

PROJETO 3E

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

WWW.MMA.GOV.BR/CLIMA/ENERGIA/PROJETOS



BENCHMARKING DE EDIFÍCIOS PÚBLICOS

Relatório técnico de
desenvolvimento de benchmarks

Maio
2017

DEO | DESEMPENHO
ENERGÉTICO
OPERACIONAL
EM EDIFICAÇÕES


CBCS
Conselho Brasileiro de
Construção Sustentável

Relatório Técnico de Desenvolvimento de Benchmarks

Projeto: Benchmarking de desempenho energético em edifícios públicos

CBCS - Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
Olavo Kucker - Presidente do Conselho Deliberativo
Vanderley M. John e Orestes M. Gonçalves - Diretores

PNUD: Celena Souza e Willian Zanetti
MMA: Alexandra Maciel, Camila Vasconcelos e Alessandra Silva

Equipe:

Prof. Roberto Lamberts - Coordenador do CT Energia CBCS
Edward Borgstein
Alexandre Schinazi
Braúlio Nunes
Rosane Fukuoka
Maxine Jordan
Adriano Perez
Carolina Furlanetto Mendes

São Paulo – Maio, 2017

SUMÁRIO

1.	Introdução	1
1.1	Desempenho Energético Operacional em edifícios (DEO)	1
1.2	Conceitos de benchmarking	2
1.3	Estrutura do projeto	3
2.	Mapeamento de consumo em escritórios públicos.....	5
2.1	Sistemas prediais e avaliação da amostra.....	5
2.2	Definições de área.....	7
2.3	Consumo energético	8
2.4	Economias operacionais	12
2.5	Modelos arquétipos	12
3.	Impactos de clima	18
3.1	Uso de dados climáticos para avaliação.....	18
3.2	Avaliação de consumo anual.....	19
3.3	Avaliação de consumo mensal	20
3.4	Forma do edifício	22
3.5	Sistema de condicionamento.....	23
4.	Impactos de ocupação e outros fatores	27
4.1	Densidade de ocupação.....	27
4.2	Horários de ocupação	27
4.3	Estacionamentos	28
4.4	CPDs	29
5.	Conforto térmico e qualidade ambiental.....	31
5.1	Conforto de usuários e qualidade ambiental.....	31
5.2	Conforto térmico	31
5.3	Conforto visual	33
5.4	Conforto térmico – estudo de caso com simulação calibrada	37
6.	Modelo de benchmarking	43
6.1	Modelagem de edifícios típicos.....	43
6.2	Desenvolvimento da equação	46
6.3	Correções desenvolvidas por simulação	48

6.4	Correções desenvolvidas por cálculo manual	51
6.5	Verificação do benchmark	52
7.	Uso e aplicação dos benchmarks.....	54
7.1	Validação da tipologia	54
7.2	Conforto dentro da edificação.....	54
7.3	Desafios de levantamento de dados.....	54
7.4	Plataforma e utilização dos benchmarks	55
	Anexo.....	57
	Dados de edifícios da amostra e arquétipos	57
	Lista de siglas	61
	Referências.....	63

1. INTRODUÇÃO

1.1 DESEMPENHO ENERGÉTICO OPERACIONAL EM EDIFÍCIOS (DEO)

A definição e acompanhamento de estratégias eficazes para implementação de gestão energética e projetos de eficiência, com consequente redução de custos operacionais e emissões de gases do efeito estufa (GEE) em edifícios, requer a identificação do perfil e de indicadores de consumo de energia desses edifícios. Para tanto, verifica-se a necessidade de melhor entender o consumo energético de edificações em operação, a fim de promover a gestão de consumo e uma operação mais eficiente. O benchmarking de consumo energético de edifícios é uma das ferramentas utilizadas para definição destas variáveis e é o foco do presente trabalho.

O Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) é uma organização da sociedade civil sem fins lucrativos (OSCIP), que tem como objetivo contribuir para a promoção do desenvolvimento sustentável por meio da geração e disseminação de conhecimento, bem como da mobilização da cadeia produtiva da construção civil de seus clientes e consumidores.

Em 2013, o CBCS lançou o programa de Desempenho Energético Operacional (DEO), que desenvolve conhecimento, indicadores e técnicas para avaliação e melhoria de desempenho energético em edificações na fase de uso. Este projeto é coordenado pelo Comitê Temático (CT) de Energia do CBCS, um grupo de trabalho que reúne empresas atuantes na manutenção e operação de empreendimentos, concessionárias, construtores, proprietários e agentes de decisão para a participação no projeto, além de representantes do poder público e da academia.

Em maio de 2013, o CBCS publicou um posicionamento intitulado "Benchmarking e Etiquetagem Energética – Visão Brasileira". Neste documento, foi elaborado o plano para o desenvolvimento de benchmarks e indicadores de desempenho energético para edifícios na fase de operação.

O primeiro benchmark desenvolvido e publicado pelo CBCS foi para a tipologia de agências bancárias. O desenvolvimento do benchmark foi feito em conformidade com os critérios definidos na **Comunicação Técnica “Desenvolvimento de benchmarks nacionais de consumo energético de edificações em operação”, publicado pelo CT Energia em agosto de 2014**. A segunda fase envolveu o desenvolvimento de benchmarks para escritórios corporativos, em parceria com a Embaixada Britânica e o Programa Nacional de Conservação de Energia (Procel). Publicado em 2015 e revisado em 2016, foi amplamente divulgado. Ferramentas disponibilizadas no site do CBCS permitem a utilização destes benchmarks para auto avaliação de edifícios.

Visando o desenvolvimento de outras técnicas importantes para a avaliação e otimização de desempenho energético operacional, em 2016 também foram publicados guias de auditoria energética e metodologias de avaliação de conforto, satisfação e qualidade ambiental em edificações. Ilustrados com estudos de caso, o material contribuiu para a capacitação de grupos de profissionais para aplicar as metodologias.

O projeto DEO continua sua atuação com planos para o desenvolvimento de benchmarks para dez tipologias comerciais adicionais em conjunto com o Procel.

A experiência do CBCS no desenvolvimento de benchmarks foi a base para a sua contratação pelo Projeto PNUD BRA/09/G31 - “**Transformação do mercado de eficiência energética no Brasil**”, para o desenvolvimento de benchmarks e ferramentas de avaliação de desempenho em edifícios públicos administrativos.

1.2 CONCEITOS DE BENCHMARKING

Os benchmarks (linhas de base ou bases de comparação) permitem a visualização de consumo real dos edifícios, a avaliação do seu desempenho, a identificação de metas e o reconhecimento de edifícios com melhor desempenho. A informação proporcionada otimiza eventuais investimentos em auditoria, comissionamento e retrofit de edifícios e serve como linha de base para projetos de redução de custos operacionais e emissões de gases do efeito estufa (GEE).

Internacionalmente, benchmarks são publicados e utilizados em diversos países. No Reino Unido, o Instituto de Engenheiros de Sistemas Prediais (CIBSE, na sigla em inglês) publica benchmarks para o consumo energético de todas as principais tipologias de edificações; estes benchmarks são adotados na legislação do país, que obriga a etiquetagem energética em operação de edifícios públicos, com base nestes benchmarks (DECs). O governo dos EUA também desenvolve benchmarks, e mantém um portal na internet chamado **Energy Star Portfolio Manager** que permite a rápida comparação de desempenho energético com benchmarks, e que já foi utilizado por mais de 260.000 edifícios.

Benchmarks podem ter uma grande variedade de características e usos, e um benchmark precisa ser adequado para o uso proposto para ele (**fit-for-purpose**). Os usos principais para os benchmarks no Brasil são a avaliação simplificada e classificação de níveis de desempenho em edificações, através de comparações com edifícios da mesma tipologia. Os usos secundários são o acompanhamento de desempenho e a avaliação da efetividade de medidas ao longo do tempo.

Outros possíveis formatos de benchmark podem identificar medidas específicas de eficiência aplicáveis aos edifícios, ou proporcionar parâmetros para a avaliação de operação e manutenção de edifícios em tempo real, mas tais benchmarks necessitam de uma estrutura diferente, limitando a abrangência das possibilidades do seu uso.

O desempenho energético de um edifício é impactado pelo tipo de uso, pela estrutura física (incluindo envoltória e sistemas prediais), pelas condições externas e pela eficiência da operação. Uma definição adequada de tipologia assegura que comparações sejam realizadas entre edifícios com o mesmo tipo geral de uso do espaço, e em muitos casos as estruturas físicas dos edifícios são parecidas (por exemplo, escritórios corporativos sempre têm mais que dez andares).

As variações em condições externas precisam ser consideradas via medições climáticas, para permitir a utilização de um fator de "correção", utilizado para comparar edifícios em diferentes climas. Variações em uso de operação também podem gerar fatores de correção vinculados à intensidade de uso. Por exemplo, um galpão logístico que opera com três turnos (24h/dia) sempre terá um consumo maior que um galpão idêntico operando com apenas um turno (8h/dia).

As variações na eficiência da operação e na eficiência dos sistemas não geram fatores de correção no benchmark, pois são exatamente estas características que devem ser medidas. Então, um edifício que tem um consumo muito maior que o benchmark deve buscar entender quais desperdícios operacionais estão presentes e quais sistemas são inefficientes e precisam ser trocados, para que ele possa chegar no nível de desempenho especificado pelo benchmark, mantendo um mesmo nível de serviço dentro do edifício.

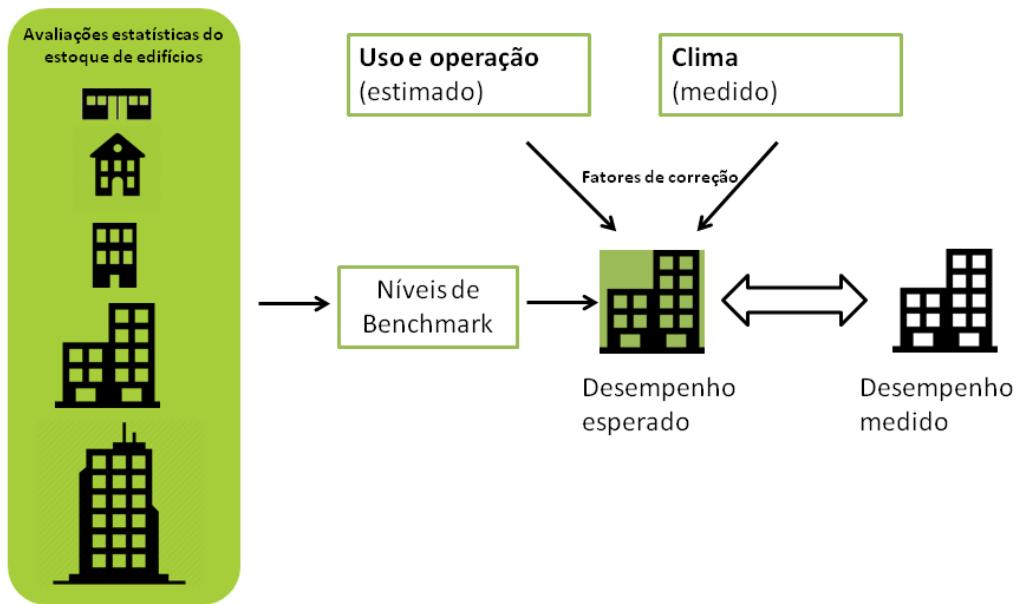


Figura 1. Desenvolvimento de benchmarks estatísticos (Fonte: Borgstein et al 2016)

No início do desenvolvimento da metodologia o CBCS definiu que benchmarks devem buscar ser robustos, relevantes, flexíveis e capazes de evoluir, permitindo adaptação futura.

1.3 ESTRUTURA DO PROJETO 3E

O Projeto PNUD BRA/09/G31 - “**Transformação do mercado de eficiência energética no Brasil**” (Projeto 3E) - tem o objetivo de influenciar e desenvolver o mercado de eficiência energética em edificações comerciais e públicas. Visa contribuir com uma economia de até 4 milhões de MWh de eletricidade nos próximos 20 anos, com potencial redução de emissões de gases do efeito estufa em até 2 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO_2).

O Projeto 3E tem como principal agência executora o Ministério de Meio Ambiente (MMA), por meio da Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental (SMCQ), sendo o Diretor do Departamento de Mudanças Climáticas o seu coordenador nacional. Este Projeto é implementado em parceria com o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) e é financiado pelo **Global Environment Facility** (GEF) e pelo Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID).

O CBCS foi contratado para realizar uma consultoria técnica especializada envolvendo a preparação de benchmarks para escritórios públicos, o desenvolvimento de uma plataforma

online para utilização dos benchmarks e ações de treinamento e capacitação referentes a esses sistemas. Este projeto foi gerenciado dentro do CT Energia do CBCS.

Para a captação de dados de consumo energético em edifícios, foi realizada uma chamada pública para edifícios públicos submeterem dados sobre os edifícios e contas de energia de 12 meses de operação. Dos edifícios que participaram da chamada pública, foram selecionados 20 para receber a instalação de medidores de energia e diagnósticos energéticos detalhados, identificando os seus níveis de desempenho e possíveis melhorias e ações. Os resultados das avaliações estatísticas e das auditorias energéticas são descritas nos Produtos 2 e 4 do contrato entre CBCS e Projeto 3E, respectivamente. As informações assim coletadas formaram a base para o desenvolvimento dos benchmarks para escritórios públicos, descrito neste relatório.

O atual relatório representa o Produto 5 (P5) e define a metodologia a ser adotada para benchmarking, junto com os benchmarks de desempenho.

Os sites do Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) e do MMA podem ser consultados para mais informações sobre o programa DEO e sobre o Projeto 3E, respectivamente:

<http://www.cbcbs.org.br/deo>

<http://www.mma.gov.br/component/k2/item/10577-p-r-o-j-e-t-o-3e>

2. MAPEAMENTO DE CONSUMO EM ESCRITÓRIOS PÚBLICOS

2.1 SISTEMAS PREDIAIS E AVALIAÇÃO DA AMOSTRA

Conforme a metodologia elaborada pelo CBCS, o desenvolvimento de um **benchmark** de consumo energético é feito para um determinado tipo de construção.

Este projeto aplica-se a edifícios administrativos públicos, localizados no Brasil.

O termo “edifícios públicos” foi escolhido para este projeto por representar uma categoria de edificações das esferas estaduais, federais e municipais, com perfis de consumo e de operação diversos que constituem uma amostragem significativa dentro do estoque.

De forma geral, um edifício público é uma categoria de edificações que abrange desde construções térreas até edificações com mais de 15 andares, com áreas úteis totais que variam de 500 m² a 70.000 m². A amostragem acabou incluindo um edifício cultural, porém a maioria é composta por edifícios públicos com funções administrativas. Dentro dessa categoria, os edifícios são basicamente monousuários, nos quais a conta de energia representa a totalidade da edificação.

Edificações públicas também possuem alto consumo energético, devido ao uso intenso de computadores e centrais de processamento de dados (CPDs), com a densidade de consumo variada, apresentando valores de 41 a 405 (kWh/m²/ano). Também há exigências térmicas de conforto, com aproximadamente 70% da área útil condicionada. Em relação aos tipos de sistemas de ar condicionado encontrados, nota-se que há grande utilização de equipamentos de **splits** e ar condicionado de janela (ACJ), ambos encontrados principalmente em edificações mais antigas, seguido por centrais de água gelada (CAG) com **chiller**, e depois pelo sistema de **Variable Refrigerant Flow** (VRF), como pode ser visto no gráfico a seguir, que são os sistemas escolhidos para atender maiores capacidades de refrigeração. Também foram encontrados equipamentos do tipo **self-contained** em algumas edificações, porém como sistema minoritário ou subsistema.

É necessário destacar que um dos edifícios possui mais de um sistema de condicionamento de ar principal (CAG e VRF), e por isso o gráfico a seguir totaliza 21 sistemas nos 20 prédios. Além disso, é importante notar que esta análise não contempla a capacidade térmica dos equipamentos instalados.

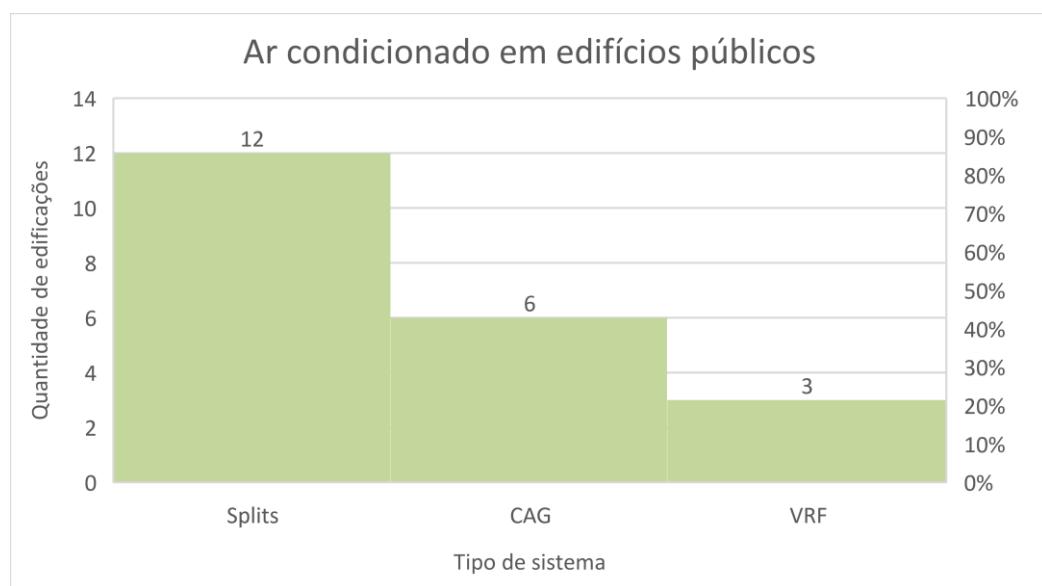


Figura 2. Histograma da quantidade de sistemas principais de AVAC encontrados nos edifícios. Um dos edifícios possui mais de um sistema de condicionamento de ar principal (CAG e VRF), e por isso o gráfico totaliza 21 sistemas nos 20 prédios.

Na parte de iluminação da área de escritórios, a grande maioria dos edifícios apresentaram luminárias com 2 lâmpadas fluorescentes tubulares de 32W e 40W. A iluminação com LED foi encontrada em poucos edifícios. O controle do sistema, de forma geral, é feito manualmente, por interruptores ou disjuntores por andar. Em termos de densidade de potência de iluminação (DPI) encontrado, foi identificada uma variação de 6 W/m² a 17 W/m² nas áreas administrativas, com a média de 10 W/m². Já na iluminação de estacionamentos (interno e externo) foram identificadas densidades de 1,8 a 15,3 W/m² com a média de 4,6 W/m².



Figura 3. Gráfico de ocorrência de lâmpadas encontradas nos edifícios.

2.2 DEFINIÇÕES DE ÁREA

Nos edifícios estudados, foi difícil chegar em uma definição única de área para ser utilizada nas avaliações. Para fins de avaliação, foram definidos 4 tipos de área distintas:

- Área útil (excluindo estacionamentos e andares técnicos)
- Área condicionada
- Área de escritórios
- Área de estacionamento

A Figura 4 mostra claramente que a relação entre estes diferentes tipos de área varia muito dentro do estoque estudado, e que isso precisa ser levado em consideração na análise. A porcentagem da área útil que é condicionada varia entre 20% e 100%, enquanto a área de escritórios é mais estável. A área de estacionamento é uma variável completamente independente, e precisa ser considerada separadamente.

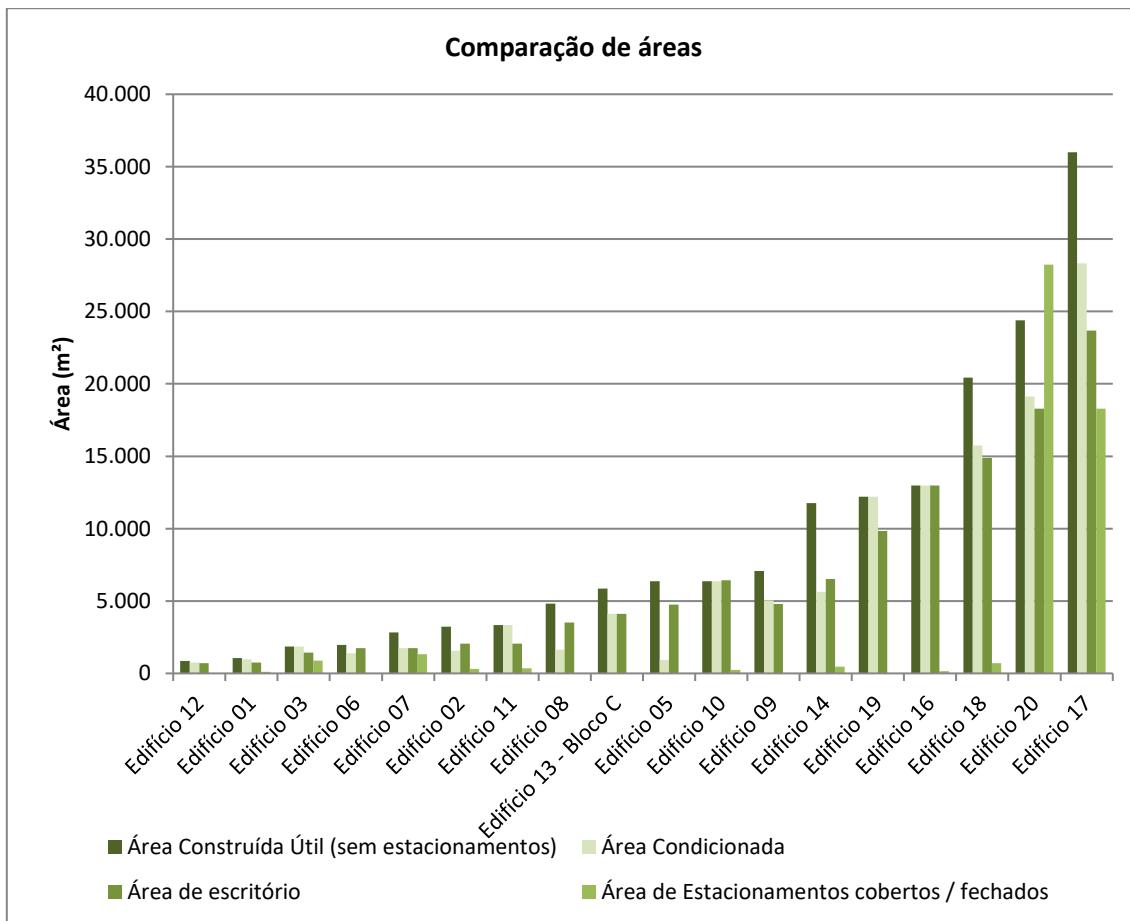


Figura 4. Comparação de áreas construídas, condicionadas, de escritório e de estacionamentos

2.3 CONSUMO ENERGÉTICO

O principal indicador de desempenho utilizado é o consumo energético, medido em kWh por m² por ano. Este indicador foi calculado para todos os prédios, sendo considerado o consumo total. Conforme demonstrado na figura abaixo, há uma grande variação nos consumos dos diferentes edifícios. Nos dados de consumos totais, 50% mostram consumo entre 116 e 247 kWh/m²/ano, com mediana de 191 kWh/m²/ano.¹

Porém, nota-se que dentro deste banco de dados, há muitos edifícios que mostram consumos totais abaixo de 100 kWh/m²/ano, o que provavelmente representa distorções nos dados, como edifícios parcialmente ocupados, erros nos dados de consumo ou cálculos de área feitas incluindo estacionamento. Também há uma ocorrência de um edifício com consumo acima de 500 kWh/m²/ano, que no caso é um edifício cultural, atípico dentro da amostra.

