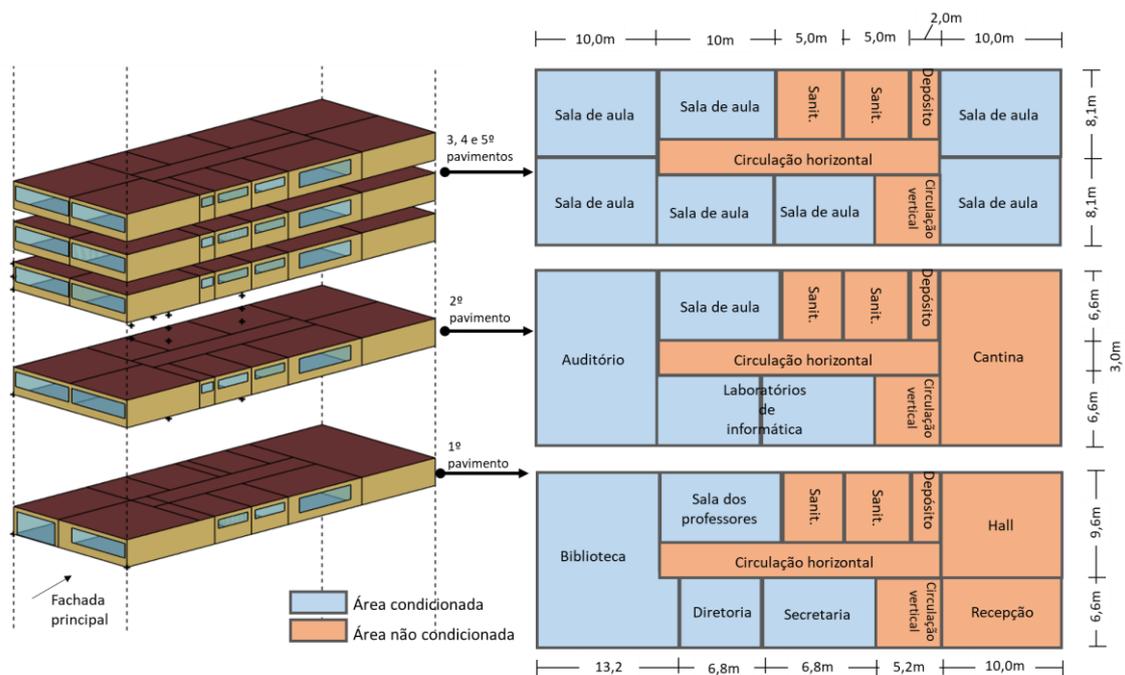


Figura 3 – Volumetria e configuração da planta do arquétipo para a edificação geral

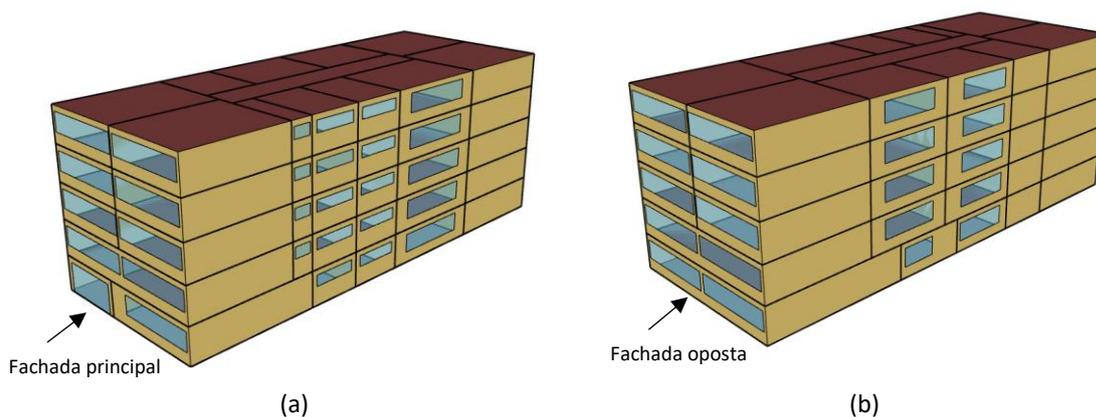


Figura 4 – Perspectiva da volumetria da edificação geral. (a) frente e lateral esquerda; (b) fundos e lateral direita.

Com relação à volumetria para gabinetes dos professores, foram consideradas 8 salas com dimensões 3m x 5m x 3,2m (L x C x A) cada, totalizando 120 m³. A Figura 5 apresenta a configuração dos ambientes considerados no arquétipo e a sua volumetria. Nota-se que nesta volumetria foram representados brises nas esquadrias. No entanto, há cenários com e sem brises.

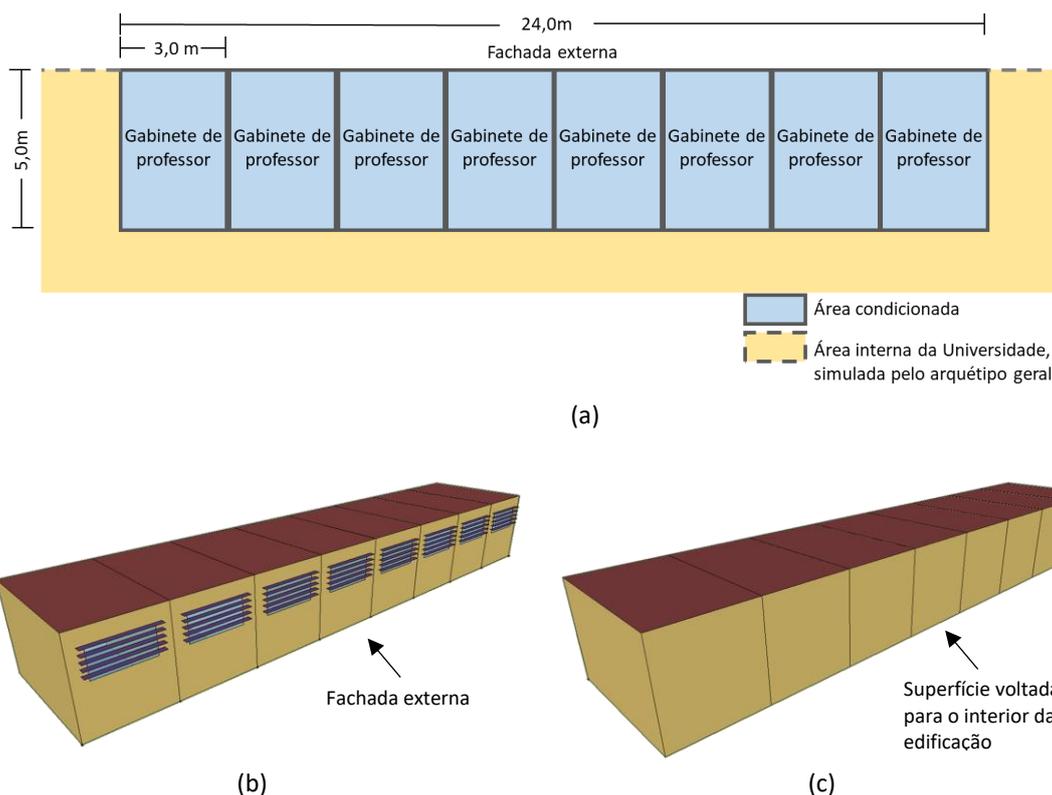


Figura 5 – Volumetria do modelo dos gabinetes de professores (a) Configuração da planta; (b) Fachada externa e cobertura expostas; (c) Laterais e piso adiabáticos

4.2. ILUMINAÇÃO

No levantamento dos dados do projeto META foi identificada 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.

Os sistemas de iluminação permanecem totalmente acesos nos ambientes de permanência prolongada ao longo de todo o período de ocupação. Nas zonas de circulação e instalações sanitárias, o período de funcionamento total é estendido em 30 minutos antes do início das atividades na edificação e mais 30 minutos após seu término. Por motivos de vigilância e segurança, foi considerado o funcionamento parcial da iluminação das zonas de circulação (10% da potência instalada), durante o período que a edificação não estiver ocupada.

Para o modelo de gabinetes de professores, duas DPI foram consideradas: 19,04 W/m² (ILUM01), e 10,00 W/m² (ILUM02), correspondendo, respectivamente, as classes D e A da INI-C. A iluminação foi considerada acesa enquanto houvesse ocupação na sala.

A Figura 6 ilustra o cronograma de operação da iluminação, considerando o percentual de salas de aula iluminadas ao longo do dia para cada uma das modalidades de turno de operação das Universidades e Instituições de Ensino Técnico (manhã e noite; manhã, tarde e noite; apenas a noite).

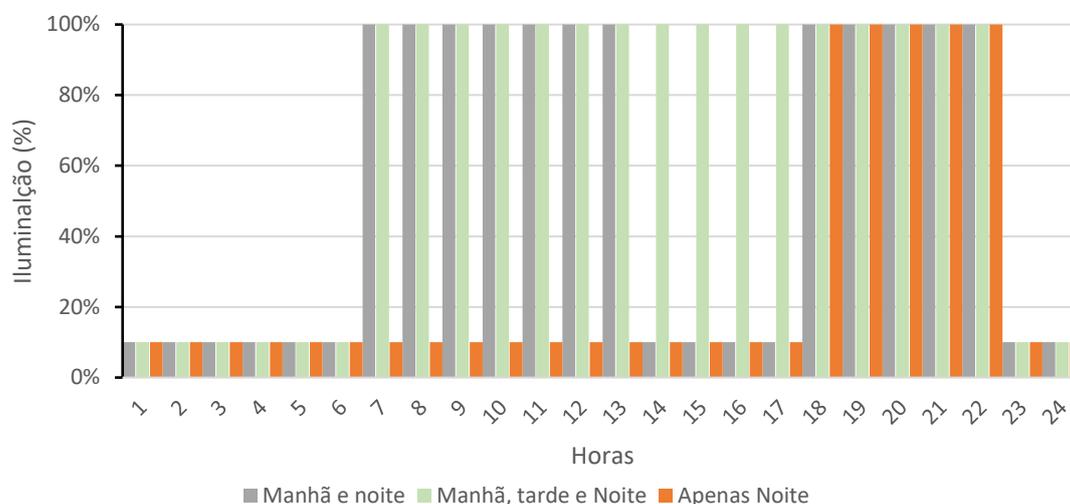


Figura 6 – Cronograma adotado para Iluminação nas salas de aula.

4.3. OCUPAÇÃO

O horário de funcionamento desta tipologia é uma variável de entrada da simulação e foi definido de acordo com os turnos oferecidos pelas instituições de ensino. Três cenários foram considerados. O TURN01 contempla todos os períodos do dia com aulas de manhã (das 7h30 às 12h00), de tarde (das 13h00 às 17h30) e de noite (das 18h00 às 22h30). O TURN02 consiste apenas nos períodos da manhã e da noite, mantendo os respectivos horários do TURN01. Em ambos, o período de funcionamento das partes administrativas e da biblioteca foi mantido ininterrupto ao longo de todo o dia, desde o início da primeira aula da manhã, até o término da última da noite. No TURN03 as aulas são ministradas somente no período noturno, também durante os mesmos horários, e os setores administrativos e biblioteca iniciam suas atividades às 15h00 e se encerram às 22h30.

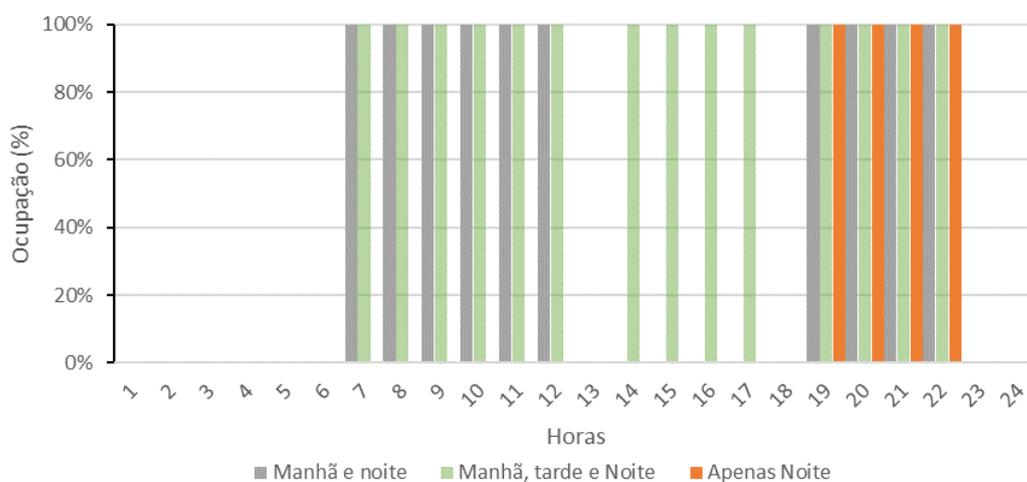
Utilizando-se como base as auditorias energéticas realizada para esta tipologia, adotou-se dois cenários para definir a densidade de ocupação nas salas de aula. No primeiro cenário, a ocupação é de 1,2m² por pessoa (PESS01) e no segundo cenário 3,0 m² por pessoa (PESS02). Em ambos os cenários, considerou-se como cargas de equipamentos na sala de aula um computador e um projetor. A Figura 7 apresenta o cronograma de ocupação de acordo com cada ambiente.

Para os demais ambientes, foram definidos cenários fixos de ocupação e cargas de tomada, conforme a seguir:

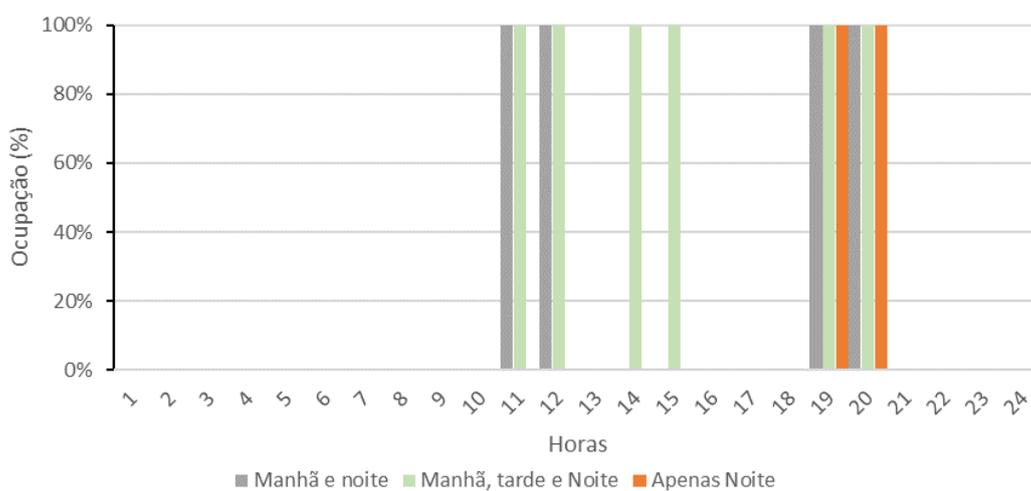
- Diretoria: duas pessoas, dois computadores e uma impressora;
- Secretaria: seis pessoas, seis computadores, uma impressora e uma cafeteira;
- Sala dos professores: uma pessoa, quatro computadores, uma impressora e uma cafeteira;

- Biblioteca: três funcionários, frequência média de um aluno a cada 10m², totalizando 18 alunos, e seis computadores;
- Auditório: ocupação de 1m² por pessoa (totalizando 160 pessoas), um projetor e um computador. Este ambiente é ocupado uma vez por semana, pelo período de dois turnos por vez; e
- Salas de ensino e pesquisa com computadores: ocupação de 1,5m² por pessoa (totalizando 36 pessoas em cada sala), com 36 computadores e um projetor. Estas salas são utilizadas todos os dias por duas horas a cada turno.

