

**LAURA CAIXETA BRAGA**

**VALIDAÇÃO AMPLA DE OPERAÇÃO DE  
EDIFICAÇÕES**

**BELO HORIZONTE**

**2013**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA ELÉTRICA**

**VALIDAÇÃO AMPLA DE OPERAÇÃO**  
**DE EDIFICAÇÕES**

Tese submetida à  
Universidade Federal de Minas Gerais  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

**LAURA CAIXETA BRAGA**

Belo Horizonte, 02 de setembro de 2013.

*Aos meus pequenos João Pedro e Danielle.*

# Agradecimentos

Agradeço às minhas amigas e orientadoras Carmela e Eleonora pela dedicação e disponibilidade e, principalmente por terem acreditado em mim e neste trabalho quando eu mesma duvidei. Ao Prof. Fábio Jota, pela importante colaboração dada a este trabalho, sobretudo em suas etapas iniciais. A ele agradeço, de coração, em especial, pelas conversas estimulantes, pela disponibilização do sistema CMUF e pelos "alunos emprestados".

Agradeço também à Professora Maria Cristina Lima de Castro e ao Professor Tomaz Aroldo da Mota Santos, diretores do Instituto de Ciências Biológicas, que abriram as portas do ICB e não mediram esforços para apoiar este trabalho. Ao Professor Márcio Ziviani diretor do Departamento de Manutenção e Operação da Infraestrutura (Demai) por disponibilizar sua equipe para o trabalho. Agradeço especialmente ao Eng. Artur Risi de Aguiar, pessoa essencial na instalação e manutenção da rede CMUF.

Ao amigo e co-orientador informal Prof Anísio Braga por toda a ajuda e "perturbações". Ao Cristiano pelas suas horas de trabalho e dedicação e ao Hudson pela paciência por todas as suas visitas ao ICB.

Agradeço a todos aqueles que passaram pelo LVAS e fizeram essa caminhada tão mais leve e agradável, em especial, Marcelino, Tadeu, Matheus(s), Heli e tantos outros. Ao Prof. Paulo Seixas pelos momentos compartilhados. Aos amigos Derick, Hugo e Lúcio pelas sugestões e incentivos. A minha querida amiga Patrícia Pena, por ter sempre acreditado e apoiado. Você foi essencial em muitos momentos.

Agradeço também ao Prof. Ronaldo Pena pelo apoio; aos queridos amigos da família Sinisterra por todo o carinho; à minha madrinha, minha tia Cida querida, presente em todos os momentos da minha vida; à família Bandeira e aos meus familiares pelo apoio; e à Dra Cristina por ter me feito acreditar.

Acima de tudo agradeço à minha família, meus amados pais por toda a força, todo o carinho e toda a compreensão. Ao meu marido pela felicidade e amor que ele traz a minha vida. Minha querida irmã quem me entende como ninguém mais. Ao Lauro por muitas vezes ter sido seu o abraço mais apertado e que me manteve em pé. E aos meus pequenos João Pedro e Danielle por existirem.

Por fim, agradeço à FAPEMIG pela bolsa de doutorado e à FINEP pelo financiamento do sistema CMUF.

Resumo da Tese apresentada à UFMG como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

## **VALIDAÇÃO AMPLA DE OPERAÇÃO DE EDIFICAÇÕES**

**Laura Caixeta Braga**

Setembro/2013

Propõe-se uma metodologia para a validação ampla da operação de edificações. Esta metodologia é baseada na prática de validação, amplamente aplicada na indústria de processos. É realizada uma releitura de todos os passos metodológicos da validação e sua adaptação à área de estudo. Além da definição do método a ser aplicado - que foi testado em edificações simuladas em softwares adequados e aplicada em uma edificação real - foi desenvolvido um software para a validação online de edificações. Esse software viabiliza o monitoramento, análise automática de dados e geração de notificações, alarmes e sugestões de atuação para controle. A ferramenta de software desenvolvida monitora o perfil usual de consumo energético e os estados de conforto térmico e lumínico dos diversos ambientes de uma edificação, identificando mudanças ou estados fora de conforto de maneira automática e viabiliza a atuação preventiva ou corretiva. Esta ferramenta de software se baseia no fato do modo de uso ou operação da edificação ser refletido no consumo energético, que frequentemente apresenta um perfil cíclico característico. Foi proposta uma estrutura multicanal para modelar o consumo em função deste perfil estatístico (média e incerteza). Este perfil é analisado usando ferramentas de CEP que geram diagnósticos, alarmes e recomendações. A estrutura multicanal proposta é facilmente modelada, sintonizada e implementada com baixa demanda computacional de memória e de velocidade de processamento. O conforto térmico é avaliado aplicando o conceito de distância estatística multivariada sobre o Diagrama Bioclimático de Givoni. A distância estatística fornece uma medida do desconforto e o monitoramento desta por meio da Carta  $T^2$  de Conforto permite identificar degradações nas condições climáticas internas, permitindo uma atuação preventiva do sistema de climatização artificial. Já o conforto lumínico é avaliado e monitorado em função da manutenção dos níveis de iluminância exigidos por norma. Os dados de luminosidade são modelados em uma estrutura multicanal e, em seguida, é computada a distância cumulativa entre a luminosidade medida no ambiente e aquela determinada pela norma. O comportamento da soma cumulativa é monitorado por meio de uma carta de CuSum. A ferramenta de software desenvolvida utiliza as mesmas ferramentas de análise automática de dados, utilizada no monitoramento do consumo, para o monitoramento de conforto, o que permite um armazenamento inteligível de dados e um rastreamento facilitado de faltas.