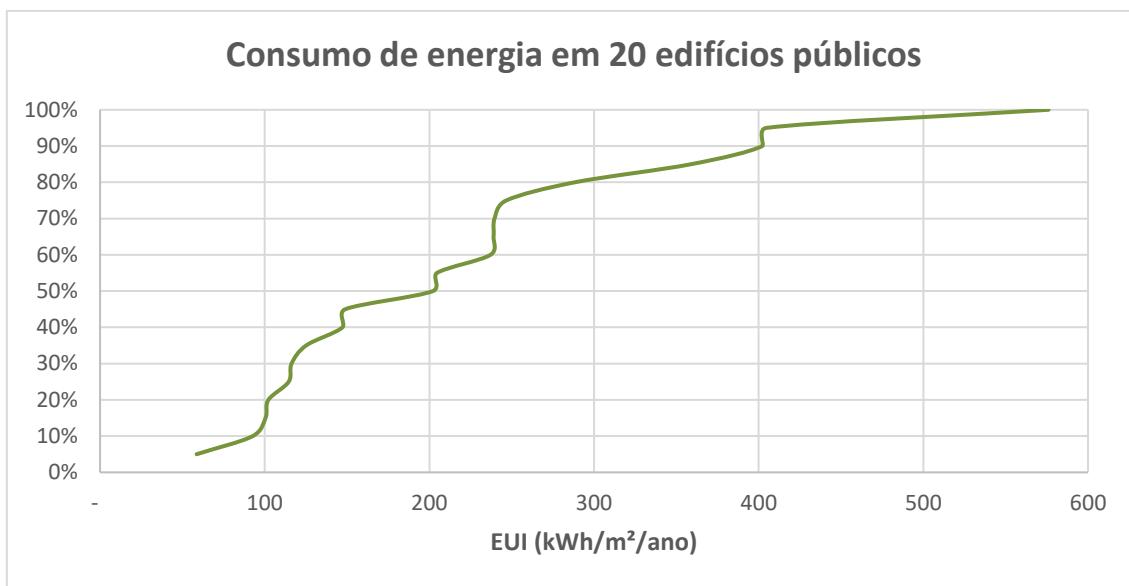


Figura 5. Variação do consumo elétrico nos 20 edifícios públicos.

Com exceção do edifício cultural, da amostra de edifícios públicos foi observada uma ocupação de 60 a 200 funcionários por edifício. Através do cálculo da densidade de ocupação m²/pessoa, é possível ver que a média foi de 13,1 m²/pessoa, porém esse valor foi influenciado por um número pequeno de edifícios com densidades muito baixas, chegando a 35 m²/pessoa em edificações que não estão 100% ocupadas.

Desta forma, é mais interessante observar que o mediano da densidade de ocupação foi de 12,1 m²/pessoa; este valor já está mais alinhado com valores praticados pelo mercado. A Figura 7 mostra os consumos energéticos e as densidades de ocupação dos edifícios, sendo desconsiderados:

¹ Os valores de EUI (kWh/m²/ano) apresentados neste capítulo foram calculados com base na área útil condicionada das edificações. Esse resultado poderá ser diferente se for considerada a área útil total das mesmas.

- Edifícios com consumo energético acima de 450 kWh/m²/ano (1 edifício);
- Edifícios com consumo energético abaixo de 100 kWh/m²/ano (2 edifícios); e
- Edifícios que demonstram baixa densidade de ocupação, com valores acima de 25 m²/pessoa (1 edifício).

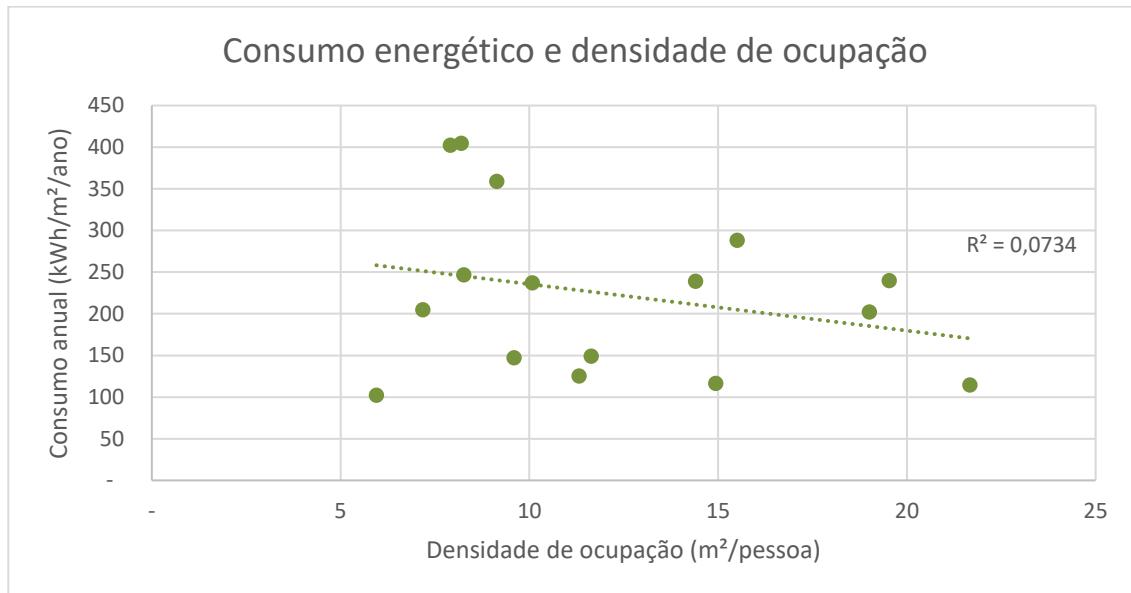


Figura 6. Consumo energético e densidade de ocupação.

Através da Figura 7, que mostra a desagregação de cargas, é possível perceber que as cargas mais significativas nos edifícios são: ar condicionado (refrigeração, rejeição e ventilação), iluminação e data centers. Os edifícios 4, 20, 11 e 19 possuem data centers de maior porte dentre os 20 edifícios e os edifícios 19, 16, 13 e 11 possuem grande parcela de ar condicionado. Já na parte de iluminação, os destaques de consumo são os edifícios 16 e 19. Outra parcela relevante são as cargas de tomada, compostas por equipamentos de escritório, principalmente computadores e monitores. As cargas de elevadores e bombeamento de água são menos significativas, em geral, com exceção do edifício 20, que possui 9 elevadores.

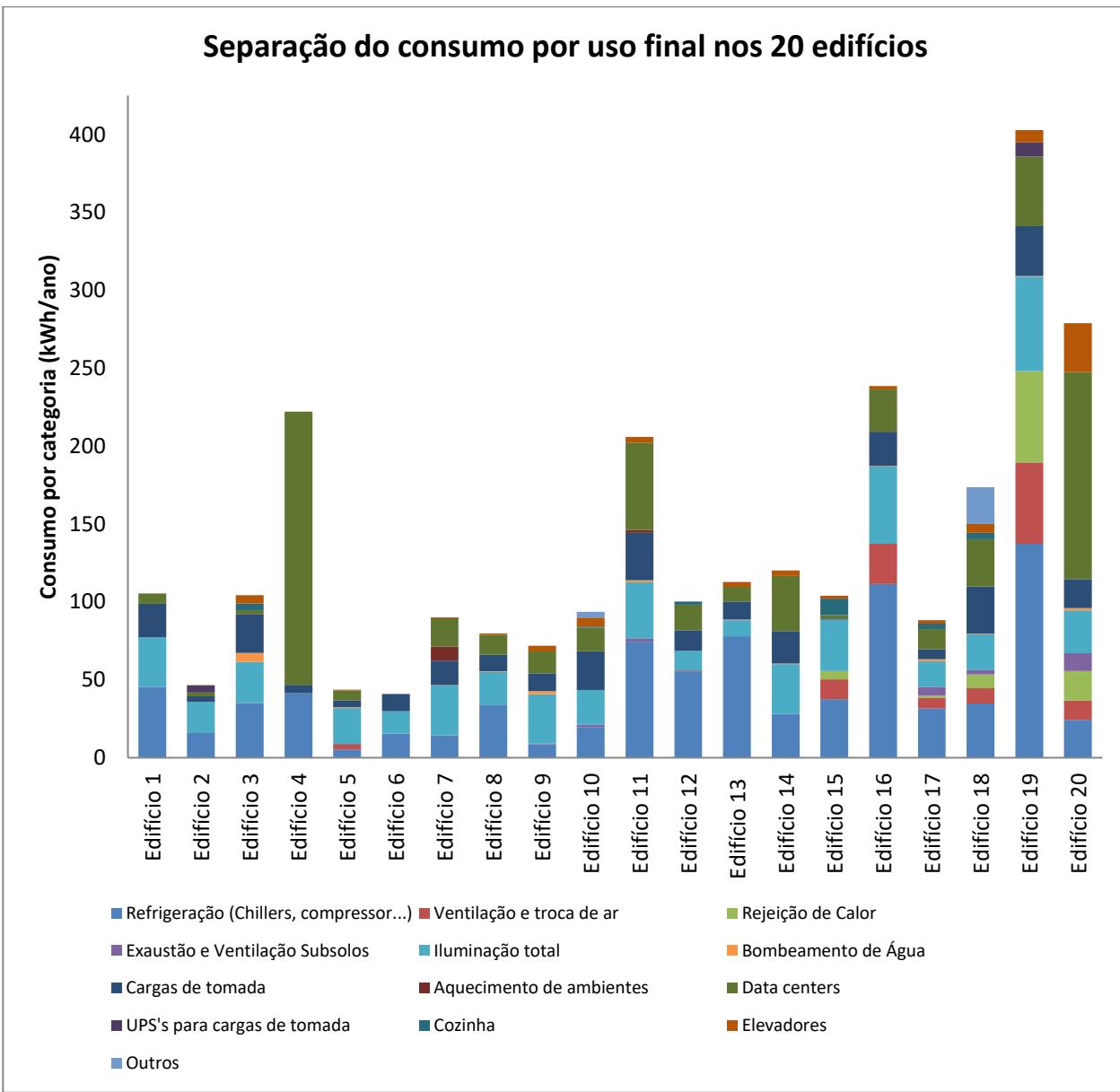


Figura 7. Gráfico de desagregação de cargas dos 20 edifícios.

De forma geral, não foi possível identificar uma correlação clara entre consumo energético e densidade de ocupação (Figura 7), porque há outros fatores que não estão listados que exercem grande influência no consumo, como é o fator de uso e operação de cada edifício e o clima de cada região. É necessário fazer um levantamento mais detalhado para dimensionar corretamente essa relação.

Das outras informações fornecidas, muitas não chegam na amostra necessária para uma análise coerente, e as informações destas pequenas amostras necessitam ser complementadas por outros fontes de dados. Porém, é possível identificar algumas características gerais deste tipo de edificação:

- Forma: maioria retangular ou quadrado (80%);
- Área Útil condicionada: 80% até 13.000 m² (95% até 20.000 m²);
- População: 80% até 900 pessoas;
- Idade (em 2017): 20% até 20 anos; 80% é acima de 20 anos até 87 anos.

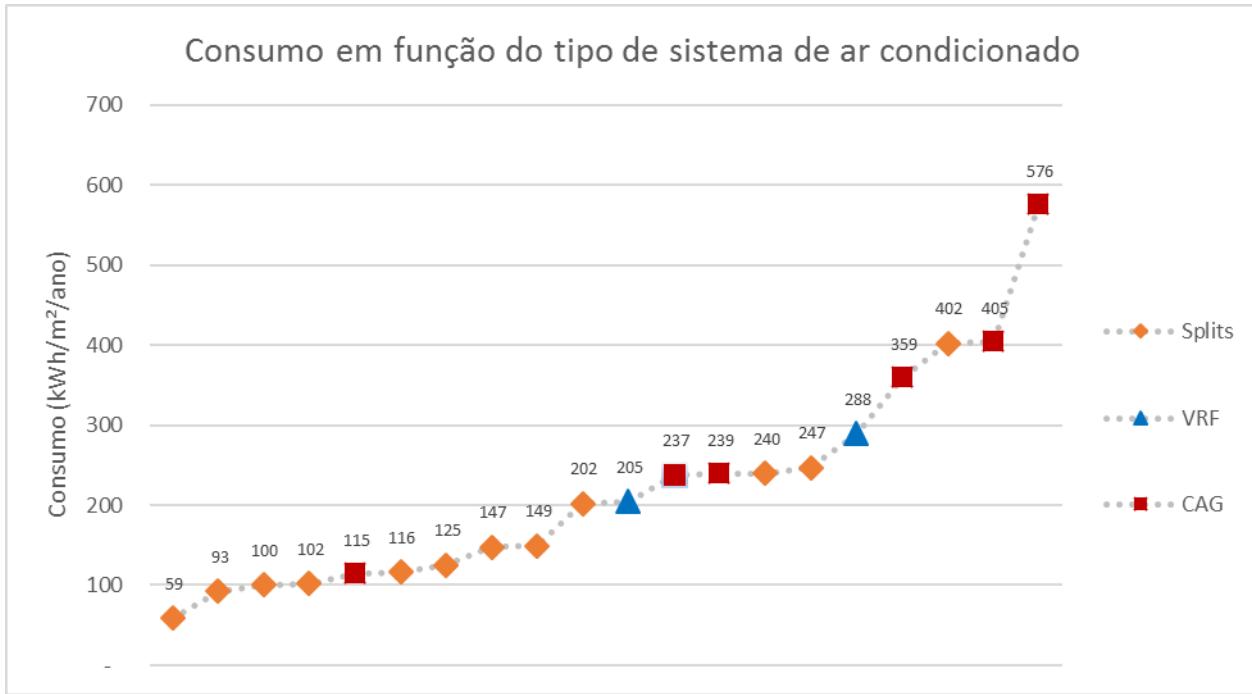


Figura 8. Consumo de edifícios públicos em função do tipo de sistema de ar condicionado.

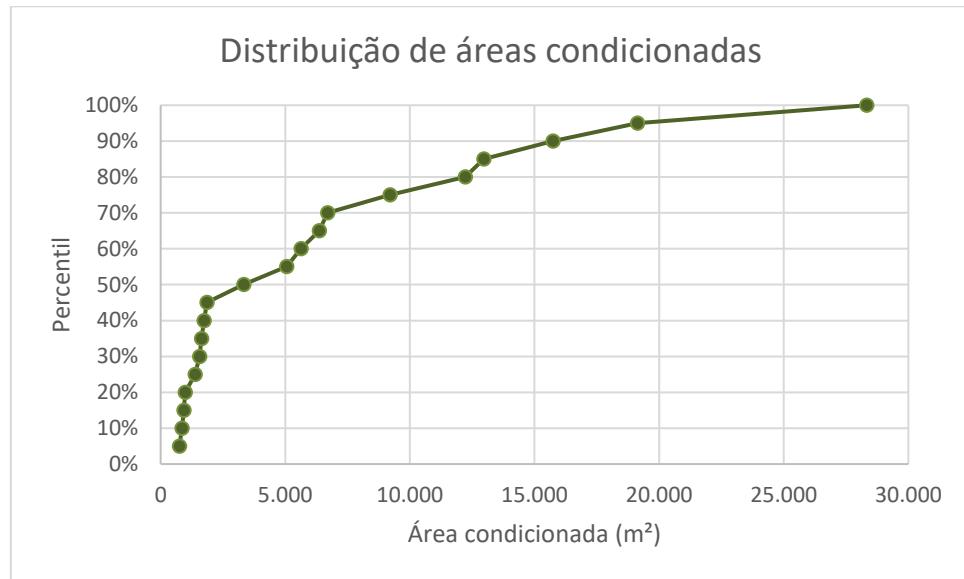


Figura 9 – Distribuição de áreas condicionadas nos edifícios

2.4 ECONOMIAS OPERACIONAIS

Muito se discute sobre aquisição e troca de equipamentos como formas de economia de energia em edificações. Porém, após as auditorias energéticas realizadas é notável a existência de grandes oportunidades de melhorias operacionais de zero custo, em comum nos 20 edifícios públicos analisados.

A causa dessa realidade é devido a diversos fatores como, por exemplo, problemas de operação dos sistemas de iluminação e ar condicionado, tal como a falta de procedimentos formais de acionamento e desligamento dos mesmos, que acabam funcionando fora dos horários de operação do edifício. No edifício 19, por exemplo, foi visto que a Central de Água Gelada (CAG) ficava ligada 24 horas por dia, 7 dias por semana, devido à necessidade de refrigerar apenas 1/3 do 14º pavimento onde ficavam os plantonistas responsáveis pela Sala Cofre à noite. Isso gerou um desperdício enorme para o prédio, aumentando o consumo da CAG em 52%, sendo que poderiam ser utilizados equipamentos splits individuais para atender essa área.

Um fato muito recorrente foi o baixo **setpoint** de temperatura encontrado nas salas de CPD (Central de Processamento de Dados) dos edifícios. Por desconhecimento e medo de danificação dos equipamentos e servidores, muitos operadores acabaram por deixar temperaturas muito abaixo do adequado (em muitos casos, a ASHRAE - **American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers** - indica que uma temperatura de 27°C é adequada²) para refrigerar salas que funcionam 24 horas por dia e representam uma parcela significativa no consumo do edifício.

Outro ponto identificado, em geral, foi a ausência de um gestor de energia responsável nos prédios, sendo frequente a avaliação e monitoramento apenas do valor final das faturas elétricas. O acompanhamento e monitoramento do consumo mensal, ultrapassagens de demanda, excesso de energia reativa, verificação de anomalias e contratações foram assuntos esquecidos na maior parte dos casos.

Cabe destacar também a dificuldade de coleta de informações nos edifícios por falta de organização interna ou inexistência dos mesmos. Dados como cópias das faturas mensais de energia de 12 meses e plantas de arquitetura, elétrica e ar condicionado foram obtidas após muita insistência e esforço.

Mais informações sobre os edifícios individuais e potenciais de economia em cada caso estão disponíveis em Produto 4 deste projeto.

2.5 MODELOS DE REFERÊNCIA

A partir dos dados levantados nas auditorias foi possível elaborar modelos computacionais termo energéticos representativos do estoque, para estudar variações e impactos de alterações nos perfis de consumo energético.

² ASHRAE Guidelines for Data Center Temperatures Ranges

Dois edifícios foram desconsiderados na avaliação das características típicas por se afastarem da realidade observada no conjunto total. Foram estes o edifício 4, por sua principal função ser um CPD e o edifício 15, por se tratar de um centro cultural com características e usos específicos de museu.

Inicialmente, os edifícios visitados foram classificados em ordem crescente de área construída útil (sem estacionamentos). A grande variação encontrada levou à separação dos edifícios em médios e grandes, de acordo com a tabela a seguir. Esta abordagem levou à criação de dois modelos de referência para a realização das simulações, cujas diferenças confirmaram a necessidade de estudar o conjunto de edifícios considerando duas tipologias.

Tabela 1. Separação dos edifícios visitados em duas tipologias

Edifícios	Área Construída Útil (m ²) (sem estacionamentos)	Representação nos modelos de referência
Edifício 12	866	Edifícios médios
Edifício 01	1.060	
Edifício 03	1.862	
Edifício 06 - Bloco B	1.975	
Edifício 07	2.834	
Edifício 02	3.219	
Edifício 11	3.331	
Edifício 08	4.818	
Edifício 13 - Bloco C	5.858	
Edifício 05	6.364	
Edifício 10	6.370	Edifícios grandes
Edifício 09	7.070	
Edifício 14	11.752	
Edifício 19	12.214	
Edifício 16	12.970	
Edifício 18	20.430	
Edifício 20	24.379	
Edifício 17	35.995	

O modelo de referência do edifício médio (Figura 10) é caracterizado por uma volumetria retangular com 6 pavimentos, eixo longitudinal (maior dimensão) orientado de Leste a Oeste e percentual de abertura de fachada de 40%, definido a partir da amostragem de edifícios visitados. A área construída útil é de 4.982m². Esta área é 75% condicionada e com uso de escritórios, de acordo com conjunto de edifícios médios.

