UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE

PEDRO PAULO FERNANDES DA SILVA

**Calibração do consumo de energia elétrica
simulado por um modelo *EnergyPlus*:
estudo de caso do Hospital Universitário
da Universidade de São Paulo**

São Paulo
2018

PEDRO PAULO FERNANDES DA SILVA

Calibração do consumo de energia elétrica simulado por um modelo *EnergyPlus*: estudo de caso do Hospital Universitário da Universidade de São Paulo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Programa de Pós-Graduação em Energia.

Área de concentração: Planejamento Integrado de Recursos: Oferta, demanda e qualidade de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Ildo Luís Sauer

Co-Orientador: Prof. Dr. Alberto Hernandez Neto

Versão Corrigida

São Paulo
2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, Pedro Paulo Fernandes da.

Calibração do consumo de energia elétrica simulado por um modelo *EnergyPlus*: estudo de caso do Hospital Universitário da Universidade de São Paulo. / Pedro Paulo Fernandes da Silva; orientador: Ildo Luís Sauer; co-orientador : Alberto Hernandez Neto. – São Paulo, 2018.

143 f.: il; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

1. Energia elétrica - consumo. 2. Hospitais universitários. 3. Simulação de sistemas. I. Título.

Elaborado por Maria Penha da Silva Oliveira CRB-8/6961

PEDRO PAULO FERNANDES DA SILVA

Calibração do consumo de energia elétrica simulado por um modelo *EnergyPlus*: estudo de caso do Hospital Universitário da Universidade de São Paulo

Dissertação defendida no Programa de Pós-Graduação do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Programa de Pós-Graduação em Energia, aprovada em 23 de Outubro de 2018, pela Banca Examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Ildo Luís Sauer

Instituto de Energia e Ambiente – USP
Presidente da Banca

Prof. Dr. Roberto Lamberts

Departamento de Engenharia Civil – UFSC
Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Fúlvio Vittorino

Instituto de Pesquisas Tecnológicas – USP
Julgamento: Aprovado

Profa. Dra. Roberta Consentino Kronka Mülfart

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – USP
Julgamento: Aprovado

Aos empurrados para a informalidade, apertados em ônibus e vagões precários e às humilhadas dentro e fora de seus lares.

Dedico este trabalho ao povo brasileiro, cujo suor financia, até sem saber, a pesquisa e educação de excelência.

Agradecimentos

Gostaria de demonstrar minha enorme gratidão aos meus dois orientadores, acima de tudo, amigos: ao professor Ildo Sauer, pela confiança em mim depositada e por ser, desde nosso primeiro encontro, uma fonte de inspiração; e ao professor Alberto Hernandez pela paciência e representar um refúgio para minhas ideias e boas conversas.

Aproveito, também, para agradecer ao Welson Bassi pelas dicas e sugestões para melhoria do trabalho. Aos pesquisadores Alcantaro Lemes, Márcio Ribeiro e Nilton Amado pela disponibilidade e, também, pelo bom convívio.

Em seguida, gostaria de homenagear duas pessoas às quais não posso dispensar agradecimentos: minha companheirinha Juliana por compartilhar suas experiências acadêmicas e pela sempre amorosa compreensão; e meu companheiro de república, Marcos Amarís, pela ajuda nas ferramentas que formam a base textual deste trabalho: *L^AT_EX* e *Rstudio*.

Aos funcionários do Hospital Universitário da USP, em especial os funcionários da divisão técnica Marcelo e Paulo, por sempre manterem as portas do hospital aberto, dia e noite. Aos técnicos da empresa responsável pela manutenção do sistema de climatização do Hospital Universitário, especialmente Gilmar e Diego, pela prontidão no auxílio e esclarecimento de dúvidas.

Estendo minha gratidão à altamente qualificada equipe de técnicos e pesquisadores do Instituto de Energia e Ambiente, esta dissertação é fruto do trabalho de todos vocês: professor Hédio Tatizawa, Johny Ricardo, Milton Zanotti, Marcelo Fernandes, Claudiney Primo, Luiz Gustavo e Ricardo Clemente.

Gratidão ao meu querido núcleo familiar: Denise, João e Manoel, nada disto seria possível sem o seu apoio e carinho. Amo todos vocês.

Por fim, estou grato à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento à pesquisa e pela concessão da bolsa de mestrado.

Resumo

Silva, Pedro Paulo Fernandes da. Calibração do consumo de energia elétrica simulado por um modelo *EnergyPlus*: estudo de caso do Hospital Universitário da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2018. 159p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo.

A utilização de um modelo computacional para simular o consumo energético de edificações para diferentes fins tornou-se prática comum. Entretanto, para que suas finalidades sejam válidas para prédios em fase de operação é necessário que a simulação passe por uma fase denominada calibração, ou seja, ajuste de seus parâmetros de entrada para verificar que seu resultado esteja coerente com a realidade. Dado esta necessidade, este trabalho tem como objetivo a calibração da energia elétrica simulada por um modelo *EnergyPlus* do Hospital Universitário da Universidade de São Paulo (HU-USP). Na busca por este objetivo, faz-se a revisão do estado da arte sobre metodologias de calibração baseadas em evidência, ou seja, no qual os ajustes nos parâmetros de entradas baseiam-se em informações coletadas acerca do edifício real. Pela comparação destas metodologias, selecionou-se aquela proposta por Raftery, Keane e O 'donnell (2011a) cuja aplicação mostrou-se mais generalizada para diferentes tipologias de edifícios. As medições disponíveis do HU-USP contra o qual as simulações foram confrontadas foram: consumo de prédio, consumo de uma das duas centrais de água gelada do prédio e medição de 16 equipamentos modulares do tipo *split*. Os indicadores estatísticos resultantes da comparação destas medições revelaram que, ao final do processo de calibração, apenas o consumo do prédio pôde ser considerado calibrado. A partir da simulação calibrada foram avaliadas quatro alternativas de eficiência energética, duas no sistema de iluminação e duas no sistema de climatização. As experiências acumuladas na calibração da simulação do HU-USP e a identificação de melhores práticas na literatura permitiram, ao final, a elaboração de uma nova metodologia que engloba a abordagem de um prédio com as características de edificações públicas brasileiras.

Palavras-chave

1. Energia elétrica - consumo. 2. Hospitais universitários Calibração 3. Simulação de sistemas

Abstract

Silva, Pedro Paulo Fernandes da. **Calibration of model that simulate the USP university hospital electric energy consumption with EnergyPlus software.** São Paulo, 2018. 159p. MSc. Dissertation. Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo.

The use of a computational model for simulation of the energy consumption of buildings for different goals has become common practice. However, in order to use it to simulate operating buildings, it is necessary that the simulation undergoes a process called calibration. This means adjusting simulation input to certify that its output consistently represents the reality. This work objective is to calibrate the electric energy simulated by an energy model of the University Hospital of the University of São Paulo (HU-USP). The state of the art is reviewed in search of evidence-based calibration methodologies. This type of methodologies uses data collected from the real building to change the simulation input. It was selected the methodology proposed by Raftery, Keane e O ’donnell (2011a) which was evaluated as the most generalized approach between the methodologies reviewed. The available measurements of HU-USP against which the simulations were confronted were: building electricity consumption, one (of the two) chilled water plant electricity consumption and the electricity measurement of 16 *split* type air conditioner. The statistical indicators resulted in comparisons of the measurements revealed, at the end of the calibration process, that only the consumption of the building could be considered calibrated. From the calibrated calibration, four energy efficiency alternatives were simulated, two concerning the lighting system and two concerning the air conditioning system. From the experience accumulated through the calibration of HU-USP electric energy consumption simulation and the identification of the best practices in the literature, it was elaborated a new methodology that includes an approach that deal with brazilian public buildings features.

Keywords

1. Electrical energy - consumption 2. University hospitals 3. System simulation

Lista de Figuras

1.1	Distribuição do consumo por uso final nos setores comercial e público. ELETROBRAS (2007a)	19
1.2	Percentual do tipo de sistemas de ar condicionado e/ou ventilação encontrado nos empreendimentos amostradas por ELETROBRAS (2007b), ELETROBRAS (2007c).	19
1.3	Percentual de consumidores por idade da instalação. (ELETROBRAS, 2007b; ELETROBRAS, 2007c)	20
1.4	Solução integrada de um sistema central no <i>Energyplus</i> . Adaptado e traduzido de ASHRAE (2013)	22
2.1	Elementos típicos de um diagrama de caixa e de um diagrama violino. Traduzido e adaptado de Hintze e Nelson (1998)	29
2.2	Tradução do fluxograma da metodologia de calibração em sete etapas proposta por Yoon, Lee e Claridge (2003).	31
2.3	Método de calibração proposto por O'Neill et al. (2011).	33
2.4	Método de calibração proposto por Raftery, Keane e O'donnell (2011a).	35
2.5	Detalhamento interativo da simulação de acordo com Raftery, Keane e O'donnell (2011a).	39
2.6	Método de calibração da simulação proposto por Lam et al. (2014).	40
3.1	Photograph of the facade of the building	43
	(a) Vista aérea do HU - USP.	43
	(b) Fotografia da fachada do prédio	43
3.2	Localização do Hospital Universitário da USP com indicação de sua orientação em relação ao Norte. Adaptado de (Google Maps, 2018)	44
3.3	Distribuição mensal temperatura de abril de 2017 a março de 2018 da estação meteorológica da USP. (Baseada nos dados cedidos pelo LabMicro do IAG-USP)	45
3.4	Ambientes internos do HU-USP	46
3.5	Fotografia dos dois tipos de luminárias encontradas no HU-USP.	47
	(a) Luminária de embutir	47
	(b) Luminária de sobrepor	47

3.6	Planta baixa do HU-USP com a identificação da áreas condicionadas.	49
3.7	Fotografia dos dois resfriadores que compõem a CAG 1	50
(a)	CAG 1 - Foto do resfriador 1	50
(b)	CAG 1 - Foto do resfriador 2	50
3.8	Fotografia do chiller da CAG 2	51
3.9	Classificação dos equipamentos modulares identificados de acordo com seu ano de fabricação.	52
3.10	Classificação dos equipamentos modulares identificados de acordo com seu índice de eficiência energética	52
3.11	Temperatura interna de ambiente não condicionados	53
3.12	Ambientes não condicionados: variação da temperatura interna de acordo com as horas do dia	54
3.13	Corredor centro cirúrgico: temperatura e umidade relativa	54
3.14	Diagrama unifilar simplificado da rede de alimentação elétrica do HU-USP.	55
3.15	Perfil anual de demanda energética do HU-USP.	57
3.16	Perfil anual de demanda energética do trafo 1.	57
3.17	Perfil anual de demanda energética do trafo 2.	58
3.18	Perfil anual de demanda energética do trafo 3.	58
3.19	Perfil anual de demanda energética do trafo 5.	58
3.20	Perfil anual de consumo de energia elétrica da CAG1.	59
3.21	Perfil anual de consumo de energia elétrica da CAG1.	60
3.22	Participação dos trafos no consumo total do HU-USP.	60
4.1	Distribuição mensal da temperatura do ar coletada pela estação climática de Congonhas. (Baseada nos dados de NREL (2018))	66
4.2	Modelo Sketchup no Hospital Universitário da USP	67
(a)	Fachada norte	67
(b)	Fachada sul	67
4.3	Agenda de equipamentos elétricos	72
4.4	Agenda do sistema de iluminação	72
4.5	Agenda de ocupação	72
4.6	Agenda de equipamentos elétricos em dias de semana conforme tipo de ambiente do HU-USP.	75
4.7	Agenda de iluminação em dias de semana conforme tipo de ambiente do HU-USP.	76
4.8	Agenda de equipamentos elétricos em finais de semana conforme tipo de ambiente do HU-USP.	77
4.9	Agenda de iluminação em finais de semana conforme tipo de ambiente do HU-USP.	78

4.10	Comparação da potência medida e simulada em período com temperatura externa inferior a 8,9°C.	79
4.11	Diferença entre TBS e UR de Congonhas e do LabMicro	84
4.12	Comparação mensal da demanda de energia horária entre a versão AS e a versão B00	89
4.13	Comparação das fontes de carga interna nos ambientes atendidos pelos <i>splits</i> medidos	97
4.14	Matriz desagregada de consumo de energia do modelo final da fase B	101
5.1	Curva de carga com segregação por tipo de uso final	102
5.2	Comparação do consumo de energia elétrica mensal pela substituição das atuais lâmpadas fluorescentes tubulares de 32W por lâmpadas LED tubulares de 18W	104
5.3	Comparação do consumo de energia elétrica mensal pela substituição das atuais lâmpadas fluorescentes tubulares de 32W por lâmpadas LED com eficiência de 140 lm/W	105
5.4	Comparação do consumo de energia elétrica mensal caso os atuais equipamentos de ar condicionado do tipo <i>splits</i> possuíssem um COP correspondente ao selo A	106
5.5	Comparação do consumo de energia elétrica mensal caso todos equipamentos de ar condicionado tipo <i>split</i> fossem substituídos por uma CAG única	107
6.1	Visão geral do método de calibração da simulação	110
6.2	Simulação <i>versus</i> medição: erro na representação de agendas.	114
6.3	Simulação <i>versus</i> medição: erro na intensidade elétrica.	115
6.4	Simulação <i>versus</i> medição: erro na agenda dos equipamentos elétricos e na intensidade elétrica.	115
6.5	Simulação <i>versus</i> medição: erro na representação do horário de funcionamento do edifício.	116
6.6	Simulação <i>versus</i> medição: excesso de climatização.	116
D.1	1andar_2: potência elétrica ao longo do período de medição e sua correspondente assinatura elétrica	141
D.2	Split 1_11: potência elétrica ao longo do período de medição e sua correspondente assinatura elétrica	142
D.3	Split 1_12.13: potência elétrica ao longo do período de medição e sua correspondente assinatura elétrica	143
D.4	Split 2_71.72.73: potência elétrica ao longo do período de medição e sua correspondente assinatura elétrica	144
D.5	Split 2_106: potência elétrica ao longo do período de medição e sua correspondente assinatura elétrica	145

D.6	Split 2_114: potência elétrica ao longo do período de medição e sua correspondente assinatura elétrica	146
D.7	Split 2_117: potência elétrica ao longo do período de medição e sua correspondente assinatura elétrica	147
D.8	Split 2_121: potência elétrica ao longo do período de medição e sua correspondente assinatura elétrica	148
D.9	Split 3_17: potência elétrica ao longo do período de medição e sua correspondente assinatura elétrica	149

Lista de Tabelas

2.1	Indicadores de qualidade para diferentes normas	28
2.2	Comparação das metodologias avaliadas	42
3.1	Características dos sensores de coleta de dados climáticos - LabMicro IAG-USP	45
3.2	Aparelhos raio-x, tomógrafos e autoclaves: potência máxima e de stand-by.	48
3.3	Computadores, notebooks, ventiladores, refrigerador e freezer: quantidade e potência total	48
3.4	Levantamento dos resfriadores componentes da CAG1.	49
3.5	Fan coils integrantes da CAG1	50
3.6	Fan coils integrantes da CAG2	51
3.7	Equipamentos utilizados nas instalações	56
3.8	<i>Splits</i> medidos - identificação do ambiente atendido e agregação caso atendam o mesmo ambiente	61
3.9	Comparação da disponibilidade de dados	62
4.1	Hierarquização das evidências coletadas	66
4.2	Fase A: Revisão das versões	67
4.3	Tipologia dos ambientes no modelo digital	69
4.4	Características dos materiais usados nas superfícies do modelo digital do HU-USP	70
4.5	Características dos materiais usados nas subsuperfícies do modelo digital do HU-USP	70
4.6	Intensidade elétrica de iluminação e equipamentos elétricos e densidade de pessoas de acordo com os ambientes definidos pelas normas ASHRAE 186.1 (2009) e ASHRAE 90.1 (2010)	71
4.7	Modelo inicial: indicadores de qualidade do prédio todo e da CAG1	73
4.8	modeloA01 e modeloA00: comparação do tempo de simulação e indicadores de qualidade	73
4.9	modeloA02 e modeloA01: comparação do tempo de simulação e indicadores de qualidade	74
4.10	Tabela-exemplo do procedimento de criação da agenda de equipamentos elétricos	76

4.11	modeloA03 e modeloA02: comparação do tempo de simulação e indicadores de qualidade	78
4.12	Dados de projeto de ar condicionado para a região de Guarulhos	79
4.13	modeloA04 e modeloA03: comparação do tempo de simulação e indicadores de qualidade	80
4.14	Características dos materiais que compõem a envoltória do HU-USP	81
4.15	modeloA05 e modeloA04: comparação do tempo de simulação e indicadores de qualidade	81
4.16	ModeloA06: comparação do tempo de simulação e indicadores de qualidade	82
4.17	modeloA07 e modelo A06: comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de qualidade	82
4.18	modeloA08 e modelo A07: comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de qualidade	83
4.19	Fase AE: Revisão das versões	84
4.20	modeloAE1 e modeloA08: comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia	85
4.21	modeloAE2 e modeloAE1: comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia	85
4.22	Agregação na escala mensal dos indicadores horários calculados - modeloAE2	86
4.23	Mudança da acurácia da simulação da CAG1 ao longo das versões criadas na fase A	87
4.24	Análise de sensibilidade: Temperatura da serpentina	87
4.25	Modelo AS: indicadores estatísticos	88
4.26	Fase A: Revisão das versões	90
4.27	modeloB00 e modeloAS - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia	90
4.28	Modelo B00 - Indicadores estatísticos dos ar condicionados tipo <i>split</i> medidos	91
4.29	modeloB00 e modeloB01 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia	91
4.30	modeloB02 e modeloB01 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia	92
4.31	modeloB03 e modeloB02 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia	92
4.32	modeloB04 e modeloB03 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia	93
4.33	modeloB05 e modeloB04 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia	94
4.34	Fase AE: Revisão das versões	94

4.35	modeloBE1 e modeloB05 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia	95
4.36	modeloBE2 e modeloBE1 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia	95
4.37	modeloBE2 e modeloBE1 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia	96
4.38	modeloBE3 e modeloBE2 - indicadores estatísticos de acurácia	98
4.39	Simulação da CAG1 - Matriz da variação do ESM em função da temperatura do ar insuflado de resfriamento e da taxa de infiltração	99
4.40	Simulação dos <i>splits</i> - Matriz da variação do ESM em função da temperatura na serpentina de resfriamento e da taxa de infiltração	99
4.41	Indicadores de acurácia em relação ao consumo total do prédio e dos equipamentos de climatização - Versão final	99
4.42	Indicadores estatísticas de todas versões criadas na calibração da simulação do HU-USP	100
6.1	Planilha para classificação e hierarquização das evidências	113
A.1	Equipamentos hospitalares do HU-USP	131
A.2	Equipamentos de escritório	132
B.1	Equipamentos de climatização modulares identificados no HU -USP	133
C.1	Classificação dos Equipamentos tipo Split	138
C.2	Classificação dos Equipamentos tipo Janela	138
C.3	Classificação dos Equipamentos tipo Split	139
C.4	Classificação dos Equipamentos tipo Janela	139
E.1	modeloB01 e modeloB00 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia	150
E.2	modeloB02 e modeloB01 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia	151
E.3	modeloB03 e modeloB02 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia	151
E.4	modeloB04 e modeloB03 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia	152
E.5	modeloB05 e modeloB04 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia	152
E.6	modeloBE1 e modeloB05 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia	153

E.7	modeloBE2 e modeloBE1 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia	153
E.8	modeloBE3 e modeloBE2 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia	154
F.1	Ar condicionado: Coeficientes da capacidade de refrigeração total em função da temperatura de operação (°C) (CUTLER et al., 2013)	155
F.2	Ar condicionado: Coeficientes do COP em função da temperatura de operação (°C) (CUTLER et al., 2013)	155
F.3	Bomba de calor: Coeficientes da capacidade de refrigeração e aquecimento em função da temperatura de operação (°C) (CUTLER et al., 2013)	156
F.4	Bomba de calor: Coeficientes de COP em função da temperatura de operação (°C) (CUTLER et al., 2013)	156
G.1	Eficiência típica e fator de manutenção de equipamento de ar condicionado e bomba de calor	157

Sumário

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	ix
1 Introdução	16
1.1 Motivação	17
1.2 Objetivo	18
1.2.1 Objetivos Específicos	18
1.3 Contexto - uso energético nas edificações	18
1.4 Estimativa da eficiência energética através da simulação calibrada	20
1.5 As ferramentas de simulação	21
1.5.1 O EnergyPlus	21
1.6 A calibração da simulação	23
1.7 Justificativa para calibração	24
2 Revisão das metodologias de calibração da simulação de modelos energéticos	26
2.1 Indicadores de acurácia da simulação	26
2.1.1 Métodos estatísticos	26
2.1.2 Métodos de comparação gráfica	28
2.2 Classificação das abordagens de calibração	28
2.3 Revisão dos métodos manuais de calibração	29
2.3.1 Método de Yoon, Lee e Claridge (2003)	30
2.3.2 Método de Westphal e Lamberts (2005)	32
2.3.3 Método de O'Neill et al. (2011)	33
2.3.4 Método de Raftery, Keane e O'donnell (2011a)	34
2.3.5 Método de Lam et al. (2014)	38
2.3.6 Comparação das metodologias	41
3 Procedimentos metodológicos	43
3.1 Caracterização do edifício	43
3.1.1 Caracterização climática	44
3.1.2 Pesquisa Observacional	45
3.1.2.1 Identificação dos ambientes internos	45
3.1.2.2 Sistema de iluminação	46
3.1.2.3 Equipamentos elétricos	47
3.1.2.4 Sistema de climatização	48
3.1.2.5 Temperatura interna	53
3.1.2.6 Diagrama Unifilar	55
3.1.3 Pesquisa da carga elétrica	56
3.1.3.1 Medição dos transformadores elétricos do edifício	56

3.1.3.2	Medição dos equipamentos de ar condicionado tipo <i>split</i>	59
3.2	Avaliação da disponibilidade de dados	61
3.3	Definição do método de calibração do HU-USP	63
3.3.1	Abordagem de calibração	63
3.3.2	Ferramenta de simulação e de avaliação de acurácia	63
4	Calibração da simulação do consumo de energia elétrica do Hospital Universitário da USP	65
4.1	Preparação para calibração	65
4.2	Fase A - Ajuste baseado em evidências	67
4.2.1	modelo00 - modelo inicial	67
4.2.2	modeloA01	73
4.2.3	modeloA02	74
4.2.4	modeloA03	74
4.2.5	modeloA04	79
4.2.6	modeloA05	80
4.2.7	modeloA06	80
4.2.8	modeloA07	82
4.2.9	modeloA08	83
4.3	Fase A - Ajuste para correção de erros	83
4.3.1	modeloAE1	84
4.3.2	modeloAE2	85
4.4	Fase A - Análise paramétrica	86
4.5	Fase B: Ajuste baseado em evidências	88
4.5.1	modeloB00	89
4.5.2	modeloB01	90
4.5.3	modeloB02	91
4.5.4	modeloB03	92
4.5.5	modeloB04	93
4.5.6	modeloB05	93
4.6	Fase B - Ajuste para correção de erros	94
4.6.1	modeloBE1	94
4.6.2	modeloBE2	95
4.6.3	modeloBE3	97
4.7	Fase B - Análise paramétrica	98
4.8	Resumo do processo de calibração	99
5	Aplicações da simulação calibrada	102
5.1	Estimativa da curva de carga do HU-USP	102
5.2	Seleção de alternativas de Ações de Eficiência Energética (AEE's)	103
5.2.1	Lâmpadas tubular LED de 18W	103
5.2.2	Lâmpadas tubular LED mais eficiente do Brasil	104
5.2.3	<i>Splits</i> com selo A	105
5.2.4	Substituição dos <i>splits</i> por uma CAG	106

6	Proposta de uma metodologia de calibração	108
6.1	Premissas para construção de um novo método de calibração	108
6.2	Metodologia de calibração	109
6.2.1	Delimitação das zonas térmicas	111
6.2.2	Coletas e organização de evidências	111
6.2.3	Controle dos ajustes do modelo	113
6.3	Avaliação da acurácia da simulação	113
6.4	Fase A	116
6.4.1	Modelo inicial	117
6.4.2	Ajustes das cargas independentes de condições climáticas	117
6.4.2.1	Avaliação das cargas independentes de condições climáticas	118
6.4.3	Ajustes dos materiais construtivos	118
6.4.4	Ajustes no sistema de climatização de médio e grande porte	119
6.5	Fase B	119
6.5.1	Ajuste no sistema de climatização de pequeno porte	119
6.6	Correção de erros	120
6.7	Análise paramétrica	121
6.7.1	Ajuste final da intensidade do uso final com maior incerteza	121
7	Considerações finais e recomendações de trabalhos futuros	122
7.1	Sugestão de trabalhos futuros	123
	Referências Bibliográficas	125
A	Lista de Equipamentos elétricos do Hospital Universitário da USP	131
B	Informações técnicas dos equipamentos de ar condicionado de pequeno porte identificados no HU-USP	133
C	Faixas de desempenho de condicionadores de ar para classificação de acordo com o seu nível de consumo	138
C.1	Definição das classes de eficiência energética de acordo com INMETRO (2011)	138
C.2	Definição das classes de eficiência energética de acordo com INMETRO (2013)	139
D	Apresentação das características elétricas dos equipamentos tipo <i>split</i> medidos	140
E	Fase B: Indicadores estatísticos obtidos para os equipamentos modulares	150
F	Cutler et al. (2013): Tabelas de coeficientes das curvas de rendimento de equipamentos unitários	155
G	Hendron (2006): Tabela de eficiência e fator de manutenção de equipamentos de climatização unitários	157

Introdução

A simulação energética através de um programa computacional pode trazer informações úteis sobre como as intervenções na edificação visando a eficiência energética e mudanças operacionais podem influenciar o uso de energia em um edifício. De fato, o seu uso é apontado como uma das alternativas para a avaliação dos níveis de eficiência energética, de acordo com os manuais de Medição e Verificação (M&V) disponíveis: ASHRAE (2002), EVO (2011) e USDOE (2015).

Entretanto, ela é mais aplicável para análises em edifícios em fase de projeto. Para edifícios já em operação, é imprescindível verificar se a estimativa do modelo está de acordo com a realidade, e caso não esteja de acordo, a simulação necessita ser calibrada (HEO; CHOUDHARY; AUGENBROE, 2012). Este processo significa comparar a resposta simulada com a sua resposta real, obtida por medições, e ajustar a primeira à segunda, a partir da alteração dos parâmetros de entrada do modelo. Em se tratando de modelos de simulação para avaliação de alternativas de projetos de eficiência energética, o referencial de calibração é, naturalmente, o consumo de energia elétrica.

A calibração de uma simulação de energia é tarefa que há muito já foi considerada como arte (STEIN, 1997). Para diminuição de sua subjetividade, foram criadas metodologias de calibração. Entre elas, as metodologias baseadas em evidências, pela própria sugestão do nome, procuram ajustar os parâmetros de entrada de acordo com os parâmetros reais do edifício em operação, como intensidade luminosa, padrão de ocupação e temperatura de *setpoint* de ar condicionados. A vantagem desta metodologia é a sua fácil reprodutibilidade, uma vez que não utiliza nenhuma automação e métodos sofisticados de visualização 3D. Utilizam esta abordagem parcial ou integralmente: Dadioti e Rees (2013), Lam et al. (2014), O'Neill et al. (2011); Raftery, Keane e Costa (2011b), Westphal e Lamberts (2005) e Yoon, Lee e Claridge (2003).

Mesmo com suas vantagens, há obstáculos para aplicação de metodologias baseadas em evidências. Dentre eles estão aquelas inerentes à complexidade dos modelos de simulação energética, o qual o principal expoente é o *EnergyPlus*. Esta ferramenta possui centenas de parâmetros de entrada que estão em interação não-linear ao longo do tempo. O conhecimento da ferramenta é necessário, uma vez que uma metodologia baseada em evidências pressupõe o ajuste manual dos parâmetros de entrada do modelo energética.

Outro obstáculo é a dificuldade em representar o perfil de ocupação de certas classes de edifícios. Isto é verdade, por exemplo, em edifícios como hospitais, que diferentemente de prédios de escritório ou indústrias, não possuem um horário de expediente bem determinado. O fluxo de pacientes e médicos, variáveis inerentemente estocásticas, é dificilmente representado por um comportamento fixo ao longo do tempo. Além disto, em hospitais com vida útil de mais de dez anos, o modelador encarregado da calibração pode se deparar com instalações elétricas com mal funcionamento, o qual o modelo de simulação, que funciona sob um universo ideal, não foi desenvolvido para representar.

Prédios de hospitais representam uma família de prédios, que podem ser classificados pela complexidade, finalidade ou regime de propriedade. De todas estas classificações, aquele que parece dificultar ainda mais são os hospitais escola. Isto porque a estocasticidade das variáveis de ocupação se tornam ainda mais evidente no caso desta categoria de hospitais, que integram perfis típicos de hospitais de uma instituição de ensino. Assim, uma tipologia bem específica de edifício emerge como um desafio para as metodologias de calibração baseadas em evidência: os hospitais escola.

1.1 Motivação

O presente estudo está inserido no projeto denominado "Avaliação integrada de geração distribuída, gerenciamento da demanda, monitoramento, qualidade e desempenho da rede, visando otimização de investimentos e regulação tarifária, em rede subterrânea". Este projeto atende à chamada estratégica da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nº 01 de 2016¹, intitulada "Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior", tendo a AES Eletropaulo como empresa financiadora².

Este projeto prevê ações de eficiência energética pela substituição da totalidade da iluminação do Hospital Universitário por lâmpadas a LED e a instalação de geração fotovoltaica com cerca de 85 kW pico. Ações de pesquisa e desenvolvimento também estão contempladas no projeto, como o desenvolvimento de sistemas de monitoramento e medição de grandezas elétricas e a implantação de uma usina operando a biogás com cerca de 100 kW de potência. A execução desta frente é responsabilidade da equipe de pesquisadores do Instituto de Energia e Ambiente da USP (IEE-USP).

O projeto inicial elaborado pela equipe do IEE-USP em parceria com o HU-USP, antes da publicação da chamada ANEEL, compreendia, entre outros, a implantação de sistemas integrados de geração de calor, frio e eletricidade com a utilização de gás natural, de fontes térmicas e, também, fontes renováveis. O diagnóstico energético para avaliar esta implantação

¹Minuta disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656831/15028501/Chamada+Priorit%C3%A1rio+e+Estrat%C3%A9gico+001+-+2016+-+V5+%28Reuni%C3%A3o%29.pdf/ed980806-1a52-4303-a2dd-0be9dcae0a11>

²Em conformidade com a Lei nº 9.991 da ANEEL, a AES Eletropaulo destina 0,4% da sua Receita Operacional Líquida (ROL) para Projetos de Eficiência Energética (PEE). (AES ELETROPAULO, 2018a)

seria feito através da modelagem energética através da ferramenta *EnergyPlus* em conjunto com medições das cargas elétricas da edificação.

Entretanto, verificou-se que a representação energética do HU-USP exigia um esforço maior dado às características de funcionamento e estado do prédio. Preferiu-se, então, a concentração no exercício de calibração da simulação do modelo energético do edifício e para isto, a utilização de mais informações para entrada no modelo energético. Um modelo calibrado de forma adequada pode atender às futuras chamadas da ANEEL.

1.2 Objetivo

Realizar a calibração da estimativa de energia elétrica do modelo energético do Hospital Universitário da USP e a partir da experiência obtida na calibração, propor uma nova metodologia de calibração.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Avaliar a aplicabilidade das metodologias de calibração existentes em estudo de caso do Hospital Universitário da USP.
- Avaliar alternativas de eficiência energética no sistema de iluminação e ar condicionado.

1.3 Contexto - uso energético nas edificações

A diversidade dos usos de energia nas edificações é um das características das sociedades contemporâneas e compreende o atendimento de serviços que, de acordo com Vorsatz et al. (2012), incluem, entre outros, higiene, preparação e conservação de alimentos, entretenimento e comunicação.

A satisfação destes serviços energéticos está ligada diretamente ao consumo de energia, que pode ser oriunda de eletricidade ou energia elétrica, diesel, gás liquefeito de petróleo (GLP), gás natural, entre outras. Pela sua facilidade em ser convertida em energia mecânica e térmica bem como o crescimento das aplicações da eletrônica, o uso da energia elétrica ganha destaque no contexto das edificações.

A Agência Internacional de Energia (IEA - *International Energy Agency*) não realiza o cômputo individualizado do consumo nos edifícios, porém ela mostra que os seus grandes representantes, o setor comercial e residencial, somam 49% do total de na energia elétrica consumida no mundo (IEA, 2017). Segundo o PROCEL, as edificações brasileiras representam uma participação semelhante: 50% e soma mais um setor dentro das edificações: o setor público (PROCEL, 2018).

Nos setores comercial e público, a energia elétrica é o energético predominante, concentrando em torno de 90% da energia total consumida pelos setores. Os usos finais típicos destes setores estão apresentados na Figura 1.1.

Figura 1.1: Distribuição do consumo por uso final nos setores comercial e público. ELETROBRAS (2007a)

Os usos finais cujas Ações de Eficiência Energética (AEE's) são tipicamente avaliadas por programas de simulação são iluminação e ar condicionado. Dentro destes dois setores situam os hospitais e instituições de ensino, cujos principais tipos de equipamentos de ventilação e condicionamento estão apresentados na Figura 1.2. Nota-se que o tipo de sistema de condicionamento predominante é o equipamento denominado modular, ou seja, aparelhos tipo janela e split.

Figura 1.2: Percentual do tipo de sistemas de ar condicionado e/ou ventilação encontrado nos empreendimentos amostrados por ELETROBRAS (2007b), ELETROBRAS (2007c).

Quanto ao tempo de vida dos edifícios, tem-se o panorama apresentado na Figura 1.3. Vê-se que edifícios com uma idade superior a 10 anos correspondem a 43% dos prédios de instituições de ensino e 58% das edificações hospitalares.

Figura 1.3: Percentual de consumidores por idade da instalação.
(ELETROBRAS, 2007b; ELETROBRAS, 2007c)

1.4 Estimativa da eficiência energética através da simulação calibrada

A estimativa de oportunidades de eficiência energética é escopo das chamadas diretrizes de Medição e Verificação (M&V): Protocolo internacional de medição e verificação de performance da EVO³ (EVO, 2011), *ASHRAE Guideline 14* (ASHRAE, 2002) e guia de medição e verificação de performance da *USDOE* (USDOE, 2015). Estas diretrizes apresentam abordagens e procedimentos para fazer a estimativa dos potenciais de eficiência energética com confiabilidade.

Uma alta confiabilidade é necessária nestas estimativas, uma vez que não ocorre a medição direta da eficiência energética, sendo sua obtenção feita de maneira indireta. Assim, um dos pressupostos numa avaliação sob os critérios das diretrizes M&V é equiparar as condições de operação do equipamento antes e depois de uma ação de eficiência energética, excluindo mudanças não associadas a esta ação. Uma abordagem que permite esta equivalência entre condições é a simulação calibrada, ou seja, uma simulação energética que é capaz de descrever de maneira confiável o comportamento de um edifício. Dado o impacto do custo energético em uma edificação, o seu uso para a estimativa de oportunidades de conservação de energia devido a uma AEE tornou-se prática comum (HEO; CHOUDHARY; AUGENBROE, 2012).

³Efficiency Valuation Organization

1.5 As ferramentas de simulação

Dentre os usos finais típicos de uma edificação, a simulação do sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) é aquele que incorre numa maior complexidade. Isto se deve ao fato de o consumo energético deste sistema, diferente dos sistemas puramente eletrônicos, variar de acordo com a interação de dois principais componentes: a quantidade de calor a ser removida/adicionada (carga térmica); e o desempenho do sistema de climatização existente.

