



CBCS

Conselho Brasileiro de Construção Sustentável

RT2B.01: Desenvolvimento de arquétipo, modelo de simulação, análise de sensibilidade e equações de *benchmark* para a tipologia de Agência Bancária

PROJETO: ECV – PRFP 003B/2020

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

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

Ana Carolina Veloso

Ana Paula Melo

Anderson Letti

Arthur Cursino

Camila Suizu

Clarice Degani

Daniel Amaral

Eduardo Kanashiro

Roberto Lamberts

Kleber Moura

Coordenação Eletrobras/Procel: Elisete Cunha

Publicado em 08/03/2021

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

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..... | 9 |
| 4.6. Definição da carga térmica e sistema de condicionamento de ar | 10 |
| 5. MODELO DE SIMULAÇÃO | 12 |
| 5.1. Cenários de simulação | 12 |
| 5.2. Método de análise dos resultados das simulações..... | 13 |
| 6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE | 14 |
| 6.1. análise em Cidades com ghr abaixo de 54 mil | 14 |
| 6.1.1. aGÊNCIAS..... | 14 |
| 6.1.2. ÁREAS DE atm | 15 |
| 6.2. análise em Cidades com ghr acima de 54 mil | 16 |
| 6.2.1. AGÊNCIAS..... | 16 |
| 6.2.2. áreas de atm | 17 |
| 6.3. ANÁLISE DOS IMPACTOS DOS PARÂMETROS SIGNIFICATIVOS | 19 |
| 7. EQUAÇÃO DE REGRESSÃO | 24 |
| 7.1. Cidades com GHR ACIMA de 54 mil | 24 |
| 7.1.1. AGÊNCIAS | 24 |
| 7.1.2. Áreas de atm..... | 25 |
| 7.2. Cidades com GHR ABAIXO de 54 mil..... | 26 |
| 7.2.1. AGÊNCIAS | 26 |
| 7.2.2. Áreas de atm..... | 27 |
| 7.3. Avaliação entre o consumo simulado e o consumo calculado | 28 |
| 8. ESCALAS DE CONSUMO DE ENERGIA | 29 |
| 8.1. Método para cálculo das escalas | 29 |
| 8.2. Exemplo de aplicação | 30 |
| 9. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 31 |
| REFERÊNCIAS | 32 |

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.

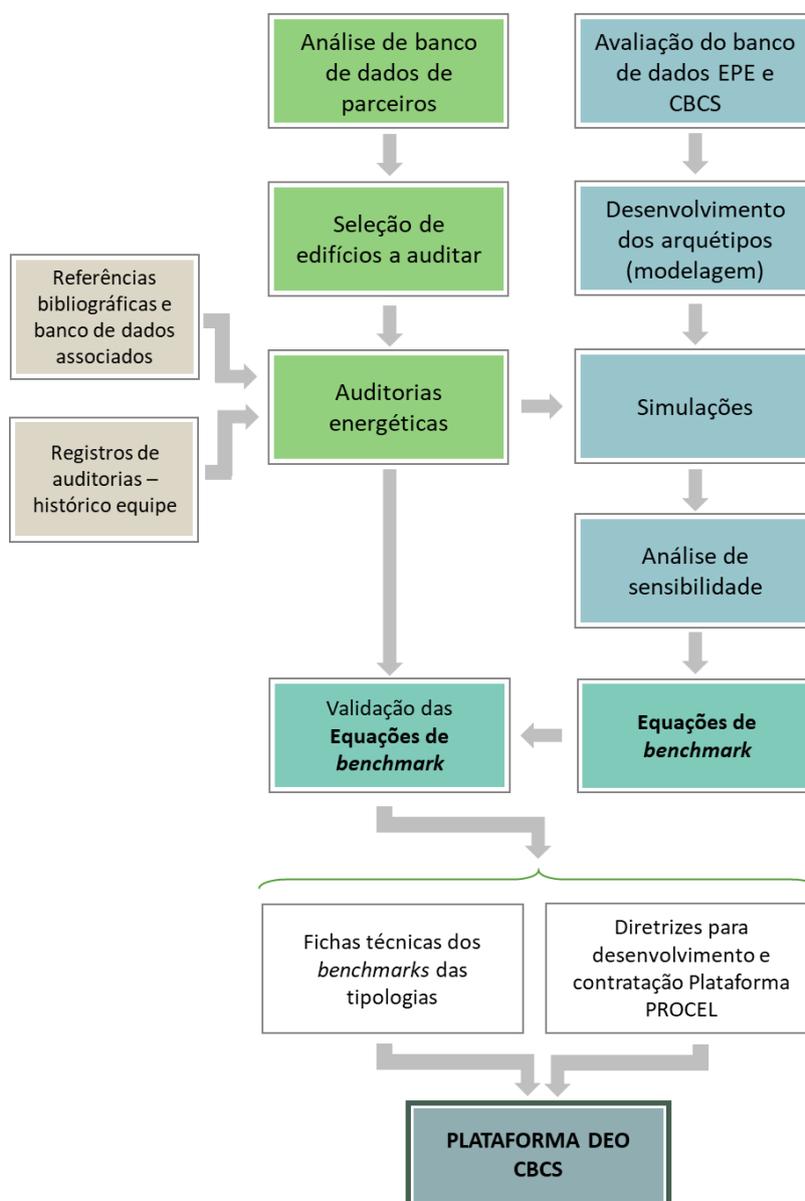


Figura 1 - Método aplicado pelo CBCS para o desenvolvimento dos benchmarks no âmbito deste convênio

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 **Agência Bancária**.

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, entorno, tipo de vidro, orientação, envoltória, renovação e condicionamento de ar. Uma análise de sensibilidade foi realizada com os resultados das simulações, identificando as principais variáveis relativas a esta tipologia. Então, estas variáveis preponderantes foram utilizadas – aliadas aos resultados das simulações – para construir um modelo de regressão multivariada, dando origem à equação de *benchmark* para esta tipologia. Por fim, apresenta-se a definição das escalas de consumo, que estabelecem os limites para definição do consumo operacional como eficiente, típico ou ineficiente. A Figura 2 apresenta o fluxograma das etapas conduzidas neste relatório.

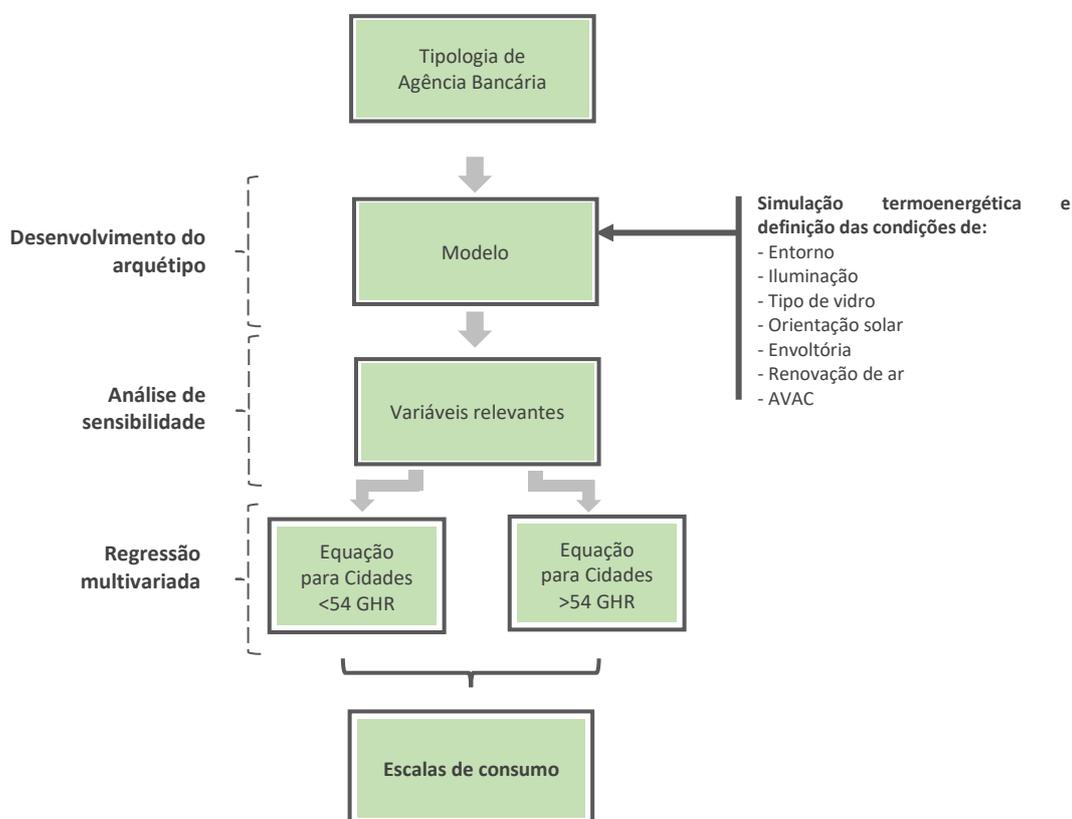


Figura 2 – Fluxograma de desenvolvimento das equações de benchmark e escalas de consumo para a tipologia de Agência Bancária

3. CIDADES SELECIONADAS

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

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

Esta estratificação foi necessária para adequar a representatividade do clima no desempenho do sistema de condicionamento de ar. A **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 **Agência Bancária** constitui-se tipicamente por edifícios independentes ou partes de edifícios cuja função principal são as atividades de atendimento ao público e de escritório.

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 consideradas agências ocupando dois pavimentos, com o seu pavimento térreo em contato direto com o solo e adotados dois cenários:

- Agências bancárias ocupando toda edificação, com até dois pavimentos e envoltória toda exposta ao clima externo.
- Agências bancárias ocupando parte de uma edificação maior, com múltiplos pavimentos e apenas a fachada frontal exposta ao clima externo.