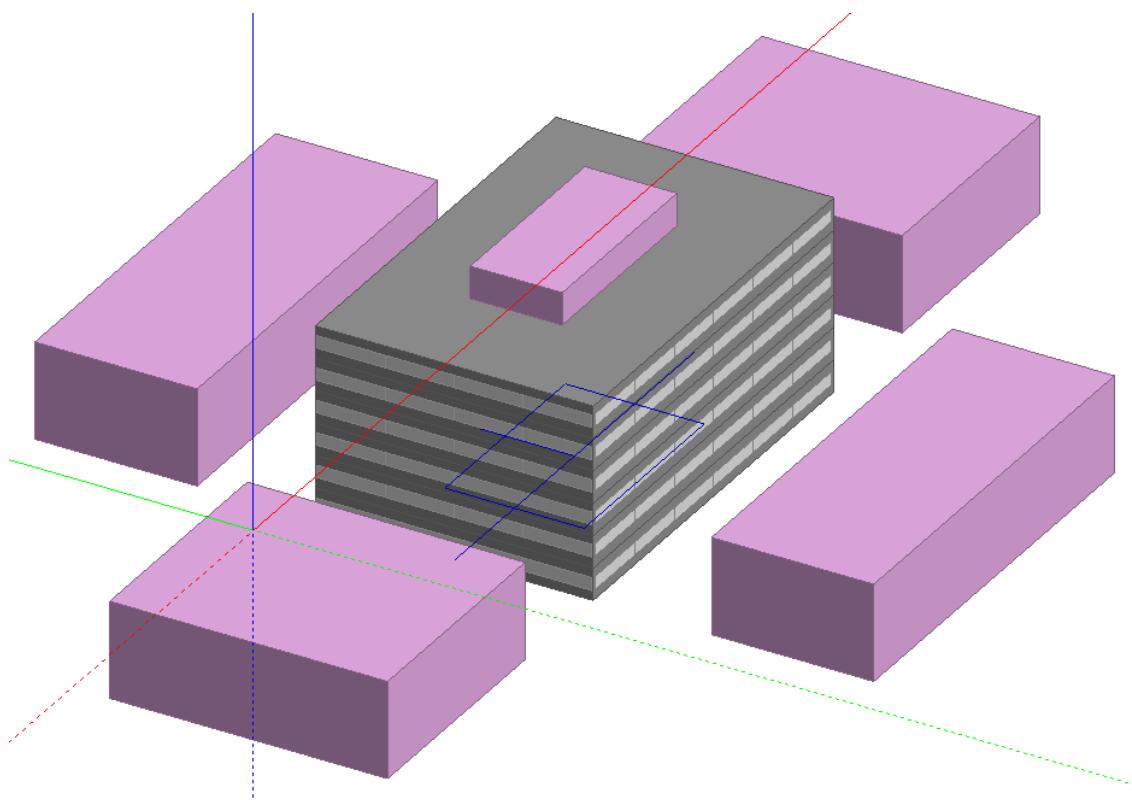


Figura 10. Modelo de referência para edifício médio.

Para caracterizar os edifícios grandes foi construído um modelo de referência com geometria semelhante (Figura 11), porém com 12 pavimentos e percentual de abertura de fachada de 46%. Este critério foi escolhido devido à grande diferença nesta variável encontrada nos maiores edifícios visitados. A área construída útil do modelo de referência do edifício grande é de 19.500m², com 70% de área condicionada e com uso de escritórios, em concordância com a amostra.

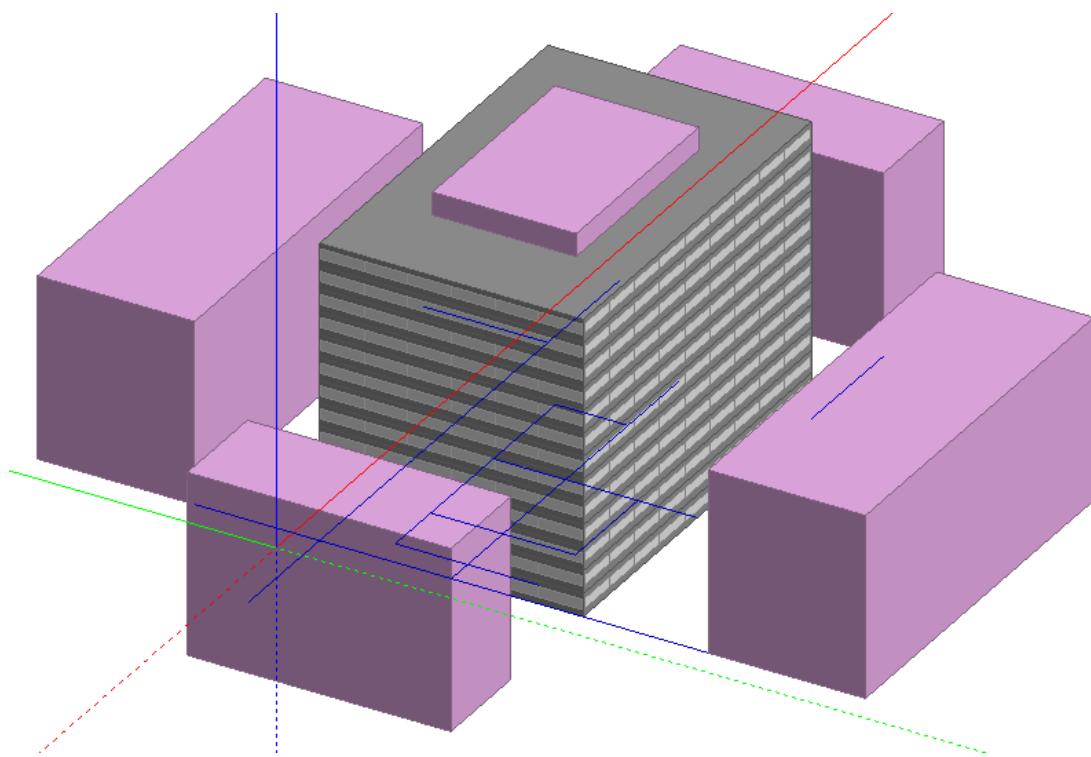


Figura 11. Modelo de referência para edifício médio.

Devido ao contexto urbano da maioria dos edifícios, foi considerada a existência de vizinhos com altura média inferior ao do edifício de referência, estimada a partir dos locais visitados. O pé direito útil (entre piso e forro) considerado para a definição das alturas totais foi o mesmo em todos os casos: 2,74 metros, segundo critério do **National Renewable Energy Laboratory** (NREL), o principal laboratório de pesquisa sobre energias renováveis e eficiência energética dos EUA.

Definidos os aspectos geométricos dos modelos de referência, foi necessário realizar a correspondência das cargas instaladas e padrões de operação para corresponder ao conjunto de edifícios visitados. O consumo real de tomadas por ocupante foi definido em 90W/pessoa, a partir do conjunto de edifícios, para ambos os casos. A variação não foi calculada neste caso, mas o fator principal impactando a carga por pessoa é a prevalência do uso de notebooks em estações de trabalho. Porém, a ocupação e horas de funcionamento observados foram distintos, no valor médio de 14m²/pessoa e 10 horas diárias para o edifício médio e 10m²/pessoa com 11 horas diárias no edifício grande. Os principais parâmetros utilizados nos modelos de referência estão agrupados na tabela abaixo. O conjunto completo de dados, incluindo médias e variações encontradas nas auditorias, é apresentado no anexo.

Tabela 2. Características dos modelos de referência

Sistema	Variável	Unidade	EDIFÍCIO MÉDIO	EDIFÍCIO GRANDE
			Modelo de referência Médio	Modelo de referência Médio
Edifício	Área total do pavimento	m ²	830	1.500
	Área de escritório	% da área total	75%	70%
	Pavimentos	#	6	13
	Área condicionada		75%	70%
	Área útil	m ²	4.982	19.500
	Sombreamento	Andares do vizinho	9	26
	Pé direito útil		2,74	2,74
Envoltória	Abertura da fachada (PAF)	%	40%	46%
	Fator solar dos vidros		0,59	0,59
	Proteção solar		Não	Não
	Paredes		bloco de concreto	bloco de concreto
	U_paredes	W/(m ² K)	1,97	1,97
	Absortância_paredes		0,6	0,6
	Cobertura		laje fibrocimento	laje de concreto
	U_cobertura	W/(m ² K)	2,57	2,42
	Cor da cobertura		cinza	cinza
Iluminação	Absortância_cobertura		0,6	0,6
	DPI	W/(m ² K)	11,0	11,0
	Iluminação noturna	%	5%	5%
Ocupação	Funcionários	m ² /pessoa	14,0	10,0
	Estações de trabalho	W/m ²	6,4	9,0
	Equipamentos adicionais	W/m ²	1,0	1,5
	Diária	h/dia	10,0	11,0
	Semanal	Dias/semana	5,0	5,0
	Anual	feriados por ano	10,0	10,0
AVAC	Tipo		Split	Chiller a Ar
	COP (sistema inteiro)		2,4	2,9
	Área condicionada	%	75%	70%
	Setpoint de resfriamento	Temperatura, °C	22,0	24,0

Estes parâmetros médios geraram um consumo de cargas de tomada ao qual foi somado um valor constante de uso de contínuo, representando demais equipamentos de escritório em uso, **standby** ou ligados 24 horas, no valor de 1W/m² para o modelo de referência médio e 1,5W/m² no modelo de referência grande. Ponderados pela área de escritório, o consumo anual simulado com carga de tomadas foi de 28,22 kW/m² para o modelo de referência médio e 44,26 kW/m² para o grande, com desvios de 2,5% e 7,5% em relação às médias dos dois conjuntos de edifícios visitados.

De forma semelhante, o consumo com iluminação foi baseado nos valores encontrados nos edifícios. A média para os dois casos indicou uma densidade de potência instalada de 11 W/m² de área útil. O consumo anual calculado para este uso foi de 22,11 kW/m² para o modelo de referência médio e 34,25 kW/m² para o grande, com desvios de 2,7% e 0,3% em relação ás médias levantadas nas visitas, considerando operação cinco dias por semana ao longo do ano (excluindo feriados).

Estes valores e respectivos erros foram aceitos devido à correlação entre as variáveis e o grau de incerteza que é esperado em levantamentos de edifícios reais.

Por fim, o consumo de ar condicionado foi calculado automaticamente pelo programa de simulação, a partir dos dados de entrada que representam a maioria dos edifícios e os dados climáticos para a cidade de São Paulo. Para o modelo de referência médio foi utilizado sistema do tipo **split**, com controle pelo usuário, COP 2,4 e **setpoint** em 22°C, uma vez que o uso tende a ser menos criterioso. Já para o modelo de referência grande, foi simulado um sistema central com **chiller** a ar, controle por sensor de temperatura, COP 2,9 do **chiller** (o COP do sistema será mais baixo) e **setpoint** em 24°C.

As centrais de processamento de dados (CPDs) não foram avaliadas via simulação.

3. IMPACTOS DE CLIMA

3.1 USO DE DADOS CLIMÁTICOS PARA AVALIAÇÃO

O clima e as condições externas impactam no consumo energético de um edifício de diversas formas. A temperatura do ar, umidade, radiação solar, velocidade do vento e até a cobertura de nuvens determinam necessidades de consumos para condicionamento do ar e iluminação.

Projetos de novos edifícios que consideram a eficiência energética e arquitetura bioclimática geralmente levam em consideração estes fatores através dos anos de referência criados com base no banco de dados histórico do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), disponibilizado para 400 cidades no Brasil no formato de um arquivo que pode ser utilizado em simulação energética³.

Porém, a utilização destes anos de referência representa alguns problemas. Primeiramente, o efeito combinado de mudanças do clima e de ilhas de calor urbanas, tornam os dados desatualizados, já que são desenvolvidos com base em séries históricas. Finalmente, apesar de mostrar sempre a variação climática ao longo do ano, estes dados podem ser muito diferentes da realidade num ano real, sobretudo com a tendência de aumento de eventos climáticos extremos. Isso torna desejável a utilização de dados climáticos reais para a realização de avaliações, sempre que possível. A Figura 12 compara os anos de referência de Rio de Janeiro e São Paulo com dados medidos de temperatura para os últimos 3 anos, mostrando que os anos de referência não são adequados para previsão de consumo durante eventos extremos de temperatura como ondas de calor no verão em grandes centros urbanos.

O indicador mais utilizado para avaliações climáticas simplificadas é o Grau-Hora de Resfriamento (GHR)⁴. A metodologia de cálculo dos grau-horas é descrita pela ASHRAE⁵. A escolha da temperatura base para cálculo das GHRs deve ser feita considerando temperaturas em quais um edifício poderia funcionar sem resfriamento artificial, a chamada "temperatura de balanço". Como não é prática calcular essa temperatura para todas as possíveis configurações de edifício, uma temperatura base de 22°C é adotada, com base em estudos anteriores (Borgstein & Lamberts 2014). Quando o termo GHR é utilizado sem ser qualificado ou definido, no resto deste relatório, o termo se refere aos GHRs calculados com temperatura bulbo seco e temperatura de base de 22°C.

Cabe notar que a metodologia adotada para avaliação por grau-horas nos benchmarks de escritórios públicos representa um avanço significativo comparado com os benchmarks desenvolvidos anteriormente. Isso porque, os GHRs podem ser medidos em estações meteorológicas próximas aos edifícios a serem estudados, e registrados mensalmente para determinadas cidades. Assim, os GHRs de um determinado mês são utilizados para avaliar o consumo energético do mês, e a soma destes é utilizada para comparar o consumo anual total. Isso permite a avaliação de desempenho em qualquer série de 12 meses consecutivos. Para

³ Disponíveis em www.labeee.ufsc.br

⁴ Em climas frios, grau-horas de aquecimento são adotados.

⁵ ASHRAE Handbook – Fundamentals

essa análise, são utilizados dados disponibilizados pelo INMET, que incluem temperatura e umidade. Como os dados não incluem temperatura de bulbo úmido, e o cálculo deste indicador é complexo podendo inviabilizar várias análises, o indicador de temperatura de bulbo seco é adotado. Nas avaliações previamente realizadas, a diferença entre estes dois indicadores se mostrou pequena, quando são utilizadas para avaliação climática (Borgstein & Lamberts, 2014).

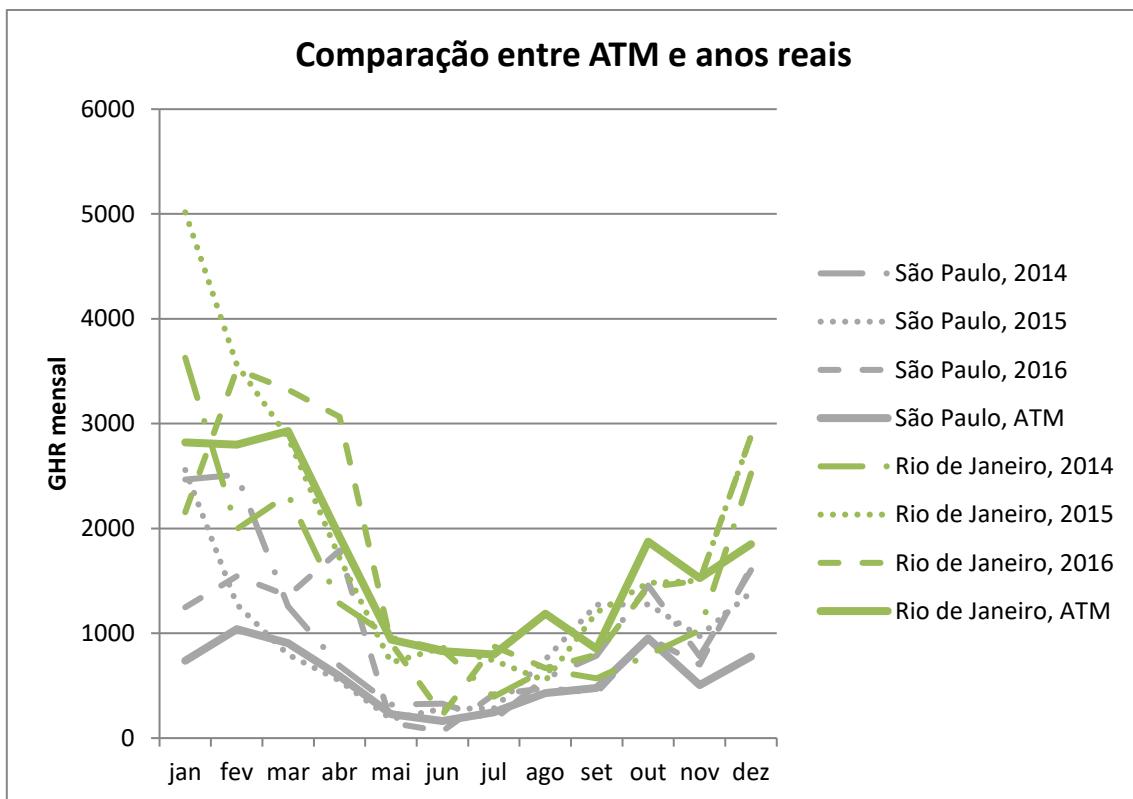


Figura 12. Comparação entre temperaturas reais e temperaturas no ano típico

Dados de estações meteorológicas são disponibilizados pelo INMET, com dados recentes disponíveis no site, e dados mais antigos disponíveis via consulta especial ao órgão. Para fins deste estudo, consultas foram realizadas para todas as cidades nas quais se encontravam edifícios selecionados para diagnósticos energéticos (um total de 14 cidades). Em alguns casos, os dados registrados pelas estações apresentaram curtos períodos sem leitura. Como estes períodos representaram uma proporção pequena das horas do ano, os vazios foram preenchidos com uso de temperaturas médias anuais.

3.2 AVALIAÇÃO DE CONSUMO ANUAL

Na primeira fase deste projeto, foram coletados dados básicos de consumo energético de 207 edifícios públicos. Destes, 138 foram incluídos numa base de dados mais detalhada, e utilizados para realizar as análises estatísticas descritas no Produto 1. Existem fontes de dados para

diversas cidades no Brasil, por exemplo através do INMET, que disponibiliza dados dos últimos três meses via internet. Para algumas cidades, foram realizados pedidos ao INMET para a liberação de dados históricos adicionais para permitir uma análise melhor. Dentro do projeto DEO, dados de GHR bulbo úmido para anos típicos meteorológicos foram tabelados e disponibilizados pelo CBCS. Estes dados incluem as cidades onde se encontram 112 destes edifícios. A Figura 13 mostra a comparação entre os consumos anuais destes edifícios e o GHR de anos típicos meteorológicos para as respectivas cidades. Cabe notar que uma proporção significativa destes edifícios se encontra em São Paulo, Rio de Janeiro e Brasília, o que explica as concentrações de edifícios em colunas com os mesmos GHRs.

Estas informações não são adequadamente detalhadas para desenvolver uma correção climática. Outro problema com esta base de dados é que foi claramente demonstrado durante as visitas técnicas que muitos dos dados de área fornecidos para o projeto foram contabilizados erroneamente.

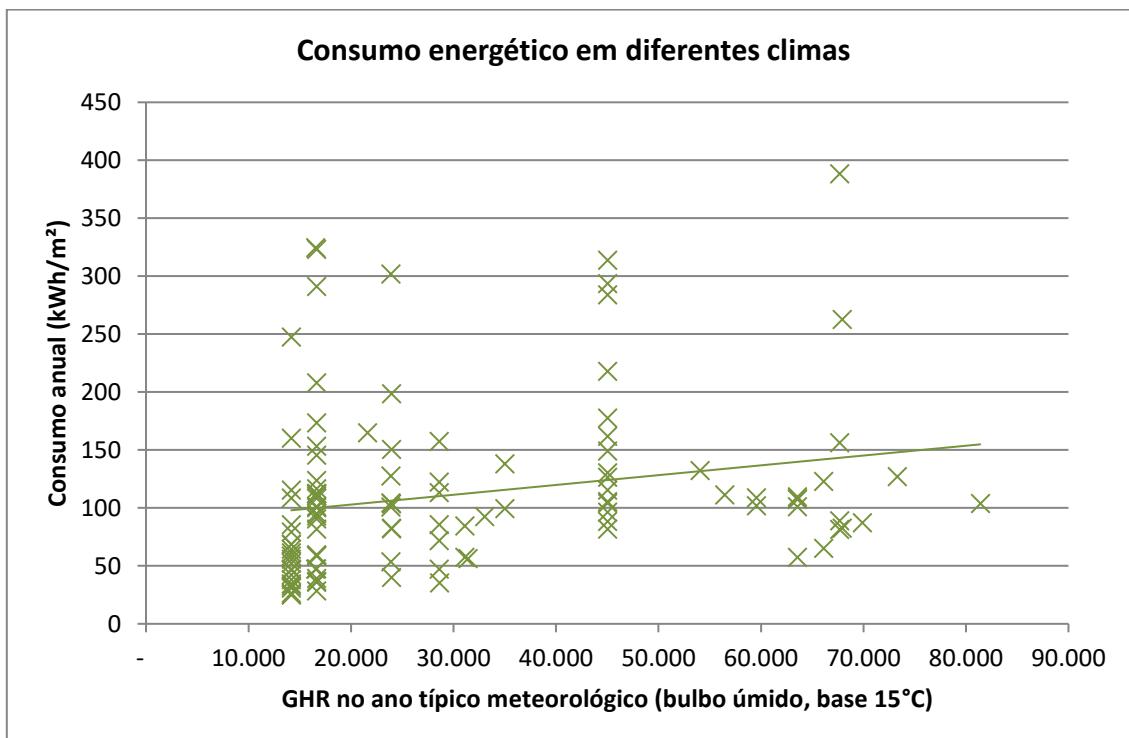


Figura 13. Consumo energético anual versus GHR (bulbo úmido) de um ano típico

3.3 AVALIAÇÃO DE CONSUMO MENSAL

Após a coleta inicial de dados dos edifícios, 20 deles receberam diagnósticos energéticos como parte deste projeto. Para estes edifícios, informações detalhadas de consumo mensal estão disponíveis, com medição confiável de área edificada, verificada in-loco. Cada edifício forneceu entre 12 e 24 contas de energia ao longo do processo de avaliação. Também foram feitas solicitações ao INMET para disponibilização de registros de estações climáticas entre junho de

2013 e dezembro de 2016. Com base nestes registros, foram calculados valores de GHR (base 22°C, bulbo seco) para cada mês.

A Figura 14 mostra a relação de consumo energético nestes edifícios com a intensidade climática para o determinado mês, para 98 edifícios que foram levantados na avaliação estatística. A Figura 15 mostra a mesma avaliação para os 20 edifícios que receberam diagnósticos energéticos. Cabe anotar que todos os pontos no gráfico com consumo maior que 40,7 kWh/m²/mês são da responsabilidade de um único edifício, cujo consumo é impulsionado por um restaurante e um espaço cultural.