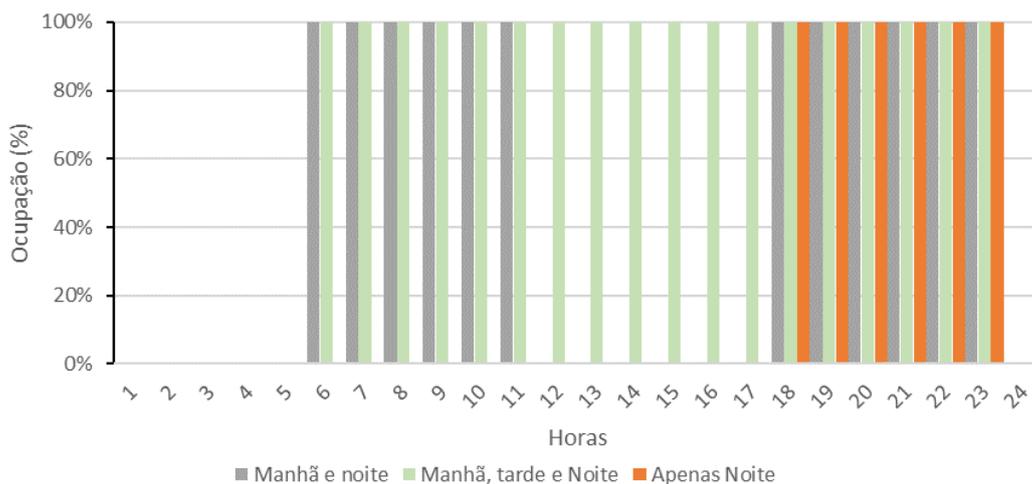
Com relação ao modelo de gabinetes dos professores, diferentemente das salas de aula que podem ser utilizadas por diferentes turmas ao longo do dia, os gabinetes pertencem a apenas uma pessoa, que ao ministrar suas aulas, não ocupam seus respectivos gabinetes ao longo de todo o dia. Portanto, foram considerados três cenários de ocupação dos gabinetes com quatro horas e trinta minutos de duração, sendo o TURN01 pela manhã, o TURN02 à tarde e o TURN03 à noite.



(a) Salas de aula



(b) Salas de Ensino e pesquisa com computadores



(c) Administrativos

Figura 7 – Cronograma adotado para ocupação para cada tipo de ambiente.

4.4. SOMBREAMENTO E ORIENTAÇÃO SOLAR

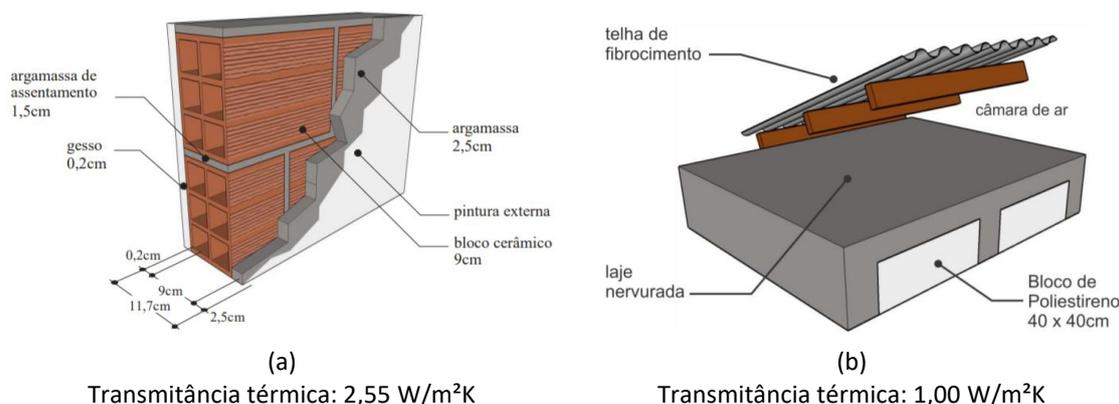
Pela simetria do arquétipo desenvolvido, foram considerados dois cenários de orientação solar: o primeiro considerando a fachada principal orientada a sul (ORIE01) e o segundo considerando a fachada principal orientada a leste (ORIE02).

Dois cenários para sombreamento das esquadrias foram considerados. No primeiro cenário nenhum sombreamento foi considerado (SOMB01). No segundo cenário, foram considerados *brises* horizontais de 20 cm de projeção e 20 cm de espaçamento entre as aletas por toda a esquadria, com extensão de 20 cm em relação as bordas laterais das janelas (SOMB02).

A orientação da volumetria de gabinetes de professores foi realizada considerando-se a cobertura e uma das faces laterais expostas ao ambiente externo, voltadas para as quatro orientações solares principais (ORIE01 – Sul, ORIE02 - Oeste, ORIE03 – Norte e ORIE04 - Leste). As demais faces e o piso foram considerados adiabáticos.

4.5. ENVOLTÓRIA E TIPO DE VIDRO

Para definir os cenários que representam a eficiência da envoltória da edificação, foram adotadas propriedades fixas para as transmitâncias das paredes e coberturas de 2,50 W/m²K e 1,00 W/m²K, respectivamente. A Figura 8 apresenta os elementos construtivos de referência para parede e cobertura.



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

Capacidade térmica: 238 kJ/m²K
Atraso térmico: 8,7 h

Figura 8 – Elementos construtivos de referência para (a) Paredes e (b) Cobertura

Como a absorvância está relacionada à cor, e esta característica se apresenta amplamente variável no estoque de edificações, foram definidos dois cenários de variação para esta propriedade. O primeiro cenário considera cores mais escuras e absorvância de 0,7 (ENVO01), e o segundo cenário considera cores mais claras, com absorvâncias de 0,3 (ENVO02).

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.

Em relação ao vidro das esquadrias, foi utilizado um vidro simples de 3 mm, com valor de transmitância de 5,8 W/m²K em dois cenários com variação de fator solar. No primeiro cenário o vidro não possui proteção solar (FSOL01) e tem um fator solar de 0,87. No segundo cenário o vidro possui película de controle solar (FSOL02) e fator solar de 0,5.

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

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

A partir dessa etapa de simulação preliminar, foram identificados os cenários nos quais as variáveis mais impactaram os resultados de carga térmica total da simulação. Então, uma segunda rodada de simulação foi realizada, considerando apenas esse cenário único (Tabela 3). O objetivo dessa segunda rodada de simulações preliminares foi identificar a carga térmica de resfriamento (em Toneladas de Resfriamento, TR) para cada cidade representativa.

Tabela 3 – Cenário considerado para cálculo de carga térmica

Variável	Cenário
Iluminação	ILUM01
Turno	TURN01
Densidade de pessoas	PESS01
Sombreamento	SOMB01
Orientação solar	ORIE02
Envoltória	ENVO01
Tipo de vidro	FSOL01
Renovação de ar	RENO01

Nas simulações da segunda rodada preliminar foram consideradas a vazão de ar, a capacidade de refrigeração e aquecimento no modo *autosize*, com um superdimensionamento de 25% no modo aquecimento e de 15% no modo refrigeração. A eficiência dos equipamentos de ar condicionado foi

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

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 com base em equipamentos existentes no mercado, sendo escolhido o equipamento de capacidade superior a carga térmica definida. O equipamento foi modelado na simulação termoenergética do arquétipo.

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

A 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	53,3
São Paulo	SP	3	197,5
Porto Alegre	RS	3	227,8
Campinas	SP	3	206,3
Rio de Janeiro (Vila Militar)*	RJ	8	239,0
Vitória	ES	8	234,0
Recife	PE	8	224,9
Fortaleza	CE	8	231,9

* Cidade selecionada

Percebe-se que, dentre as cidades selecionadas como representativas, a cidade com maior carga térmica foi o Rio de Janeiro, com 239 TR, sendo 83,6% desta demanda para atender as 24 zonas térmicas de salas de aula e salas de ensino e pesquisa com computadores, 8,3% o auditório, 4,4% a biblioteca (4,4%) e 3,7% as áreas administrativas. Dessa forma, o arquivo climático do Rio de Janeiro (Vila Militar) foi selecionado como referência para dimensionamento do sistema de condicionamento de ar considerado no arquétipo.

Dois cenários para ar condicionado foram considerados nas simulações. O primeiro cenário considera sistemas individuais tipo *Split* para cada zona térmica, com EER (*Energy Efficiency Ratio*) médio de 3,25W/W. O segundo cenário considerou um sistema mais eficiente, na forma de um sistema centralizado tipo VRF (*Variable refrigerant flow*) com duas condensadoras por andar, atendendo às zonas térmicas separadas pelo eixo maior da edificação, com um EER médio de 4,07 W/W.

Ainda, um terceiro cenário sem ar-condicionado nas salas de aula foi considerado. Neste último cenário, uma combinação de ventilação natural e artificial (por meio de ventiladores de parede) é utilizada para proporcionar conforto térmico nas salas de aulas. As áreas administrativas, biblioteca e auditório possuem sistema de ar-condicionado tipo split individual.

Para os gabinetes de professores, foram considerados dois cenários para ar-condicionado. O primeiro cenário representa um sistema menos eficiente utilizando sistema individuais tipo split. O segundo cenário representa um sistema mais eficiente, na forma de um sistema centralizado do tipo VRF. Um terceiro cenário sem ar-condicionado também foi considerado, adotando-se o uso de ventiladores de parede que ficam ligados sempre que a sala está ocupada, independente da temperatura ambiente.

A renovação de ar em ambientes condicionados artificialmente é obrigatória pela Lei 13.589/18, com valores definidos na norma técnica ABNT NBR 16401-3. Entretanto é comum encontrar na prática edificações que não contam com tal sistema de renovação de ar e por vezes, quando possuem, não operam adequadamente. Dessa forma, foram considerados dois cenários: um sem renovação de ar (RENO02); e outro com renovação de ar (RENO01). O cenário com renovação de ar foi determinado considerando-se 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 taxa de renovação de ar de acordo com a ocupação de 6,3 L/s por pessoa, acrescido de 0,8 L/s a cada metro quadrado referente à área do ambiente.

Similarmente, para os gabinetes dos professores, a renovação de ar também foi simulada em dois cenários. Um de acordo com o nível 2 da norma ABNT NBR 16401-3 (cenário RENO01) e outro sem renovação de ar (cenário RENO02).

A renovação de ar em ambientes condicionados artificialmente é obrigatória pela Lei 13.589/18, com valores definidos na norma técnica ABNT NBR 16401-3. Entretanto, na prática, é comum encontrar edificações sem sistema de renovação de ar e, por vezes, quando os possuem, não operam adequadamente. Por esta razão, foram considerados dois cenários: um sem renovação de ar (RENO02) e outro com renovação de ar (RENO01) na vazão apropriada conforme o tipo de ambiente e de acordo com o Nível 2 da norma ABNT NBR 16401-3.

5. MODELOS DE SIMULAÇÃO

5.1. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO - EDIFICAÇÃO GERAL

As simulações foram realizadas utilizando-se uma abordagem paramétrica, considerando as variações dos cenários apresentados e as oito cidades representativas (capítulo 3). No total, 1.152 casos foram simulados. Foi utilizado o programa de simulação *EnergyPlus* (versão 9.2). Os resultados das simulações foram compilados em um banco de dados com os consumos anuais totais, consumos desagregados por uso final e por ambiente. A Tabela 5 apresenta a síntese das características dos cenários adotados nas simulações termoenergéticas para esta tipologia.

Tabela 5 – Cenários adotados para as simulações - Edificação geral

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
	TURN03	Aulas somente no período noturno
Densidade de pessoas	PESS01	Alta densidade de alunos (1,2 m ² /aluno)
	PESS02	Baixa densidade de alunos (3,0 m ² /aluno)
Sombreamento	SOMB01	Sem brise
	SOMB02	Com brise

Orientação solar	ORIE01	Fachada principal orientada a Sul
	ORIE02	Fachada principal orientada a Leste
Envoltória	ENVO01	$U_{\text{parede}} = 2,50 \text{ W/m}^2.\text{K}$; $U_{\text{cobertura}} = 1,00 \text{ W/m}^2.\text{K}$ Absortância = 0,70
	ENVO02	$U_{\text{parede}} = 2,50 \text{ W/m}^2.\text{K}$; $U_{\text{cobertura}} = 1,00 \text{ W/m}^2.\text{K}$ Absortância = 0,30
Tipo de vidro	FSOL01	Sem película; $U = 5,8 \text{ W/m}^2.\text{K}$; SHGC = 0,87
	FSOL02	Com película; $U = 5,8 \text{ W/m}^2.\text{K}$; SHGC = 0,5
AVAC	Split	Sistema Split (EER = 3,25W/W)
	VRF	Sistema VRF (EER = 4,07W/W)
	Ventilador	Salas de aula: ventilador de parede; Administração, Biblioteca e Auditório: Sistema Split (EER = 3,25W/W)
Renovação de ar	RENO01	Com renovação de ar (Taxas de cada ambiente conforme Nível 2 da ABNT NBR 16401-3)
	RENO02	Sem renovação de ar

Notas:

U = Transmitância térmica;

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

5.2. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO - GABINETES DOS PROFESSORES

Da mesma forma que foi feito para a edificação geral, o modelo de gabinetes dos professores também foi simulado de forma paramétrica, combinando-se os cenários considerados e as oito cidades representativas, resultando em 768 casos de simulação. Além disso, os resultados das simulações foram compilados em um banco de dados com os consumos anuais totais e consumos desagregados por usos finais. A Tabela 6 resume as características dos cenários adotados nas simulações termo energéticas para os gabinetes individuais de professores.

Tabela 6 - Especificação dos cenários adotados para os gabinetes de professores

Parâmetro	Cenário	Dado utilizado
Iluminação	ILUM01	Iluminação com DPI 19,04 W/m ² PBE classe D
	ILUM02	Iluminação com DPI 10 W/m ² PBE classe A
Turno	TURN01	Ocupação no período da manhã
	TURN02	Ocupação no período da tarde
	TURN03	Ocupação no período da noite
Sombreamento	SOMB01	Sem brise
	SOMB02	Com brise
Orientação solar	ORIE01	Face exposta orientada a Sul
	ORIE02	Face exposta orientada a Oeste
	ORIE03	Face exposta orientada a Norte
	ORIE04	Face exposta orientada a Leste
Envoltória	ENVO01	$U_{\text{parede}} = 2,50 \text{ W/m}^2.\text{K}$; $U_{\text{cobertura}} = 1,00 \text{ W/m}^2.\text{K}$ Absortância = 0,70
	ENVO02	$U_{\text{parede}} = 2,50 \text{ W/m}^2.\text{K}$; $U_{\text{cobertura}} = 1,00 \text{ W/m}^2.\text{K}$ Absortância = 0,30
Tipo de vidro	FSOL01	Sem película; $U = 5,8 \text{ W/m}^2.\text{K}$; SHGC = 0,87
	FSOL02	Com película; $U = 5,8 \text{ W/m}^2.\text{K}$; SHGC = 0,5
AVAC	Split	Sistema Split (EER = 3,40W/W)
	VRF	Sistema VRF (EER = 5,23W/W)
	Ventilador	Ventilador de parede sempre ligado durante ocupação
Renovação de ar	RENO01	Com renovação de ar (ABNT NBR 16401-3, Nível 2)

É importante destacar que os modelos foram calibrados com os dados provenientes das auditorias energéticas realizadas no âmbito deste convênio. Dessa forma, garantiu-se que os resultados das simulações podem representar consumos de edifícios na prática.