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: uma área para receber clientes do banco, uma zona de caixas eletrônicos e uma área de escritórios utilizada por funcionários da agência. As zonas térmicas que compõe o arquétipo são: uma zona térmica de caixas eletrônicos (ATM), uma zona térmica técnica atrás dos caixas eletrônicos (Back ATM), duas zonas térmicas de caixas para atendimento ao público, uma no térreo e outra no primeiro pavimento, uma zona térmica de atividade administrativa e uma zona térmica para a Central de Processamento de Dados (CPD).

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 |
|---------------|------------|------------------------------|--------------------------|
| Caixas 01 | 1 | 150 | 25% |
| Back ATM | 1 | 20 | 3,3% |
| ATM Clientes | 1 | 130 | 21,7% |
| Administração | 1 | 144 | 24% |
| Caixas 02 | 1 | 150 | 25% |
| CPD | 1 | 6 | 1% |
| TOTAL | 6 | 600 | 100% |

O modelo do arquétipo foi construído com base em uma edificação de dois pavimentos de dimensões 20 m x 15 m (L x C) cada pavimento, totalizando então 600 m² de área. Quanto ao pé-direito, considerou-se o valor médio observado nas auditorias de 2,76 m, medidos do piso ao forro. Dessa forma, como a simulação energética considera uma modelagem de construção entre pisos, adotou-se o pé-direito de 3,20 m para contemplar a medida até o forro, acrescido por 24 cm do forro até à laje, e acrescido de 20 cm de espessura da própria laje.

A Figura 3 apresenta a volumetria, planta e configuração dos ambientes considerados, e a Figura 4 as perspectivas do modelo.

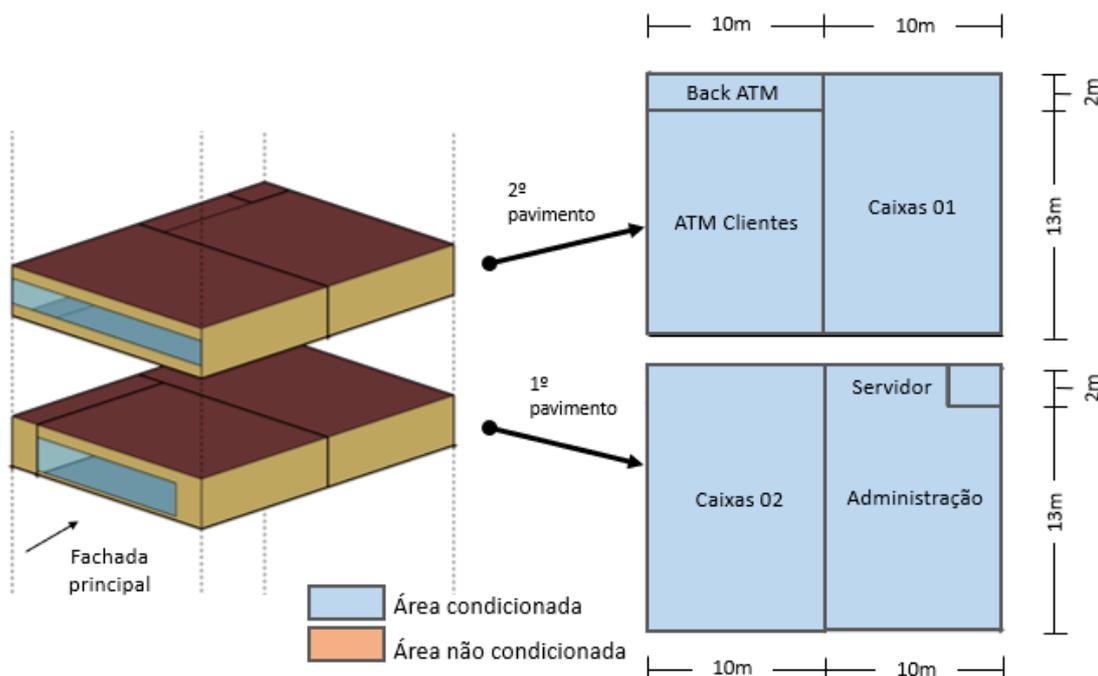


Figura 3 – Volumetria e configuração da planta do arquétipo

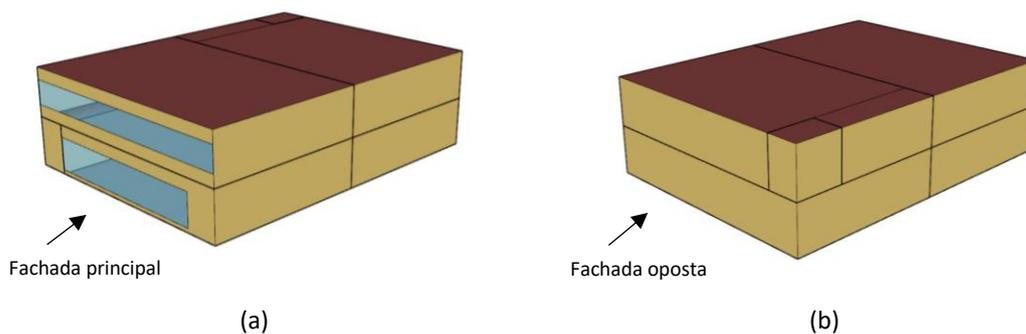


Figura 4 – Perspectiva da volumetria da edificação (a) frente e lateral esquerda e (b) fundos e lateral direita

4.2. ILUMINAÇÃO

No levantamento dos dados do projeto META foi identificado uma predominância significativa (85%) de iluminação à base de lâmpadas fluorescentes. Entretanto, com a evolução e disponibilização de diferentes tipos de lâmpadas de LED considerou-se que este seria um cenário mais eficiente. Portanto foram definidos dois cenários: um cenário mais eficiente (ILUM01) representando as lâmpadas tipo LED com

densidade de potência instalada de 10 W/m² e um cenário menos eficiente (ILUM02) representando as lâmpadas fluorescentes com densidade de potência instalada de 23,84 W/m². Esses valores correspondem, respectivamente, a uma classe A e classe D, 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 a iluminação para cada tipo de ambiente.

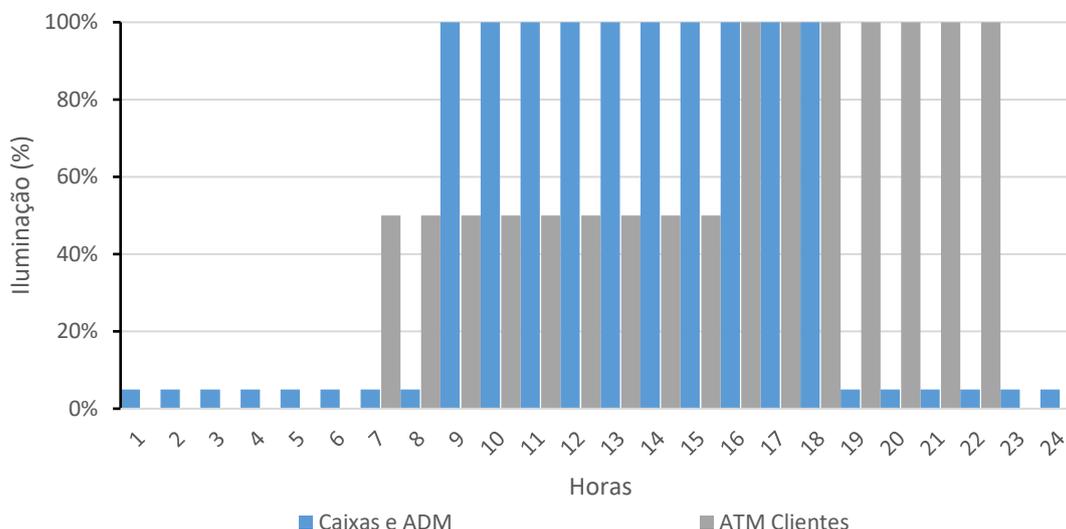


Figura 5 – Cronograma adotado para Iluminação para cada tipo de ambiente

4.3. OCUPAÇÃO

O horário de funcionamento desta tipologia foi definido da seguinte forma: das 6:00 às 22:00 horas na zona térmica dos caixas eletrônicos (ATM); das 08:30 às 19:00 nas zonas térmicas de caixas e administrativa; e o servidor que funciona ininterruptamente. Na zona térmica de ATM foi considerado um total de 200 pessoas/dia, nas zonas térmicas de caixas foram considerados um total de 6 funcionários e 100 clientes/dia por zona, e na zona térmica administrativa foi considerada um total de 6 funcionários. Nas zonas térmicas do servidor e Back ATM não foram considerados ocupação pois são áreas transitórias (tempo de ocupação inferior a 15 minutos por hora). A Figura 6 ilustra a ocupação para cada tipo de ambiente.

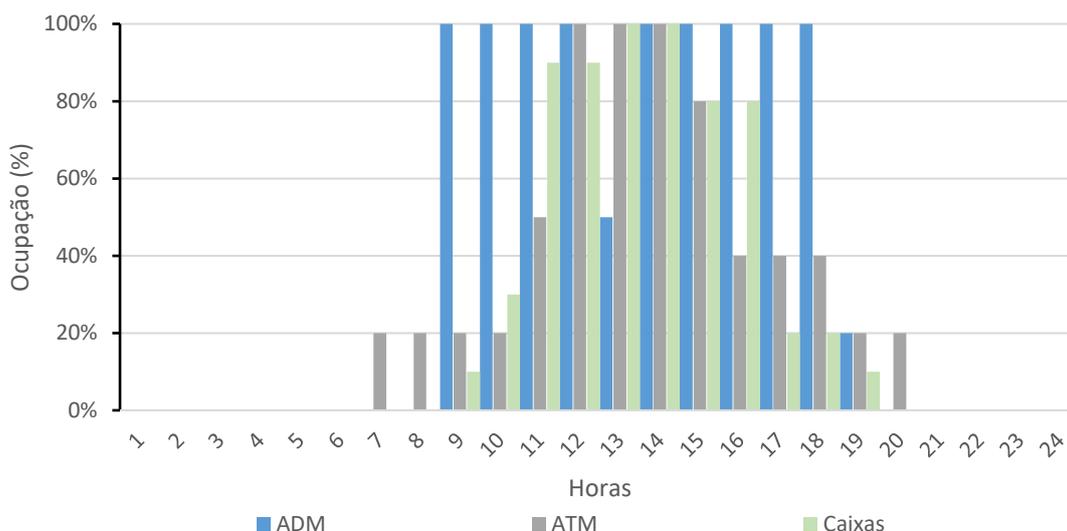


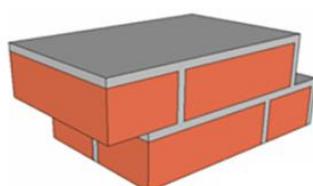
Figura 6 – Cronograma adotado para ocupação para cada tipo de ambiente.