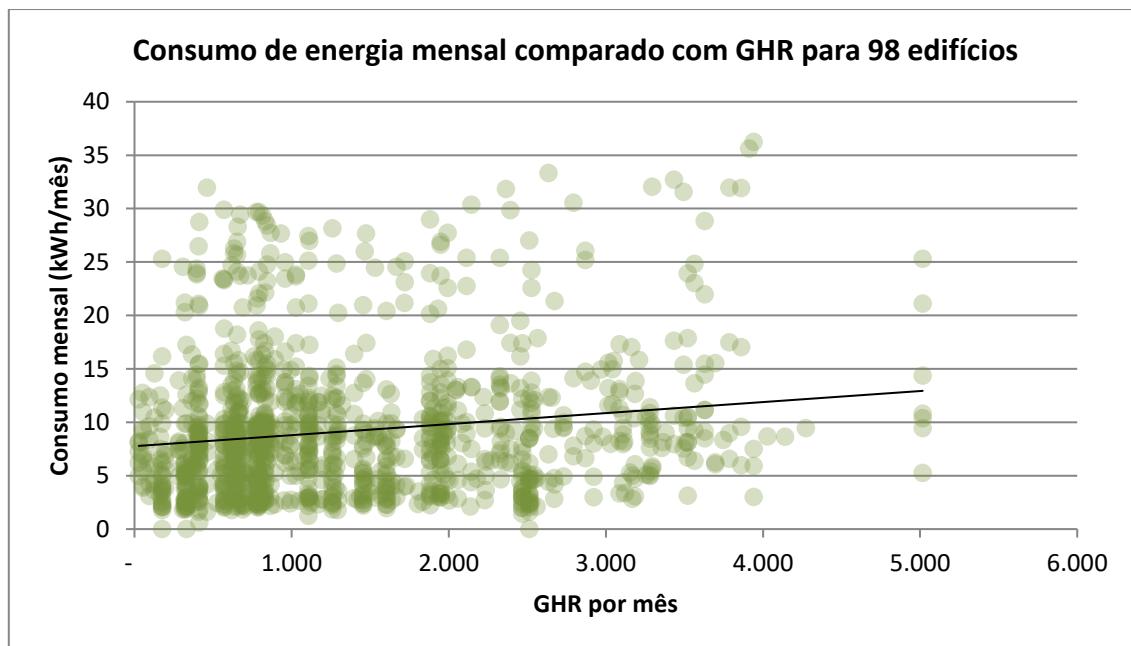


Figura 14. Consumo mensal comparado com grau horas de resfriamento para 98 edifícios da avaliação estatística

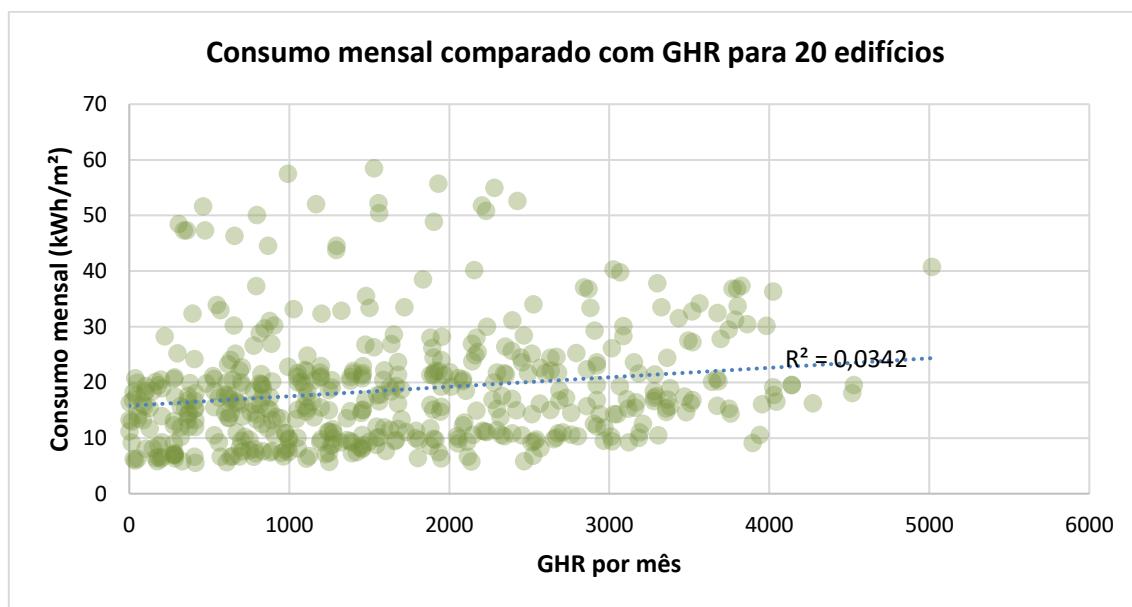


Figura 15. Consumo mensal comparado com grau horas de resfriamento para 20 edifícios das auditorias energéticas

Fica clara a existência de uma leve relação entre consumo energético e clima ($R^2 = 0,034$), e a avaliação mensal com base em dados medidos de clima é a melhor forma de detalhar essa relação e construir uma metodologia de correção climática.

3.4 FORMA DO EDIFÍCIO

A tipologia de escritórios públicos apresenta uma grande variação de tamanhos, áreas e formas construtivas.

Dos 20 edifícios, 17 têm forma retangular, com dois em forma de "L" e um em forma retangular com dois átrios internos. O número de andares varia entre um e 23 andares, com a média sendo nove. Em muitos casos, a altura média dos edifícios no entorno era semelhante à altura do prédio, mas a densidade de sombreamento externo não foi medida.

É esperado que o "fator de forma" (medido como a razão de superfície de envoltória e área de piso) de um edifício possa impactar no seu consumo energético, sobretudo em climas mais quentes, ou com maior intensidade de radiação solar. Isso porque as cargas de envoltória serão maiores relativamente à área do edifício, então ocorrerão mais ganhos térmicos. Porém, a relação não é simples, uma vez que edifícios com fator de forma maior podem utilizar a fachada para ter maior área de iluminação natural em horários mais claros e ventilação natural em horários de temperatura mais baixa, permitindo outras modalidades de operação.

Como os dados dos edifícios medidos não são suficientes para realizar uma avaliação estatística dos impactos de fator de forma, os dois modelos de referência foram utilizados para investigar o

impacto de diferentes fatores de forma. O modelo de referência médio tem um fator de forma de aproximadamente 0,6 enquanto o fator do modelo de referência grande é de 0,4.

Para realizar esta avaliação, as densidades de população e de equipamentos foram alteradas para serem iguais em ambos os modelos (com 12m²/pessoa), assim retirando o maior elemento de divergência entre eles. Cabe notar que o segundo grande elemento de diferença entre os modelos é o consumo de iluminação, que não foi corrigido, assim restando uma diferença significativa entre os modelos.

Apesar das diversas outras diferenças entre os modelos, nota-se com os resultados visíveis na Figura 16 que a variação de consumo entre os dois modelos é relativamente constante, sendo de 19-21% em quatro modelos e subindo para 25% apenas no modelo de São Paulo.

Assim é possível concluir que o maior fator de forma pode aumentar levemente o consumo de energia em climas mais quentes, mas que o impacto desta variação é pequeno, comparado com as outras variáveis e fatores que impactam o consumo.

A implementação de uma correção por fator de forma implicaria em um nível elevado de complexidade de cálculo e medição, limitando a aplicação dos benchmarks, e gerando pouco valor adicional em termos de entendimento de desempenho do edifício.

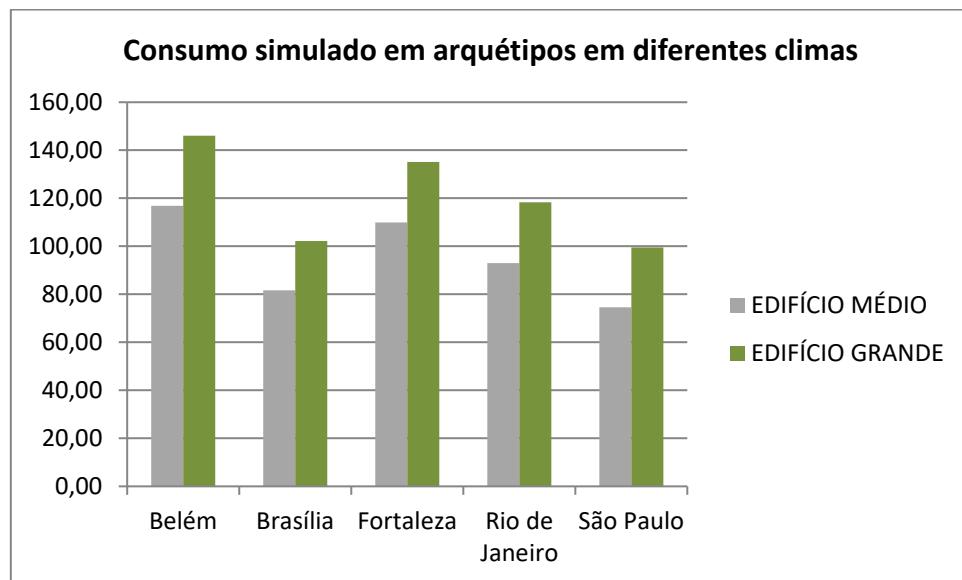


Figura 16. Consumo simulado em modelos de referência em diferentes climas

3.5 SISTEMA DE CONDICIONAMENTO

Os diferentes sistemas de ar condicionado que se encontram em edificações têm impactos significativos no consumo por três motivos:

1. Alguns sistemas são mais eficientes que outros pelas suas características técnicas;

2. Os níveis de controle, operação e manutenção necessários variam muito entre os sistemas; e
3. Sistemas centrais que cobrem o edifício integralmente (e que não permitem abertura de janelas) podem ter perfis de consumo e níveis de conforto diferentes de edifícios que utilizam apenas **splits**, e podem desligar sistemas ou abrir janelas em horários de baixa temperatura.

Para fins de análise, os sistemas são divididos em sistemas centrais, geralmente centrais a água gelada (CAG), e sistemas localizados, geralmente sistemas de expansão direta (DX). Três edifícios na amostra têm sistemas VRF, que agrupam características de ambos os tipos de ar condicionado. Estes sistemas são considerados mais parecidos com sistemas centrais, então são considerados conjuntamente.

Tipo de sistema	Tecnologias	Ventilação natural	Uso
Central	CAG, VRF ou Self	Não utilizado	Edifícios grandes
Individual	Split ou janela	Utilizado	Edifícios pequenos

Uma análise dos dados de consumo dos edifícios no banco de dados pode ser feita, realizando uma separação entre sistemas centrais e individuais. A Figura 17 mostra esta análise, enquanto a Figura 18 mostra a mesma análise após a retirada de três edifícios que não podem ser considerados escritórios, devido ao fato de ter seus consumos impulsionados por CPDs ou centros culturais. Nesta análise, são considerados 11 edifícios com sistemas individuais e 6 edifícios com sistemas centrais.

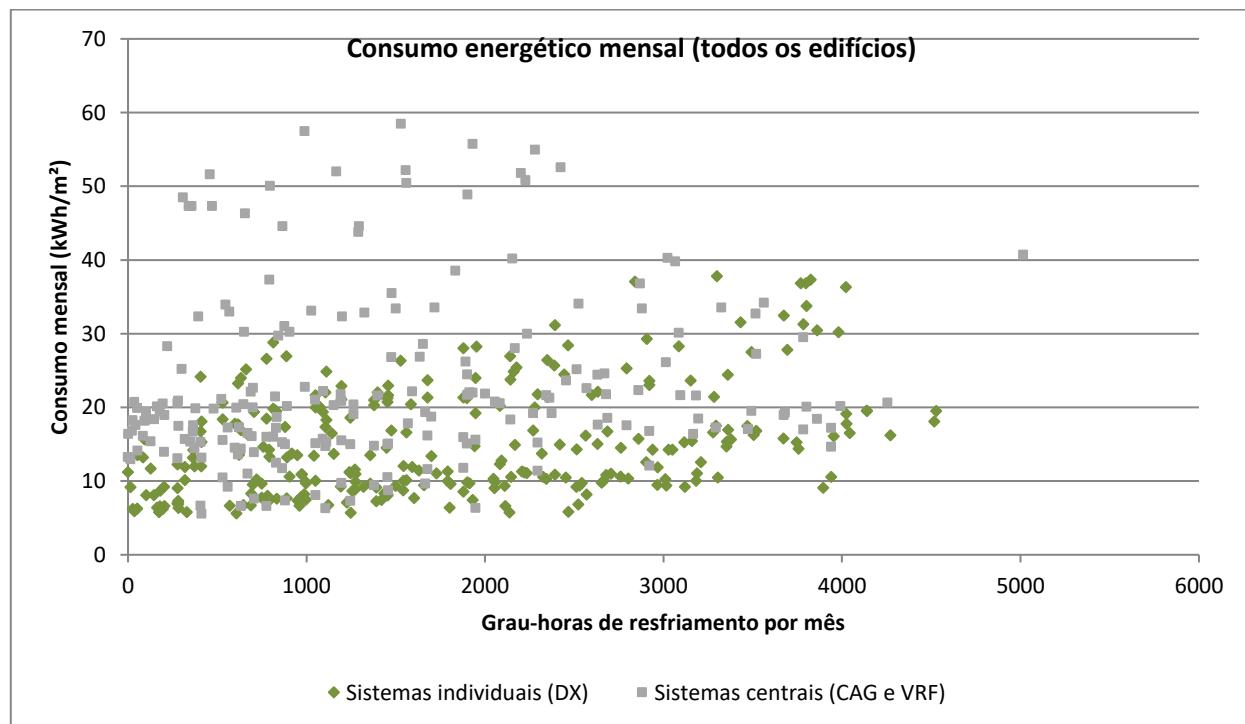


Figura 17. Consumo energético de diferentes sistemas de ar condicionado - todos os edifícios

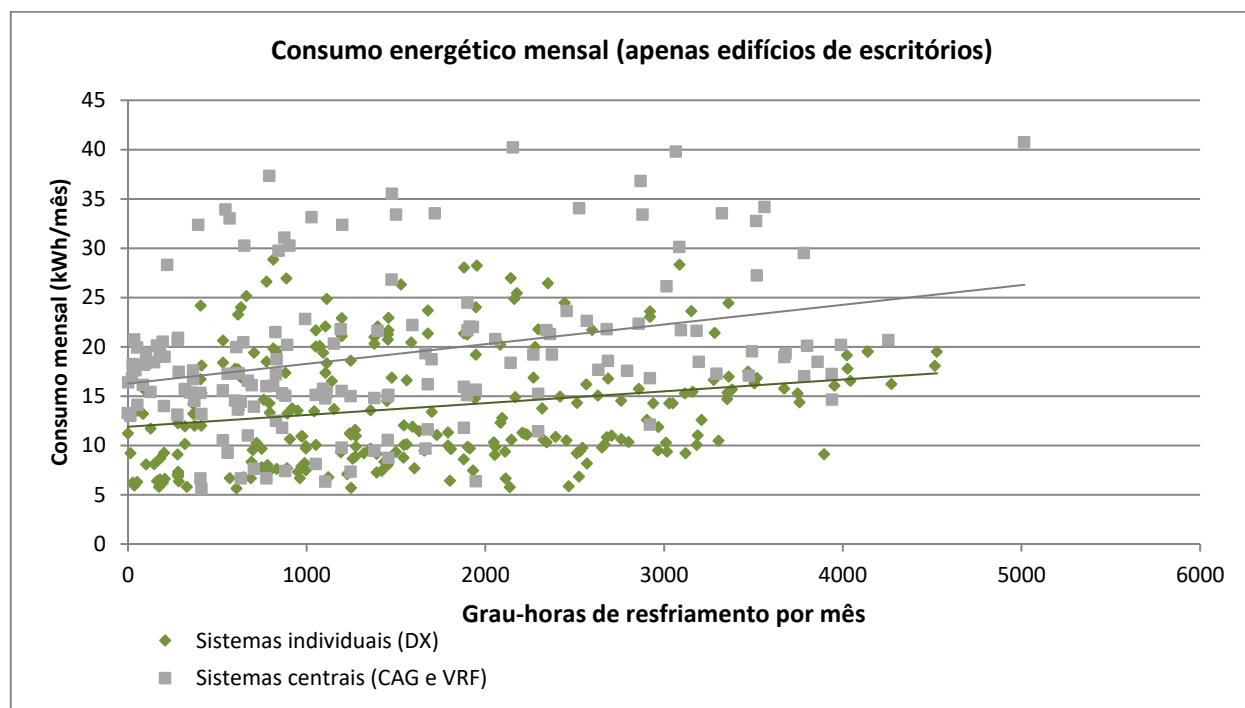


Figura 18. Consumo energético de diferentes sistemas de ar condicionado - apenas edifícios de escritórios

Fica claro que os edifícios maiores geralmente demonstram um consumo maior. Porém, como a amostra pequena, não é possível atribuir esta diferença às variações de interação com o clima com exatidão, pois outros fatores também podem contribuir significativamente. Por exemplo, o desenvolvimento dos benchmarks mostrou que os edifícios maiores costumam ter densidades maiores de ocupação, o que explica uma boa parte da diferença entre eles (como mostra a Figura 16, quando as densidades são iguais, os consumos passam a ser quase idênticos).

Teoricamente, em climas mais frios, deve ser possível utilizar os edifícios com sistemas individuais em "modo misto", aproveitando o frio externo para deixar o sistema de ar condicionado desligado e simplesmente abrir as janelas durante boa parte do ano. Na prática, os dados não são suficientes para tirar uma conclusão deste tipo, apesar de demonstrar que edifícios com sistemas individuais apresentam altos níveis de eficiência em climas com temperaturas menores.

A Figura 19 e a Figura 20 mostram os mesmos dados para os edifícios individualmente, considerando sistemas individuais e sistemas centrais, respectivamente. Essa análise mostra com mais clareza as relações entre temperatura e consumo para os edifícios individualmente, que são consistentes com a utilização de GHR como base para normalização e correção climática.

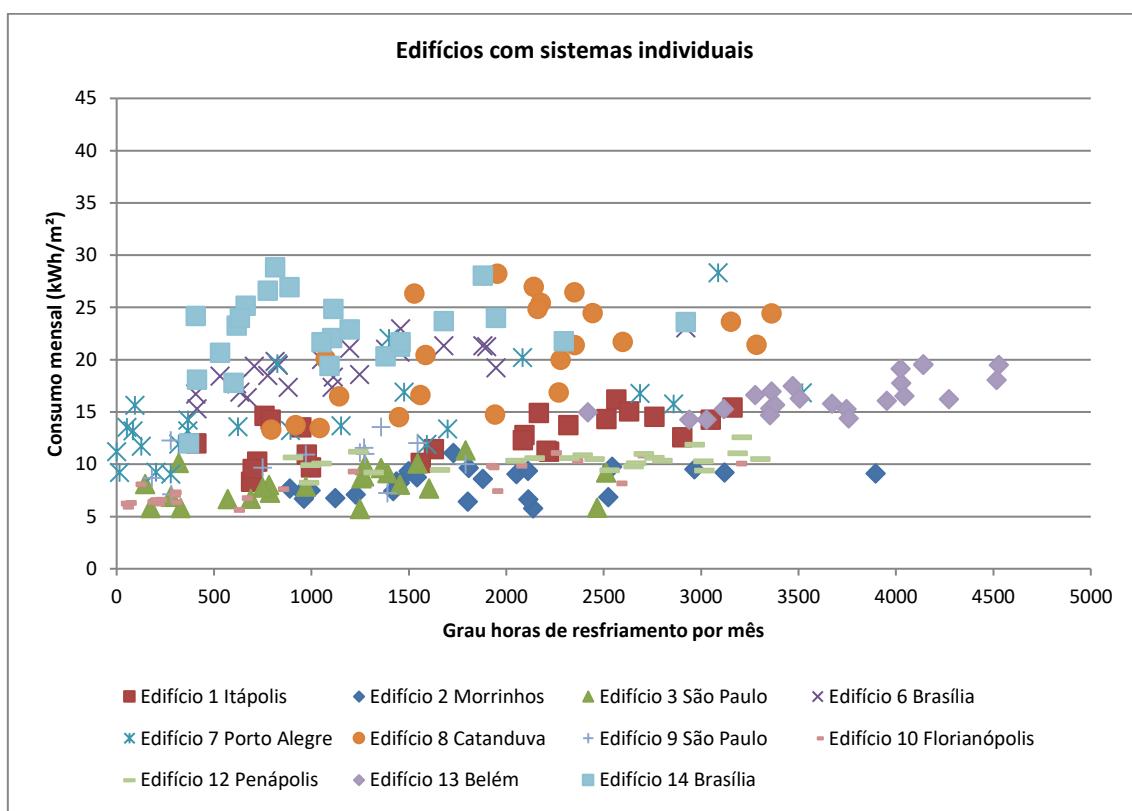


Figura 19. Consumos mensais por edifício (sistemas individuais)

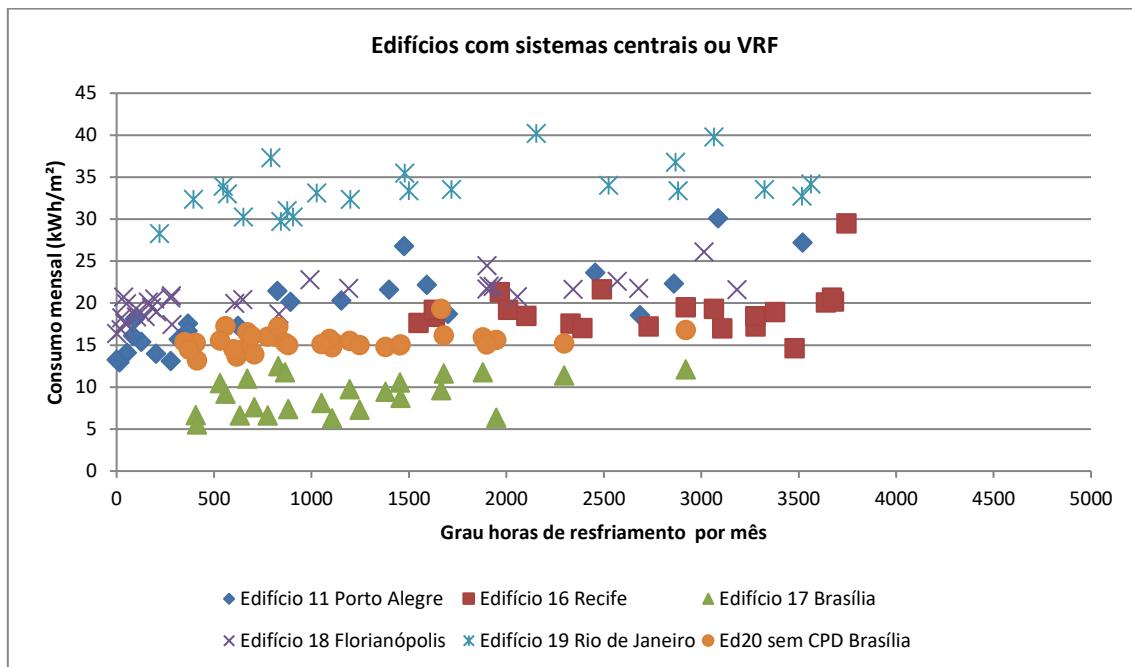


Figura 20. Consumos mensais por edifício (sistemas centrais)

4. IMPACTOS DE OCUPAÇÃO E OUTROS FATORES

4.1 DENSIDADE DE OCUPAÇÃO

A variação de ocupação observada nas auditórias foi aplicada aos modelos de referência para estudar os impactos no consumo de energia. De forma geral, o aumento da densidade de ocupação acarreta no aumento de equipamentos de escritório e da carga térmica retirada pelo sistema de ar condicionado.