5.3. MÉTODO DE ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Os resultados obtidos nas simulações mostraram um consumo significativo de aquecimento nas cidades mais frias. No caso de Campos do Jordão, o consumo para aquecimento chega a superar o consumo de resfriamento. Portanto, as análises e equações foram divididos em dois grupos a partir da relação GHR e GDA (Graus-dia de aquecimento).

No primeiro grupo inseriu-se as cidades que apresentaram algum GDA. Nesse caso, as cidades possuem no máximo cerca de 54.000 GHR. No segundo grupo, inseriu-se as cidades que apresentam mais de 54.000 GHR. A Tabela 7 apresenta as cidades e seus grupos.

Tabela 7 – 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	
São Paulo	SP	-23,85	-46,64	792	14.172	<54.000 GHR
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	
Vitória	ES	-20,32	-40,34	9	54.061	>54.000 GHR
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 da divisão pelos grupos de cidades abaixo e acima de 54.000 GHR, é importante esclarecer que a análise de sensibilidade foi conduzida agrupando-se os ambientes em três grupos: (a) salas de aula; (b) salas de ensino e pesquisa com computadores; e (c) demais áreas (que compreende salas administrativas, biblioteca, corredor, banheiros, sala dos professores e hall). Um quarto grupo (d) representa o gabinete de professores, que foi modelado e simulado separadamente.

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

6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

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

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

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

Os parâmetros analisados foram: iluminação (ILUM), turno (TURN), densidade de alunos em sala de aula (PESS), uso de elementos de sombreamento nas aberturas (SOMB), orientação solar (ORIE), envoltória – sendo aqui considerada apenas a variação de sua absorvância (ENVO), fator solar dos vidros (FSOL), 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. SALAS DE AULA

Por meio das Figuras 6 e 7, verifica-se que os parâmetros com variações mais significativas são o GHR, GDA, AVAC, ILUM, TURN, PESS. As variações dos parâmetros RENO, SOMB, ENVO, FSOL e ORIE tiveram um impacto pequeno no cálculo do consumo de energia.

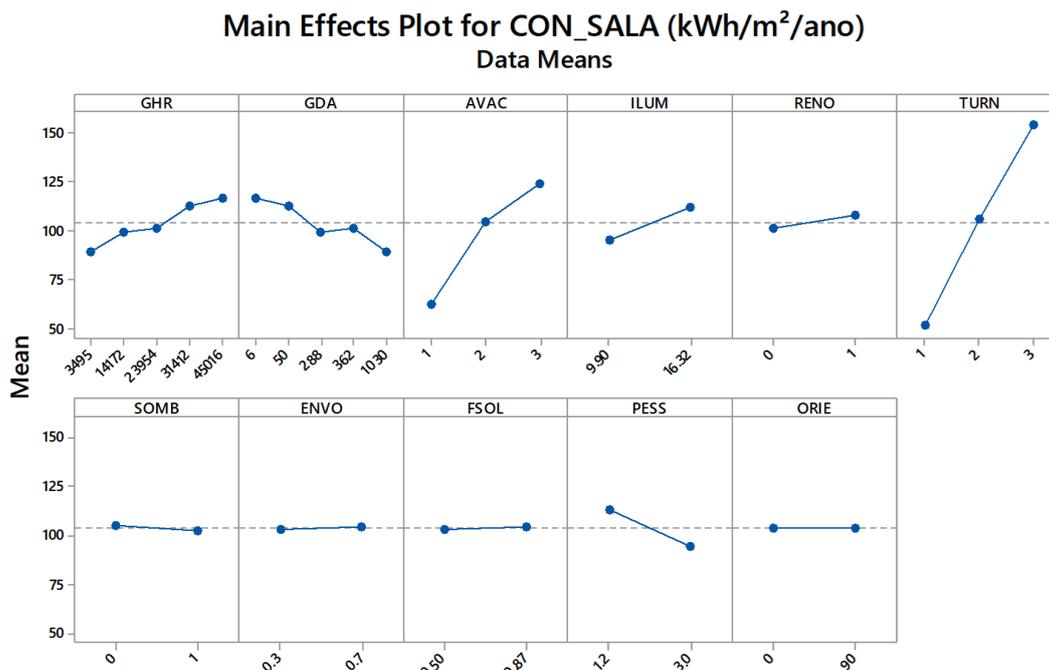


Figura 9 - Efeito dos parâmetros no consumo de energia.

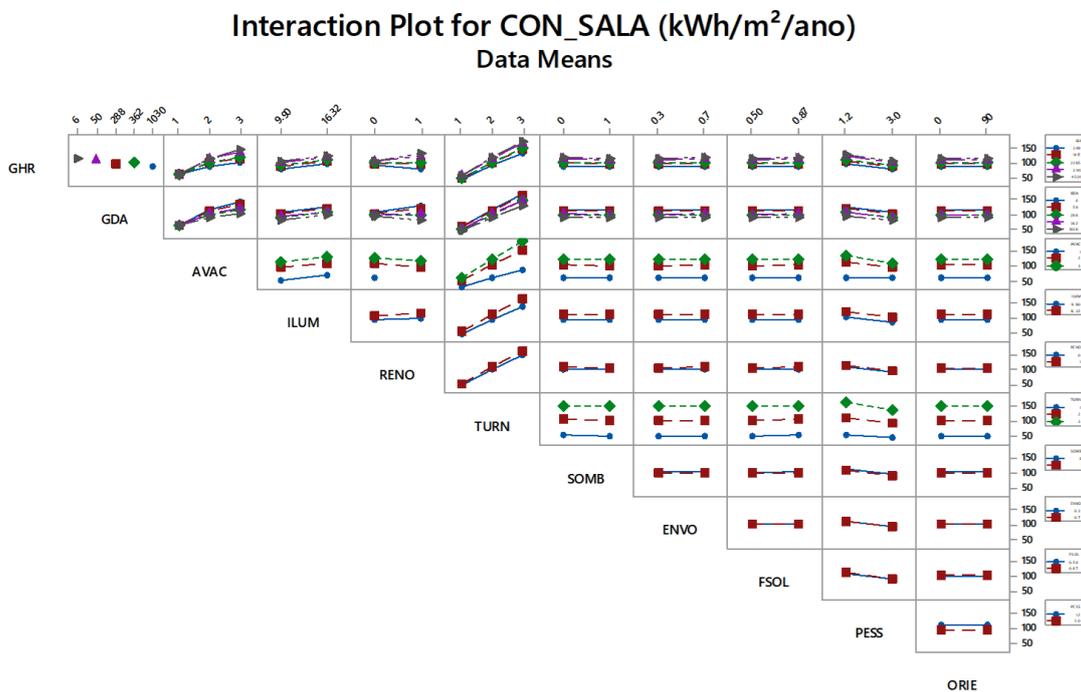


Figura 10 - Interação entre os parâmetros

6.1.2. SALAS DE ENSINO E PESQUISA COM COMPUTADORES

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

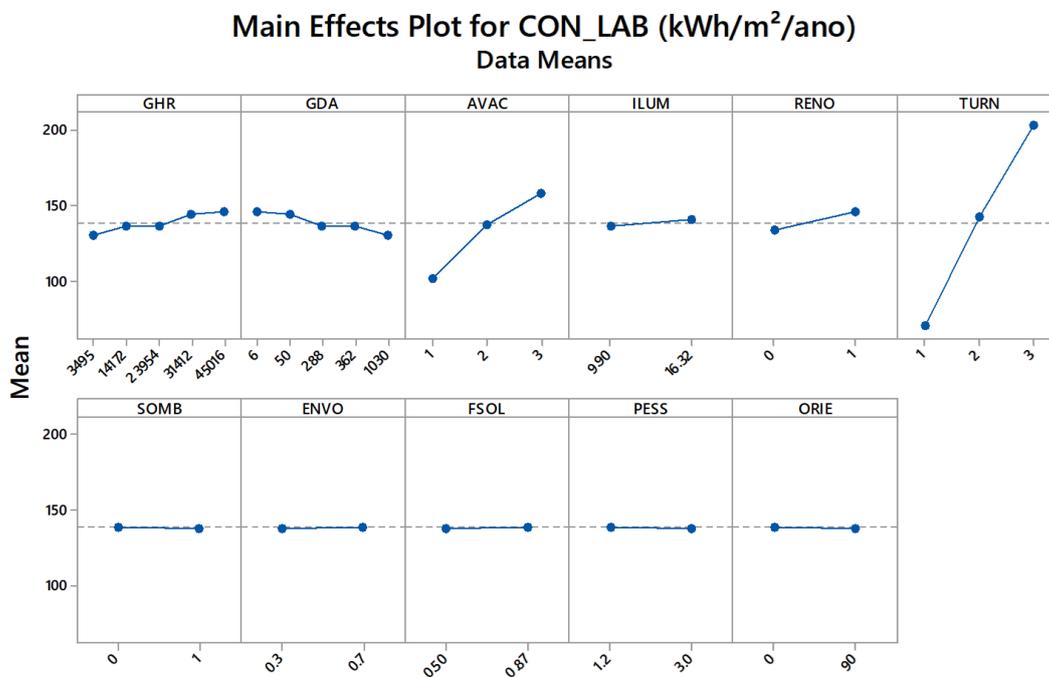


Figura 11 - Efeito dos parâmetros no consumo de energia

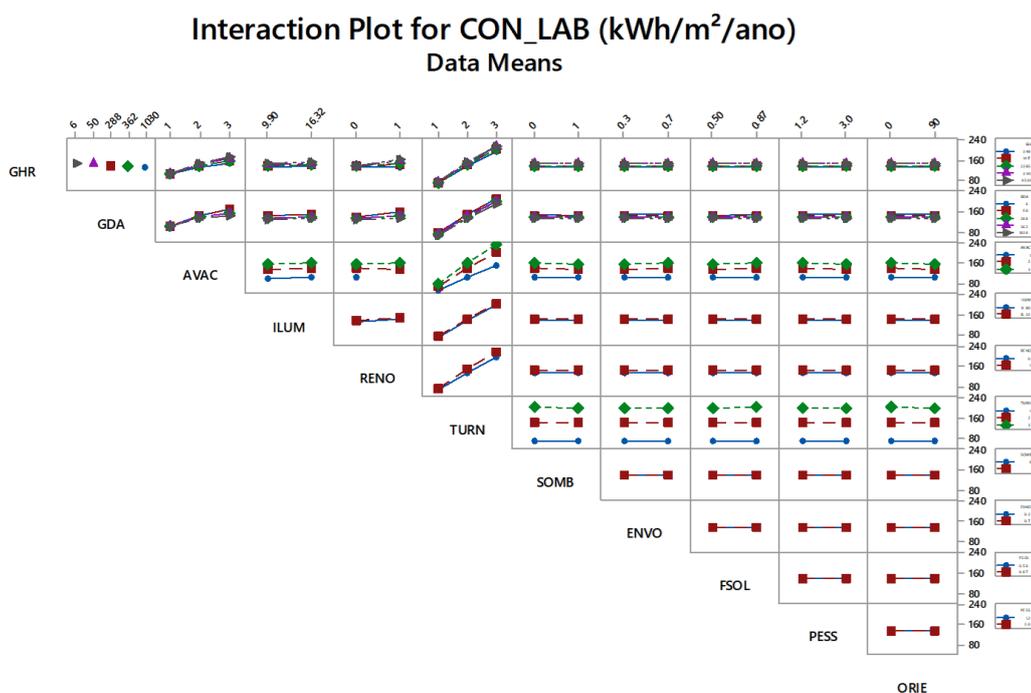


Figura 12 - Interação entre os parâmetros

6.1.3. DEMAIS ÁREAS

Por meio das Figuras 10 e 11, verifica-se que os parâmetros com variações mais significativas são o GHR, GDA, AVAC, ILUM, TURN. As variações dos parâmetros PESS, SOMB, ENVO, FSOL, ORIE, RENO tiveram um impacto pequeno no cálculo do consumo de energia.

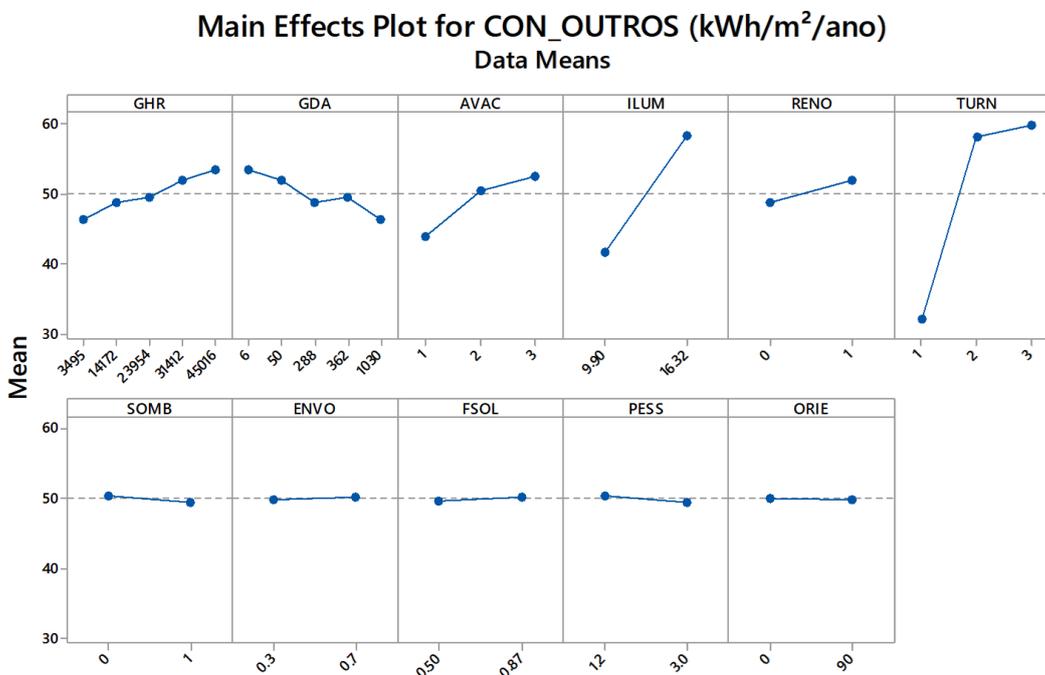


Figura 13 - Efeito dos parâmetros no consumo de energia

Interaction Plot for CON_OUTROS (kWh/m²/ano)
Data Means

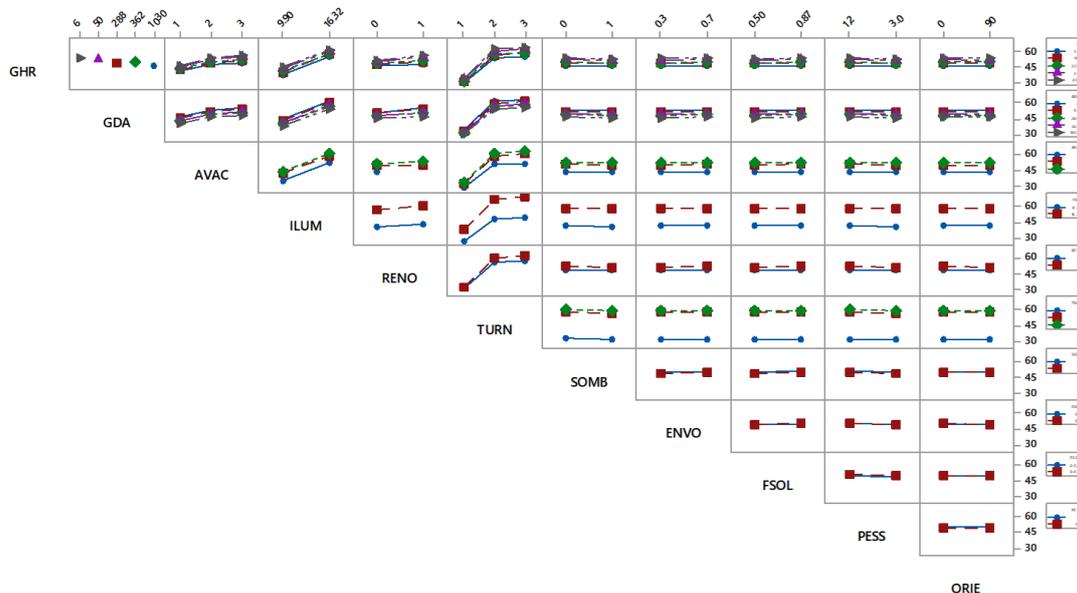


Figura 14 - Interação entre os parâmetros

6.1.4. GABINETE DOS PROFESSORES

Por meio das Figuras 18 e 19, verifica-se que os parâmetros com variações mais significativas são o GHR, GDA, AVAC, ILUM, TURN. As variações dos parâmetros PESS, SOMB, ENVO, FSOL, ORIE e RENO tiveram um impacto pequeno no cálculo do consumo de energia.