4.4. SOMBREAMENTO E ORIENTAÇÃO SOLAR

Pela simetria do arquétipo desenvolvido, foram considerados quatro cenários de orientação solar considerando as principais direções, norte (ORIE01), oeste (ORIE02), sul (ORIE03) e leste (ORIE04).

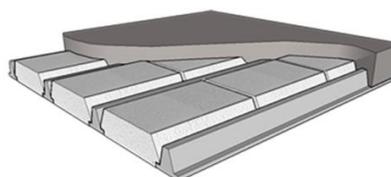
4.5. ENVOLTÓRIA E TIPO DE VIDRO

Para definir os cenários que representam a eficiência da envoltória da edificação, foram adotados os valores apresentados nos Requisitos Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviço e Públicos, RTQ-C (INMETRO, 2010). Para o cenário menos eficiente (ENVO01) foi considerada a transmitância térmica da parede igual a 3,70 W/m².K, da cobertura igual a 2,00 W/m².K e uma absorvância à radiação solar de ambos igual a 0,7, equivalente ao concreto aparente. Para o cenário mais eficiente (ENVO02), onde os materiais utilizados na construção da edificação são mais isolantes e com menor retenção do calor proveniente da radiação solar incidente, minimizando as oscilações de temperatura interior em função das condições climáticas externas que muitas vezes são indesejados nos ambientes internos, foi determinado uma envoltória com transmitância térmica das paredes igual a 2,50 W/m².K, da cobertura de 1,00 W/m².K e um valor de absorvância à radiação solar de ambos igual a 0,3, equivalente à uma pintura na cor branca. A Figura 7 apresenta os elementos construtivos de referência para paredes e coberturas de ambos os cenários.



(a)

Transmitância térmica: 3,7 W/m²K
Capacidade térmica: 142 kJ/m²K
Atraso térmico: 2,3 h



(b)

Transmitância térmica: 2,0 W/m²K
Capacidade térmica: 132 kJ/m²K
Atraso térmico: 2,5 h

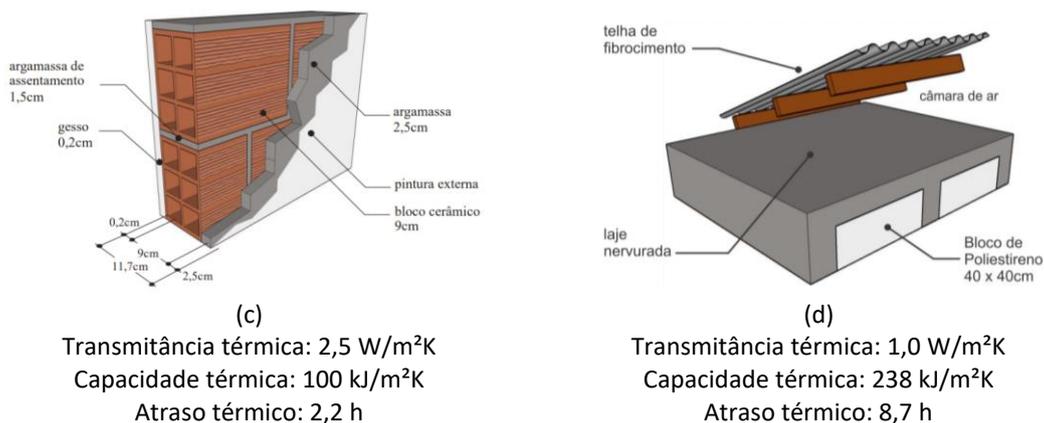


Figura 7 – Elementos construtivos de referência para: Cenário ENVO01 (a) Paredes e (b) Cobertura e Cenário ENVO02 (c) Paredes e (d) Cobertura

Em ambos os casos foram consideradas unidades com seu piso térreo 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 foram definidos um vidro de controle solar (FSOL01) e um vidro simples laminado (FSOL02). A relação janela-parede externa (WWR) do edifício é de 10,6% no caso do entorno ENTO01 e de 49,4 % para o cenário ENTO02. O vidro de controle solar possui transmitância térmica 5,6 W/m².K, fator solar (SHGC) de 0,3 e a transmissão luminosa de 0,4. O vidro simples possui transmitância térmica de 5,6 W/m².K, fator solar (SHGC) de 0,7 e a transmissão luminosa de 0,6, que apesar da maior passagem de fluxo luminoso, permite também que mais calor seja transmitido para o lado interno da edificação.

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

Uma etapa preliminar de simulação termoenergética do arquétipo foi realizada, utilizando o ambiente de simulação *EnergyPlys*, versão 9.2. O modelo foi simulado utilizando arquivos climáticos do tipo INMET¹ para as oito cidades representativas. Essa etapa preliminar de simulação foi feita considerando diversas combinações de todos os cenários de variáveis que contribuem para carga interna (ou seja, vários tipos de iluminação, 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 |
|------------------|----------------|
| Entorno | ENTO01 |
| Iluminação | ILUM02 |
| Tipo de Vidro | FSOL02 |
| Orientação Solar | ORIE02 - Oeste |
| Envoltória | ENVO01 |
| Renovação de ar | RENO01 |

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

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 do sistema de condicionamento de ar foi mantida com o padrão do *EnergyPlus* (3 W/W no modo de refrigeração e 2,75 W/W no modo de aquecimento). Com relação à eficiência dos ventiladores, utilizaram-se os coeficientes para vazão constante ($P \text{ [kW]} = \text{vazão [l/s]} \times 0,0017$), e para vazão variável ($P \text{ [kW]} = \text{vazão [l/s]} \times 0,0024$), conforme recomendação da ASHRAE 90.1-2010 (ASHRAE, 2011).

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

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

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

Tabela 4 – Carga térmica por cidade representativa.

| Cidade | UF | Zona Bioclimática | Carga Térmica (TR) |
|-------------------------------|-----------|-------------------|--------------------|
| Campos do Jordão | SP | 1 | 21.3 |
| São Paulo | SP | 3 | 22.0 |
| Porto Alegre | RS | 3 | 25.4 |
| Campinas | SP | 3 | 21.7 |
| Rio de Janeiro (Vila Militar) | RJ | 8 | 25.4 |
| Vitória | ES | 8 | 24.6 |
| Recife* | PE | 8 | 26.2 |
| Fortaleza | CE | 8 | 23.2 |

* Cidade selecionada

Percebe-se que, dentre as cidades selecionadas como representativas, a cidade com maior carga térmica foi o Recife, com 26.2 TR.

Os sistemas de condicionamento de ar na tipologia de **Agência Bancária** têm duas demandas diferentes: o atendimento às necessidades de conforto dos ocupantes, clientes e funcionários; e o atendimento às necessidades operacionais dos equipamentos do servidor (CPD) e dos ATM. Assim foram definidos um sistema central que atende às zonas térmicas ocupadas (zonas térmicas de caixas eletrônicos, duas zonas térmicas de caixas e zona administrativas) e dois sistemas unitários (um que atende à zona térmica do servidor e outro que atende à zona térmica Back ATM).

Dois cenários para os sistemas de condicionamento de ar foram considerados nas simulações. O primeiro cenário considera sistema tipo Split (EER de 3,24 W/W) para o servidor e para a área técnica dos caixas eletrônicos (EER de 3,42 W/W) e um sistema tipo Splitão (EER de 3,16 W/W) para o restante da agência.

O segundo cenário considera sistema tipo Split com Inverter para o servidor (EER de 3,23 W/W) e para a área técnica dos caixas eletrônicos (EER de 3,42 W/W) e um sistema tipo VRF para o restante da agência (EER 4,57 W/W). O Splitão é um sistema central em que uma condensadora alimenta uma evaporadora interna que resfria todo o ar a ser climatizado e o distribui para as zonas através de dutos. Esse sistema possui apenas um controle de temperatura e a vazão de ar é constante independentemente da variação da carga térmica de cada zona. O VRF também é um sistema com uma condensadora que alimenta várias evaporadoras localizadas nas zonas térmicas, no entanto ele responde individualmente à variação de carga térmica de cada zona, modulando a vazão de gás refrigerante e, por isso, sendo mais eficiente que o sistema tipo Splitão.

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 cenário sem renovação de ar; e outro com renovação de ar com uma vazão de 27 m³/h para cada ocupante do espaço, conforme Nível 3 da norma ABNT NBR 16401-3.

