



CBCS

Conselho Brasileiro de Construção Sustentável

RT2B.14: Desenvolvimento de arquétipo, modelo de simulação, análise de sensibilidade e equações de *benchmark* para a tipologia de Posto de Saúde e Assistência Social

PROJETO: ECV – PRFP 003B/2020

CONVÊNIO DE COOPERAÇÃO TÉCNICO-FINANCEIRA ENTRE A ELETROBRAS E O CBCS, DESTINADO AO DESENVOLVIMENTO DE BENCHMARKS ENERGÉTICOS NO ÂMBITO DO PROCEL

Relatório elaborado pelos colaboradores do CBCS CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL:

Ana Carolina Veloso

Ana Paula Melo

Anderson Letti

Arthur Cursino

Camila Suizu

Clarice Degani

Daniel Amaral

Eduardo Kanashiro

Roberto Lamberts

Kleber Moura

Coordenação Eletrobras/Procel: Elisete Cunha

Publicado em 18/03/2021

Relatório da atividade 2B com a finalidade de descrever o processo de desenvolvimento de arquétipo, o modelo de simulação, a análise de sensibilidade e as equações de *benchmark* para a tipologia de Posto de Saúde e Assistência Social.

Sumário

Sumário	1
1. CONTEXTUALIZAÇÃO E METODOLOGIA	2
Metodologia geral adotada para o convênio	3
2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	4
3. CIDADES SELECIONADAS	5
4. DESENVOLVIMENTO DO ARQUÉTIPO	6
4.1. Volumetrias	6
4.2. Iluminação	7
4.3. Ocupação	8
4.4. Sombreamento e orientação solar	9
4.5. Envoltória e tipo de vidro	10
4.6. Definição da carga térmica e SISTEMA DE CONDICINAMENTO DE AR	11
5. MODELO DE SIMULAÇÃO	13
5.1. Cenários de simulação	13
5.2. Método de análise dos resultados das simulações	14
6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	15
6.1. ANÁLISE EM Cidades com ghr abaixo de 54 mil	15
6.2. ANÁLISE EM Cidades com ghr acima de 54 mil	16
6.3. análise do impacto DOS PARÂMETROS SIGNIFICATIVOS	17
7. EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	19
7.1. Cidades com GHR abaixo de 54 mil	19
7.2. Cidades com GHR ACIMA de 54 mil	20
7.3. Avaliação entre o consumo simulado e o consumo calculado	21
8. ESCALAS DE CONSUMO DE ENERGIA	22
8.1. Método para cálculo das escalas	22
8.2. Exemplo de aplicação	23
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	25
REFERÊNCIAS	26

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.

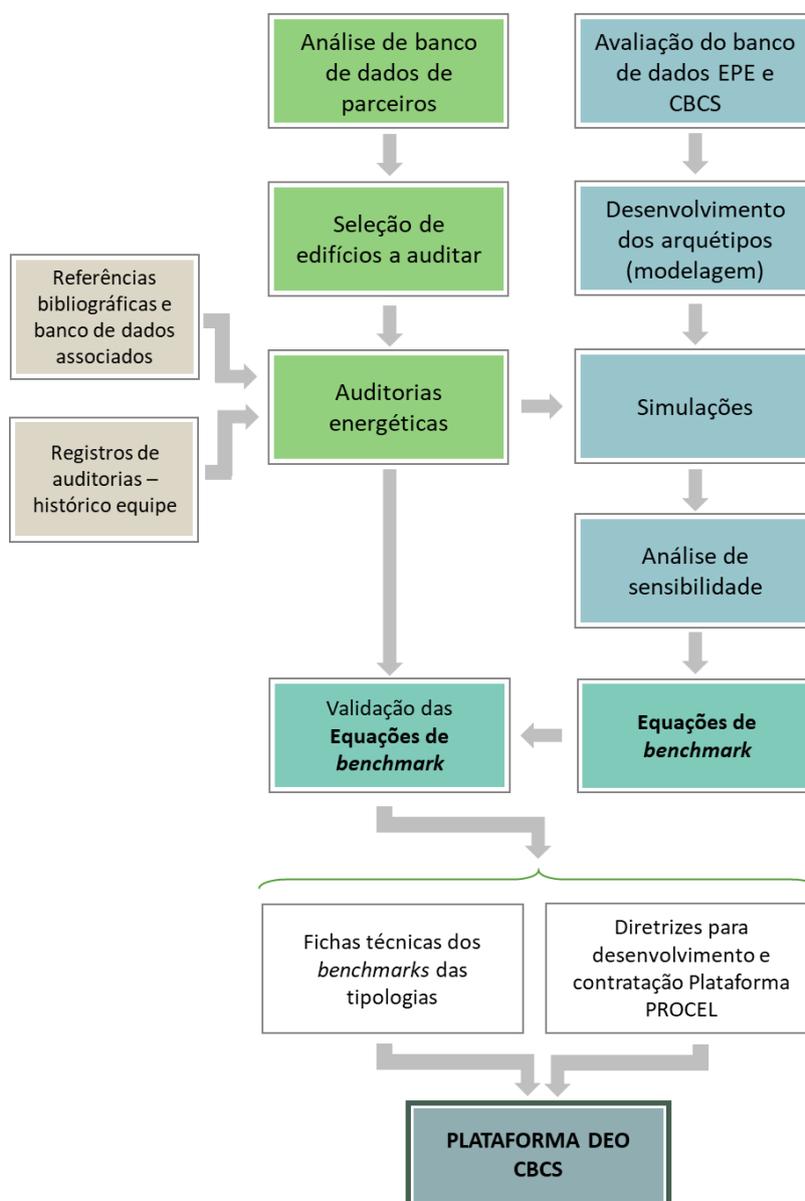


Figura 1 - Método aplicado pelo CBCS para o desenvolvimento dos benchmarks no âmbito deste convênio

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 **Posto de Saúde e Assistência Social**.

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, 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.