Para proceder com as análises, a variação da carga de tomadas foi realizada com uma base de consumo efetivo de 90 W/estação de trabalho, média observada nas visitas técnicas. Uma carga adicional de equipamentos diversos, em **standby** ou com funcionamento 24 horas, foi considerada de forma constante, no valor de 1 W/m² para os edifícios médios e 1,5 W/m² nos grandes, conforme sintetizado na tabela abaixo.

Densidade	EDIFÍCIO MÉDIO			EDIFÍCIO GRANDE		
	Ocupação (m ² /pessoa)	Computadores (W/m ²)	Outros/stand by (W/m ²)	Ocupação (m ² /pessoa)	Computadores (W/m ²)	Outros/stand by (W/m ²)
Mais densa	8	11,25	1	8	11,25	1,5
	10	9	1	10	9	1,5
Normal	12	7,5	1	12	7,5	1,5
	14	6,429	1	14	6,429	1,5
Menos densa	16	5,625	1	16	5,625	1,5

Estas variações de ocupação foram simuladas nos modelos de referência utilizando cinco arquivos climáticos para diferentes cidades: Belém, Brasília, Fortaleza, Rio de Janeiro e São Paulo. Dessa forma, a análise busca validar a dependência do consumo energético total com a variação de densidade de ocupação, possibilitando a criação de relações matemáticas que representam a variação de consumo de acordo com a ocupação de forma independente da localização do edifício.

4.2 HORÁRIOS DE OCUPAÇÃO

O conjunto de edifícios visitados apresentou pouca variação nos horários de ocupação. De forma geral, o funcionamento regular ocorre de segunda a sexta-feira, em horário comercial (08:00 às 18:00). A média de ocupação é de 10,5 horas diárias para o conjunto total de edifícios.

Podem ocorrer variações devido à rotinas operacionais mais extensas, como entrada da equipe de limpeza, ou usos secundários que operam em um intervalo pouco superior à ocupação principal. O edifício 5, por exemplo, possui um teatro com funcionamento noturno variável e o edifício 15 funciona durante os finais de semana por ter uso de museu.

Embora uma pequena variação nos horários de funcionamento tenha sido considerada na construção dos modelos de referência, não é esperado impacto relevante do horário de ocupação no consumo dos edifícios para fins de elaboração e uso do benchmark. Portanto, para esta variável, não é necessário desenvolver coeficiente de correção.

4.3 ESTACIONAMENTOS

O perfil de consumo dos estacionamentos não apresenta relação com o perfil das áreas de escritórios, portanto, pode ser excluído da área construída útil. Nos edifícios avaliados, existe grande variação da área de estacionamentos cobertos, entre 0 e 28.245 m², de acordo com a inserção urbana e a época de construção do edifício.

Geralmente localizados em subsolos, o consumo dos estacionamentos cobertos chega a representar 6,8% do consumo nos edifícios visitados, com uma média de 2,9%. Já os estacionamentos externos não apresentam consumo energético significante na maioria dos casos. As exceções estão ligadas ao contexto do entorno imediato, como o edifício 5 que está inserido em um parque cuja iluminação é conectada no quadro principal do edifício, representando 24% do consumo total do edifício.

Apenas 5 edifícios apresentaram estacionamentos cobertos com sistema de exaustão. A energia consumida depende da potência instalada do sistema de exaustão, do sistema de controle e dos horários de uso ao longo do ano. A densidade de potência instalada de exaustão mostrou variação significativa de 1,47 – 8,68 W/m². De forma geral, não foram encontrados sistemas inteligentes de controle de exaustão.

A energia para iluminação depende da densidade de potência de iluminação (DPI), do sistema de controle utilizado e dos horários de utilização. Foi observada uma grande variação de DPI, entre 1,65 e 8 W/m², excluindo o edifício 14, que possui 15,3 W/m² de iluminação. Isso se deve ao fato do sistema ser muito antigo e ineficiente. De forma geral, as densidades são baixas devido ao uso de sistemas fluorescentes e ao baixo nível de iluminação necessário em estacionamentos.

Desta forma, podemos considerar que o consumo por m² de área de estacionamento exibe uma variação que depende apenas da eficiência dos sistemas utilizados. Considerando operação 76 h por semana, sendo possível estudar diferentes cenários:

- Um sistema eficiente, com 0,50 W/m² de exaustão, DPI = 2,0 W/m², fator de controle de 70% para a iluminação (o que representa um sistema de controle que desliga a iluminação 30% do tempo durante operação). Consumo esperado = 6,94 kWh/m²/ano.
- Um sistema típico, com 0,84 W/m² de exaustão, DPI = 3,0 W/m², sem controle inteligente. Consumo esperado = 14,42 kWh/m²/ano.

Cabe lembrar que estes valores representam consumo por m² de área de estacionamento, e não por área útil condicionada da edificação.

4.4 CPDs

A existência de centrais de processamento de dados (CPDs) nos edifícios públicos têm apresentado uma tendência crescente. Todos os edifícios visitados possuem este tipo de consumo energético, embora exista uma grande variação de representação do consumo total. Os CPDs podem configurar o consumo predominante, como ocorre no edifício 4 onde o sistema responde por 76,6% do total. Nos edifícios 6 e 20 este valor ultrapassa 40%, nos demais edifícios os menores valores chegam a 2,2%.

O termo CPD é utilizado para se referir apenas a salas dedicadas ao processamento de dados, com sistemas de resfriamento e controle de entrada. Quando bem estruturados, são utilizados **sistemas de resfriamento dedicados, sendo comuns os “sistemas de precisão”, do tipo self**, com insuflamento pelo piso, retorno pelo teto e uso de corredores quentes e frios para otimizar a distribuição de calor. A Energia é geralmente consumida para os seguintes fins:

- Processamento de dados;
- No-break ou UPS (**Uninterruptible Power Supply**);
- Refrigeração;
- Rejeição de calor; e
- Iluminação.

A grande variação de consumos entre os CPDs indica que não há relação direta entre este sistema e o restante da edificação. Portanto, este estudo não contempla um benchmarking de CPDs, embora tenha indicado medidas de eficiência para melhorar algumas condições operacionais do sistema.

Em nível internacional, estão sendo desenvolvidas algumas metodologias e normas para avaliar e promover a eficiência energética de CPDs, como a norma ASHRAE 90.4. Antes de tudo, é necessário estabelecer um indicador de consumo para basear as possíveis comparações.

Como o consumo de CPDs não está relacionado à área ocupada pelo sistema. O índice mais utilizado é o PUE (**Power Usage Effectiveness**), caracterizado pela relação entre o consumo com processamento de dados e o consumo para outros fins, incluindo ar condicionado. Entretanto, para a utilização deste indicador é necessário dispor de dados de submedição. Para projeto de novos sistemas esta é uma alternativa viável, porém, para sistemas existentes esta abordagem é laboriosa.

A potência instalada do CPD é uma informação mais acessível. Porém, o consumo real geralmente é muito menor, uma vez que estes sistemas são projetados para comportar expansões. Além disso, existe uma variação no perfil de consumo de acordo com operação durante ou fora do horário comercial, embora os equipamentos permaneçam ligados permanentemente.

Desta forma, não é possível realizar uma comparação entre as edificações sem a separação do consumo do CPD, e a eficiência destes sistemas não pode ser aferida com os dados disponíveis.

A abordagem recomendada é que seja realizada a submedição do CPD, abrangendo todos os consumos relacionados, principalmente resfriamento e rejeição de calor. Entretanto, na

impossibilidade desta opção é factível estimar o consumo anual do CPD a partir de medições pontuais em momentos específicos.

A equação a seguir pode ser utilizada para realizar esta estimativa. São necessárias pelo menos dez medições em cada horário representativo.

$$\text{Consumo anual (kWh)} = P_{dia} \cdot \sum(h_{dia}) + P_{noite} \cdot \sum(h_{noite}) + P_{fds} \cdot \sum(h_{fds})$$

Onde:

P_{dia} = potência média medida durante horários de operação do edifício (kW)

P_{noite} = potência média medida durante a semana, fora de horários de operação do edifício (kW)

P_{fds} = potência média medida durante o dia nos sábados e domingos (kW)

h_{dia} = número de horas de operação do edifício durante um ano

h_{noite} = número de horas durante dias de trabalho em que o edifício está inoperante

h_{fds} = número de horas de sábados, domingos e feriados durante um ano

$$h_{dia} + h_{noite} + h_{fds} = 8.760$$

5. CONFORTO TÉRMICO E QUALIDADE AMBIENTAL

5.1 CONFORTO DE USUÁRIOS E QUALIDADE AMBIENTAL

O benchmark trabalha com a suposição que os “serviços energéticos” de conforto térmico interno, renovação de ar, conforto visual e outras variáveis de qualidade ambiental são atingidos. Estes serviços, que muitas vezes são responsáveis por grande parte do consumo energético, são funções intrínsecas da edificação, necessários para o desempenho e conforto dos usuários.

Na prática, no entanto, há muita variação nos níveis de qualidade ambiental dentro de edificações, como foi exemplificado nas visitas dos 20 edifícios estudados. Isso pode ser refletido nas questões de desempenho energético de um edifício, que pode se mostrar mais eficiente energeticamente por simplesmente não entregar os níveis mínimos de conforto térmico para os usuários.

Uma avaliação simples de conforto térmico e qualidade da iluminação dos edifícios visitados foi realizada durante as auditorias. Essas avaliações foram realizadas de forma subjetiva, com base em entrevistas com usuários, registros de reclamações de desconforto de usuários e medição pontual em alguns casos. Medições de iluminância nos planos de trabalho também foram efetuadas, e comparadas com níveis requeridos por normas nacionais. A avaliação da qualidade da iluminação é descrita no próximo tópico.

5.2 CONFORTO TÉRMICO



Edifício 2, Morrinhos	Edifício 1, Itápolis (falta de renovação de ar)
Edifício 3, São Paulo	Edifício 5, Limeira
Edifício 4, João Pessoa	Edifício 6, Brasília
Edifício 7, Porto Alegre	Edifício 9, São Paulo
Edifício 8, Catanduva	Edifício 13, Belém
Edifício 10, Florianópolis	Edifício 16, Recife
Edifício 11, Porto Alegre	
Edifício 12, Penápolis	
Edifício 14, Brasília	
Edifício 15, Belo Horizonte	
Edifício 17, Brasília	
Edifício 18, Florianópolis	
Edifício 19, Rio de Janeiro	
Edifício 20, Brasília	

A maioria dos edifícios visitados tiveram níveis de conforto térmico geralmente adequados, porém 30% demonstraram uma falta de capacidade de ar condicionado instalada, resultando em uma sensação de calor perceptível, confirmada por relatos de reclamações de calor dos usuários. Portanto, para atingir um nível de serviço aceitável, e assim poder fazer uma comparação real entre outros edifícios, o consumo desses edifícios deveria ser ajustado, e no caso, aumentado acima do consumo de hoje. Assim, o consumo relativamente baixo demonstrado por esses edifícios não pode ser considerado como sendo eficiente.

Para avaliar o tamanho do aumento de consumo que esse ajuste pode representar, foi realizado um estudo de caso com simulação energética do edifício 16 em Recife, em que o sistema de ar condicionado era de capacidade muito inadequada (em baixo).



Figura 21. Foto de equipamento instalado, mas que não podia ser acionado no edifício 6, causando desconforto.

5.3 CONFORTO VISUAL

A tabela abaixo resume quais edifícios demonstraram níveis de iluminância abaixo do normal. A norma brasileira NBR ISO 8995-1 estipula um nível ideal de 500 lux no plano de trabalho em espaços de escritórios. Porém, isso é um valor muito acima do nível encontrado na maioria de edifícios. Levando em consideração as características normalmente encontradas em edificações Brasileiras, para essa avaliação foi considerado adequado um nível de iluminância medido entre 300 e 500 lux no plano de trabalho, e inadequado um nível de iluminância abaixo de 300 lux.



Edifícios com Iluminação Adequada	Edifícios com Iluminação Inadequada
Edifício 2, Morrinhos	Edifício 1, Itápolis
Edifício 3, São Paulo	Edifício 5, Limeira
Edifício 4, João Pessoa	Edifício 6, Brasília
Edifício 8, Catanduva	Edifício 7, Porto Alegre
Edifício 9, São Paulo	Edifício 12, Penápolis
Edifício 10, Florianópolis	Edifício 13, Belém
Edifício 11, Porto Alegre	
Edifício 14, Brasília	
Edifício 15, Belo Horizonte	
Edifício 16, Recife	
Edifício 17, Brasília	
Edifício 18, Florianópolis	
Edifício 19, Rio de Janeiro	
Edifício 20, Brasília	

Similarmente à questão do conforto térmico, os edifícios com iluminância inadequada têm um consumo relativamente baixo comparado aos outros, porém isso não pode ser considerado como uma eficiência.

A fim de considerar essa questão, é importante destacar que a equação do benchmark só dará um resultado fiel para edifícios que cumpram as funções básicas. Portanto, na plataforma do benchmarking haverá um pop-up declarando ao usuário que o resultado só pode ser aplicável se o edifício em questão atinge as normas de conforto térmico (conforme NBR 16401-2), renovação de ar (NBR 16401) e iluminação adequada (NBR ISO 8995-1), e que edifícios que não atinjam essas condições ambientais internas poderão ter resultados que indicam operação eficiente, não sendo de fato verdade.



Figura 22. Foto de iluminação ineficiente de uma área de trabalho no edifício 12, em que foram registrados níveis de iluminância muito baixos.

A tabela a seguir resume as principais características de conforto encontradas nos 20 edifícios:

Número do Edifício	Confortável? (Térmico e Iluminação)	Comentários:
Edifício 1	Não. Para ser confortável, teria que ter um sistema de renovação de ar e mais iluminação.	<ul style="list-style-type: none"> - Não tem entrada de ar externo, qualidade do ar ruim - Trocaram algumas lâmpadas para LED mas escolheram lâmpadas erradas -> ofuscamento - Tinham tirado várias lâmpadas para economizar energia, mas estava escuro
Edifício 2	Sim	Iluminação externa muito alta
Edifício 3	Sim	Troca de lâmpadas CFL 11 W para LED 11 W nas áreas de circulação, para melhoria de nível de iluminação (i.e. W/m ² dessas áreas é confortável)
Edifício 4	Sim	
Edifício 5	Não. Seria necessário aumentar a potência instalada de ar condicionado e a densidade de iluminação nas áreas de circulação	Muita reclamação de calor
Edifício 6	Não. Seria necessário aumentar a potência instalada de ar condicionado.	Não há capacidade elétrica para ligar equipamentos de AC, e desligam iluminação para não ficar quente

Edifício 7	Sim para o conforto térmico, mas para a iluminação é um pouco escura nos corredores.	
Edifício 8	Sim	
Edifício 9	Não. Precisa aumentar o conforto térmico	Nenhum comentário?
Edifício 10	Sim	Iluminação alta demais em algumas áreas, e baixa em outras.
Edifício 11	Sim	
Edifício 12	Sim	
Edifício 13 - Bloco C	Não. Seria necessário aumentar a potência instalada e horas de operação do ar condicionado e da iluminação para atingir condições de conforto.	Reclamação de calor, iluminação não adequada em muitos lugares
Edifício 14	Sim	
Edifício 15	Sim	
Edifício 16	Não. O sistema tem dificuldade em atingir condições de conforto térmico.	A CAG não é suficiente para o resfriamento necessário.
Edifício 17	Sim	
Edifício 18	Sim	
Edifício 19	Sim, com exceção do consumo da CAG ligada 24h.	Alguns andares quentes, alguns frios, válvulas quebradas.
Edifício 20	Sim, porém com problema na distribuição / eficiência dos sistemas.	

5.4 CONFORTO TÉRMICO – ESTUDO DE CASO COM SIMULAÇÃO CALIBRADA

Para estudar as variações de consumo que podem ocorrer a partir de ações que procurem proporcionar níveis de conforto adequados aos usuários, foi construído um modelo de simulação para um dos 20 edifícios visitados que apresentou situação de desconforto devido à degradação do sistema de ar condicionado.

O edifício 16 é composto por 10 pavimentos tipo, um subsolo, um andar de auditório e uma área técnica de cobertura. O sistema de condicionamento de ar central é composto por dois **chillers** resfriados a ar com capacidade de 300 TR cada um. A circulação de água gelada é realizada através de uma única bomba de 40 CV (mais reserva), abastecendo duas prumadas. Em cada pavimento tipo existem 3 **fan coils** na região sudeste e dois na parte noroeste. O andar de auditório e o subsolo são condicionados por unidades do tipo **split** e splitão.

Na visita técnica foi verificado que o sistema central apresenta alto grau de deterioração: apenas 4 dentre os 10 compressores do conjunto de **chillers** estavam em funcionamento, fazendo com que a água gelada não atingisse a temperatura de projeto e a bomba permanecesse com operação em 60 Hz, embora tenha variador de frequência. Com o sistema de automação inoperante o ar condicionado central é acionado manualmente todos os dias em sua máxima capacidade, invariavelmente. Além disso, foram observados equipamentos tipo Split em algumas salas dos pavimentos tipo, adicionados devido às mudanças constantes nos layouts das salas.

A partir dos dados colhidos na visita técnica, foi construído um modelo de simulação linha de base (Edifício Real) para representar o comportamento e o consumo energético faturado. Utilizando as leituras da concessionária e os dados registrados na plataforma online, o modelo foi calibrado para refletir o consumo operacional do edifício.

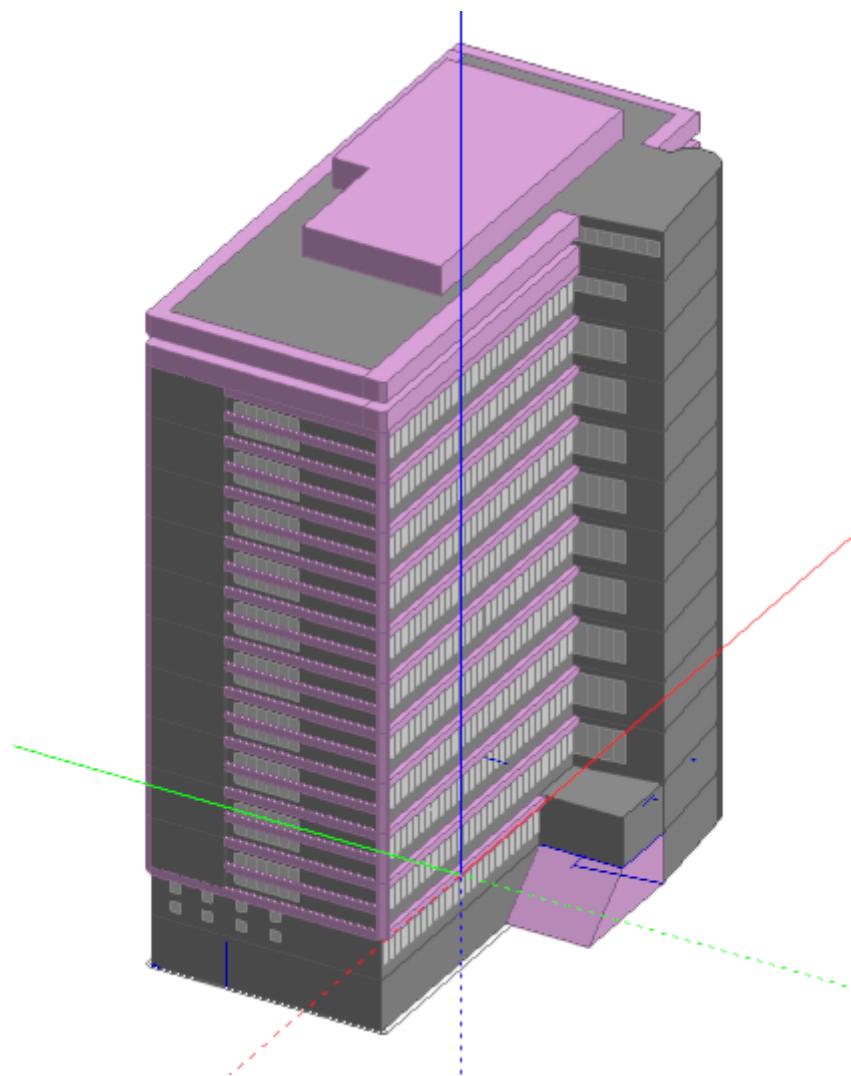


Figura 23. Modelo de simulação do Edifício 16.

Para verificar a calibragem do modelo foram utilizados os consumos mensais medidos e simulados aplicando-se os parâmetros de aferição de erro contidos no ASHRAE **Guideline** 14-2014:

- Coeficiente de variação da raiz quadrada do erro quadrático médio ou CV(RMSE): entre +/- 15%.
- Erro de polarização média normalizada (NMBE): entre +/- 5%.