Representar de maneira rigorosa estes dois componentes é um processo repetitivo que exige a utilização de um programa computacional⁴. Estes programas permitem uma resposta mais rápida do consumo de energia de um prédio, por isso seu uso tornou-se prática comum. Dentre eles enquadram-se o *EnergyPlus*, *eQUEST*, *DOE-2*, *ESP-r*, *BLAST*, *HVAC-SIM+* e *TRNSYS*. (MA et al., 2012)

1.5.1 O EnergyPlus

O *EnergyPlus* nasceu da fusão das melhores capacidades do *DOE-2* e *BLAST*. Sendo uma ferramenta de simulação com entrada no formato texto, o *EnergyPlus* não possui uma interface muito prática. Assim, terceiros criaram programas que dão ao *EnergyPlus* uma interface de utilização mais amigável. Esses programas são chamados de GUI (do Inglês, *Graphical User Interface*) e a interface proporcionada por eles facilita muitas tarefas no *EnergyPlus*, como o desenho da geometria do edifício e a inserção/edição de componentes do sistema de climatização. GUI já consolidados incluem: *Openstudio*, *Simergy* e *Design Builder*. (Energy-Models, 2018)

O *EnergyPlus* conta com dois principais módulos: um para determinação da carga térmica (através do método do balanço de calor) e outro para simular a operação dos sistema climatização do edifício; estes módulos interagem dentro de um volume de controle denominado zona térmica. A solução ótima do balanço destes módulos é calculada por um módulo de gerenciamento que, por sua vez, controla a simulação de acordo com o intervalo de tempo desejado (pode ser até o intervalo de segundos) (CRAWLEY et al., 2001). A solução integrada permite que a carga de resfriamento/aquecimento remanescente na zona térmica seja somada ou subtraída no próximo intervalo da simulação da carga térmica. USDOE (2017a)

O passo-a-passo de simulação no *Energyplus* é descrito por O'Neill et al. (2011): o *EnergyPlus* toma como entrada a descrição do edifício (geometria, materiais, tipo de teto, detalhe das janelas, geometria de sombreamento, localização, orientação), o seu perfil de uso, suas cargas internas (agendas em função da hora do dia) e a descrição de seus equipamentos

⁴Embora menos eficientes ainda há métodos realizados sem a ajuda de computadores, denominados métodos manuais. Entre os métodos manuais mais comuns está a regra do polegar que propõe o dimensionamento do sistema de climatização segundo a tipologia do edifício e sua área de piso. Bruning (2012) afirma que muitos projetistas recorrem a este método em designs iniciais, permitindo uma estimativa inicial de orçamento em um curto espaço de tempo.

de climatização (sistema central, sistema de expansão direta, bombas de calor, controles de temperatura de *setpoint*, vazão de ar, etc) para computar os fluxos de energia, temperatura das zonas, vazão de ar e níveis de conforto para intervalos até sub-horário, em períodos de dias até o ano todo.

A integração dos componentes de um sistema central no programa é dado pela Figura 1.4. O *EnergyPlus* separa-o em sistema primário e sistema secundário. O primário é responsável pela geração do frio/calor, incluindo equipamentos como resfriadores, caldeiras e torre de resfriamento. Já o sistema secundário inclui todos elementos entre o sistema primário e a zona térmica, ou seja, ventiladores, bombas, dutos, *dampers*, serpentinas de aquecimento/resfriamento. É o sistema secundário responsável pelo transporte de calor, se conectando às zonas térmica através de um *loop* de ar; é neste sistema, também, que estão associados controladores como temperatura de *setpoint* da zona, vazão mínima de ar externo, temperatura da água que passa pelo fancoil, entre outros. Sistemas de climatização modulares possuem uma estrutura mais simplificada, pois não possuem *loops* de água.

Figura 1.4: Solução integrada de um sistema central no *Energyplus*. Adaptado e traduzido de ASHRAE (2013)

No *Energyplus* os equipamentos de condicionamento são representados por módulos que simulam o comportamento de um sistema real para atender a um determinado nível de carga térmica previsto pelo módulo de balanço de calor. Para se aproximar do comportamento mais real deste equipamentos, além de considerar o funcionamento em carga parcial dos equipamentos, o programa realiza ajustes das características das suas condições nominais para as condições de operação a cada intervalo de tempo. O ajuste é feito ou através de curvas de desempenho ou através de tabelas de desempenho, ambas obtidas através de dados empíricos, podendo ser utilizadas de forma intercambiável. A diferença entre elas é que as curvas de performance são obtidas da análise de regressão dos dados tabulares, sendo, por isso, de mais fácil uso. (USDOE, 2017a).

Dentro das curvas de performance enquadram-se funções, principalmente de natureza polinomial, que são usadas para mensurar a variação da mudança na performance nominal de um componente ou sistema dado o mecanismo que causa esta mudança. Dentro do equacionamento

a mudança representa a variável dependente e o mecanismo causador pode ser uma única ou um conjunto de variáveis independentes. As curvas variam desde simples relações lineares de uma variável dependente até relações triquadráticas, exponenciais e sigmoidais. Por exemplo, a curva que descreve mudança na capacidade de resfriamento de uma serpentina de expansão direta (tipicamente o fenômeno que ocorre em equipamentos modulares do tipo *split* e de janela) é uma equação polinomial biquadrática de duas variáveis independentes: temperatura de bulbo úmido na serpentina de evaporação (condição de dentro do ambiente climatizado) e temperatura de bulbo seco na serpentina de condensação (condição meteorológica externa). (USDOE, 2017a; USDOE, 2017b)

Assim, de acordo com Duarte et al. (2017), a solução integrada com o uso de ajustes do desempenho permite ao *Energyplus* reproduzir com confiabilidade o comportamento real dos principais sistemas de climatização. O programa foi testado e validado para a simulação de sistemas de expansão direta usando o teste BESTEST E100–E200 (HENNINGER; WITTE; CRAWLEY, 2004). As referências das engrenagens do programa estão descritas nas referências do programa: guia dos princípios de simulação do *EnergyPlus* (USDOE, 2017a) e guia da entrada e saída de dados (USDOE, 2017b).

1.6 A calibração da simulação

Heo, Choudhary e Augenbroe (2012) afirma que *softwares* de simulação são mais facilmente aplicados para estimativa de consumo de energia de edifícios ainda não construídos, em fase de projeto. Para edifícios em operação a estimativa prevista pelo modelo deve passar por um processo de calibração, ou seja, deve ser comparado a sua resposta real, obtida por medições, e ajustar a primeira à segunda, a partir da alteração dos parâmetros de entrada.

Heo, Choudhary e Augenbroe (2012), então sugere que o modelo digital do edifício deve representá-lo como ele é operado de maneira a analisar alternativas de *retrofit* com confiabilidade; isto quer dizer que o modelo deve captar os sistemas energéticos do edifício tal qual eles estão instalados, operados e usados. Entretanto, um edifício já em operação pode apresentar sistemas energéticos com falhas e degradados pelo tempo, detalhes que não são, a priori, previstos no universo ideal encapsulado dentro de um modelo computacional.

Representar de maneira fiel o funcionamento de um edifício exige não apenas conhecimento de sua operação, mas como estas informações se convertem em parâmetros de entrada do modelo. Este problema é relatado por Bazjanac (2008) que critica o alto grau de subjetividade na construção do modelo, uma vez que as evidências a serem coletadas do edifício não estão prontamente traduzidas ao modelo energético.

Fora da questão da traduzibilidade das informações, Chong, Xu e Lam (2015) aponta a quantidade de dados de entrada: segundo eles 649 variáveis no *EnergyPlus* são consideradas incertas. As engrenagens de simulação do *Energyplus* considera um grande número de variáveis muitas das quais em interação mútua ao longo do tempo. Além disso, o detalhamento de

algumas variáveis muitas vezes não é possível devido à indisponibilidade de dados. Segundo os autores, isto leva o profissional que atua na elaboração dos modelos para simulação a adotar valores padrão disponíveis a partir de suposições. (CHONG; XU; LAM, 2015)

De acordo com Hornberger e Spear (1981), os modelos de simulação possuem elevado grau de liberdade, possibilitando o alcance de qualquer comportamento desejado. No entanto, quando utilizados em condições onde faltam dados que quantifiquem/qualifiquem o comportamento do sistema real, o resultado da simulação perde significado. Este problema é conhecido no meio científico como *Garbage In - Garbage Out* (GIGO) (SALTELLI, 2002) que se refere à relação causal entre os parâmetros de entrada e a resposta de um modelo: a inconsistência do primeiro leva obrigatoriamente à inconsistência do segundo. Por isso Waltz (1992) afirma que um alto grau de precisão na simulação é atingida pela otimização de três fatores: o bom conhecimento do edifício, o bom conhecimento da ferramenta de simulação e análise crítica dos resultados da simulação.

Sobre os problemas relatados na literatura, Reddy (2005) resume:

”As principais ressalvas em relação ao uso generalizado de simulação calibrada é que é intensivo em mão-de-obra, consome muito tempo, requer um alto nível de habilidade e conhecimento do usuário tanto na simulação quanto na operação prática da edificação, e é altamente dependente do julgamento pessoal do analista que realiza a calibração. A última ressalva implica que o processo é mais uma arte do que uma ciência e, ainda pior, que os resultados são específicos do analista.”(REDDY, 2005)

1.7 Justificativa para calibração

A simulação calibrada de um modelo energético consiste numa poderosa ferramenta que ajuda no processo de tomada de decisão, entre suas aplicações, destacam-se:

- analisar alternativas de *retrofit* tanto nos sistemas energéticos como na envoltória de um edifício. (GARWOOD et al., 2018; LI et al., 2015; RHODES et al., 2015; HEO; CHOUDHARY; AUGENBROE, 2012; WESTPHAL; LAMBERTS, 2005; WALTZ, 1992)
- estimar a performance energética de edifícios que ainda serão construídos para comparar alternativas de *design*. (LARA et al., 2017; ANĐELKOVIĆ; MUJAN; DAKIĆ, 2016; CHONG; XU; LAM, 2015; ZHAO et al., 2015; MONETTI et al., 2015; CLARKE, 2001; WALTZ, 1992)
- representar a assinatura energética da edificação (*energy signature*), ou seja, performance dos sistemas de climatização em função da temperatura externa; (ALLESINA et al., 2018)
- estabelecer *benchmark* de consumo de energia; (BOXER; HENZE; HIRSCH, 2017; CHONG; XU; LAM, 2015)

- demonstrar conformidade com códigos e normas para certificação; (LAM et al., 2014)
- fornecer informação sobre as curvas de carga elétrica e/ou térmica da edificação (SONDEREGGER et al., 2001 apud REDDY, 2005)
- fornecer um diagnóstico da matriz desagregada de usos finais de uma edificação; (WALTZ, 1992)
- auxiliar no comissionamento de edificações; (PAN; HUANG; WU, 2007; PAN et al., 2006; CLARIDGE, 2004)
- analisar *retrofits* envolvendo inserção de tecnologias de energia renovável; (DADIOTI; REES, 2013)

Pode-se dizer que o mote principal para o uso da simulação calibrada é a redução de custos em comparação com outros métodos. Além disto ela é uma ferramenta flexível: uma vez obtida uma simulação calibrada, ela pode ser usada simulando outros sistemas energéticos a escolha do projetista. Isto permite avaliar um leque de opções de AEE e, com isto, selecionar qual delas retornará um benefício maior com um menor investimento, o que resulta numa diminuição do risco do projeto.

Desta forma, o uso de ferramentas de simulação tornam mais claras os custos das AEE's, que podem ser aproveitados no contexto do planejamento do setor elétrico. De acordo com Jannuzzi e Swisher (1997) o custo da adoção da eficiência energética é tipicamente mais baixo que aquele necessário para expansão do sistema, comparação que pode ser melhor evidenciada se, em nível predial, houver a generalização do uso de modelos energéticos para avaliar medidas de eficiência energética.

Revisão das metodologias de calibração da simulação de modelos energéticos

Neste capítulo é feita uma revisão de contribuições em relação às metodologias de simulação de modelos energéticos.

2.1 Indicadores de acurácia da simulação

Dada a inviabilidade de se coletar todos os parâmetros de entrada possíveis de serem introduzidos no *EnergyPlus*, certas simplificações devem ser realizadas. De fato, a necessidade de se adotar simplificações faz parte da própria concepção da modelos para simulação. Clarke, Strachan e Pernot (1993) diz que para a realização da simulação, algumas simplificações são necessárias, devido à falta de capacidade de representar por meio de um modelo certo fenômeno ou à falta de necessidade de representar exatamente alguns processos, dado o objetivo da modelagem.

A introdução de simplificações não impugna o uso da simulação calibrada. Entretanto, para verificar a sua acuracidade em representar o edifício real, deve-se utilizar os métodos abordados nesta seção. Dentre eles, destacam-se os métodos estatísticos que fornecem indicadores matemáticos que expressam a adequabilidade da previsão do modelo frente aos dados observados; e os métodos de comparação gráfica que utilizam de métodos de plotagem para comparar resultado previsto por modelagem e dados medidos.

2.1.1 Métodos estatísticos

Os métodos estatísticos estão entre os meios mais básicos para avaliar a performance de modelos nas ciências naturais. (WILLMOTT; MATSUURA, 2005) As diretrizes de M&V definem dois principais indicadores estatísticos de qualidade do modelo energético. A saber:

Erro Sistemático Médio (ESM) (%) (*Mean Bias Error, MBE*): é uma medida não dimensional, resultado da soma de todo desvio entre a medição e estimativa do modelo para cada intervalo de tempo, que pode ser horário, mensal ou anual. Ele indica com valores positivos, o valor médio da sobre-estimativa (simulação média acima da medição)

e com valores negativos o valor médio da sub-estimativa (simulação média acima da medição). Ele é um bom indicador do desvio médio do modelo ao longo de todo período de avaliação, entretanto deve ser interpretado cuidadosamente já que ele é sujeito ao efeito de compensação, onde sub-estimativas compensam sobre-estimativas, efeito reportado por Diamond e Hunn (1981). O cálculo deste indicador é dado pela equação 2-1.

$$ESM(\%) = \frac{\sum_{i=1}^N (s_i - m_i)}{\sum_{i=1}^N (m_i)} \times 100 \quad (2-1)$$

Onde s_i indica um elemento do vetor que recebe os resultados de simulação e m_i indica um elemento (com o mesmo índice do elemento de simulação) do vetor que recebe os dados de medição; i indica o índice que varia de 1 a N que, por sua vez, indica o tamanho de cada vetor, que deve ser coincidente. Para avaliação ao longo de um ano no intervalo de tempo horário N máximo é de 8760, no intervalo mensal N é de 12 e igual N é de 1, no intervalo anual.

Coefficiente de Variância do Erro Médio Quadrático (CV EMQ) (%) (*Coefficiente of Variation of Root Mean Square Error, CV RMSE*): o uso do erro médio quadrático remove o sinal do erro, considerando apenas a sua magnitude (WILLMOTT; MATSUURA, 2005). Para a remoção do sinal, a cada diferença entre simulação e medição, eleva-se ao quadrado e calcula-se a sua raiz quadrada. Cancelando, assim, o efeito de compensação, o indicador do coeficiente de variância deste erro permite a determinação de quão o modelo se adequa às medições reais (COAKLEY; RAFTERY; KEANE, 2014). O CV EMQ é obtido pela equação 2-2.

$$CV EMQ(\%) = \frac{\sqrt{(\sum_{i=1}^N (m_i - s_i)^2 / N)}}{\bar{m}} \quad (2-2)$$

Onde s_i indica um elemento do vetor que recebe os resultados de simulação e m_i indica um elemento (com o mesmo índice do elemento de simulação) do vetor que recebe os dados de medição; i indica o índice que varia de 1 a N que, por sua vez, indica o tamanho de cada vetor, que deve ser coincidente. Para avaliação ao longo de um ano no intervalo de tempo horário N máximo é de 8760, no intervalo mensal N é de 12 e igual N é de 1, no intervalo anual; $\bar{m}$ representa a média do vetor medição.

Vale ressaltar que o campo de varredura dos vetores é limitado pelo tamanho do vetor que possui maior restrição de dados. Por exemplo, se por algum defeito, perde-se um mês de medição, o valor de N , apesar de não sofrer alteração na escala anual, na escala horária e mensal terá valores inferiores ao máximos apresentados. Neste caso, exclui-se os valores de simulação que possuem o mesmo índice dos dados de medição perdidos.

Os manuais de M&V sugerem um período de 12 meses de medição do consumo de energia do prédio (EVO, 2011; ASHRAE, 2002; USDOE, 2015). O motivo para adotar este período,

conforme EVO (2011), é que ele corresponde ao ciclo dos edifícios, ou seja, intervalo de tempo que marca o início e o fim da variabilidade no qual ele está sujeito, tipicamente influenciado pelas condições climáticas. De acordo com ASHRAE (2002), se não houver disponibilidade de se obter medições ao longo de um ano, devem ser selecionados, pelo menos, períodos que representem cada estação do ano.

Os limites máximos aceitáveis desses indicadores de acordo com as três principais diretrizes de M&V estão apresentados na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Indicadores de qualidade para diferentes normas

Instrumentos normativo	Resolução mensal		Resolução horária	
	ERM (%)	CV EQM (%)	ERM (%)	CV EQM (%)
Diretrizes 14 - ASHRAE (2002)	± 5	15	± 10	30
Manual M&V - EVO (2011)	± 20	–	± 5	20
Manual M&V - USDOE (2015)	± 5	15	± 10	30

2.1.2 Métodos de comparação gráfica

ASHRAE (2002) apresenta quatro diferentes técnicas de comparação gráfica da simulação *versus* medição entre os quais merece destaque o diagrama denominado gráfico de caixa, *box plot*, *schematic plots* ou *box-whisker plots*. Segundo Williamson, Parker e Kendrick (1989), este diagrama consiste em uma técnica estatística que permite identificar, visualmente, padrões que poderiam estar escondidos dentro do conjunto de dados. De acordo com os autores, o *box plot* é dividido em duas metades com iguais quantidades: valores dentro e fora da caixa. A caixa é delimitada superiormente pelo terceiro quartil (75% da amostra ordenada) e inferiormente pelo primeiro quartil (25 % da amostra ordenada), possuindo um traço central que representa a mediana. As linhas que se estendem a partir da caixa representam os limite superior e inferior dos dados, pontos fora deste limite são tratados como *outliers*.

Uma maneira gráfica de identificação de padrões é o diagrama violino que consiste numa combinação de um diagrama de caixa com um histograma. Assim, um diagrama violino permite, além da identificação dos quartis, uma indicação da forma no qual se dá a distribuição dos dados (HINTZE; NELSON, 1998). A descrição dos elementos comuns a diagrama de caixa e violino estão apresentados na figura 2.1.

2.2 Classificação das abordagens de calibração

As abordagem de ajuste do modelo de simulação em relação à medição foram classificadas por Coakley, Raftery e Keane (2014) em:

Calibração manual: baseia-se na intervenção pragmática e iterativa do profissional que realiza as simulações, sem utilizar nenhum método automatizado.

Figura 2.1: Elementos típicos de um diagrama de caixa e de um diagrama violino. Traduzido e adaptado de Hintze e Nelson (1998)

Calibração automatizada: aquela no qual o processo de calibração utiliza-se, pelo menos em algum momento, de uma abordagem automatizada, ou sejam, que não utiliza edição dos dados de entrada realizada pelo usuário.

Dentro da calibração manual, enquadram-se dois principais procedimentos para melhoria da qualidade da simulação através de manipulação manual dos dados: abordagem baseada em evidência e a abordagem utilizando análise de sensibilidade. A primeira diz respeito a inserção de dados no modelo a partir exclusivamente de evidências coletadas que descrevem o sistema real; e a segunda baseia-se no emprego de um estudo que avalie quais parâmetros de entrada melhor aproxima a resposta da simulação com a medição. A análise de sensibilidade pode ser utilizada, também, para mensurar as incertezas do modelo.

2.3 Revisão dos métodos manuais de calibração

Segundo Coakley, Raftery e Keane (2014), nas últimas décadas foram propostos vários procedimentos para calibração da simulação do desempenho energético das edificações. Nas subseções seguintes, serão apresentados os principais métodos em ordem cronológica, dando enfoque no seu uso para calibração da simulação do consumo elétrico da edificação e utilizando uma abordagem manual.

2.3.1 Método de Yoon, Lee e Claridge (2003)

O método proposto por Yoon, Lee e Claridge (2003) é baseado em etapas utilizando dados mensais de medições de sub-instalações para calibração. Os autores citam sete etapas, entretanto as etapas de calibração correspondem às seis primeiras, sendo a última destinada às análises de AEE's. Ao final, os autores testam o método na calibração da simulação de um edifício comercial de 83.212 m² no centro da cidade Seoul utilizando o programa de modelagem DOE2.1E. A figura 2.2 apresenta as sete etapas envolvidas neste método.

Na primeira etapa, os autores sugerem a coleta dos dados necessários para a simulação, entre os quais informações sobre a envoltória, sistemas elétricos e dados meteorológicos. Entretanto, os autores não deixam claro quais informações são consideradas necessárias para a simulação: se todas as informações possíveis de serem coletadas ou apenas aquelas para possibilitar uma primeira simulação. A coleta de informações não se encerra nesta etapa, pois na quarta etapa também é sugerida a busca por informações a partir de "visitas *in situ* adicionais e entrevistas" para refinamento das informações. Quanto ao zoneamento, é sugerido seguir o layout das plantas do edifício.

Na segunda etapa, faz-se uma "análise da carga de base", ou seja, aquela que, de acordo com definição dos autores, é independente de condições meteorológicas. Para esta análise, eles lançam mão de um modelo 3P (advém de três parâmetros), para segregar, a nível mensal, a carga de base daquela carga da carga dependente de condições climáticas, ou seja, a de resfriamento e aquecimento. Os ganhos de calor provenientes da carga de base são afinadas na terceira etapa, denominada pelo autor de "calibração inter-sazonal" (*swing-season calibration*). A ideia é fazer o refinamento de dados de iluminação, sistemas de climatização, carga de tomada e consumo de elevador em um período onde a carga de resfriamento e aquecimento são mínimos.

A certificação de que as características reais do sistema de climatização é feita na quinta etapa, chamada de "calibração na estação de aquecimento/resfriamento" (*Heating/Cooling Season Calibration*). Nesta etapa, são atualizadas informações inseridas no modelo do sistema de climatização de acordo com as evidências coletadas a certa do sistema de climatização real, entre os quais, temperatura de *setpoint*, características operacionais do sistema, característica do ar externo, agenda de operação, curva de performance, entre outros.

De modo geral, a metodologia proposta por Yoon, Lee e Claridge (2003) possui alto grau de subjetividade na coleta de dados para introdução do modelo. A ordem de atualização das informações do modelo prevê a interação dos sistemas de climatização com os ganhos internos do edifício: primeiro atualiza-se os dados do lado da demanda (características relacionadas aos ganhos internos) e, em seguida, são atualizados os dados do lado da oferta (características de operação dos sistemas de climatização).

Como os autores trabalham com a possibilidade de se medir o consumo de energia a nível de sub-instalação, eles fornecem diretrizes importantes para nortear essas informações. Por exemplo, eles sugerem que medições horárias a nível de sub-instalação deve acontecer em

Figura 2.2: Tradução do fluxograma da metodologia de calibração em sete etapas proposta por Yoon, Lee e Claridge (2003).

pelo menos no período de um dia e preferencialmente no período de uma semana. Além disso, eles sugerem que as simulações de sub-instalações devem divergir até 10% de suas respectivas medições, em base mensal.

2.3.2 Método de Westphal e Lamberts (2005)

A metodologia proposta por Westphal e Lamberts (2005) aproveita informações coletadas ao longo de auditorias no edifício de estudo e análise de sensibilidade. Para exemplificar, os autores aplicam-na para calibrar a simulação de um prédio público em Florianópolis, Santa Catarina, utilizando o programa *EnergyPlus*. Iniciando-se a partir de um modelo base, ela é dividida em seis fases:

1. Calibração da energia e agenda de cargas constantes, como cargas de iluminação e tomadas;
2. Análise de carga térmica através da simulação de dias de projeto;
3. Análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada relacionados aos ganhos/perdas de calor mais significativos;
4. Ajuste dos parâmetros mais significativos e com maior grau de incerteza;
5. Simulação de um ano completo;
6. Ajustes finais.

Como a metodologia de Yoon, Lee e Claridge (2003), este passo-a-passo também baseia-se numa análise da carga de base, ou como chamado por Westphal e Lamberts (2005), cargas constantes. Entretanto, ao invés de lançar a mão de um modelo para segregar cargas dependentes e independentes de condições meteorológicas, Westphal e Lamberts (2005) propõem analisar um dia representativo onde não houve acionamento do sistema de ar condicionado para calibrar a simulação das cargas constantes, basicamente, iluminação e carga de tomadas.

A partir da simulação da carga térmica nos dias de projeto, os autores hierarquizam qual a fonte que mais contribui com entrada/saída de calor do ambiente: paredes, janelas, ocupação, iluminação ou demais equipamentos elétricos. Assim, dado que as cargas de iluminação e equipamentos elétricos já estão calibradas a partir da fase anterior, os autores identificam qual, entre as fontes restantes, é aquela que mais contribui com calor. É nesta fonte que, segundo os autores, o analista deve dar maior enfoque na caracterização.

Na terceira fase, é feita uma análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada que influenciam a fonte mais contribuidora, identificada na fase anterior. Os parâmetros mais influentes são aqueles os quais os autores sugerem a busca por informações a partir do prédio real. Esta sugestão de Westphal e Lamberts (2005) auxilia no direcionamento da auditoria a ser realizada, o que pode ser útil em projetos que dispõem de pouco tempo para diagnóstico do prédio, ou mesmo quando há restrições de acesso às instalações do prédio em estudo, como áreas críticas de hospitais e indústrias.

As próximas etapas destinam-se a comparar o resultado da simulação com a medição de energia elétrica, na escala mensal e horária. O critério de comparação não é sugerido pelos autores, entretanto, no estudo de caso é usado o erro médio. Os autores não usam o CV EQM para averiguar se as diferenças negativas estão compensando as diferenças positivas, mas avaliam graficamente estas diferenças para o mês de março, concluindo que o modelo encontra-se calibrado.

Westphal e Lamberts (2005) baseia-se numa análise de sensibilidade para focar as informações a serem detalhadas, ao invés de informações "necessárias" para simulação. Na análise da carga de base proposta pelos autores, sugere-se comparar o consumo de um dia representativo que há informação sobre o desligamento do sistemas de climatização. Esta sugestão pode não se estender para estudo em prédios onde não informações sobre o desligamento do sistema de climatização, ou também prédios que possuem áreas críticas que necessitam o uso contínuo de sistema de climatização, como áreas de hospitais como laboratórios, áreas de armazenamento de produtos farmacêuticos, UTI's, etc. Há edifícios que possuem uso diferenciado em finais de semana, resultando em perfis de carga que não se assemelham a um dia representativo.

No estudo de caso apresentado pelos autores, os autores plotam a potência horária demandada pelo edifício para um dia representativo de março, concluindo que a simulação estava calibrada. Entretanto, devido à sazonalidade do consumo de energia do sistema de climatização, é necessário averiguação em outros dias úteis para confirmação do sucesso da calibração. Uma outra ferramenta analítica, seria o cálculo do indicador CV EQM horário para o ano todo de simulação.

2.3.3 Método de O'Neill et al. (2011)

O'Neill et al. (2011) utiliza o *EnergyPlus* para calibração de um modelo digital de um edifício do departamento de defesa dos Estados Unidos que possui selo *Gold* pelo LEED®. Sua metodologia utiliza uma análise de sensibilidade paramétrica para identificação dos parâmetros que mais influenciam no consumo de energia elétrica do modelo. O passo-a-passo da metodologia é apresentado na Figura 2.3.

Figura 2.3: Método de calibração proposto por O'Neill et al. (2011).

Foram identificados no edifício cinco diferentes ambientes, três deles condicionados por sistemas centrais acoplados a terminais VAV e dois por equipamentos do tipo *split*¹. Entretanto, na construção do modelo os autores mencionam apenas a configuração utilizada para atender dois dos ambientes servidos pelo VAV. Além de ignorar o terceiro ambiente servido por VAV, não é mencionado, sequer, que não se considerou a construção de um módulo que simulasse o condicionamento dos ambientes atendidos pelos equipamentos do tipo *split*.

Em sua análise de sensibilidade, os autores utilizam uma abordagem quase-aleatória para gerar amostras de parâmetros. Nesta análise, os autores mantiveram os valores de algumas variáveis constantes e variaram um total de 1009 parâmetros em $\pm 20\%$ de seus valores nominais, resultando em 5000 simulações. Os dados meteorológicos utilizados (estão entre os parâmetros mantidos constantes) são provenientes de um ano meteorológico típico de uma estação distante mais de 35 km do edifício de estudo. Os autores não citam quais os valores nominais que ele considerou como ponto de partida para a variação de $\pm 20\%$.

Entre as respostas de simulação influenciadas pela análise de sensibilidade, os autores avaliam o consumo anual de energia e o pico de demanda de energia. Entretanto, ao invés de demanda de energia, o autor quis dizer consumo de energia horário, já que os resultados são mostrados em unidades de consumo de energia, em *Joule* [J]. Ao final, são identificados os parâmetros que mais influenciam nestas respostas e são atribuídos a eles os valores finais que minimizam a discrepância entre simulação e medição.

Os autores avaliam a aderência da simulação e modelo graficamente a partir do consumo mensal de energia elétrica. Apesar de afirmar que, ao final, o modelo se encontra calibrado, percebe-se em alguns meses erros de mais de 10%, o que não passaria pela o critério definido pelas normas de M&V. Além disso, os autores avaliam o resultado da simulação se ela fosse efetuada utilizando dados de alguns meses provenientes de uma estação meteorológica mais próxima. Nesses meses, os autores afirmam diferenças na faixa de $\pm 10\%$.

A metodologia proposta por O'Neill et al. (2011) permite a diminuição do tempo necessário para a coleta de evidências acerca da edificação. Por outro lado, resta um maior número de parâmetros incertos que devem ser analisados dentro do modelo *Energyplus*. No estudo, os autores identificam 1009 parâmetros incertos que resultaram numa análise de sensibilidade que envolveu no total 5000 simulações. Mesmo na escala de tempo mensal, o estudo resultou em uma simulação com baixa aderência ainda na base mensal.

2.3.4 Método de Raftery, Keane e O'donnell (2011a)

A metodologia proposta por Raftery, Keane e O'donnell (2011a) traz uma sistematização do processo de calibração através de evidências coletadas acerca do edifício existente. Esta metodologia conta com a existência de um modelo digital pronto do edifício desde a fase de projeto, a partir do qual se segue o passo-a-passo de calibração apresentado na figura 2.4.

¹Os autores chamam este sistema de "duct free split system"

Figura 2.4: Método de calibração proposto por Raftery, Keane e O'donnell (2011a).

Na fase de preparação, os autores propõem um ordenamento hierárquico das evidências coletadas nas seguintes categorias:

1. Dados registrados de medições;
2. Medição pontual;
3. Levantamento e verificação física (pesquisas de campo);
4. Entrevistas a funcionários e operadores;
5. Documentos de operação (manuais de operação e manutenção - O&M);
6. Documento da instalação (desenhos e plantas "*as built*");
7. Estudos de referência "*benchmark*" e guias de boas práticas;
8. Normas, especificações e guias.

As informações hierarquizadas são adicionadas no modelo de forma que uma mudança só pode substituir outra se vier de uma evidência de uma hierarquia mais alta. A cada mudança nos parâmetros de entrada, deve-se identificar qual mudança e criar uma nova versão. Para o controle de todas as versões criadas, os autores sugerem o uso de um *software* de controle de versão ("*version control software*") para o registro da versão e identificar de qual alteração ele resulta. A sugestão do uso desta ferramenta é importante no caso em que há mais de um analista trabalhando no projeto, permitindo compartilhamento das diversas versões. Entretanto, para projetos com apenas um analista, uma planilha com identificação da versão e sua respectiva mudança já seria suficiente.

A verificação da influência de uma mudança na calibração é feita utilizando, o que os autores sugerem, um critério de significância, abaixo do qual a mudança não foi significativa. Este critério se traduz na variação dos indicadores de qualidade (ERM e CV EQM) em relação ao modelo anterior. No estudo em que os autores aplicam a metodologia, é definido um critério de 1% para ERM, 1% para CV EQM mensal e 2% para CV EQM horário. A proposição deste critério de significância, apesar de tornar o processo menos subjetivo, não reconhece efeitos interativos de uma mudança para outra. Por exemplo, a mudança da intensidade elétrica pode resultar em uma variação menor se for aplicada em agendas diferentes, assim, definir um critério de significância em mudanças individuais pode ignorar estes efeitos.

Raftery, Keane e O 'donnell (2011a) também propõem uma sistematização em relação à definição das zonas térmicas. Segundo os autores, agregar múltiplas zonas térmicas em uma zona única resulta no modelo menos representativo do edifício real. As razões para isto são descritas pelos autores:

- zonas agregadas não representam situações onde há cargas de resfriamento e aquecimento simultâneas em diferentes ambientes. Como no Brasil não há costume de se utilizar sistemas de climatização para aquecimento, esta situação é rara em prédios brasileiros.
- zonas agregadas não permitem representação precisa de diferentes perfis de ocupação e de carga térmica. Esta razão advém de uma falta de clareza sobre a definição de uma zona térmica que não representam os espaços físicos do prédio, mas um volume de

ar servido por um mesmo sistema de condicionamento. Assim, zonas térmicas podem sim representar múltiplos ambientes (com, por ventura, diferentes agendas), entretanto ambientes não podem ter múltiplas zonas térmicas.

- agregar zonas térmicas diminui a acuracidade da representação de ambientes condicionados por diferentes métodos de condicionamento. Esta razão está coerentes com a definição de zona térmica.
- zonas térmicas agregadas resultam em uma planta simplificada que pode não ser adequada para edifícios com grande áreas de piso. Entretanto o autor não deixa claro qual limiar que caracteriza um edifício com pequena ou grande área de piso.
- zonas térmicas desagregadas permitem que AEE's sejam investigadas com maior resolução e com menos simplificações. Esta vantagem auxilia na investigação, por exemplo, do consumo de energia em equipamentos de condicionamento modulares que tipicamente climatizam um único ambiente.

A utilização de zonas térmicas mais desagregadas, não obstante, não possui apenas vantagens em relação ao uso de zonas térmicas agregadas. A sua principal desvantagem é o aumento do tempo geral de simulação, tanto para o analista que deve detalhar melhor a geometria, quanto tempo necessário para o processamento computacional da simulação. Além disso, dependendo do objetivo da simulação, algumas simplificações podem ser introduzidas sem perda de confiabilidade, como, por exemplo, o estudo de diferentes materiais de envoltória e estudos de porcentagem de área envidraçada. De fato, os autores admitem casos onde pode ocorrer agregação de diferentes zonas térmicas:

- as zonas térmica são do mesmo tipo. Segundo os autores, os tipos de zona térmica se baseiam: na função do ambiente que elas atendem, na posição em relação ao ambiente externo, os dados de medição disponíveis; e o equipamento de condicionamento usado. Percebe-se, de novo, que, tirando o último critério, há uma confusão em relação à definição do que é uma zona térmica.
- a relação entre área entre zonas e a área total dos ambientes é significativa. Percebe-se o uso de uma adjetivação que não contribui para a clareza do método. Em outro artigo publicado pelos mesmos autores (RAFTERY; KEANE; COSTA, 2011b), fez-se a agregação de zonas térmica quando a razão comprimento da área entre zonas e o perímetro dos ambientes era maior que 0,05%. Esta razão traz certo estranhamento, já que na metodologia original foi citada uma razão entre áreas e não entre distâncias.
- a zona térmica aglomerada não deveria possuir uma área de piso excessivamente grande. Novamente, como o autor não fornece faixas de valores, cabe ao julgamento subjetivo a decisão se uma zona possui ou não uma grande área de piso.

Em relação aos parâmetros de entrada do sistema de climatização, os autores sugerem a coleta de uma uma extensa lista de evidências. No entanto, pelo volume de dados, talvez nem todas informações sejam capazes de serem obtidas em função da falta de documentos de O&M e

incapacidade de conferência visual pela degradação das etiquetas dos equipamentos. A medição de todas essas variáveis é uma tarefa que consome tempo e exige a disponibilidade de diversos equipamentos de medição. De fato, nem no estudo em que os autores aplicam esta metodologia (RAFTERY; KEANE; COSTA, 2011b), é citada a disponibilidade de tamanho detalhamento de informações, apesar da calibração ter sido realizada. O aproveitamento de dados de medição do sistema de climatização poderia diminuir a quantidade de informações necessárias.

A tomada de decisão sobre quão longe devem ir as mudanças no modelo está descrito na Figura 2.5 que corresponde ao ciclo apresentado na figura 2.4 como "*Iteratively improving model*".

O processo geral envolve o reconhecimento das fontes de discrepância e avaliação das evidências passíveis de ser coletadas. Se as discrepâncias não advêm de erros no modelo, ao final o analista deve avaliar se ele dispõe de recursos para coleta da informação sobre o parâmetro. A subjetividade de inserção dos parâmetros é minimizada, se limitando apenas a deixar, ao final, o analista considerar se é necessário coletar certa evidência. Os autores sugerem, também, uma análise de sensibilidade para nortear qual parâmetro possui mais influência, e que precisa ser melhor detalhado.