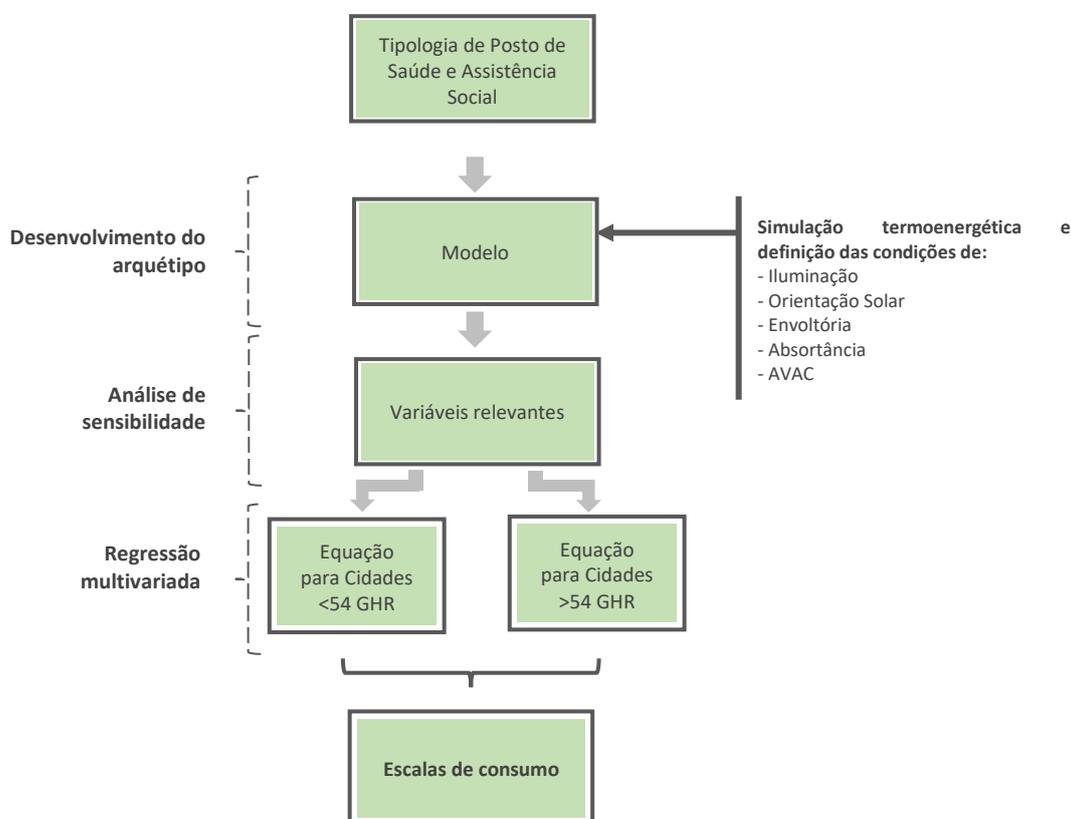


Figura 2 – Fluxograma de desenvolvimento das equações de benchmark e escalas de consumo para a tipologia de Posto de Saúde e Assistência Social

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 **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** 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 **Posto de Saúde e Assistência Social** constitui-se tipicamente por edifícios de apenas um andar cuja função principal seja de atendimentos de rotina, como consultas com o clínico geral, tratamentos, vacinação, pré-natal, atendimento odontológico e acompanhamento de hipertensos e diabéticos. É a porta de entrada do usuário no Sistema Único de Saúde (SUS). Essa tipologia é essencialmente constituída de prédios públicos e, portanto, para a construção do arquétipo foi considerado um projeto típico de uma unidade básica de saúde de porte 2, que abriga no mínimo duas equipes de Saúde da Família. A área bruta da edificação deve incluir todo o espaço dentro do edifício, incluindo consultórios médicos e odontológicos, sala de procedimentos e curativos, sala de vacinação, depósito e distribuição de medicamentos, além de áreas administrativas.

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 uma auditoria energética. 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 edificações independentes, ou seja, expostas à radiação solar em todas as suas faces.

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 os apresentados na Figura 3

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

4.1. VOLUMETRIAS

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

Tabela 2 – Áreas dos ambientes considerados

Ambiente	Quantidade	Área total (m ²)	Percentual na área total
Administrativo	5	35.22	9.8%
Áreas de atendimento	8	115.79	32.2%
Áreas técnicas	3	27.73	7.7%
Sanitários	4	20.77	5.8%
Odontologia	1	46.16	12.8%
Recepção	1	113.68	31.6%
TOTAL	22.	359.35	100%

O modelo da Edificação geral foi construído com base em uma edificação de pavimento único com divisões internas totalizando 360 m². Foi adotado o formato de edifício padrão de UBS tipo II, disponibilizado pelo

Ministério da Saúde – Brasil. A Figura 3 apresenta a planta e a configuração dos ambientes considerados, e a Figura 4 as perspectivas do modelo.

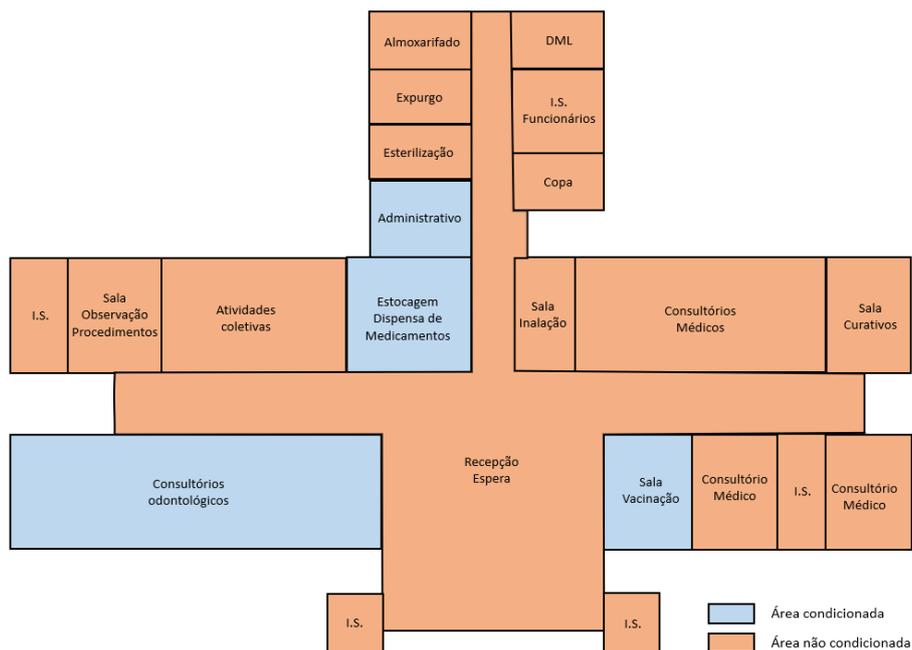


Figura 3 – Configuração da planta do arquétipo

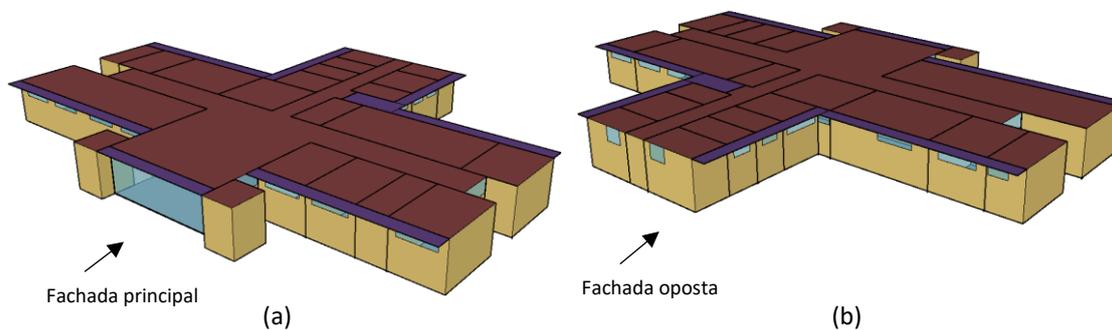


Figura 4 – Perspectiva da volumetria da edificação (a) frente e lateral direita e (b) fundos e lateral esquerda

4.2. ILUMINAÇÃO

Em relação à iluminação artificial foram definidos dois cenários: um cenário mais eficiente (ILUM02) representando as lâmpadas tipo LED com densidade de potência de iluminação (DPI) médio de 9,97 W/m² e o outro cenário menos eficiente (ILUM01) representando as lâmpadas fluorescentes e/ou incandescentes com DPI médio de 16,39 W/m². Esses valores correspondem, respectivamente, a uma classe A e classe D, com valores determinados para cada tipo de ambientes presentes no arquétipo de acordo com seu uso, segundo a Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas - INI-C (CB3E, 2020).