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, 2.048 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 simulações

| Parâmetro | Cenário | Dado utilizado |
|--------------------------|---------|---|
| Condição de entorno | ENTO01 | Edificação exposta |
| | ENTO02 | Edificação adiabática, apenas fachada principal exposta |
| Iluminação | ILUM01 | DPI = 10,0 W/m ² |
| | ILUM02 | DPI = 23,84 W/m ² |
| Orientação solar | ORIE01 | Frente orientada a Norte |
| | ORIE02 | Frente orientada a Oeste |
| | ORIE03 | Frente orientada a Sul |
| | ORIE04 | Frente orientada a Leste |
| Envoltória e Absortância | ENVO01 | U _{parede} = 3,70 W/m ² .K; U _{cobertura} = 2,00 W/m ² .K Absortância = 0,70 |
| | ENVO02 | U _{parede} = 2,50 W/m ² .K; U _{cobertura} = 1,00 W/m ² .K Absortância = 0,30 |
| Tipo de vidro | FSOLO1 | U = 5,6 W/m ² .K; SHGC = 0,3; VT = 0,4 |
| | FSOLO2 | U = 5,6 W/m ² .K; SHGC = 0,7; VT = 0,6 |
| Renovação de ar | RENO01 | Q = 27 m ³ /h.pessoa, nível 3 |
| | RENO02 | Não tem |
| AVAC | Splitão | Servidor: Split EER = 3,24 W/W ATM = Split EER = 3,42 W/W Agência = Splitão EER = 3,16 W/W |
| | VRF | Servidor: Inverter EER = 3,23 W/W ATM = Inverter EER = 3,42 W/W Agência = VRF EER = 4,57 W/W |

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. 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 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 | <54.000 GHR |
| São Paulo | SP | -23,85 | -46,64 | 792 | 14.172 | |
| Porto Alegre | RS | -30,03 | -51,23 | 47 | 23.954 | |
| Campinas | SP | -22,82 | -47,06 | 640 | 31.412 | |
| Rio de Janeiro (Vila Militar) | RJ | -22,86 | -43,41 | 45 | 45.016 | |
| 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 as análises foram divididas entre o consumo da zona dos ATM e o consumo do restante da agência. A intenção é que na equação de *benchmarking* o número de ATM seja um fator usado para ajustar o índice de consumo aliado com a área da agência, em função de sua carga térmica.

No caso de haver ambientes diferentes dos considerados e com cargas específicas, estas deverão ser consideradas na análise comparativa do consumo real com o estimado pela equação de benchmark, conforme seus perfis de carga e 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: condição de entorno (ENTO), iluminação (ILUM), orientação solar (ORIE), envoltória (ENVO), tipo de vidro (FSOL), renovação de ar (RENO) e tipo de sistema de condicionamento de ar (AVAC). Nesta tipologia, o parâmetro absorvância solar (ASOL) está considerado na variação do parâmetro envoltória (ENVO). 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. AGÊNCIAS

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

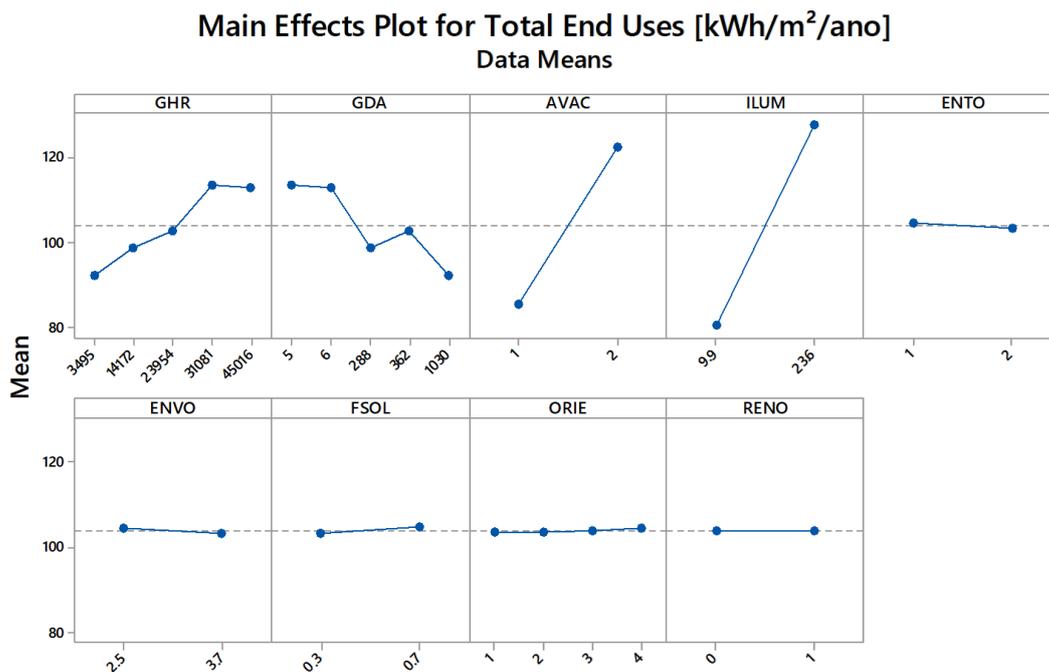


Figura 8 - Efeito dos parâmetros no consumo de energia

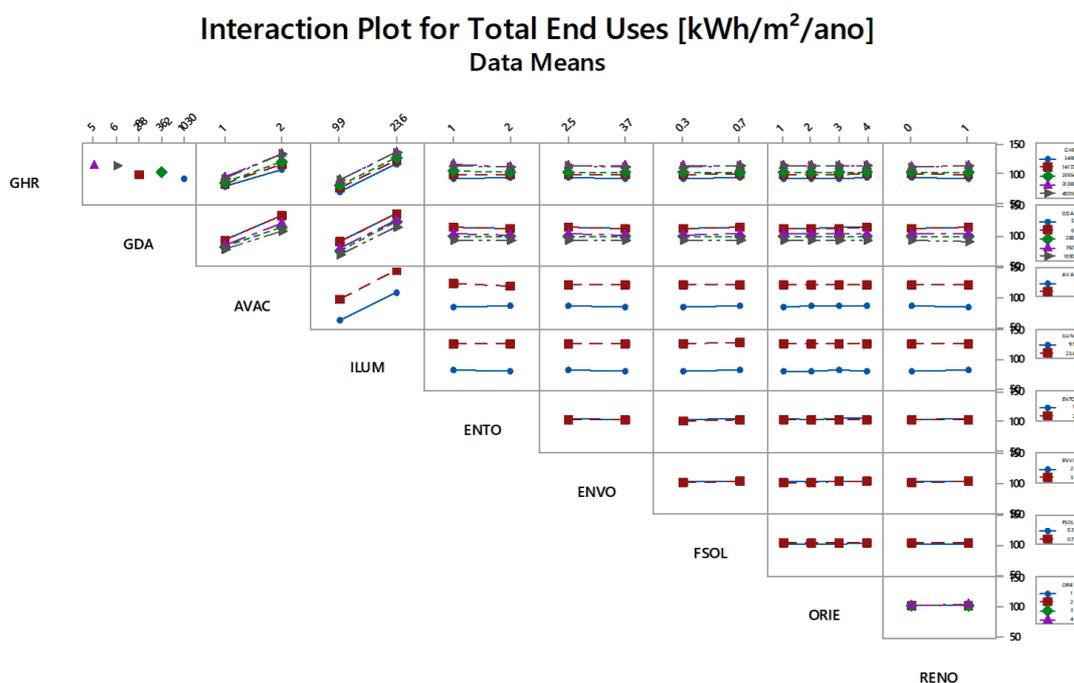


Figura 9 - Interação entre os parâmetros

6.1.2. ÁREAS DE ATM

Por meio das Figuras 10 e 11, verifica-se que os parâmetros com variações mais significativas são o GHR, GDA e ILUM. Os parâmetros AVAC e ORIE apresentaram pouca variação e as variações dos parâmetros ENTO, ENVO, FSOL e RENO tiveram impactos ainda menores no cálculo do consumo de energia.