A metodologia de Raftery, Keane e O 'donnell (2011a) permite compreender de forma clara todos os processos de calibração de uma simulação, baseando-se somente em evidências coletadas da edificação real. Ele envolve várias sistematizações que dão reprodutibilidade à metodologia, podendo ser aplicada a várias tipologias de edifícios. Entretanto, os autores partem de pressupostos que podem divergir da realidade de certos prédios, como a existência de uma modelo digital da edificação desde a fase de projeto e a possibilidade de ter acesso a praticamente todas informações nominais do sistema de climatização.

O método ainda comporta certo grau de subjetividade, pois depende de análises baseadas no julgamento do analista, como os critérios para agregar zonas térmicas e a definição de um critério de significância. O estudo para definição destes critérios podem aumentar ainda mais a reprodutibilidade deste método.

2.3.5 Método de Lam et al. (2014)

Lam et al. (2014) propõem um método de calibração de um modelo *EnergyPlus* baseado em prédios de escritório, utilizando modelagem para gerar o perfil de ocupação. A Figura 2.6 apresenta o diagrama com a visão geral do método. Para comprovar a eficiência de sua metodologia, os autores a aplicam em um edifício de 2.262m² composto por 2 lojas.

A metodologia é composta por quatro etapas principais: a primeira no qual são inseridos dados meteorológicos que refletem as condições onde o edifício está inserido; a segunda e a terceira nos quais calibra-se as cargas constantes a partir da medição do consumo de energia de iluminação e equipamentos; e na quarta etapa onde calibra-se o sistema de climatização, usando, também, medição deste sistema. A ordem é explicada pelos autores: para evitar o

Figura 2.5: Detalhamento iterativo da simulação de acordo com Raftery, Keane e O 'donnell (2011a).

Figura 2.6: Método de calibração da simulação proposto por Lam et al. (2014).

efeito interativo do calor proveniente da iluminação e equipamentos elétricos, faz-se o ajuste dos parâmetros que alteram estes sistemas antes dos parâmetros que influenciam o sistema de climatização.

Neste processo, os autores dispõem de um grande volume de dados para auxiliar no processo de calibração. Além dos dados de consumo de energia elétrica horária da edificação, eles possuem consumo horário de energia elétrica ao longo do ano de iluminação (interna e externa) e de equipamentos elétricos (internos e externos). Em relação ao sistema de climatização, há dados apenas para os meses de setembro a dezembro. Os autores constroem o perfil de ocupação a partir de dados coletados com sensores de presença colocados nos ocupantes, informações de uso dos programas de computador e o consumo de energia de equipamentos pessoais, como laptop, ventiladores, carregadores e impressoras.

Ao final os autores comparam a intensidade anual de uso de energia (em kWh/m²) nos diferentes estágios da simulação: modelo de base da ASHRAE 90.1-2007, modelo inicial do prédio de estudo, modelo calibrado e a medição do consumo de energia. Além disso, os autores comparam esses consumos com a geração de energia fotovoltaica por m² da região. O valor de intensidade energética que apresentou maior desvio é o do consumo de energia do modelo de base, que segundo os autores usam dados de intensidade de iluminação e de equipamentos muito superiores ao caso de estudo. Retirando este modelo, todos outros encontram-se com intensidade energética inferiores à geração de energia fotovoltaica.

O objetivo dos autores em modelar os dados de ocupação é criar uma abordagem "cientificamente precisa". Apesar da acuracidade de utilização da metodologia, ela depende de muitos dados que não estão facilmente disponíveis ao modeladores como os dados necessários para criação do perfil de ocupação. Assim, resta questionamentos a nível prático da aplicação da

metodologia, principalmente na sua aplicabilidade a um prédio de escritório de maior porte.

2.3.6 Comparação das metodologias

De modo geral, identifica-se em todas metodologias graus de subjetividade que podem dificultar a sua aplicação. Para a mensuração destes graus propõe-se a comparação destas metodologias sob à luz de critérios que podem ser classificados em eliminatórios ou classificatórios. Critérios eliminatórios representam aspectos cujo não atendimento inviabiliza a utilização de determinada metodologia. São determinados os seguintes critérios eliminatórios:

Tipologia de edifício-alvo: a metodologia é desenvolvida para ser aplicada em uma tipologia específica de edifício? Assim, se o edifício estudado não corresponde àquele especificado na metodologia, ela não pode ser utilizada.

Softwares adicionais: além da própria ferramenta de simulação (e seu respectivo *GUI*), a metodologia depende da utilização de outra ferramenta computacional? O não domínio destas outras ferramentas por parte do profissional responsável pela calibração inviabiliza o uso da metodologia. Ferramentas adicionais são tipicamente utilizadas em calibrações automatizadas e incluem: *Matlab* (YANG; BECERIK-GERBER, 2015), programação em Python (DERKSEN; GUENTHER,), GoSUM (O'NEILL et al., 2011).

Já os critérios de ordem classificatória dizem respeito a elementos que caso não atendidos, não inviabilizam seu uso, porém aumentam a subjetividade de sua aplicação. São definidos como critérios deste tipo:

Critério de Zoneamento: caso a metodologia proposta dá diretrizes para a definição do zoneamento do modelo.

Ordem para inserção de ajustes: caso os autores da metodologia definem uma ordem de inserção de ajustes na simulação.

Orientação sobre as evidências: caso os autores dão orientações sobre a coleta ou organização das evidências coletadas em relação ao edifício real.

A Tabela 2.2 apresenta a comparação das metodologias revisadas sob à luz destes critérios. Critérios eliminatórios são avaliados com "S", sim, ou "N", não; já os critérios classificatórios são avaliados com a "X" quando há a satisfação do critério.

Percebe-se que, dentre as metodologias avaliadas, aquela que é capaz de satisfazer todos os critérios classificatórios é a de Raftery, Keane e O'donnell (2011a). Entretanto, possui a desvantagem de necessitar a utilização de um *software* de controle de versões para registro dos ajustes efetuados em cada fase da simulação. Mesmo assim, esta limitação ainda pode ser superada utilizando outras estratégias de controle de versão independente destes tipos de *softwares*. Isto não pode ser feito, por exemplo, na metodologia de O'Neill et al. (2011) que depende de um *software* para realizar uma análise paramétrica no *EnergyPlus*.

Tabela 2.2: *Comparação das metodologias avaliadas*

	Critérios eliminatórios		Critérios classificatórios		
	Tipologia de edifício-alvo	Softwares adicionais	Critério de zoneamento	Ordem para inserção de ajustes	Orientação sobre evidências
Yoon, Lee e Claridge (2003)	N	N		X	X
Westphal e Lamberts (2005)	N	N		X	
O'Neill et al. (2011)	N	S		X	
Raftery, Keane e O'donnell (2011a)	N	S	X	X	X
Lam et al. (2014)	S	S		X	X

Para além dos critérios avaliados, as metodologias analisadas fornecem orientações de ordem prática que podem ser aproveitadas para facilitar os ajustes necessários da calibração. A seguir são identificados estas orientações de acordo com os autores:

Yoon, Lee e Claridge (2003): período de preferencial de coleta de dados em nível de sub-instalação.

Westphal e Lamberts (2005): sistemática para avaliar qual ajuste deve ser priorizado

O'Neill et al. (2011): faixa de variação das variáveis numa análise paramétrica.

Raftery, Keane e O'donnell (2011a): hierarquização das evidências coletadas.

Procedimentos metodológicos

Neste capítulo são apresentados os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado, incluindo a caracterização do edifício que será utilizado como estudo de caso e a apresentação da metodologia de calibração e avaliação da acurácia do modelo de simulação.

3.1 Caracterização do edifício

O Hospital Universitário da USP (HU-USP), apresentado na figura 3.1, desenvolve atividades desde 1968 e tem como atividade fim a assistência hospitalar de média complexidade. Como um hospital escola, ele possui entre as suas prerrogativas o desenvolvimento de atividades de ensino e pesquisa na área da saúde. (USP, 2017b)

(a) Vista aérea do HU - USP.

(b) Fotografia da fachada do prédio

Figura 3.1: *Photograph of the facade of the building*

Ele possui uma área construída de 36.000m² dividido em seis andares que contam com: (USP, 2017b)

- 258 leitos;
- centro cirúrgico com 9 salas e 7 leitos de recuperação;
- centro obstétrico com 4 salas;
- UTI de adultos com 14 leitos;
- UTI pediátrica com 6 leitos;

- ambulatório com 57 consultórios;
- 5 anfiteatros;
- 17 salas de aula distribuídas por todo o hospital.

O Hospital Universitário situa-se no *campus* Butantã da Universidade de São Paulo. A Figura 3.2 apresenta uma imagem do *Google Maps* com a localização do Hospital Universitário com indicação de sua orientação.

Figura 3.2: Localização do Hospital Universitário da USP com indicação de sua orientação em relação ao Norte. Adaptado de (Google Maps, 2018)

As subseções seguintes dedicam-se a apresentar as informações climáticas à respeito do sítio onde o HU-USP está localizado, bem como os dados energéticos do edifício. Estes dados foram coletados durante auditoria energética realizada nas dependências do hospital pela equipe de pesquisadores do Instituto de Energia e Ambiente (IEE-USP), a partir de setembro de 2016. Convencionou-se utilizar a classificação de Waltz (1992) para apresentar estes dados: pesquisa observacional e pesquisa de carga elétrica.

3.1.1 Caracterização climática

A coleta de dados climáticos representativos do *campus* é feita sistematicamente pelo Laboratório de Micrometeorologia (LabMicro) do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP (IAG-USP). A plataforma micrometeorológica está situada no prédio do IAG-USP, rua do Matão, 1226 – Cidade Universitária (Latitude: 23°33', Longitude: 46°38'), a

740 metros do nível do mar. A torre esta a 17m da superfície. As características dos sensores estão apresentados na Tabela 3.1, sendo que os dados são amostrados a cada 10 segundos, e salvos a cada 5 minutos.

Tabela 3.1: *Características dos sensores de coleta de dados climáticos - LabMicro IAG-USP*

Variável	Modelo/Marca do sensor	Altura na torre
Temperatura do ar	CS215 - Campbell	1,7 m
Umidade relativa do ar	CS215 - Campbell	1,7 m
Radiação Global	PBW - Eppley	1,5 m
Radiação Difusa	PSP - Eppley	1,5 m
Pressão atmosférica	CS106 - Campbell/Vaisala	1,7 m
Velocidade do vento	IRGASON - Campbell	8,4 m

Apresenta-se, na Figura 3.3, a distribuição mensal da temperatura do ar coletada.

Figura 3.3: *Distribuição mensal temperatura de abril de 2017 a março de 2018 da estação meteorológica da USP. (Baseada nos dados cedidos pelo LabMicro do IAG-USP)*

3.1.2 Pesquisa Observacional

A pesquisa observacional incluiu a identificação dos seguintes sistemas: o sistema de iluminação, o sistema de equipamentos elétricos e o sistema de ar condicionado. Além de avaliação destas cargas, o prédio foi percorrido, inclusive durante a noite, para o conhecimento do horário de funcionamento, conferência dos dados de planta e coleta de dados de temperatura de ambientes internos.

3.1.2.1 Identificação dos ambientes internos

A Figura 3.4 apresenta a planta baixa do prédio com a identificação dos tipos de ocupação dos ambientes do HU-USP.

Figura 3.4: Ambientes internos do HU-USP

Assim, notam-se ambientes com diferentes fins e, por isto, diferentes perfis de ocupação e nível de atividade de pessoas. Para ajudar a identificar os horários de ocupação, foi disponibilizado o registro de entrada e saída dos funcionários do edifício de acordo com o departamento ou setor do prédio.

3.1.2.2 Sistema de iluminação

As luminárias existentes em toda instalação do HU-USP foram inventariadas, sendo que no total, o sistema de iluminação soma pelo menos 4.830 luminárias que podem ser divididas por pavimento da seguinte maneira:

1º pavimento: 1.480 luminárias;

2º pavimento: 1.550 luminárias;

3° pavimento: 450 luminárias;

4° pavimento: 450 luminárias;

5° pavimento: 450 luminárias;

6° pavimento: 450 luminárias.

As luminárias são ou do tipo de embutir - figura 3.5(a) - ou do tipo de sobrepor - Figura 3.5(b). Cada uma conta com duas lâmpadas tubulares T8 com 32W com marcas variadas, entre as quais *Philips*, *Sylvania* e *GE*. Assim, o HU-USP integra 309,12 kW de potência total de iluminação.

(a) *Luminária de embutir*

(b) *Luminária de sobrepor*

Figura 3.5: Fotografia dos dois tipos de luminárias encontradas no HU-USP.

3.1.2.3 Equipamentos elétricos

O levantamento dos equipamentos elétricos hospitalares baseou-se numa lista fornecida pela equipe técnica do prédio. Os equipamentos que, segundo a equipe, possuem potência significativa estão apresentados no Apêndice A. Esses equipamentos integram uma potência de 238,155 kW.

Já para aparelhos raio-x, tomógrafos e autoclaves, não se considerou a potência máxima, mas a potência de *stand-by* que equivale à média de 4,34% da potência ¹, de acordo com medições do laboratório do Serviço Técnico de Desempenho e Segurança de Equipamentos e Materiais Elétricos do IEE (DESEME - IEE). A Tabela 3.2 apresenta estes equipamentos com a suas respectivas potências máxima e de *stand-by*.

Já para os equipamentos mais abundantes foi levantado os dados constantes no banco de dados de patrimônio da USP 3.3. A potência máxima destes equipamentos somam 227,140 kW.

Tem-se, portanto, uma potência total de equipamentos elétricos igual a 481,46 kW que somados com a iluminação já resulta numa potência de aproximadamente 791 kW, mais do que a metade da potência média horária do prédio. Considerando os meses de maio a agosto, a potência de 791 kW aproxima-se com o terceiro quartil da potência horária medida.

¹O levantamento realizado apenas considerou consumo de tomógrafos e aparelhos raio-x. Por ausência de dados, convencionou-se utilizar a mesma razão para autoclaves, apesar de estes não terem a mesma natureza de funcionamento que tomógrafos e aparelhos de raio-x.

Tabela 3.2: *Aparelhos raio-x, tomógrafos e autoclaves: potência máxima e de stand-by.*

Equipamento	Potência máxima (W)	Potência de stand-by (W)
Aparelho de raios-x	2.200	95,57
Aparelho de raios-x	65.000	2.823,76
Aparelho de raios-x	50.000	2.172,13
Aparelho de raios-x	40.000	1.737,70
Aparelho de raios-x	80.000	3.475,40
Tomógrafo	80.000	3.475,40
Autoclave	4.000	173,77
Autoclave	18.000	781,97
Autoclave	18.000	781,97
Autoclave	15.000	651,64
TOTAL (kW)		161,69

Tabela 3.3: *Computadores, notebooks, ventiladores, refrigerador e freezer: quantidade e potência total*

Equipamento	Potencia (W)	Quantidade	Potência - Total (W)
Computador	130	861	111.930
Notebook	54	60	3.240
Ventilador	130	594	77.220
Refrigerador	250	115	28.750
Freezer	400	15	6.000
TOTAL (kW)			227,14

3.1.2.4 Sistema de climatização

Há ambientes do prédio climatizadas com sistemas centrais, como ambientes climatizados por sistemas modulares. Os sistemas centrais são constituídos por duas centrais de água gelada (CAG) com condensação a ar. Os sistema autônomos consistem em 205 equipamentos, 192 do tipo *split* e 13 do tipo janela. Existem alguns equipamentos modulares para aquecimento, porém estes se reduzem a poucas unidades. A Figura 3.6 apresenta a planta baixa do HU-USP com a identificação das áreas condicionadas e o tipo de equipamento de condicionamento.

Uma das centrais da água gelada, que convencionou-se ser chamada de CAG1, atende áreas dos centros cirúrgico e obstétrico. Ela conta com dois resfriadores cujas informações estão apresentadas na tabela 3.4. Ambos equipamentos totalizam uma capacidade de refrigeração nominal de 596 kW (170 TR). A Figura 3.7 traz fotos destes dois resfriadores.

Já os *fan coils* da CAG1 estão apresentados na Tabela 3.5. Estes *fan coils* somam uma capacidade de refrigeração total de 543 kW (154 TR), inferior à capacidade total dos dois resfriadores da CAG1, de 596 kW (170 TR).

A outra central de água gelada, CAG2, atende áreas pertencentes ao setor de radiografia. Ela possui um resfriador com 237 kW (67,3 TR) de capacidade nominal de refrigeração da marca

Figura 3.6: Planta baixa do HU-USP com a identificação das áreas condicionadas.

Tabela 3.4: Levantamento dos resfriadores componentes da CAG1.

	Resfriador 1	Resfriador 2
Capacidade	283,4 kW (80,6 TR)	312,9 kW (89 TR)
Marca	Chiller Trane Company	Chiller Trane Company
Modelo	CGAB080	RTAA090
COP	4,78	3,7
Número de compressores	4	2
Temperatura de saída da água gelada	9,5°C	
Número e tipo de bombas	3 - Velocidade constante

(a) CAG 1 - Foto do resfriador 1

(b) CAG 1 - Foto do resfriador 2

Figura 3.7: Fotografia dos dois resfriadores que compõem a CAG
1

Tabela 3.5: Fan coils integrantes da CAG1

Descrição	Marca	Modelo	Capacidade (kW)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)
FC11	Trox do Brasil	TKM 24	19,9	0,61
FC12	Trox do Brasil	TKM 24	19,9	0,61
FC13	Trox do Brasil	TKM 24	19,9	0,61
FC14	Trox do Brasil	TKM 24	19,9	0,61
FC15	Trox do Brasil	TKM 24	19,9	0,61
FC16	Trox do Brasil	TKM 24	19,9	0,61
FC17	Trox do Brasil	TKM 24	19,9	0,61
FC18	Trox do Brasil	TKM 24	19,9	0,61
FC19	Trox do Brasil	TKM 24	19,9	0,61
FC20	Trox do Brasil	TKM 24	20,6	0,61
FC21	Trox do Brasil	TKM 59	55,2	1,56
CF22	Trox do Brasil	TKM 59	45,4	1,42
FC23	Trox do Brasil	TKM 47	42,8	1,28
FC24	Trox do Brasil	TKM 59	47,7	1,42
FC25	Trox do Brasil	TKM 59	51,9	1,42
FC32	Trox do Brasil	TKM 24	26,1	0,62
FC39	Trox do Brasil	TKM 74	34,4	2,08
FC41	Trox do Brasil	TKM 24	20,6	0,62
FC42	Trox do Brasil	TKM 24	20,1	0,57

Trane Company, modelo CGAD070, COP nominal de 3,7 e temperatura de saída de água de 9,0°C. A fotografia deste resfriador apresenta-se na Figura 3.8, este possui quatro compressores e está conectado a duas bombas de velocidade constante.

Figura 3.8: Fotografia do chiller da CAG 2

A CAG2 possui 6 *fan coils* cujas capacidade de refrigeração estão apresentadas na Tabela 3.6. Estes *fan coils* integralizam uma capacidade de refrigeração nominal de 234 kW (66 TR), também inferior á capacidade de refrigeração do resfriador a ele ligado.

Tabela 3.6: *Fan coils integrantes da CAG2*

Fan coil	Marca	Capacidade de refrigeração nominal (kW)
<i>Fan coil 1</i>	Trane	43,96
<i>Fan coil 2</i>	Trane	45,19
<i>Fan coil 3</i>	Trane	28,63
<i>Fan coil 4</i>	Trane	44,07
<i>Fan coil 5</i>	Trox	17,58
<i>Fan coil 6</i>	Trox	54,51

Quanto aos equipamentos autônomos, estes se encontram pulverizados ao longo do edifício atendendo áreas com finalidades diversas. Além da marca e ano de fabricação das máquinas, foram identificados nas etiquetas as seguintes informações nominais: capacidade de refrigeração, COP e potência elétrica. Aquelas informações que não puderam ser identificadas nas visitas e dados do patrimônio, foram consultadas informações em sites de fabricantes e revendedores. Nos casos de valores indisponíveis de COP, adotou-se a média do COP de todos equipamentos do prédio, igual a 2,67. As informações de todos equipamentos podem ser consultadas no Apêndice B. Os dados nominais de todos equipamentos totalizam 451 TR de capacidade de refrigeração e aproximadamente 560 kW de potência elétrica.

A Figura 3.10 classifica os equipamentos autônomos identificados no HU-USP de acordo com as faixas de ano de fabricação. A escolha destas faixas de ano baseou-se nas datas de publicação das portarias do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) que estabelecem as faixas de eficiência para classificação dos equipamentos de

ar condicionado: INMETRO (2011) e INMETRO (2013) (estas faixas podem ser consultadas no Apêndice C). Pode-se verificar que equipamentos cujo ano de fabricação não pôde ser correspondem a 16 % do total.

Figura 3.9: Classificação dos equipamentos modulares identificados de acordo com seu ano de fabricação.

Removendo os equipamentos sem ano de fabricação e com ano de fabricação anterior a 2011, restam 36 equipamentos, 18 % do total inventariado. Classificando estes equipamentos restantes de acordo com a portaria INMETRO (2011) ou INMETRO (2013), chega-se à Figura 3.10. Identificam-se nesta figura, também, aqueles equipamentos cujo índice de eficiência encontra-se abaixo do nível mínimo estabelecidos nestas portarias (abaixo do selo E para a portaria INMETRO (2011) e abaixo do selo D para a portaria INMETRO (2013)).

Figura 3.10: Classificação dos equipamentos modulares identificados de acordo com seu índice de eficiência energética

Verifica-se que não foram identificados equipamentos selo E, apesar da portaria INMETRO (2011) trazer a faixa de eficiência para esta classificação. A maior parte dos equipamentos possuem selo C, enquanto os equipamentos mais eficientes (selo A) correspondem a 5 %. Aparelhos de ar condicionado com nível de eficiência abaixo do nível mínimo somam a mesma quantidade dos classificados com selo A, ou seja, duas unidades ou 5 % do total.

A substituição de equipamentos mais antigos e/ou com baixa eficiência por equipamentos classe A pode resultar em diminuição de quase 11% da potência nominal dos equipamentos modulares. Segundo Pereira, Lamberts e Ghisi (2013) os maiores COP encontrados nos *split* brasileiros giram em torno de 4,79 bem acima do mais alto COP encontrado no hospital que foi de 3,3.

Esta análise, se baseia nos valores identificados nas placas dos equipamentos de ar condicionado do HU-USP, não levando em consideração fatores como a degradação do COP do equipamento ao longo do tempo. Esta degradação pode ser acelerada devido a más condições de operação dos equipamentos, resultado de má instalação e falta de manutenção adequada.

3.1.2.5 Temperatura interna

Ao longo do mês de abril de 2018 fez-se a coleta das temperaturas dos corredores internos dos seis andares do HU-USP. A Figura 3.11 apresenta o resultado da medição da temperatura ao longo deste período, utilizando um intervalo de coleta de cinco minutos.

Figura 3.11: *Temperatura interna de ambiente não condicionados*

A média das leituras de temperatura por hora do dia possui o perfil apresentado na Figura 3.12. Percebe-se uma amplitude térmica que vai desde de um mínimo em torno dos 22° C e o máximo em torno dos 30°.

Além dos ambientes não condicionados, coletou-se também a temperatura e umidade relativa de um dos ambientes atendidos pela CAG1. O resultado destas medições estão apresentadas na Figura 3.13, utilizando 10 minutos como passo de coleta de dados.

Percebe-se a grande variabilidade da umidade relativa interna, variando numa faixa entre 46% e 72%. A norma NBR 7256 de 2005 (ABNT, 2005b), que versa sobre requisitos de projeto de sistema de ar condicionado em estabelecimentos de saúde, propõe uma faixa de 40% e 60% para a maioria dos ambientes hospitalares. De fato, ambas centrais de água gelada do prédio fazem apenas o controle da temperatura dos ambientes internos.

Figura 3.12: Ambientes não condicionados: variação da temperatura interna de acordo com as horas do dia

Figura 3.13: Corredor centro cirúrgico: temperatura e umidade relativa

3.1.2.6 Diagrama Unifilar

Para o funcionamento das instalações elétricas do prédio, o hospital dispõe de uma subestação principal que é ligado à rede de média tensão proveniente da rua. Esta cabine primária conta com acessórios de segurança e manobra e alimenta sete transformadores de potência a seco, responsáveis pelo rebaixamento da tensão para suprimento das cargas do HU-USP. A Figura 3.14 traz um diagrama unifilar simplificado da alimentação do prédio.

Figura 3.14: Diagrama unifilar simplificado da rede de alimentação elétrica do HU-USP.

Percebe-se da Figura 3.14 que o único trafo dedicado a alimentar um uso final de energia específico é o trafo 7, que alimenta uma das Centrais de Água Gelada presentes no HU-USP. Ao longo da auditoria foi possível identificar que esta central se refere àquela que atende o centro cirúrgico e obstétrico do hospital, ou seja, a CAG1, conforme nomenclatura adotada na seção 3.1.2.4.

3.1.3 Pesquisa da carga elétrica

Aqui enquadram-se o diagnóstico da carga elétrica onde enquadram-se a medição dos parâmetros elétricos dos transformadores abaixadores de tensão do prédio e a medição do consumo de energia elétrica dos equipamentos de condicionamento do *split*.

3.1.3.1 Medição dos transformadores elétricos do edifício

O monitoramento das grandezas elétricas no fornecimento de energia elétrica para as instalações interiores do HU foram realizadas por meio de dois sistemas de medição:

Medições locais (Transformadores): relativas à medição individual de cada um dos sete transformadores. Os sinais de tensão foram tomados, diretamente, dos barramentos de baixa tensão e os sinais de corrente são adquiridos fazendo-se uso de transformadores de corrente bipartidos de diferentes relações.

Medição global (Cabine primária): referente ao circuito total onde é referido o faturamento do consumo do hospital. Esta foi realizada na cabine primária pela instalação de um medidor de energia em paralelo com o medidor eletrônico local. Para esta medição foram utilizados três transformadores de potência e três transformadores de corrente no circuito de entrada em alta tensão.

A Tabela 3.7 apresenta os analisadores de energia utilizados nesses sistemas de medição. Apesar de terem sido instalados medidores de energia nos trafos 4 e 6, não serão apresentados os resultados destes pontos de medição uma vez que estes dados cobrem apenas os períodos em que eventualmente houve falha ou desligamento para manutenção dos demais transformadores.

Tabela 3.7: Equipamentos utilizados nas instalações

Ponto de medição	Analisador instalado
Entrada	Marca: Landis+Gyr; Modelo: SAGA1000
Trafo 1	Marca: ESB; Modelo: SAGA1000
Trafo 2	Marca: ESB; Modelo: SAGA1000
Trafo 3	Marca: ESB; Modelo: SAGA1000
Trafo 4	Marca: ESB; Modelo: SAGA1000
Trafo 5	Marca: ESB; Modelo: SAGA1000
Trafo 6	Marca: ESB; Modelo: SAGA1000
Trafo 7	Marca: Landis+Gyr; MODELO: SAGA4500

A Figura 3.15 apresenta diagramas de caixa representando a demanda horária de energia elétrica do prédio ao longo dos meses do ano, resultado do equipamento instalado no ponto da entrada de energia elétrica do HU-USP. A linha cinza que intercepta os diagramas de caixa representa a demanda horária média. Percebe-se uma potência média que varia entre 700 e 600kW, com pico de 1000kW no mês de março de 2018. Ao longo do ano apurado, esta demanda integra um consumo de energia elétrica de aproximadamente 5.194 MWh.

Figura 3.15: Perfil anual de demanda energética do HU-USP.

O resultado da medição do trafo 1 está segregado por meses em diagramas de caixa apresentados na Figura 3.16. Percebe-se pequena variabilidade mensal da demanda horária que permanece em torno de 220 kW ao longo de todo período do ano. No ano analisado, este transformador totaliza um consumo de energia de quase 1.837 MWh.

Figura 3.16: Perfil anual de demanda energética do trafo 1.

A demanda horária de energia do trafo 2 agregada por meses do ano está apresentado na Figura 3.17. A demanda horária média deste trafo gira entre 225 kW e 200 kW na maior parte do tempo, sendo que a demanda horária máxima registrada não ultrapassa os 400 kW. Integrando todo período de medição, as cargas conectadas a este transformador consomem uma energia elétrica total de 1.867 MWh.

Já os diagramas de caixa apresentando a demanda horária do trafo 3 estão incluídos na Figura 3.18. A demanda média deste trafo está quase em todo o período abaixo de 50 kW, com apenas uma ocorrência registrada acima de 75 kW. A integração das demandas horárias resulta em um consumo de 408 MWh.

A Figura 3.19 mostra os diagramas de caixa com as demandas horárias das cargas conectadas ao trafo 5. Percebe-se uma demanda média em torno de 40 kW com incremento gradativo a partir de outubro de 2017. Ao todo, as cargas deste trafo consomem 359 MWh.

Já a Figura 3.20 apresenta os diagrama de caixa da demanda horária de energia elétrica da CAG1, resultado do medidor conectado ao trafo 7. Nota-se uma média em torno dos 60kW, com

Figura 3.17: Perfil anual de demanda energética do trafo 2.

Figura 3.18: Perfil anual de demanda energética do trafo 3.

Figura 3.19: Perfil anual de demanda energética do trafo 5.

picos por volta dos 125kW. A sazonalidade da demanda energética deste equipamento não é muito regular, mas de modo geral percebe-se tendência de diminuição em meses de inverno e aumento em meses de verão. Ao longo do período apurado, o consumo de energia elétrica soma em torno de 477 MWh.

Figura 3.20: Perfil anual de consumo de energia elétrica da CAG1.

De modo a capturar o perfil de funcionamento deste sistema, constrói-se a Figura 3.21. Esta figura apresenta um gráfico da potência elétrica demandada pela CAG1 versus a temperatura externa registrada; a média da potência horária demandada por hora do dia; e consumo de energia elétrica integrado por dia da semana.

A Figura 3.21 dá uma visão do funcionamento da CAG1. Primeiramente, o gráfico da potência *versus* temperatura externa mostra como o funcionamento deste sistema varia de acordo com a temperatura externa. O teste R-quadrado resulta em um valor de 0,44 o que indica pouca relação entre as duas variáveis.

Já a demanda nas horas do dia indica que a CAG1 apresenta uma potência média basal de aproximadamente 45 kW com salto de consumo a partir das 6 horas da manhã. A demanda elétrica do sistema retorna ao patamar destes 45 kW às 23 horas.

Percebe-se pouca variação do consumo da CAG1 ao longo dos dias da semana. Entretanto, de modo geral, o consumo de energia elétrica do sábado e domingo são os menores verificados.

A participação de cada tráfego no consumo de energia elétrica do HU-USP está apresentado no gráfico pizza da Figura 3.22. Verifica-se que o tráfego 2 é aquele que mais demanda energia elétrica, enquanto o tráfego que menos demanda energia é o tráfego 5. A CAG1 exclusivamente atendida pelo tráfego 7, corresponde a 10 % do consumo energético do HU-USP.

3.1.3.2 Medição dos equipamentos de ar condicionado tipo *split*

Foram medidos o consumo de energia elétrica de 18 equipamentos de ar condicionado modulares tipo *split*. A Tabela 3.8 informa o período de medição destes equipamentos e, também, identifica a quantidade de equipamentos de ar condicionado que estão servindo um mesmo ambiente, conjunto que convencionou-se denominar de equipamentos integrados.

Figura 3.21: Perfil anual de consumo de energia elétrica da CAG1.

Figura 3.22: Participação dos trafos no consumo total do HU-USP.

Tabela 3.8: *Splits medidos - identificação do ambiente atendido e agregação caso atendam o mesmo ambiente*

Andar	Ambiente	Identificador segundo Apêndice B	Período Medição		Split por sala
			Instalação	Remoção	
1º	Conforto médico - Reunião	1_2	23 ago 2017	01 nov 2017	1
	Farmácia - Sala 1	1_11	09 ago 2017	23 ago 2017	1
	Farmácia - Armazenamento	1_12	07 ago 2017	23 ago 2017	2
		1_13	07 ago 2017	01 nov 2017	
2º	Laboratório 1 - Análise	2_6	01 nov 2017	09 abr 2018	6
	Laboratório 2 - Análise	2_19	18 ago 2017	07 dez 2017	5
	Hospital Dia	2_50	02 ago 2017	09 abr 2018	5
	Fisioterapia	2_52	09 ago 2017	05 out 2017	2
	Biblioteca	2_71	09 ago 2017	05 out 2017	3
		2_72	09 ago 2017	05 out 2017	
		2_73	09 ago 2017	05 out 2017	
	PSI ^a - Internação	2_81	20 out 2017	06 abr 2018	4
	PSA ^b - Sala de Engessamento	2_106	20 out 2017	09 abr 2018	1
	PSA - Internação	2_114	20 out 2017	06 abr 2018	1
	PSA - Internação	2_117	20 out 2017	06 abr 2018	1
	PSA - Internação	2_121	20 out 2017	06 abr 2018	1
3º	CPCE ^c - Sala Pesquisador	3_17	01 nov 2017	09 abr 2018	1
	UTI ^d Neonatal	3_24	23 ago 2017	05 out 2017	3

^aPronto Socorro Infantil

^bPronto Socorro Adulto

^cCentro de Pesquisa Clínica e Epidemiológica

^dUnidade de Tratamento Intensivo

O desenho do consumo elétrico destes equipamentos com a descrição da média da potência nas horas do dia e o consumo por dia da semana estão apresentados no Apêndice D.

3.2 Avaliação da disponibilidade de dados

Para qualificar o volume de dados disponíveis do HU-USP, compara-o com os utilizados para calibrar as edificações nos quais foram testadas as metodologias avaliadas. Em relação às cargas constantes, definem-se os seguintes aspectos comparativos:

Segregação: se há a segregação da medição das cargas constantes: iluminação e equipamentos de tomada.

Período: qual o período de medição das cargas constantes. No caso de não haver desagregação, avalia-se com um "NA", não se aplica.

Já para o sistema de climatização, tem-se os seguintes pontos a serem comparados:

Tipo: tipo do sistema de climatização do edifício.

Segregação: se há medição individualizada do sistema de climatização. No caso de não haver desagregação, avalia-se com um "NA", não se aplica.

Abrangência: identificação se a medição é feita no conjunto do sistema de climatização ou individualiza a medição dos seus componentes, como resfriadores, bombas, etc. Para sistemas modulares não há esta diferenciação.

Período: qual o período de medição dos equipamentos de climatização abrangidos. No caso de não haver desagregação, avalia-se com um "NA", não se aplica.

O resultado da comparação da disponibilidade de informações sob a luz destes aspectos são evidenciados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9: Comparação da disponibilidade de dados

	Cargas constantes		Sistema de climatização				Outras medições
	Segregação	Período de medição	Tipo	Segregação	Abrangência	Período de medição	
HU-USP	Não	NA	2 CAGs; 204 <i>splits</i>	Sim	1 CAG sem individualização e 16 <i>splits</i>	1 CAG - Ano; <i>splits</i> - semanas	Temperatura interna; Registro do ponto eletrônico de funcionários
Yoon, Lee e Claridge (2003)	Sim	Março	CAG e caldeira a gás	Sim	Sem individualização	Ano	Consumo de gás na caldeira
Westphal e Lamberts (2005)	Não	NA	CAG	Não	NA	NA	Não
O'Neill et al. (2011)	Sim	Ano	CAG	Sim	Individualização: Resfriadores e <i>fan coils</i>	Julho	Não
Raftery, Keane e Costa (2011b)	Sim	Ano	CAG e água quente	Sim	Sem individualização	Ano	Banco de dados de ocupação, medição de vazão, conferência da temperatura de <i>setpoint</i> nos terminais VAV
Lam et al. (2014)	Sim	Ano	Bomba de calor geotérmico	Sim	Sem individualização	Setembro - Dezembro	Medição da ocupação com pedômetros e <i>softwares</i> de detecção de tempo de uso de computadores

Desta comparação pode-se perceber que nenhuma das abordagens de calibração avaliadas lidam com edifícios com sistema de climatização do tipo modular. Vale também a ressalva de que as metodologias são testadas em edifícios com sistema de climatização funcionando sob automação, sem intervenção direta do usuário. Estes aspectos já indicam as características únicas do HU-USP, bem como levantam o questionamento se é possível calibrar a simulação de suas demandas energéticas.

Nota-se também a diferença no volume de dados disponíveis para efetuar a calibração do consumo de energia do edifício. Os dois edifícios-teste que mais possuem dados disponíveis foram aqueles avaliados por Raftery, Keane e Costa (2011b) e por Lam et al. (2014). Esta disponibilidade de dados provavelmente afeta o êxito de calibração do prédio estudado.