O modelo calibrado alcançou os valores: 11% para o CV(RMSE) e -2,6% para NMBE, ficando dentro dos intervalos estipulados. Para esta avaliação foi necessário descartar o consumo medido no mês de fevereiro de 2016, quando ocorreu um erro de medição e faturamento pela concessionária de energia. Naquele mês o consumo varia 55% acima da média dos consumos dos demais meses.

A avaliação das temperaturas internas das zonas definidas pela compartimentação dos pavimentos tipo demonstrou que, em muitos casos, o **setpoint** do ar condicionado fixado em 24°C não foi alcançado na semana típica de verão (Figura 24 e Figura 25), principalmente nas regiões das fachadas Nordeste. Nota-se ainda que a temperatura operacional alcança valores acima de 27°C. Portanto, o modelo valida a situação de desconforto térmico observada e relatada na visita técnica ao edifício 16, aqui entendida de forma simplificada como o atendimento à temperatura de **setpoint** desejada (24°C).

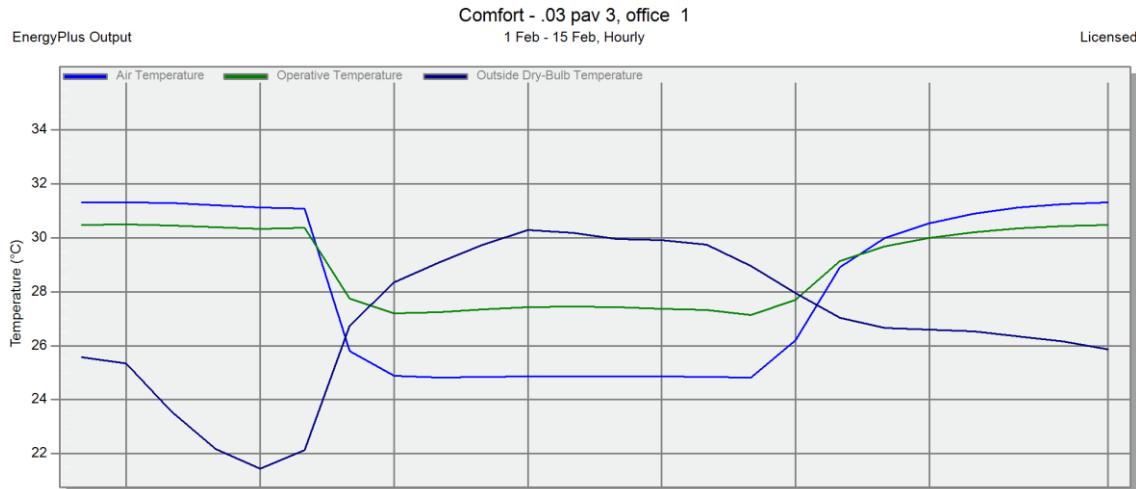


Figura 24. Gráfico de temperaturas para uma zona térmica do terceiro andar.

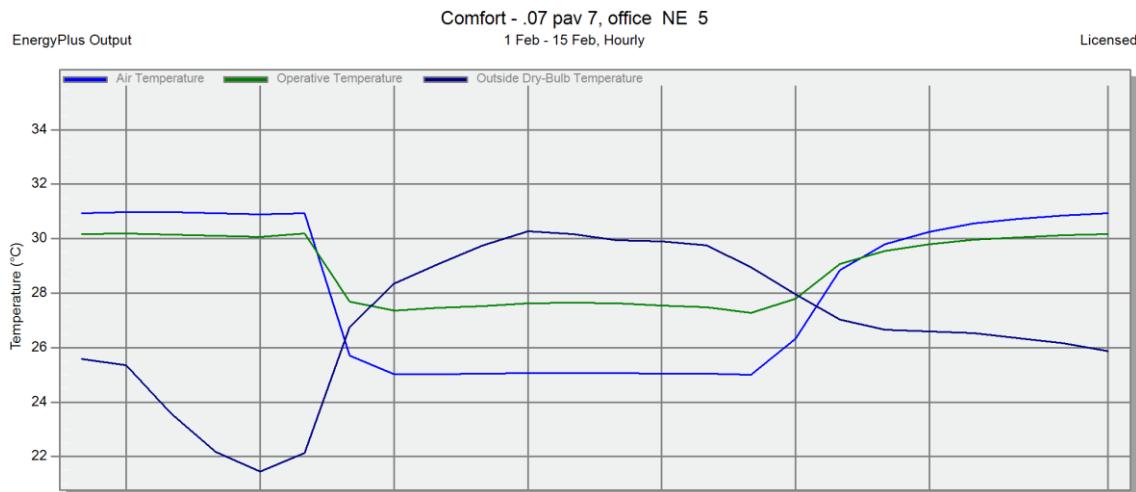


Figura 25. Gráfico de temperaturas para uma zona térmica do sétimo andar.

Para atingir as condições de conforto, seria necessário realizar a recuperação ou troca do sistema de ar condicionado central e a redistribuição dos dutos e grelhas para permitir maior flexibilidade em relação ao layout das salas, idealmente implantando sistema de VAV (Volume de Ar Variável). Atualmente os layouts variáveis não são compatíveis com o sistema de distribuição instalado e são diferentes entre os andares. Estas ações resultariam em aumento de consumo de energia, embora possibilitessem a eliminação de equipamentos Split, adicionados gradativamente nos últimos anos.

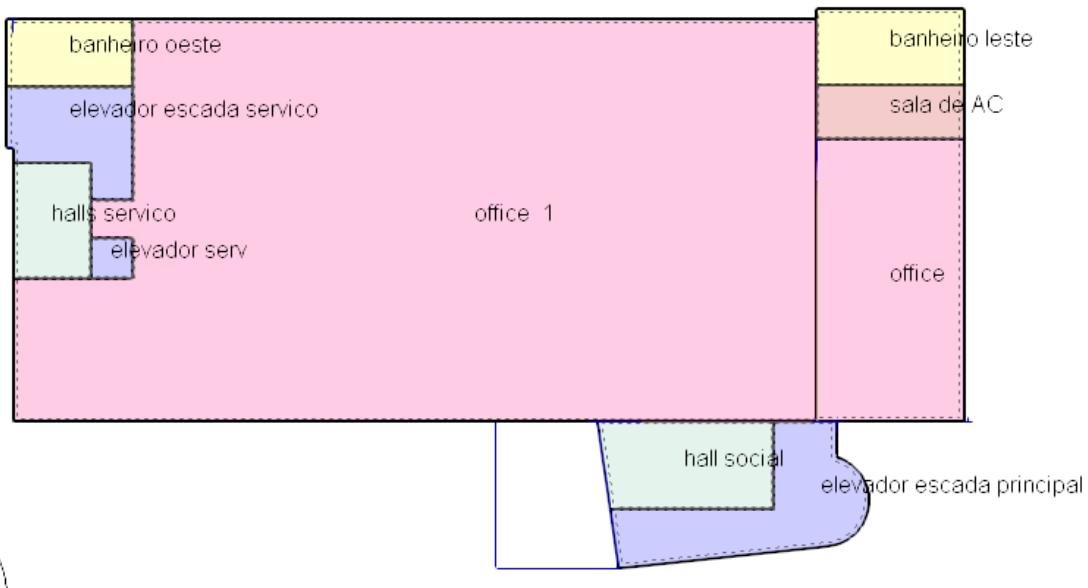


Figura 26. Layout simplificado das zonas térmicas do segundo andar.

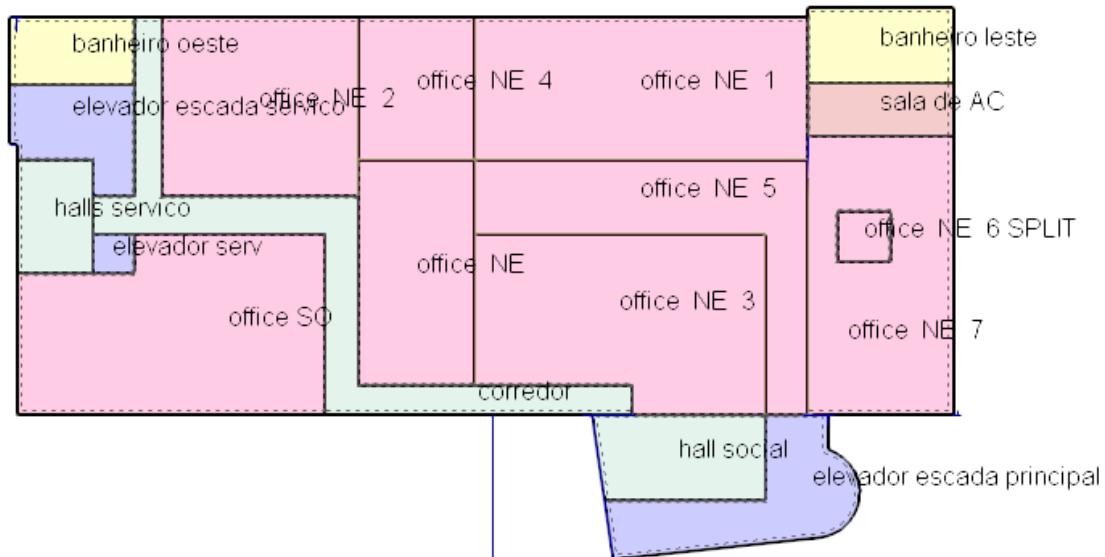


Figura 27. Layout simplificado das zonas térmicas do sexto andar.

Para averiguar este impacto, foi construído um cenário de simulação (Edifício Projetado) com o sistema de ar condicionado central atual operando segundo as condições de projeto informadas no documento “Especificações de Materiais e Serviços - Instalações de Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento”, fornecido pela administração do edifício. Além disso, foram retirados os equipamentos do tipo Split nos pavimentos tipo, restando aqueles do auditório e do subsolo.

Para este cenário, verificou-se o aumento de 9,1% no consumo do sistema de ar condicionado, traduzido em 4,1% do consumo anual total do edifício. Embora a temperatura de **setpoint** de 24°C tenha sido atingida em todas as zonas térmicas simuladas, a avaliação do efeito da compartimentação é limitada à configuração simulada. Sabe-se que os andares tipo do edifício

passam por modificações de layout com certa frequência, podendo ocasionar situações de desbalanceamento na distribuição do ar condicionado.

Uma vez alcançada a temperatura, partimos para a verificação de dimensionamento do sistema. Para tal análise, foi testado um cenário adicional de melhoria: troca do sistema central, com dimensionamento automático do sistema de ar condicionado central.

A tabela abaixo apresenta a descrição dos cenários e respectivos resultados compilados para as três simulações realizadas: Edifício Real (linha de base), Edifício Projetado e Melhoria.

Tabela 3. Cenários para o edifício 16.

CENÁRIOS	DESCRÍÇÃO	CONSUMO TOTAL AUAL (kWh)	CONSUMO ESPECÍFICO ANUAL (kWh/m ²)	AUMENTO RELATIVO (%)
REAL	Splits nos pavimentos tipo, temperatura de entrada de água no FC 14°C, temperatura de saída no FC 18°C. chiller : funcionamento de metade dos compressores, perda de eficiência de 15% (15 anos de funcionamento), saída de água 14°C, capacidade de resfriamento 897kW, potência elétrica 360kW, COP 2,49.	3110597	171	Linha de base
PROJETADO	Sem splits nos pavimentos tipo, temperatura de entrada de água no FC 7°C, temperatura de saída do FC 14°C. Chiller : saída de água 7°C, capacidade de resfriamento 2110kW, potência elétrica 720kW, COP 2,93.	3238780	181	4,10%
MELHORIA	Dimensionamento automático do sistema de ar condicionado central. COP 2,93.	3050553	170	-1,90%

Consumos específicos para os cenários do edifício 16 [kWh/m²/ano]

■ REAL ■ PROJETADO ■ MELHORIA

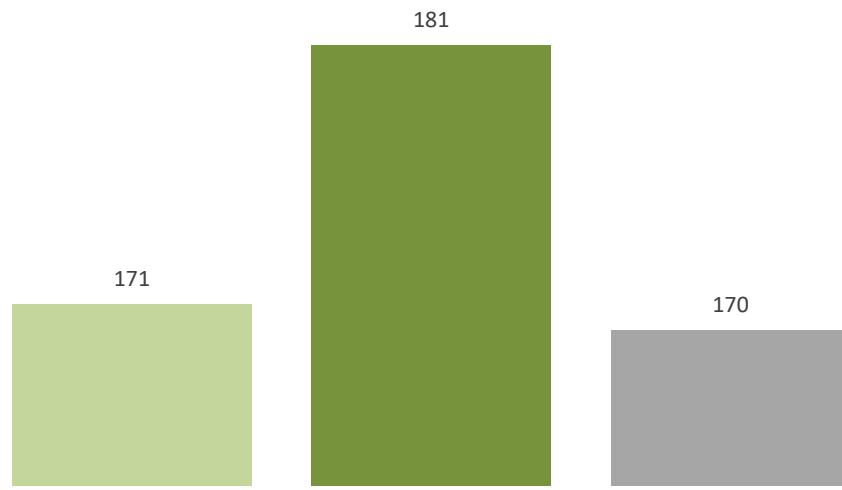


Figura 28. Gráfico comparativo dos consumos para os três cenários do edifício 16.

É possível perceber que o aumento de consumo para proporcionar condições de conforto, encontrado no cenário Edifício Projetado, é pequeno se considerado o ganho na qualidade do ambiente de trabalho que poderia ser proporcionado. Portanto, este custo operacional deve ser considerado na tomada de decisão de forma a incentivar uma reforma do sistema.

Por outro lado, a partir do cenário de Melhoria, observa-se que o dimensionamento do sistema poderia ser reavaliado em uma situação de troca total, com a possibilidade de economia em relação à situação atual. Neste caso, um sistema com COP maior e VAV traria ganhos ainda maiores.

6. MODELO DE BENCHMARKING

6.1 MODELAGEM DE EDIFÍCIOS TÍPICOS

A base do desenvolvimento do benchmark é a avaliação do comportamento do consumo energético de edifícios em diferentes condições e situações, de forma que seja possível entender os impactos de fatores externos e fatores de ocupação no seu desempenho.

Por isso, primeiramente foram utilizados os dados medidos de consumo (conforme descrito acima), e em segundo lugar foram utilizados os modelos de referência, construídos para representar o estoque de edifícios públicos e representar seu desempenho em situações diferentes.

Modelos de referência com sistemas mais eficientes foram utilizados para simular o desempenho de edifícios eficientes e criar este ponto no banco de dados.

Os consumos resultantes da simulação são menores que os consumos reais em muitos casos, pois não incluem alguns fatores (como pode ser visto em **Tabela 4**).

Porém, a Figura 29 e Figura 30 mostram os consumos mensais resultando da simulação dos modelos de referência médios e grandes respectivamente, e os comparam com os consumos medidos dos edifícios. A avaliação do impacto de densidade de ocupação é mostrada em Figura 31 e Figura 32 para os modelos de referência médio e grande respectivamente.

Tabela 4. Avaliações de consumo energético por tipo de cálculo

Consumo	Avaliação
Ar condicionado	
Iluminação interna	Simulação
Cargas de tomada	
Elevadores	
Estacionamentos e iluminação externa	Cálculo manual
Outras cargas	
CPD	Benchmark = consumo real

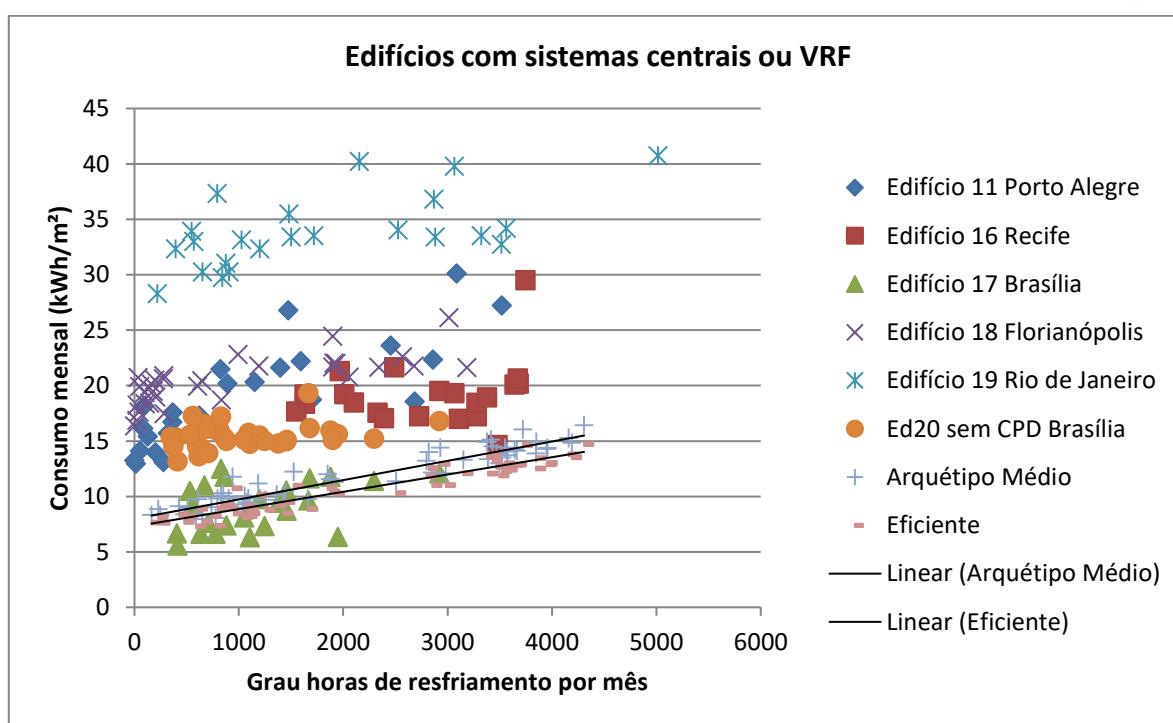


Figura 29. Comparação entre dados simulados do modelo de referência e dados medidos para edifícios com sistemas centrais

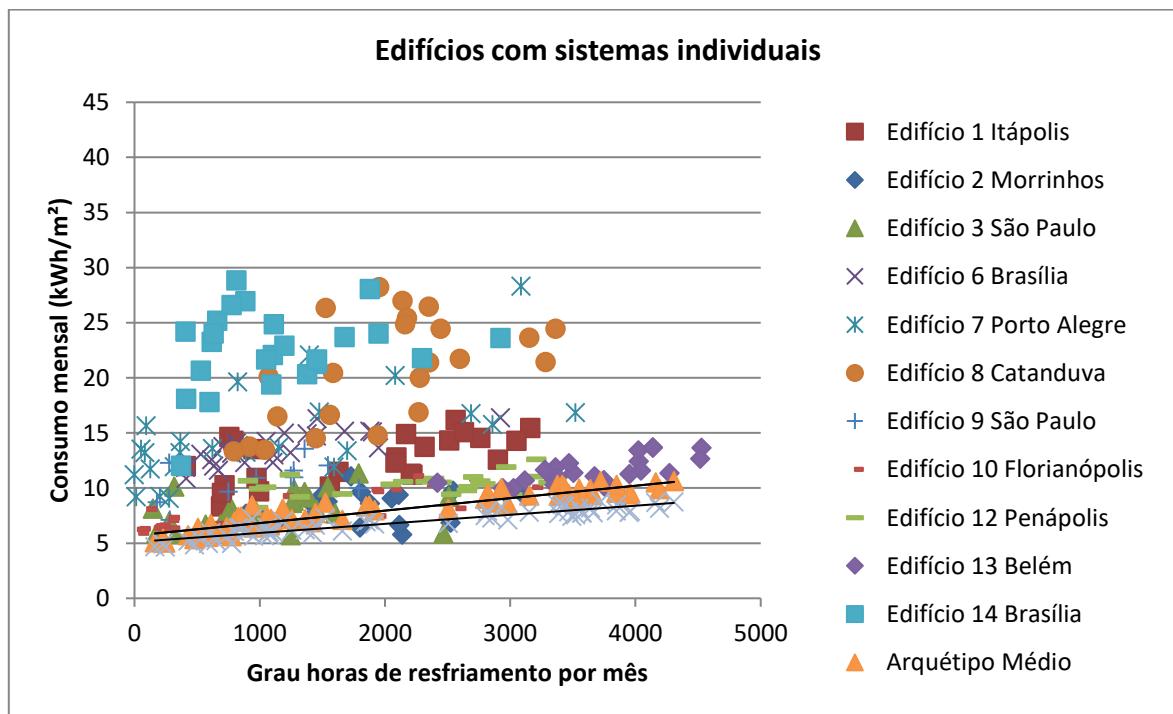


Figura 30. Comparação entre dados simulados do modelo de referência e dados medidos para edifícios com sistemas individuais

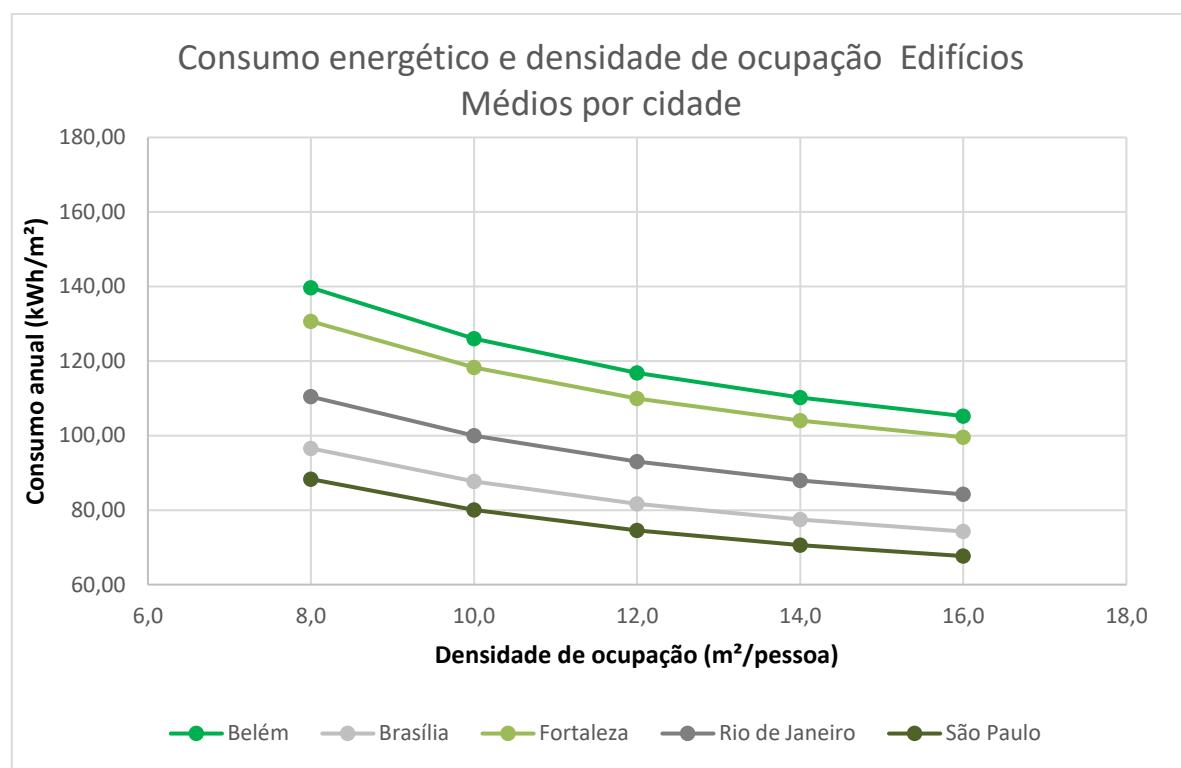


Figura 31. Comparação de consumo energético em diferentes cidades com variação na densidade de ocupação, para o modelo de referência médio