A Figura 5 ilustra o cronograma de operação da iluminação, considerando a variação de turnos.

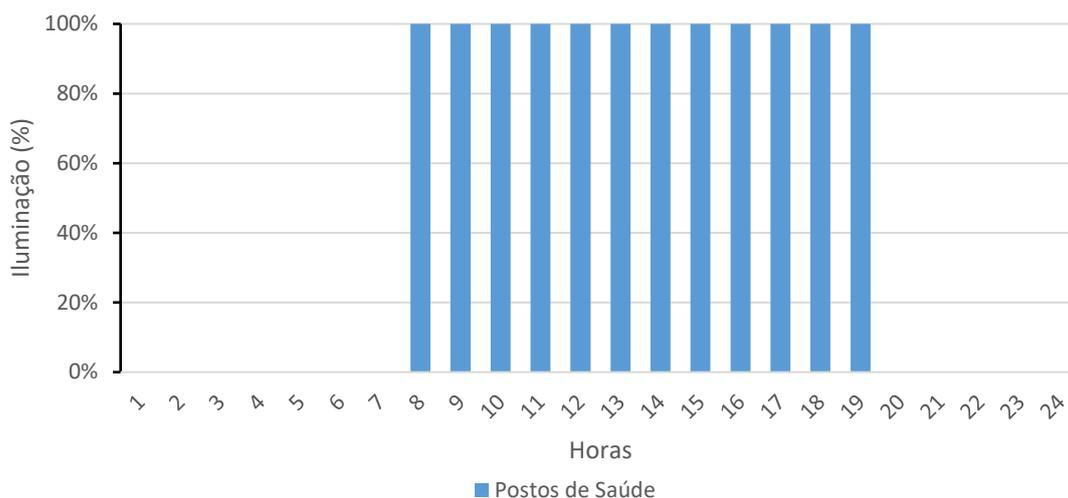


Figura 5 – Cronograma adotado para Iluminação

4.3. OCUPAÇÃO E EQUIPAMENTOS

O horário de funcionamento do posto de saúde foi definido como sendo das 07:00 às 19:00 horas, de segunda a sexta feira. A Figura 6 apresenta o cronograma adotado para a ocupação. A densidade de ocupação foi definida de acordo com o *layout* do projeto padrão utilizado e só foi considerada nas zonas em que há sistemas de condicionamento de ar.

A ocupação possui impacto apenas na carga térmica dos sistemas de condicionamento de ar e não gera consumo de energia direto.

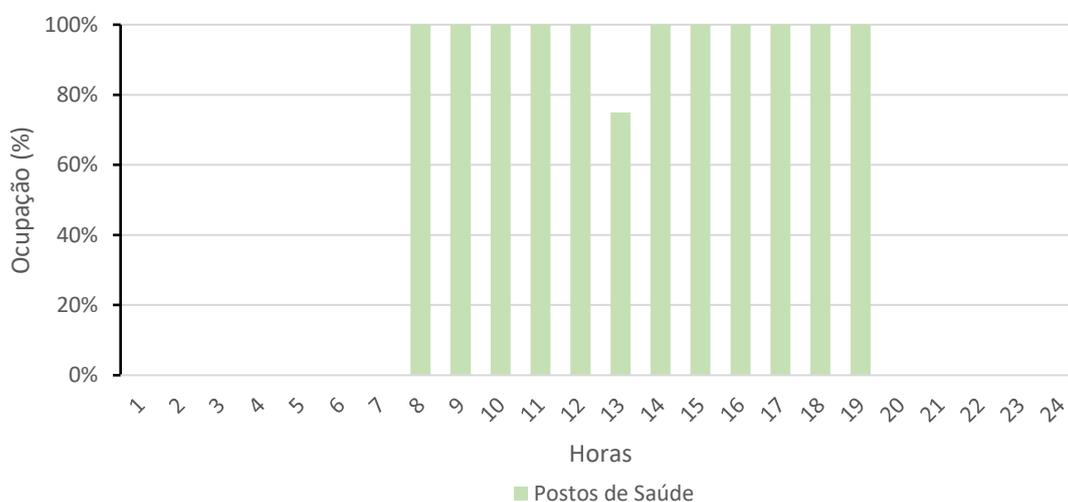


Figura 6 – Cronograma adotado para ocupação

As densidades de carga dos equipamentos de tomada foram fixadas nas simulações, por tipo de ambiente, da seguinte maneira:

Administrativos – 24,5 W/m²

Coleta – 18,6 W/m²

Consultórios (3 tipos) – 33,8 W/m²; 32,9 W/m²; 24,2 W/m²

Copa – 8,8 W/m²
Curativo – 14,0 W/m²
Estoque – 6,5 W/m²
Inalação – 19,7 W/m²
Apoio funcionários – 20,2 W/m²
Odontologia – 68 W/m²
Procedimentos – 12,9 W/m²
Recepção – 38,8 W/m²
Vacinas – 1,7 W/m²

Considerada carga média de equipamentos instalados em posto de saúde de 18 W/m².

4.4. SOMBREAMENTO E ORIENTAÇÃO SOLAR

Devido ao arquétipo ter aberturas em todas as orientações e ter uma geometria não compacta, foram considerados quatro cenários de orientação solar, usando a fachada principal como referência temos: 0° - Sul (ORIE01), 90° - Oeste (ORIE02), 180° - Norte (ORIE03), e 270° - Leste (ORIE04).

4.5. ENVOLTÓRIA E TIPO DE VIDRO

Para definir os cenários que representam a eficiência da envoltória da edificação, foram determinados dois valores de transmitância térmica para a envoltória e dois valores para a absorvância à radiação solar das superfícies externas, paredes e coberturas. Para o cenário com ENVO01 a transmitância das paredes igual a $3,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e da cobertura de $2,00 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e para o cenário com ENVO02 a transmitância das paredes igual a $2,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e da cobertura de $1,00 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

Também foram definidos dois cenários para o valor da absorvância à radiação solar da envoltória. Com um material mais escuro (ASOL01) para o caso menos eficiente com absorvância de 0,7 e um caso mais eficiente um material claro (ASOL02) com absorvância de 0,3.

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

Em relação ao tipo de vidro, ele não foi considerado uma variável uma vez que vidros especiais de controle solar não são comuns nessa tipologia. Foi utilizado um vidro float incolor simples de 3 mm, com valor U de $5,8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, fator solar de 0,87 e transmissão luminosa de 0,88.

A Figura 7 apresenta os elementos construtivos de referência para parede e cobertura.