De fato, percebe-se que apenas a Raftery, Keane e Costa (2011b) conseguem atingir um modelo calibrado para o sistema de condicionamento no período de um ano e na escala horária. Yoon, Lee e Claridge (2003) é capaz de calibrar o sistema de condicionado, porém numa escala mensal. Já Lam et al. (2014) calibra na escala horária, porém apenas para o período entre setembro e dezembro.

3.3 Definição do método de calibração do HU-USP

A metodologia de calibração da energia elétrica simulada do HU-USP baseia-se na abordagem e ferramentas aqui apresentadas.

3.3.1 Abordagem de calibração

Pelo seu potencial de generalização e êxito de sua aplicação em um edifício real, escolhe-se a abordagem de Raftery, Keane e O'donnell (2011a) para calibração da simulação do HU-USP. Entretanto sugerem-se modificações de ordem prática afim de facilitar o processo.

A primeira é em relação ao zoneamento proposto pelos autores. Como o condicionamento do HU-USP consiste em um *mix* entre equipamentos centrais e modulares, será feito um zoneamento em duas etapas. A primeira consiste em zonas térmicas agregadas, de forma a representar fielmente apenas as zonas térmicas ligadas às CAG's; e a segunda de forma a representar fidedignamente o zoneamento real encontrado no edifício, com a pulverização das zonas térmicas dedicadas aos equipamentos de pequeno porte, tipo janela e *split*. Convencionou-se chamar a primeira etapa de agregação de fase de A e a segunda etapa, de fase B.

Quanto ao uso de um *software* de registro. Utilizou-se um planilha com a identificação de todas versões. Para identificação das fases utilizou-se um sufixo "A" ou "B", seguido de um número que indica a ordem do ajuste. Em etapas de identificação de erros, convencionou-se utilizar a letra "E" após o sufixo de identificação da fase. Em etapas de análise de sensibilidade, usou-se a letra "S" após o sufixo da fase. Assim, por exemplo, a versão AE3 endereça-se à 3ª etapa de correção de erros da fase A.

3.3.2 Ferramenta de simulação e de avaliação de acurácia

Para representar a geometria do edifício do Hospital Universitário e inserção de elementos do sistema de climatização, foi utilizado o *plug-in Openstudio* versão 2.5.0 na versão 2017 do *Sketchup Maker*. As medidas das dimensões de paredes basearam-se em plantas do projeto do prédio no formato CAD que foram importadas à plataforma *Sketchup*. As alterações dos elementos construtivos e das agendas também foram realizadas utilizando a interface gráfica deste *plug-in*.

Apesar da edição dos principais elementos ocorrer dentro do ambiente do *Openstudio*, optou-se por realizar a simulação através do *EnergyPlus* versão 8.9.0. Para isto, o projeto foi exportado para o formato *idf*, legível pelo *EnergyPlus*.

Para a determinação se a simulação está calibrada ou não serão utilizados os limites preconizados pela diretriz da ASHRAE (2002) e USDOE (2015). Estes limites correspondem, para o Erro Sistemático Médio (ESM), 5% na escala mensal e para o Coeficiente de Variação do Erro Quadrático Médico, 15% na escala mensal e 30% na escala horária. Não se adota o limite do ESM horário porque este possui aproximadamente o mesmo valor numérico que o ESM mensal. Assim, procurou usar como crivo para o ESM o seu limite mais rigoroso, uma vez que o limite para a escala horária é de 10%, o dobro da escala mensal.

Calibração da simulação do consumo de energia elétrica do Hospital Universitário da USP

A partir dos materiais e métodos levantados no Capítulo 3, realiza-se neste capítulo a calibração da estimativa de consumo de energia elétrica de um modelo *EnergyPlus* do Hospital Universitário da USP.

4.1 Preparação para calibração

As informações disponíveis acerca do edifício convertem-se em evidências a partir do qual a calibração se baliza. A Tabela 4.1 apresenta a lista com todas evidências coletadas e a sua hierarquização de acordo com o proposto por Raftery, Keane e O'donnell (2011a). A partir destas evidências, prevê-se nas seguintes tópicos construir um modelo inicial de simulação do consumo energético do HU-USP, bem como detalhar os ajustes realizados para calibrar esta simulação.

Quanto aos dados climáticos, foi utilizado o arquivo climático referente à estação localizada em Congonhas - São Paulo no ano de 2005, disponibilizada pelo site do *EnergyPlus* (NREL, 2018). A Figura 4.1 apresenta o diagrama de violino com a distribuição das medições de temperatura desta estação. Considerou-se horário de verão entre 3º domingo de outubro até 3º sábado de fevereiro.

Como não se verifica a segregação de cargas específicas nos trafos que alimentam o HU-USP, apenas dois pontos de medição podem ser utilizados como referência contra o qual os resultados do modelo podem ser comparados: a medição da entrada de energia elétrica do HU-USP (resultado das medição apresentados na Figura 3.15, Seção 3.1.3) e a medição do trafa 7 (resultado das medição apresentados na Figura 3.20, Seção 3.1.3) o qual alimenta a CAG1, segundo o diagrama unifilar simplificado da Seção 3.1.2.6.

Tabela 4.1: Hierarquização das evidências coletadas

TIPO DE EVIDÊNCIA	DESCRIÇÃO	ID
Dados registrados de medições	Medição da CAG1	a
	Medição de 19 equipamentos <i>split</i>	b
	Registro do ponto eletrônico de funcionários	c
	Temperatura do corredor do centro cirúrgico	d
	Temperatura dos corredores do prédio	e
Medição pontual	—	
Levantamento e verificação física (pesquisa de campo)	Inventário das lâmpadas do prédio.	f
	Identificação das características nominais nos <i>splits</i> , COP, capacidade de refrigeração e potência elétrica.	g
	Investigação visual da planta baixa do projeto.	h
	Identificação de áreas condicionadas e tipo de condicionamento.	i
	Fotografias.	j
Entrevistas a funcionários e operadores	Temperatura da água na entrada e saída dos resfriadores.	k
	Material das paredes.	l
	Lista de equipamentos elétricos.	m
	Tipo de acionamento dos ventiladores da CAG1	n
Planilha de propriedade de materiais	Planilha de Ordenes et al. (2003)	o
Documentos de operação (manuais de operação e manutenção, O&M)	Manuais trane: Trane do Brasil (1998), Trane do Brasil (2006), Trane do Brasil (2012)	p
Documento da instalação (desenhos e plantas "as built")	Planta baixa do projeto.	q
	Projeto civil do corpo de bombeiros.	r
Estudos de referência "benchmark" e guias de boas práticas	Curvas de performance de equipamentos de ar condicionado propostas por Cutler et al. (2013)	s
	Características típicas de ar condicionados <i>split</i>	x
	Metodologia de Raftery, Keane e O'donnell (2011a)	t
Normas, especificações e guias	ASHRAE 90.1 (2010) (ASHRAE, 2010)	u
	ASHRAE 189.1 (2009) ASHRAE (2009b)	v

Figura 4.1: Distribuição mensal da temperatura do ar coletada pela estação climática de Congonhas. (Baseada nos dados de NREL (2018))

4.2 Fase A - Ajuste baseado em evidências

Os ajustes baseados em evidências da fase A estão apresentados na Tabela 4.2. Pode-se perceber que prevê-se apenas ajustes nas cargas constantes e equipamentos de ar condicionado de grande porte.

Tabela 4.2: Fase A: Revisão das versões

Versão	Mudança	Evidência
modeloA00	Modelo inicial	i, j, q, r, u, v
modeloA01	Alteração da densidade de iluminação	f
modeloA02	Alteração da densidade de equipamentos elétricos	m
modeloA03	Alteração da agenda de iluminação e equipamentos elétricos	c
modeloA04	Inserção dos dados meteorológicos representativos da USP	w
modeloA05	Atualização de dados construtivos	l, o
modeloA06	Mudança da temperatura de <i>setpoint</i> das zonas térmicas atendidas pela CAG1	d
modeloA07	Alteração das características dos resfriadores	g, j, p
modeloA08	Velocidade constante: bombas e ventiladores	g, j, p

A descrição dos ajustes identificados na Tabela 4.2, bem como seus efeitos em termos dos indicadores de acurácia, são feitos nas subseções seguintes.

4.2.1 modelo00 - modelo inicial

A Figura 4.2 mostra o modelo digital do HU-USP construído. A altura do pé direito no primeiro andar é de 4,86 m; no segundo, de 5,50 m e nos demais igual a 4,32 m. A face norte foi rotacionada a 30° no sentido horário.

Figura 4.2: Modelo Sketchup no Hospital Universitário da USP

O modelo totalizou 179 espaços integrados em aproximadamente 35.568 m². A divergência entre a área do modelo e a área informada pelo site do HU-USP deve-se provavelmente a arredondamentos dos valores reais encontrados. Esses valores divergem, também, do anuário

estatístico digital da USP USP (2017a) que aponta uma área total edificada de 45.099 m². As áreas condicionadas totalizaram 12.213 m², no qual 2.192² são condicionadas por Centrais de Água Gelada. A área envidraçada do modelo integra 7,75% da envoltória.

Como não há carga expressiva de aquecimento, não se utilizou dimensionamento do sistema de condicionamento para dias de inverno. O dia crítico de verão desta estação corresponde ao dia 21 de fevereiro com as seguintes condições de projeto:

- Frequência anual de 0,4 % para condição extrema de temperatura de bulbo seco. Segundo ASHRAE (2009a), esta informação é utilizada para dimensionar equipamentos de refrigeração, como resfriadores e sistemas de ar condicionado unitários.
- Frequência anual de 0,4 % para condição extrema de ponto de orvalho. Segundo ASHRAE (2009a), esta informação é utilizada para dimensionar sistemas de desumidificação.
- Frequência anual de 0,4 % para condição extrema de entalpia. Segundo ASHRAE (2009a), esta informação é utilizada para calcular cargas de resfriamento provenientes de infiltração e/ou ventilação.
- Frequência anual de 0,4 % para condição extrema de temperatura de bulbo úmido. Segundo ASHRAE (2009a), esta informação é utilizada para dimensionar torres de resfriamento, resfriadores evaporativos e sistemas de ventilação de ar fresco.

As zonas térmicas que abrangem ambientes do centro cirúrgico, centro obstétrico e radiografia foram associadas a um difusor simples ligado a uma central de água gelada com as seguintes características-padrão fornecidas pelo *Energyplus*:

Resfriador com condensação a ar: COP nominal: 5,5; temperatura de saída da água: 6,67°C; temperatura de entrada da água: 29,4°C; capacidade nominal de resfriamento: *autosized*¹.

Bomba de velocidade variável: vazão nominal: *autosized*; pressão: 179.352 Pa; consumo elétrico nominal: *autosized*; eficiência do motor: 90 %.

Fan coil de velocidade variável: disponibilidade: sempre disponível; eficiência do ventilador: 60 %; pressão total: 1.017 Pa; vazão nominal máxima: *autosized*; eficiência do motor: 93 %.

Caixa de mistura: vazão máxima de ar externo: *autosized*; vazão mínima de ar externo: *autosized*.

Agregaram-se as zonas condicionadas por equipamentos de pequeno porte por setor ao invés de salas individuais. A cada uma destas zonas foi associado um sistema de ar condicionado compacto do tipo *Packaged Terminal Air Conditioner* (PTAC), todos com as mesmas características:

Caixa de mistura: vazão máxima de ar externo: *autosized*; vazão mínima de ar externo: *autosized*.

¹No *EnergyPlus*, utilizar a configuração de dimensionar automatizadamente significa fazer o cálculo de dias de projeto para entregar as menores configurações do sistema de climatização necessárias para adequadamente condicionar o espaço.

Serpentina de aquecimento: desligada.

Serpentina de resfriamento: capacidade nominal de resfriamento: *autosized*; COP: 3,0; vazão de ar: *autosized*; razão nominal de calor sensível: *autosized*.

Ventilador: disponibilidade: sempre disponível; eficiência do ventilador: 60 %; pressão: 250 Pa; vazão: *autosized*; eficiência do motor: 80 %; posição do ventilador: aspira ar através da serpentina.

Quanto à temperatura de *setpoint* dos ambientes condicionados, foram assumidos os valores sugeridos pela norma brasileira NBR 7.256 que estabelece faixas de temperatura aconselhadas para ambientes hospitalares típicos (ABNT, 2005a). Foi adotada uma média de temperatura de *setpoint* de 24°C para todos ambientes, com exceção das salas de operação e de parto, que foi adotada uma temperatura de 22°C, e das salas de UTI neonatal, com temperatura de 25°C.

Os ambientes criados no modelo inicial correspondem àqueles tipificados na Tabela 4.3, conforme normas ASHRAE (2009b) e ASHRAE (2010). Desta, basearam-se características de ambientes hospitalares; daquela, as características de ambientes de escritório.

Tabela 4.3: Tipologia dos ambientes no modelo digital

Norma ASHRAE	Tipo de ambiente	Número de ambientes	Área (m ²)
189.1 (2009) - Escritório	Sala de descanso	2	732
	Conferência	4	723
	Sala eletromecânica	2	705
	CPD	3	49
	Escritório aberto	4	1.969
	Armazém	6	2224
	Sala de vendas	1	116
90.1 (2010) - Hospital	Corredor	29	3.864
	Refeitório	1	486
	Sala de emergência - Exames	24	1.952
	Sala de emergência - Ferimentos	2	571
	Sala de emergência - Espera	7	998
	UTI - Estação de enfermagem	3	276
	UTI - Estação de trabalho	1	206
	UTI - Sala de pacientes	7	1.259
	Cozinha	2	1.311
	Laboratório	6	1.681
	Estação de enfermagem	7	2.110
	Sala de operação	1	3.057
	Escritório	27	3.734
	Corredor de pacientes	19	2.076
	Sala de pacientes	18	3.455
	Fisioterapia	1	215
	Radiologia	2	1.555
TOTAL		179	35.324

Foram utilizados o conjunto de materiais típicos de um hospital de acordo com a norma ASHRAE (2010) para a zona climática 2 definida pela ASHRAE, conforme Tabela 4.4.

Em todas as janelas foram implementados elementos de sombreamento. A Tabela 4.5 apresenta os detalhes construtivos das portas, janelas e elementos de sombreamento utilizados no modelo.

Tabela 4.4: Características dos materiais usados nas superfícies do modelo digital do HU-USP

Superfícies Internas					
Tipo de Superfície	Material	Espessura (mm)	Condutividade térmica ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	Massa específica (kg.m^{-3})	Calor específico ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
Parede	Estuque	253,00	0,6918	1858,00	837,00
	Concreto	203,20	1,311	2240,00	836,80
	Isolamento	36,54	0,049	265,00	836,80
	Gesso	12,70	0,160	784,90	830,00
Piso	Concreto	101,60	1,311	2240,00	836,80
Teto	Membrana	9,50	0,160	1121,29	1460,00
	Isolamento	170,14	0,049	265,00	836,80
	Cobertura metálica	1,50	45,006	7680,00	418,40
Superfícies Externas					
Tipo de Superfície	Material	Espessura (mm)	Condutividade térmica ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	Massa específica (kg.m^{-3})	Calor específico ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
Parede	Placa de gesso	19,00	0,160	800,00	1090,00
	Câmara de ar	Resistência térmica: $0,150 \text{ m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$			
	Placa de gesso	19,00	0,160	800,00	1090,00
Piso	Azulejo acústico	19,10	0,060	368,00	590,00
	Câmara de ar	Resistência térmica: $0,180 \text{ m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$			
	Concreto leve	101,60	0,530	1280,00	840,00
Cobertura	Concreto leve	101,60	0,530	1280,00	840,00
	Câmara de ar	Resistência térmica: $0,180 \text{ m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$			
	Azulejo acústico	19,10	0,060	368,00	590,00

Tabela 4.5: Características dos materiais usados nas subsuperfícies do modelo digital do HU-USP

Tipo de Superfície	Material	Espessura (mm)	Condutividade térmica ($\text{W} . \text{m}^{-1} . \text{K}^{-1}$)	Massa específica ($\text{kg} . \text{m}^{-3}$)	Calor específico ($\text{J} / \text{kg} . \text{K}$)
Portas	Superfície metálica	0,80	45,280	7824,00	500,00
	Placa de isolamento	25,40	0,030	43,00	1210,00
Janelas	Vidro simples	Fator U: $4,258698 \text{ W} . \text{m}^{-2} . \text{K}^{-1}$			
Elementos de sombreamento	Persianas	Ângulo: 45° ; Condutividade térmica: $221,000 \text{ W} . \text{m}^{-1} . \text{K}^{-1}$ Largura da lâmina: 25,00 mm; Distância entre as lâminas: 18,75 mm;			

A densidade elétrica do sistema de iluminação e dos equipamentos elétricos e densidade de pessoas foram definidos conforme valores definidos pelas normas ASHRAE (2009b) e ASHRAE (2010). Tais valores variam de acordo com os ambientes apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: *Intensidade elétrica de iluminação e equipamentos elétricos e densidade de pessoas de acordo com os ambientes definidos pelas normas ASHRAE 186.1 (2009) e ASHRAE 90.1 (2010)*

Norma ASHRAE	Ambiente	Densidade de potência de iluminação (W/m²)	Densidade de potência de equipamentos (W/m²)	Densidade de pessoas (pessoas/100m²)
189.1 (2009) - Escritório	Sala de descanso	11,625	48,007	53,819
	Conferência	12,593	3,982	53,819
	Sala de elevador	14,531	2,906	0
	CPD	10,656	16,791	5,381
	Escritório aberto	10,656	7,642	5,651
	Armazem	7,750	0	0
	Sala de vendas	4,843	41,441	1,076
90.1 (2010) - Hospital	Corredor	9,579	0	1,076
	Refeitório	6,996	7,857	10,763
	Sala de emergência - Exames	24,326	11,732	21,527
	Sala de emergência - Ferimentos	24,326	31,43	21,527
	Sala de emergência - Espera	24,326	21,204	21,527
	UTI - Estação de enfermaria	9,364	15,715	5,381
	UTI - Baia	12,378	23,572	21,527
	UTI - Sala de pacientes	6,673	23,572	5,381
	Cozinha	10,656	58,878	5,381
	Laboratório	19,482	34,659	5,381
	Estação de enfermaria	9,364	8,180	7,685
	Sala de operação	20,343	31,43	5,381
	Escritório aberto	11,947	7,857	7,523
	Corredor de pacientes	9,579	0	1,076
	Sala de pacientes	6,673	15,715	5,381
	Sala de fisioterapia	9,795	11,732	5,381
	Radiologia	14,208	78,361	5,381

O perfil de funcionamento de equipamentos elétricos e de escritório foi adotado conforme o apresentado na Figura 4.3. Os perfis baseiam-se nas normas ASHRAE (2009b) e ASHRAE (2010).

Já o perfil de funcionamento do sistema de iluminação é apresentado na Figura 4.4. Como o perfil dos equipamentos elétricos, estes também foram baseados nas normas ASHRAE (2009b) e ASHRAE (2010).

A Figura 4.5 apresenta as agendas de equipamentos elétricos, os quais foram baseados na norma ASHRAE 186.1 (2009) e 90.1 (2010).

Para áreas tipo escritório foi associada uma infiltração de 0,00030226 m³/s por m² de superfície externa. Nas áreas do tipo hospital, a infiltração em função da superfície externa foi de 0,000226568 m³/s.

Figura 4.3: Agenda de equipamentos elétricos

Figura 4.4: Agenda do sistema de iluminação

Figura 4.5: Agenda de ocupação

A Tabela 4.7 apresenta os indicadores de qualidade obtidos no modelo inicial. Convencionou-se identificar com a cor azul os indicadores estatísticos que atingem os limites das normas consideradas: 5 % para ESM, 15 % para CV EQM mensal e 30 % para CV EQM horário.

Tabela 4.7: *Modelo inicial: indicadores de qualidade do prédio todo e da CAG1*

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%) mensal	CV EQM (%) horário
HU-USP	modeloA00	3min55s	-12,39	13,44	39,89
CAG1	modeloA00	3min55s	-69,28	77,46	80,61

Uma vez que um valor negativo de ESM significa estimativa do modelo maior que a medição, pode-se afirmar que o modelo inicial está subestimando o consumo de energia do sistema energético do HU-USP. Desta forma, o exercício de calibração, neste primeiro momento, vai em direção a aumentar a previsão de consumo de energia elétrica do modelo. Não obstante, pode-se observar que o modelo inicial da edificação já encontra-se dentro da faixa das normas em termos de CV EQM mensal.

4.2.2 modeloA01

A densidade luminosa média de todos espaços foi alterada para 8,69 W/m², obtido da divisão entre a potência total da iluminação inventariada e a área do modelo inicial. A Tabela 4.8 mostra os indicadores de qualidade para o modelo versão A01 em comparação com a versão A00, inicial.

Tabela 4.8: *modeloA01 e modeloA00: comparação do tempo de simulação e indicadores de qualidade*

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%) mensal	CV EQM (%) horário
HU-USP	modeloA00	3min55s	-12,39	13,44	39,89
	modeloA01	3min59s	-20,79	21,43	37,79
CAG1	modeloA00	3min55s	-69,28	77,46	80,61
	modeloA01	3min59s	-72,21	80,33	83,22

Nota-se a intensificação das diferenças entre simulação e medição quase em todos indicadores de acurácia. Houve melhora da qualidade do modelo apenas em termos de CV EQM horário, evidenciando já de início a relação não linear entre as variações dos indicadores estatísticos sugeridos pela literatura.

4.2.3 modeloA02

A densidade média de equipamentos elétricos de todos espaços foi alterada para 19,70 W/m², obtido a partir da soma da potência dos equipamentos informados e a soma das áreas que possuem equipamentos elétricos, desconsiderando portanto corredores e salas de espera, totalizando 24.445 m². A Tabela 4.9 mostra os indicadores de qualidade para o modelo versão A02 em comparação com a versão A01.

Tabela 4.9: *modeloA02 e modeloA01: comparação do tempo de simulação e indicadores de qualidade*

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%) mensal	CV EQM (%) horário
HU-USP	modeloA01	3min59s	-20,79	21,43	37,79
	modeloA02	3min36s	-23,83	24,39	39,13
CAG1	modeloA01	3min59s	-72,21	80,33	83,22
	modeloA02	3min36s	-73,80	81,90	84,64

Os indicadores estatísticos sofrem aumento em todas dimensões de comparação. Como a intensidade média de equipamentos elétricos advém de uma evidência de hierarquia inferior à evidência da intensidade de iluminação, prevê-se maior incerteza na representação da intensidade média de equipamentos elétricos real.

4.2.4 modeloA03

Alterou-se as agendas de funcionamento da iluminação e equipamentos elétricos a partir do cômputo de entrada e saída de funcionários feito por ponto eletrônico ao longo dos meses junho, julho e agosto de 2017. Como não existe sistema de automação nesses equipamentos, considerou-se que a variação da ocupação corresponde à variação do acionamento do sistema de iluminação e de equipamentos elétricos. Para esta conversão, os dados de número funcionários devem ser traduzidos para unidades percentuais. Este processo de conversão está descrito a seguir.

De acordo com o horário de entrada e saída de funcionários, foram identificadas no HU-USP duas tipologias de áreas: ambientes hospitalares e áreas de escritório. Para cada uma destas tipologias, agrega-se de hora em hora todo cômputo de entrada e saída de funcionários. O número de funcionários que permanece é obtido da diferença entre entrada e saída que acumula a partir da primeira hora do dia em que o número de entradas é maior que número de saídas. A permanência máxima de uma tipologia é dividida da permanência do prédio (soma da permanência das duas tipologias) no mesmo horário. Na hora máxima, verifica-se a porcentagem necessária para atingir 100 %. Esta mesma quantidade é, finalmente, adicionada em todos horários.

Esta maneira de tratar os dados procura descrever a variabilidade do acionamento dos equipamentos elétricos de forma a considerar o horário de maior permanência como 100 %. Esta permanência máxima é comparado com a permanência total do prédio no mesmo horário. A diferença entre elas é tratada como uma carga de base percentual que deve ser acrescida de todas as outras. Pela natureza dos equipamentos elétricos tipicamente encontrados em escritório, esta carga de base é somada apenas dos horários onde possui ocupação, que de acordo com os dados de junho, julho e agosto de 2017, ocorre entre 7h e 18h.

Para exemplificar este processo, a Tabela 4.10 apresenta os resultados de cada passo descrito. Como observado, às 5h é o primeiro horário do dia em que o número de entrada é maior que o de saída. Assim, a diferença entre entradas e saídas das 6h são somadas com a diferença obtida às 5h, e assim sucessivamente até às 4h (dados da 1h soma-se ao dados da 0h). O horário com a maior permanência é às 11h e, neste horário, a permanência total do prédio é de 11.492 funcionários. A permanência total do prédio é então dividida das permanência individuais (coluna *Razão Permanência*). Na última coluna, a quantidade necessária para a razão obtida às 11h alcançar 100 % (34,5 %) é somada de todas outras razões.

As Figura 4.6 apresenta o diagrama com os níveis de equipamentos elétricos dos ambientes hospitalares e áreas de escritório, tal como foram introduzidos no modelo A03.

Figura 4.6: Agenda de equipamentos elétricos em dias de semana conforme tipo de ambiente do HU-USP.

Para os níveis de iluminação, utilizou a mesma base de informação dos equipamentos elétricos, porém pela natureza dos equipamentos de iluminação, a variabilidade típica dos equipamentos elétricos foi reduzida. A Figura 4.7 apresenta o perfil diário do nível de iluminação assim como introduzido no modelo.

Nos finais de semana, ao invés de se considerar o valor máximo como 1, utilizou-se o quociente entre o 3º quartil das medições de dia de semana e o 3º quartil das medições de

Tabela 4.10: *Tabela-exemplo do procedimento de criação da agenda de equipamentos elétricos*

Horário	Entradas	Saídas	Permanência Horária	Razão Permanência	Nível de equipamentos elétricos
01:00	1	10	34	0,2 %	34,7 %
02:00	0	0	34	0,2 %	34,7 %
03:00	0	0	34	0,2 %	34,7 %
04:00	0	0	34	0,2 %	34,7 %
05:00	22	2	20	0,1 %	34,6 %
06:00	525	102	443	2,5 %	37,0 %
07:00	12906	5110	8239	47,0 %	81,5 %
08:00	2632	381	10490	59,8 %	94,3 %
09:00	595	109	10976	62,6 %	97,1 %
10:00	463	65	11374	64,8 %	99,3 %
11:00	243	125	11492	65,5 %	100,0 %
12:00	578	757	11313	64,5 %	99,0 %
13:00	6820	9189	8944	51,0 %	85,5 %
14:00	456	1409	7991	45,6 %	80,0 %
15:00	73	445	7619	43,4 %	77,9 %
16:00	163	2879	4903	28,0 %	62,4 %
17:00	22	1722	3203	18,3 %	52,7 %
18:00	143	727	2619	14,9 %	49,4 %
19:00	5320	6863	1076	6,1 %	40,6 %
20:00	83	726	433	2,5 %	37,0 %
21:00	9	117	325	1,9 %	36,3 %
22:00	9	265	69	0,4 %	34,9 %
23:00	0	26	43	0,2 %	34,7 %
00:00	0	0	43	0,2 %	34,7 %
Permanência máxima do prédio			17.542		
Diferença			34,5 %

Figura 4.7: *Agenda de iluminação em dias de semana conforme tipo de ambiente do HU-USP.*

sábado e de domingo. Assim, para sábado o pico de permanência ocorre às 7h e o quociente é de 78 % e, para domingo, o valor máximo de permanência é às 10h, e seu quociente é de 75 %. Este procedimento é uma forma de sinalizar que as maiores medições analisadas no final de semana correspondem a uma fração das maiores medições ocorridas durante a semana (assinaladas como 100 %), assumindo que ambas são bem representadas pelo 3º quartil, ou seja, limite a partir do qual encontram-se 25 % dos valores mais elevados. A Figura 4.8 apresenta os níveis de equipamentos elétricos nos finais de semana que foram apenas considerados para os ambientes hospitalares, uma vez que não se verificou atividade nas áreas de escritório nestes dias.

Figura 4.8: Agenda de equipamentos elétricos em finais de semana conforme tipo de ambiente do HU-USP.

De maneira análoga à iluminação dos dias de semana, o perfil de iluminação nos finais de semana é semelhante àquele dos equipamentos elétricos porém possui menor variabilidade. A Figura 4.9 mostra o novo perfil do nível de iluminação nos finais de semana que foi assinalado apenas às áreas tipificadas como ambientes hospitalares.

Além dos ambientes hospitalares e de escritório, foi criada uma terceira tipologia de área que possui sistema de iluminação que funciona ininterruptamente e não possui equipamentos elétricos. Esta área é destinada a representar ambientes comuns como corredores, salas de espera e banheiros. A Tabela 4.11 mostra os indicadores de qualidade para o modelo versão A03 em comparação com a versão A02.

Verifica-se a diminuição dos indicadores estatísticos em todas instâncias. Como esperado, a diminuição maior foi na simulação do prédio, uma vez que o consumo de iluminação e equipamentos elétricos impacta diretamente o consumo total simulado. O impacto indireto destes consumo no sistema de climatização pode ser observado pela diminuição, também, dos indicadores estatísticos da CAG1.

Figura 4.9: Agenda de iluminação em finais de semana conforme tipo de ambiente do HU-USP.

Tabela 4.11: modeloA03 e modeloA02: comparação do tempo de simulação e indicadores de qualidade

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%) mensal	CV EQM (%) horário
HU-USP	modeloA02	3min36s	-23,83	24,39	39,13
	modeloA03	3min38s	-17,58	18,08	33,52
CAG1	modeloA02	3min36s	-73,80	81,90	84,64
	modeloA03	3min38s	-74,22	82,20	84,86

Vale, conforme sugestão de Westphal e Lamberts (2005), avaliar a representatividade do modelo para períodos onde não houve acionamento do sistema de climatização. Como não há informação de um dia ou período em que não houve acionamento deste sistema, assume-se que este período pode ser representado por aquele em que foram verificadas as temperaturas mais frias. De acordo com o anexo A da norma NBR 16401, a temperatura mínima que é excedida a uma frequência anual de 99%, é de 8,9°C para a Guarulhos (Tabela 4.12).

Assim, considerando apenas as horas em que a temperatura externa foi menor que 8,9°C, compara-se a demanda de energia medida e simulada conforme Figura 4.10. Como mostrado, a simulação tende a subestimar a potência real da instalação em torno de 50 kW, diferença que permanece relativamente constante ao longo do período avaliado. Como não se sabe se neste período houve o acionamento do sistema de ar condicionado, esta diferença pode ser atribuída a um sistema de ar condicionado, que mesmo abaixo de 8,9°C esteja consumindo energia elétrica. Outra razão para esta diferença está na subestimativa da intensidade de equipamentos elétricos que foi assinalada como a variável mais incerta. Não obstante, observa-se na Figura 4.10 a capacidade do modelo de captar qualitativamente as diferenças horárias de temperatura,

Tabela 4.12: *Dados de projeto de ar condicionado para a região de Guarulhos*

SP	São Paulo Guarulhos		Latitude	Longit.	Altitude	Pr.atm	Período	Extrem. anuais	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s
			23,43S	46,47W	750m	92,63	88/01		29,0	34,8	1,0	3,4	2,8
Mês>Qt	Freq. anual	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq. anual	Aquec.	Umidificação	
Jan	0,4%	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Jul	99,6%	TBS	TPO	w
?Tmd	1%	31,8	22,0	24,2	27,9	23,2	19,7	25,1		99%	8,9	6,0	6,3
8,9	2%	30,8	21,7	23,7	27,3	22,9	19,3	24,9					

evidenciando que as novas agendas atribuídas representam corretamente as agendas reais dos equipamentos elétricos do HU-USP.

Figura 4.10: *Comparação da potência medida e simulada em período com temperatura externa inferior a 8,9°C.*

4.2.5 modeloA04

O arquivo climático, originalmente referente à estação de Congonhas, foi alterado para um novo arquivo que representa o sítio no qual o hospital está situado. Este arquivo foi criado a partir da conversão de dados climáticos tabulares em um arquivo do tipo "epw" (formato de arquivo climático lido pelo *EnergyPlus*) pelo *software* denominado *Elements*. A Tabela 4.13 apresenta a comparação dos indicadores de qualidade obtidos por este ajuste.

Nota-se uma pequena variação nos indicadores de qualidade entre as versões: em torno de 1,0 % para menos. Percebe-se que apesar da temperatura do meio externo tender a ser mais baixa, o consumo de energia da CAG1 tende a ser maior, o que pode parecer contraditório, uma vez que temperaturas mais baixas indicariam menor consumo de ar condicionado. Entretanto, vale ressaltar que o acionamento de equipamentos de climatização interna não está exclusiva-

Tabela 4.13: *modeloA04 e modeloA03: comparação do tempo de simulação e indicadores de qualidade*

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%)	CV EQM (%)
				mensal	horário
HU-USP	modeloA03	3min38s	-17,58	18,08	33,52
	modeloA04	3min33s	-17,00	17,34	35,65
CAG1	modeloA03	3min38s	-74,22	82,20	84,86
	modeloA04	3min33s	-73,49	81,36	83,89

mente ligado às condições meteorológicas e sim às coincidências entre estas condições e as cargas internas do edifício. Além disso, as temperaturas mais baixas na USP podem ter sido verificadas em períodos em que não haveria acionamento da CAG1 mesmo sob as temperaturas de Congonhas, não importando o quão inferior as temperaturas da USP estão em relação às temperaturas de Congonhas.

4.2.6 modeloA05

São definidos novos materiais de construção que compõem a envoltória do HU-USP, conforme informações concedidas pela equipe técnica do empreendimento e planilha desenvolvida por Ordenes et al. (2003) com materiais tipicamente usados na construção civil brasileira. Estes materiais formam os novos elementos da envoltória apresentados na Tabela 4.14. A Tabela 4.15 apresenta os indicadores de qualidade obtidos no modeloA05 comparando-os com os indicadores da versão anterior, modeloA04.

Como a alteração dos materiais construtivos da envoltória do modelo é um parâmetro que impacta exclusivamente o consumo do sistema de climatização, nota-se maior alteração nos indicadores estatísticos sobre a CAG1. Expressando a diminuição verificada neste uso final em termos percentuais, tem-se: 37 % do ESM, 33 % do CV EQM mensal e de 28 % do CV EQM horário. A diminuição do ESM evidencia que a estimativa do consumo da CAG1 foi maior, o que é previsível uma vez que o modelo anterior possuía camadas de isolamento em sua envoltória que dificulta a perda de carga de frio para o ambiente externo. Como a envoltória do HU-USP não possui isolamento térmico, sua envoltória propicia maior ganho de calor através de sua envoltória, por isso o consumo de energia da CAG1 é maior com o novo conjunto de materiais.

4.2.7 modeloA06

Altera-se a temperatura de *setpoint* das áreas atendidas pela CAG1 de acordo com a medição da temperatura destes ambientes, cujos valores medidos estão apresentados na Figura 3.13. Assim, adotou-se a média dos valores de temperatura verificada ao longo do período de medição: 23°C.

Tabela 4.14: Características dos materiais que compõem a envoltória do HU-USP

Superfícies Internas					
Tipo de Superfície	Material	Espessura (mm)	Condutividade térmica ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	Massa específica (kg.m^{-3})	Calor específico ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
Parede	Argamassa de emboço	25	1,150	2000	1000
	Tijolo maciço	96	0,900	1764	920
	Gesso	5	0,727	1602,00	840
Piso/Teto	Forro de alumínio tipo <i>Dampa</i>	20	230	2700	880
	Câmara de ar com baixa emissividade		Resistência térmica: $0,61 \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$		
	Laje de concreto	200	1,750	2200	1000
	Piso cerâmico	10	0,900	1600	920
Superfícies Externas					
Tipo de Superfície	Material	Espessura (mm)	Condutividade térmica ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	Massa específica (kg.m^{-3})	Calor específico ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
Parede	Argamassa de emboço	25	1,150	2000	1000
	Tijolo maciço	96	0,900	1764	920
	Gesso	5	0,727	1602	840
Cobertura	Forro de alumínio tipo <i>Dampa</i>	20	230,00	2700	880
	Câmara de ar com baixa emissividade		Resistência térmica: $0,61 \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$		
	Laje de concreto	20	1,750	2200	1000
Superfícies em contato com o chão					
Tipo de Superfície	Material	Espessura (mm)	Condutividade térmica ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	Massa específica (kg.m^{-3})	Calor específico ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
Parede	Argamassa de emboço	25	1,150	2000	1000
	Tijolo maciço	96	0,900	1764	920
	Gesso	5	0,727	1602	840
Piso	Solo	457	0,870	1361	837,3
	Laje de concreto	200	1,750	2200	1000
	Piso cerâmico	10	0,900	1600	920

Tabela 4.15: modeloA05 e modeloA04: comparação do tempo de simulação e indicadores de qualidade

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%) mensal	CV EQM (%) horário
HU-USP	modeloA04	3min33s	-17,00	17,34	35,65
	modeloA05	3min19s	-12,72	13,88	34,69
CAG1	modeloA04	3min33s	-73,49	81,36	83,89
	modeloA05	3min19s	-44,98	54,53	60,70

Esta evidência pode resultar em falta de representatividade da simulação uma vez que se utilizou apenas um mês como período de medição. Entretanto, não se espera variações na temperatura de *setpoint* interna, pois ela não possui componente sazonal já que seu controle em uma faixa fixa é a função principal da CAG1. A equipe técnica responsável pela manutenção deste sistema não efetuou mudanças nesta temperatura. A Tabela 4.16 apresenta os indicadores de qualidade obtidos no modeloA06 em comparação com sua versão anterior, modeloA05.