Abstract of Thesis presented to UFMG as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in Electrical Engineering.

## **VALIDATION OF OPERATION OF BUILDINGS**

**Laura Caixeta Braga**

September/2013

A methodology for buildings' operation validation is proposed. This methodology is based on Validation, a practice widely applied in the process industry. A rereading of all the methodological steps of validation is done and it is adapted to the study area. The proposed steps were tested in simulated buildings and applied in a real building. A software tool was also developed for performing the online validation of buildings. This software enables monitoring, data analysis and automatic generation of alarms and suggested actions for control purposes. It monitors the usual profile of energy consumption and the conditions of thermal and luminic comfort, identifying changes or out of comfort occurrences and enabling corrective or preventive actions. The computational tool is based on the fact that the buildings' usage mode is reflected in the energy consumption, which often presents a cyclical profile. A multichannel structure was proposed for modelling and estimating statistical profile (average and uncertainty) of the energy consumption of a building during a predetermined cycle. These statistics profile is analyzed with Statistical Process Control (SPC) techniques for signaling alarms or reporting interpreted faults of unpredicted or unusual behavior of energy demand. Thermal comfort is also evaluated by applying concepts of multivariate statistical distance on Givoni's Bioclimatic Chart. The statistical distance provides a measure of discomfort and its monitoring by  $T^2$  Comfort Chart that helps the identification of degradations in internal climatic conditions allowing preventive action to be performed by the artificial air conditioning system. Luminic comfort is monitored and evaluated in accordance to standard required illuminance levels. The luminance data are modeled in a multichannel structure and then the cumulative distance is computed among the measured luminosity and the one determined by standard. The behavior of the cumulative sum is monitored by CUSUM charts.

# Lista de Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ARIMA	Média Móvel Autoregressiva Integrada
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i>
BEMS	<i>Building Energy Management System</i>
BESTEST	<i>Building Energy Simulation Test</i>
CEFET	Centro Federal de Educação Tecnológica
CEP	Controle Estatístico de Processos
CMUF	Centro de Monitoramento de Usos Finais
CuSum	Somas Cumulativas
EIA	<i>Energy Information Administration</i>
ELETRORBRAS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
EMA	Erro Médio Absoluto
EMQ	Erro Médio Quadrático
EUA	Estados Unidos da América
EWMA	Média Móvel Exponencialmente Ponderada
GMP	<i>Good Manufacturing Practices</i>
HVAC	<i>Heating, Ventilation, and Air Conditioning</i>
ICB	Instituto de Ciências Biológicas
LC	Linha Central
LIC	Limite Inferior de Controle
LSC	Limite Superior de Controle
MIMO	Múltiplas Entradas e Múltiplas saídas
MISO	Múltiplas Entradas e Única saída

NBR	Norma Técnica Brasileira
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PMV	Plano Mestre de Validação
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia
PV	Processo de Validação
QD	Qualificação do Desempenho
QI	Qualificação da Instalação
QO	Qualificação da Operação
RMV	Valor Medido Bruto
RTQ	Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Residenciais
RU	Incerteza Bruta
SAE	Sistema de Automação da Edificação
SCADA	Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados
SMV	Sistema de monitoramento e Validação
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UGR	Índice de Ofuscamento Unificado
VMV	Valor Medido Validado
VU	Incerteza Validada

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivo . . . . .	5
1.2	Estrutura do trabalho . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>6</b>
2.1	O sistema edificação . . . . .	6
2.1.1	Abordagem sistêmica . . . . .	7
2.1.2	Sistemas de automação e controle de edificações . . . . .	26
2.1.3	Programas de simulação computacional . . . . .	34
2.2	Validação . . . . .	35
2.2.1	Objetivos da validação . . . . .	36
2.2.2	Etapas do processo de validação . . . . .	37
2.2.3	Validação <i>online</i> . . . . .	39
2.2.4	Ferramentas da validação de processos . . . . .	41
2.2.5	Validação ampla . . . . .	49
2.3	Considerações finais . . . . .	51