Main Effects Plot for Total End Uses kWh/m²/ano
Data Means

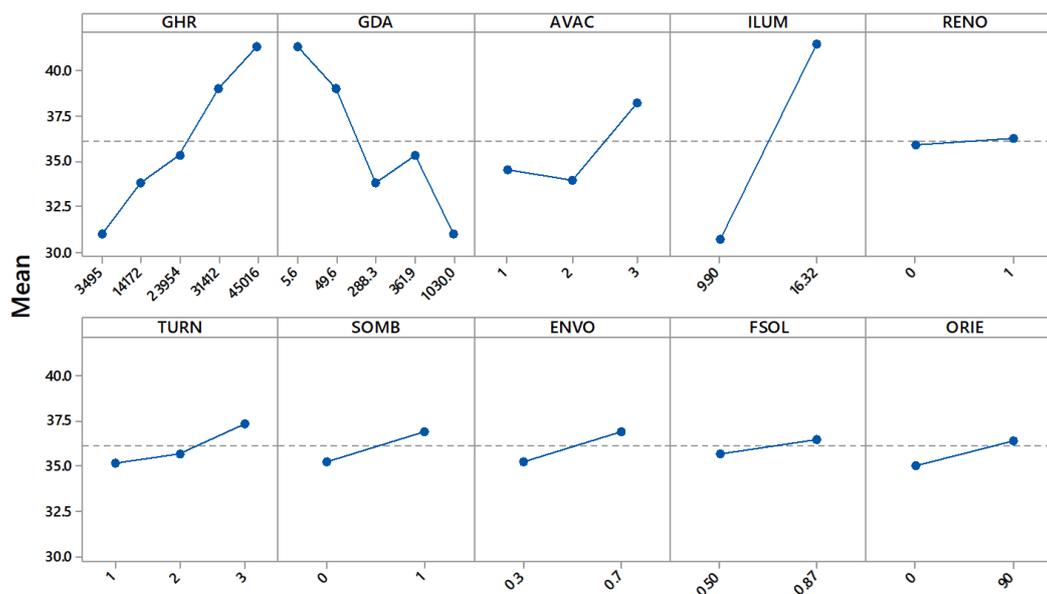


Figura 15 - Efeito dos parâmetros no consumo de energia

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

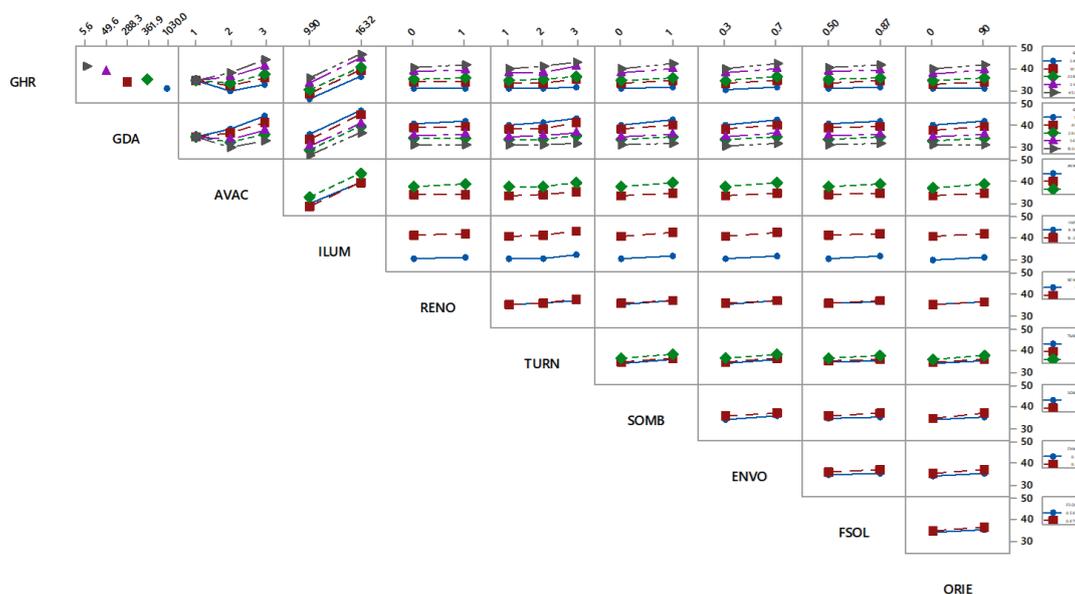


Figura 16 - Interação entre os parâmetros

6.2. ANÁLISE EM CIDADES COM GHR ACIMA DE 54 MIL

6.2.1. SALAS DE AULA

Por meio das Figuras 12 e 13, verifica-se que os parâmetros com variações mais significativas são o GHR, AVAC, ILUM, TURN, PESS e RENO. A variação dos parâmetros SOMB, ENVO, FSOL e ORIE tiveram um impacto pequeno no cálculo do consumo de energia.

Main Effects Plot for SALA [kWh/m²/ano]
Data Means

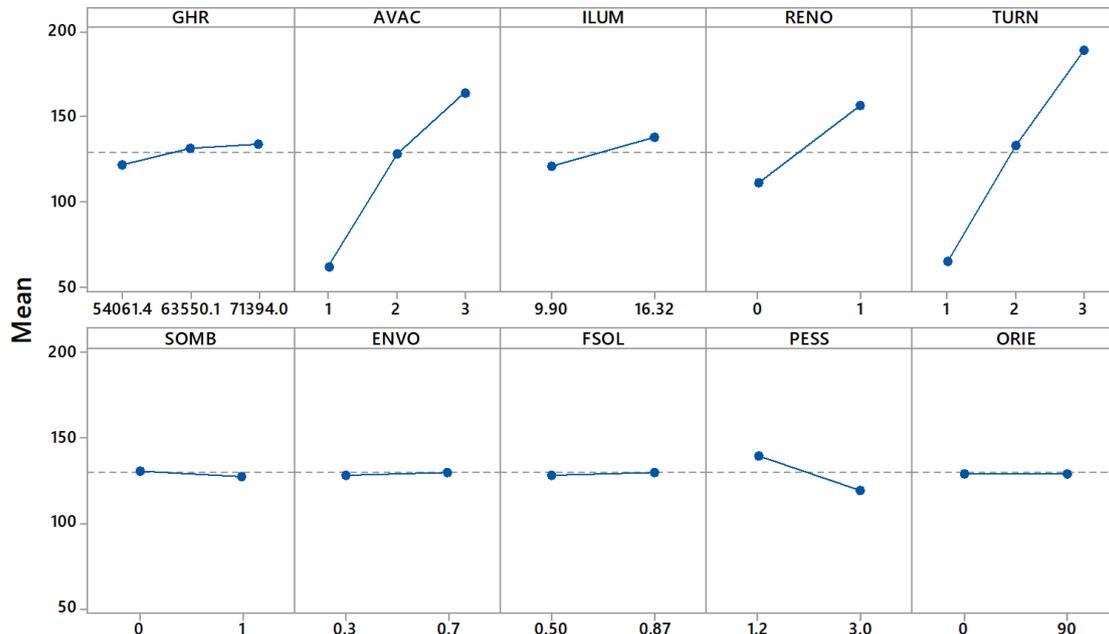


Figura 17 - Efeito dos parâmetros no consumo de energia

Interaction Plot for SALA [kWh/m²/ano]
Data Means

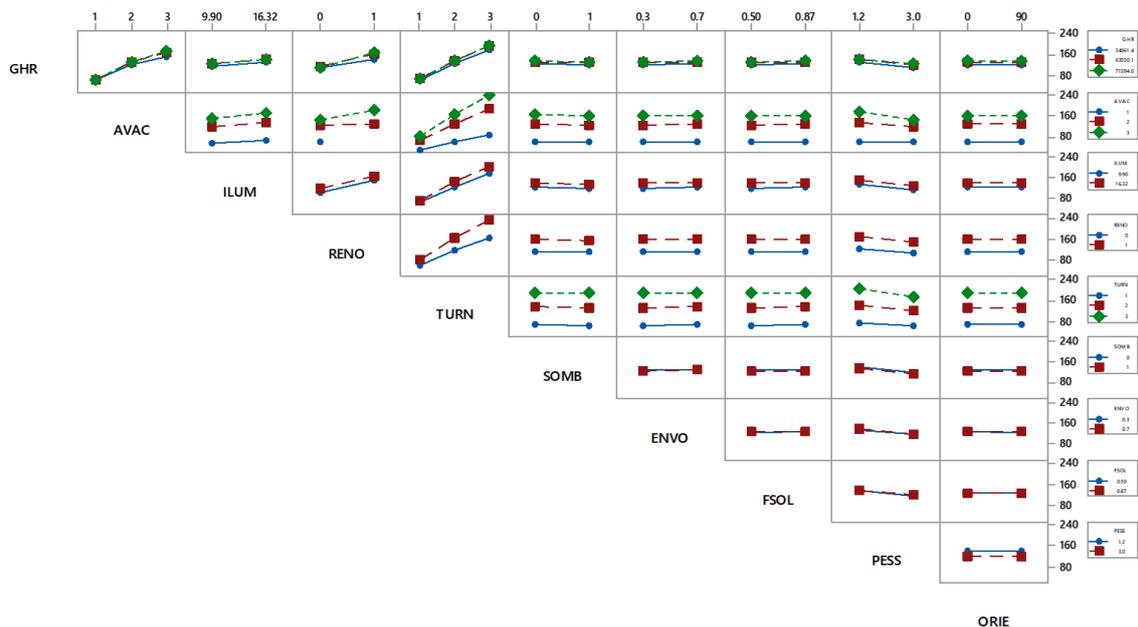


Figura 18 - Interação entre os parâmetros

6.2.2. SALAS DE ENSINO E PESQUISA COM COMPUTADORES

Por meio das Figuras 14 e 15, verifica-se que os parâmetros com variações mais significativas são o AVAC, TURN e RENO. As variações dos parâmetros GHR, ILUM, SOMB, ENVO, FSOL, PESS e ORIE tiveram um impacto pequeno no cálculo do consumo de energia.

Main Effects Plot for LAB [kWh/m²/ano] Data Means

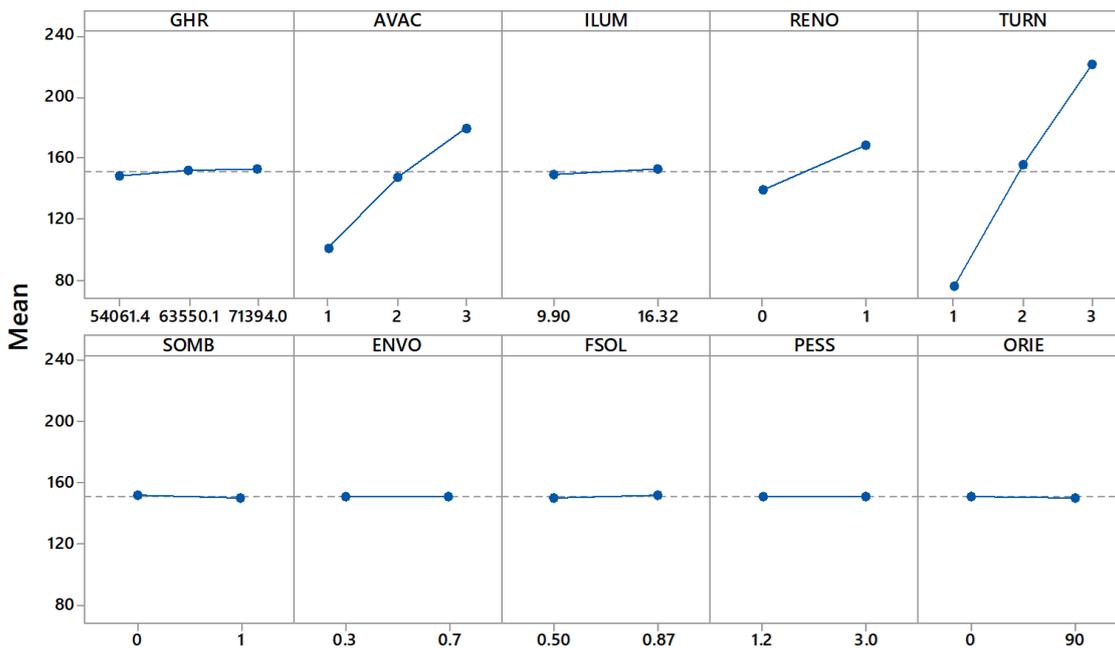


Figura 19 - Efeito dos parâmetros no consumo de energia

Interaction Plot for LAB [kWh/m²/ano] Data Means

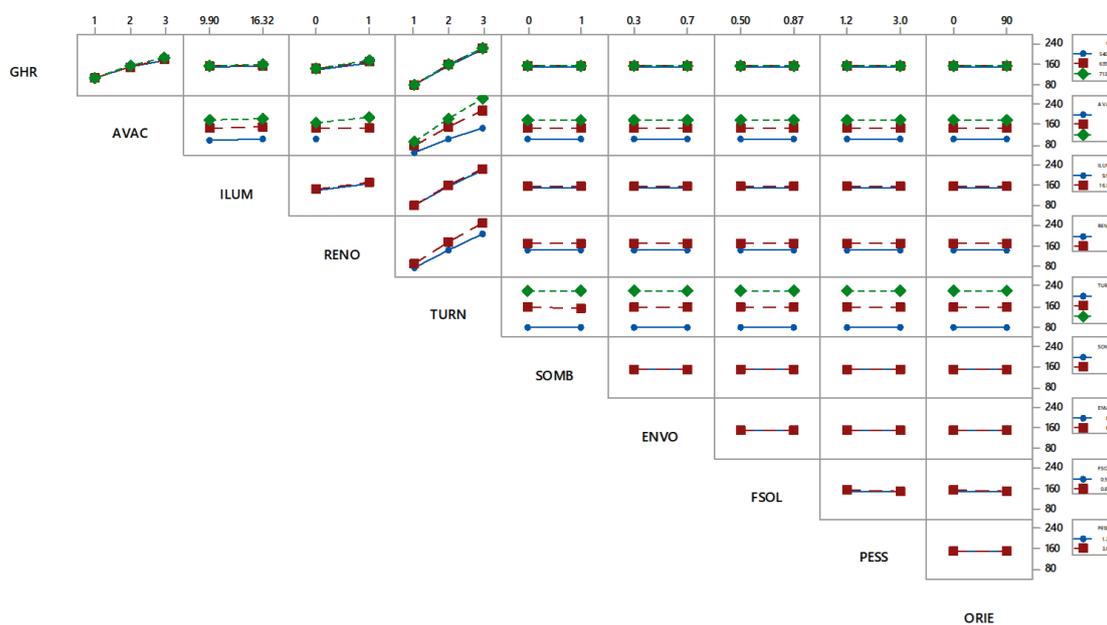


Figura 20 - Interação entre os parâmetros

6.2.3. DEMAIS ÁREAS

Por meio das Figuras 16 e 17, verifica-se que os parâmetros com variações mais significativas são o AVAC, TURN, RENO, ILUM e GHR. As variações dos parâmetros SOMB, ENVO, FSOL, PESS, ORIE tiveram um impacto pequeno no cálculo do consumo de energia.