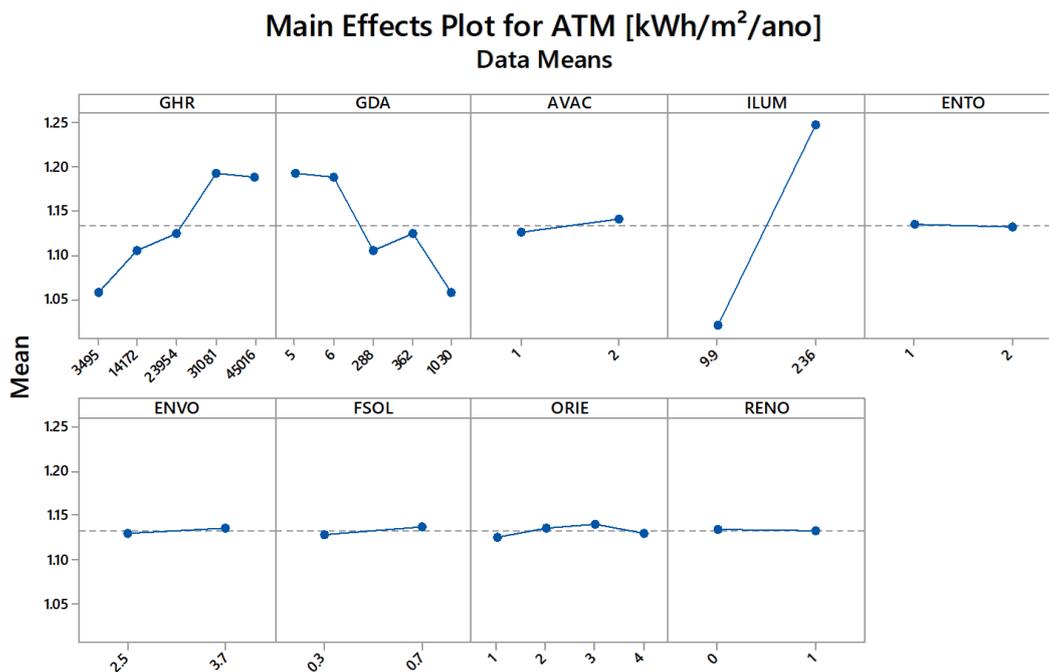


Figura 10 - Efeito dos parâmetros no consumo de energia

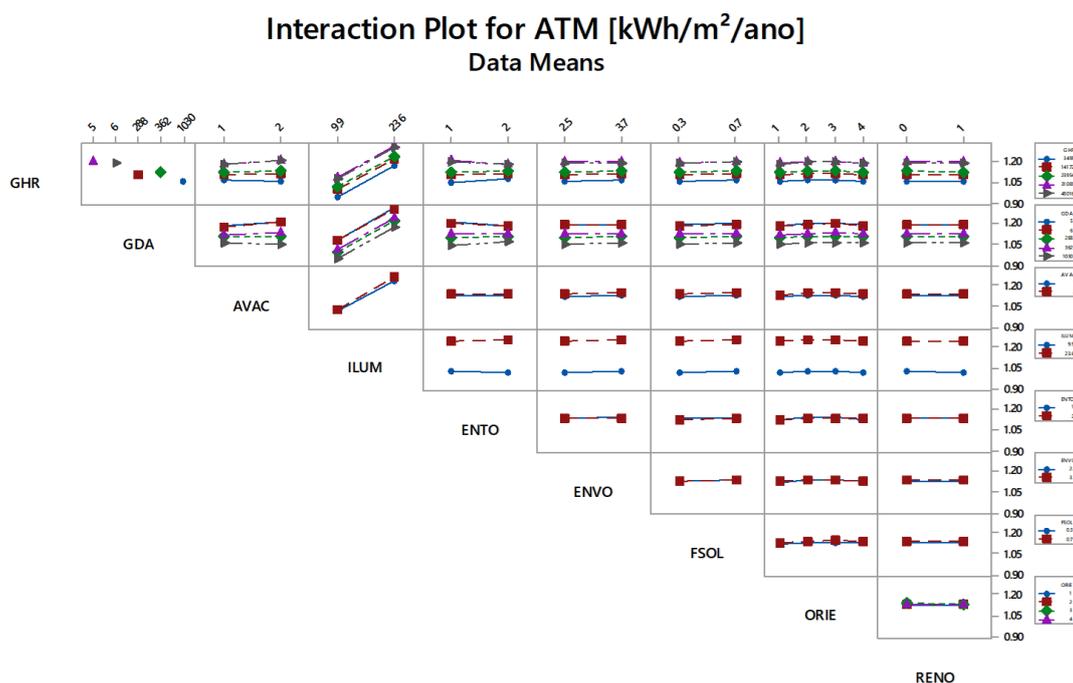


Figura 10. Interação entre os parâmetros

6.2. ANÁLISE EM CIDADES COM GHR ACIMA DE 54 MIL

6.2.1. AGÊNCIAS

Por meio das Figuras 12 e 13, verifica-se que os parâmetros com variações muito significativas são AVAC e ILUM. As variações dos parâmetros GHR, ENTO, ENVO e RENO podem ser consideradas e as variações

dos parâmetros FSOL e ORIE tem pouco impacto no cálculo do consumo de energia e foram retirados das análises da equação de regressão da Agência para GHR acima de 54 mil.

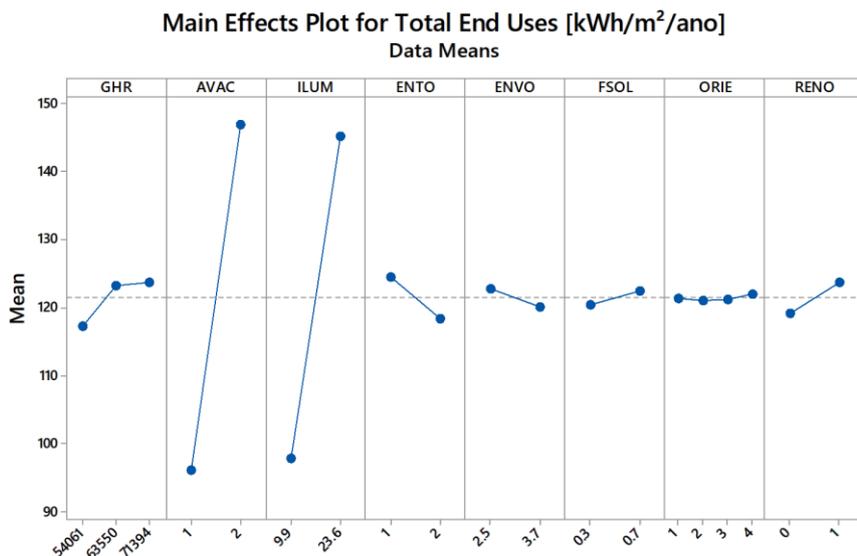


Figura 11 - Efeito dos parâmetros no consumo de energia

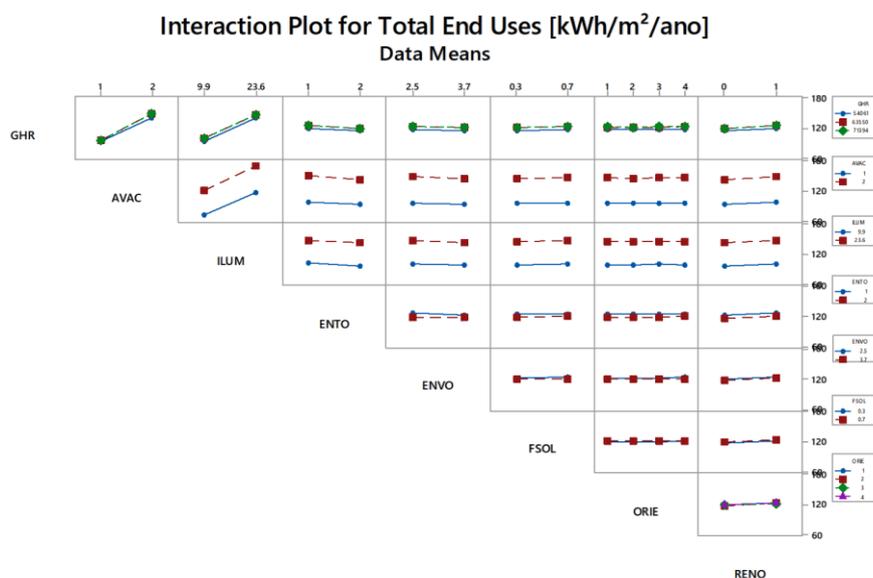


Figura 12 - Interação entre os parâmetros

6.2.2. ÁREAS DE ATM

Por meio das Figuras 14 e 15, verifica-se que os parâmetros com variações mais significativas são o GHR, AVAC, ILUM e ENTO. As variações dos parâmetros ENVO, FSOL e ORIE tiveram pouco impacto no cálculo do consumo de energia e o parâmetro RENO menos ainda para estas áreas específicas, sendo desconsiderados nas análises da equação de regressão para as áreas de ATMs para as cidades com GHR acima de 54 mil.

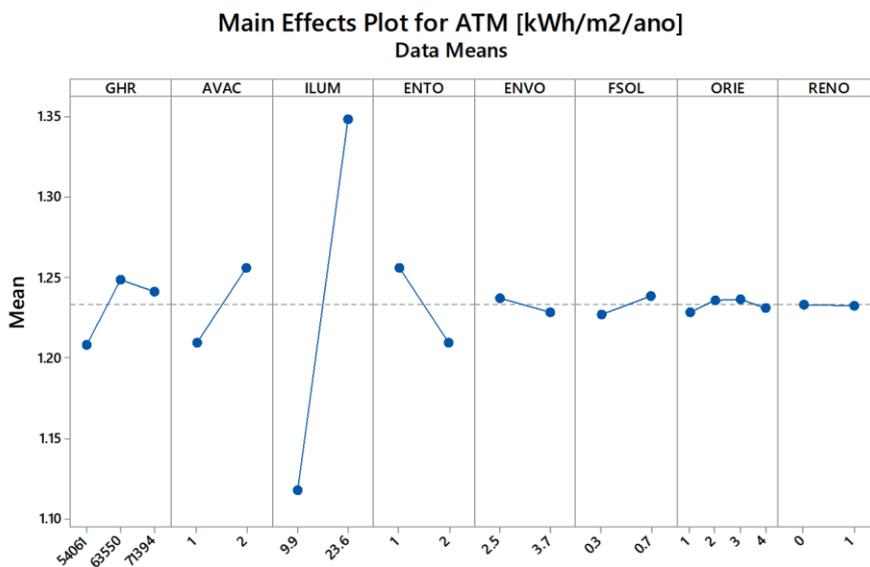


Figura 13. Efeito dos parâmetros no consumo de energia

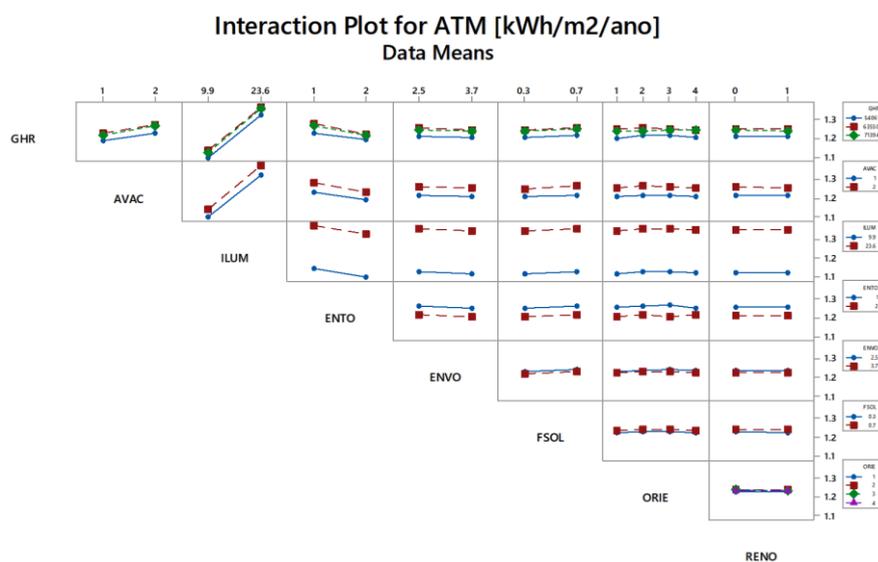


Figura 14. Interação entre os parâmetros

6.3. ANÁLISE DOS IMPACTOS 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. Para as áreas gerais das agências, foram considerados: GHR, GDA, AVAC, ILUM, ENTO, ENVO e RENO.

A condição de entorno, ou seja, se a edificação se encontra inserida em outra edificação ou se ela está exposta ao ambiente externo também apresentou uma diferença no consumo de condicionamento de ar que será considerada, chegando a 30% em alguns casos, como pode ser observado na Tabela 7.