Tabela 4.16: *ModeloA06: comparação do tempo de simulação e indicadores de qualidade*

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%)	CV EQM (%)
				mensal	horário
HU-USP	modeloA05	3min19s	-12,72	13,88	34,69
	modeloA06	3min17s	-12,23	13,43	34,51
CAG1	modeloA05	3min19s	-44,98	54,53	60,70
	modeloA06	3min17s	-40,12	50,28	57,19

Percebe-se uma diminuição dos desvios da simulação em relação à medição. Considerando a simulação do prédio todo, o indicador CV EQM mensal quase se aproxima do limite aceitável de 15% estipulado pelas diretrizes de M&V consideradas.

4.2.8 modeloA07

Ajustou-se as características dos resfriadores que compõe as centrais de água gelada do prédio de acordo com as informações levantadas em auditoria apresentadas na Tabela 3.4. Assim, no caso da CAG1, o resfriador único foi substituído por dois resfriadores com as características nominais identificadas. O mesmo foi feito com a CAG2, com apenas um único resfriador. A Tabela 4.17 apresenta os indicadores de qualidade obtidos no modeloA07 em comparação com sua versão anterior, modeloA06.

Tabela 4.17: *modeloA07 e modelo A06: comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de qualidade*

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%)	CV EQM (%)
				mensal	horário
HU-USP	modeloA06	3min17s	-12,23	13,43	34,51
	modeloA07	3min13s	-11,98	13,21	34,45
CAG1	modeloA06	3min17s	-40,12	50,28	57,19
	modeloA07	3min13s	-39,11	49,31	56,39

Nesta etapa há uma quebra da tendência do aumento da acurácia da simulação indicada pela diminuição dos valores absolutos dos indicadores estatísticos. Como pode-se notar, esta diminuição da acurácia foi observada em todos os níveis de comparação.

4.2.9 modeloA08

Alterou-se as informações das bombas e ventiladores das centrais de água gelada para as informações coletadas ao longo da auditoria e apresentadas na seção 3.1.2.4. Para a CAG1, foram inseridas 3 bombas em paralelo com velocidade constante, utilizando o módulo *Headered Pumps* do *EnergyPlus*. O *fan coil* ligado a esta central foi dividido em 19 *fan coils* de velocidade variável.

A Tabela 4.18 apresenta os indicadores de qualidade estatísticos obtidos para a versão A08 em comparação com a versão A07.

Tabela 4.18: *modeloA08 e modelo A07: comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de qualidade*

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%)	CV EQM (%)
				mensal	horário
HU-USP	modeloA07	3min13s	-11,98	13,21	34,45
	modeloA08	3min12s	-3,99	4,92	32,12
CAG1	modeloA07	3min13s	-39,11	49,31	56,39
	modeloA08	3min12s	25,15	36,48	57,36

O principal impacto observado neste ajuste foi o aumento no consumo da CAG1 simulada, apresentando um incremento de ESM de + 64 %. Este aumento se deve principalmente à troca dos equipamentos de velocidade variável por equipamentos de velocidade constante que não são capazes de modular seu acionamento conforme a variação da carga térmica.

Este aumento não se deve aos dados nominais de vazão inseridos nos *fan coils*, uma vez que a soma destes apresentou um valor menor que a vazão default do *fan coil* único utilizado esta versão. Mesmo assim, a pulverização de *fan coils* pode resultar em aumento do consumo, uma vez que a soma das ineficiências dos *fan coil* menores é maior que a ineficiência de um *fan coil* maior. Apesar disto, o maior número de *fan coils* com capacidade menor permite algumas vantagens operativas como o desligamento de equipamentos de atendem áreas inativas ao invés de manter um *fan coil* com capacidade alta para condicionar um ambiente.

Este aumento é refletido na simulação do edifício cujos indicadores de ESM e CV EQM mensal passam a ser dentro dos limites normativos. O nível de Cv EQM horário, no entanto, encontra-se 2 % acima de seu limite.

4.3 Fase A - Ajuste para correção de erros

Nesta fase faz-se a correção dos erros identificados na Fase A. A Tabela 4.19 apresenta as versões previstas nesta fase de correção.

Tabela 4.19: Fase AE: Revisão das versões

Versão	Mudança
ModeloAE1	Correção do arquivo climático
ModeloAE3	Correção das temperaturas de controle da CAG1

4.3.1 modeloAE1

Procura-se verificar a diferença horária entre as duas estações climáticas em relação à Temperatura de Bulbo Seco (TBS) e Umidade Relativa (UR) em diagramas de caixas apresentados na Figura 4.11. Em relação à TBS, a média da diferença está em torno de 0°C, com uma ligeira tendência de valores negativos, indicando que os dados de Congonhas apresentam temperatura mais alta. Já em relação à UR, a tendência é de valores acima de zero, indicando que a Umidade Relativa de Congonhas apresenta, na média, valores mais baixos. Desta forma, pode-se dizer que a USP apresenta temperatura inferior e umidade relativa superior em relação à Congonhas.

Figura 4.11: Diferença entre TBS e UR de Congonhas e do Lab-Micro

Pode-se perceber alguns valores de diferença de umidade próximos de 75 % o que indica possíveis erros de leituras da estação LabMicro. Vale, portanto, usar uma função para preencher valores que apresentam problemas. Assim, a matriz com os dados climáticos desta estação foram importadas para o ambiente R no qual utilizou-se a função *NA.approx* para fazer a interpolação das leituras ausentes ou com erros. Esta função utiliza uma interpolação linear no preenchimento.

Verificou-se que, além das leituras de UR, as leituras de velocidade do vento também apresentavam valores incorretos. Para esta identificação, comparou-se os valores máximos da amostra com os seus quartis. Valores máximos se aproximavam de 100 m/s, enquanto o terceiro quartil está em 2,5 m/s. Assim, tal como a UR, valores de velocidade do vento discrepantes

foram interpoladas utilizando a função *NA.approx*. A Tabela 4.20 traz os indicadores estatísticos resultantes da comparação da simulação do modeloAE2 com a medição, apresentando os indicadores estatísticos da versão anterior.

Tabela 4.20: *modeloAE1 e modeloA08: comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia*

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%)	CV EQM (%)
				mensal	horário
HU-USP	modeloA08	3min12s	-3,99	4,92	32,12
	modeloAE1	3min20s	-3,68	7,28	33,06
CAG1	modeloA08	3min12s	25,15	36,48	57,36
	modeloAE1	3min20s	25,86	40,66	61,74

Nota-se a relação não linear do efeito nos indicadores estatísticos resultantes desta correção. Como o arquivo climático influi exclusivamente na carga de ar condicionado, as maiores variações foram observadas na comparação da CAG1, que variaram no sentido do aumento da qualidade em termos de ESM e diminuição da qualidade considerando o CV EQM. Em termos da comparação com a medição do prédio, as variações observadas foram as mesmas, porém em menor escala.

4.3.2 modeloAE2

Ajustou-se as temperaturas de água gelada controlada pelo *Setpoint Manager* para os mesmos valores assinalados na saída dos resfriadores: 9,5° C no controlador da CAG1 e 7,0° C no controlador da CAG2. Além disto, fez-se a correção da temperatura de insuflamento de ar dos *fan coils* para 10 °C abaixo da temperatura de setpoint dos ambientes atendido pelas centrais de água gelada (ASHRAE, 2013). Assim, ajustou-se para 13° C a temperatura de insuflamento da CAG1 e para 14° C a temperatura de insuflamento da CAG2.

O impacto desses ajustes em termos dos indicadores de acurácia podem ser visualizados na Tabela 4.21.

Tabela 4.21: *modeloAE2 e modeloAE1: comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia*

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%)	CV EQM (%)
				mensal	horário
HU-USP	modeloAE1	3min20s	-3,68	7,28	33,06
	modeloAE2	3min20s	-4,70	5,68	32,05
CAG1	modeloAE1	3min20s	25,86	40,66	61,74
	modeloAE1	3min20s	17,96	34,71	48,01

Percebe-se a melhoria em todos os indicadores relacionados à simulação da CAG1. Já na simulação do prédio, esta melhoria só não foi observada em termos de ESM. Houve melhoria em todos indicadores de acurácia referentes à CAG1.

Assim, alcança-se o fim da fase A no qual se faz ajustes das cargas constantes e dos equipamentos de condicionamento de grande porte. Mesmo assim, percebe-se que, se utilizarmos o limite dos indicadores estatísticos do prédio todo, a simulação da CAG1 não se encontra calibrada. Este resultado desfavorável vai ao encontro dos resultados obtidos na literatura analisada, no qual nenhum autor conseguiu atingir os limites dos indicadores estatísticos para o sistema de ar condicionado, usando medição de um ano completo.

Para verificar se há um comportamento sazonal a acurácia, constrói-se a Tabela 4.22. Esta tabela traz a variação mensal dos indicadores estatísticos horários e diferença entre medição e simulação agregados por mês.

Tabela 4.22: *Agregação na escala mensal dos indicadores horários calculados - modeloAE2*

	Jan	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Diferença (kWh): Simulação - medição	-2.108	-10.698	1.521	14.056	15.206	25.251	24.908	12.245	4.961	12.523	298
ESM (%)	-3,83	-16,99	14,37	74,80	50,86	92,47	83,69	29,59	10,16	31,01	0,57
CV EQM (%)	8,92	8,58	6,08	20,65	24,11	30,90	28,40	16,05	11,65	11,72	5,24

Percebe-se que os erros tendem a ser menores nos meses mais quentes, sendo o ESM mínimo observado em dezembro. Como indício da importância do uso de ambos indicadores, tem-se o mês de abril, que possui o CV EQM mínimo, porém o ESM máximo. Assim, neste mês há subestimativa média do consumo da CAG1, porém as variações do consumo estão sendo melhor capturadas neste mês.

Vale ressaltar que esta falta de acoplamento do modelo frente à medição é resultado também da falta de automatização do sistema. Segundo funcionários do HU-USP, os ventiladores que atendem as salas de operação do centro cirúrgico são acionados manualmente em função da ocorrência de cirurgia. Este esquema de acionamento introduz elementos estocásticos ao perfil de consumo que não é considerada pela simulação, que considera que o acionamento da CAG1 decorre da diferença entre temperatura interna e temperatura de *setpoint*.

Nesta perspectiva, a simulação pode ser vista como uma CAG1 funcionando sob automatização. A economia de energia elétrica caso a CAG1 tivesse o regime de operação conforme a simulação seria de 8.924 kWh médios por mês, o que corresponde à redução de aproximadamente 23% do consumo mensal da CAG1.

4.4 Fase A - Análise paramétrica

Vale, de modo a atingir melhor acurácia na simulação da CAG1, realizar uma análise paramétrica. Para auxiliar nesta fase, verifica-se o comportamento da simulação do consumo de energia elétrica da CAG1 frente a sua respectiva medição conforme Figura

Afim de identificar possibilidades não baseadas em evidências para melhorar a adequação na simulação da CAG1, inicia-se uma análise dos parâmetros que a influam. Primeiramente, pretende-se verificar a partir das comparações da simulação *versus* medição da CAG1 aquele parâmetro de entrada mais sensível. A Tabela 4.23 apresenta as mudanças nos indicadores estatísticos calculados, no qual valores negativos indicam piora e valores positivos melhoria.

Tabela 4.23: *Mudança da acurácia da simulação da CAG1 ao longo das versões criadas na fase A*

	ESM (%)	CV EQM (%) mensal	CV EQM (%) horário
modeloA01	-4 %	-4 %	-3 %
modeloA02	-2 %	-2 %	-2 %
modeloA03	-1 %	0 %	0 %
modeloA04	1 %	1 %	1 %
modeloA05	39 %	33 %	28 %
modeloA06	11 %	8 %	6 %
modeloA07	3 %	2 %	1 %
modeloA08	164 %	26 %	-2 %
modeloAE1	-3 %	-11 %	-8 %
modeloAE2	31 %	15 %	22 %

Percebe-se que os ajustes que mais influenciaram a simulação da CAG1 são os realizados nas versões modeloA05, modeloA08 e modeloAE2 que correspondem respectivamente a: alteração dos dados construtivos, alteração das características das bombas e ventiladores e alteração da temperatura de insuflamento de ar frio. Como os dois primeiros incorrem em mudanças qualitativas do modelo, seleciona-se a variável temperatura para realizar uma análise paramétrica.

Assim, deseja-se verificar qual o valor de temperatura de insuflamento que retorna uma simulação com maior acurácia. Assim, variou-se as temperaturas de insuflamento em 1°C para cima a partir de 23°C. Os resultados das simulações em termos de ESM(%) se encontram na Tabela 4.24.

Tabela 4.24: *Análise de sensibilidade: Temperatura da serpentina*

Temperatura da serpentina (°C)	19	18	17	16	15	14	13
Erro Relativo Médio - ESM (%)	-5,76	4,60	8,25	12,90	15,56	17,16	17,96

Assim, percebe-se que o ponto de ESM nulo está entre 18 e 19°C. Considerando linear a diminuição do ESM entre estas temperaturas, tem-se para atingir um ERM nulo, a temperatura de 18,7°C. Este valor de temperatura de ar insuflado resulta nos indicadores de qualidade apresentados na Tabela 4.25.

Assim, pode-se, de fato, utilizar uma análise paramétrica para se obter uma simulação de maior qualidade. Entretanto, o resultado de 18,7°C de temperatura de ar insuflado não é uma

Tabela 4.25: *Modelo AS: indicadores estatísticos*

Medição de Referência	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%)	CV EQM (%)
			mensal	horário
HU-USP	3min22s	-5,06	9,47	33,09
CAG1	3min22s	-0,31	26,09	50,77

evidência coletada, por isto admite-se que há outros parâmetros que possam resultar numa maior acurácia da simulação. A utilização de uma ferramenta de análise paramétrica automatizada é capaz de aumentar o campo de varredura dos parâmetros que retornam uma simulação com maior acurácia. O tempo gasto pelo modelador em fazer este tipo de investigação de maneira manual pode aumentar enormemente, por isto talvez as novas metodologias tem lançado mão de ferramentas automatizadas.

4.5 Fase B: Ajuste baseado em evidências

O zoneamento desta fase foi feito de maneira que os limites físicos dos ambientes cujos equipamentos integrados foram medidos concomitantemente são iguais aos limites físicos da sua respectiva zona térmica. A vista aérea das novas zonas térmicas criadas estão apresentados no anexo. As zonas térmicas servidas por equipamentos modulares resultaram numa área de 5.362 m², 46 % menor que a área condicionada por equipamentos modulares na fase A.

Devido à limitação do modelo *EnergyPlus* em segregar equipamentos de climatização que atendem uma mesma sala, nos casos em que não houve medição concomitante de todos equipamentos integrados, aqueles que foram medidos não são comparados com a simulação. Aqueles equipamentos integrados que foram medidos de maneira concomitante, adota-se a nomenclatura apresentada na última coluna da tabela 3.8 com a identificação do andar e o identificador do equipamento conforme Apêndice B.

A diferença mensal das demandas horárias de energia são apresentadas no diagrama de caixa da Figura 4.12.

Pode-se averiguar que, de modo geral, que a demanda de energia tende a ser menor na primeira versão criada nesta fase B. Isto era esperado, uma vez que como este modelo apresenta uma área condicionada maior e como o cálculo das cargas de iluminação e equipamentos elétricos advêm de uma relação W/m², quanto maior a área, maior a carga térmica proveniente destas fontes. Ao longo de todo período, a diferença total integraliza 214 MWh, o que equivale a 4% do consumo total anual de energia medida do HU-USP.

Nesta fase, prevem-se as cinco versões apresentadas na Tabela 4.26, obtidas a partir das evidências em relação aos equipamentos de ar condicionado do tipo modular já trazidos na Tabela 4.1. Nas subseções a seguir são apresentados os indicadores estatísticos atingidos nestas versões pela comparação da simulação destes sistemas de climatização e suas respectivas

Figura 4.12: Comparação mensal da demanda de energia horária entre a versão AS e a versão B00

medições, trazidas no Apêndice D; bem como a consequência para a simulação do HU-USP. Por razão prática, optou-se por representar os indicadores estatísticos dos equipamentos medidos em médias, sendo os valores individuais para cada equipamento identificados no Apêndice E.

4.5.1 modeloB00

Assim como na primeira fase, inseriram-se nas zonas térmicas servidas por equipamentos modulares sistema de ar condicionado compacto do tipo *Packaged Terminal Air Conditioner* (PTAC) com as seguintes características:

Mixer de ar externo: vazão máxima de ar externo: *autosized*; vazão mínima de ar externo: *autosized*.

Serpentina de aquecimento: desligada.

Serpentina de resfriamento : capacidade nominal de resfriamento: *autosized*; COP: 3,0; vazão de ar: *autosized*; razão nominal de calor sensível: *autosized*.

Ventilador: disponibilidade: sempre disponível; eficiência do ventilador: 60 %; pressão: 250 Pa; vazão: *autosized*; eficiência do motor: 80 %; posição do ventilador: aspira ar através da serpentina.

Tabela 4.26: Fase A: Revisão das versões

Versão	Mudança	Evidência
ModeloB00	Modelo inicial	i, j, q, r, u, v
ModeloB01	Alteração da característica dos equipamentos modulares	g
ModeloB02	Alteração da posição do ventilador	x
ModeloB03	Remoção da vazão de ar externo	x
ModeloB04	Mudança das curvas de performance	s
ModeloB05	Mudança do horário de funcionamento dos equipamentos de pequeno porte	a, i

A Tabela 4.27 apresenta os indicadores estatísticos obtidos para a estimativa de energia elétrica do prédio do HU-USP.

Tabela 4.27: modeloB00 e modeloAS - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%) mensal	CV EQM (%) horário
HU-USP	modeloAS	3min22s	-9,43	11,86	36,41
	modeloB00	17min52s	-9,21	11,74	36,40

Apesar da pequena diminuição dos indicadores estatísticos de acurácia, houve um aumento de 14 minutos do tempo de simulação, um aumento de 430 %. No artigo em que Raftery, Keane e Costa (2011b) testam a sua metodologia, os autores verificam um aumento de 370 % no tempo de simulação, resultando em uma simulação de 3h48min. O escalonamento do zoneamento em duas fases pretende contornar este aumento logo no começo do processo de calibração.

Compara-se, então, as medições elétrica dos equipamentos modulares apresentados na tabela 3.8 com suas respectivas simulações pelo modelo *EnergyPlus*. A tabela 4.28 apresenta os indicadores estatísticos obtidos desta comparação. Como as medições não compreenderam um período de um ano completo, não se calculou o CV EQM para a escala mensal.

Identifica-se uma comparação discrepante: o equipamento 2.106. Desconsiderando esta medição, temos a mediana do ESM de -56% e do CV EQM 150%. Assim, tem-se que a simulação tende a subestimar a demanda elétrica dos equipamentos de ar condicionado medidos. Em termos de ESM, a média é de 42% e CV EQM, de 169%.

4.5.2 modeloB01

Ajusta-se as capacidades de refrigeração e COP nominais dos sistemas PTAC's de acordo com as características dos equipamentos modulares levantadas durante a auditoria (Apêndice B). Aos sistemas PTAC's que representam equipamentos modulares integrados, soma-se as capacidades de refrigeração individuais dos equipamentos modulares e faz-se uma média ponderada pela capacidade para o COP.

Tabela 4.28: *Modelo B00 - Indicadores estatísticos dos ar condicionados tipo split medidos*

<i>Split</i> medido	ESM (%)	CV EQM (%) horário
1_2	-32,54	224,55
1_11	-95,96	149,77
1_12.13	-81,43	88,06
2_71.72.73	-81,98	91,69
2_106	1504,30	824,86
2_114	102,57	-42,24
2_117	-82,47	168,54
2_121	-55,92	105,54
3_17	28,50	289,52

A comparação dos equipamentos simulados e medidos estão apresentados na tabela E.1, incluindo a comparação da medição e simulação do consumo elétrico do HU-USP. Os valores médios da comparação dos *splits* estão na tabela 4.29.

Tabela 4.29: *modeloB00 e modeloB01 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia*

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%) mensal	CV EQM (%) horário
HU-USP	modeloB00	17min52s	-9,21	11,74	36,40
	modeloB01	18min15s	-9,00	11,63	36,57
Splits	modeloB00	17min52s	46,86	–	315,72
	modeloB01	18min15s	-50,47	–	319,78

Entre todos equipamentos, aquele que apresenta a maior diminuição é o 1_2 com uma diminuição de 52% ESM, entretanto com o aumento do CV EQM 6%. Para os demais equipamentos, nota-se que não há uma tendência de diminuição unânime dos desvios, havendo inclusive aumento do desacoplamento em algumas simulações. Em média, a variação do ESM é de 2% e do CV EQM é de 0,14%. Na média, averigua-se que a simulação tanto do prédio como dos *splits* tende a subestimar a demanda real do prédio.

4.5.3 modeloB02

A posição do ventilador do modelo energético foi alterado de após a serpentina (*DrawThrough*) para antes da serpentina (*BlowThrough*). Assim, o ventilador ao invés de aspirar ar através da serpentina, sopra ar através dela, assim como a configuração de um equipamento

split típico. Este ajuste resultou nos indicadores estatísticos apresentados na tabela E.2, sendo a média dos indicadores dos *splits* apresentados na tabela 4.30.

Tabela 4.30: *modeloB02 e modeloB01 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia*

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%) mensal	CV EQM (%) horário
HU-USP	modeloB01	18min15s	-8,10	11,63	36,57
	modeloB02	19min00s	-9,05	11,66	36,57
1.2	modeloB01	18min15s	-15,74	–	237,50
	modeloB02	19min00s	48,79	–	317,06

Em relação ao consumo elétrico do prédio, a diminuição foi apenas observada no CV EQM (menos de 1 %), no ERM houve um aumento de 12 %. Já para os equipamentos de condicionamento modular, a variação de todos indicadores estatístico foi de menos de 1 %.

4.5.4 modeloB03

Como nenhum dos equipamentos *splits* encontrados no prédio possuía renovação de ar externo, foi retirada a vazão de ar externo dos PTAC's que estavam configurados como *autosize*. De fato, equipamentos de ar condicionado convencionais não contam com aparato para realizar a renovação de ar. Alguns tipos específicos de equipamentos *split* possuem esta função, de outra forma, a renovação de ar pode ser realizada através de uma caixa de mistura conectada com um sistema de ventilação.

A Tabela 4.31 apresenta os indicadores estatísticos obtidos com este ajuste em comparação ao ajuste da versão anterior. A Tabela E.3 traz a comparação individualizada por *split* medido.

Tabela 4.31: *modeloB03 e modeloB02 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia*

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%) mensal	CV EQM (%) horário
HU-USP	modeloB02	19min00s	-9,00	11,63	36,57
	modeloB03	19min16s	-8,64	11,07	35,58
<i>Splits</i>	modeloB02	19min00s	48,79	–	317,06
	modeloB03	19min16s	46,52	–	299,19

Nota-se a diminuição de todos indicadores na simulação do consumo elétrico total do HU-USP. O equipamento cuja simulação obteve a variação de acoplamento foi 2.114, com 47 % de diminuição do ESM e 16,07 % de diminuição do CV EQM. Em média a diminuição do ESM foi de 3,59 % e do CV EQM, de 3,35%. O prédio também obteve a diminuição dos indicadores: 4,53 % do ESM e 5,06 do CV EQM.

4.5.5 modeloB04

Foram alteradas os coeficientes das curvas de ajuste do modelo dos equipamentos de ar condicionado. Assim, adotou-se os coeficientes apresentados nas tabelas F.1 e F.2 que ajustam a capacidade total de refrigeração em função da temperatura de operação e o COP em função da temperatura de operação, respectivamente. A Tabela 4.32 traz os novos indicadores estatísticos de acurácia obtidos neste ajuste em comparação com o ajuste anterior, sendo os indicadores individualizados apresentados na Tabela E.4.

Tabela 4.32: *modeloB04 e modeloB03 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia*

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%) mensal	CV EQM (%) horário
HU-USP	modeloB03	19min16s	-8,64	11,07	35,58
	modeloB04	18min21s	-8,91	11,24	35,44
<i>Splits</i>	modeloB03	19min16s	46,52	–	299,19
	modeloB04	18min21s	35,88	–	288,53

Em relação à comparação do prédio, houve diminuição do ESM em 3 % e do CV EQM mensal em 1,54 %, enquanto o CV EQM horário melhorou menos de 1 %. Na comparação dos *splits*, percebe-se também uma diminuição do ESM (2 %) e melhora do CV EQM na mesma proporção que o prédio todo.

4.5.6 modeloB05

A partir dos perfis de consumo energético apresentados no Apêndice D, criaram-se os seguintes perfis de disponibilidade dos equipamentos de climatização de pequeno porte:

Desligado: equipamentos que, como o *split* 2_106, tem menos de 5 acionamentos em um mês.

Sempre ligado: equipamentos que funcionam integralmente.

Horário de escritório, exceto fim de semana: equipamentos que são acionados em horário de expediente típico de escritório: entre 8 e 17 horas. Não funciona no final de semana.

Horário de escritório: idêntico à agenda de escritório, porém com funcionamento no final de semana.

Além dessas agendas, foi inserida uma nova agenda referenciada ao horário de funcionamento da biblioteca, condicionada pelos *splits* 2_71.72 e 73, que, entre os equipamentos medidos, é aquele com o perfil mais claro. Estes equipamentos possuem funcionamento apenas nos dias de semana, entre às 7-16h. A Tabela 4.33 traz os indicadores estatísticos médios resultantes desta mudança. Os indicadores individualizados são trazidos na Tabela E.5.

Percebe-se piora dos indicadores estatísticos do prédio completo. A comparação da mudança dos indicadores estatísticos dos *splits* revela a vantagem de se balizar no CV EQM

Tabela 4.33: *modeloB05 e modeloB04 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia*

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%) mensal	CV EQM (%) horário
HU-USP	modeloB04	18min21s	-8,91	11,24	35,44
	modeloB05	18min47s	-9,84	11,93	35,71
<i>Splits</i>	modeloB04	18min21s	35,88	–	288,53
	modeloB05	18min47s	-44,08	–	223,37

ao invés do ESM. Como observado, houve uma diminuição da energia simulada pelos equipamentos, entretanto, esta diminuição foi tamanha que voltou a estar fora do limite, entretanto do limite inferior, ao invés do superior. A avaliação se este ajuste resultou numa melhoria ou piora deve-se, nesta situação, se basear no índice CV EQM que desconsidera o efeito do sinal.

A grande variação do ESM, como pode ser analisado da Tabela E.5 deve-se em especial à simulação do *split* 2_106. Anteriormente, este equipamento era acionado pelo modelo, entretanto optou-se por desligá-lo uma vez que ele apresentou menos de 3 acionamento no período de um mês. Apesar dos indicadores estatísticos desta simulação ainda apresentarem valores abaixo da norma, em comparação com os resultados anteriores, houve melhoria de qualidade.

4.6 Fase B - Ajuste para correção de erros

Corrige-se os erros que ainda persistem da fase B, conforme versões trazidas na Tabela 4.34.

Tabela 4.34: *Fase AE: Revisão das versões*

Versão	Mudança
ModeloBE1	Redefinição das intensidade de iluminação e de equipamentos elétricos e suas agendas
ModeloBE2	Redefinição das configurações das centrais de água gelada
ModeloBE3	Correção de erros ligados aos ganhos de calor interno dos ambientes condicionados por <i>split</i>

4.6.1 modeloBE1

Percebeu-se que os valores de intensidade e as agendas de iluminação e de equipamentos de tomada do modeloB05 estavam diferindo daqueles inseridos na fase A. Corrigiu-se estes valores para os valores inseridos conforme evidências (subseções 4.2.2, 4.2.3 e 4.2.4). A tabela 4.35 apresenta a mudança verificada a partir deste ajuste em relação ao modelo anterior.

Com estas mudanças, verifica-se que a simulação do HU-USP pode ser considerada como calibrada, melhorando o ESM em 79%, o CV EQM mensal em 36% e o horário em 16%.

Tabela 4.35: *modeloBE1 e modeloB05 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia*

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%) mensal	CV EQM (%) horário
HU-USP	modeloB05	18min47s	-9,84	11,93	35,71
	modeloBE1	19min05s	-1,29	7,01	29,59
<i>Splits</i> medidos	modeloB05	18min47s	-44,08	–	223,37
	modeloBE1	19min05s	-30,60	–	211,91

Entretanto, em nível de *splits*, houve uma melhora de apenas 2% do ESM e de menos de 1% do CV EQM. Percebe-se como os indicadores estatísticos podem variar sem uma tendência constante entre eles. Até então a ordem de crescimento do CV EQM mensal e horário guardava uma constância no grau, entretanto percebe-se aqui uma diferença de mais de 2 vezes na variação de um para outro.

Apesar das variações claras nos indicadores de acurácia do prédio, a simulação dos equipamentos modulares não surtiu uma mudança tão expressiva. Nestes equipamentos, o ESM melhorou em 1 % e o CV EQM, em 0,4 %. Pode-se averiguar como estes equipamentos não possuem uma sensibilidade tão alta em relação às agendas de iluminação e equipamentos elétricos como a simulação do prédio todo.

4.6.2 modeloBE2

Redefiniu-se as centrais de água gelada de acordo com a última configuração alcançada na primeira fase. A Tabela 4.36 apresenta a evolução dos indicadores estatísticos devido à introdução destes ajustes.

Tabela 4.36: *modeloBE2 e modeloBE1 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia*

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%) mensal	CV EQM (%) horário
HU-USP	modeloBE1	19min05s	-1,29	7,01	29,59
	modeloBE2	21min02s	-6,77	9,26	28,82
CAG1	modeloBE1	19min05s	50,02	66,65	92,08
	modeloBE2	21min02s	-52,79	62,68	77,56
<i>Splits</i>	modeloBE1	19min05s	-43,08	–	224,39
	modeloBE2	21min02s	-45,50	–	220,15

A simulação energética do prédio todo, verificou-se piora do ESM e do CV EQM mensal, este mantendo-se dentro dos limite de acurácia e aquele saindo do limite. Já o CV EQM horário teve uma melhora de 14 %. Já em relação à simulação da CAG1, percebe-se uma inversão de

valores do ESM, indicando que esta deixou de sobrestimar o consumo da CAG1 e passou a subestimá-la; entretanto, em relação à CV EQM, houve melhora.

Pode-se averiguar, da Tabela 4.36, que apesar dos ajustes terem sido nas configurações da CAG1, houve impactos no consumo dos *splits*. Estes impactos são decorrentes em alterações da troca de calor nas superfícies das zonas térmicas atendidas por *splits* e que fazem limite com as zonas térmicas atendidas pela CAG1. Em relação ao ESM, a variação foi de 8,44 % e em relação ao CV EQM horário, 1,52 %.

Vale verificar se a temperatura da serpentina de resfriamento de 18,5° continua retornando um ESM nulo em relação à simulação da CAG1, conforme verificado na análise paramétrica da fase A. Os indicadores estatísticos da simulação com esta temperatura estão apresentados na Tabela 4.37.

Tabela 4.37: *modeloBE2 e modeloBE1 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia*

Medição de Referência	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%) mensal	CV EQM (%) horário
HU-USP	20min31s	-0,27	6,44	28,21
CAG1	20min31s	6,40	26,17	48,67
<i>Splits</i>	20min31s	-45,49	–	220,10

Verifica-se que esta configurações retornam uma melhor adequabilidade da simulação do prédio todo que entra dentro dos limites dos indicadores das normas consideradas. Em relação à CAG1, no entanto, percebe-se que o ESM deixou de ser nulo e se encontra com um valor que indica sobre-estimativa média de + 6,40 % do consumo elétrico. Isto se deve provavelmente ao aumento de perda de energia térmica para as regiões vizinhas, uma vez que se reduziu a área total de área condicionada por *splits*. Quanto à simulação dos *splits*, houve pouca diferença em relação ao resultado do modeloBE2, mostrando que o consumo destes equipamentos é pouco sensível à mudança de temperatura de serpentina da CAG1.

Este resultado dá indício de que o zoneamento de forma a representar de forma fiel o esquema de climatização do prédio é uma variável importante a ser considerada numa análise paramétrica. Assim, sugere-se que a análise paramétrica seja feita considerando um modelo que esteja representando de maneira fiel o zoneamento real do prédio, baseado em evidências. O impacto no tempo de calibração é claro: enquanto na fase A a análise paramétrica que deu origem à Tabela ?? resultou em 25 simulações com um tempo médio de 3 minutos, o que corresponde a 1h15min médios; na fase B a mesma análise resultaria em 25 simulações de 19 minutos, o que corresponderia a um total de 7h55min. Reconsiderar o número de simulações ou optar por uma análise paramétrica automatizada diminuiria o tempo e trabalho do responsável por efetuar a calibração da simulação.

4.6.3 modeloBE3

Até este ponto, as mudanças ocorreram em todos equipamentos do prédio. Procura-se, neste versão, averiguar pistas das diferenças entre simulação e medição dos *splits*. Vale nesta averiguação seguir sugestão de Westphal e Lamberts (2005) e avaliar as fontes internas de calor no modelo digital, uma vez que não se espera alterar parâmetros relacionados às fontes externas. A Figura 4.13 mostra a participação das cargas internas no calor gerado no interior dos ambientes condicionados pelos equipamento *splits* medidos.

Figura 4.13: Comparação das fontes de carga interna nos ambientes atendidos pelos splits medidos

Assim, percebe-se que os *splits* 1_11 e 1_12.13 não possuem carga provenientes de pessoas. Desta forma, incluiu neste ambiente o mesmo perfil de ocupação dos ambientes tipicamente hospitalares conforme norma ASHRAE (2010) (apresentados na seção 4.2.1). Estes ajustes repercutiram nas variações nos indicadores estatísticos apresentadas na Tabela 4.38.

Tabela 4.38: *modeloBE3 e modeloBE2 - indicadores estatísticos de acurácia*

Medição de Referência	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%)		
			mensal	horário	
HU-USP	modeloBE2	19min05s	-11,27	13,01	31,35
	modeloBE3	20min42s	-11,09	12,86	31,32
CAG1	modeloBE2	19min05s	-52,79	62,68	77,56
	modeloBE3	20min42s	-52,79	62,68	77,56
Splits	modeloBE2	19min05s	-45,49	–	220,10
	modeloBE3	20min42s	-44,16	–	218,77

Nota-se a diminuição dos indicadores em relação em todas as esferas de comparação. Naturalmente, a maior melhoria observada foi nos indicadores que versam sobre a simulação dos *splits*, de 2,94 % do ESM e 0,63 % do CV EQM horário. A variação nos indicadores estatísticos da simulação da CAG1 foi desprezível.

Apesar de exauridas as fontes de possíveis discrepâncias nos equipamentos modulares, os erros da versão final mostram uma tendência de subestimativa da simulação em relação a todas medições de referências consideradas.

4.7 Fase B - Análise paramétrica

Após o término de evidências para a melhoria da qualidade da simulação sem o alcance dos limites estatísticos considerados, deseja-se investigar, tal como na fase A, parâmetros que retornam uma melhoria da acurácia da simulação. Como já pesquisado, no que tange a simulação da CAG1, a temperatura do ar insuflado é um parâmetro sensível capaz de anular o ESM da simulação deste sistema. Entretanto, para a simulação dos *splits*, esta variável mostrou-se pouco sensível.