Main Effects Plot for OUTROS [kWh/m²/ano]
Data Means

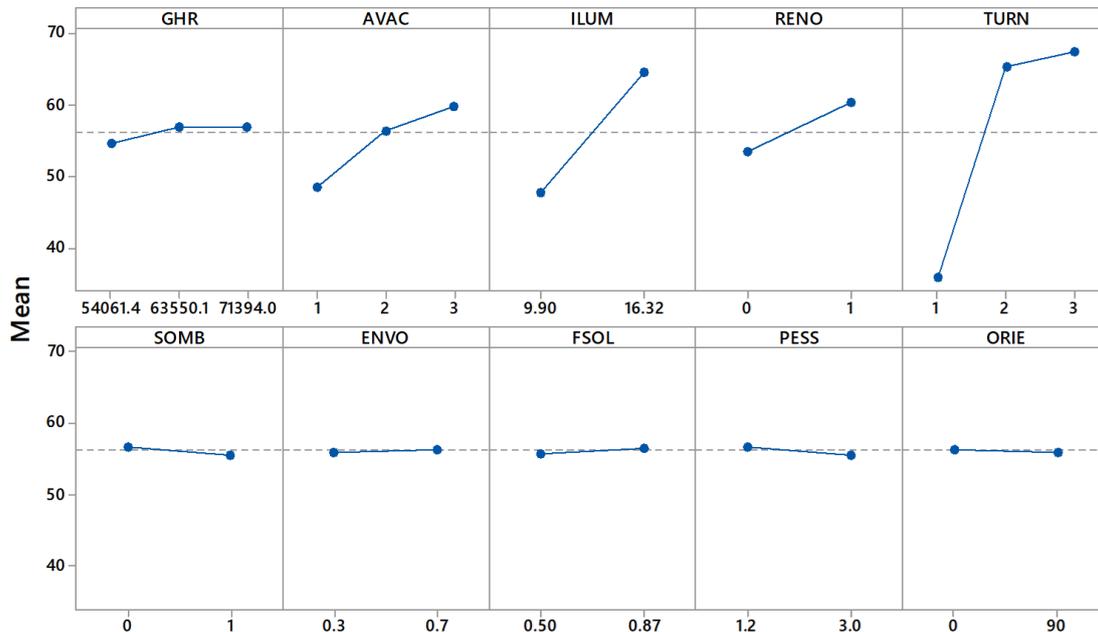


Figura 21 - Efeito dos parêmtros no consumo de energia

Interaction Plot for OUTROS [kWh/m²/ano]
Data Means

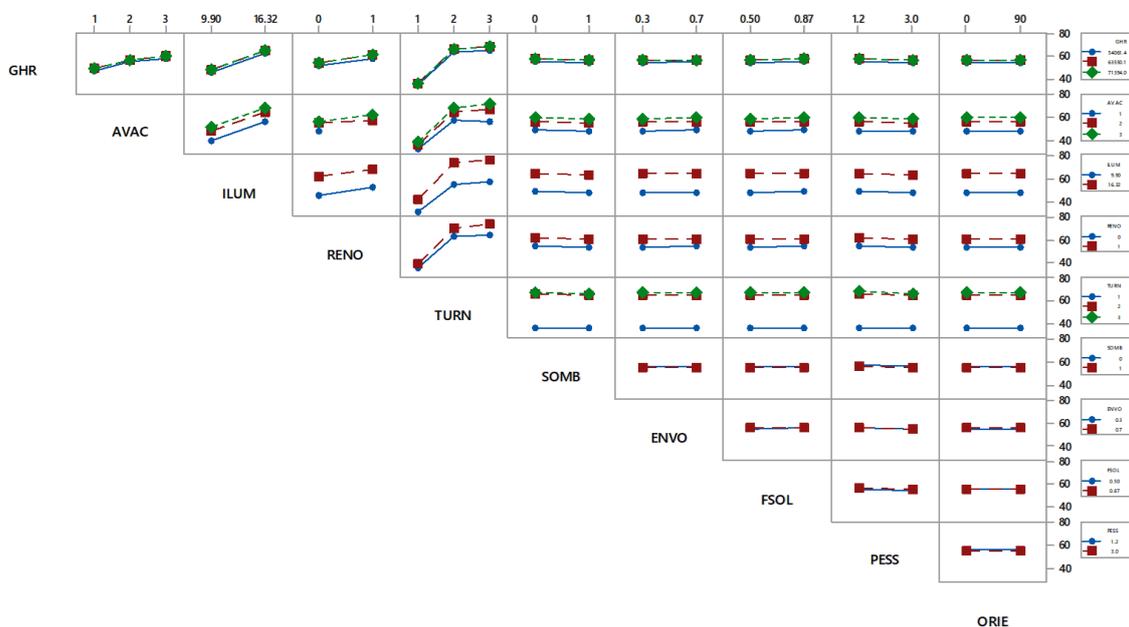


Figura 22 - Interação entre os parâmetros

6.2.4. GABINETE DOS PROFESSORES

Por meio das Figuras 20 e 21, verifica-se que os parâmetros com variações mais significativas são o AVAC, TURN, ILUM, GHR. As variações dos parâmetros SOMB, FSOL, RENO, ORIE e ENVO tiveram um impacto pequeno no cálculo do consumo de energia.

Main Effects Plot for Total End Uses kWh/m²/ano
Data Means

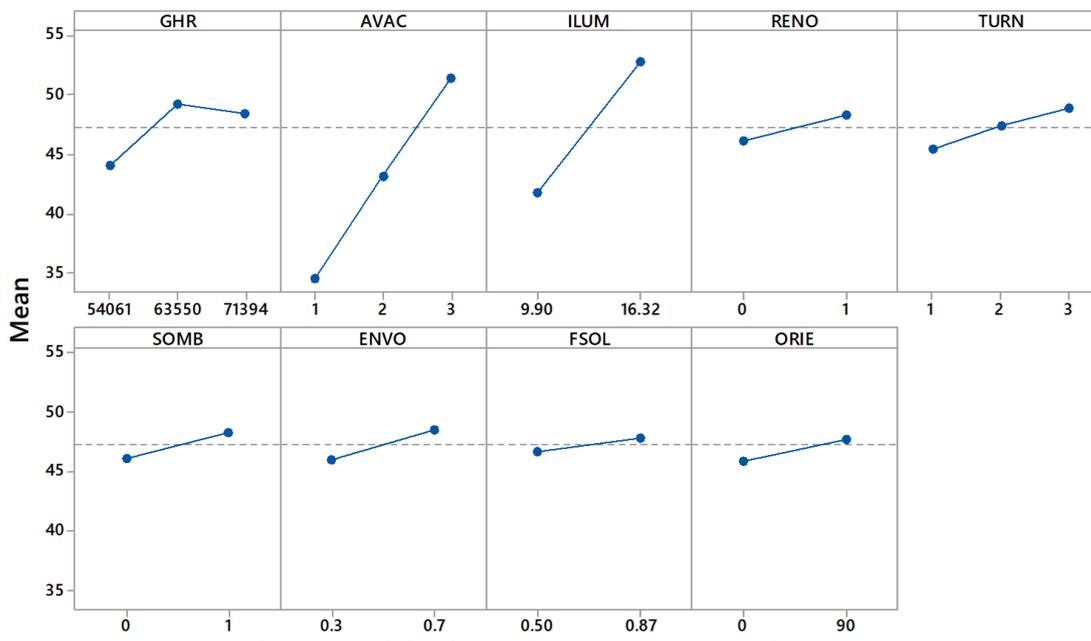


Figura 23 - Efeito dos parâmetros no consumo de energia

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

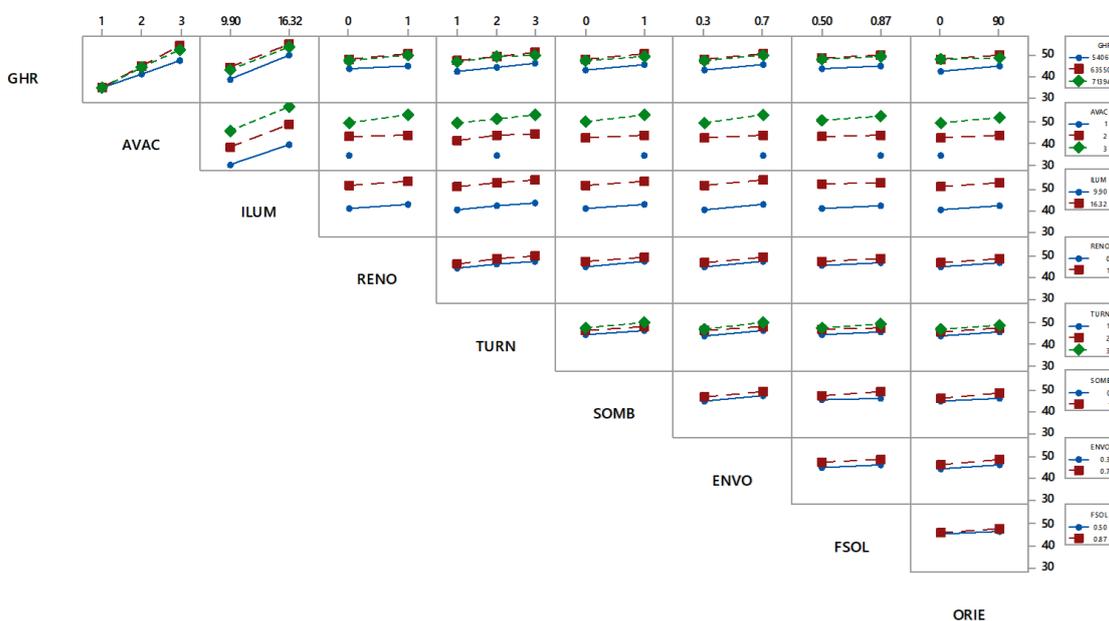


Figura 24 - Interação entre os parâmetros

6.3. ANÁLISE DO IMPACTO DOS PARÂMETROS SIGNIFICATIVOS

6.3.1. EDIFICAÇÃO GERAL

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, TURN, PESS, RENO e AVAC. No entanto, para esta análise de impacto sobre o consumo do sistema de condicionamento de ar nos gabinetes de professores, optou-se por incluir a observação da variação do parâmetro SOMB, uma vez que na análise do estoque observou-se a predominância da adoção de elementos de sombreamento nas fachadas.

O sistema de iluminação, além do consumo próprio de energia elétrica, também aumenta a carga térmica dentro da edificação, influenciando o consumo de energia do sistema de ar condicionado. A Tabela 8 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), por vezes reduzindo mais de 10% no consumo de resfriamento da edificação. Este parâmetro possui um impacto significativo no consumo de energia da edificação como um todo e por isso foi utilizado para construir a equação de *benchmark*.

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

Modelo base	AVAC: Sistema split (EER =3,25W/W)		
	Iluminação: Parâmetro analisado		
	Turno: manhã/tarde/noite		
	Densidade de pessoas: 3,0 m ² /aluno (sala de aula)		
	Envoltória: Upar: 2,5 / Ucob: 1,0 / α: 0,3		
	Orientação Solar: Norte		
	Vidro: com película (SHGC=0,5)		
	Sombreamento: com brise		
	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	8,46	6,60	-21,9%
São Paulo	23,64	20,47	-13,4%
Porto Alegre	28,50	25,53	-10,4%
Campinas	47,92	43,79	-8,6%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	54,45	50,04	-8,1%
Vitória	64,07	59,56	-7,0%
Recife	79,30	74,74	-5,7%
Fortaleza	85,33	80,73	-5,4%

A densidade de alunos presentes nas salas de aula também possui grande impacto no consumo do sistema de condicionamento ambiental. A carga térmica oriunda das pessoas que ocupam um ambiente pode ser significativa quando a densidade é alta. Uma quantidade 60% menor de alunos na sala de aula (variação de 1,2 m² por aluno para 3,0 m² por aluno), implica em uma redução significativa no consumo dos sistemas de ar-condicionado (Tabela 9). Portanto, esse parâmetro também foi selecionado como fator na equação de *benchmark*.

Tabela 9 – Impacto da densidade de alunos nas salas de aula no consumo do sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC: Sistema split (EER =3,25W/W)		
	Iluminação: PBE classe A (9,9 W/m ² , ref. Sala de aula)		
	Turno: manhã/tarde/noite		
	Densidade de pessoas: Parâmetro analisado		
	Envoltória: Upar: 2,5 / Ucob: 1,0 / α: 0,3		
	Orientação Solar: Leste		
	Vidro: com película (SHGC=0,5)		
	Sombreamento: com brise		
	Renovação de ar: ABNT 16401 - nível 2		
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Varição no consumo de Resfriamento
	Parâmetro analisado: Densidade de pessoas		
	1,2 m ² por aluno	3,0 m ² por aluno	
Campos do Jordão	17,57	6,49	-63,1%
São Paulo	37,01	20,41	-44,9%
Porto Alegre	40,79	25,44	-37,6%
Campinas	64,92	43,75	-32,6%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	72,19	49,95	-30,8%
Vitória	82,18	59,40	-27,7%
Recife	97,61	74,28	-23,9%
Fortaleza	104,23	80,49	-22,8%

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, foi incluído como parâmetro de entrada para o cálculo da equação de *benchmark*. A Tabela 10 apresenta a diferença no consumo de energia de acordo com a quantidade de turnos oferecidos.

Tabela 10 – Impacto do regime de turnos no sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC: Sistema split (EER =3,25W/W)		
	Iluminação: PBE classe A (9,9W/m ² , ref. Sala de aula)		
	Turno: Parâmetro analisado		
	Densidade de pessoas: 1,2 m ² /aluno (sala de aula)		
	Envoltória: Upar: 2,5 / Ucob: 1,0 / α: 0,3		
	Orientação Solar: Leste		
	Vidro: com película (SHGC=0,5)		
	Sombreamento: com brise		
	Renovação de ar: ABNT 16401 - nível 2		
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Varição no consumo de Resfriamento
	Parâmetro analisado: Turno		
	manhã/tarde/noite	manhã/noite	
Campos do Jordão	17,57	9,61	-45,3%
São Paulo	37,01	23,11	-37,6%
Porto Alegre	40,79	25,38	-37,8%

Campinas	64,92	41,14	-36,6%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	72,19	49,59	-31,3%
Vitória	82,18	57,56	-30,0%
Recife	97,61	70,03	-28,3%
Fortaleza	104,23	74,98	-28,1%

O próprio sistema de condicionamento de ar possui diversas tecnologias com eficiências energéticas distintas que impactam no consumo de energia total de uma edificação. A Tabela 11 ilustra a diferença no consumo de energia dos sistemas *Split*, mais comum e mais barato, e o sistema VRF, que apesar do custo maior de instalação, consome menos energia para manter uma temperatura mais estável no ambiente. Esta variável também foi utilizada para construir a equação de *benchmark*.