<b>3</b>	<b>Metodologia da pesquisa</b>	<b>53</b>
3.1	Edificações de teste . . . . .	55
3.1.1	O software <b>EnergyPlus</b> . . . . .	55
3.1.2	Exemplo de caso de uma edificação residencial . . . . .	56
3.1.3	Exemplo de caso de uma edificação comercial . . . . .	57
3.2	Edificação real a ser validada . . . . .	58
3.2.1	Sistema de medição e monitoramento . . . . .	61
3.2.2	Modelagem da edificação real pelo software EnergyPlus . . . . .	66
3.3	Considerações finais . . . . .	69
<b>4</b>	<b>Metodologia Proposta para Validação de Edificações</b>	<b>71</b>
4.1	A validação da operação de edificações e suas delimitações . . . . .	71
4.2	Etapas da validação de operação de edificações . . . . .	72
4.3	Qualificação da instalação (QI) . . . . .	74
4.4	Qualificação da operação (QO) . . . . .	75
4.5	Qualificação do desempenho (QD) . . . . .	80
4.6	Validação <i>online</i> da operação da edificação . . . . .	86
4.6.1	Sistema de Monitoramento e Validação (SMV) . . . . .	86
4.6.2	Módulo de monitoramento e validação <i>online</i> do consumo de energia . . . . .	89
4.6.3	Módulo de monitoramento e validação <i>online</i> do conforto térmico . . . . .	106
4.6.4	Módulo de monitoramento e validação <i>online</i> do conforto lumínico . . . . .	112
4.6.5	Módulo de geração de alarmes, diagnósticos e relatórios . . . . .	115
4.6.6	Sistema supervisorio . . . . .	118
4.7	Considerações finais . . . . .	128

<b>5</b>	<b>Aplicação da metodologia de validação a uma edificação real</b>	<b>129</b>
5.1	Qualificação da instalação . . . . .	129
5.2	Qualificação da operação . . . . .	131
5.3	Qualificação do desempenho . . . . .	134
5.4	Validação <i>online</i> da operação da edificação . . . . .	135
5.4.1	Monitoramento <i>online</i> do conforto térmico . . . . .	136
5.4.2	Monitoramento <i>online</i> do consumo . . . . .	143
5.5	Considerações finais . . . . .	146
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>148</b>
6.1	Sugestões de trabalhos futuros . . . . .	151

# Lista de Figuras

2.1	Diagrama Bioclimático de Givoni. Dados do programa <b>Analysis BIO</b> . . . . .	11
2.2	Diagrama Bioclimático de Givoni para Belo Horizonte. Dados baseados em [Assis, 2001] . . . . .	12
2.3	Zonas Bioclimáticas Brasileiras conforme norma NBR 15575. . . . .	13
2.4	Arquitetura dos SAE . . . . .	27
2.5	Árvore de Decisão para Validação . . . . .	37
2.6	Etapas do Processo de Validação <i>Offline</i> . . . . .	37
2.7	Etapas do Processo de Validação <i>Online</i> . . . . .	40
2.8	Funções associadas ao Processo de Validação . . . . .	40
2.9	Representação do Processo industrial como um Sistema . . . . .	42
2.10	Hierarquia das funções de um sistema de controle de processos, atividades de gerenciamento da produção e sistemas de gerenciamento da informação usados em uma planta industrial. Fonte: Braga et al. [2006] . . . . .	50
3.1	Metodologia de Pesquisa . . . . .	54
3.2	Diagrama de entradas e saídas do <i>Energy Plus</i> . . . . .	56
3.3	Caso exemplo residencial . . . . .	57
3.4	Caso exemplo de prédio comercial . . . . .	58

3.5	Layout da Edificação Estudada . . . . .	59
3.6	Layout dos auditórios . . . . .	60
3.7	Layout do subsolo . . . . .	61
3.8	Auditório:visão palco . . . . .	61
3.9	Auditório:visão fundos . . . . .	62
3.10	Rede CMUF - ICB . . . . .	63
3.11	Rede CMUF - auditórios . . . . .	65
3.12	Nó de rede central dos auditórios . . . . .	65
3.13	Modelo do auditório 2 no EnergyPlus . . . . .	67
3.14	Dados de validação do modelo do auditório 2 . . . . .	68
3.15	Padrões de ocupação simulados para o auditório 2 . . . . .	69
4.1	Fluxograma da validação . . . . .	73
4.2	Gráfico de conforto do prédio comercial operando com ventilação natural e ocupação de $6\text{ m}^2/\text{pessoa}$ . . . . .	77
4.3	Gráfico de conforto do prédio comercial operando com ventilação natural no período de inverno . . . . .	78
4.4	Gráfico de conforto do prédio comercial operando com climatização artificial no período de verão . . . . .	79
4.5	Verificação da posição de um ponto com relação a um polígono . . . . .	81
4.6	Mapa de Iluminância do caso exemplo residencial. . . . .	85
4.7	Diagrama de blocos do sistema de monitoramento e validação <i>online</i> . . . . .	87
4.8	Diagrama de blocos do sistema de monitoramento e validação . . . . .	88
4.9	Perfis de consumo característicos para diferentes tipos de edifícios. Fonte: Martinez-Ortiz et al. [2011]. . . . .	90