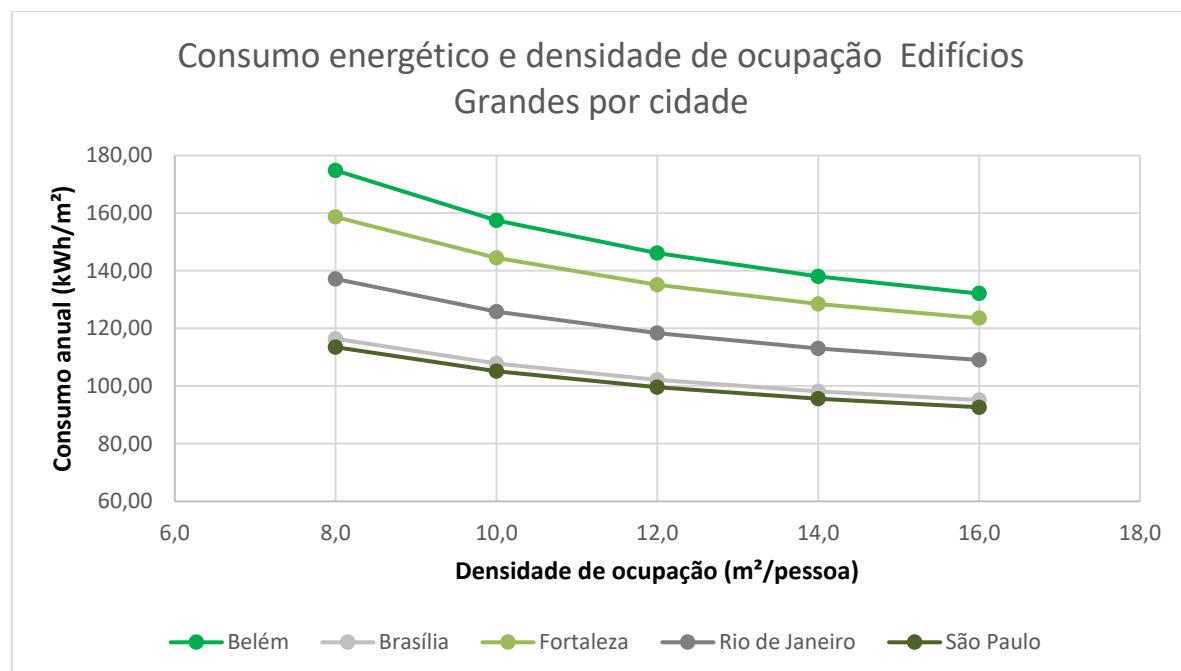


Figura 32. Comparação de consumo energético em diferentes cidades com variação na densidade de ocupação, para o modelo de referência grande

6.2 DESENVOLVIMENTO DA EQUAÇÃO

Conforme descrito no primeiro capítulo deste relatório, o consumo energético de um edifício depende de fatores externos, intensidade de uso, infraestrutura física e eficiência de operação. O papel deste benchmark é possibilitar comparações entre edifícios que irão identificar seus níveis de eficiência de infraestrutura física e operação. Por isso, é necessário normalizar os impactos mais importantes dos fatores externos e intensidade de ocupação. Isso é feito através de fatores de correção.

De acordo com os resultados das avaliações realizadas nos edifícios para desenvolver este benchmark, os fatores que precisarão ser levados em consideração para preparar um benchmark adequado são:

- Área útil do edifício;
- Temperatura externa real;
- Densidade de população no edifício;
- Taxa de ocupação do edifício;
- Área do edifício que é condicionada;
- Consumo de energia em datacenters;
- Área de estacionamentos cobertos;
- Área de iluminação externa; e
- Uso de grupo gerador na hora de ponta.

Em conformidade com outros benchmarks previamente desenvolvidos, o fator de normalização utilizado é a área útil do edifício, ou seja, todos os consumos do edifício são normalizados por essa área, que vai representar proporcionalmente as cargas predominantes do edifício. O consumo de energia é calculado mensalmente, junto com as taxas de ocupação e grau-horas de resfriamento no local. A avaliação é feita com uma base anual, sendo a soma de 12 meses consecutivos de medição.

A densidade de população vai impactar no consumo por metro quadrado de área útil, sendo aplicado um fator de correção.

Na maioria dos casos, a maior parte da área de um edifício de escritórios é condicionada, porém, uma proporção significativa dos escritórios estudados apresenta ar condicionado em apenas alguns ambientes. Nestes casos, é necessário considerar que a área condicionada pode ser menor que a área útil, e essa área terá um consumo maior relacionado às necessidades do ar condicionado. As condições climáticas vão impactar esta parte, e a correção é aplicada por meio de um multiplicador de grau-horas de resfriamento com temperatura base de 22°C.

Para construir um consumo total teórico, é adotada uma metodologia **bottom-up**, identificando e somando os principais responsáveis por consumo energético no edifício. No caso de datacenters, isso é um consumo total; nos casos de iluminação externa e estacionamento coberto, um consumo por m² é adotado. Finalmente, é necessário desconsiderar uma porcentagem do consumo se um grupo gerador é normalmente utilizado nas horas de ponta.

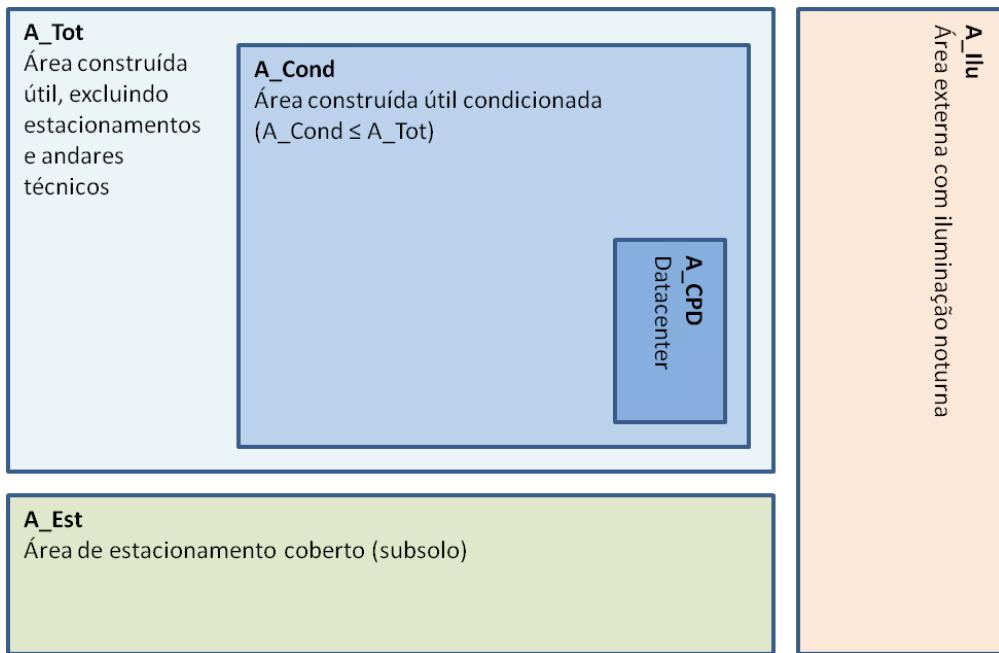


Figura 33. Relação de áreas consideradas na equação de benchmarking

Os fatores acima citados podem ser utilizados para desenvolver uma equação para modelar o consumo de energia esperado para um edifício, de acordo com as seguintes equações.

$$E_{Ben} = \left[\left(A + \left(G + \sum_i^{i+11} (GHR_i \cdot B) \right) \cdot \left(\frac{A_{Cond}}{A_{Tot}} \right) + \left(\frac{N}{T \cdot A_{Tot}} - \rho \right) \cdot C \right) \cdot T + \left(\frac{Q_{CPD}}{A_{Tot}} \right) + \left(\frac{A_{Est}}{A_{Tot}} \cdot D \right) + \left(\frac{A_{Ilu}}{A_{Tot}} \cdot E \right) \right] \cdot (1 - F_{Gerador})$$

E:

$$E_{Real} = \frac{\sum_i^{i+11} (Q_i)}{A_{Tot}}$$

Onde:

$$T = \left(\frac{\sum_i^{i+11} T_i}{12} \right)$$

A_{Tot} = Área útil (excluindo estacionamentos e andares técnicos)

A_{Cond} = Área condicionada (incluindo halls de elevadores e banheiros que não têm condicionamento próprio, mas que são adjacentes a áreas condicionadas. Em um edifício que está completamente condicionado, essa área será igual A_{Tot})

A_{Est} = Área de estacionamentos cobertos, com iluminação e ventilação

N = Número de ocupantes permanentes no edifício - média durante os horários de operação

Q_{CPD} = Consumo anual do CPD ou datacenter em kWh (pode ser calculado utilizando a potência média medida)

A_{Ilu} = Área externa iluminada durante a noite (m^2)

$F_{Gerador}$ = F quando um gerador é utilizado como fornecimento principal de energia para o edifício em horários de ponta; em outros casos é igual a 0

T_i = Taxa de ocupação média do edifício durante o período de medição (%)

Q_i = Consumo mensal em kWh

ρ = densidade média de ocupação = 0,0833 pessoas/ m^2

A = constante relacionada a consumos fixos do edifício (kWh/ m^2 /ano)

B = constante relacionada ao impacto de clima (kWh/ m^2 /ano/GHR)

G = constante relacionada ao consumo fixo de ar condicionado (kWh/ m^2 /ano)

C = constante relacionada ao impacto de população (kWh/pessoa)

D = constante relacionada ao consumo de estacionamentos cobertos (kWh/ m^2 /ano)

E = constante relacionada ao consumo de iluminação externa (kWh/ m^2 /ano)

F = constante que representa a proporção de energia consumida em horas de ponta (%)

6.3 CORREÇÕES DESENVOLVIDAS POR SIMULAÇÃO

Impactos da densidade de ocupação

Simulações foram realizadas em 5 cidades com 5 diferentes níveis de densidade de ocupação para cada um dos dois modelos, totalizando 50 simulações, que foram utilizados para estudar os impactos de densidade de ocupação no consumo energético dos edifícios.

As cargas de computadores foram variadas proporcionalmente à população, seguindo o resultado desenvolvido nos diagnósticos energéticos que o consumo de computadores por pessoa é de 90 W/pessoa, enquanto outros consumos (como impressoras e geladeiras) não variam proporcionalmente à população, e sim à área do edifício.

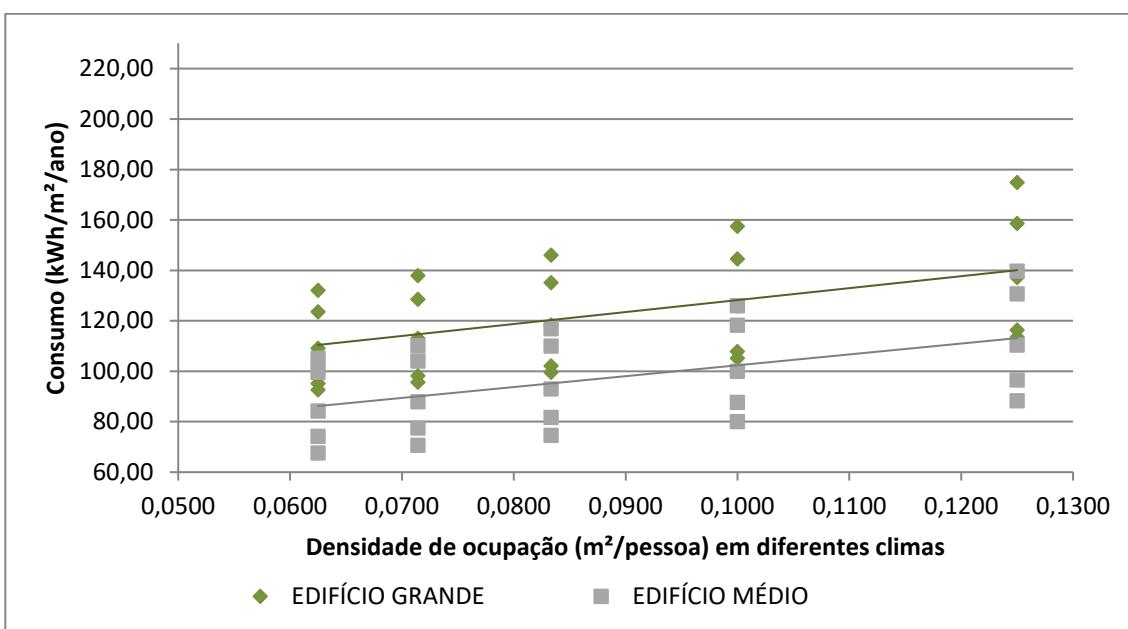


Figura 34. Impacto da densidade de ocupação no consumo energético

A partir destes resultados, é possível concluir que o consumo adicional por pessoa, incluindo cargas de tomadas e os impactos resultantes no consumo de ar condicionado, é de 452kWh/pessoa. Este valor é utilizado como constante C, e é mantido igual nos modelos eficientes e típicos.

Impactos de clima

Simulações foram realizadas em 5 cidades englobando a maioria das variações climáticas no Brasil, gerando 60 consumos mensais por modelo que foram plotados com os GHR dos meses simulados na Figura .

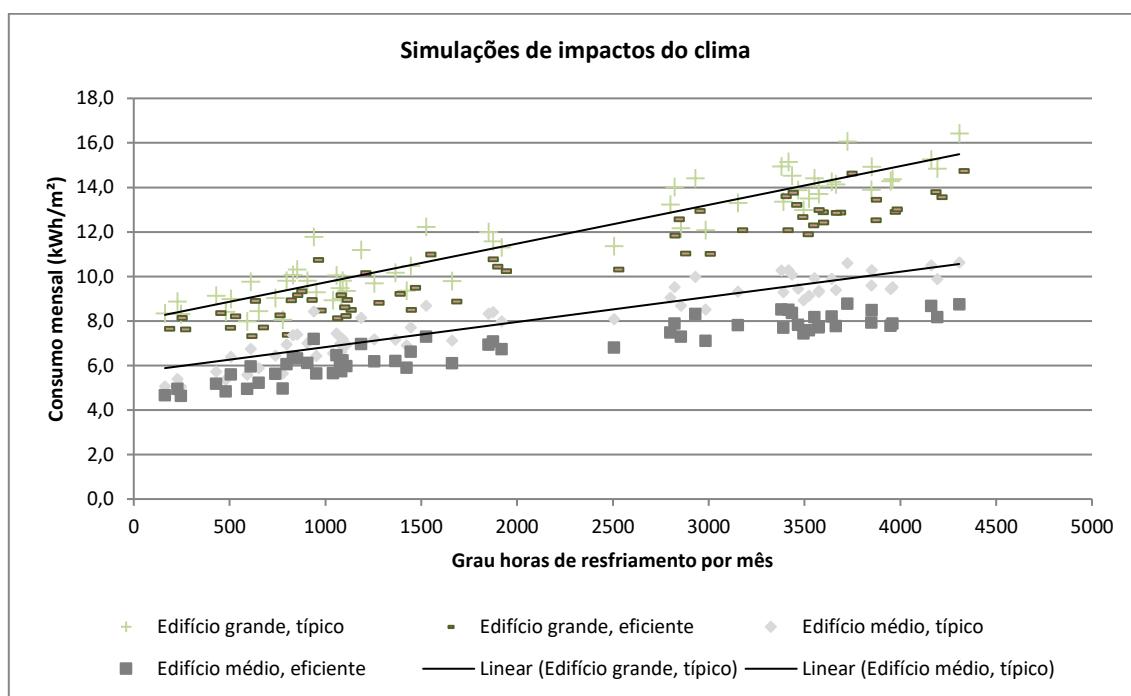


Figura 34 Simulações de impactos de clima

Os modelos de referência foram propositalmente escolhidos para representar a maior variação possível dentro das características dos edifícios, então é natural que tenham consumos significativamente diferentes.

O importante nestes gráficos é considerar os gradientes das linhas relacionando GHR e consumo energético, que são coerentes com os gradientes observados na Figura 14 e na Figura 15. (As interseções com os eixos também precisam ser calculadas, mas as diferenças aqui notadas são dominadas pelas diferenças em densidade de ocupação e consumo de iluminação dos edifícios – considerados em cima).

A média dos gradientes para os modelos eficientes é 0,0012 enquanto a média dos gradientes para os modelos típicos é 0,0014. Estes valores são adotados para a constante B.

Utilizando o fator de correção desenvolvido para normalizar os consumos dos modelos de referência para 12 pessoas/ m^2 , separando os consumos de energia resultantes da simulação em fatores devidos à iluminação, tomadas e ar condicionado, e tirando as médias entre os modelos grandes e pequenos, é possível calcular os consumos fixos referentes aos edifícios típicos, assim definindo os valores das próximas constantes:

$$A_{\text{eficiente}} = 51,9 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$$

$$A_{\text{típico}} = 55,2 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$$

$$G_{\text{eficiente}} = 21,4 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$$

$$G_{\text{típico}} = 25,9 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$$

6.4 CORREÇÕES DESENVOLVIDAS POR CÁLCULO MANUAL

Estacionamentos cobertos

Para calcular os impactos de estacionamentos, são adotados os resultados do estudo de escritórios corporativos (CBCS, 2015), sendo que os estacionamentos cobertos observados mostraram características de consumo similares aos grandes edifícios, chegando aos seguintes resultados:

$$D_{\text{eficiente}} = 10,0 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$$

$$D_{\text{típico}} = 14,4 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$$

Áreas de iluminação externa

Alguns edifícios pequenos têm grandes áreas de iluminação externa, cujas contas são pagas pelo edifício. Para não criar distorções significantes nestas áreas, é importante que seja possível considerá-las nos modelos de benchmark quando são significativas.

A densidade de potência luminosa para áreas externas foi calculada com base na ASHRAE 90.1-2010, onde é citado o valor de 0,54 W/m². Uma operação de 12h/dia em média, produz um consumo de 2,37 kWh/m²/ano para estas áreas externas, que é adotado como o valor da constante E.

Grupo gerador

Em alguns casos, o grupo gerador é utilizado durante horários de ponta, para o chamado "**peak shaving**", onde o consumo na hora de ponta é evitado para reduzir custos energéticos. Com base nas avaliações de contas de energia para edifícios maiores, a porcentagem de consumo na hora de pico é estimada em 10% na média dos edifícios estudados. (É importante anotar que isso varia entre edifícios e entre estações do ano). Então, nos casos de edifícios que adotam esta estratégia, é necessário reduzir o consumo de energia elétrica esperado proporcionalmente. Por isso, é adotado o valor F = 0,10.

CPDs

O consumo de energia em datacenters (ou CPDs) precisa ser considerado separadamente, já que não tem uma relação com a área útil do edifício e é responsável por uma porcentagem significativa do consumo na maioria dos casos.

É desejável que o consumo energético do CPD seja submedido, incluindo a carga de processamento de dados e dos UPS e sistemas de ar condicionado dedicados exclusivamente a este sistema. Tal consumo é considerado separadamente dos demais consumos do edifício.

Nos casos em que o CPD responde por menos de 15% do consumo do edifício, seu consumo pode ser estimado por meio de medições instantâneas de carga elétrica (noturno e diurno), para construir uma estimativa da sua curva de carga e extrapolar para chegar ao consumo anual.

6.5 VERIFICAÇÃO DO BENCHMARK

Para verificação da sua efetividade, o benchmark foi aplicado nos 20 edifícios estudados no processo de auditoria (os demais edifícios no banco de dados não apresentam informações suficientemente detalhadas para realizar esta análise, e geralmente as áreas dos edifícios não são confiáveis).

A Figura mostra os benchmarks e compara com os consumos reais dos edifícios na amostra. Alguns edifícios mostram grandes divergências com os benchmarks; na maioria dos casos é fácil identificar os motivos destas divergências, a maioria dos quais são mostrados na Figura – isso quando há edifícios que não são escritórios, que não atingem condições mínimas de conforto ambiental, ou que apresentam sistemas com problemas extremos de operação.