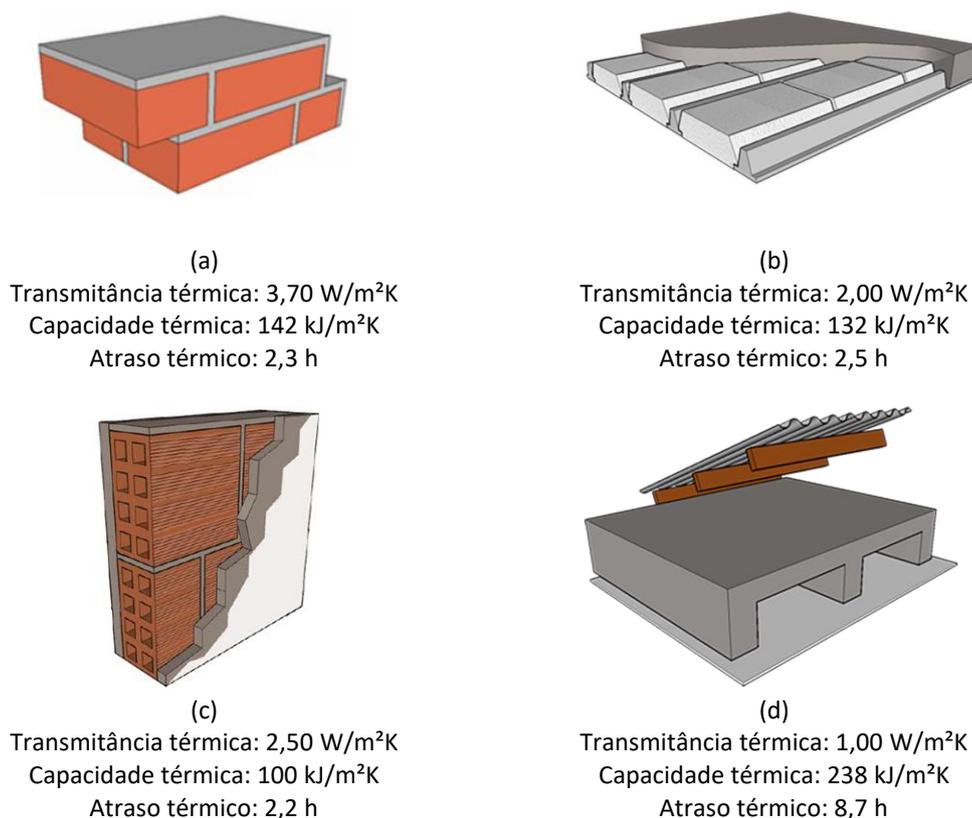


Figura 7 – Elementos construtivos de referência para: Cenário ENVO01 (a) Paredes e (b) Cobertura e Cenário ENVO02 (c) Paredes e (d) Cobertura

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

Uma etapa preliminar de simulação termoenergética do arquétipo foi realizada, utilizando o ambiente de simulação *EnergyPlys*, versão 9.2. O modelo foi simulado utilizando arquivos climáticos do tipo INMET¹ para as oito cidades representativas. Essa etapa preliminar de simulação foi feita considerando diversas combinações de todos os cenários de variáveis que contribuem para carga interna (ou seja, 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
Orientação solar	ORIE01
Envoltória	ENVO01
Absortância	ASOL01

Nas simulações da segunda rodada preliminar foram consideradas a vazão de ar, a capacidade de refrigeração e aquecimento no modo *autosize*, com um superdimensionamento de 25% no modo aquecimento e de 15% no modo refrigeração. A eficiência dos equipamentos de ar-condicionado foi mantida com o padrão do *EnergyPlus* (3 W/W no modo de refrigeração e 2,75 W/W no modo de aquecimento). Com relação à eficiência dos ventiladores, utilizaram-se os coeficientes para vazão constante ($P [kW] = \text{vazão [l/s]} \times 0,0017$), e para vazão variável ($P [kW] = \text{vazão [l/s]} \times 0,0024$), conforme recomendação da ASHRAE 90.1-2010 (ASHRAE, 2011).

Após as simulações, selecionou-se a cidade com maior carga térmica para o dimensionamento do sistema de condicionamento de ar do arquétipo. Esta seleção foi feita tendo como base equipamentos existentes no mercado, sendo escolhido o equipamento de capacidade superior a carga térmica definida. O equipamento foi modelado na simulação termoenergética do arquétipo.

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

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

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

Tabela 4 – Carga térmica por cidade representativa

Cidade	UF	Zona Bioclimática	Carga Térmica (TR)
Campos do Jordão	SP	1	4.7
São Paulo*	SP	3	5.0
Porto Alegre	RS	3	5.0
Campinas	SP	3	4.9
Rio de Janeiro (Vila Militar)	RJ	8	4.9
Vitória	ES	8	4.4
Recife	PE	8	4.5
Fortaleza	CE	8	4.2

* Cidade selecionada

Percebe-se que, dentre as cidades selecionadas como representativas, a cidade com maior carga térmica foi São Paulo, com 5.0 TR. Dessa forma, o arquivo climático de São Paulo foi selecionado como referência para dimensionamento do sistema de condicionamento de ar considerado no arquétipo.

Os sistemas de condicionamento de ar na tipologia de **Posto de Saúde e Assistência Social** visam o atendimento às necessidades de conforto dos funcionários, pacientes e manutenção de temperatura de medicamentos em ambientes específicos. Nos cenários em que foram considerados sistemas de ar condicionado, as zonas climatizadas foram: Sala de vacinação, Consultório odontológico, Salas administrativas e Estoque de medicamentos. Esses ambientes foram definidos de acordo com informações obtidas na auditoria conduzida.

Como cenário menos eficiente para o cenário AVAC foram considerados sistemas individuais tipo Split para cada zona térmica, com EER médio de 3,24W/W. Como cenário mais eficiente foram considerados sistemas split do tipo Inverter que possuem EER médio de 3,88W/W. Foi considerado também um cenário sem sistema de ar condicionado, apenas com ventiladores. Neste cenário, os ventiladores foram considerados apenas pelo seu consumo de energia, não tendo sido avaliado se haveria ou não a necessidade de instalação de sistemas de condicionamento de ar para a garantia do conforto dos ocupantes.

5. MODELO DE SIMULAÇÃO

5.1. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

As simulações foram realizadas utilizando-se uma abordagem paramétrica, considerando as variações dos cenários apresentados e as oito cidades representativas (capítulo 3). No total, 96 casos foram simulados. Foi utilizado o programa de simulação *EnergyPlus* (versão 9.2). Os resultados das simulações foram compilados em um banco de dados com os consumos anuais totais, consumos desagregados por uso final e por ambiente. A Tabela 5 apresenta a síntese das características dos cenários adotados nas simulações termoenergéticas para esta tipologia.