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

Modelo base	AVAC: Parâmetro analisado		Variação no consumo de Resfriamento
	Iluminação: PBE classe D (16,32W/m ² , ref. Sala de aula)		
	Turno: manhã/tarde/noite		
	Densidade de pessoas: 1,2 m ² /aluno (sala de aula)		
	Envoltória: Upar: 2,5 / Ucob: 1,0 / α: 0,7		
	Orientação Solar: Sul		
	Vidro: sem película (SHGC=0,87)		
	Sombreamento: sem brise		
	Renovação de ar: ABNT 16401 – nível 2		
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m ²] Parâmetro analisado: sistema AVAC		Variação no consumo de Resfriamento
	Split Individual	Central VRF	
Campos do Jordão	27,82	17,16	-38,3%
São Paulo	47,52	29,80	-37,3%
Porto Alegre	51,04	31,03	-39,2%
Campinas	77,20	46,44	-39,8%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	84,67	50,93	-39,9%
Vitória	95,72	56,73	-40,7%
Recife	113,52	65,13	-42,6%
Fortaleza	117,62	67,44	-42,7%

Outro fator que também impacta no consumo de energia do sistema de ar-condicionado é a renovação do ar interno da instalação. Apesar de este fator ser obrigatório por lei (nº 13.589, de 4 de janeiro de 2018), e devesse ser utilizado em todas as instalações, é possível perceber que em muitas edificações esse fator não é levado em consideração, seja por falta de recursos ou negligência. A Tabela 12 informa que, em climas mais frios, a utilização da renovação de ar propicia um consumo anual de energia do sistema de ar-condicionado 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. Esta variável serviu como calibração para o consumo do usuário final, que poderá avaliar sua instalação de acordo com o seu padrão de utilização, advertindo-se, no entanto, sobre a não conformidade com a legislação vigente.

Tabela 12 – Impacto da renovação de ar interno no consumo do sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC: Sistema split (EER =3,25W/W)		
	Iluminação: PBE classe A (9,9W/m ² , ref. Sala de aula)		
	Turno: manhã/tarde/noite		
	Densidade de pessoas: 3,0 m ² /alunos (sala de aula)		
	Envoltória: Upar: 2,5 / Ucob: 1,0 / α: 0,3		
	Orientação Solar: Leste		
	Vidro: com película (SHGC=0,5)		
	Sombreamento: com brise		
	Renovação de ar: Parâmetro analisado		
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Varição no consumo de Resfriamento
	Parâmetro analisado: Renovação de ar		
	com renovação	sem renovação	
Campos do Jordão	6,49	22,54	247,3%
São Paulo	20,41	28,81	41,1%
Porto Alegre	25,44	29,64	16,5%
Campinas	43,75	35,16	-19,6%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	49,95	37,53	-24,9%
Vitória	59,40	39,64	-33,3%
Recife	74,28	43,95	-40,8%
Fortaleza	80,49	44,26	-45,0%

6.3.2. GABINETES DOS PROFESSORES

Quanto ao modelo de gabinetes de professores, a iluminação também se mostrou um fator com grande impacto no consumo de energia. Além do impacto direto no consumo de energia elétrica, também há o aumento da carga térmica dentro da edificação, o que influencia no consumo de energia do sistema de ar-condicionado. A Tabela 13 ilustra o impacto no consumo de energia apenas do sistema de ar-condicionado ao substituir o sistema de iluminação no padrão PBE classe D (19,04W/m²) para um PBE classe A (10,00W/m²), em alguns casos reduzindo mais de 10% no consumo de resfriamento. Este parâmetro apresentou um impacto significativo no consumo de energia da edificação, e foi utilizado como fator para construção da equação de *benchmark*.

Tabela 13 – Impacto do sistema de iluminação no sistema de condicionamento de ar dos gabinetes dos professores

Modelo base	AVAC: Sistema split (EER =3,4W/W)		
	Iluminação: Parâmetro analisado		
	Turno: tarde		
	Sombreamento: sem brise		
	Envoltória: Upar: 2,5 / Ucob: 1,0 / α: 0,7		
	Vidro: sem película (SHGC=0,87)		
	Orientação Solar: Norte		
	Renovação de ar: ABNT 16401 - nível 2		
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Varição no consumo de Resfriamento
	Parâmetro analisado: Iluminação		
	PBE classe D	PBE classe A	
Campos do Jordão	9,11	7,53	-17,3%
São Paulo	15,00	13,29	-11,4%
Porto Alegre	16,85	15,20	-9,8%
Campinas	24,66	22,75	-7,8%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	27,44	25,56	-6,8%
Vitória	31,43	29,58	-5,9%
Recife	37,20	35,36	-4,9%
Fortaleza	33,80	31,91	-5,6%

A Tabela 14 evidencia que os brises nas janelas causam um impacto significativo no consumo de energia dos sistemas de ar-condicionado, por meio da redução da incidência de luz solar no interior das salas, reduzindo assim o ganho de carga térmica na edificação. Observa-se que a utilização de brises pode representar uma redução significativa (até 45,7%) no consumo de ar-condicionado em uma edificação. Dessa forma, este parâmetro foi considerado como um fator para a construção da equação de *benchmark*.

Tabela 14 – Impacto da utilização de brises nas janelas dos gabinetes dos professores no consumo do sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC: Sistema split (EER =3,4W/W)		
	Iluminação: PBE classe A		
	Turno: tarde		
	Sombreamento: Parâmetro analisado		
	Envoltória: Upar: 2,5 / Ucob: 1,0 / α : 0,7		
	Vidro: sem película (SHGC=0,87)		
	Orientação Solar: Norte		
	Renovação de ar: ABNT 16401 - nível 2		
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Variação no consumo de Resfriamento
	Parâmetro analisado: Sombreamento		
	Sem brise	Com brise	
Campos do Jordão	9,11	4,94	-45,7%
São Paulo	15,00	10,53	-29,8%
Porto Alegre	16,85	12,37	-26,5%
Campinas	24,66	19,17	-22,3%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	27,44	21,66	-21,0%
Vitória	31,43	25,27	-19,6%
Recife	37,20	31,66	-14,9%
Fortaleza	33,80	29,68	-12,2%

O período de utilização da sala também apresentou um impacto no consumo de energia. Uma vez que as temperaturas mais altas do dia ocorrem no período da tarde, espera-se que o consumo do sistema de ar-condicionado nessas horas seja mais elevado. A Tabela 15 apresenta a diferença no consumo de energia entre a utilização da sala no período da manhã e no período da tarde.

Tabela 15 – Impacto do regime de turnos no consumo de condicionamento de ar nos gabinetes dos professores

Modelo base	AVAC: Sistema split (EER =3,4W/W)		
	Iluminação: PBE classe A		
	Turno: Parâmetro analisado		
	Sombreamento: sem brise		
	Envoltória: Upar: 2,5 / Ucob: 1,0 / α : 0,7		
	Vidro: sem película (SHGC=0,87)		
	Orientação Solar: Norte		
	Renovação de ar: ABNT 16401 - nível 2		
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Variação no consumo de Resfriamento
	Parâmetro analisado: Turno		
	Tarde	Manhã	
Campos do Jordão	9,11	6,15	-32,4%
São Paulo	15,00	11,03	-26,4%
Porto Alegre	16,85	12,57	-25,4%
Campinas	24,66	18,15	-26,4%

Rio de Janeiro (Vila Militar)	27,44	23,33	-15,0%
Vitória	31,43	27,67	-12,0%
Recife	37,20	34,13	-8,2%
Fortaleza	33,80	31,69	-6,2%

O próprio sistema de condicionamento de ar possui diversas tecnologias com eficiências energéticas distintas e impactam no consumo de energia total de uma edificação. A Tabela 16 apresenta a diferença no consumo de energia do sistema individual *Split*, e o sistema central VRF. Este parâmetro também foi utilizado para construir a equação de *benchmark*.

Tabela 16 - Impacto do tipo de sistema de condicionamento de ar no consumo do sistema de condicionamento de ar nos gabinetes dos professores

Modelo base	AVAC: Parâmetro analisado		
	Iluminação: PBE classe A		
	Turno: tarde		
	Sombreamento: sem brise		
	Envoltória: Upar: 2,5 / Ucob: 1,0 / α : 0,7		
	Vidro: sem película (SHGC=0,87)		
	Orientação Solar: Norte		
	Renovação de ar: ABNT 16401 - nível 2		
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Varição no consumo de Resfriamento
	Parâmetro analisado: Sistema AVAC		
	Split individual	VRF Central	
Campos do Jordão	9,11	6,54	-28,2%
São Paulo	15,00	10,98	-26,8%
Porto Alegre	16,85	11,49	-31,8%
Campinas	24,66	17,03	-30,9%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	27,44	18,23	-33,6%
Vitória	31,43	20,20	-35,7%
Recife	37,20	22,35	-39,9%
Fortaleza	33,80	21,18	-37,3%

7. EQUAÇÃO DE REGRESSÃO

7.1. EDIFICAÇÃO GERAL

Para o desenvolvimento das equações para predição do consumo de energia da tipologia **Universidade e Instituição de Ensino Técnico**, 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*.

A equações foram separadas para cada modelo (edifício geral e gabinetes dos professores). O modelo do edifício geral foi segmentado em salas de aulas, em salas de ensino e pesquisa com computadores e em demais áreas para que o usuário possa adequar o modelo à sua realidade de acordo com a área ocupada por tais tipos de ambientes. Além disso, foram separados também em cidades com necessidade, tanto que aquecimento (GHR menores que 54.000) quanto resfriamento ambiental, e aquelas com demanda apenas de resfriamento (GHR maiores ou iguais a 54.000). Em suma, foram construídas 2 equações para o modelo de edifício geral e 2 para o modelo de gabinete dos professores.

7.1.1. CIDADES COM GHR ABAIXO DE 54 MIL

Análise dos parâmetros – Salas de Aula

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

	-----Step 1-----		-----Step 2-----		-----Step 3-----		-----Step 4-----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	103.811		103.811		103.811		103.811	
TURN	41.842	0.000	41.842	0.000	41.842	0.000	41.842	0.000
AVAC			21.921	0.000	21.921	0.000	21.921	0.000
PESS					-9.380	0.000	-9.380	0.000
logGDA							-9.372	0.000
ILUM								
logGHR								
S		32.5813		24.1046		22.2062		20.1321
R-sq		62.26%		79.35%		82.48%		85.60%
R-sq(adj)		62.25%		79.34%		82.46%		85.59%
R-sq(pred)		62.23%		79.32%		82.44%		85.57%
Mallows' Cp		10723.61		3698.88		2414.30		1131.77
	-----Step 5-----		-----Step 6-----					
	Coef	P	Coef	P				
Constant	103.811		103.811					
TURN	41.842	0.000	41.842	0.000				
AVAC	21.921	0.000	21.921	0.000				
PESS	-9.380	0.000	-9.380	0.000				
logGDA	-9.372	0.000	-5.608	0.000				
ILUM	8.391	0.000	8.391	0.000				
logGHR			4.577	0.000				
S		18.3002		18.1158				
R-sq		88.10%		88.34%				
R-sq(adj)		88.09%		88.33%				
R-sq(pred)		88.07%		88.31%				
Mallows' Cp		104.07		7.00				

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	6	11922108	1987018	6054.62	0.000
logGHR	1	32513	32513	99.07	0.000
logGDA	1	48821	48821	148.76	0.000
AVAC	1	2306050	2306050	7026.74	0.000
ILUM	1	337930	337930	1029.70	0.000
TURN	1	8401823	8401823	25601.09	0.000
PESS	1	422231	422231	1286.58	0.000
Error	4793	1572978	328		
Lack-of-Fit	173	1156033	6682	74.04	0.000
Pure Error	4620	416944	90		
Total	4799	13495086			

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
18.1158	88.34%	88.33%	88.31%

Equação de Regressão

Consumo_Salas_de_Aula [kWh/m²/ano] = -110.90 + 11.82 log_GHR - 7.049 log_GDA + 29.290 AVAC + 51.240 TURN + 2.6139 ILUM - 10.421 PESS

Análise das variáveis – Salas de ensino e pesquisa com computadores

Candidate terms: logGHR, logGDA, AVAC, TURN, RENO

	-----Step 1-----		-----Step 2-----		-----Step 3-----		-----Step 4-----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	138.510		138.510		138.510		138.510	
TURN	54.474	0.000	54.474	0.000	54.474	0.000	54.474	0.000
AVAC			20.326	0.000	20.326	0.000	20.326	0.000
logGDA					-5.356	0.000	-3.156	0.000
logGHR							2.675	0.000
RENO								
S		23.9528		12.6701		11.4832		11.3831
R-sq		83.80%		95.47%		96.28%		96.34%
R-sq(adj)		83.80%		95.47%		96.28%		96.34%
R-sq(pred)		83.79%		95.46%		96.27%		96.33%
Mallows' Cp		16464.64		1153.50		92.36		8.59
	-----Step 5-----							
	Coef	P						
Constant	138.510							
TURN	54.474	0.000						
AVAC	20.448	0.000						
logGDA	-3.156	0.000						
logGHR	2.675	0.000						
RENO	-0.372	0.032						
S		11.3788						
R-sq		96.35%						
R-sq(adj)		96.34%						
R-sq(pred)		96.34%						
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	16372594	3274519	25290.18	0.000
logGHR	1	11106	11106	85.77	0.000
logGDA	1	15458	15458	119.39	0.000
AVAC	1	1791568	1791568	13836.87	0.000
TURN	1	14240528	14240528	109984.26	0.000
RENO	1	594	594	4.59	0.032
Error	4794	620717	129		
Lack-of-Fit	69	587609	8516	1215.37	0.000
Pure Error	4725	33108	7		
Total	4799	16993311			

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
11.3788	96.35%	96.34%	96.34%

Equação de Regressão

Consumo_Salas Ensino e Pesquisa com computadores [kWh/m²/ano] = -75.73 + 6.909 log_GHR - 3.967 log_GDA + 27.322 AVAC + 66.710 TURN - 0.760 RENO

Análise das variáveis – Demais ambientes

Candidate terms: logGHR, logGDA, AVAC, TURN, ILUM, TURN*TURN

	-----Step 1-----		-----Step 2-----		-----Step 3-----		-----Step 4-----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	50.034		50.034		58.141		58.1415	
TURN	11.393	0.000	11.393	0.000	11.3927	0.000	11.3927	0.000
ILUM			8.421	0.000	8.4206	0.000	8.4206	0.000
TURN*TURN					-8.109	0.000	-8.1094	0.000
AVAC							2.9858	0.000
logGHR								
logGDA								
S		11.3085		7.54803		4.90811		3.89515
R-sq		50.38%		77.90%		90.66%		94.12%
R-sq(adj)		50.37%		77.89%		90.65%		94.11%
R-sq(pred)		50.34%		77.87%		90.64%		94.10%
Mallows' Cp		61517.52		24743.18		7694.47		3072.66
	-----Step 5-----		-----Step 6-----					
	Coef	P	Coef	P				
Constant	58.1415		58.1415					
TURN	11.3927	0.000	11.3927	0.000				
ILUM	8.4206	0.000	8.4206	0.000				
TURN*TURN	-8.1094	0.000	-8.1094	0.000				
AVAC	2.9858	0.000	2.9858	0.000				
logGHR	2.3014	0.000	1.1610	0.000				
logGDA			-1.3865	0.000				
S		3.14216		3.04182				
R-sq		96.17%		96.41%				
R-sq(adj)		96.17%		96.41%				
R-sq(pred)		96.16%		96.40%				
Mallows' Cp		327.50		7.00				