4.10	Série temporal de consumo de energia e seu comportamento estatístico. . . . .	91
4.11	Estratégia de monitoramento e validação <i>online</i> do módulo de consumo de energia. .	92
4.12	Estrutura de dados do módulo SMV de consumo de energia. . . . .	93
4.13	Validação Passiva . . . . .	94
4.14	Estrutura multicanal . . . . .	95
4.15	Visualização 3D da compactação de dados em uma estrutura multicanal: (a) dado 'dobrado' em períodos semanais e (b) o valor computado para um canal ao longo das semanas. . . . .	96
4.16	Visualização 3D da compactação de dados em uma estrutura multicanal: (a) dado 'dobrado' em períodos semanais e (b) o valor computado para um canal ao longo das semanas. . . . .	97
4.17	Fator de Utilização . . . . .	99
4.18	Gerador de Perfil Planejado . . . . .	99
4.19	Sinalizador de estado: critérios para definição . . . . .	101
4.20	Estruturas multicanais de curta duração para a primeira semana de simulação . . . .	103
4.21	Estruturas multicanais de curta duração para a quinta semana de simulação . . . . .	104
4.22	Estruturas multicanais de curta duração para a nona semana de simulação . . . . .	104
4.23	Estruturas multicanais de curta duração para as 3 zonas do primeiro andar do prédio comercial . . . . .	105
4.24	Estruturas multicanais de curta duração para o primeiro andar do prédio comercial . .	106
4.25	Estratégia de monitoramento e validação <i>online</i> do módulo de consumo de energia. .	106
4.26	Função de Probabilidade e Curvas de Nível da Zona de Conforto de Givoni . . . . .	108
4.27	Carta Psicrométrica com curvas de nível de desconforto . . . . .	110
4.28	Carta $T^2$ para a nona semana de simulação . . . . .	111

4.29	Estruturas multicanais de curta duração para a quinta semana de simulação . . . . .	112
4.30	Diagrama de blocos do módulo de conforto lumínico . . . . .	113
4.31	Teste de CuSum durante o mês de fevereiro no caso residencial . . . . .	114
4.32	Teste de CuSum durante o mês de setembro no caso residencial . . . . .	115
4.33	Sinalização e alarme para os estados de consumo . . . . .	116
4.34	Sinalização e alarme para os estados de conforto térmico . . . . .	117
4.35	Sinalização e alarme para os estados de conforto lumínico . . . . .	118
4.36	Tela Geral do Validador . . . . .	120
4.37	Tela de supervisão do Validador . . . . .	121
4.38	Tela de alarmes do Validador . . . . .	122
4.39	Tela de tendência do Validador . . . . .	123
4.40	Tela de agendamento do Validador . . . . .	124
4.41	Tela de CEP do Validador . . . . .	125
4.42	Telas de configurações do Validador . . . . .	127
5.1	Condições térmicas do auditório 2 no verão com ocupação máxima para dados simulados . . . . .	136
5.2	Distância estatística máxima para verão com ocupação máxima para os dados simulados do auditório 2 . . . . .	137
5.3	Condições térmicas do auditório no verão com ocupação mínima para os dados simulados do auditório 2 . . . . .	137
5.4	Condições térmicas do auditório no verão sem ocupação para os dados simulados do auditório 2 . . . . .	138
5.5	Distância estatística máxima para o verão para os dados simulados do auditório 2 . . . . .	139

5.6	Distância estatística média para o verão para os dados simulados do auditório 2 . . .	139
5.7	Diagrama de Givoni no verão com ocupação máxima para os dados simulados do auditório 2 . . . . .	140
5.8	Condições térmicas do auditório no inverno com ocupação máxima para os dados simulados do auditório 2 . . . . .	141
5.9	Distância estatística máxima no inverno para os dados simulados do auditório 2 . . .	141
5.10	Distância estatística média no inverno para os dados simulados do auditório 2 . . . .	142
5.11	Condições térmicas do auditório 2 com retrofitting no verão com ocupação máxima .	142
5.12	Estruturas multicanais para média e variância e sinalizador de estado para os dados simulados do auditório 2 . . . . .	143
5.13	Resultado dos testes de CuSum e alarmes para os dados simulados do auditório 2 . .	144
5.14	Estruturas multicanais para média e variância e sinalizador de estado para os dados simulados do auditório 2 . . . . .	144
5.15	Resultado dos testes de CuSum e alarmes . . . . .	145
5.16	Estruturas multicanais para média e variância e sinalizador de estado . . . . .	146
5.17	Resultado dos testes de CuSum e alarmes . . . . .	146

# Lista de Tabelas

2.1	Critérios para a definição de níveis de desempenho térmico: temperatura . . . . .	14
2.2	Critérios para a definição de níveis de desempenho térmico: ventilação . . . . .	14
3.1	Relação dos dispositivos de medição . . . . .	64
3.2	Relação dos dispositivos de medição das variáveis ambientais . . . . .	66
3.3	Validação do modelo . . . . .	68
4.1	Conforto térmico e condições operativas para o exemplo de prédio comercial . . . . .	80
4.2	Índice de adequação térmica para o exemplo de caso residencial desconsiderando ocupação . . . . .	83
4.3	Índice de adequação térmica para o exemplo de caso residencial considerando ocupação plena . . . . .	83
4.4	Quantidade mínima de pontos a serem medidos. Fonte:ABNT NBR 15215-4 . . . . .	84
4.5	Índice de adequação lumínica para a sala do caso exemplo residencial . . . . .	85
4.6	Médias e Covariâncias da Zona de conforto . . . . .	109
5.1	Potência instalada nos auditórios (em kW) . . . . .	129
5.2	Luminosidade aferida nos auditórios . . . . .	131
5.3	Correlações: subestações . . . . .	132