Tabela 5 – Cenários adotados para as simulações

Parâmetro	Cenário	Dado utilizado
Iluminação	ILUM01	Iluminação com DPI PBE classe D (16,39W/m ²)
	ILUM02	Iluminação com DPI PBE classe A (9,97W/m ²)
Orientação solar	ORIE01	Frente orientada a Sul
	ORIE02	Frente orientada a Oeste
	ORIE03	Frente orientada a Norte
	ORIE04	Frente orientada a Leste
Envoltória	ENVO01	Uparedes = 3,70 W/m ² .K; Ucobertura = 2,00 W/m ² .K
	ENVO01	Uparedes = 2,50 W/m ² .K; Ucobertura = 1,00 W/m ² .K
Absortância	ASOL01	Absortância = 0,70
	ASOL02	Absortância = 0,30
AVAC	Split	Sistema Split (EER = 3,24W/W)
	Split Inverter	Sistema Inverter (EER = 3,88W/W)
	Ventiladores	Ventiladores

Notas:

U = Transmitância térmica;

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

5.2. MÉTODO DE ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Os resultados obtidos nas simulações mostraram um consumo significativo de aquecimento nas cidades mais frias, chegando a superar o consumo de resfriamento em alguns cenários em Campos do Jordão, a cidade mais fria em análise. Portanto, as análises e equações foram divididos em dois grupos: 1- para cidades que apresentam Graus-Dia de Aquecimento (GDA), como mostra a Tabela 4, e conseqüentemente consumo com aquecimento e Graus-Hora de Resfriamento (GHR); 2- para cidades que só apresentam Graus Hora de Resfriamento (GHR).

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 6 apresenta as cidades e seus grupos.

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

Cidade	UF	Latitude	Longitude	Altitude	GHR	Grupo
Campos do Jordão	SP	-22,74	-45,59	1.642	3.495	
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 disso, a contribuição dos ambientes não considerados, que podem possuir cargas especiais, como por exemplo equipamentos de exame de imagem e CPDs, não foi modelada no arquétipo. Neste caso, como trata-se de um consumo muito particular de cada caso, definiu-se que essas cargas entrariam de forma isolada na equação de *benchmarking*, conforme seus perfis de carga e de utilização.

6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

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

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

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

Os parâmetros analisados foram: iluminação (ILUM), orientação solar (ORIE), envoltória (ENVO), Absortância (ASOL) e tipo de sistema de condicionamento de ar (AVAC). Além disso, a carga térmica, influenciada pela cidade (GHR, GDA) também foi um parâmetro analisado.

Assim, para as equações de *benchmark*, foram considerados somente os parâmetros cuja variação apresentou impacto significativo no consumo energético total do edifício. Esses parâmetros podem apresentar um consumo direto, por meio do seu uso efetivo (potência e funcionamento), ou um consumo indireto, por exemplo, a carga térmica interna gerada no uso dos ambientes aumenta a necessidade de funcionamento do ar condicionado para manter as condições locais de conforto.

6.1. ANÁLISE EM CIDADES COM GHR ABAIXO DE 54 MIL

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

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

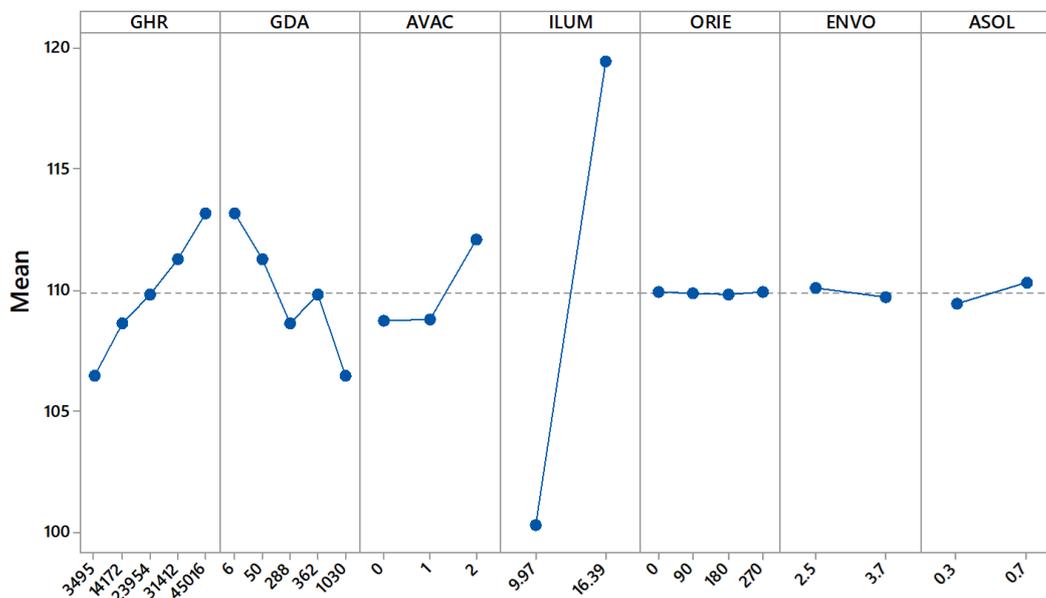


Figura 8 - Efeito dos parâmetros no consumo de energia

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

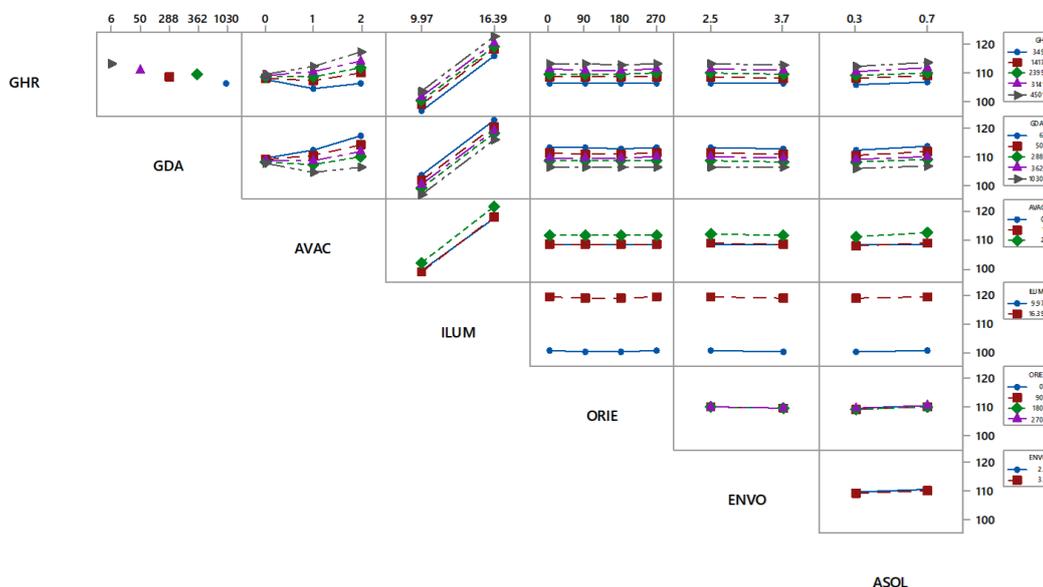


Figura 9 - Interação entre os parâmetros

6.2. ANÁLISE EM CIDADES COM GHR ACIMA DE 54 MIL

Por meio das Figura 10 e Figura 6, verifica-se que os parâmetros com variações mais significativas são o GHR, AVAC e ILUM. As variações dos parâmetros ENVO, ORIE e ASOL tiveram um impacto pequeno no consumo de energia.