Tabela 7 – Impacto das condições de entorno no consumo do sistema de condicionamento de ar

| | | | |
|-------------------------------|---|--------------------------------------|------------------------------------|
| Modelo base | AVAC: | Sistema Splitão (EER = 3,16W/W) | |
| | Iluminação: | PBE classe A (10,0W/m ²) | |
| | Envoltória: | Upar: 3,7 / Ucob: 2,0 / α: 0,7 | |
| | Entorno: | Parâmetro analisado | |
| | Vidro: | Menor fator solar / SHGC: 0,3 | |
| | Orientação: | Norte (0°) | |
| | Renovação: | Sem renovação interna de ar | |
| Cidade | Consumo anual de energia [kWh/m²] | | Variação no consumo de AVAC |
| | Parâmetro analisado: Entorno | | |
| | Adiabático | Exposto | |
| Campos do Jordão | 36,02 | 36,76 | 2,1% |
| São Paulo | 44,81 | 48,78 | 8,9% |
| Porto Alegre | 49,16 | 56,78 | 15,5% |
| Campinas | 62,13 | 75,72 | 21,9% |
| Rio de Janeiro (Vila Militar) | 62,39 | 75,76 | 21,4% |
| Vitória | 67,25 | 84,15 | 25,1% |
| Recife | 74,39 | 96,94 | 30,3% |
| Fortaleza | 76,41 | 95,77 | 25,3% |

A

Tabela 8, ilustra a variação no consumo de energia elétrica no sistema de condicionamento de ar de uma edificação construída com um material mais isolante e um menos isolante. A variação no consumo do sistema de condicionamento de ar foi significativa, atingindo uma diferença de 17,5% na cidade de Recife.

Tabela 8 – Impacto da envoltória no consumo do sistema de condicionamento de ar

| Modelo base | AVAC: | Sistema VRF (EER = 4,57W/W) | |
|-------------------------------|--|---|-----------------------------|
| | Iluminação: | PBE classe D (23,84W/m ²) | |
| | Envoltória: | Parâmetro analisado | |
| | Entorno: | Exposto | |
| | Vidro: | Maior fator solar / SHGC: 0,7 | |
| | Orientação: | Sul (180°) | |
| | Renovação: | Com renovação (27m ³ /h.pessoa) | |
| Cidade | Consumo anual de energia [kWh/m ²] | | Variação no consumo de AVAC |
| | Parâmetro analisado: Envoltória | | |
| | Mais isolante Upar: 2,5 / Ucob: 1,0 / α: 0,3 | Menos isolante Upar: 3,7 / Ucob: 2,0 / α: 0,7 | |
| Campos do Jordão | 23,61 | 25,33 | 7,3% |
| São Paulo | 30,58 | 31,84 | 4,1% |
| Porto Alegre | 32,88 | 35,75 | 8,7% |
| Campinas | 42,10 | 46,02 | 9,3% |
| Rio de Janeiro (Vila Militar) | 41,69 | 45,56 | 9,3% |
| Vitória | 44,57 | 49,39 | 10,8% |
| Recife | 47,98 | 56,38 | 17,5% |
| Fortaleza | 48,36 | 54,02 | 11,7% |

O sistema de iluminação, além do consumo próprio de energia elétrica, também aumenta a carga térmica dentro da edificação, influenciando o consumo de energia do sistema de condicionamento de ar. A Tabela 9 ilustra o impacto no sistema de condicionamento de ar ao substituir o sistema de iluminação no padrão PBE classe D (23,84 W/m²) para um PBE classe A (10,0 W/m²), por vezes reduzindo mais de 20% 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 9 – Impacto do sistema de iluminação no consumo do sistema de condicionamento de ar

| | | | |
|-------------------------------|---|--|-----------------------------------|
| Modelo base | AVAC: | Sistema VRF (EER = 4,57W/W) | |
| | Iluminação: | Parâmetro analisado | |
| | Envoltória: | Upar: 2,5 / Ucob: 1,0 / α : 0,3 | |
| | Entorno: | Adiabático | |
| | Vidro: | Maior fator solar / SHGC: 0,7 | |
| | Orientação: | Sul (0°) | |
| | Renovação: | Com renovação (27m ³ /h.pessoa) | |
| Cidade | Consumo anual de energia [kWh/m²] | | Varição no consumo de AVAC |
| | Parâmetro analisado: Iluminação | | |
| | PBE classe D (23,84 W/m ²) | PBE classe A (10,00 W/m ²) | |
| Campos do Jordão | 29,25 | 23,39 | -20,0% |
| São Paulo | 34,47 | 29,10 | -15,6% |
| Porto Alegre | 35,98 | 31,22 | -13,2% |
| Campinas | 42,89 | 39,82 | -7,1% |
| Rio de Janeiro (Vila Militar) | 42,73 | 38,84 | -9,1% |
| Vitória | 44,80 | 41,32 | -7,8% |
| Recife | 46,94 | 43,83 | -6,6% |
| Fortaleza | 47,56 | 44,47 | -6,5% |

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 10 ilustra a diferença no consumo de energia dos sistemas Splitão, mais comum e mais barato, e o sistema VRF, que apesar do custo maior de instalação, consome menos energia para manter condições confortáveis de permanência prolongada no ambiente. A diferença entre os dois sistemas superou 50% no consumo final de energia pelo sistema de condicionamento de ar.

Tabela 10 – Impacto do tipo de AVAC no consumo do sistema de condicionamento de ar

| Modelo base | AVAC: | | Parâmetro analisado |
|-------------------------------|--|-----------------------|--|
| | Iluminação: | | PBE classe A (10,00 W/m ²) |
| | Envoltória: | | Upar: 2,5 / Ucob: 1,0 / α: 0,3 |
| | Entorno: | | Exposto |
| | Vidro: | | Menor fator solar / SHGC: 0,3 |
| | Orientação: | | Leste (270°) |
| | Renovação: | | Com renovação (27m ³ /h.pessoa) |
| Cidade | Consumo anual de energia [kWh/m ²] | | Variação no consumo de AVAC |
| | Parâmetro analisado: AVAC | | |
| | Splitão (EER 3,16 W/W) | VRF (EER 4,57 W/W) | |
| Campos do Jordão | 46,60 | 19,21 | -58,8% |
| São Paulo | 57,09 | 25,45 | -55,4% |
| Porto Alegre | 63,64 | 28,41 | -55,4% |
| Campinas | 79,45 | 38,00 | -52,2% |
| Rio de Janeiro (Vila Militar) | 79,21 | 36,73 | -53,6% |
| Vitória | 86,44 | 39,86 | -53,9% |
| Recife | 95,59 | 44,02 | -54,0% |
| Fortaleza | 98,09 | 44,76 | -54,4% |

Outro parâmetro que também impacta o consumo de energia do sistema de condicionamento de ar é a renovação do ar interno da instalação. Este item é obrigatório por lei (nº 13.589, de 4 de janeiro de 2018) e deveria ser utilizado em todas as instalações. No entanto, como forma de economia de energia muitas pessoas desligam a renovação de ar em detrimento da salubridade do local, estando sujeito a penalidades em caso de fiscalização. A Tabela 11 mostra que nos climas mais frios, a renovação de ar reduz o consumo de energia no consumo anual de energia do sistema de condicionamento de ar, essa redução se dá pela estratégia chamada *free-cooling*, quando a entalpia do ar externo é inferior à do ar interno. Para climas mais quentes, no entanto o desligamento da renovação de ar reduz de forma significativa o consumo de energia elétrica. Este parâmetro será considerado na equação de *benchmarking*, o que permitirá o usuário avaliar sua instalação de acordo com o seu padrão de utilização, mas terá uma sinalização sobre a não conformidade com a legislação vigente.

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

| | | | |
|-------------------------------|---|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Modelo base | AVAC: | Sistema Splitão (EER = 3,16W/W) | |
| | Iluminação | PBE classe A (10,0W/m ²) | |
| | Envoltória | Upar: 2,5 / Ucob: 1,0 / α: 0,3 | |
| | Entorno: | Adiabático | |
| | Vidro: | Menor fator solar / SHGC: 0,3 | |
| | Orientação | Leste (270°) | |
| | Renovação: | Parâmetro analisado | |
| Cidade | Consumo anual de energia [kWh/m²] | | Varição no consumo de AVAC |
| | Parâmetro analisado: Renovação de ar | | |
| | (27 m ³ /h.pessoa), nível 3 | Sem renovação | |
| Campos do Jordão | 34,81 | 37,43 | 7,5% |
| São Paulo | 44,85 | 45,80 | 2,1% |
| Porto Alegre | 51,32 | 50,24 | -2,1% |
| Campinas | 67,68 | 62,90 | -7,1% |
| Rio de Janeiro (Vila Militar) | 67,19 | 63,12 | -6,1% |
| Vitória | 74,11 | 67,71 | -8,6% |
| Recife | 82,41 | 74,15 | -10,0% |
| Fortaleza | 85,61 | 76,04 | -11,2% |

7. EQUAÇÃO DE REGRESSÃO

Para o desenvolvimento das equações para predição do consumo de energia da tipologia de **Agência Bancária**, utilizou-se um modelo estatístico de regressão linear multivariada. Para teste da qualidade do modelo, avaliou-se o coeficiente de determinação (R²). Quanto mais próximo de 1,00, mais o modelo consegue prever valores próximos aos valores utilizados para construí-lo.