5.4	Correlações: auditório 1 - dados de medições . . . . .	132
5.5	Correlações: auditório 2 - dados de medições . . . . .	132
5.6	Correlações: auditório 3 - dados de medições . . . . .	133
5.7	Correlações: auditório 4 - dados de medições . . . . .	133
5.8	Estatística descritiva: umidade dos auditórios - dados de medições . . . . .	133
5.9	Estatística descritiva: temperatura dos auditórios - dados de medições . . . . .	134
5.10	Índices de Adequação Lumínica com relação a uma luminosidade artificial de 100 lux	134
5.11	Índices de Adequação do Auditório 2 . . . . .	135
5.12	Índices de Adequação do Auditório 2 com <i>retrofit</i> . . . . .	135

# Capítulo 1

## Introdução

A função primordial de uma edificação é a de proporcionar abrigo às atividades humanas atendendo às necessidades com relação à moradia, trabalho e lazer. No entanto, quais são as necessidades humanas com relação às atividades citadas? Segundo a norma da ABNT NBR 15575-1<sup>1</sup> que estabelece parâmetros técnicos para a avaliação do desempenho dos edifícios habitacionais, os requisitos dos usuários podem ser classificados em: (1) segurança - que engloba segurança estrutural, combate ao fogo e segurança no uso e na operação; (2) habitabilidade - que engloba a estanqueidade, os desempenhos térmico, acústico e lumínico, a saúde e higiene e a qualidade do ar; e (3) sustentabilidade - que engloba a durabilidade, a manutentabilidade e o impacto ambiental. Estes requisitos são, em sua maioria, parcialmente atendidos por projetos e construção adequada. No entanto, após entrar em operação nada garante que esta situação será mantida. Mesmo uma edificação com projeto estrutural adequado para as suas características pode entrar em colapso e cair, caso uma de suas vigas estruturais seja danificada ou retirada. Da mesma maneira, edificações construídas para serem energeticamente eficientes podem desperdiçar mais energia do que edificações com projetos que desconsideram este fator. Isto se deve ao fato das edificações serem sistemas dinâmicos, que são modificadas ao longo de sua vida útil, e operadas de maneira distintas umas das outras. Definir o desempenho de edifícios no momento em que são projetados, ao final de sua construção ou até mesmo estando eles em operação é uma tarefa complexa. Talvez a terminologia mais adequada seja definir o potencial dos edifícios em termos de segurança, de habitabilidade ou de sustentabilidade.

A avaliação do potencial das edificações é essencial para identificar gargalos e garantir qualidade

---

<sup>1</sup>Edificações Habitacionais - Desempenho.

de projeto e construção. Este é o passo inicial para que uma edificação atenda às necessidades dos usuários. No entanto, o modo com que os edifícios são operados determina a satisfação de seus ocupantes. É necessário, portanto, avaliar o uso das edificações. O modo com que são operadas e mantidas. Esta avaliação permite verificar se as possibilidades encontradas nos projetos estão sendo realmente alcançadas. Além de viabilizarem a gestão da edificação, esta avaliação permite qualificar o desempenho ao longo do tempo e identificar necessidades de práticas de correção com o intuito de manter a performance.

A prática existente no campo industrial para a avaliação das condições de operação de um sistema, determinando se ele opera conforme sua qualidade especificada é a validação de sistemas. Esta prática é realizada para a obtenção de evidências documentadas de que um sistema atende com consistência às especificações declaradas, por exemplo, de plantas industriais, de instrumentos de campo (sensores e atuadores), de equipamentos de processo (bombas e motores), de controladores, de redes de comunicação e até mesmo de funcionários [Passos, 2009]. De maneira análoga à prática realizada no âmbito industrial, é possível validar o desempenho de uma edificação. Esta validação, ao ser realizada de modo *online* permite identificar, analisar e avaliar como as edificações estão sendo operadas em relação a padrões normativos, contratuais, ou padrões de uso. Além de viabilizar a identificação e o diagnóstico de situações que levariam a uma perda de desempenho, alarmando, notificando e indicando correções para a manutenção da performance.

Ao se iniciar um processo de validação é necessário definir o escopo da validação. Um processo pode ser validado com relação, por exemplo, ao seu consumo de energia ou água. Para fazer o mesmo em edificações é necessário garantir que são mantidas as condições de conforto aos usuários. Esta tese propõe métodos e dispositivos para a validação ampla de edificações com enfoque no consumo de energia elétrica e nos padrões de conforto térmico e lumínico estabelecidos. Diversas simplificações são assumidas como, por exemplo, a avaliação do conforto térmico somente em função da temperatura e da umidade e a avaliação do conforto lumínico somente com relação ao nível de iluminância. Estas simplificações foram realizadas devido às limitações tecnológicas existentes, e as variáveis monitoradas foram consideradas como capazes de representar o conforto.