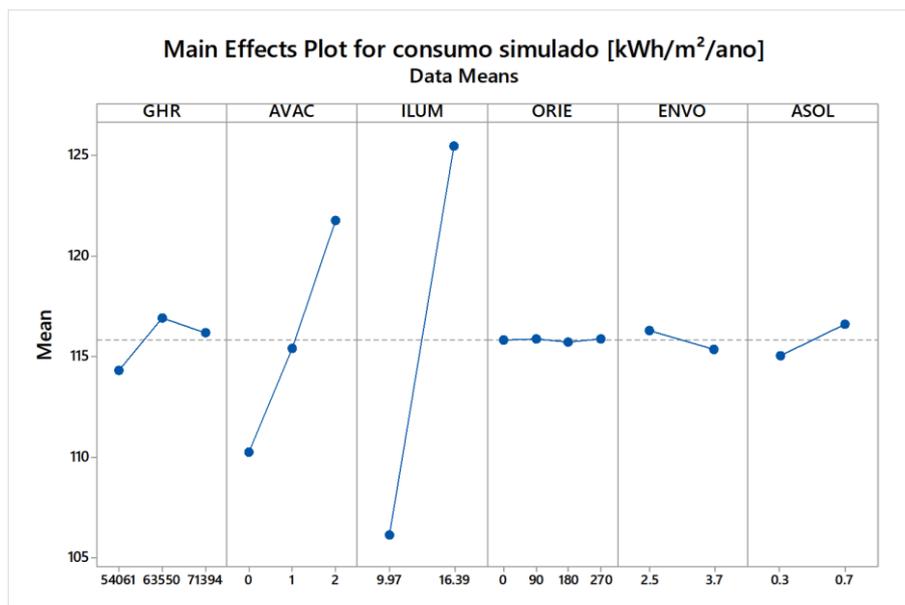


Figura 10 - Efeito dos parâmetros no consumo de energia

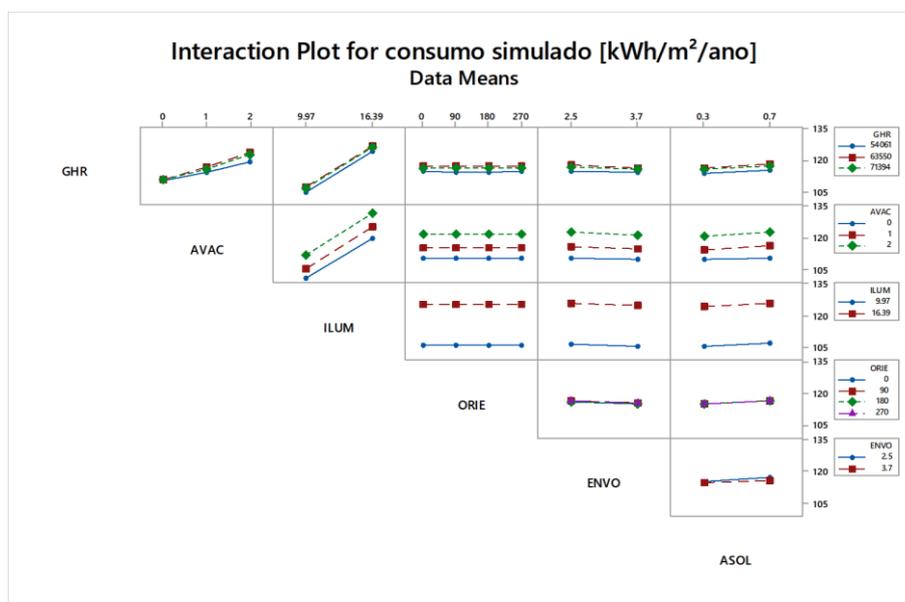


Figura 6 - Interação entre os parâmetros

6.3. ANÁLISE DO IMPACTO DOS PARÂMETROS SIGNIFICATIVOS

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

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 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 7 ilustra o impacto no consumo de energia do sistema AVAC ao substituir o sistema de iluminação no padrão PBE classe D (16,39W/m²) para um PBE classe A (9,97W/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 7 - Impacto do sistema de iluminação no consumo do sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC: Sistema split (EER =3,24W/W)		
	Iluminação:	Parâmetro analisado	
	Envoltória:	Upar: 3,7 / Ucob: 2,0	
	Absortância	α : 0,7	
	Orientação Solar:	Fachada principal a sul	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Varição no consumo de AVAC
	Parâmetro analisado: Iluminação		
	PBE classe D (16,39W/m ²)	PBE classe A (9,97W/m ²)	
Campos do Jordão	8,18	7,22	-11,7%
São Paulo	11,86	10,76	-9,3%
Porto Alegre	13,59	12,43	-8,5%
Campinas	15,77	14,53	-7,9%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	18,79	17,48	-6,9%
Vitória	20,47	19,13	-6,5%
Recife	24,18	22,79	-5,8%
Fortaleza	23,62	22,22	-5,9%

O próprio sistema de condicionamento de ar possui diversas tecnologias com eficiências energéticas distintas e que impactam no consumo de energia total de uma edificação. A Tabela 8 ilustra a diferença no consumo de energia dos sistemas Split, mais comum e mais barato que o sistema Split Inverter, que consome menos energia para manter condições confortáveis de permanência prolongada no ambiente. Este parâmetro também será utilizado para balizar a eficiência energética do usuário final na equação de *benchmark*.

Tabela 8 – Impacto do tipo de sistema AVAC no consumo do sistema de condicionamento de ar

Modelo base	AVAC: Parâmetro analisado		
	Iluminação:	PBE classe A (9,97 W/m ²)	
	Envoltória:	Upar: 3,7 / Ucob: 2,0	
	Absortância	α : 0,7	
	Orientação Solar:	Fachada principal a sul	
Cidade	Consumo anual de energia [kWh/m²]		Varição no consumo de AVAC
	Parâmetro analisado: sistema AVAC		
	Split (EER =3,24W/W)	Inverter (EER =3,88W/W)	
Campos do Jordão	9,45	8,90	-5,8%
São Paulo	13,44	11,89	-11,5%
Porto Alegre	15,63	13,35	-14,6%
Campinas	18,16	15,28	-15,9%
Rio de Janeiro (Vila Militar)	21,45	17,57	-18,1%
Vitória	23,76	19,17	-19,3%
Recife	28,92	23,00	-20,5%
Fortaleza	26,98	21,20	-21,4%

7. EQUAÇÃO DE REGRESSÃO

Para o desenvolvimento das equações para predição do consumo de energia da tipologia de **Posto de Saúde e Assistência Social**, 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 predizer valores próximos aos valores utilizados para construí-lo.