Com a pulverização das zonas térmicas do modelos de forma a representar os ambientes atendidos por equipamentos de ar condicionado de pequeno porte, espera-se que a simulação do consumo destes equipamentos seja mais sensível a parâmetros de entrada ligados aos elementos da envoltória, uma vez que as suas zonas térmicas possuem relação área/volume maior. Assim, como forma de representar o efeito da abertura de portas, realiza-se uma análise paramétrica variando a taxa de infiltração, representada por uma relação de vazão por área de superfície da envoltória. Assim, varia-se a taxa de infiltração nas zonas térmicas atendidas pelos *splits* em duas proporções: 20% para mais e 20% para menos. Espera-se que esta taxa impacte, também, a simulação da CAG1, porém em menor proporção.

As Tabelas 4.39 e 4.40 apresentam o reflexo da variação da temperatura do ar insuflado e da taxa de infiltração na simulação da CAG1 e na simulação dos *splits*, respectivamente. Este reflexo é expresso em termos do Erro Sistemático Médio (ESM).

Tabela 4.39: *Simulação da CAG1 - Matriz da variação do ESM em função da temperatura do ar insuflado de resfriamento e da taxa de infiltração*

		Variação da Taxa de infiltração		
		- 20 %	0 %	+ 20 %
Temperatura do ar insuflado	23°C	-52,78	-52,79	-52,80
	21°C	-26,06	-26,08	-26,09
	19°C	0,99	1,04	1,02

Tabela 4.40: *Simulação dos splits - Matriz da variação do ESM em função da temperatura na serpentina de resfriamento e da taxa de infiltração*

		Variação da Taxa de infiltração		
		- 20 %	0 %	+ 20 %
Temperatura da serpentina de resfriamento	23°C	-45,64	-44,16	-47,32
	21°C	-48,22	-45,64	-47,32
	19°C	-48,22	-45,64	-47,31

Pode-se notar que, apesar da hipótese adotada, a simulação dos *splits* mostra-se pouco sensível ao parâmetro taxa de infiltração. Uma taxa de - 20 % retornou uma variação do ESM em 9 % e a taxa de +20%, uma variação do ESM de - 7 %. A variação do ESM da simulação da CAG1 pode ser considerada desprezível em relação à variação da taxa de infiltração. A temperatura da serpentina de resfriamento que mostrou o melhor acoplamento do modelo foi a de 19°C à taxa de infiltração sem variação. Os indicadores estatísticos para esta configuração estão apresentadas na Tabela 4.41.

Tabela 4.41: *Indicadores de acurácia em relação ao consumo total do prédio e dos equipamentos de climatização - Versão final*

Medição de Referência	ESM (%)	CV EQM (%) mensal	CV EQM (%) horário
HU-USP	-1,19	6,86	25,76
CAG1	1,04	25,98	50,28
Splits	-45,64	–	214,29

Há, portanto, não só a melhoria da acurácia da simulação da CAG1, mas também da simulação do consumo elétrico do prédio. Com esta configuração final, pode-se considerar a simulação calibrada.

4.8 Resumo do processo de calibração

A Tabela 4.42 apresenta a variação nos indicadores estatísticos nas primeiras e últimas versões de cada fase do processo de calibração. Os momentos nos quais os indicadores alcançam

os limites das normas ASHRAE (2002), USDOE (2015) estão destacados em azul.

Tabela 4.42: Indicadores estatísticos de todas versões criadas na calibração da simulação do HU-USP

	Medição: Prédio			Medição: equipamento de ar condicionado			
	ESM (%)	CV EQM (%) mensal	CV EQM (%) horário	Tipo	ESM (%)	CV EQM (%) mensal	CV EQM (%) horário
modeloA00	-13,80	14,66	36,57	CAG1	-68,19	74,89	78,37
modeloA08	-20,43	20,74	36,81	CAG1	-89,09	101,15	97,87
modeloAE2	-4,66	5,64	32,05	CAG1	17,96	34,71	48,01
modeloB00	-9,21	11,74	36,40	<i>Splits</i>	46,86	–	315,72
modeloB05	-9,84	11,93	35,71	<i>Splits</i>	-44,08	–	223,37
modeloBE3	-11,09	12,86	31,32	CAG1	-52,79	62,68	77,59
				<i>Splits</i>	-44,16	–	218,77
Final	-1,19	6,86	25,76	CAG1	1,04	25,98	50,28
				<i>Splits</i>	-45,64	–	214,29

Desconsiderando a versão final que é resultado de uma análise paramétrica, corrobora-se a eficiência da utilização de uma método baseado em evidências para a calibração do consumo de energia elétrica do HU-USP. Da versão inicial até a versão modeloBE3, a simulação do prédio em relação a todos os indicadores melhorou 15 % médios. Em relação à simulação da CAG1, a melhoria média foi de 13 %. Já em relação à simulação dos *splits* que foram medidos, a versão inicial é o modeloB00 no qual os indicadores estatísticos melhoraram 18 % na média até a versão modeloBE3.

Entretanto, percebe-se que apesar da versão final ter sido exitosamente calibrada, a simulação dos sistemas de climatização na versão final ainda não pode ser considerada calibrada. Entretanto, ainda não há na literatura a proposição de limites estatísticos na simulação em nível de equipamentos de usos finais. De fato, apenas do ESM pôde ser calibrado na simulação da CAG1. Entretanto, o CV EQM, um indicador que remove o efeito de compensação entre estimativas para mais e para menos, o limite não pôde ser alcançado. A discrepância entre simulação e medição foi maior no caso dos *splits*, cujo CV EQM horário não apresentou, em nenhuma das versões, valores inferiores a 200 %.

A utilização, na carência de evidências, de uma análise paramétrica para ajustar parâmetros de entrada do sistema de climatização tendo como função objetivo a minimização do ESM foi preponderante no êxito do exercício de calibração. O ajuste da temperatura da serpentina de resfriamento da CAG1 além de trazer o ESM da simulação deste sistema para níveis dentro dos limites normativos teve como consequência, também, o alcance destes limites em relação à simulação do edifício.

A partir da obtenção da matriz desagregada da simulação apresentada na Figura 4.14 pode-se averiguar o motivo pelo qual, apesar de a simulação dos sistemas de climatização possuírem discrepâncias para além dos limites normativos, a simulação do prédio todo alcançar estes limites. Portanto, percebe-se que o motivo está na baixa participação do sistema de climatização

no consumo elétrico do prédio, apenas 26 %, sendo 77 % representado por central de água gelada e 23% por equipamentos de condicionamento modulares.

Figura 4.14: *Matriz desagregada de consumo de energia do modelo final da fase B*

A matriz desagregada da Figura 4.14 também revela que, pela baixa participação de ar condicionado, outro tipo de modelo poderia ter sido lançado mão. O *EnergyPlus* é uma ferramenta cujo principal aplicação é simular a performance térmica da edificação, sendo preterida no caso de edifícios cuja demanda térmica não é relevante.

Aplicações da simulação calibrada

Afim de apresentar as aplicações da simulação calibrada, neste capítulo serão apresentados o seu uso para estimar a matriz desagregada do HU-USP e para simular um leque de cenários de intervenção, tanto no sistema de iluminação como no de climatização.

5.1 Estimativa da curva de carga do HU-USP

A Figura 5.1 apresenta a curva de carga da simulação calibrada em três estações do ano, distinguindo sábado, domingo e segunda-feira.

Figura 5.1: Curva de carga com segregação por tipo de uso final

À primeira vista, nota-se que ainda restam fontes de desvios entre simulação e medição. De fato, o alcance dos limites dos indicadores estatísticos não revela que a simulação representa

perfeitamente o consumo elétrico do prédio. Estes limites alcançados revelam que a simulação é capaz de representar minimamente o comportamento energético do prédio real.

Como esperado, há o aumento da participação dos sistemas de climatização na carga do edifício em meses de temperatura mais alta. O conhecimento desta curva de carga desagregada permite o estudo de cenários de eficiência energética com a finalidade de reduzir o acionamento de cargas desnecessários em horário de ponta, que, segundo área de atuação da AES Eletropaulo, corresponde ao período de 17h às 22h (AES ELETROPAULO, 2018b). Além disto, podem-se avaliar cenários para redução da demanda de pico com a finalidade de redução da demanda contratada. O regime de tarifação da USP (circuito geral que alimenta o HU-USP) enquadra-se no regime A4 Horo-Sazonal VERDE.

5.2 Seleção de alternativas de Ações de Eficiência Energética (AEE's)

Seleciona-se algumas alternativas de AEE's no sistema de iluminação e climatização. As comparações de cada alternativa seleciona com a simulação calibrada estão apresentadas nas subseções a seguir. Para compatibilizar a nomenclatura com a norma ABNT NBR ISO 50.001 (ABNT, 2011), utiliza-se o termo "linha de base" para designar o consumo de energia elétrica sem a AEE, representado pela simulação calibrada.

5.2.1 Lâmpadas tubular LED de 18W

Como apresentado, esta pesquisa pertence a um projeto principal que tem como um dos objetivos a troca de todas lâmpadas fluorescentes do HU-USP por lâmpadas LED. Procurou-se a lâmpada substituta que não necessitasse a troca das luminárias já existentes, com duas lâmpadas tubulares. Para preencher este pre-requisito, prevê-se como substituta, uma lâmpada LED tubular de 18W.

Como há 4.830 luminárias no HU-USP, cada qual com 2 lâmpadas, a potência total de iluminação integraliza 173,88 kW. Esta potência resulta numa intensidade luminosa de 4,89 W/m². A comparação do consumo de energia mensal da linha de base com o cenário com as lâmpadas LED de 18W resulta na Figura 5.2. As economias mensal de energia elétrica, em MWh, estão identificadas nesta figura.

Nota-se sazonalidade nas economias esperadas, uma vez que uma intensidade luminosa inferior incorre em menos calor sendo gerado para o sistema de climatização. Assim, há um efeito secundário na adoção de lâmpadas mais eficientes que é a diminuição do consumo dos equipamentos de climatização.

Anualmente, os ganhos de energia somam 886 MWh. Considerando o consumo mensal do HU-USP integralizam 434 MWh mensais médios, a redução anual pelo uso de LED 18W representa 2 vezes este consumo.

Figura 5.2: Comparação do consumo de energia elétrica mensal pela substituição das atuais lâmpadas fluorescentes tubulares de 32W por lâmpadas LED tubulares de 18W

5.2.2 Lâmpadas tubular LED mais eficiente do Brasil

Afim de se avaliar um cenário mais otimista de redução de consumo de energia elétrica, testa-se qual seria o impacto no consumo de energia se ao invés das lâmpadas de 18W, fosse instalada uma lâmpada com uma eficiência de conversão de luz mais elevada. Assim, considera-se a lâmpada com a maior eficiência energética de acordo com a tabela dos produtos etiquetados pelo PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica): uma lâmpada de 140 lm/W. (PROCEL INFO, 2018)

Considerando a potência de conversão das lâmpadas de 18 W igual a 108 lm/W, temos no total 18 Mlm de fluxo luminoso a ser satisfeito para o prédio do HU-USP. O atendimento deste fluxo luminoso total por lâmpadas de eficiência de 140 lm/W representaria uma demanda elétrica igual a 134,14kW, o que corresponde a uma intensidade luminosa de 3,77 W/m². Esta novo cenário resulta nas reduções mensais no consumo de energia elétrica do prédio apresentadas na Figura 5.3.

As reduções resultam numa economia equivalente a 1.148 MWh anuais, ou seja, uma economia 29 % maior que aquela esperada no cenário com lâmpadas de 18 W. Vale ressaltar que considerou-se este cenário apenas para delimitar um potencial de eficiência energética máxima a qual o HU-USP pode alcançar no tocante ao seu sistema de iluminação existente.

Figura 5.3: Comparação do consumo de energia elétrica mensal pela substituição das atuais lâmpadas fluorescentes tubulares de 32W por lâmpadas LED com eficiência de 140 lm/W

5.2.3 Splits com selo A

Faz-se a simulação de um cenário caso todos os equipamentos de ar condicionado do HU-USP possuíssem o COP de equipamentos selo A, ou seja, 3,23. As demais características destes equipamentos foram mantidas as mesmas que são encontradas na última versão criada na calibração. A Figura 5.4 mostra a redução do consumo de energia elétrica resultante deste cenário.

Percebe-se uma redução pequena no consumo de energia em comparação com a linha de base, representando uma redução do consumo de energia elétrica de apenas 0,40 %. Anualmente, esta redução representa uma economia de 20.692 kWh anuais. Os meses com o maior consumo mensal do prédio são os meses que foram observadas as maiores redução de energia elétrica caso se substituam os atuais equipamentos *splits* por aparelhos de selo A.

Como a troca de equipamentos de ar condicionado representa tipicamente um maior investimento em comparação com a troca de lâmpadas, pode-se prever um menor custo benefício de uma AEE para a troca de equipamentos *splits* do que para a troca de lâmpadas mais eficientes.

Figura 5.4: Comparação do consumo de energia elétrica mensal caso os atuais equipamentos de ar condicionado do tipo splits possuíssem um COP correspondente ao selo A

5.2.4 Substituição dos *splits* por uma CAG

Por último, faz-se a simulação considerando que os ambientes condicionados por equipamentos *splits* são condicionados por uma terceira CAG. Esta CAG possui um resfriador de condensação a ar com as mesmas características da CAG criada no modelo inicial, ou seja:

Resfriador com condensação a ar: COP nominal: 5,5; temperatura de saída da água: 6,67°C; temperatura de entrada da água: 29,4°C; capacidade nominal de resfriamento: *autosized*.

Bomba de velocidade variável: vazão nominal: *autosized*; pressão: 179.352 Pa; consumo elétrico nominal: *autosized*; eficiência do motor: 90 %.

Fan coil de velocidade variável: disponibilidade: sempre disponível; eficiência do ventilador: 60 %; pressão total: 1.017 Pa; vazão nominal máxima: *autosized*; eficiência do motor: 93 %.

Caixa de mistura: vazão máxima de ar externo: *autosized*; vazão mínima de ar externo: *autosized*.

O resultado da comparação deste cenário com a simulação calibrada em termos de consumo mensal de energia elétrica está apresentado na Figura 5.5

Percebe-se que, diferente daqueles cenários tratados até agora, o aumento do consumo de energia elétrica em relação à linha de base. Este aumento está associado ao gasto adicional

Figura 5.5: Comparação do consumo de energia elétrica mensal caso todos equipamentos de ar condicionado tipo split fossem substituídos por uma CAG única

de energia para a renovação de ar nos ambientes, função não atendida por equipamentos do tipo *split* convencionais. Este aumento representa, anualmente, cerca de 1.990 MWh, 38 % de energia adicionais em comparação com a linha de base.

Como este cenário atende a uma demanda não englobada na linha de base, pode-se considerá-lo não como uma AEE, mas um ajuste de linha de base.

Proposta de uma metodologia de calibração

A partir da experiência obtida e dificuldades enfrentadas do processo de calibração da simulação elétrica do HU-USP, faz-se uma proposta de uma nova metodologia de calibração da simulação. Os detalhes para aplicação desta metodologia são exauridos neste capítulo.

6.1 Premissas para construção de um novo método de calibração

A partir da revisão dos principais métodos de calibração e experiência do exercício de calibração da simulação do HU-USP, foram identificadas melhores práticas e práticas que devem ser evitadas. Todas elas servem como premissa para a construção de um novo modelo que deve considerar:

Abordagem baseada em evidência ou baseada em uma análise paramétrica: de modo geral, foi identificado que métodos baseados em evidências são eficazes para o alcance de simulações próximas às simulações. Entretanto, a utilização de análise paramétrica parece uma alternativa para avaliar evidências que não foram possíveis de ser coletadas, ou focar a coleta de evidências naquelas que possuem maior influência.

Dados climáticos: utilizar dados climáticos de obtidos de uma estação mais próxima possível do edifício de estudo.

Ordem de inserção dos parâmetros: em primeiro lugar altera-se os parâmetros que afetam as cargas internas, em seguida os parâmetros que descrevem o sistema de climatização.

Zoneamento: zonas térmicas muito detalhadas no início da calibração resulta em um maior tempo de simulação a partir da primeira versão da calibração. Utilizar um esquema de zoneamento que otimize o tempo despendido para construção do modelo e o tempo de simulação. Zonas térmicas podem agregar ambientes com tipologias diferentes.

Avaliação a simulação dos usos finais: como não há norma para avaliar a aderência da estimativa energética desagregada por usos finais, pode-se, para as cargas independentes de condições climáticas, utilizar os mesmos limites da simulação para a instalação inteira; e, para as carga dependentes de condições climáticas, utilizar de técnicas de visualização.

Hierarquização das evidências: hierarquizar as evidências coletadas de acordo com a ordem proposta por Raftery, Keane e O'donnell (2011a).

Registro das versões da simulação: manter e controlar as versões criadas ao longo da calibração e identificar o ajuste realizado e cada versão.

Fase de correção de erros: como as versões criadas advêm de ajustes gradativos, a identificação de erro em algum parâmetro ajustado inicialmente levaria à correção de todas fases posteriores a esta fase inicial. A reserva de uma fase de correção de erros evita a necessidade de se retornar à versão onde o erro ocorreu e corrigir todas versões posteriores.

Sistema de condicionamento de pequeno porte: nenhuma metodologia avaliada abordou edifícios que continham equipamentos de pequeno porte como *split* e ar condicionado de janela. A criação de uma nova metodologia deve considerar a inserção da característica destes equipamentos, bem como a divisão das zonas térmicas condicionadas por eles.

Eliminação de critérios subjetivos: todas metodologias continham em alguma parte um passo que envolvia decisões com base na experiência do analista. A remoção destes critérios deve estar entre os esforços na criação de uma nova metodologia.

6.2 Metodologia de calibração

A Figura 6.1 apresenta o diagrama com o passo-a-passo do método de calibração proposto. O objetivo da calibração é assegurar que o consumo simulado se aproxime, sob a luz dos indicadores de qualidade dos manuais de M&V, à medição dos consumos dos equipamentos elétricos do edifício parcial ou integralmente.

O método é composto por duas fases principais: a fase A no qual cria-se um modelo inicial com um zoneamento que detalha os ambientes atendidos por equipamentos de médio e grande porte, ou seja, equipamentos com capacidade de refrigeração a partir de 17,6 kW os quais incluem principalmente *self-contained*, *VRV/VRF* e Central de Água Gelada; e a fase B no qual faz-se o detalhamento dos ambientes que são atendidos por equipamentos de pequeno porte, que podem ser bombas de calor e ar condicionado ou do tipo *split*, ou *multisplit* ou janela. Caso não houver equipamentos de pequeno porte, ou caso estes não sejam medidos, a fase B é ignorada.

A divisão deste método em fases de acordo com o nível de desagregação da zona térmica deve-se à uma razão de ordem prática: um modelo mais detalhado custa mais processamento computacional e tempo de preparação do modelo; assim, a fase B, de maior desagregação do modelo, ocorre posteriormente posteriores. Tem-se, desta forma, um sentido preferencial de ordenamento das fases: dos níveis de maior agregação de zonas térmicas ao nível de menor agregação de forma a otimizar o tempo necessário para calibração.

Figura 6.1: *Visão geral do método de calibração da simulação*

6.2.1 Delimitação das zonas térmicas

A delimitação destas zonas se inicia com a definição do tipo de sistema de condicionamento em operação, como visto este sistemas definirão o número de fases da calibração. Diferentes sistemas de condicionamento devem servir diferentes zonas térmicas, entretanto, não se cria uma zona térmica única sob um mesmo sistema de condicionamento. Deve-se fazer a desagregação das zonas térmicas de acordo com os seguintes critérios baseados nas orientações de Raftery, Keane e O 'donnell (2011a):

Função do ambiente: a cada zona térmica se associa um ambiente ou conjunto de ambientes nos quais estão associadas as informações das cargas internas fontes de calor. Deve-se certificar que as zonas térmicas condicionadas por algum sistema possua ambientes com cargas internas homogêneas, ou seja, intensidade e agenda de iluminação; intensidade e agenda de equipamentos elétricos; perfil de ocupação; nível de atividade dos ocupantes; etc.

Posição relativa ao exterior: de acordo com Raftery, Keane e O 'donnell (2011a) este critério relaciona-se com a diferença de carga criada entre as zonas internas e externas resultantes da irradiância solar, condução das paredes externas e infiltração de ar.

Além dos critérios definidos por Raftery, Keane e O 'donnell (2011a) são concebidos os seguintes critérios:

Áreas não condicionadas: pode-se agregar em uma zona térmica única ambientes não condicionados, mesmo que estes tenham diferentes funções.

Andar: de maneira a representar as diferenças de condução térmica entre os andares e principalmente entre o piso do primeiro andar e o solo, desagrega-se zonas térmicas que, mesmo atendidos por um mesmo sistema, estão em diferentes andares. Esta diretriz está de acordo com os exemplos de modelos comerciais disponível em USDOE (2018).

Por fim, na fase B, pode-se criar um nível mais baixo de desagregação das zonas térmicas baseados na disponibilidade de medições que ocorram em equipamentos que funcionam dentro de um limite delimitado. Este critério é mais explícito para sistemas de condicionamento ambiental, pois estes atendem ambientes com limites identificáveis. Entretanto, não se descarta a possibilidade de se obter medições isoladas por salas ou setores dos demais usos finais.

6.2.2 Coletas e organização de evidências

Uma abordagem de calibração baseada em evidências tem como elementos fulcrais a caracterização do edifício existente através da investigação e coleta de dados (DADIOTI; REES, 2013). As informações podem ser coletadas previamente ou ao longo do processo de calibração, como apresentado no processo iterativo proposto pelos autores Raftery, Keane e O 'donnell (2011a) e descrito na Figura 2.5. Waltz (1992) sugere dois tipos de pesquisa para desenvolver um melhor conhecimento das características físicas e operacionais de um edifício:

Pesquisa observacional: inclui a investigação, a partir de observação direta, do funcionamento da instalação. Esta investigação inclui a conferência dos dados de planta, contagem de equipamentos elétricos, verificação do tipo de sistema de climatização e suas características, mapeamento dos ambientes condicionados, mapeamento do horário de funcionamento das ambientes. Waltz (1992) inclui, também, a avaliação do estado dos sistema de controle do sistema de climatização a partir medição de parâmetros de operação como a temperatura de *setpoint* do sistema de condicionamento e temperatura do ar na caixa de mistura. O autor sugere também uma visita ao longo da noite para avaliar o funcionamento do sistema neste período.

Pesquisa da carga elétrica: de acordo com Waltz (1992) podem-se ter duas categorias de medições: as medições instantâneas, que usam um medidor de energia portátil em quadros de energia e equipamentos elétricos; e as medições registradas, que usam um medidor com memória de massa para captar a variação do consumo de energia (tipicamente horário) ao longo de um período. Este último tipo de medição, além de ser utilizada para medir o consumo de toda edificação, é necessária a nível de sub-instalação no caso de ocorrência de cargas específicas cujo perfil de consumo possui grande variação, como equipamentos de condicionamento e motores de indução. Caso seja necessário a medição do sistema de condicionamento de um ambiente que é atendido por mais um equipamento de climatização modular, a medição destes equipamentos deve ser feita ao longo do mesmo período. Tais equipamentos serão denominados equipamentos modulares integrados.

Todas estas pesquisas podem estar enquadradas em um programa de auditoria energética que nada mais é do que um procedimento de avaliação de onde e como uma instalação (ou parte dela) usa energia, identificando oportunidade de redução de consumo. O livro intitulado *Handbook of Energy Audits* (THUMANN; YOUNGER, 2003) provém toda informação necessária para a implementação de um programa de auditoria energética em uma instalação.

É sugerido que as evidências sejam coletadas e organizadas de acordo com o grau de hierarquia proposto por Raftery, Keane e O'donnell (2011a). Entretanto, propõe-se a segregação do tipo "Dados registrados de medições" em dois níveis: um nível mais alto denominado "Dados registrados de medições elétricas", e um nível mais baixo, "Dados registrados de medições não-elétricas". Vale ressaltar que este nível hierárquico não corresponde à ordem de prioridade de coleta de informações acerca de um edifício, já que esta deve priorizar informações documentais antes de medições. A Tabela 6.1 apresenta um planilha-exemplo das categorias de hierarquia propostas e a ordem preferencial de coleta de dados.

Assim, ajustes que são baseados em evidências com prioridade mais alta podem substituir ajustes com prioridade mais baixa. Como utiliza-se a simulação para tentar representar o consumo de energia elétrica real dos equipamentos do prédio, define-se os "dados registrados de medições elétricas" com prioridade mais alta. Assim, ele pode ser utilizado como referência em análises paramétricas que aproximem a resposta simulada da resposta medida.

Tabela 6.1: Planilha para classificação e hierarquização das evidências

Prioridade	Ordem preferencial de coleta de dados	Tipo de evidência	Evidências coletadas
1	5	Dados registrados de medições elétricas	
2	6	Dados registrados de medições não elétricas	
3	7	Dados de medições pontuais	
4	3	Levantamento e verificação física (pesquisa de campo)	
5	4	Entrevistas a funcionários e operadores	
6	2	Documentos de operação (manuais de operação e manutenção - O&M)	
7	1	Documento da instalação (desenhos e plantas "as built")	
8	8	Estudos de referência "benchmark" e guias de boas práticas	
9	9	Normas, especificações e guias	

6.2.3 Controle dos ajustes do modelo

As evidências coletadas servem como base para ajuste nos parâmetros de entrada do modelo. Assim, antes de iniciar o processo de calibração deve-se prever quais serão esses ajustes e com base em qual evidência. Cada ajuste resulta em uma nova versão do modelo que deve ser devidamente identificado. Nesta metodologia, opta-se por identificar a versão do modelo com um padrão alfanumérico: primeiro a letra que indica a fase da calibração (A ou B) seguida de um número representando a ordem do ajuste que foi realizado nesta fase. Este padrão pode estar precedido de um nome arbitrário como "versão" ou "modelo". Também prevê-se a utilização de um sufixo E para identificação de versão advinda de uma correção de erros. Dedicar-se, também, uma fase de análise paramétrica identificada com a letra S.

Para controle de todas as versões criadas, pode-se usar um programa de controle de versão (*version control software*) como sugerido por Raftery, Keane e O'donnell (2011a). Há diversos programas deste tipo disponíveis como o *TortoiseSVN*, usado por Raftery, Keane e Costa (2011b), ou o *GitHub*. Pode-se optar, não obstante, a uma planilha para identificação da versão e a mudança nela inserida. Esta opção não permite compartilhamento com diversos analistas em comparação a um *software* de controle de versão, porém pode ser suficiente no caso de projetos de um único analista ou no caso de que alterações que não são feitas simultaneamente por diferentes analistas.

6.3 Avaliação da acurácia da simulação

A avaliação da acurácia da simulação pode ser feita individualmente em cada versão criada ou apenas na versão final de cada fase, onde se exaure os ajustes baseados em evidência. Nesta avaliação, pode ser usado os indicadores de qualidade de caráter estatísticos discutidos na Seção 2.1.

Raftery, Keane e O'donnell (2011a) afirma que até o momento os níveis de qualidade visam avaliar a qualidade de simulação apenas em nível da instalação como um todo. Os autores esperam que no futuro, com a disponibilização de mais informações sobre medição dos usos

finais em edifícios, publique-se normas que contenham níveis de qualidade da simulação a nível de sub-instalação, ou seja, que avalie a aderência da simulação dos usos finais de energia.

Como observado no processo de calibração apresentado, perseguir o alcance dos mesmos níveis de qualidade do prédio, em especial o CV EQM, para equipamentos de condicionamento não é tarefa fácil. Provavelmente, os níveis de qualidade poderiam ser aumentados para caber a calibração dos equipamentos de condicionamento. Ou então, a utilização de outros indicadores estatísticos, que, ao invés de avaliar o acoplamento entre simulação e medição em todo período, avalia apenas o período crítico de funcionamento do sistema de climatização, ou seja, quando este demanda mais energia.

Além dos métodos estatísticos, pode-se lançar mão de métodos visuais ou para certificação da acuracidade do modelo ou para indicação do problema que causa o distanciamento da simulação, indicação impossível de se obter através de um indicador estatísticos. Por exemplo, se a causa do distanciamento jaz em erros na representação das agendas dos equipamentos elétricos, a plotagem da simulação *versus* a medição em um dia específico pode trazer um gráfico como o apresentado na Figura 6.2.

Figura 6.2: Simulação versus medição: erro na representação de agendas.

Percebe-se, na Figura 6.2 que desvios causados por erro na representação de agenda são caracterizados graficamente por desvios entre a carga de pico e base que são de diferente tamanho. Por outro lado, erros caracterizados por intensidade elétrica em excesso ou em falta, caracteriza-se por diferenças entre a carga de pico e de base que se mantém relativamente constante, como a Figura 6.3 que exemplifica um caso de intensidade elétrica da simulação mais baixa. Esses dois erros podem surgir juntos em uma simulação resultando na Figura 6.4.

Há também casos em que supõe-se um horário de funcionamento do modelo que difere do edifício real. Neste caso, por exemplo, percebe-se um evidente abaixamento ou aumento

Figura 6.3: *Simulação versus medição: erro na intensidade elétrica.*

Figura 6.4: *Simulação versus medição: erro na agenda dos equipamentos elétricos e na intensidade elétrica.*

da potência prevista em simulação, porém que não é acompanhada pela medição. Neste caso, tem-se a Figura 6.5.

Figura 6.5: Simulação versus medição: erro na representação do horário de funcionamento do edifício.

Casos em que há um excesso no sistema de climatização podem ser verificados por uma carga de pico exagerada, como é caso da Figura 6.6.

Figura 6.6: Simulação versus medição: excesso de climatização.

6.4 Fase A

Esta fase dedica-se à criação de um modelo inicial e iniciar as alterações nos parâmetros que influem nas cargas constantes, ou independente de condições meteorológicas, ou seja, iluminação e equipamentos elétricos. Propõe-se a seguinte ordem para os ajustes: (1) ajustes

nas cargas independentes de condições climáticas; (2) ajustes nos materiais construtivos; e (3) ajustes no sistema de climatização de grande e médio porte. Pode-se optar por não seguir esta ordem devido à indisponibilidade de informações para os ajustes necessários.

6.4.1 Modelo inicial

Três evidências básicas são necessárias para a construção de um modelo de simulação inicial no *EnergyPlus*: planta baixa representando o edifício existente e dados meteorológicos ¹ do período em que se deseja fazer a análise e numa escala de tempo horária. A partir das plantas baixas, desenha-se a geometria 3D do edifício, tipificando os ambientes internos de acordo com informações normativas, que incluem intensidade luminosa, intensidade de equipamentos elétricos, agendas e características construtivas. Entre as normas utilizadas, destaque para a *ASHRAE 90.1* e *ASHRAE 189.0*. Além de normas, pode-se usar valores padrões sugeridos pelo programa *EnergyPlus*.

O zoneamento adotado nesta fase deve identificar com precisão os ambientes atendidos por equipamentos de condicionamento de grande porte. Os ambientes atendidos por equipamentos modulares podem ser agregados em áreas maiores, por exemplo, o setor inteiro no qual esses ambientes fazem parte. Define-se inicialmente uma temperatura de *setpoint* média para todos ambientes.

A versão do modelo inicial recebe a nomenclatura A0, A para indicar a primeira etapa de simulação e 0 indicando que é o modelo inicial desta etapa. Como ponto de partida do processo de calibração, faz-se o cálculo dos indicadores de qualidade para este modelo inicial.

6.4.2 Ajustes das cargas independentes de condições climáticas

Altera-se gradativamente a partir do modelo inicial os parâmetros que afetam as cargas constantes, independentes de condições meteorológicas que incluem principalmente: intensidade elétrica de iluminação e de equipamentos elétricos; agenda de iluminação e de equipamentos elétricos. A alteração pode abarcar outros fatores que influem nas cargas constantes, mas procurou-se identificar aqui os parâmetros mais fáceis e de mais comum obtenção.

A cada alteração, deve-se criar uma outra versão do modelo que recebe a denominação A seguido de um número que corresponde a ordem em que o parâmetro foi adicionado ao modelo. Assim, se a ordem de parâmetros (definida a critério do analista) for intensidade elétrica de iluminação, intensidade de equipamentos elétricos e agenda de iluminação; o modelo A1 é aquele onde se alterou a intensidade de iluminação, modelo A2 é onde alterou-se a intensidade de equipamentos elétricos e modelo A3 onde foi feita a alteração da agenda de iluminação. Deve-se assegurar que todas as versões não apresentem erros de simulação.

¹Os dados meteorológicos críticos incluem pressão atmosférica, temperatura de bulbo seco e de bulbo úmido, ponto de orvalho, umidade relativa, velocidade e direção do vento, irradiância solar normal, difusa e global. (USDOE, 2017a)

Entre as intensidades de iluminação e de equipamentos elétricos, o analista pode selecionar aquela que ele julga, devido à indisponibilidade de dados em um nível hierárquico mais alto, mais incerta. Este parâmetro é identificado na planilha ou *software* de controle de versão.

6.4.2.1 Avaliação das cargas independentes de condições climáticas

Além do cálculo dos indicadores de qualidade da simulação elétrica do modelo todo, de acordo com o grau de disponibilidade de medições elétricas, pode-se avaliar como está a simulação das cargas constantes. O método de avaliação depende da disponibilidade de dados de medição desagregada, os casos serão apresentados a seguir.

No caso de se dispor de medições desagregadas de iluminação e/ou equipamentos elétricos, pode calcular os mesmos indicadores de qualidade da simulação do edifício todo para estes usos finais. Como não se espera grande variabilidade destes usos ², é possível estabelecer o mesmos limites de ERM e CV EQM apresentados na Tabela 2.1. Além da avaliação analítica a partir de indicador numérico, pode-se optar por utilizar método visual para certificar o casamento entre simulação e medição das cargas constantes.

No caso de não se dispor de medições desagregadas, pode-se lançar mão de métodos para discretizar as cargas dependentes e independentes de clima. Westphal e Lamberts (2005), por exemplo, aconselham verificar o consumo do edifício em um dia que há certeza que não houve o acionamento de sistema de condicionamento ambiental. Para edifícios com apenas sistemas de ar condicionado, este dia pode corresponder a um período onde foram verificadas as temperaturas mais frias. A identificação das temperaturas mais frias podem se basear nos dados de projeto dos climas típicos do Brasil, conforme ABNT (2008).

6.4.3 Ajustes dos materiais construtivos

Devem-se atualizar os materiais que compõem a envoltória do modelo digital conforme os materiais utilizados na edificação real. Esta fase se faz necessária principalmente se foram associados aos ambientes materiais construtivos de normas que utilizam em sua envoltória uma camada de isolamento que na maioria das vezes não é comum para a realidade climática brasileira.

Nesta atualização, pode-se utilizar o relatório elaborado por Ordenes et al. (2003) com o levantamento dos materiais típicos utilizados na construção civil brasileira. O projeto denominado Projeteee (Projetando Edificações Energeticamente Eficientes) também traz informações mais atualizadas de componentes construtivos tipicamente usados no Brasil. O banco de dados deste projeto podem ser consultados em Projeteee (2018).

²Algumas tipologias de edifícios possui variabilidade até nesses usos finais como estudo de caso avaliado por Dadioti e Rees (2013). Neste caso, deve ser identificado qual o período do ano ocorre a variação e traduzi-la em termos de agenda de iluminação e equipamentos elétricos

6.4.4 Ajustes no sistema de climatização de médio e grande porte

Definido o tipo de sistema de climatização de médio e grande porte existente no edifício, deve-se inserir informações para detalhamento do módulo simulação destes equipamentos. Raftery, Keane e O 'donnell (2011a) sugere a seguinte lista de evidências para alimentar o modelo:

do ventilador: vazão máxima, pressão, eficiência de operação, curva de carga parcial;

das serpentinas: tipo, capacidade de refrigeração/aquecimento, temperatura da água/ar, máxima vazão de ar ou de água, *setpoints* de operação;

dos motores: tipo, potência máxima, eficiência de operação;

das bombas: tipo, vazão e pressão máximas, curva de carga parcial, *setpoints* de operação;

dos caldeiras: tipo, capacidade, eficiência térmica, vazão e temperatura da água, consumo parasítico de energia, curva de carga parcial, *setpoints* de operação;

dos resfriadores: tipo, capacidade, coeficiente nominal de desempenho, temperatura e vazão do fluido refrigerante, curva de fração da capacidade, curva de carga parcial, *setpoints* de operação;

das torres de resfriamento: tipo, capacidade, potência do ventilador, temperatura e vazão do fluido refrigerante, curva de carga parcial (para torres com velocidade variável), *setpoints* de operação.

dos equipamentos terminais: tipo (caixa VAV ou de volume constante, ventiladores de exaustão, etc), requisitos de ventilação, vazão de ar mínima e máxima, capacidade de aquecimento e resfriamento, potência, *setpoints* de operação.