A validação do consumo energético é extremamente importante visto que as edificações representam percentuais significativos do consumo de energia mundial. Em termos numéricos a energia utilizada nas edificações nos setores comercial e residencial representa 24% do consumo energético

mundial [Pérez-Lombard et al., 2008]. Esta expressiva percentagem tende a crescer, segundo o EIA<sup>2</sup>, em 34% nos próximos 20 anos [DOE, 2008]. Este crescimento, deve ser ainda maior nos países em desenvolvimento.

A preocupação com o alto consumo energético dos edifícios e a necessidade de reduzi-lo levou à criação de diversas políticas públicas que incentivam o uso eficiente de energia em todo o mundo. Esta prática possui grande potencial e experiências internacionais mostram ganhos expressivos ao adotá-la. Os Estados Unidos (EUA), por exemplo, alcançaram, com a implementação de sua primeira norma energética datada de 1973: a redução em 11,3% no consumo anual de energia de residências unifamiliares; 42,7% em residências multifamiliares; 59,7% em edifícios de escritórios; 40,1% em edifícios comerciais e 48,1% em edifícios escolares [Beraldo, 2006]. Na França este valor foi de 75% entre as décadas de 70 a 90 [Beraldo, 2006].

No Brasil, a questão da eficiência energética passa a ser tratada pelo governo federal em 1981, devido à crise do setor petrolífero. Neste ano, é criado o programa CONSERVE, voltado para o consumo energético industrial. Em 1984, são iniciadas as ações do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), que visa a avaliação e divulgação do desempenho energético de equipamentos fabricados no país. Em 1985, com o agravamento da conjuntura do setor elétrico, é criado, pelos Ministérios de Minas e Energia e da Indústria e Comércio, o Programa Nacional de Conservação de Energia (PROCEL), sob a coordenação da ELETROBRAS. O programa se propõe a promover a racionalização da produção e do consumo de energia elétrica, para eliminar desperdícios e reduzir custos e investimentos. A criação do PROCEL provocou mudanças significativas na forma com que as atividades relacionadas com eficiência energética eram conduzidas no país. Entretanto, entre os anos de 1986 a 1997, o programa passou por várias discontinuidades, sendo que, em 1998, foi cogitada a hipótese de sua extinção. Entretanto, desde o início dos anos 2000, o programa tornou-se referência em eficiência energética no Brasil. A partir de 2001, com o agravamento da crise energética brasileira, vários outros instrumentos legais foram estabelecidos com o intuito de se reduzir o consumo deste insumo. Cita-se a lei 10.295 de 2001 que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Esta lei estabelece índices de consumo máximo para os equipamentos comercializados no país e sua classificação de acordo com o PBE. Em 2009, o PBE foi expandido para edificações por meio do Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. Este regulamento estabelece a etiquetagem e a inspeção como mecanismos

---

<sup>2</sup>Energy Information Administration (EIA) é uma agência vinculada ao Departamento de Energia dos EUA, cuja missão é prover dados, previsões e análises acerca do consumo de energia e sua interação com a Economia e o Meio-Ambiente.

de avaliação da conformidade para classificação do nível de eficiência energética de edifícios. Os parâmetros utilizados para análise são: as características construtivas e os sistemas de iluminação e condicionamento de ar.

O uso de certificados de eficiência energética é uma prática comum em diversos países como os países-membros da União Européia, EUA, Canadá, Austrália, Japão e Hong Kong. Trata-se de um mecanismo de mercado efetivo para a promoção da eficiência energética em equipamentos, pois estimulam a fabricação de produtos eletroeletrônicos energeticamente eficientes e orientam consumidores no ato da compra. No entanto, acredita-se que a adoção de certificados deve ser visualizada como um primeiro passo para a validação da edificação sendo complementada posteriormente com práticas de validação *online*. Este primeiro passo identifica o máximo potencial de eficiência passível de ser alcançado pela edificação. Caso não fossem realizadas modificações durante toda a vida útil das mesmas, o seu desempenho iria decair com o passar dos anos, devido, por exemplo, a desgastes em suas estruturas, equipamentos e sistemas. Este decaimento, no entanto, não é facilmente previsível, pois varia de acordo com as condições de manutenção e limpeza dos diversos equipamentos existentes. Entretanto, não é razoável considerar que não ocorram, durante a vida útil de uma edificação, mudanças em sua estrutura e/ou subsistemas. Edificações são dinâmicas e estão em constante modificação. Novos equipamentos são inseridos frequentemente, sendo que, diversos deles são instalados pelos próprios usuários, que não informam este fato aos gestores da edificação. Mudanças de *layout* são frequentemente necessárias e estas podem modificar o fluxo de ventilação natural ou a entrada de luz solar. É possível, portanto, afirmar que o desempenho energético das edificações varia no tempo de acordo com diversos fatores, sendo que alguns deles são não controláveis, não lineares e não predizíveis.

Para realizar a validação *online* de edificações como proposto, uma ferramenta de software foi desenvolvida. Esta ferramenta monitora e valida, em tempo real, a operação da edificação em função de seu desempenho energético e das condições de conforto térmico e lumínico. O sistema de monitoramento é capaz de identificar diversas situações operativas como (1) a existência de fugas de corrente com mudanças no patamar de consumo não acompanhadas pela luminosidade ou não explicadas por usos incomuns; (2) a existência de lâmpadas queimadas, ou a necessidade de sua limpeza ou substituição com a redução nos patamares de luminosidade ; (3) a existência de vazamentos no sistema hidráulico com aumento nos valores de umidade.