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

O modelo estatístico do *benchmarking* foi segmentado em cidades com necessidade, tanto de aquecimento (GHR menores que 54.000) quanto de 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 ACIMA DE 54 MIL

7.1.1. AGÊNCIAS

Análise das variáveis – Agência Bancária

| | ----Step 1---- | | ----Step 2---- | | ----Step 3---- | | ----Step 4---- | | ----Step 5---- | | ----Step 6---- | |
|-------------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|
| | Coef | P |
| Constant | 45.50 | | -12.784 | | -4.237 | | -271.6 | | -274.2 | | -266.2 | |
| AVAC | 50.70 | 0.000 | 50.883 | 0.000 | 50.861 | 0.000 | 50.861 | 0.000 | 50.881 | 0.000 | 50.893 | 0.000 |
| ILUM | | | 3.4684 | 0.000 | 3.4668 | 0.000 | 3.4668 | 0.000 | 3.4682 | 0.000 | 3.4691 | 0.000 |
| ENTO | | | | | -5.665 | 0.000 | -5.665 | 0.000 | -5.645 | 0.000 | -5.633 | 0.000 |
| log_GHR | | | | | | | 55.74 | 0.000 | 55.74 | 0.000 | 55.74 | 0.000 |
| RENO | | | | | | | | | 4.994 | 0.000 | 5.006 | 0.000 |
| ENVO | | | | | | | | | | | -2.594 | 0.000 |
| S | 24.5351 | | 6.00662 | | 5.29731 | | 4.51964 | | 3.76430 | | 3.42704 | |
| R-sq | 51.69% | | 97.11% | | 97.75% | | 98.37% | | 98.87% | | 99.06% | |
| R-sq(adj) | 51.63% | | 97.10% | | 97.75% | | 98.36% | | 98.86% | | 99.06% | |
| R-sq(pred) | 51.44% | | 97.09% | | 97.73% | | 98.35% | | 98.85% | | 99.05% | |
| Mallows' Cp | 38346.66 | | 1581.87 | | 1061.27 | | 566.85 | | 162.74 | | 7.00 | |

Análise de variância

| Source | DF | Seq SS | Contribution | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|-------------|-----|--------|--------------|--------|--------|----------|---------|
| Regression | 6 | 941927 | 99.06% | 941927 | 156988 | 13366.80 | 0.000 |
| log_GHR | 1 | 5830 | 0.61% | 5830 | 5830 | 496.42 | 0.000 |
| AVAC | 1 | 491525 | 51.69% | 495320 | 495320 | 42174.25 | 0.000 |
| ILUM | 1 | 431811 | 45.41% | 431969 | 431969 | 36780.26 | 0.000 |
| ENTO | 1 | 6138 | 0.65% | 6068 | 6068 | 516.66 | 0.000 |
| RENO | 1 | 4770 | 0.50% | 4793 | 4793 | 408.12 | 0.000 |
| ENVO | 1 | 1853 | 0.19% | 1853 | 1853 | 157.74 | 0.000 |
| Error | 758 | 8902 | 0.94% | 8902 | 12 | | |
| Lack-of-Fit | 89 | 7938 | 0.83% | 7938 | 89 | 61.87 | 0.000 |
| Pure Error | 669 | 964 | 0.10% | 964 | 1 | | |
| Total | 764 | 950829 | 100.00% | | | | |

Resumo do Modelo

| S | R-sq | R-sq(adj) | PRESS | R-sq(pred) |
|---------|--------|-----------|---------|------------|
| 3.42704 | 99.06% | 99.06% | 9066.41 | 99.05% |

Equação de Regressão

Consumo Final [kWh/m²/ano] = -204.52 + 55.74*logGHR + 50.893*AVAC + 3.4691*ILUM - 5.633*ENTO - 2.594*ENVO + 5.006*RENO

7.1.2. ÁREAS DE ATM

Análise de variáveis – Áreas de ATM

| | -----Step 1----- | | -----Step 2----- | | -----Step 3----- | | -----Step 4----- | |
|-------------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|
| | Coef | P | Coef | P | Coef | P | Coef | P |
| Constant | 0.95230 | | 0.88101 | | 0.94958 | | -0.4435 | |
| ILUM | 0.016794 | 0.000 | 0.016807 | 0.000 | 0.016794 | 0.000 | 0.016794 | 0.000 |
| AVAC | | | 0.04743 | 0.000 | 0.04726 | 0.000 | 0.04726 | 0.000 |
| ENTO | | | | | -0.04544 | 0.000 | -0.04544 | 0.000 |
| log_GHR | | | | | | | 0.2904 | 0.000 |
| S | 0.0393673 | | 0.0314182 | | 0.0216665 | | 0.0161803 | |
| R-sq | 89.54% | | 93.35% | | 96.84% | | 98.24% | |
| R-sq(adj) | 89.53% | | 93.33% | | 96.83% | | 98.23% | |
| R-sq(pred) | 89.49% | | 93.29% | | 96.81% | | 98.22% | |
| Mallows' Cp | 3755.71 | | 2114.07 | | 607.55 | | 5.00 | |

Análise de variância

| Source | DF | Seq SS | Contribution | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|-------------|-----|---------|--------------|---------|---------|----------|---------|
| Regression | 4 | 11.1070 | 98.24% | 11.1070 | 2.7768 | 10606.35 | 0.000 |
| log_GHR | 1 | 0.1583 | 1.40% | 0.1583 | 0.1583 | 604.55 | 0.000 |
| AVAC | 1 | 0.4140 | 3.66% | 0.4270 | 0.4270 | 1631.19 | 0.000 |
| ILUM | 1 | 10.1398 | 89.69% | 10.1238 | 10.1238 | 38669.90 | 0.000 |
| ENTO | 1 | 0.3949 | 3.49% | 0.3949 | 0.3949 | 1508.52 | 0.000 |
| Error | 760 | 0.1990 | 1.76% | 0.1990 | 0.0003 | | |
| Lack-of-Fit | 19 | 0.1125 | 1.00% | 0.1125 | 0.0059 | 50.74 | 0.000 |
| Pure Error | 741 | 0.0865 | 0.76% | 0.0865 | 0.0001 | | |
| Total | 764 | 11.3060 | 100.00% | | | | |

Resumo do Modelo

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

0.161803 98.24% 98.23% 0.201495 98.22%

Equação de Regressão

Consumo ATM [kWh/m²/ano] = -0.4435 + 0.2904*logGHR + 0.04726*AVAC + 0.016794*ILUM - 0.04544*ENTO

EQUAÇÃO FINAL PARA CIDADES COM GHR ACIMA DE 54 MIL

Consumo Final [kWh/m²/ano] = ((-204,52 + 55,74*logGHR + 50,893*AVAC + 3,4691*ILUM - 5,633*ENTO - 2,594*ENVO + 5,006*RENO) + (-0,4435 + 0,2904*logGHR + 0,04726*AVAC + 0,016794*ILUM - 0,04544*ENTO)* n^o de ATM))

Onde:

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

AVAC – Tipo de sistema de condicionamento de ar (1 – VRF, 2 – Splitão)

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

ENTO – Condição de entorno (1 – edificação exposta, 2 – edificação adiabática, apenas fachada principal exposta)

ENVO – Transmitância térmica das paredes externas (W/m².K)

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

N^o de ATM – Número de caixas eletrônicos

7.2. CIDADES COM GHR ABAIXO DE 54 MIL

7.2.1. AGÊNCIAS

Análise das variáveis – Agência Bancária

Candidate terms: ILUM, AVAC, logGHR*logGDA

| | -----Step 1----- | | -----Step 2----- | | -----Step 3----- | |
|---------------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|
| | Coef | P | Coef | P | Coef | P |
| Constant | 46.55 | | -9.25 | | 6.681 | |
| ILUM | 3.4332 | 0.000 | 3.4438 | 0.000 | 3.4439 | 0.000 |
| AVAC | | | 37.130 | 0.000 | 37.131 | 0.000 |
| logGHR*logGDA | | | | | -2.0496 | 0.000 |
| S | 20.6387 | | 8.99026 | | 5.13659 | |
| R-sq | 56.53% | | 91.76% | | 97.31% | |
| R-sq(adj) | 56.50% | | 91.74% | | 97.31% | |
| R-sq(pred) | 56.39% | | 91.72% | | 97.29% | |
| Mallows' Cp | 19280.46 | | 2627.57 | | 4.00 | |

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 | 3 | 1213838 | 97.31% | 1213838 | 404613 | 15335.22 | 0.000 |
| ILUM | 1 | 705132 | 56.53% | 709525 | 709525 | 26891.72 | 0.000 |
| AVAC | 1 | 439431 | 35.23% | 439443 | 439443 | 16655.32 | 0.000 |
| logGHR*logGDA | 1 | 69274 | 5.55% | 69274 | 69274 | 2625.57 | 0.000 |
| Error | 1271 | 33535 | 2.69% | 33535 | 26 | | |
| Lack-of-Fit | 17 | 26660 | 2.14% | 26660 | 1568 | 286.05 | 0.000 |
| Pure Error | 1254 | 6875 | 0.55% | 6875 | 5 | | |
| Total | 1274 | 1247372 | 100.00% | | | | |

Resumo do Modelo

| S | R-sq | R-sq(adj) | PRESS | R-sq(pred) |
|---------|--------|-----------|---------|------------|
| 6.31138 | 95.95% | 95.94% | 50967.2 | 95.92% |

Equação de Regressão

Consumo Final [kWh/m²/ano] = 10.044 - 2.2408 logGHR*logGDA + 37.159 AVAC + 3.4459 ILUM