6.5 Fase B

Nesta fase faz-se a desagregação das zonas térmicas de forma a captar o limite físico dos ambientes atendidos por equipamentos de climatização de pequeno porte. Caso o sistema de climatização do prédio não contemple este tipo de sistema, a fase B não é considerada.

6.5.1 Ajuste no sistema de climatização de pequeno porte

São inseridos módulos de simulação de equipamentos de climatização de pequeno porte. As principais informações nominais a serem coletadas a respeito destes equipamentos são: capacidade de refrigeração/aquecimento e COP, sendo que de ambos deriva a potência elétrica. Em caso em que há equipamentos integrados, deve-se considerar, no modelo, um equipamento único com capacidade de refrigeração/aquecimento igual à soma das capacidades de cada equipamento e obter o COP a partir da média ponderada das capacidades pela potência elétrica, tal qual Equação 6-1, onde N é o número de equipamentos servindo o mesmo ambiente.

$$COP_{médio} = \frac{\sum_{i=1}^N (Capacidade_i \times Potência_i)}{\sum_{i=1}^N Potência_i} \quad (6-1)$$

Além destas informações principais, pode-se identificar parâmetros de mais difícil acesso como a vazão de ar nominal, temperatura de *setpoint*, curvas de desempenho, disponibilidade do equipamento, eficiência do ventilador e motor, entre outros. No caso da indisponibilidade de dados sobre vazão nominal de ar, sugere-se calculá-lo a partir da equação fornecida pelo *EnergyPlus* conforme Equação 6-2

$$Vazão[m^3.s^{-1}] = Capacidade[W] \times 5,304 \times 10^{-5} \quad (6-2)$$

Em relação às curvas de rendimento, vale-se utilizar os coeficientes propostos e avaliados por Cutler et al. (2013). Neste estudo, estes autores concluem insignificante impacto na simulação de energia entre o uso destes coeficientes e o uso de coeficientes específicos por equipamentos. Desta forma, utilizar os coeficientes proposto pelos autores ajuda na economia de tempo no caso de haver um grande número de equipamentos modulares, ou mesmo quando não é possível identificar os coeficientes destes equipamentos. Os coeficientes Cutler et al. (2013) para equipamentos de ar condicionado e bombas de calor modulares são apresentados no Apêndice F.

Hendron (2006) traz a uma relação matemática expressa na equação 6-3 para determinar a eficiência de refrigeração de ar condicionados e bombas de calor (EFF) quando não é possível medi-lo experimentalmente.

$$EFF = EFF_{original} \times (1 - M)^{idade} \quad (6-3)$$

Esta relação leva em conta a taxa de degradação da eficiência original ($EFF_{original}$) dos equipamentos, dada em função da sua idade e um índice definido pelo autor como fator de manutenção, M. Estes fatores são definidos conforme levantamento do autor apresentado no Apêndice G.

6.6 Correção de erros

Prevê-se, após os ajustes baseados em evidências de todas as fases, dedicar uma etapa para correção de eventuais erros identificados nos parâmetros de entrada usados. Caso esta etapa seja necessária, insere-se o sufixo E após a letra de identificação da fase (A ou B). Se vários erros forem identificados, coloca-se após da letra E um número representando a ordem da correção dos erros.

6.7 Análise paramétrica

A partir dos ajustes baseados em evidência, identifica-se aqueles que mais repercutiram na variação do consumo elétrico do sistema de climatização. Assim, varia-se este parâmetro numa faixa de $\pm 20\%$, num passo definido pelo projetista. Aquele parâmetro que melhor resultou na diminuição do ESM, é adotado.

Análises paramétricas, apesar de não serem utilizadas pelas metodologias baseadas em evidência, são a base de outras metodologias que se utilizam de um nível de automação, como a de O'Neill et al. (2011). Como o modelo admite uma gama de soluções de menor desvio, não se pode confirmar que o parâmetro adotado que minimize o ESM é um parâmetro confiável. Entretanto, dada a estocasticidade da simulação de equipamentos de condicionamento e alto grau de recurso necessário para a coleta de parâmetros necessários, as evidências não ser suficiente para explicar o comportamento elétrica da edificação.

Caso a simulação necessite em um longo tempo para ser realizada (no modelo testado neste trabalho a simulação alcançou os 20 minutos), pode-se fazer variações em direção a um sentido preferencial. Por exemplo, caso o intuito seja o aumento do consumo de ar condicionado, o ajuste recomendável seria a diminuição da temperatura de *setpoint*, aumento da intensidade de equipamentos elétricos, aumento da atividade das pessoas, etc; nunca o contrário.

Para aumentar o espectro de procura de um parâmetro ou conjunto de parâmetros ótimos, pode-se, também, lançar mão de uma ferramenta automatizada. Yang e Becerik-Gerber (2015), por exemplo, cita esta alternativa em caso de indisponibilidade de evidências acerca do edifício real. Além de aumentar o campo de busca, a utilização destas ferramentas tornam mais a calibração mais rápida e exige um menor tempo do profissional empenhado na simulação, que, caso contrário, deve fazer o ajuste dos parâmetros de maneira manual.

6.7.1 Ajuste final da intensidade do uso final com maior incerteza

Esta etapa final destina-se a realizar o ajuste fino da intensidade de iluminação ou equipamentos elétricos que foi identificada na primeira fase como a mais incerta. Assim, partindo do pressuposto que neste ponto todas as cargas estão calibradas com exceção desta, resta apenas fazer a modificação desta carga para se obter um modelo completamente calibrado. Esta consideração assume que o erro mais significativo que resta é o erro representado no gráfico da Figura 6.3

Desta forma, a modificação nesta carga é feita multiplicando-a pelo quociente do consumo de energia medida com o consumo de energia simulada, ambos integrados ao longo do período estudado que normalmente é ao longo de um ano todo. Repete-se este passo até que a simulação se enquadre dentro dos limites dos manuais de M&V.

O impacto na carga de ar condicionado decorrente do aumento/redução da intensidade será considerado marginal caso a variação seja inferior a 2 vezes o valor de intensidade inicial.

Considerações finais e recomendações de trabalhos futuros

A calibração da estimativa de consumo de energia de um modelo é uma necessidade quando este é usado para representar edifícios já em operação. Desta forma, este trabalho tem como objetivo calibrar a simulação de um modelo na plataforma *EnergyPlus* que representa o consumo de energia elétrica do Hospital Universitário da USP. A escolha da metodologia utilizada neste processo baseia-se na revisão do estado da arte dos principais métodos baseados em evidência, ou seja, que utilizam informações coletadas acerca do edifício real para alteração dos parâmetros de entrada da simulação.

A partir da revisão, verificou-se que a metodologia de Raftery, Keane e O'donnell (2011a) é a que possui maior potencial de ser generalizada para outros edifícios, além de ser a única a dar diretrizes para a criação de zonas térmicas. De forma complementar, notou-se que o estudo de caso no qual Raftery, Keane e Costa (2011b) testou a metodologia, foi o único a atingir os níveis de acurácia normativos ao longo do ano e na escala horária, mesmo em relação à simulação do sistema de condicionamento ambiental. As demais metodologias ou não utilizaram os indicadores estatísticos ou não possuíam medições segregadas do sistema de climatização ou não avaliaram a simularam deste sistema ao longo de um ano completo.

A simulação calibrada do HU-USP a partir desta metodologia retornou todos indicadores de acurácia dentro dos limites normativos escolhidos. Entretanto, quando comparou-se a simulação do sistema de climatização com as medições disponíveis, percebeu-se indicadores ainda fora dos limites normativos. Estas medições incluem o que convencionou-se chamar de CAG1: a central de água gelada que atende ambientes do centro cirúrgico e obstétrico; e 16 equipamentos modulares do tipo *split* que atendem áreas com usos diversos.

Percebeu-se que o único indicador que foi possível trazer para limites normativo aceitáveis utilizando uma análise paramétrica manual foi o Erro Sistemático Médio (ESM). Nesta análise, variando o parâmetro temperatura da serpentina de resfriamento da CAG1, foi possível encontrar um valor ótimo que retorna um ESM dentro dos limites para a simulação deste sistema. O grande tempo necessário para a simulação do modelo final criado, em média 19min, impõe uma restrição para realizar análises paramétricas manuais utilizando outros parâmetros de entrada. Desta forma, não se atingiu o limite de acurácia dos demais indicadores, nem em relação

à simulação dos *splits*, não obstante os ganhos de acurácia devido aos ajustes baseados em evidência.

Resta-se a dúvida se os indicadores estatísticos utilizados para avaliar a acurácia da simulação do edifício podem ser utilizados para validar a simulação dos equipamentos de climatização. Da calibração dos sistemas de climatização do HU-USP, percebem-se ainda grandes discrepâncias em relação às medições coletadas.

A partir da simulação calibrada simula-se alternativas de eficiência energética no sistema de iluminação e de ar condicionado. A alternativa que resultou numa maior redução foi aquela relacionada ao sistema de iluminação. O cenário de substituição de todos equipamentos de ar condicionado do tipo *split* por uma central de água gelada, ao contrário, resultou num aumento do consumo de energia elétrica do prédio.

A experiência acumulada no processo de calibração do consumo de energia elétrica do HU-USP, bem como a revisão bibliográfica, permitiram a proposição de uma metodologia nova. A intenção desta proposta de abordagem está em considerar as idiosincrasias dos usos finais do HU-USP. Assim, ela leva em consideração dois pontos fulcrais não avaliadas pelas metodologias baseadas em evidência: a presença de equipamentos de condicionamento modulares e carências de evidências acerca do edifício real.

Para confrontar o primeiro ponto, foi proposta um escalonamento da metodologia em duas fases. A primeira no qual se considera apenas equipamentos de médio e grande porte, que tipicamente sugerem zonas térmicas mais volumosas; e a segunda fase no qual se considera a pulverização das zonas térmicas de forma a detalhar os ambientes condicionados por equipamentos modulares. Além do zoneamento, esta metodologia propõe orientações para a coleta e organização de evidências para calibração, bem como fornece ferramentas para identificar fontes de desvios entre simulação e medição.

A presente metodologia encara o segundo ponto, admitindo a possibilidade de parâmetros serem adotados na simulação, porém não baseados em evidência. Para isto, ela propõe a escolha de um parâmetro mais sensível e sua variação para buscar o melhor acoplamento da simulação com a medição. Propõe-se, para agilizar este processo, a utilização de uma ferramenta de parametrização automatizada.

7.1 Sugestão de trabalhos futuros

Dentre os desdobramentos de trabalhos futuros do presente trabalho de pesquisa destacam-se:

- estender a generalização da metodologia criada, considerando o consumo de gás e cargas de aquecimento;
- certificar a generalidade da metodologia proposta através de sua aplicação em diferentes tipologias de edifícios;

- construção de uma ferramenta de otimização dos parâmetros de entrada do modelo *EnergyPlus* tendo como função objetivo o alcance dos limites dos indicadores de Erro Sistemático Médio (ESM) e CV EQM (Coeficiente de Variação do Erro Quadrático Médio). A utilização da programação em *Python* neste trabalho parece uma ferramenta promissora.
- adaptação dos indicadores estatísticos (ou do seus limites) de forma a melhor expressar o acoplamento entre simulação dos sistemas de climatização e medição. Como o sistema de climatização deve ser dimensionado de forma a atender a carga de pico, parece que avaliar a simulação nesses períodos uma estratégia mais realista do que ao longo do período completo de um ano, hora a hora.
- verificar a diferença entre a economia de energia elétrica prevista entre as diferentes versões criadas. A hipótese a ser avaliada seria: a economia de energia elétrica prevista é indiferente às versões criadas. Naturalmente, prevê-se algumas AEE's seriam mais sensíveis a certas versões.
- verificar se a equação de Hendron (2006) (6-3) de degradação do COP é aplicável.

Referências Bibliográficas

AES ELETROPAULO. *Eficiência Energética*. 2018a. Disponível em: <<https://www-aeseletropaulo.com.br/sobre-a-aes-eletropaulo/eficienciaenergetica/Paginas/projetos-de-efici%C3%Aancia-energ%C3%A9tica.aspx>>. Acesso em: 13 jul. 2018.

AES ELETROPAULO. *Horário de Ponta*. 2018b. Disponível em: <<https://www-aeseletropaulo.com.br/poder-publico/sobre-energia/paginas/horario-de-ponta.aspx>>. Acesso em: 01 ago. 2018.

ALLESINA, G.; MUSSATTI, E.; FERRARI, F.; MUSCIO, A. A calibration methodology for building dynamic models based on data collected through survey and billings. *Energy and Buildings*, v. 158, p. 406–416, 2018.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. *Guideline 14-2002: Measurement of energy and demand savings*. Atlanta, GA, 2002.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. *2009 ASHRAE Handbook: Fundamentals*. International system units. Atlanta, USA: ASHRAE, 2009a.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. *ANSI/ASHRAE/USGBC/IES Standard 189.1-2009: Standard for the design of high-performance green buildings - except low-rise residential buildings*. Atlanta, GA, 2009b.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. *ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-2007: Energy standard for buildings except low-rise residential buildings*. Atlanta, GA, 2010.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. *2013 ASHRAE Handbook: Fundamentals*. International system units. Atlanta, USA: ASHRAE, 2013.

ANĐELKOVIĆ, A. S.; MUJAN, I.; DAKIĆ, S. Experimental validation of a energypus model: Application of a multi-storey naturally ventilated double skin façade. *Energy and Buildings*, v. 118, p. 27–36, 2016. ISSN 03787788.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 6.023: Tratamento de ar em estabelecimentos assistenciais de saúde (EAS) - requisitos para projeto e execução das instalações*. Rio de Janeiro, 2005. 28 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7.256: Tratamento de ar em estabelecimentos assistenciais de saúde (eas) - requisitos para projeto e execução das instalações*. Rio de Janeiro, 2005. 22 p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 16.401-1*: Instalações de ar condicionado - sistemas centrais e unitários - parte 1: Projetos das instalações - anexo a: Dados climáticos de projeto. Rio de Janeiro, 2008. 60 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR ISO 50.001*: Sistema de gestão da energia - requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro, 2011. 32 p.
- BAZJANAC, V. Ifc bim-based methodology for semi-automated building energy performance simulation. In: CIB-W78 25TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION TECHNOLOGY IN CONSTRUCTION, 2008. Santiago, Chile: Universidad de Talca, Chile, 2008. Disponível em: <<https://eetd.lbl.gov/sites/all/files/publications/919e.pdf>>. Acesso em: 27 fev. 2018.
- BOXER; HENZE, G. P.; HIRSCH, A. I. A model-based decision support tool for building portfolios under uncertainty. *Automation in Construction*, v. 78, p. 34 – 50, 2017. ISSN 0926-5805. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580517300547>>.
- BRUNING, S. F. Load calculation spreadsheets. *ASHRAE Journal*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., v. 54, n. 1, 2012.
- CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. *Avaliação do mercado de eficiência energética do brasil*: Sumário executivo - ano base 2005. Rio de Janeiro: ELETROBRAS; PROCEL, 2007a.
- CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. *Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso: ano-base 2005*: Classe comercial – alta tensão. relatório setorial: instituições de ensino. Rio de Janeiro: ELETROBRAS; PROCEL, 2007b.
- CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. *Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso: ano-base 2005*: Classe comercial – alta tensão. relatório setorial: hospitais / clínicas. Rio de Janeiro: ELETROBRAS; PROCEL, 2007c.
- CHONG, A.; XU, W.; LAM, K. P. Uncertainty analysis in building energy simulation: A practical approach. In: BS2015: 14TH CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION, 2015. Hyderabad, India, 2015. p. 2796–2803.
- CLARIDGE, D. E. Using simulation models for building commissioning. Energy Systems Laboratory, Paris, France, 2004.
- CLARKE, J. A. *Energy simulation in building design*. Oxford, UK: Routledge, 2001.
- CLARKE, J. A.; STRACHAN, P. A.; PERNOT, C. An approach to the calibration of building energy simulation models. *ASHRAE Transactions*, v. 99, n. 2, p. 917–927, 1993.
- COAKLEY, D.; RAFTERY, P.; KEANE, M. A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 37, p. 123–141, 2014. ISSN 13640321. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.007>>.
- CRAWLEY, D. B.; LAWRIE, L. K.; WINKELMANN, F. C.; BUHL, W. F.; HUANG, Y. J.; PEDERSEN, C. O.; STRAND, R. K.; LIESEN, R. J.; FISHER, D. E.; WITTE, M. J. W.; GLAZER, J. Energyplus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and buildings*, Elsevier, v. 33, n. 4, p. 319–331, 2001.

- CUTLER, D.; WINKLER, J.; KRUIS, N.; CHRISTENSEN, C.; BRANDEMUEHL, M. Improved Modeling of Residential Air Conditioners and Heat Pumps for Energy Calculations. 2013. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/694e-ba843519148d0150c7b7721f03c8a685981e.pdf>>.
- DADIOTI, R.; REES, S. Operational performance and calibrated model analysis of a large low-energy university building. In: 13TH CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION. Chambéry, France, 2013.
- DERKSEN, R. W.; GUENTHER, H. The application of differential evolution to hvac optimization. In: *WIT Transactions on the Built Environment*. Southampton, Reino Unido: WIT Press. ISBN 9781845647742. ISSN 17433509.
- DIAMOND, S. C.; HUNN, B. D. Comparison of doe-2 computer program simulations to metered data for seven commercial buildings. *ASHRAE Transactions*, v. 87, p. 982–993, 1981.
- DUARTE, V. C. P.; BAVARESCO, M. V.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Análise dos indicadores de desempenho dos sistemas de aquecimento e resfriamento para as zonas climáticas brasileiras. In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE REFRIGERAÇÃO, AR CONDICIONADO, VENTILAÇÃO, AQUECIMENTO E TRATAMENTO DE AR, 2017. São Paulo: CIAR-CONBRAVA 2017, 2017.
- EFFICIENCY VALUATION ORGANIZATION. *Protocolo Internacional para Medição e Verificação de Performance: Conceitos e opções para determinação de economias de energia e de água - volume 1*. Toronto: Canadá, 2011.
- Energy-Models. *EnergyPlus Portal*. 2018. Disponível em: <<http://energy-models.com/tools-/energyplus-portal>>. Acesso em: 04 mar. 2018.
- GARWOOD, T. L.; HUGHES, B. R.; OATES, M. R.; O'CONNOR, D.; HUGHES, R. A review of energy simulation tools for the manufacturing sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, p. 895 – 911, 2018. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117312078>>.
- Google Maps. 2018. Disponível em: <<https://www.google.com/maps>>. Acesso em: 04 abr. 2018.
- HENDRON, R. *Building America performance analysis procedures for existing homes*. Golden, CO, USA, 2006.
- HENNINGER, R. H.; WITTE, M. J.; CRAWLEY, D. B. Analytical and comparative testing of energyplus using IEA HVAC BESTEST E100–E200 test suite. *Energy and Buildings*, v. 36, p. 855–863, 2004.
- HEO, Y.; CHOUDHARY, R.; AUGENBROE, G. A. Calibration of building energy models for retrofit analysis under uncertainty. *Energy and Buildings*, v. 47, p. 550–560, 2012.
- HINTZE, J. L.; NELSON, R. D. Violin plots. *The American Statistician*, Taylor & Francis Group, v. 52, n. 2, p. 181–184, 1998.
- HORNBERGER, G. M.; SPEAR, R. C. Approach to the preliminary analysis of environmental systems. *Journal of Environmental Management*, v. 12, n. 1, p. 7–18, 1981.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. *Portaria INMETRO n. 007*: Requisitos de avaliação da conformidade para condicionadores de ar. Rio de Janeiro, 2011. 37 p.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. *Portaria INMETRO n. 410*: Revisão das classes de eficiência energética e o formato da etiqueta nacional de conservação de energia – ENCE para condicionadores de ar. Rio de Janeiro, 2013. 5 p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Key world energy statistics*. Paris, 2017.

JANNUZZI, G. D. M.; SWISHER, J. N. *Planejamento integrado de recursos energéticos: meio ambiente, conservação de energia e fontes renováveis*. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 1997.

LAM, K. P.; ZHAO, J.; YDSTIE, B. E.; WIRICK, J.; QI, M.; PARK, J. An energyplus whole building energy model calibration method for office buildings using occupant behavior data mining and empirical data. *2014 ASHRAE/IBPSA-USA Building Simulation Conference*, p. 160–167, 2014.

LARA, R.; NABONI, E.; PERNIGOTTO, G.; CAPPELLETTI, F.; ZHANG, Y.; BARZON, F.; GASPARELLA, A.; ROMAGNONI, P. Optimization tools for building energy model calibration. *Energy Procedia*, Elsevier B.V., v. 111, n. September 2016, p. 1060–1069, 2017. ISSN 18766102. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.269>>.

LI, N.; YANG, Z.; BECERIK-GERBER, B.; TANG, C.; CHEN, N. Why is the reliability of building simulation limited as a tool for evaluating energy conservation measures? *Applied Energy*, 2015. ISSN 03062619.

MA, Z.; COOPER, P.; DALY, D.; LEDO, L. Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. *Energy & Buildings*, v. 55, p. 889–902, 2012.

MONETTI, V.; DAVIN, E.; FABRIZIO, E.; ANDRÉ, P.; FILIPPI, M. Calibration of building energy simulation models based on optimization: a case study. *Energy Procedia*, Elsevier, v. 78, p. 2971–2976, 2015.

National Renewable Energy Laboratory. *EnergyPlus Weather Data*. 2018. Disponível em: <<https://energyplus.net/weather>>. Acesso em: 06 fev. 2018.

O'NEILL, Z.; EISENHOWER, B.; YUAN, S.; BAILEY, T.; NARAYANAN, S.; FONOBEROV, V. Modelling and calibration of energy models for a dod building. In: 2011 ASHRAE ANNUAL CONFERENCE. Montreal, Canadá: ASHRAE Transactions, 2011.

ORDENES, M.; PEDRINI, A.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. *Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e componentes construtivos brasileiros para simulações no visualdoe-3.1*. Florianópolis, 2003.

PAN, Y.; HUANG, Z.; WU, G. Calibrated building energy simulation and its application in a high-rise commercial building in shanghai. *Energy and Buildings*, v. 39, p. 651–657, 2007.

PAN, Y.; HUANG, Z.; WU, G.; CHEN, C. The application of building energy simulation and calibration in two high-rise commercial buildings in shanghai. In: SECOND NATIONAL CONFERENCE OF IBPSA-USA. Cambridge, Massachusetts, 2006.

PEREIRA, C. D.; LAMBERTS, R.; GHISI, E. *Nota técnica referente aos níveis mínimos de eficiência energética de condicionadores de ar no Brasil*. Florianópolis, 2013.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. *Edificações*. 2018. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?TeamID=%7B82BBD82C-FB89-48CA-98A9-620D5F9DBD04%7D>>.

Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética. *Equipamentos com Selo PROCEL*. 2018. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/>>. Acesso em: 20 jul. 2018.

PROJETANDO EDIFICAÇÕES ENERGETICAMENTE EFICIENTES. *Componentes construtivos*. 2018. Disponível em: <<http://projeteee.mma.gov.br/componentes-construtivos-/>>.

RAFTERY, P.; KEANE, M.; COSTA, A. Calibrating whole building energy models: Detailed case study using hourly measured data. *Energy & Buildings*, v. 43, p. 3666–3679, 2011b.

RAFTERY, P.; KEANE, M.; O 'donnell, J. Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology. *Energy & Buildings*, v. 43, p. 2356–2364, 2011a.

REDDY, T. A. Literature Review on Calibration of Building Energy Simulation Programs: Uses, Problems, Procedures, Uncertainty, and Tools. *ASHRAE Transactions*, v. 112, p. 226–240, 2005.

RHODES, J. D.; GORMAN, W. H.; UPSHAW, C. R.; WEBBER, M. E. Using BEopt (energyplus) with energy audits and surveys to predict actual residential energy usage. *Energy and Buildings*, Elsevier B.V., v. 86, n. January, p. 808–816, 2015. ISSN 03787788.

SALTELLI, A. Sensitivity analysis for importance assessment. *Risk analysis*, Wiley Online Library, v. 22, n. 3, p. 579–590, 2002.

STEIN, J. Calibrated simulation: an improved method for analyzing building energy use. *E-Source Tech Update TU-97-10*, Boulder, CO, September, 1997.

THUMANN, A.; YOUNGER, W. J. *Handbook of energy audits*. 6th. ed. Lilburn (GA): The Fairmont Press, Inc., 2003.

TRANE DO BRASIL. *Catálogo de produto: Modelo CGAB 10 a 15TR e 80 a 120 TR - resfriadores de líquido com condensação a ar, compressores H e SH recíprocos*. São Paulo, 1998. 97 p.

TRANE DO BRASIL. *Catálogo de produto: Model RTAA 70 to 125 tons - air-cooled series, rotary liquid chiller*. São Paulo, 2006. 47 p.

TRANE DO BRASIL. *Catálogo de produto: Modelo CGAD 20 a 150 TR - resfriadores de líquido com condensação a ar, compressor scroll*. São Paulo, 2012. 104 p.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. *Infraestrutura física: Área edificada por campus e unidade*. 2017. Disponível em: <<https://uspdigital.usp.br/anuario/AnuarioControle>>.

Universidade de São Paulo. *Sobre o HU USP: missão, visão e valores*. 2017. Disponível em: <<http://www.hu.usp.br/missao-visao-e-valores/>>. Acesso em: 24 out. 2017.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *M&V Guidelines: Measurement and Verification for Performance-Based Contracts Version 4.0*. Washington, D.C., 2015.

U.S. Department of Energy. *EnergyPlus Version 8.7 Documentation - Engineering Reference*: The reference to energyplus calculations. Washington D.C., 2017a.

U.S. Department of Energy. *EnergyPlus Version 8.7 Documentation - Input Output Reference*: The encyclopedic reference to energyplus input and output. Washington D.C., 2017b.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Commercial Reference Buildings*. 2018. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/buildings/commercial-reference-buildings>>.

VORSATZ, D. U.; EYRE, N.; GRAHAM, P.; HARVEY, D.; HERTWICH, E.; JIANG, Y.; KORNEVALL, C.; MAJUMDAR, M.; MCMAHON, J. E.; MIRASGEDIS, S.; MURAKAMI, S.; NOVIKOVA, A. Energy end-use: Buildings. In: JOHANSSON, T. B.; NAKICENOVIC, N.; PATWARDHAN, A.; GOMEZ-ECHEVERRI, L. (Org.). *Global Energy Assessment: Toward a sustainable future*. Paris: Cambridge University Press, 2012. p. 649–760.

WALTZ, J. P. Practical experience in achieving high levels of accuracy in energy simulations of existing buildings. *ASHRAE Transactions*, AN-92-1-2, p. 606–617, 1992.

WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. Building simulation calibration using sensitivity analysis. In: 9TH INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE. Montréal (Canada), 2005. p. 1331–1338.

WILLIAMSON, D. F.; PARKER, R. A.; KENDRICK, J. S. The box plot: a simple visual method to interpret data. *Annals of internal medicine*, Am Coll Physicians, v. 110, n. 11, p. 916–921, 1989.

WILLMOTT, C. J.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate research*, JSTOR, v. 30, n. 1, p. 79–82, 2005.

YANG, Z.; BECERIK-GERBER, B. A model calibration framework for simultaneous multi-level building energy simulation. *Applied Energy*, v. 149, p. 415 – 431, 2015. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915003323>>.

YOON, J.-H.; LEE, E.-J.; CLARIDGE, D. E. Calibration procedure of energy performance simulation model for a commercial building. *Journal of Solar Energy Engineering*, v. 125, p. 251–257, 2003.

ZHAO, J.; LAM, K. P.; YDSTIE, B. E.; KARAGUZEL, O. T. Energyplus model-based predictive control within design–build–operate energy information modelling infrastructure. *Journal of Building Performance Simulation*, Taylor & Francis, v. 8, n. 3, p. 121–134, 2015.

Lista de Equipamentos elétricos do Hospital Universitário da USP

Tabela A.1: *Equipamentos hospitalares do HU-USP*

Equipamento elétrico	Quantidade	Potência total (W)	Equipamento elétrico	Quantidade	Potência total (W)
Agitador	4	311	Guindaste	1	240
Aparelho de Anestesia	2	1386	Hemodialisadora	3	5940
Aparelho de fototerapia	3	531	Histoprocessador	1	1452
Aquecedor de gel	1	30	Impedanciômetro	3	680
Aquecedor de leite	1	3200	Impressora	1	440
Aquecedor para tubilhão	1	3000	Incubadora	4	1415
Arco cirúrgico	2	10390	Infra vermelho	1	150
Aspirador	2	900	Injetora	1	150
Aspirador	1	1100	Insuflador	5	1910
Audiômetro	2	710	Lâmpada de fenda	1	160
Balança	26	859.6	Lavadora	2	42000
Banho histológico	3	1800	Lavadora Ultrassonica	1	1760
Banho Maria	5	6100	Lensômetro	1	50
Banho Parafina	1	1500	Mamógrafo	1	10000
Berço aquecido	2	1090	Manta Térmica	1	1320
Bisturi	2	960	Maquina de gelo	1	380
Bomba	1	120	Microscópio	8	1107
Bomba de infusão	3	717.5	Microscópio cirúrgico	2	1910
Bomba de ordenha	2	100	Micrótomo	2	2640
Bomba de sangue	1	30	Monitor	4	722
Bomba peristáltica	1	25	Monitor	1	130
Cadeira Odontologica	1	660	Monitor multiparamétrico	5	1588
Cadeira oftamologica	1	440	Monitor NO / NO2	1	30
Cadeira para otorrinolaringologista	1	1100	Montador de lâminas	1	100
Câmara de pressão	1	800	Ondas Curtas	1	250
Câmara de vacinas	2	2289	Osmose Central	1	3000
Câmera	3	240	Oxímetro	1	120
Cardiotocógrafo	1	240	Pasteurizador	1	3500
Central de Café	1	8400	Perfurador cirúrgico	1	198
Central de inclusão	2	1155	Phmetro	1	5
Centrífuga	6	4286	Processadora	2	6800
Centrigufa	2	3650	Processadora de imagem	2	366
Colposcópio	2	700	Projeto	1	80
Contador hematológico	1	55	Recortador de gesso	1	330
CONTAINER TÉRMICO	1	700	Resfriador	1	200
Corador de lâminas	1	1400	Respirador	10	1479.2
Desfibrilador	2	830	Secadora	4	23601.3
Eletrocardiógrafo	1	17	Seladora	4	1280

Equipamento elétrico	Quantidade	Potência total (W)	Equipamento elétrico	Quantidade	Potência total (W)
Eletroestimulador	5	131	Serra de gesso	1	180
Estação de preparos	3	4620	Sistema neurofisiológico	1	100
Esteira	1	800	Sonar	1	1320
Esteira Ergométrica	1	2200	Soprador	1	1400
Estufa	5	2595	Termocautério	1	50
Estufa	1	440	Termodesinfetadora	1	15000
Facoemulsificador	1	1386	Turbilhão de água	1	800
Foco cirúrgico	5	1265	Ultrassom	6	8030
Foco ginecológico	2	110	Ultrassom Tratamento	2	136
Foco Odontológico	1	30	Umidificador	4	500
Fonte de Luz	10	5972	Unitarizadora	1	1400
Forno combinado	2	8175	Vibrador elétrico	1	30
Garrote pneumático	1	220	Workstation	1	1100
Gravador eletroquímico	1	660	YAG Laser	1	200

Tabela A.2: Equipamentos de escritório

Equipamento	Quantidade	Potência total (W)
Computador	861	111930
Notebook	60	3240
Ventilador	594	77220

Informações técnicas dos equipamentos de ar condicionado de pequeno porte identificados no HU-USP

Tabela B.1: Equipamentos de climatização modulares identificados no HU - USP

Andar	ID	Localização	Equipamento	Marca	Capacidade (BTU/h)	COP
1º	1	Conforto Médico	<i>Split</i>	Springer SilverMaxi	36.000	2,84
1º	2	Conforto Médico	Cassete	Electrolux	36.000	2,50
1º	3	Conforto Médico	<i>Split</i>	Totaline	12.000	2,95
1º	4	Conforto Médico	<i>Split</i>	Totaline	12.000	2,95
1º	5	Conforto Médico	<i>Split</i>	Totaline	12.000	2,95
1º	6	Conforto Médico	<i>Split</i>	Totaline	12.000	2,95
1º	7	Conforto Médico	<i>Split</i>	Totaline	12.000	2,95
1º	8	Conforto Médico	<i>Split</i>	Totaline	12.000	2,95
1º	9	Conforto Médico	<i>Split</i>	Totaline	12.000	2,95
1º	10	Farmácia	<i>Split</i>	Springer Carrier	58.000	3,01
1º	11	Farmácia	<i>Split</i>	Elgin	18.000	2,93
1º	12	Farmácia	<i>Split</i>	Totaline	36.000	3,02
1º	13	Farmácia	<i>Split</i>	Totaline	36.000	3,02
1º	14	Centro de Vivência	<i>Split</i>	Springer SilverMaxi	48.000	3,21
1º	15	Centro de Vivência	<i>Split</i>	Springer SilverMaxi	48.000	3,21
1º	16	CME	<i>Split</i>	Elgin	48.000	2,96
1º	17	CME	<i>Split</i>	Elgin	48.000	2,96
1º	18	CME	<i>Split</i>	Elgin	48.000	2,96
1º	19	CME	<i>Split</i>	Elgin	48.000	2,96
1º	20	CME	<i>Split</i>	Elgin	48.000	2,96
1º	23	CME	Cassete	Carrier	36.000	2,85
1º	24	CME	Cassete	Carrier	36.000	2,85
1º	26	Banco do Brasil	<i>Split</i>	Trane	36.000	2,77
1º	27	Sala de refrigeradores	<i>Split</i>	Trane	36.000	2,90
1º	28	Atendimento	<i>Split</i>	Springer Carrier	18.000	2,85
1º	29	Atendimento	<i>Split</i>	Totaline	36.000	3,33
1º	30	Atendimento	Janela	Totaline	18.000	2,67
1º	31	Banco Santander	<i>Split</i>	York	24.000	2,33
1º	32	Banco Santander	<i>Split</i>	Springer Carrier	24.000	2,65
1º	33	Banco Santander	<i>Split</i>	Springer	12.000	3,24
1º	34	Banco Santander	<i>Split</i>	Springer	22.000	3,22
2º	1	Laboratório	<i>Split</i>	Springer Maxiflex	22.000	2,56
2º	2	Laboratório	<i>Split</i>	Trane	24.000	2,90
2º	3	Laboratório	<i>Split</i> Piso teto	Carrier	18.000	2,71