## 1.1 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo principal a proposição de uma metodologia para a validação ampla da operação de edificações em função de seu desempenho energético e levando em consideração as condições de conforto térmico e lumínico, viabilizando a detecção, identificação e diagnóstico de suas condições operacionais.

## 1.2 Estrutura do trabalho

O trabalho desenvolvido encontra-se organizado em seis capítulos. O presente capítulo introduz o assunto, apresentando sua motivação e objetivos.

No segundo capítulo é feita a revisão bibliográfica dividida em duas seções. A primeira apresenta o sistema foco deste trabalho: a edificação. O desempenho das edificações de acordo com as características dos seus principais sistemas consumidores de energia é discutido. Em seguida, são apresentados os sistemas e subsistemas de controle e automação dedicados às edificações. Na segunda seção são apresentados conceitos de Validação de Processos. Inicialmente, a temática é contextualizada. A Validação é conceituada e seus passos são descritos. Em seguida, as ferramentas que viabilizam a aplicação da validação de processos são apresentadas. Os métodos de análise e monitoramento das variáveis de qualidade por meio de técnicas de Controle Estatístico de Processos são discutidos. Por último, é apresentado o conceito de validação ampla de unidades industriais.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia da pesquisa, identificando os passos metodológicos seguidos para a realização deste trabalho, e apresenta os estudos de caso presentes neste trabalho. São apresentadas as edificações de testes - edificações modelo simuladas utilizadas para testes e proposições - e a edificação real na qual a metodologia proposta foi aplicada.

O quarto capítulo é dedicado à apresentação da metodologia e do sistema proposto. São utilizados exemplos de casos simulados para exemplificar a aplicação da metodologia proposta.

No quinto capítulo a metodologia proposta é aplicada ao modelo validado utilizando dados reais da edificação modelada.

No sexto capítulo é apresentada a conclusão desta etapa do trabalho e os passos a serem seguidos para a defesa da tese.

## Capítulo 2

# Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica abordando, em sua primeira seção, a edificação a ser validada e, em sua segunda seção o método de validação. Na primeira seção o edifício é analisado de maneira sistêmica, em termos do seu desempenho lumínico, térmico e energético. Em seguida, são apresentados os sistemas e subsistemas de controle e automação possíveis para uso dedicado às edificações. Estes sistemas são fundamentais para a metodologia de validação a ser proposta, visto que estes podem viabilizar a prática da validação. Por fim os programas de simulação termo-energética de edificações são conceituados. Na segunda seção do capítulo, é apresentada uma revisão de conceitos e técnicas de Validação de Processos.

### 2.1 O sistema edificação

Esta seção apresenta o sistema a ser validado : a edificação. A seção é dividida em duas partes principais, a primeira apresenta a abordagem teórica utilizada para a análise das edificações em termos do seu consumo energético e de suas variáveis ambientais: a Teoria de Sistemas. De acordo com esta teoria, o edifício é analisado como um sistema, em termos do seu desempenho lumínico, térmico e energético. A análise de desempenho é apresentada de acordo com as principais características de qualidade que o interfere. Na segunda parte deste capítulo, são apresentados os sistemas e subsistemas de controle e automação possíveis para uso dedicado às edificações. Estes sistemas são fundamentais para a metodologia de validação a ser proposta, visto que estes podem viabilizar a prática da validação *online* a ser discutida no próximo capítulo.

### 2.1.1 Abordagem sistêmica

Até o início do século XX, a visão de mundo predominante no Ocidente era a reducionista<sup>1</sup>, proveniente da Revolução Científica. Pensadores como Bacon, Galileu, e Newton acreditavam que: para entender o todo, era necessário decompô-lo em partes isoladas entre si, até um elemento indivisível, a partir do qual seria possível explicar a realidade [Santos, 1988]. Este método foi aplicado com sucesso por diversos cientistas, e embasaram, por exemplo, as Leis de Newton.

Entretanto, esta visão do mundo entra em crise no século XX, quando Einstein demonstra as limitações da teoria de Newton por meio de sua teoria da relatividade e da simultaneidade [Santos, 1988]. Segundo Rheingantz [2000] esta crise se agrava quando Heisenberg e Bohr demonstram não ser possível observar ou medir um objeto sem nele interferir. Não sendo possível, portanto, reconstituir o total a partir de suas partes. A partir do questionamento dos alicerces filosóficos do método reducionista, novas teorias passaram a ser desenvolvidas. Dentre elas, destaca-se o desenvolvimento da Teoria Geral dos Sistemas, proposta por Bertalanffy, e defendida e aprimorada por diversos outros cientistas.

A teoria sistêmica defende a visão do todo como um conjunto de elementos interligados e interdependentes, que não podem ser entendidos isoladamente. O foco da teoria sistêmica não está nas partes do todo, mas, nas relações orgânicas e estatísticas existentes entre estas partes. Para entender estas relações é necessário combinar e abranger as diversas áreas de conhecimento de maneira a se ter uma visão holística do todo [Bertalanffy, 2008].