A regressão linear multivariada resulta em uma equação, na qual a variável resposta (ou dependente) é o consumo de energia da edificação e as variáveis explicativas (ou independentes) são os parâmetros utilizados para construir o modelo. Para realizar as análises apresentadas neste capítulo foi utilizada a metodologia de regressão linear múltipla, realizada por meio do *software Minitab*.

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

7.1. CIDADES COM GHR ABAIXO DE 54 MIL

Análise dos parâmetros – Posto de Saúde e Assistência Social

Candidate terms: logGHR, logGDA, ILUM, AVAC

	-----Step 1-----		-----Step 2-----		-----Step 3-----		-----Step 4-----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	70.547		46.70		45.035		58.73	
ILUM	2.9859	0.000	2.9859	0.000	2.9859	0.000	2.9859	0.000
logGHR			5.619	0.000	5.619	0.000	3.121	0.000
AVAC					1.662	0.000	1.6616	0.000
logGDA							-1.478	0.000
S	3.12854		2.24667		1.78941		1.66048	
R-sq	90.41%		95.06%		96.88%		97.31%	
R-sq (adj)	90.39%		95.04%		96.86%		97.29%	
R-sq (pred)	90.33%		95.00%		96.81%		97.25%	
Mallows' Cp	1220.86		399.23		80.79		5.00	

α to enter = 0.15, α to remove = 0.15

Análise de variância

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	4	47466.6	97.31%	47466.6	11866.6	4303.90	0.000
logGHR	1	2270.9	4.66%	226.7	226.7	82.22	0.000
logGDA	1	214.5	0.44%	214.5	214.5	77.79	0.000
ILUM	1	44097.7	90.41%	44097.7	44097.7	15993.73	0.000
AVAC	1	883.5	1.81%	883.5	883.5	320.44	0.000
Error	475	1309.7	2.69%	1309.7	2.8		
Lack-of-Fit	25	1138.4	2.33%	1138.4	45.5	119.62	0.000
Pure Error	450	171.3	0.35%	171.3	0.4		
Total	479	48776.2	100.00%				

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)
1.66048	97.31%	97.29%	97.25%

EQUAÇÃO FINAL PARA CIDADES COM GHR MENORES QUE 54 MIL

$$\text{CONSUMO FINAL [kWh/m}^2\text{/ano]} = 58,73 + 3,121 \log\text{GHR} - 1,478 \log\text{GDA} + 1,6616 \text{ AVAC} + 2,9859 \text{ ILUM}$$

Onde:

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

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

AVAC – Tipo de sistema de condicionamento de ar (0- Ventilador, 1 – Split Inverter, 2 – Split)

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

7.2. CIDADES COM GHR ACIMA DE 54 MIL

Análise dos parâmetros – Posto de Saúde e Assistência Social

Candidate terms: logGHR, AVAC, ILUM

	-----Step 1-----		-----Step 2-----		-----Step 3-----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	76.19		70.438		-10.39	
ILUM	3.0099	0.000	3.0099	0.000	3.0099	0.000
AVAC			5.757	0.000	5.757	0.000
logGHR					16.85	0.000
S	5.02052		1.72235		1.50689	
R-sq	78.86%		97.52%		98.11%	
R-sq (adj)	78.78%		97.50%		98.09%	
R-sq (pred)	78.56%		97.47%		98.06%	
Mallows' Cp	2890.69		90.33		4.00	

α to enter = 0.15, α to remove = 0.15

Análise de variância

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	33448.1	11149.4	4910.08	0.000
logGHR	1	200.6	200.6	88.33	0.000
AVAC	1	6363.3	6363.3	2802.36	0.000
ILUM	1	26884.2	26884.2	11839.54	0.000
Error	284	644.9	2.3		
Lack-of-Fit	14	297.0	21.2	16.47	0.000
Pure Error	270	347.9	1.3		
Total	287	34093.0			

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.50689	98.11%	98.09%	98.06%

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

CONSUMO FINAL [kWh/m²/ano] = -10,39 + 16,85 logGHR + 5,757 AVAC + 3,0099 ILUM

Onde:

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

AVAC – Tipo de sistema de condicionamento de ar (0- Ventilador, 1 – Split Inverter, 2 – Split)

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

7.3. AVALIAÇÃO ENTRE O CONSUMO SIMULADO E O CONSUMO CALCULADO

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

A Figura 7 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 97,81%, logo a equação de *benchmark* tem boa representatividade do modelo para a tipologia de **Posto de Saúde e Assistência Social**.

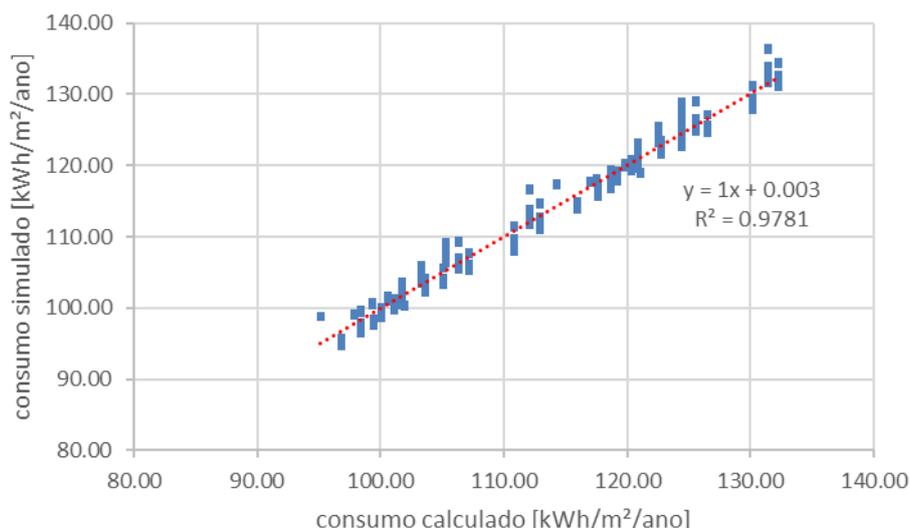


Figura 7 – Comparação entre o EUI simulado e o predito pela equação

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 9.

Tabela 9 – Parâmetros para Escala de Consumo de Energia em função do GHR, para Posto de Saúde e Assistência Social

Parâmetro	Variáveis Significativas de acordo com a cidade	
	GHR < 54mil	GHR ≥ 54mil
Cidade		
Ar condicionado	Ventilador	
	Split Inverter	x
	Split	x
Iluminação	W/m ²	x

A escala de eficiência é definida por meio do cálculo dos consumos máximo e mínimo, determinados a partir das informações da edificação em análise, considerando o cenário base utilizado para o desenvolvimento da equação de *benchmark*. A Tabela 8 apresenta a definição do cenário utilizado para determinar os consumos mínimos e máximos para esta tipologia.