Andar	ID	Localização	Equipamento	Marca	Capacidade (BTU/h)	COP
2º	4	Laboratório	<i>Split</i> Piso teto	Elgin	30.000	3,07
2º	5	Laboratório	<i>Split</i> Piso teto	Elgin	30.000	3,07
2º	6	Laboratório	<i>Split</i> Piso teto	Carrier	36.000	2,34
2º	7	Laboratório	<i>Split</i> Piso teto	Carrier	36.000	2,34
2º	8	Laboratório	<i>Split</i> Piso teto	Carrier	36.000	2,84
2º	9	Laboratório	<i>Split</i> Piso teto	Carrier	36.000	2,84
2º	10	Laboratório	Janela	Springer Mundial	30.000	2,79
2º	11	Laboratório	Janela	Springer Silentia	30.000	2,79
2º	12	Laboratório	Janela	Springer Mundial	30.000	2,79
2º	13	Laboratório	Janela	Springer Mundial	30.000	2,82
2º	14	Laboratório	Janela	Springer Silentia	10.000	3,19
2º	15	Laboratório	<i>Split</i> Piso teto	Trane	24.000	2,90
2º	16	Laboratório	Janela	Springer Mundial	30.000	2,79
2º	17	Laboratório	Janela	Springer Mundial	30.000	2,79
2º	18	Laboratório	Janela	Springer Mundial	30.000	2,79
2º	19	Laboratório	<i>Split</i> Piso teto	Elgin	30.000	2,96
2º	20	Laboratório	<i>Split</i> Piso teto	Elgin	30.000	2,96
2º	21	Laboratório	<i>Split</i> Piso teto	Elgin	30.000	2,96
2º	22	Laboratório	<i>Split</i> Piso teto	S/ Marca	24.000	2,67
2º	23	Laboratório	<i>Split</i> Piso teto	Springer SilverMaxi	30.000	2,67
2º	24	Laboratório: sala de refrigeração	Cassete	Carrier	36.000	2,85
2º	25	Laboratório: sala de refrigeração	<i>Split Hi-wall</i>	Springer Maxiflex	30.000	2,77
2º	26	Laboratório: sala de refrigeração	<i>Split</i> Piso teto	Carrier	58.000	2,81
2º	27	Laboratório	Janela	Springer Minimax	12.000	2,78
2º	28	Informática	<i>Split Hi-wall</i>	Midea	18.000	2,86
2º	29	Informática	Cassete	Coolix	24.000	2,31
2º	30	Informática: Sala de Treinamento	Cassete	Coolix	24.000	2,31
2º	31	Informática: Sala de Reuniões	<i>Split</i> Piso teto	Totaline	36.000	2,91
2º	32	Informática	<i>Split Hi-wall</i>	Midea	18.000	2,86
2º	33	Informática	Cassete	Coolix	24.000	2,31
2º	34	CPD	<i>Split</i> piso teto	Hitachi	18.000	3,22
2º	35	CPD	<i>Split</i> piso teto	Carrier	48.000	2,98
2º	36	Eletroencefalograma	<i>Split Hi-wall</i>	Totaline	9.000	3,00
2º	37	Eletroencefalograma	<i>Split Hi-wall</i>	Totaline	9.000	3,00
2º	38	Eletroencefalograma	<i>Split Hi-wall</i>	Totaline	9.000	3,00
2º	39	Eletroencefalograma	<i>Split Hi-wall</i>	Totaline	9.000	3,00
2º	40	Eletroencefalograma	<i>Split Hi-wall</i>	Totaline	9.000	3,00
2º	41	Eletrocardiograma	<i>Split Hi-wall</i>	Fujitsu	9.000	3,04
2º	42	Eletrocardiograma	<i>Split Hi-wall</i>	Fujitsu	9.000	3,04
2º	43	Eletrocardiograma	<i>Split Hi-wall</i>	Fujitsu	9.000	3,04
2º	44	Hemodialise	<i>Split</i>	Totaline	36.000	2,91
2º	45	Hemodialise	<i>Split</i>	Totaline	36.000	2,91
2º	46	Hospital Dia	Cassete	Carrier	36.000	2,85
2º	47	Hospital Dia	Cassete	Carrier	36.000	2,85
2º	48	Hospital Dia	Cassete	Carrier	36.000	2,85
2º	49	Hospital Dia	Cassete	Carrier	36.000	2,85
2º	50	Hospital Dia	<i>Split</i>	Carrier Tempstar	18.000	2,62
2º	51	Audiometria	<i>Split</i>	Springer Maxiflex	30.000	2,78
2º	52	Fisioterapia	Cassete	Springer Carrier	36.000	2,85
2º	53	Fisioterapia	Cassete	Springer Carrier	36.000	2,85
2º	54	Endoscopia	Cassete	Springer Carrier	36.000	2,85
2º	55	Endoscopia	Cassete	Springer Carrier	36.000	2,85
2º	56	Endoscopia	Cassete	Springer Carrier	36.000	2,85
2º	57	Endoscopia	<i>Split</i>	Brastemp	12.000	2,79

Andar	ID	Localização	Equipamento	Marca	Capacidade (BTU/h)	COP
2º	58	Endoscopia	<i>Split</i>	Brastemp	12.000	2,79
2º	59	Endoscopia	<i>Split Hi-wall</i>	Carrier Tempstar	24.000	2,72
2º	60	Endoscopia	<i>Split Hi-wall</i>	Carrier Tempstar	24.000	2,72
2º	61	Endoscopia	<i>Split Hi-wall</i>	Carrier Tempstar	12.000	2,66
2º	62	Endoscopia	<i>Split</i>	Springer Carrier	7.000	2,77
2º	63	Radiografia: Tomografia	<i>Split</i>	Carrier	48.000	3,21
2º	64	Radiografia: Tomografia	<i>Split</i>	Springer Maxiflex	22.000	2,61
2º	65	Radiografia: Tomografia	<i>Split</i>	Springer Maxiflex	22.000	2,61
2º	66	Radiografia: Tomografia	<i>Split</i>	Trane	9.000	2,67
2º	67	Radiografia: Tomografia	<i>Split</i>	Trane	9.000	2,67
2º	68	Radiografia: Tomografia	<i>Split</i>	Carrier	22.000	3,01
2º	69	Radiografia: Tomografia	<i>Split</i>	Carrier	48.000	3,21
2º	70	Radiografia: CPD	<i>Split</i> Piso teto	Trane	10.919	3,14
2º	71	Biblioteca	<i>Split</i> Piso teto	Springer Carrier	18.000	2,42
2º	72	Biblioteca	<i>Split Hi-wall</i>	LG	24.000	3,01
2º	73	Biblioteca	<i>Split Hi-wall</i>	LG	24.000	3,01
2º	74	Biblioteca	<i>Split Hi-wall</i>	Springer Carrier	9.000	3,24
2º	75	Serviço de Ensino e Qualidade	Cassete	LG	48.000	2,81
2º	76	Internação - Sala de espera	<i>Split</i> Piso teto	Carrier	24.000	2,65
2º	77	Anfiteatro	<i>Split</i>	Carrier	90.000	3,04
2º	78	Anfiteatro	<i>Split</i>	Carrier	90.000	3,04
2º	79	Agência Transfusional (Banco de Sangue)	<i>Split</i> Piso teto	Rheem	35.166	2,32
2º	80	Agência Transfusional (Banco de Sangue)	Janela	Springer Mundial	21.000	2,72
2º	81	PSI: Internação	Cassete	Springer Carrier	36.000	2,85
2º	82	PSI: Internação	Cassete	Springer Carrier	36.000	2,85
2º	83	PSI: Internação	Cassete	Springer Carrier	36.000	2,85
2º	84	PSI: Internação	Cassete	Springer Carrier	36.000	2,85
2º	85	PSI: Internação	Cassete	Springer Carrier	36.000	2,85
2º	86	PSI: Conforto Médico	<i>Split Hi-wall</i>	Springer Maxiflex	12.000	2,77
2º	87	PSI: Sala de Espera	<i>Split</i> Piso teto	Springer Carrier	58.000	3,01
2º	88	PSI: Sala de Espera	<i>Split</i> Piso teto	Springer Carrier	58.000	3,01
2º	89	Laboratório de coleta	<i>Split</i> Piso teto	Elgin	60.000	2,60
2º	90	Laboratório de coleta	<i>Split</i> Piso teto	Elgin	60.000	2,60
2º	91	Serviço Social	<i>Split</i>	Carrier	30.000	2,78
2º	92	Triagem: Atendimento	<i>Split</i>	Midea	18.000	2,7
2º	93	Triagem: Atendimento	<i>Split</i>	Carrier	22.000	3,01
2º	94	Triagem: Atendimento	<i>Split</i>	Midea	18.000	2,7
2º	95	Triagem: Atendimento	Janela	Sanyo	18.000	2,67
2º	96	Ambulatório: Sala de Medicação	<i>Split</i>	Carrier	12.000	2,01
2º	97	Ambulatório: Sala de Medicação	<i>Split</i>	Springer Maxiflex	12.000	2,77
2º	98	SAME	<i>Split</i>	Fujitsu	9.200	3,00
2º	99	PSA: Sala de espera medicação	Cassete	Springer Carrier	36.000	2,85
2º	100	PSA: Sala de espera medicação	Cassete	Springer Carrier	36.000	2,85
2º	101	PSA: Sala de Medicação	i	Fujitsu	9.000	3,04
2º	102	PSA: Sala de Medicação	<i>Split</i>	Fujitsu	9.000	3,04
2º	103	PSA: Sala de Medicação	<i>Split</i>	Fujitsu	12.000	2,95
2º	104	PSA: Sala de espera de Atendimento	<i>Split</i>	Carrier	60.000	3,00
2º	105	PSA: Corredor Sala de espera de Atendimento	<i>Split</i>	Carrier	60.000	3,00
2º	106	PSA: Sala de Gesso	<i>Split</i>	Springer Maxiflex	18.000	2,79
2º	107	PSA: Consultório 1	<i>Split</i>	Springer Maxiflex	12.000	2,77
2º	108	PSA: Consultório 2	<i>Split</i>	Springer Maxiflex	12.000	2,77

Andar	ID	Localização	Equipamento	Marca	Capacidade (BTU/h)	COP
2º	109	PSA: Consultório 3	<i>Split</i>	Springer Maxiflex	12.000	2,77
2º	110	PSA: Consultório 4	<i>Split</i>	Springer Maxiflex	12.000	2,77
2º	111	PSA: Consultório 5	<i>Split</i>	Carrier	12.000	3,24
2º	112	PSA: Internação	<i>Split</i>	Totaline	48.000	2,95
2º	113	PSA: Internação	<i>Split</i>	Totaline	48.000	2,95
2º	114	PSA: Internação	<i>Split</i>	Springer Maxiflex	9.000	2,59
2º	115	PSA: Internação	<i>Split</i>	Carrier	60.000	3,23
2º	116	PSA: Internação	<i>Split</i>	Carrier	18.000	2,85
2º	117	PSA: Internação	<i>Split</i>	Springer	18.000	3,01
2º	118	PSA: Internação	<i>Split</i>	Springer Maxiflex	12.000	2,77
2º	119	PSA: Internação	<i>Split</i>	Springer SilverMaxi	60.000	3,23
2º	120	PSA: Internação	<i>Split</i>	Springer Maxiflex	22.000	2,61
2º	121	PSA: Internação	<i>Split</i>	Springer Maxiflex	12.000	2,77
2º	122	PSA: Conforto	<i>Split</i>	Springer	60.000	2,95
2º	123	Centro Obstétrico: Sala de Espera	<i>Split</i>	Carrier Tempstar	24.000	2,72
2º	124	Centro Obstétrico: Ultrassom	i	Springer	9.000	2,78
2º	125	Centro Obstétrico: Consultório	<i>Split</i>	Springer Maxiflex	9.000	2,78
2º	126	Centro Obstétrico: Consultório	<i>Split</i>	Springer Maxiflex	9.000	2,78
2º	127	Centro Obstétrico: Consultório	<i>Split</i>	Springer Maxiflex	9.000	2,78
2º	128	Hemodialise: Água	<i>Split</i>	Fujitsu	12.000	2,77
2º	129	Centro Cirúrgico	<i>Split</i>	Carrier	12.000	2,65
2º	130	Centro Cirúrgico	<i>Split</i>	Springer Maxiflex	18.000	2,79
3º	1	Divisão Administrativa: CPD	<i>Split</i>	Rheem	18.000	2,81
3º	2	Superintendência	<i>Split</i>	Springer Carrier	18.000	2,79
3º	3	Superintendência	<i>Split</i>	Springer Carrier	22.000	2,59
3º	4	Superintendência	<i>Split</i>	Springer Carrier	18.000	2,79
3º	5	Superintendência: Sala de reunião	<i>Split</i>	Springer Carrier	18.000	2,79
3º	6	Superintendência	<i>Split</i>	Springer Carrier	9.000	3,02
3º	7	Protocolo	<i>Split Hi-wall</i>	Springer Carrier	12.000	3,24
3º	8	Departamento Médico	i	Springer Carrier	12.000	2,77
3º	9	Departamento de Enfermagem	Janela	Totaline	18.000	2,67
3º	10	Departamento de Enfermagem	<i>Split Hi-wall</i>	Springer Carrier	30.000	2,78
3º	11	Departamento de Enfermagem	<i>Split Hi-wall</i>	Springer Carrier	22.000	3,01
3º	12	CCIH: Sala de Reuniões	<i>Split</i>	Carrier Tempstar	24.000	3,18
3º	13	Centro de Pesquisa Clínica e Epidemiológica (CPCE)	<i>Split</i>	Springer Carrier	9.000	3,24
3º	14	Centro de Pesquisa Clínica e Epidemiológica (CPCE)	<i>Split</i>	Springer Carrier	9.000	2,67
3º	15	Centro de Pesquisa Clínica e Epidemiológica (CPCE)	<i>Split</i>	Springer Carrier	12.000	2,77
3º	16	Centro de Pesquisa Clínica e Epidemiológica (CPCE)	<i>Split</i>	Springer Carrier	9.000	2,78
3º	17	Centro de Pesquisa Clínica e Epidemiológica (CPCE)	<i>Split</i>	Springer Carrier	9.000	3,01
3º	18	Centro de Pesquisa Clínica e Epidemiológica (CPCE)	<i>Split</i>	Springer Carrier	9.000	3,21
3º	19	UTI Pediátrica	<i>Split</i>	Hitachi	18.000	3,22
3º	20	UTI Pediátrica	<i>Split</i>	Hitachi	18.000	3,22
3º	21	UTI Pediátrica	<i>Split</i>	Hitachi	18.000	3,22
3º	22	UTI Pediátrica: Isolamento	<i>Split</i>	Springer Carrier	12.000	2,67
3º	23	UTI Pediátrica: Isolamento	<i>Split</i>	Springer Carrier	12.000	2,67
3º	24	UTI Neonatal	<i>Split</i>	Springer Carrier	18.000	2,73
3º	25	UTI Neonatal	<i>Split</i>	Springer Carrier	18.000	2,73
3º	26	UTI Neonatal	<i>Split</i>	Springer Carrier	18.000	2,73

Andar	ID	Localização	Equipamento	Marca	Capacidade (BTU/h)	COP
3°	27	UTI Pediátrica: Conforto Assistente	<i>Split</i>	Fujitsu	9.200	3,00
3°	28	UTI Pediátrica: Conforto Médico Residente	<i>Split</i>	Springer Carrier	9.000	3,21
4°	1	ELSA	<i>Split</i>	Springer Carrier	7.000	2,77
4°	2	ELSA: Bodyscan	<i>Split</i>	Hitachi	18.000	2,67
4°	3	ELSA	<i>Split</i>	Springer Carrier	18.000	3,03
4°	4	ELSA	<i>Split</i>	Springer Carrier	22.000	3,03
4°	5	ELSA: Ultrassom 1	<i>Split</i>	Hitachi	18.000	2,67
4°	6	ELSA: Antropometria	<i>Split</i>	Hitachi	18.000	2,67
4°	7	ELSA: Ultrassom 2	<i>Split</i>	Hitachi	18.000	2,67
6°	1	UTI Adulto	<i>Split</i>	Elgin	30.000	2,96
6°	2	UTI Adulto	<i>Split</i>	Elgin	30.000	2,96
6°	3	UTI Adulto	<i>Split</i>	Elgin	30.000	3,01
6°	4	UTI Adulto	<i>Split</i>	Elgin	30.000	2,96
6°	5	UTI Adulto	<i>Split</i>	Elgin	30.000	2,96
6°	6	UTI Adulto	<i>Split</i>	Elgin	18.000	2,93
6°	7	UTI Adulto	<i>Split</i>	Elgin	18.000	2,93
6°	8	UTI Adulto	<i>Split</i>	Elgin	30.000	2,96
6°	9	UTI Adulto	<i>Split</i>	Elgin	18.000	2,67

Faixas de desempenho de condicionadores de ar para classificação de acordo com o seu nível de consumo

C.1 Definição das classes de eficiência energética de acordo com INMETRO (2011)

Tabela C.1: *Classificação dos Equipamentos tipo Split*

Classes	Faixa de Coeficiente de eficiência energética (W/W)
A	$\text{COP} > 3,20$
B	$3,00 < \text{COP} \leq 3,20$
C	$2,80 < \text{COP} \leq 3,00$
D	$2,60 < \text{COP} \leq 2,80$
E	$2,39 < \text{COP} \leq 2,60$

Tabela C.2: *Classificação dos Equipamentos tipo Janela*

Classes	Faixa de Coeficiente de eficiência energética (W/W)			
	Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4
	<9.000 BTU/h	9.001 a 13.999 BTU/h	14.000 a 19.999 BTU/h	>20.000 BTU/h
A	$\text{COP} \geq 2,91$	$\text{COP} \geq 3,02$	$\text{COP} \geq 2,87$	$\text{COP} \geq 2,82$
B	$2,68 \leq \text{COP} < 2,91$	$2,78 \leq \text{COP} < 3,02$	$2,70 \leq \text{COP} < 2,87$	$2,62 \leq \text{COP} < 2,82$
C	$2,47 \leq \text{COP} < 2,68$	$2,56 \leq \text{COP} < 2,78$	$2,54 \leq \text{COP} < 2,70$	$2,44 \leq \text{COP} < 2,62$
D	$2,27 \leq \text{COP} < 2,47$	$2,35 \leq \text{COP} < 2,56$	$2,39 \leq \text{COP} < 2,54$	$2,27 \leq \text{COP} < 2,44$
E	$2,08 \leq \text{COP} < 2,16$	$2,35 \leq \text{COP} < 2,35$	$2,24 \leq \text{COP} < 2,39$	$2,11 \leq \text{COP} < 2,27$

C.2 Definição das classes de eficiência energética de acordo com INMETRO (2013)

Tabela C.3: *Classificação dos Equipamentos tipo Split*

Classes	Faixa de Coeficiente de eficiência energética (W/W)
A	$\text{COP} > 3,23$
B	$3,02 < \text{COP} \leq 3,23$
C	$2,81 < \text{COP} \leq 3,02$
D	$2,60 \leq \text{COP} \leq 2,81$

Tabela C.4: *Classificação dos Equipamentos tipo Janela*

Classes	Faixa de Coeficiente de eficiência energética (W/W)			
	Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4
	$< 9.000 \text{ BTU/h}$	$9.001 \text{ a } 13.999 \text{ BTU/h}$	$14.000 \text{ a } 19.999 \text{ BTU/h}$	$> 20.000 \text{ BTU/h}$
A	$\text{COP} \geq 2,93$	$\text{COP} \geq 3,03$	$\text{COP} \geq 2,88$	$\text{COP} \geq 2,82$
B	$2,84 \leq \text{COP} < 2,93$	$2,94 \leq \text{COP} < 3,03$	$2,71 \leq \text{COP} < 2,88$	$2,65 \leq \text{COP} < 2,82$
C	$2,76 \leq \text{COP} < 2,84$	$2,86 \leq \text{COP} < 2,94$	$2,59 \leq \text{COP} < 2,71$	$2,48 \leq \text{COP} < 2,65$
D	$2,68 \leq \text{COP} < 2,76$	$2,78 \leq \text{COP} < 2,86$	$2,45 \leq \text{COP} < 2,59$	$2,30 \leq \text{COP} < 2,48$

**Apresentação das características elétricas dos
equipamentos tipo *split* medidos**

Figura D.1: *1andar_2: potência elétrica ao longo do período de medição e sua correspondente assinatura elétrica*

Figura D.2: *Split 1_11: potência elétrica ao longo do período de medição e sua correspondente assinatura elétrica*

Figura D.3: *Split 1_12.13: potência elétrica ao longo do período de medição e sua correspondente assinatura elétrica*

Figura D.4: *Split 2_71.72.73: potência elétrica ao longo do período de medição e sua correspondente assinatura elétrica*

Figura D.5: *Split 2_106: potência elétrica ao longo do período de medição e sua correspondente assinatura elétrica*

Figura D.6: *Split 2_114: potência elétrica ao longo do período de medição e sua correspondente assinatura elétrica*

Figura D.7: *Split 2_117: potência elétrica ao longo do período de medição e sua correspondente assinatura elétrica*

Figura D.8: *Split 2_121: potência elétrica ao longo do período de medição e sua correspondente assinatura elétrica*

Figura D.9: Split 3_17: potência elétrica ao longo do período de medição e sua correspondente assinatura elétrica

Fase B: Indicadores estatísticos obtidos para os equipamentos modulares

Tabela E.1: *modeloB01 e modeloB00 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia*

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%) horário
<i>Split 1_2</i>	modeloB00	17min52s	-32,54	224,55
	modeloB01	18min15s	-15,74	237,50
<i>Split 1_11</i>	modeloB00	17min52s	-95,96	149,77
	modeloB01	18min15s	-98,86	152,75
<i>Split 1_12.13</i>	modeloB00	17min52s	-81,43	88,06
	modeloB01	18min15s	-79,59	86,25
<i>Split 2_71.72.73</i>	modeloB00	17min52s	-41,13	208,64
	modeloB01	18min15s	-37,42	208,75
<i>Split 2_106</i>	modeloB00	17min52s	824,89	1504,30
	modeloB01	18min15s	841,82	1527,87
<i>Split 2_114</i>	modeloB00	17min52s	-42,24	102,57
	modeloB01	18min15s	-42,88	102,27
<i>Split 2_117</i>	modeloB00	17min52s	-82,47	168,54
	modeloB01	18min15s	-82,70	168,62
<i>Split 2_121</i>	modeloB00	17min52s	-55,92	105,54
	modeloB01	18min15s	-56,38	105,82
<i>Split 3_17</i>	modeloB00	17min52s	28,50	289,52
	modeloB01	18min15s	25,96	288,22

Tabela E.2: *modeloB02 e modeloB01 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia*

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%) horário
<i>Split 1_2</i>	modeloB01	18min15s	-15,74	237,50
	modeloB02	19min00s	-16,82	236,55
<i>Split 1_11</i>	modeloB01	18min15s	-98,86	152,75
	modeloB02	19min00s	-95,99	149,81
<i>Split 1_12.13</i>	modeloB01	18min15s	-79,59	86,25
	modeloB02	19min00s	-79,66	86,32
<i>Split 2_71.72.73</i>	modeloB01	18min15s	-37,42	208,75
	modeloB02	19min00s	-37,58	208,77
<i>Split 2_106</i>	modeloB01	18min15s	841,82	1527,87
	modeloB02	19min00s	828,06	1507,73
<i>Split 2_114</i>	modeloB01	18min15s	-42,88	102,27
	modeloB02	19min00s	-44,54	101,72
<i>Split 2_117</i>	modeloB01	18min15s	-82,70	168,62
	modeloB02	19min00s	-82,97	168,73
<i>Split 2_121</i>	modeloB01	18min15s	-56,38	105,82
	modeloB02	19min00s	-56,76	105,89
<i>Split 3_17</i>	modeloB01	18min15s	25,96	288,22
	modeloB02	19min00s	25,36	288,03

Tabela E.3: *modeloB03 e modeloB02 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia*

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	CV EQM (%) horário
<i>Split 1_2</i>	modeloB02	19min00s	-16,82
	modeloB03	19min16s	5,55
<i>Split 1_11</i>	modeloB02	19min00s	-95,99
	modeloB03	19min16s	-92,54
<i>Split 1_12.13</i>	modeloB02	19min00s	-79,66
	modeloB03	19min16s	-79,75
<i>Split 2_71.72.73</i>	modeloB02	19min00s	-37,58
	modeloB03	19min16s	-38,24
<i>Split 2_106</i>	modeloB02	19min00s	828,06
	modeloB03	19min16s	757,11
<i>Split 2_114</i>	modeloB02	19min00s	-44,54
	modeloB03	19min16s	-23,47
<i>Split 2_117</i>	modeloB02	19min00s	-82,97
	modeloB03	19min16s	-75,44
<i>Split 2_121</i>	modeloB02	19min00s	-56,76
	modeloB03	19min16s	-57,36
<i>Split 3_17</i>	modeloB02	19min00s	25,36
	modeloB03	19min16s	22,84

Tabela E.4: *modeloB04 e modeloB03 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia*

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%) horário
<i>Split 1_2</i>	modeloB03	19min16s	5,55	216,96
	modeloB04	18min21s	0,46	214,90
<i>Split 1_11</i>	modeloB03	19min16s	-92,54	148,92
	modeloB04	18min21s	-92,55	148,94
<i>Split 1_12.13</i>	modeloB03	19min16s	-79,75	86,33
	modeloB04	18min21s	-80,14	86,65
<i>Split 2_71.72.73</i>	modeloB03	19min16s	-38,24	208,63
	modeloB04	18min21s	-39,27	208,42
<i>Split 2_106</i>	modeloB03	19min16s	757,11	1388,22
	modeloB04	18min21s	681,81	1295,81
<i>Split 2_114</i>	modeloB03	19min16s	-23,47	85,37
	modeloB04	18min21s	-30,62	83,75
<i>Split 2_117</i>	modeloB03	19min16s	-75,44	165,68
	modeloB04	18min21s	-76,80	166,32
<i>Split 2_121</i>	modeloB03	19min16s	-57,36	106,06
	modeloB04	18min21s	-59,51	106,40
<i>Split 3_17</i>	modeloB03	19min16s	22,84	286,56
	modeloB04	18min21s	19,56	285,57

Tabela E.5: *modeloB05 e modeloB04 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia*

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%) horário
<i>Split 1_2</i>	modeloB04	18min21s	0,46	214,90
	modeloB05	18min47s	0,48	214,90
<i>Split 1_11</i>	modeloB04	18min21s	-92,55	148,94
	modeloB05	18min47s	-94,83	149,74
<i>Split 1_12.13</i>	modeloB04	18min21s	-80,14	86,65
	modeloB05	18min47s	-80,22	86,72
<i>Split 2_71.72.73</i>	modeloB04	18min21s	-39,27	208,42
	modeloB05	18min47s	57,86	276,89
<i>Split 2_106</i>	modeloB04	18min21s	681,81	1295,81
	modeloB05	18min47s	-100	645,87
<i>Split 2_114</i>	modeloB04	18min21s	-30,62	83,75
	modeloB05	18min47s	-30,83	83,60
<i>Split 2_117</i>	modeloB04	18min21s	-76,80	166,32
	modeloB05	18min47s	-76,81	166,32
<i>Split 2_121</i>	modeloB04	18min21s	-59,51	106,40
	modeloB05	18min47s	-59,58	106,39
<i>Split 3_17</i>	modeloB04	18min21s	19,56	285,57
	modeloB05	18min47s	-12,82	279,94

Tabela E.6: *modeloBE1 e modeloB05 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia*

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%) horário
<i>Split 1_2</i>	modeloB05	18min47s	0,48	214,90
	modeloBE1	19min05s	3,63	217,76
<i>Split 1_11</i>	modeloB05	18min47s	-94,83	149,74
	modeloBE1	19min05s	-94,90	149,80
<i>Split 1_12.13</i>	modeloB05	18min47s	-80,22	86,72
	modeloBE1	19min05s	-80,23	86,71
<i>Split 2_71.72.73</i>	modeloB05	18min47s	57,86	276,89
	modeloBE1	19min05s	63,21	285,23
<i>Split 2_106</i>	modeloB05	18min47s	-100	645,87
	modeloBE1	19min05s	-100	645,87
<i>Split 2_114</i>	modeloB05	18min47s	-30,83	83,60
	modeloBE1	19min05s	-29,28	83,02
<i>Split 2_117</i>	modeloB05	18min47s	-76,81	166,32
	modeloBE1	19min05s	-76,44	165,93
<i>Split 2_121</i>	modeloB05	18min47s	-59,58	106,39
	modeloBE1	19min05s	-59,32	106,12
<i>Split 3_17</i>	modeloB05	18min47s	-12,82	279,94
	modeloBE1	19min05s	-14,37	279,09

Tabela E.7: *modeloBE2 e modeloBE1 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia*

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%) horário
<i>Split 1_2</i>	modeloBE1	19min05s	3,63	217,76
	modeloBE2	21min02s	1,27	215,94
<i>Split 1_11</i>	modeloBE1	19min05s	-94,90	149,80
	modeloBE2	21min02s	-94,90	149,80
<i>Split 1_12.13</i>	modeloBE1	19min05s	-80,23	86,71
	modeloBE2	21min02s	-80,92	87,45
<i>Split 2_71.72.73</i>	modeloBE1	19min05s	63,21	285,23
	modeloBE2	21min02s	46,94	249,47
<i>Split 2_106</i>	modeloBE1	19min05s	-100	645,87
	modeloBE2	21min02s	-100	645,87
<i>Split 2_114</i>	modeloBE1	19min05s	-29,28	83,02
	modeloBE2	21min02s	-29,21	82,17
<i>Split 2_117</i>	modeloBE1	19min05s	-76,44	165,93
	modeloBE2	21min02s	-76,67	166,01
<i>Split 2_121</i>	modeloBE1	19min05s	-59,32	106,12
	modeloBE2	21min02s	-59,70	106,09
<i>Split 3_17</i>	modeloBE1	19min05s	-14,37	279,09
	modeloBE2	21min02s	-16,27	278,58

Tabela E.8: *modeloBE3 e modeloBE2 - comparação do tempo de simulação e indicadores estatísticos de acurácia*

Medição de Referência	Versão	Tempo de Simulação	ESM (%)	CV EQM (%) horário
<i>Split 1_2</i>	modeloBE2	21min02s	1,27	215,94
	modeloBE3	20min42s	1,29	215,50
<i>Split 1_11</i>	modeloBE2	21min02s	-94,90	149,80
	modeloBE3	20min42s	-94,63	149,65
<i>Split 1_12.13</i>	modeloBE2	21min02s	-80,92	87,45
	modeloBE3	20min42s	-69,17	75,60
<i>Split 2_71.72.73</i>	modeloBE2	21min02s	46,94	249,47
	modeloBE3	20min42s	46,94	249,47
<i>Split 2_106</i>	modeloBE2	21min02s	-100	645,87
	modeloBE3	20min42s	-100	645,87
<i>Split 2_114</i>	modeloBE2	21min02s	-29,21	82,17
	modeloBE3	20min42s	-29,21	82,17
<i>Split 2_117</i>	modeloBE2	21min02s	-76,67	166,01
	modeloBE3	20min42s	-76,67	166,01
<i>Split 2_121</i>	modeloBE2	21min02s	-59,70	106,09
	modeloBE3	20min42s	-59,70	106,09
<i>Split 3_17</i>	modeloBE2	21min02s	-16,27	278,58
	modeloBE3	20min42s	-16,27	278,58

Cutler et al. (2013): Tabelas de coeficientes das curvas de rendimento de equipamentos unitários

Tabela F.1: Ar condicionado: Coeficientes da capacidade de refrigeração total em função da temperatura de operação (°C) (CUTLER et al., 2013)

	Unidades com velocidade única	Unidades com duas velocidades	
		Baixa	Alta
<i>a</i>	1,55090	1,66458	1,36788
<i>b</i>	-0,07505	-0,08093	-0,06257
<i>c</i>	0,00310	0,00330	0,00280
<i>d</i>	0,00240	0,00124	0,00504
<i>e</i>	-0,00005	-0,00003	-0,00007
<i>f</i>	-0,00043	-0,00052	-0,00045

Tabela F.2: Ar condicionado: Coeficientes do COP em função da temperatura de operação (°C) (CUTLER et al., 2013)

	Unidades com velocidade única	Unidades com duas velocidades	
		Baixa	Alta
<i>a</i>	-0,30428	-0,42738	0,04232
<i>b</i>	0,11805	0,14191	0,07892
<i>c</i>	-0,00342	-0,00412	-0,00238
<i>d</i>	-0,00626	-0,01406	-0,00304
<i>e</i>	0,00070	0,00083	0,00053
<i>f</i>	-0,00047	-0,00043	-0,00032

Tabela F.3: Bomba de calor: Coeficientes da capacidade de refrigeração e aquecimento em função da temperatura de operação ($^{\circ}\text{C}$) (CUTLER et al., 2013)

	REFRIGERAÇÃO			AQUECIMENTO		
	Unidades com velocidade única	Unidades com duas velocidades		Unidades com velocidade única	Unidades com duas velocidades	
		Baixa	Alta		Baixa	Alta
<i>a</i>	1,557360	1,658788	1,472738	0,876825	0,846130	0,818223
<i>b</i>	-0,074448	-0,083453	-0,067222	-0,002955	-0,002279	0,001981
<i>c</i>	0,003099	0,003424	0,002920	-0,000058	-0,000047	-0,000203
<i>d</i>	0,001460	0,002433	0,000052	0,025335	0,026703	0,028703
<i>e</i>	-0,000041	-0,000045	-0,000030	0,000196	0,000201	0,000207
<i>f</i>	-0,000427	-0,000534	-0,000359	-0,000043	-0,000079	-0,000071

Tabela F.4: Bomba de calor: Coeficientes de COP em função da temperatura de operação ($^{\circ}\text{C}$) (CUTLER et al., 2013)

	REFRIGERAÇÃO			AQUECIMENTO		
	Unidades com velocidade única	Unidades com duas velocidades		Unidades com velocidade única	Unidades com duas velocidades	
		Baixa	Alta		Baixa	Alta
<i>a</i>	-0,350448	-0,582916	-0,488196	0,704658	0,551837	0,815840
<i>b</i>	0,116810	0,158101	0,099162	0,008767	0,020380	-0,006150
<i>c</i>	-0,003400	-0,004398	-0,002370	0,000625	0,000546	0,001021
<i>d</i>	-0,001226	-0,020335	0,019503	-0,009037	-0,009638	-0,001301
<i>e</i>	0,000601	0,001080	0,000430	0,000738	0,000785	0,001083
<i>f</i>	-0,000467	-0,000640	-0,001097	-0,001025	-0,001250	-0,001487

Hendron (2006): Tabela de eficiência e fator de manutenção de equipamentos de climatização unitários

Tabela G.1: *Eficiência típica e fator de manutenção de equipamento de ar condicionado e bomba de calor*

Tipo de ar condicionado ou bomba de calor	SEERoriginal	COPoriginal	HSPForiginal	Fator de manutenção	
				Manutenção profissional anual	Manutenção rara ou nunca feita
Ar condicionado tipo split dutado, compressor recíproco de duas velocidades, movimentação de ar através de motor com ECM (módulo eletrônico do motor), válvula de expansão termostática (TXV), fan-coil aparente	14	3,08		0,01	0,02
Ar condicionado tipo split dutado, compressor tipo scroll com velocidade única, movimentação de ar através de motor com ECM, fan-coil para dutos	12	3,17		0,01	0,03
Ar condicionado tipo split dutado, compressor tipo recíproco com velocidade única, movimentação de ar através de motor com PSC (capacitor permanente), fan-coil para dutos (depois de 1991)	10	2,73		0,01	0,03
Ar condicionado tipo split dutado, compressor tipo recíproco com velocidade única, movimentação de ar através de motor com PSC, fan-coil para dutos (1981 - 1991)	8	2,26		0,01	0,03
Ar condicionado tipo split dutado, compressor do tipo recíproco, com velocidade única, movimentação de ar através de motor com PSC, fan-coil para dutos (antes de 1981)	6,5	1,88		0,01	0,03

Tipo de ar condicionado ou bomba de calor	SEERoriginal	COPoriginal	HSPForiginal	Fator de manutenção	
				Manutenção profissional anual	Manutenção rara ou nunca feita
Split tipo bomba de calor, compressor tipo scroll com velocidade única, movimentação de ar através de motor com ECM, válvula TXV	14	3,08	8	0,01	0,03
Split tipo bomba de calor, compressor tipo recíproco com velocidade única, movimentação de ar através de motor com PSC (depois de 1991)	10	2,73	7,1	0,01	0,03
Split tipo bomba de calor, compressor tipo recíproco com velocidade única, movimentação de ar através de motor com PSC (1981 - 1991)	8	2,26	6,6	0,01	0,03
Split tipo bomba de calor, compressor tipo recíproco com velocidade, única, movimentação de ar através de motor com PSC (antes de 1981)	6,5	1,88	6	0,01	0,03
Ar condicionado tipo rooftop, compressor tipo recíproco com velocidade única, movimentação de ar através de motor com PSC	10	2,67		0,01	0,03
Bomba de calor aerotérmica, compressor tipo recíproco com velocidade única, movimentação de ar através de motor com PSC	10	2,67	6,8	0,01	0,03
Ar condicionado unitário, lados com persianas, apenas resfriamento, compressor com velocidade única, motor com ventilador PSC, <20.000 BTU/h (depois de 1991)		2,86		0,01	0,03
Ar condicionado unitário, lados com persianas, apenas resfriamento, compressor com velocidade única, motor com ventilador PSC, >20.000,BTU/h (depois de 1991)		2,49		0,01	0,03
Ar condicionado unitário, lados com persianas, apenas resfriamento, compressor com velocidade única, motor com ventilador PSC (1981 - 1991)		2,2		0,01	0,03
Ar condicionado unitário, lados com persianas, apenas resfriamento, compressor com velocidade única, motor com ventilador PSC (antes de 1981)		1,91		0,01	0,03
Bom de calor unitária, lados com persianas, compressor com velocidade única, motor com ventilador PSC, <20.000		2,64		0,01	0,03

Tipo de ar condicionado ou bomba de calor	SEERoriginal	COPoriginal	HSPForiginal	Fator de manutenção	
				Manutenção profissional anual	Manutenção rara ou nunca feita
Bom de calor unitária, lados com persianas, compressor com velocidade única, motor com ventilador PSC, <20.0000		2,49		0,01	0,03
Resfriamento evaporativo direto		7,33		0,02	0,05