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	6	1192109	198685	21473.23	0.000
logGHR	1	2092	2092	226.15	0.000
logGDA	1	2984	2984	322.50	0.000
AVAC	1	42783	42783	4623.81	0.000
TURN	1	622880	622880	67318.86	0.000
ILUM	1	340280	340280	36776.34	0.000
TURN*TURN	1	157765	157765	17050.71	0.000
Error	4793	44348	9		
Lack-of-Fit	83	37953	457	336.77	0.000
Pure Error	4710	6395	1		
Total	4799	1236458			

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3.04182	96.41%	96.41%	96.40%

Equação de Regressão

$$\text{Consumo_Outros [kWh/m}^2\text{/ano]} = -70.65 + 2.999 \log_GHR - 1.7428 \log_GDA + 3.9895 \text{AVAC} + 62.598 \text{TURN} + 2.6230 \text{ILUM} - 12.1616 \text{TURN*TURN}$$

EQUAÇÃO FINAL PARA CIDADES COM GHR MENORES QUE 54 MIL

$$\text{CONSUMO FINAL [kWh/m}^2\text{/ano]} = (((-110,90 + 11,82 \log GHR - 7,049 \log GDA + 29,290 \text{AVAC} + 51,240 \text{TURN} + 2,6139 \text{ILUM} - 10,421 \text{PESS}) * \text{ÁREA}_{\text{salas}}) + (-75,73 + 6,909 \log GHR - 3,967 \log GDA + 27,322 \text{AVAC} + 66,710 \text{TURN} - 0,760 \text{RENO}) * \text{ÁREA}_{\text{salas comp.}}) + ((-70,65 + 2,999 \log GHR - 1,7428 \log GDA + 3,9895 \text{AVAC} + 62,598 \text{TURN} + 2,6230 \text{ILUM} - 12,1616 \text{TURN}^2) * \text{ÁREA}_{\text{outros}}) / \text{ÁREA}_{\text{total}}$$

Em que:

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

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

AVAC – Tipo de sistema de condicionamento de ar (1- Ventilador, 2 - Central VRF, 3 - Split Individual), sendo em 1. considerados ventiladores em salas de aula e split nas salas administrativas;

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

TURN – Turno (1- noite, 2- manhã/noite, 3- manhã/tarde/noite);

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

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

ÁREA_{salas} – Área total dos ambientes de sala de aula;

ÁREA_{salas comp.} – Área total das salas de ensino e pesquisa com computadores;

ÁREA_{outros} – Demais áreas da universidade, exceto as áreas de gabinetes de professores;

ÁREA_{total} – Somatória das três áreas citadas anteriormente (salas de aulas, salas de ensino e pesquisa com computadores e outros, exceto áreas de gabinetes de professores).

7.1.2. CIDADES COM GHR ACIMA DE 54 MIL

Análise das variáveis – Sala de Aula

	-----Step 1-----		-----Step 2-----		-----Step 3-----		-----Step 4-----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	4.95		-101.98		-100.28		-76.54	
TURN	62.22	0.000	62.218	0.000	62.218	0.000	62.218	0.000
AVAC			48.604	0.000	43.509	0.000	43.509	0.000
RENO					23.78	0.000	23.778	0.000
PESS							-11.301	0.000
ILUM								
log_GHR								
S		45.7865		27.7997		25.5297		23.4170
R-sq		55.19%		83.49%		86.08%		88.29%
R-sq(adj)		55.18%		83.48%		86.07%		88.28%
R-sq(pred)		55.13%		83.45%		86.04%		88.25%
Mallows' Cp		10483.77		2049.27		1278.62		620.87

	-----Step 5-----		-----Step 6-----	
	Coef	P	Coef	P
Constant	-111.44		-584.7	
TURN	62.218	0.000	62.218	0.000
AVAC	43.509	0.000	43.509	0.000
RENO	23.778	0.000	23.778	0.000
PESS	-11.301	0.000	-11.301	0.000
ILUM	2.662	0.000	2.662	0.000
log_GHR			98.67	0.000
S		21.8033		21.2512
R-sq		89.85%		90.36%
R-sq(adj)		89.84%		90.34%
R-sq(pred)		89.81%		90.31%
Mallows' Cp		157.27		7.00

Análise de variância

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	6	12168441	2028074	4490.72	0.000
log_GHR	1	68769	68769	152.27	0.000
AVAC	1	2725958	2725958	6036.04	0.000
ILUM	1	210272	210272	465.60	0.000
PESS	1	297951	297951	659.75	0.000
TURN	1	7432468	7432468	16457.57	0.000
RENO	1	348939	348939	772.65	0.000
Error	2873	1297487	452		
Lack-of-Fit	173	1276102	7376	931.33	0.000
Pure Error	2700	21385	8		
Total	2879	13465928			

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
21.2512	90.36%	90.34%	90.31%

Equação de Regressão

$$\text{Consumo_Salas_de_Aula [kWh/m}^2\text{/ano]} = -584.7 + 98.67 \log_GHR + 43.509 \text{ AVAC} + 2.662 \text{ ILUM} - 11.301 \text{ PESS} + 62.218 \text{ TURN} + 23.778 \text{ RENO}$$

Análise das variáveis – Salas de ensino e pesquisa com computadores

	-----Step 1-----		-----Step 2-----		-----Step 3-----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	7.14		-76.34		-75.511	
TURN	72.142	0.000	72.142	0.000	72.142	0.000
AVAC			37.948	0.000	35.450	0.000
RENO					11.655	0.000
S	31.8754		14.4615		13.4187	
R-sq	77.36%		95.34%		95.99%	
R-sq (adj)	77.35%		95.34%		95.99%	
R-sq (pred)	77.33%		95.33%		95.98%	
Mallows' Cp	13363.91		467.56		4.00	

Análise de variância

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	12398833	4132944	22953.13	0.000
TURN	1	9992524	9992524	55495.47	0.000
RENO	1	83829	83829	465.56	0.000
AVAC	1	1809679	1809679	10050.41	0.000
Error	2876	517853	180		
Lack-of-Fit	11	466392	42399	2360.50	0.000
Pure Error	2865	51461	18		
Total	2879	12916686			

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
13.4187	95.99%	95.99%	95.98%

Equação de Regressão

Consumo_Salas ensino e pesquisa com computadores [kWh/m²/ano] = -75.511 + 72.142 TURN + 11.655 RENO + 35.450 AVAC

Análise das variáveis – Demais áreas

	-----Step 1-----		-----Step 2-----		-----Step 3-----		-----Step 4-----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	39.488		-20.92		-55.494		-67.267	
TURN^2	3.5845	0.000	-13.676	0.000	-13.676	0.000	-13.676	0.000
TURN			70.48	0.000	70.479	0.000	70.479	0.000
ILUM					2.6371	0.000	2.6371	0.000
AVAC							5.3512	0.000
RENO								
log_GHR								
S	13.0747		10.1664		5.62455		3.94753	
R-sq	45.02%		66.77%		89.83%		94.99%	
R-sq (adj)	45.00%		66.75%		89.82%		94.99%	
R-sq (pred)	44.96%		66.70%		89.80%		94.98%	
Mallows' Cp	47976.56		27860.96		6532.19		1760.68	
	-----Step 5-----		-----Step 6-----					
	Coef	P	Coef	P				
Constant	-66.925		-163.76					
TURN^2	-13.676	0.000	-13.676	0.000				
TURN	70.479	0.000	70.479	0.000				
ILUM	2.6371	0.000	2.6371	0.000				
AVAC	4.3260	0.000	4.3260	0.000				
RENO	4.784	0.000	4.784	0.000				
log_GHR			20.19	0.000				
S	3.26698		3.11044					
R-sq	96.57%		96.89%					
R-sq (adj)	96.57%		96.89%					
R-sq (pred)	96.56%		96.88%					
Mallows' Cp	302.55		7.00					

Análise de variância

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	6	867120	144520	14937.72	0.000
TURN^2	1	119694	119694	12371.70	0.000
TURN	1	194634	194634	20117.60	0.000
RENO	1	14127	14127	1460.13	0.000
ILUM	1	206372	206372	21330.77	0.000
AVAC	1	26948	26948	2785.38	0.000
log_GHR	1	2879	2879	297.55	0.000
Error	2873	27796	10		
Lack-of-Fit	83	24855	299	284.12	0.000
Pure Error	2790	2941	1		
Total	2879	894916			

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3.11044	96.89%	96.89%	96.88%

Equação de Regressão

$$\text{Consumo_Outros [kWh/m}^2\text{/ano]} = -163.76 - 13.676 \text{ TURN}^2 + 70.479 \text{ TURN} + 4.784 \text{ RENO} + 2.6371 \text{ ILUM} + 4.3260 \text{ AVAC} + 20.19 \text{ log_GHR}$$

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

$$\text{CONSUMO FINAL [kWh/m}^2\text{/ano]} = (((-584,7 + 98,67 \text{ logGHR} + 43,509 \text{ AVAC} + 2,662 \text{ ILUM} - 11,301 \text{ PESS} + 62,218 \text{ TURN} + 23,778 \text{ RENO}) * \text{ÁREA}_{\text{salas}}) + ((-75,511 + 72,142 \text{ TURN} + 11,655 \text{ RENO} + 35,450 \text{ AVAC}) * \text{ÁREA}_{\text{salas comp.}}) + ((-163,76 - 13,676 \text{ TURN}^2 + 70,479 \text{ TURN} + 4,784 \text{ RENO} + 2,6371 \text{ ILUM} + 4,3260 \text{ AVAC} + 20,19 \text{ logGHR}) * \text{ÁREA}_{\text{outros}})) / \text{ÁREA}_{\text{total}}$$

Em que:

- GHR – Graus-hora de resfriamento da cidade onde se localiza a edificação;
- AVAC – Tipo de sistema de condicionamento de ar (1- Ventilador, 2 - Central VRF, 3 - Split Individual), sendo em 1. considerados ventiladores em salas de aula e split nas salas administrativas;
- ILUM – Densidade de potência de iluminação instalada (W/m²);
- TURN – Turno (1- noite, 2- manhã/noite, 3- manhã/tarde/noite);
- PESS – Densidade de alunos em sala de aula (m² por aluno);
- RENO – Renovação de ar (0 – não tem, 1 – tem renovação de acordo com nível 2 da NBR 16401-3);
- ÁREA_{salas} – Área total dos ambientes de sala de aula;
- ÁREA_{salas comp.} – Área total das salas de ensino e pesquisa com computadores;
- ÁREA_{outros} – Demais áreas da universidade, exceto as áreas de gabinetes de professores;
- ÁREA_{total} – Somatória das três áreas citadas anteriormente (salas de aulas, salas de ensino e pesquisa com computadores e outros, exceto áreas de gabinetes de professores).

7.1.3. AVALIAÇÃO ENTRE O CONSUMO SIMULADO E O CONSUMO CALCULADO

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

A Figura 25 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 92,38%, logo a equação de *benchmark* tem boa representatividade do modelo para a tipologia de **Universidade e Instituição de Ensino Técnico**.

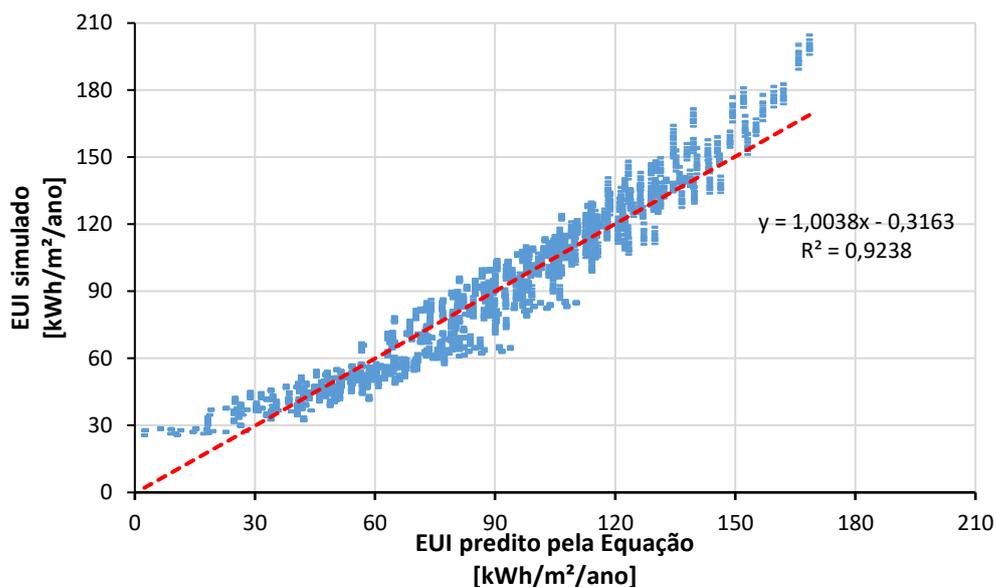


Figura 25 – Comparação entre o EUI simulado e o predito pela equação

7.2. GABINETES DOS PROFESSORES

Para o desenvolvimento das equações de regressão de previsão do consumo de energia dos Gabinetes dos Professores utilizou-se as equações de regressão multivariadas. As análises e equações também foram divididos em dois grupos: 1- para cidades que apresentam Graus-Dia de Aquecimento (GDA) e consequentemente consumo com aquecimento e Graus-Hora de Resfriamento (GHR); 2- para cidades que só apresentam Graus-Hora de Resfriamento (GHR).