7.2.2. ÁREAS DE ATM

Análise das variáveis – Áreas de ATM

Candidate terms: ILUM, AVAC, logGHR, LogGDA

| | -----Step 1----- | | -----Step 2----- | | -----Step 3----- | |
|-------------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|
| | Coef | P | Coef | P | Coef | P |
| Constant | 0.85684 | | 0.33243 | | 0.6726 | |
| ILUM | 0.016534 | 0.000 | 0.016534 | 0.000 | 0.016534 | 0.000 |
| logGHR | | | 0.12356 | 0.000 | 0.05801 | 0.000 |
| LogGDA | | | | | -0.032559 | 0.000 |
| AVAC | | | | | | |
| S | 0.0546963 | | 0.0266003 | | 0.0189118 | |
| R-sq | 81.11% | | 95.54% | | 97.75% | |
| R-sq(adj) | 81.10% | | 95.53% | | 97.74% | |
| R-sq(pred) | 81.05% | | 95.52% | | 97.73% | |
| Mallows' Cp | 11865.87 | | 1835.61 | | 301.05 | |
| | -----Step 4----- | | | | | |
| | Coef | P | | | | |
| Constant | 0.6478 | | | | | |
| ILUM | 0.016539 | 0.000 | | | | |
| logGHR | 0.05801 | 0.000 | | | | |
| LogGDA | -0.032560 | 0.000 | | | | |
| AVAC | 0.016465 | 0.000 | | | | |
| S | 0.0170265 | | | | | |
| R-sq | 98.17% | | | | | |
| R-sq(adj) | 98.17% | | | | | |
| R-sq(pred) | 98.16% | | | | | |
| Mallows' Cp | 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 | 19.7943 | 98.17% | 19.7943 | 4.9486 | 17069.76 | 0.000 |
| ILUM | 1 | 16.3540 | 81.11% | 16.3634 | 16.3634 | 56444.44 | 0.000 |
| AVAC | 1 | 0.0864 | 0.43% | 0.0864 | 0.0864 | 298.05 | 0.000 |
| logGHR | 1 | 2.9084 | 14.42% | 0.2259 | 0.2259 | 779.30 | 0.000 |
| LogGDA | 1 | 0.4455 | 2.21% | 0.4455 | 0.4455 | 1536.63 | 0.000 |
| Error | 1270 | 0.3682 | 1.83% | 0.3682 | 0.0003 | | |
| Lack-of-Fit | 16 | 0.1156 | 0.57% | 0.1156 | 0.0072 | 35.87 | 0.000 |
| Pure Error | 1254 | 0.2526 | 1.25% | 0.2526 | 0.0002 | | |
| Total | 1274 | 20.1624 | 100.00% | | | | |

Resumo do Modelo

| S | R-sq | R-sq(adj) | PRESS | R-sq(pred) |
|-----------|--------|-----------|----------|------------|
| 0.0224148 | 96.84% | 96.83% | 0.642695 | 96.81% |

Equação de Regressão

$$\text{Consumo ATM [kWh/m}^2\text{/ano]} = 0.5484 + 0.07965 \cdot \log_GHR - 0.02594 \cdot \log_GDA + 0.01646 \cdot AVAC + 0.016538 \cdot ILUM$$

EQUAÇÃO FINAL PARA CIDADES COM GHR ABAIXO DE 54 MIL

$$\text{Consumo Final [kWh/m}^2\text{/ano]} = ((71,72 - 2,2408 \log GHR \cdot \log GDA + 37,159 \cdot AVAC + 3,4459 \cdot ILUM) + (0,5484 + 0,07965 \cdot \log GHR - 0,02594 \cdot \log GDA + 0,01646 \cdot AVAC + 0,016538 \cdot ILUM) \cdot n^{\circ} \text{ de ATM}))$$

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 – Sistema de condicionamento de ar (1 – VRF, 2 – Splitão)

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

Nº de ATM – Número de caixas eletrônicos

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. nº

A Figura 16 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 97,31%, logo a equação de *benchmark* tem boa representatividade do modelo para a tipologia de **Agência Bancária**.

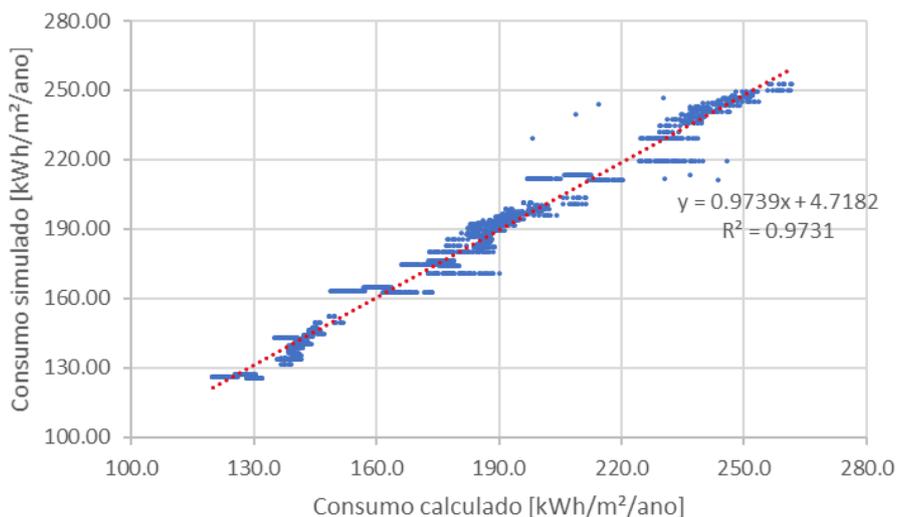


Figura 15 – Comparação entre o EUI simulado e o predito pela equação.

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 12.

Tabela 12 – Parâmetros para Escala de Consumo de Energia em função do GHR, para a tipologia de Agência Bancária

| Parâmetro | | Parâmetros significativos de acordo com a cidade | |
|-----------------|--|--|-------------|
| | | GHR < 54mil | GHR ≥ 54mil |
| Cidade | | | |
| Entorno | Adiabático, apenas fachada principal exposta | | x |
| | Exposto | | |
| Iluminação | DPI [W/M ²] | x | x |
| Envoltória | U par [W/m ² .K] | | x |
| Renovação de ar | 0- não tem renovação | | |
| | 1- renovação conforme NBR 16401-3 | | x |
| Tipo de AVAC | Splitão | x | x |
| | VRF | | |
| Número de ATM's | [unidades de ATM] | x | 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 13 apresenta a definição do cenário utilizado para determinar os consumos mínimos e máximos para esta tipologia.

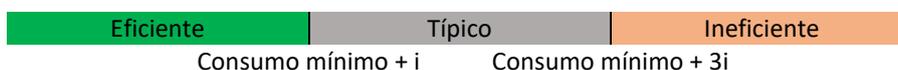
Tabela 13 – Cenários para o cálculo de consumo mínimo e máximo para tipologia de Agência Bancária

| Parâmetros | Limites do parâmetro | |
|-----------------|---|----------------|
| | Mínimo | Máximo |
| Cidade | GHR GDA | Parâmetro fixo |
| Entorno | Adiabático, apenas fachada principal exposta Exposto | Parâmetro fixo |
| Tipo de AVAC | 1 - VRF | 2 - Splitão |
| Iluminação | DPI [W/m ²] | 10 23,84 |
| Envoltória | U par [W/m.K] | 2,5 3,7 |
| Renovação de ar | Com renovação / Sem renovação | Parâmetro fixo |
| Número de ATM's | [unidades de ATM] | Parâmetro fixo |

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

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

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



8.2. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Para exemplificar a aplicação deste método e calcular as escalas de consumo de uma edificação, será apresentado o cálculo para a uma agência bancária de João Pessoa, com GHR = 67669, entorno exposto, com renovação de ar, 3 ATMs, ar condicionado central VRF, 6.6 W/m² de densidade de Iluminação e envoltória com transmitância térmica das paredes de 2.5 W/m².K. O consumo de energia operacional foi de 134,60 kWh/m²/ano.

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

Tabela 14 – Exemplo de Escala de Eficiência – Agência Bancária em João Pessoa.

| Parâmetros | | Mínimo | Máximo |
|-------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| VARIÁVEIS | AVAC | Central VRF | Splitão Dutado |
| | ILUMINAÇÃO | 10 | 23,84 |
| | ENVOLTÓRIA parede | 2,5 | 3,7 |
| JOÃO PESSOA | | GHR=67669 | |
| FIXOS | TIPO DE ENTORNO | Consumo geral: 143,10 | Consumo geral: 245,10 |
| | RENOVAÇÃO DE AR INTERNO | [kWh/m ² /ano] | [kWh/m ² /ano] |
| | NÚMERO DE ATM'S | 3 | |

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

$$i = \frac{245,1 - 143,10}{5} = 20,40$$



Considera-se nesse exemplo, portanto, que a edificação analisada apresenta consumo operacional inferior ao consumo mínimo da faixa típica (**134,60 < 163,50 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 **Agência Bancária**.

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

As variações de orientação solar e tipo de vidro não foram representativas, logo esses parâmetros não são considerados na equação de *benchmark* proposta para esta tipologia.

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

A iluminação artificial, além do impacto direto no consumo geral da edificação, tem impacto no consumo do ar condicionado, 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. No caso das agências bancárias os dois cenários claramente percebidos nos levantamentos de edificações reais, exposto ou não exposto, também mostrou ter impacto significativo no consumo do condicionamento de ar, uma vez que haverá maior ou menor troca de calor entre a edificação e o meio externo. De forma semelhante, a transmitância térmica dos elementos de envoltória também controla a quantidade de calor que será trocado com o meio externo e mostraram ter um impacto considerável no consumo do sistema de condicionamento de ar. A própria conformação do sistema de condicionamento de ar irá determinar o seu consumo final. Um sistema central ineficiente com distribuição de ar dutada, sem variação de volume de ar ou de gás refrigerante, como o Splitão, consome mais energia que sistemas como o tipo VRF. E, finalmente, a existência ou não de renovação de ar, também exerce impacto, uma vez que a renovação representa uma carga térmica a mais ou a menos a ser resolvida pelo sistema de condicionamento de ar presente.

Com a previsão do consumo de energia em relação ao consumo simulado, verificou-se que as equações têm um R^2 de acima de 97,31%, logo os modelos regressivos empregados foram representativos para prever o consumo de energia para a tipologia de **Agência Bancária**.

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

Tabela 15 - Parâmetros analisados e sua relevância para a equação de benchmark da tipologia de Agência Bancária

| Parâmetros analisados | Parâmetros na equação para GHR < 54 mil | Parâmetros na equação para GHR > 54 mil |
|-----------------------|---|---|
| Clima GHR | ✓ | ✓ |
| Clima GDA | ✓ | |
| AVAC | ✓ | ✓ |
| Iluminação | ✓ | ✓ |
| Entorno | | ✓ |
| Envoltória | | ✓ |
| Renovação de ar | | ✓ |
| Tipo de vidro | | |
| 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.