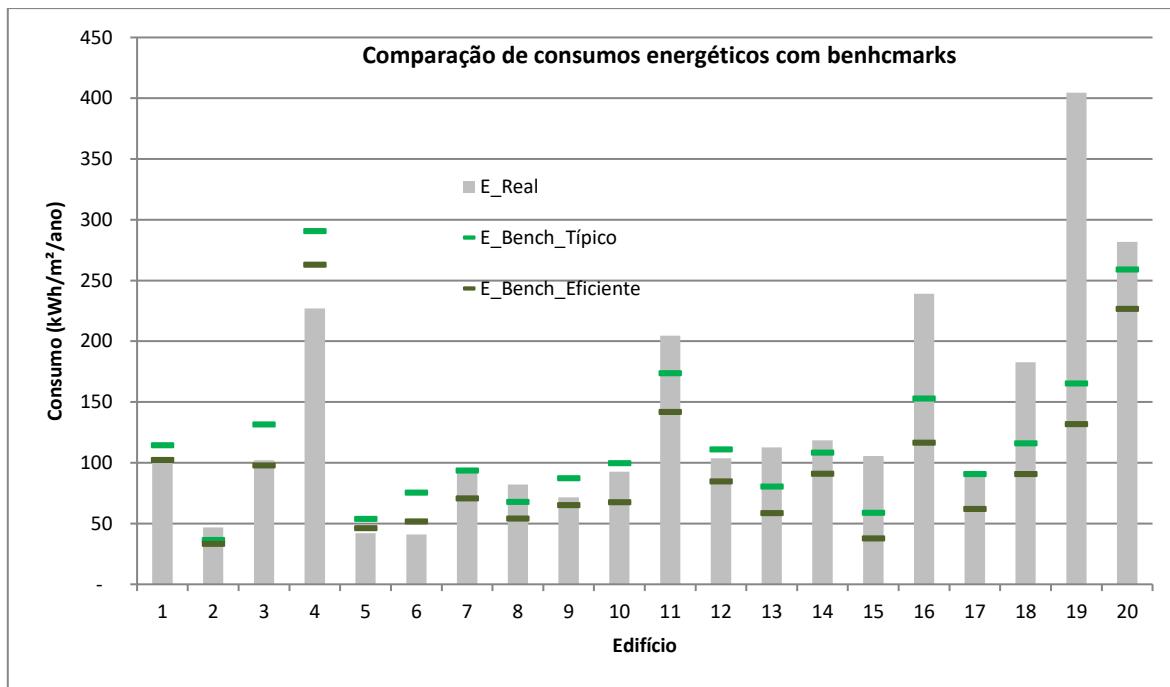


Figura 35 Comparação de consumos dos 20 edifícios com benchmarks calculados

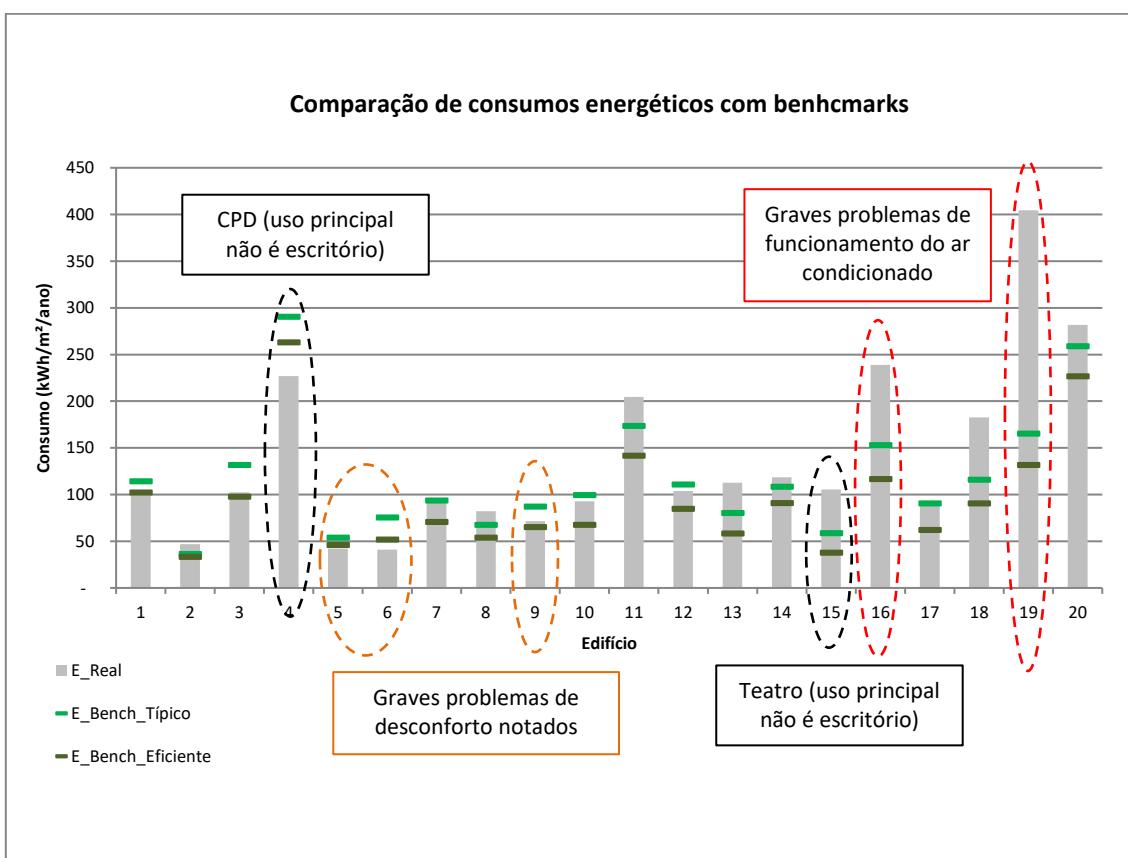


Figura 36 Comparação dos consumos com benchmarks com identificação de consumos inesperados

Para a comparação com a amostra de 20 edifícios, foram feitas algumas avaliações de qualidade do modelo. Excluindo os edifícios sinalizados na Figura , foram calculados o CV(RMSE) e o MBE, comparando o consumo típico com o real, medido do edifício:

$$CV \text{ (RMSE)} = 19\%$$

$$MBE = 8\%$$

Estes resultados indicam que o modelo tem uma tendência de identificar níveis "típicos" de eficiência que são um pouco abaixo dos níveis observados nos edifícios, com um MBE de 8%. Isso está de acordo com as observações nos diagnósticos energéticos, que indicaram a existência de diversas oportunidades para reduzir consumo corrigindo erros básicos de operação. O nível de erro é indicado pelo CV (RMSE) de 19%.

7. USO E APLICAÇÃO DOS BENCHMARKS

7.1 VALIDAÇÃO DA TIPOLOGIA

O primeiro passo para a utilização de um benchmark em um edifício é necessariamente a validação da tipologia. O benchmark desenvolvido aqui é válido apenas para edifícios cujo uso principal é da administração pública, no qual a maioria do espaço edificado seja dedicado a escritórios com estações de trabalho móveis ou fixas. Isso pode incluir edifícios públicos de autarquias, e dos governos federais, estaduais e municipais. Também são admissíveis outros usos dentro dos edifícios, como mesas de atendimento ao público ou espaços de eventos, desde que respondam por menos de 20% da área útil da edificação.

Em outros casos, será necessário adotar e utilizar diferentes benchmarks.

7.2 CONFORTO DENTRO DA EDIFICAÇÃO

Os resultados deste estudo e do benchmark são relevantes apenas em casos onde o edifício apresenta condições internas satisfatórias e saudáveis para os ocupantes. Isso inclui 3 áreas com impactos significativos no consumo energético:

1. Iluminação adequada às necessidades das tarefas a serem realizadas dentro do edifício, em conformidade com a norma NBR ISO 8995-1;
2. Renovação de ar em edifícios com ar condicionado, em conformidade com as necessidades da norma NBR 16401; e
3. Conforto térmico em edifícios com ar condicionado, atingindo **setpoints** de temperatura adequado quando o ar condicionado está ligado, conforme a norma NBR 16401.

Edifícios que não atingem essas condições ambientais internas podem demonstrar resultados que indicam operação eficiente onde isso não é o caso.

7.3 DESAFIOS DE LEVANTAMENTO DE DADOS

O maior desafio de levantamento de dados para o uso adequado dos benchmarks é a medição das áreas. Para considerações das áreas a serem medidas, devem ser levadas em conta as seguintes considerações:

Área útil: essa é a área ocupada do edifício total, incluindo áreas com e sem ar condicionado, escritórios, salas de reunião, hall de entrada, hall de elevadores, banheiros, CPD e áreas com outros usos. Devem ser excluídas desta área os estacionamentos, mesmo que cobertos, e andares que são especificamente técnicos, como os locais de instalação de **chillers** e torres de resfriamento. Geralmente, é estimado que a área de carpete de escritório seja aproximadamente 70-75% desta área, com o restante sendo aplicado a outros usos, mas este fator é variável.

Área condicionada: quando uma parte significativa do edifício (incluindo salas de reunião e escritórios) não conta com ar condicionado, estas áreas devem ser descontadas das áreas condicionadas. Porém, é comum que áreas como halls de elevadores e banheiros não tenham condicionamento próprio, mas são efetivamente condicionados por serem adjacentes a áreas condicionadas, com fluxo constante de pessoas e, em alguns casos, contam com exaustão de ar. Nestes casos essas áreas contam como condicionados. Em um edifício que está completamente condicionado, como é comum, sobretudo em edifícios grandes, essa área será igual à área útil.

Área de estacionamento: área de estacionamento coberto edificado, geralmente no subsolo do edifício, que quase sempre conta com iluminação e exaustão próprios.

Área de iluminação externa: área externa pertencente ao edifício que recebe iluminação noturna, como estacionamentos externos.

Número de pessoas: o número de ocupantes que tipicamente estão presentes dentro de um edifício durante um dia normal de trabalho. Isso normalmente não inclui população de visitantes, a não ser que este fluxo seja muito grande comparado com a população permanente (por exemplo, num edifício que inclui espaços de eventos). Neste caso deve ser realizado um cálculo de "pessoas equivalentes", no qual oito visitantes, cada um passando 1h dentro do edifício, seriam equivalentes a uma pessoa trabalhando em tempo integral.

O outro desafio que pode acontecer com os levantamentos é a estimativa de taxa de ocupação do edifício. Essa taxa será abaixo de 100% unicamente em casos onde existam andares completos ou parciais que foram totalmente desocupados por um mês ou mais, sendo que durante este período toda a iluminação e sistemas de condicionamento de ar de tais espaços foram desligados. As variações que são apenas de população (por exemplo, quando um edifício conta com apenas 70% da sua população máxima, mas todos os andares do edifício continuam ocupados) são consideradas dentro da correção por densidade de população.

7.4 PLATAFORMA E UTILIZAÇÃO DOS BENCHMARKS

Dentro deste projeto, está sendo construída uma plataforma que servirá para entrada de dados e avaliação de edifícios através de benchmarking.

Esta plataforma pode ser utilizada em 3 principais situações:

- 1) Para avaliações de estoques de edifícios, comparando os níveis de eficiência entre os diferentes edifícios da mesma organização, para decidir quais edifícios devem receber prioritariamente trabalhos de retrofit e diagnóstico energético (avaliar diversos edifícios ao mesmo tempo);
- 2) Para direcionar estratégias de gestão de energia, com avaliações periódicas para verificar problemas e potenciais de melhoria (avaliações regulares do mesmo edifício); e
- 3) Para medição e verificação de economias realizadas a partir de retrofits em determinados edifícios (avaliações pós-retrofit).

7.5 CONCLUSÕES

Este relatório documenta o desenvolvimento de um benchmark que pode ser utilizado para realizar análises e avaliações de desempenho energético em edifícios públicos de escritórios. Com base na coleta de dados realizada em etapas anteriores do projeto, e também nos modelos de simulação energética desenvolvidas, foi possível mapear os principais consumos de energia e entender melhor quais são as principais características a serem avaliadas para prever o consumo energético.

O modelo aqui desenvolvido formará a base de uma plataforma online de benchmarking, possibilitando a fácil avaliação e acompanhamento de desempenho em edificações públicas. Este benchmark foi construído com acesso a informações limitadas, por isso não é perfeito. Porém, os dados de consumo energéticos coletados no futuro, com utilização da plataforma de benchmarking, possibilitarão a avaliação e atualização futura do benchmark de forma regular.

ANEXO

DADOS DE EDIFÍCIOS DA AMOSTRA E MODELOS DE REFERÊNCIA

Sistema	Variável	Unidade	EDIFÍCIO MÉDIO					Fonte	EDIFÍCIO GRANDE					
			Auditorias			Arquétipo Médio	Arquétipo Eficiente		Auditorias			Arquétipo Médio	Arquétipo Eficiente	
			Mínimo	Máximo	Média				Mínimo	Máximo	Média			
Edifício	Área total do pavimento	m ²	158	2.982	908	830		calculado	582	6.826	2.005	1.500		estimado
	Área de escritório	% da área total	61%	100%	75%	75%		auditorias	56%	100%	74%	70%		auditorias
	Pavimentos	#	1	13	6	6		auditorias	3	23	13	13		auditorias
	Subsolo/estacionamento	#	0	1		1		auditorias	1	4		2		auditorias
	Área condicionada		20%	100%	72%	75%		estimado	48%	100%	77%	70%		estimado
	Área útil	m ²	866	6.370	3.505	4.982		NREL	7.070	35.995	17.830	19.500		calculado
	Sombreamento	Andares do vizinho	0	45	11	9		estimado	0	75	29,14285714	26		estimado
	Pé direito útil		-	-	-	2,74		NREL	-	-	-	2,74		NREL
	Orientação		-	-	-	eixo longitudinal orientado de leste a oeste		auditorias	-	-	-	eixo longitudinal orientado de leste a oeste		auditorias
Envoltória	Abertura da fachada (PAF)	%	8%	75%	40%	40%		auditorias	33%	90%	64%	46%		calculado

			EDIFÍCIO MÉDIO						EDIFÍCIO GRANDE					
			Auditorias			Arquétipo Médio	Arquétipo Eficiente	Fonte	Auditorias			Arquétipo Médio	Arquétipo Eficiente	Fonte
			Mínimo	Máximo	Média				Mínimo	Máximo	Média			
Sistema	Fator solar dos vidros		-	-	-	0,59	0,49	DEO	-	-	-	0,59	0,49	DEO
	Proteção solar		-	-	-	Não		auditorias	-	-	-	Não		auditorias
	Paredes		-	-	-	bloco de concreto		auditorias	-	-	-	bloco de concreto		auditorias
	U_paredes	W/(m²K)	-	-	-	1,97		calculado	-	-	-	1,97		calculado
	Absortância_paredes		-	-	-	0,6		auditorias	-	-	-	0,6		auditorias
	Cobertura		-	-	-	laje fibrocimento	100mm EPS	auditorias	-	-	-	laje de concreto	100mm EPS	auditorias
	U_cobertura	W/(m²K)	-	-	-	2,57		calculado	-	-	-	2,42		calculado
	Cor da cobertura		-	-	-	Cinza		auditorias	-	-	-	cinza		auditorias
	Absortância_cobertura		-	-	-	0,6	0,3	estimado	-	-	-	0,6	0,3	estimado
Iluminação	DPI	W/(m²K)	6,5	17,0	11,0	11,0	9,7	estimado	8,7	15,2	11,4	11,0	9,7	estimado
	Tipo		-	-	-	T8		auditorias	-	-	-	T8		auditorias
	Illuminação noturna	%	-	-	-	5%		estimado	-	-	-	5%		estimado
	Nível de iluminação	Lux	-	-	-	300		auditorias	-	-	-	300		auditorias

			EDIFÍCIO MÉDIO						EDIFÍCIO GRANDE					
			Auditorias			Arquétipo Médio	Arquétipo Eficiente	Fonte	Auditorias			Arquétipo Médio	Arquétipo Eficiente	Fonte
			Mínimo	Máximo	Média				Mínimo	Máximo	Média			
Ocupação	Funcionários	m ² /pessoa	5,9	35,4	15,3	14,0		auditorias	8,2	21,7	11,9	10,0		auditorias
	Estações de trabalho	W/m ²	1,7	25,9	9,7	6,4		auditorias	4,4	31,1	13,6	9,0		auditorias
	Equipamentos adicionais	W/m ²	0,5	15,1	4,4	1,0		auditorias	1,1	6,4	2,8	1,5		auditorias
	Diária	h/dia	6,0	14,0	10,1	10,0		auditorias	9,0	13,5	11,1	11,0		auditorias
	Semanal	Dias/semana	-	-	-	5,0		auditorias	-	-	-	5,0		auditorias
	Anual	feriados por ano	-	-	-	10,0			-	-	-	10,0		-
AVAC	Tipo		-	-	-	Split		NREL	-	-	-	Chiller a Ar		NREL
	COP (sistema inteiro)		-	-	-	2,4	3,0	estimado	-	-	-	2,9	3,4	estimado
	Distribuição de ar		-	-	-	VAC (volume constante)		auditorias	-	-	-	VAC (volume constante)		auditorias
	Condensação	Ar/água	-	-	-	Ar		auditorias	-	-	-	Ar		auditorias
	Controle		-	-	-	Temperatura média dos espaços condicionados		estimado	-	-	-	Temperatura média dos espaços condicionados		estimado
	Área condicionada	%	20%	100%	72%	75%		auditorias	-	-	-	70%		auditorias
	Ar externo	m ³ /h/pessoa	-	-	-	36,0		estimado	-	-	-	36,0		estimado

Sistema	Variável	Unidade	EDIFÍCIO MÉDIO						EDIFÍCIO GRANDE					
			Auditorias			Arquétipo Médio	Arquétipo Eficiente	Fonte	Auditorias			Arquétipo Médio	Arquétipo Eficiente	Fonte
			Mínimo	Máximo	Média				Mínimo	Máximo	Média			
	Setpoint de resfriamento	Temperatura, °C	-	-	-	22,0		NBR 16401	-	-	-	24,0		NBR 16401
	Economizador/trocador de calor		-	-	-	Não		estimado	-	-	-	Não		estimado
	Aquecimento de água		-	-	-	Não		estimado	-	-	-	Não		estimado
	Aquecimento do espaço		-	-	-	Não		estimado	-	-	-	Não		estimado
	Exaustão estacionamento	W/m²	-	-	-	Não		auditorias	-	-	-	Não		auditorias
	Fator de forma		-	-	-	0,6		calculado	-	-	-	0,4		calculado
	Pressão ventiladores	Pa	-	-	-	200		estimado	-	-	-	250		estimado
	Área atendido por fancoil	m²	-	-	-	156		calculado	-	-	-	262		calculado
	Pressão bomba de água gelada	kPa	-	-	-	n/a		-	-	-	-	2000		estimado

LISTA DE SIGLAS

ACJ – Ar Condicionado de Janela

ASHRAE – **American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers**

ATM – Ano Típico Meteorológico

BID – Banco Interamericano de Desenvolvimento

CAG – Central de Água Gelada

CBCS – Conselho Brasileiro de Construção Sustentável

CIBSE – **Chartered Institution of Building Services Engineers**

COP – **Coefficient of Performance**

CPD – Centro de Processamento de Dados

CT – Comitê Temático

CV (RMSE) – **Coefficient of Variance of the Root Mean Squared Error**

DEC – **Display Energy Certificate**

DEO – Desempenho Energético Operacional

DPI – Densidade de Potência de Iluminação

DPI – Densidade de Potência de Iluminação

DX – **Direct Expansion**

EUI – **Energy Utilization Index**

GEE – Gases do Efeito Estufa

GEF – **Global Environment Facility**

GHR – Grau-Horas de Resfriamento

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

LED – **Light Emitting Diode**

MBE – **Mean Bias Error**

MMA – Ministério do Meio Ambiente

NMBE – **Normalized Mean Bias Error**

NREL – National Renewable Energy Laboratory

OSCIP – Organização da Sociedade Civil de Interesse Público

PAF – Percentual de Abertura na Fachada

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

Procel – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

PUE – Power Usage Effectiveness

SMCQ – Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental

TMY – Typical Meteorological Year

TR – Tonelada de Refrigeração

UPS – Uninterrupt Power Supply

VAV – Volume de Ar Variável

VRF – Variable Refrigerant Flow

REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO-8.995-1: 2013, **Illuminação de Ambiente de Trabalho – Parte 1: Interior.**

ABNT NBR 15.220: 2003, **Desempenho Térmico de Edificações.**

ABNT NBR 16.401: 2008, **Instalações de Ar-Condicionado – Sistemas Centrais e Unitários.**

ASHRAE Guideline 14-2014: Measurement of Energy, Demand and Water Savings, **ASHRAE 2014.**

ASHRAE. **Handbook - Fundamentals.** 2015.

ASHRAE 90.1: 2016, **Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings.**

ASHRAE 90.4: 2016, **Energy Standard for Data Centers.**

BORGSTEIN; LAMBERTS. **Energy and Buildings:** Developing energy consumption benchmarks for buildings: Bank branches in Brazil. 1.ed. São Paulo: Elsevier, 2014. 91p.

BORGSTEIN; LAMBERTS; HENSEN. **Evaluating energy performance in non-domestic buildings:** A review. São Paulo, 40p, 2016.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL (CBCS). **Relatório CBCS Benchmarking de escritórios corporativos e recomendações para certificação DEO no Brasil.** CBCS, Eletrobrás, Embaixada Britânica: São Paulo, 2016.

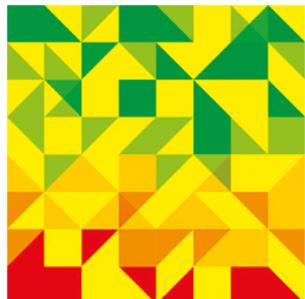
CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL (CBCS). **Relatório de diagnóstico energético.** Produto 4 do Projeto de benchmarking de desempenho energético em edifícios públicos. CBCS, PNUD, MMA, GEF: São Paulo, 2017.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL (CBCS). **Relatório de preparação de metodologia prévia para benchmarking e seleção de 20 edifícios a serem auditados.** Produto 2 do Projeto de benchmarking de desempenho energético em edifícios públicos. CBCS, PNUD, MMA, GEF: São Paulo, 2016.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL (CBCS). **Relatório de resultados do processamento inicial dos dados levantados das edificações.** Produto 1 do Projeto de benchmarking de desempenho energético em edifícios públicos. CBCS, PNUD, MMA, GEF: São Paulo, 2016.

Comitê Temático de Energia – CBCS

energia.benchmarking@cbcbs.org.br



PROJETO 3E

EFI CIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

WWW.MMA.GOV.BR/OLIMA/ENERGIA/PROJETOS

Coordenação:

MINISTÉRIO DO
MEIO AMBIENTE



Implementação:



*Empoderando vidas.
Fortalecendo nações.*

Financiamento:



Realização:

DEO | DESEMPENHO
ENERGÉTICO
OPERACIONAL
EM EDIFICAÇÕES


CBCS
Conselho Brasileiro de
Construção Sustentável