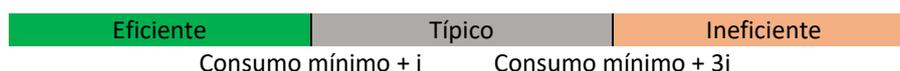
Tabela 8 – Cenários para o cálculo de consumo mínimo e máximo para a tipologia de Posto de Saúde e Assistência Social

Parâmetros		Limite Mínimo	Limite Máximo
Cidade	GHR	Parâmetro fixo	
	GDA		
Ar Condicionado	Ventilador*	Parâmetro fixo	
	-		
Iluminação	W/m ²	9,97	16,39

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 um Posto de Saúde localizado na cidade de São Paulo, com GHR = 14.172, GDA = 288, DPI de 8,00 W/m², ar condicionado Split Inverter, com absorvância das paredes igual a 0,50. **O consumo de energia operacional calculado é 93,60 kWh/m²/ano.**

Realizando o cálculo do consumo desta edificação nos cenários de consumo mínimo e consumo máximo, obtém-se os limites indicados Tabela 9.

Tabela 9 – Exemplo de Escala de Eficiência – Posto de Saúde em São Paulo.

Previsão de consumo de energia		Mínimo	Máximo
ILUMINAÇÃO	DPI (W/m ²)	9,97	16,39
AR CONDICIONADO	-	1- Split Inverter	2- Split
SÃO PAULO	GHR=14172 GDA=288	Consumo geral: 99,50 [kWh/m²/ano]	Consumo geral: 120,30 [kWh/m²/ano]

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

$$i = \frac{(120,3) - (99,5)}{5} = 4,2$$



Considera-se nesse exemplo, portanto, que a edificação analisada apresenta consumo operacional inferior ao consumo mínimo da faixa típica (**93,6 < 103,6 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 **Posto de Saúde e Assistência Social**.

Os parâmetros com maior impacto no consumo de energia desta tipologia foram: graus-hora de resfriamento (GHR); graus-dia de aquecimento (GDA); tipo de sistema de condicionamento de ar (AVAC) e iluminação (ILUM).

As variações de orientação solar e envoltória 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 condicionamento de ar, uma vez que cidades mais quentes tendem a apresentar um maior consumo para resfriamento. O mesmo acontece com o GDA, ou seja, quanto maior o valor, tendem a apresentar um maior consumo com o aquecimento.

A iluminação artificial além do impacto direto no consumo geral da edificação, têm impacto no consumo do condicionamento de ar, uma vez que parte da energia consumida pelas lâmpadas são dissipadas na forma de calor. Logo, quanto maior a densidade de potência de iluminação instalada, maior será o consumo para resfriamento. O próprio funcionamento do sistema AVAC irá determinar o seu consumo final. Ambos os sistemas considerados nessa análise são sistemas de expansão direta, unitários e do tipo Split. A diferença é que o compressor do sistema com a tecnologia inverter modula a quantidade de gás refrigerante que irá para a evaporadora, evitando que ele fique ligado e desligando como em um Split tradicional.

Com a previsão do consumo de energia em relação ao consumo simulado, verificou-se que as equações têm um R^2 de 97,81%, logo os modelos regressivos empregados foram representativos para prever o consumo de energia para a tipologia de **Posto de Saúde e Assistência Social**.

Tabela 10 -Parâmetro analisado e sua relevância para a equação de benchmark da tipologia de Posto de Saúde e Assistência Social

Parâmetros analisados	Parâmetros na equação para GHR < 54 mil	Parâmetros na equação para GHR > 54 mil
Clima GHR	✓	✓
Clima GDA	✓	
AVAC	✓	✓
Iluminação	✓	✓
Envoltória		
Absortância		
Orientação Solar		

REFERÊNCIAS

- ASHRAE Procedures for Commercial Building Energy Audits, second edition, ASHRAE 2011.
- ASHRAE Standard 90.4P, Proposed Energy Standard for Data Centers and Telecommunications Buildings, public review. 2015.
- Borgstein, E. H., and R. Lamberts - Developing energy consumption benchmarks for buildings: Bank branches in Brazil. *Energy and Buildings* 82 (2014) 82–91.
- Borgstein, E.H. - Energia primária em edifícios no Brasil, *Revista Sistemas Prediais, Engenharia e Arquitetura*, January 2014.
- CB3E - Proposta de método para a avaliação da eficiência energética com base em energia primária de edificações comerciais, de serviços e públicas. Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações, agosto 2017.
- CBCS - Comunicação técnica: Desenvolvimento de benchmarks nacionais de consumo energético de edificações em operação. Conselho Brasileiro de Construção Sustentável, outubro 2014.
- CIBSE – TM22: Energy Assessment and Reporting Methodology, Chartered Institute of Building Services Engineers, 2006.
- CIBSE – TM46: Energy Benchmarks, Chartered Institute of Building Services Engineers, 2008.
- CIBSE - TM47: Operational Ratings and Display Energy Certificates, Chartered Institute of Building Services Engineers, 2009.
- CIBSE Guide D - Transportation systems in buildings, Chartered Institute of Building Services Engineers, 2010.
- CIBSE Guide F - Energy efficiency in buildings, Chartered Institute of Building Services Engineers, 2012.
- CIBSE TM54 - Evaluating Operational Energy Performance of Buildings at the Design Stage, Chartered Institute of Building Services Engineers, 2013.
- ECON19 - Energy Efficiency Best Practices Programme, Energy Consumption Guide 19: Energy use in Offices, March 2003.
- EN 15603 - Energy performance of buildings — Overall energy use, CO2 emissions and definition of energy ratings, 2008.
- EPE - Estudos de Demanda de Energia, Nota técnica DEA 13/14 : Demanda de Energia 2050. Plano Nacional de Energia 2050, Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2014-1.
- EPE - Estudos Econômicos, Nota técnica DEA 12/14 : Cenário Econômico 2050. Plano Nacional de Energia 2050, Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2014-2.
- Healy, D. - Asset Ratings and Operational Ratings: The relationship between different energy certificate types for UK buildings, Submitted to the University of Cambridge in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Master of Studies in Interdisciplinary Design for the Built Environment, 2011
- Hinge, A., A. Cullen, B. Neely, C. Taylor - Building energy rating schemes around the world: What do we know? ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 2014.
- Hong, S.M. and P. Steadman – An Analysis of Display Energy Certificates for Public Buildings, 2008-2012, A report to the Chartered Institute of Building Services Engineers, UCL Energy Institute December 2013
- IEA - Energy Performance Certification of Buildings: A policy tool to improve energy efficiency. International Energy Agency, OECD, Paris, 2010.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). Portaria 372, de 17 de setembro de 2010. Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, De Serviços e Públicos. Rio de Janeiro, 2010.

MENEZES, A.C., A. Cripps, D. Bouchlaghem, R. Buswell, 2013 - Benchmarking small power energy consumption in UK office buildings: a review of data published in CIBSE guide F. Building Services Engineering Research and Technology, 34 (1), pp. 73-86.

SARFRAZ, O.; BACH, C. K.; WILLKINS, C. K. ASHRAE RP-1742 – Plug load design factors. ASHRAE Journals, janeiro, 2018.

Standeven, M. and B. Bordass – Landlord's Energy Statement: Guidance and Specification, version 2.3, Usable Buildings Trust, April 2007.

YUVENTI, J.; MEHDIZADEH, R. A critical analysis of power usage effectiveness and its use in communicating data center energy consumption. Energy and Buildings 64 (2013) 90-94.