7.2.1. CIDADES COM GHR ABAIXO DE 54 MIL

Análise das variáveis

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

	-----Step 1-----		-----Step 2-----		-----Step 3-----		-----Step 4-----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	14.199		-22.856		-33.433		-6.376	
ILUM	1.6716	0.000	1.6716	0.000	1.6716	0.000	1.6716	0.000
logGHR			8.729	0.000	8.729	0.000	3.796	0.000
AVAC					4.2372	0.000	4.2372	0.000
logGDA							-2.9188	0.000
TURN								
S	4.72034		3.29532		2.50513		2.12868	
R-sq	56.39%		78.75%		87.72%		91.14%	
R-sq (adj)	56.37%		78.74%		87.71%		91.13%	
R-sq (pred)	56.34%		78.72%		87.70%		91.11%	
Mallows' Cp	18944.14		7260.10		2573.56		791.10	
	-----Step 5-----							
	Coef	P						
Constant	-8.527							
ILUM	1.67159	0.000						
logGHR	3.796	0.000						
AVAC	4.2372	0.000						
logGDA	-2.9188	0.000						
TURN	1.0755	0.000						
S	1.93962							
R-sq	92.64%							
R-sq (adj)	92.63%							
R-sq (pred)	92.62%							
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	182127	36425	9682.11	0.000
logGHR	1	2689	2689	714.79	0.000
logGDA	1	6713	6713	1784.46	0.000
ILUM	1	110849	110849	29464.40	0.000
AVAC	1	17639	17639	4688.53	0.000
TURN	1	2961	2961	787.10	0.000
Error	3844	14462	4		
Lack-of-Fit	64	4048	63	22.96	0.000
Pure Error	3780	10414	3		
Total	3849	196589			

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.93962	92.64%	92.63%	92.62%

Equação de Regressão

Consumo_Gab_Prof [kWh/m²/ano] = -8.527 + 3.796 logGHR - 2.9188 logGDA + 4.2372 AVAC + 1.0755 TURN + 1.67159 ILUM

EQUAÇÃO FINAL PARA CIDADES COM GHR MENORES QUE 54 MIL

Consumo_Gab_Prof [kWh/m²/ano] = -8,527 + 3,796 logGHR – 2,9188 logGDA + 4,2372 AVAC + 1,0755 TURN + 1,67159 ILUM

Em que:

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

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

AVAC – Tipo de sistema de condicionamento de ar (1- Ventilador, 2 - Central VRF, 3 - Split Individual);

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

TURN – Turno (1- noite, 2- manhã, 3- tarde);

7.2.2. CIDADES COM GHR ACIMA DE 54 MIL

Análise das variáveis

	----Step 1----		----Step 2----		----Step 3----		----Step 4----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	24.809		4.311		-182.48		-185.94	
ILUM	1.7137	0.000	1.7137	0.000	1.7137	0.000	1.7137	0.000
AVAC			8.212	0.000	8.212	0.000	8.212	0.000
logGHR					38.94	0.000	38.94	0.000
TURN							1.7256	0.000
SOMB								
S	5.63694		3.81558		3.29222		2.97644	
R-sq	48.80%		76.55%		82.55%		85.74%	
R-sq(adj)	48.78%		76.53%		82.53%		85.72%	
R-sq(pred)	48.71%		76.49%		82.49%		85.68%	
Mallows' Cp	7417.09		2148.98		1011.74		407.36	

	----Step 5----	
	Coef	P
Constant	-187.13	
ILUM	1.7137	0.000
AVAC	8.229	0.000
logGHR	38.94	0.000
TURN	1.7256	0.000
SOMB	2.295	0.000
S	2.74637	
R-sq	87.87%	
R-sq(adj)	87.84%	
R-sq(pred)	87.81%	
Mallows' Cp	6.00	

Análise de variância

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	5	125864	87.87%	125864	25172.8	3337.43	0.000
logGHR	1	8593	6.00%	8593	8592.8	1139.24	0.000
AVAC	1	39750	27.75%	39917	39917.1	5292.25	0.000
ILUM	1	69905	48.80%	69905	69905.0	9268.07	0.000
TURN	1	4574	3.19%	4574	4573.6	606.38	0.000
SOMB	1	3042	2.12%	3042	3042.4	403.36	0.000
Error	2304	17378	12.13%	17378	7.5		
Lack-of-Fit	72	5222	3.65%	5222	72.5	13.32	0.000
Pure Error	2232	12156	8.49%	12156	5.4		
Total	2309	143242	100.00%				

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
2.74637	87.87%	87.84%	87.81%

Equação de Regressão

$$\text{Consumo_Gab_Prof [kWh/m}^2\text{/ano]} = -187.13 + 38.94 \log\text{GHR} + 8.229 \text{ AVAC} + 1.7137 \text{ ILUM} + 1.7256 \text{ TURN} + 2.295 \text{ SOMB}$$

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

$$\text{Consumo_Gab_Prof [kWh/m}^2\text{/ano]} = -187,13 + 38,94 \log\text{GHR} + 8,229 \text{ AVAC} + 1,7137 \text{ ILUM} + 1,7256 \text{ TURN} + 2,295 \text{ SOMB}$$

Em que:

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

AVAC – Tipo de sistema de condicionamento de ar (1- Ventilador, 2 - Central VRF, 3 - Split Individual);

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

TURN – Turno (1- noite, 2- manhã, 3- tarde);

SOMB – Uso de elemento de sombreamento nas aberturas (0- Com brise, 1- Sem brise)

7.2.3. AVALIAÇÃO ENTRE O CONSUMO SIMULADO E O CONSUMO CALCULADO

A partir das equações desenvolvidas, foi analisada a diferença entre o consumo simulado computacionalmente e o consumo calculado, inserindo os valores das variáveis na equação de regressão. A Figura 26 apresenta uma comparação destes resultados. 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. Verificou-se que, pela equação de aderência apresentar um coeficiente de determinação de 93,87%, a equação de *benchmark* resultou em boa representatividade do modelo dos gabinetes dos professores.

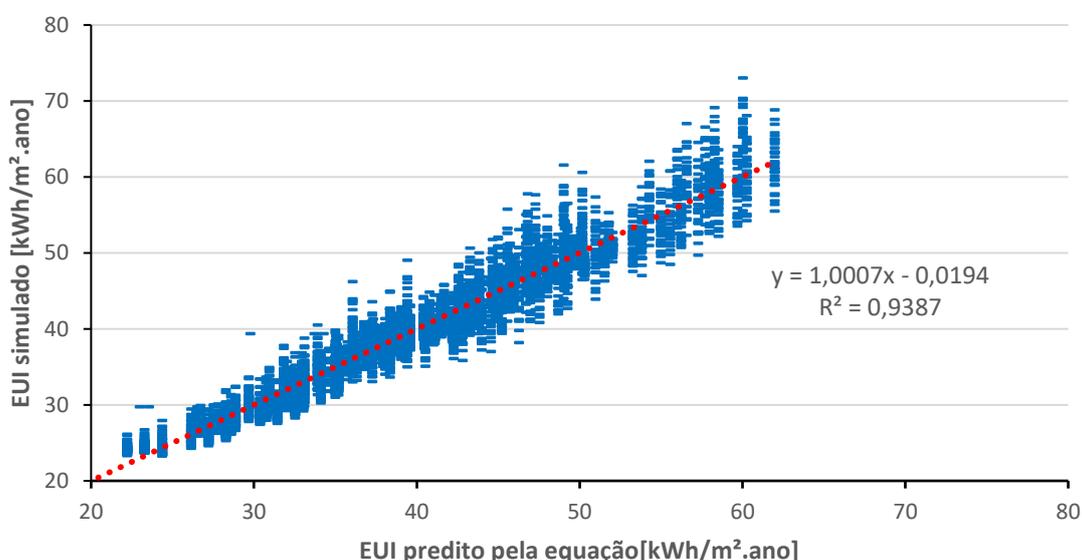


Figura 26 – Comparação entre o EUI simulado e o predito pela equação

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 17.

Tabela 17 – Parâmetros para Escala de Consumo de Energia em função do GHR, para Universidades e Instituição de Ensino, para “Edificação geral”.

Parâmetro		Parâmetros significativos de acordo com a cidade	
Cidade		GHR < 54mil	GHR ≥ 54mil
Tipo de ar-condicionado	Ventilador		
	Split Individual	x	x
	VRF		
Iluminação	W/m ²	x	x
Ocupação	m ² por aluno	x	x
Turnos	1- Noite		
	2- Manhã/noite	x	x
	3- Manhã/tarde/noite		
Renovação de ar	0 – Ausente		
	1 – Taxa de renovação de acordo com nível 2 da NBR 16401-3	x	x
Área salas (m ²)	Contínua	x	x
Área lab (m ²)	Contínua	x	x
Área outros (m ²)	Contínua	x	x

Caso a Universidade ou Instituição de Ensino tenha gabinetes individuais de professores, é necessário inserir também os parâmetros apresentados na Tabela 18, referentes a estes ambientes.

Tabela 18 – Parâmetros para Escala de Consumo de Energia em função do GHR, para “gabinetes dos professores”.

Parâmetro		Parâmetros significativos de acordo com a cidade	
Cidade		GHR < 54mil	GHR ≥ 54mil
Tipo de ar-condicionado	Ventilador		
	Split Individual	x	x
	VRF		
Iluminação	W/m ²	x	x
Turnos	1- Noite		
	2- Manhã	x	x
	3- Tarde		

Sombreamento	0- Com brise	x
	1- Sem brise	

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

Tabela 19 – Cenários para o cálculo de consumo mínimo e máximo para tipologia de Universidades e Instituição de Ensino Técnico.

Parâmetros	Limites do parâmetro	
	Mínimo	Máximo
EDIFICAÇÃO GERAL		
Cidade	GHR	Parâmetro fixo
	GDA	
Tipo de ar-condicionado	Ventilador	Parâmetro fixo
	-	VRF SPLIT
Iluminação	W/m ²	9,9 16,32
Ocupação	m ² por aluno	Parâmetro fixo
Turnos	1- Noite	Parâmetro fixo
	2- Manhã/noite	
	3- Manhã/tarde/noite	
Renovação de ar	0 – Ausente	Parâmetro fixo
	1 – Taxa de renovação de acordo com nível 2 da NBR 16401-3	
Área salas (m ²)	Contínua	Parâmetro fixo
Área salas com computadores (m ²)	Contínua	Parâmetro fixo
Área outros (m ²)	Contínua	Parâmetro fixo
GABINETE DOS PROFESSORES		
Tipo de ar-condicionado	Ventilador	Parâmetro fixo
	-	VRF SPLIT
Iluminação	W/m ²	10,00 19,04
Turnos	1- Noite	Parâmetro fixo
	2- Manhã	
	3- Tarde	
Sombreamento	-	0 - Com brise 1 - Sem brise

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 Universidade localizada na cidade de São Paulo, com GHR = 14.172, GDA = 288, ocupação de 0,69 m² por aluno, DPI de 12,37 W/m², funcionando nos turnos manhã e noite, com sistema de condicionamento de ar central tipo VRF e com renovação de ar. A área de salas de aula desta universidade é de 3.632,89 m², a área de salas de computadores, de 361,40 m² e outras áreas com 7.936,92 m², totalizando 11.931,21 m². O consumo de energia operacional calculado é **118,74 kWh/m²/ano**.

Realizando o cálculo do consumo desta universidade nos cenários de consumo mínimo e consumo máximo, obtém-se os limites indicados na Tabela 20.

Tabela 20 – Exemplo de Escala de Eficiência - Universidade em São Paulo.

Parâmetros		Mínimo	Máximo
VARIÁVEL	AVAC	Tipo	Central VRF
	ILUMINAÇÃO	W/m ²	9,9
FIXOS	CIDADE	-	SÃO PAULO (GHR = 14172, GDA = 288)
	TURNOS	-	2 - Manhã/Noite
	RENOVAÇÃO DE AR INTERNO	-	Existente
	OCUPAÇÃO	m ² por aluno	0,69
Consumo calculado (kWh/m²/ano)		116,78	134,30

Com relação aos gabinetes dos professores, foram considerados DPI de 12,37W/m² de iluminação, funcionando no turno da tarde, sistema de condicionamento de ar central tipo VRF e com renovação de ar. O consumo de energia calculado foi de **32,43 kWh/m²/ano**. Com isso, calcula-se os seguintes limites de consumo de energia (Tabela 21).

Tabela 21 – Exemplo de Escala de Eficiência, gabinete dos professores – Universidade em São Paulo.

Parâmetros		Mínimo	Máximo
VARIÁVEL	AR-CONDICIONADO	Tipo	Central VRF
	ILUMINAÇÃO	DPI (W/m ²)	10,00
FIXOS	CIDADE	-	SÃO PAULO (GHR = 14172, GDA = 288)
	TURNOS	-	3 - Tarde
Consumo calculado (kWh/m²/ano)		28,30	43,27

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

$$i = \frac{(134,30 + 43,27) - (116,78 + 28,30)}{5} = 6,50$$



Considera-se nesse exemplo, portanto, que a edificação analisada apresenta consumo operacional inferior ao consumo mínimo da faixa típica (**151,17 < 151,58 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 **Universidade e Instituição de Ensino Técnico**.

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 alunos (PESS); turnos oferecidos pela instituição (TURN); sombreamento (SOMB); tipo de sistema de condicionamento de ar (AVAC); e a renovação de ar (RENO).

As variações de absorvância solar, fator solar nos vidros e orientação solar da fachada na edificação não apresentaram impacto significativo no consumo final e, portanto, não foram incluídas na equação de *benchmark* proposta para esta tipologia.

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

A iluminação artificial, além do impacto direto no consumo geral da edificação, tem impacto no consumo do condicionamento de ar, uma vez que parte da energia consumida pelas lâmpadas é dissipada na forma de calor. Logo, quanto maior a densidade de potência de iluminação instalada, maior será o consumo para resfriamento. A carga térmica de pessoas, a depender da densidade de ocupação da sala, também tem impacto significativo no consumo de energia dos sistemas de condicionamento ambiental. O próprio sistema de ar-condicionado irá determinar o seu consumo final. Um sistema distribuído, como os splits individuais com diversas variedades de equipamentos, podendo até incluir tecnologias mais obsoletas como o ar-condicionado tipo janela irá consumir mais energia que sistemas centrais eficientes como o VRF. A existência ou não de renovação de ar tem um impacto significativo uma vez que a renovação representa uma carga térmica a mais ou a menos a ser resolvida pelo sistema de ar-condicionado.

O sombreamento das janelas com a utilização de brises reduz a carga térmica solar no interior da edificação, o que também impacta o consumo de energia pelo sistema de ar-condicionado, fato identificado como relevante nos gabinetes de professores.

Quanto aos turnos oferecidos pela instituição, além das diferenças climáticas entre os períodos da manhã, da tarde e da noite, há o tempo total de funcionamento da edificação em si, que impacta no consumo total de energia.

Cabe observar também que durante a condução das simulações energéticas e auditorias foram identificadas peculiaridades na composição real da tipologia que impossibilitaram a caracterização energética de forma mais precisa. O arquétipo desenvolvido visou abranger grande parte do perfil de consumo de energia desta tipologia, que são as salas de aula e as salas administrativas. Entretanto, é grande a quantidade de universidades que apresentam diferentes perfis de consumo energético de acordo com a área de ensino. Portanto, destaca-se que:

- Universidades particulares, em geral, possuem uma relação entre sala de aula e área total maior que as universidades públicas. Estas últimas, por sua vez, apresentam mais frequência de salas de professores e laboratórios voltados para pesquisa;

- Os laboratórios apresentam diferentes perfis de consumo de energia, variando em intensidade e em tempo de utilização, podendo ter impacto significativo no consumo total da universidade.

Os gabinetes individuais de professores possuem um perfil de consumo mais uniforme e diferente do restante dos ambientes. Dessa forma, eles foram considerados em um modelo separado neste projeto. Já os laboratórios de pesquisa (laboratórios específicos), apresentam perfis de consumo muito particulares entre si, logo os consumos relativos a estes ambientes deverão ser avaliados pelo próprio usuário separadamente.

Com a previsão do consumo de energia em relação ao consumo simulado, verificou-se que as equações têm um R^2 de 92,38% e 93,87%, logo os modelos regressivos empregados foram representativos para prever o consumo de energia para a tipologia de **Universidades e Instituições de Ensino Técnico**.

A Tabela 22 resume os parâmetros estudados e identifica os considerados significativos para o desenvolvimento das equações de *benchmark* para esta tipologia.

Tabela 22 - Parâmetros analisados e sua relevância para a equação de benchmark das UNIVERSIDADES E INSTITUIÇÕES DE ENSINO TÉCNICO.

Parâmetros analisados	Parâmetros na equação para GHR < 54 mil	Parâmetros na equação para GHR > 54 mil
Clima GHR	✓	✓
Clima GDA	✓	
AVAC	✓	✓
Iluminação	✓	✓
Turno	✓	✓
Densidade de pessoas	✓	✓
Renovação de ar interno	✓	✓
Sombreamento		✓
Absortância e envoltória		
Orientação Solar da edificação		
Fator solar dos vidros		

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.