Para utilizar a análise sistêmica como uma ferramenta de análise de edifícios é necessário, inicialmente, compreendê-los como um todo. Edificações são construções destinadas a abrigar as atividades humanas das intempéries do meio circundante. Para serem capazes de prover um ambiente satisfatório, elas devem ser operadas com o objetivo de proporcionar um local seguro e que preserve as condições de saúde e conforto de seus ocupantes. É necessário, também, que sua operação seja realizada com metas parcimoniosas, i.e., focadas no mínimo uso de recursos financeiros e naturais. Esta abordagem deve, portanto, englobar as condições ambientais, a satisfação de usuários e o consumo de recursos.

Segundo Kouloura et al. [2008], este tipo de abordagem, pode ser utilizada como uma ferramenta para aumentar o desempenho energético de uma edificação. Isto, pois, permite considerar todos os

<sup>1</sup>Também denominada de mecanicista, cartesiana ou newtoniana.

fatores que podem afetá-lo e avaliar as possíveis intervenções para a sua melhora não somente sob o ponto de vista técnico, econômico e energético, mas também, sob uma perspectiva ambiental, social e financeira.

É necessário ressaltar que o desempenho das edificações é tema de pesquisas em diversas áreas do conhecimento e, em cada uma delas, pode ser analisado sob um aspecto distinto. No âmbito da arquitetura e das ciências sociais, estuda-se o desempenho das edificações com relação ao usuário. Satisfação, conforto e produtividade são exemplos de variáveis que podem indicar o desempenho da edificação para estas áreas de conhecimento. Para a engenharia civil, o desempenho de uma edificação pode estar relacionado ao seu comportamento estrutural, caso ocorram terremotos, por exemplo. Já para a engenharia mecânica, o interesse está, sobretudo, no comportamento térmico dos sistemas de condicionamento de ar. E, por fim, na engenharia elétrica, o desempenho pode ser relacionado tanto com o uso eficiente de energia elétrica, quanto com o bom funcionamento dos sistemas de automação existentes. Ao se abordar o desempenho de edifícios é necessário, portanto, especificar sob qual ponto de vista este será determinado.

As edificações são consideradas, neste trabalho, como sistemas “sócio-tecnológicos” que consomem energia elétrica para fornecerem serviços e para modificarem as condições ambientais externas adequando-as às necessidades dos usuários. Trata-se, portanto, de um modelo simplificado do complexo sistema edificação. O desempenho destas construções será averiguado em relação: (1) ao consumo, estado de operação, manutenção e uso dos diversos equipamentos existentes; (2) à qualidade, i.e. à adequação às normas vigentes; e (3) à satisfação às exigências dos usuários.

A edificação será analisada nas subseções seguintes de acordo com o seu desempenho lumínico, térmico e energético. A performance das edificações será analisada de acordo com as principais características de qualidade que a interfere. As características de qualidade consideradas, neste trabalho, são: as descritas em normalizações e regulamentações e as definidas pela satisfação dos usuários.

#### **2.1.1.1 Desempenho lumínico**

A principal função do sistema de iluminação é a de manter níveis de conforto e de acuidade visual adequados às atividades realizadas pelos usuários da edificação. O conforto visual, ou lumínico, é determinado pelo nível de luminosidade ambiente e por outros fatores como: a uniformidade da

luminosidade, a existência de pontos de ofuscamento, e as características da fonte luminosa como fidelidade de reprodução<sup>2</sup> e temperatura de cor<sup>3</sup>.

A norma brasileira que especifica os requisitos de iluminação recomendados para diversos ambientes e atividades é a norma ABNT NBR ISO/CIE 8995-1. Esta norma, determina para casa tipo de ambiente: a iluminância média a ser mantida em uma superfície de referência; o máximo valor aceitável de ofuscamento; e o índice de reprodução de cor mínimo. O máximo valor aceitável para o ofuscamento é indicado pelo Índice de Ofuscamento Unificado (UGR - Unified Glare Rating). O UGR é determinado por um método tabular, considerando as características fotométricas da luminária no ambiente instalado, as características de refletâncias (teto, parede e piso), a proporção das dimensões do ambiente e do espaçamento das luminárias. Já o índice de reprodução de cor mínimo do ambiente deve ser comparado com o indicado na lâmpada pelo fabricante. A norma recomenda também a seleção criteriosa do sistema de iluminação e a utilização de acionamento automático ou manual ou a dimerização das lâmpadas priorizando a luz natural disponível para economizar energia.

A utilização de luminosidade natural é normalizada pela NBR 15215:2005 “Iluminação natural”. A norma aborda a utilização da luminosidade solar, apresentando dados técnicos e informações básicas para a utilização da iluminação natural no projeto de novas edificações. São apresentados métodos de cálculo e verificação dos níveis de iluminação natural no interior das edificações.

### 2.1.1.2 Desempenho térmico

O desempenho térmico de edificações é função da interação entre as condições climáticas e as características construtivas e de uso do edifício. Ele pode ser analisado em termos de sua qualidade (adequação à normas e regulamentações) e em relação às condições de conforto térmico.

O conforto térmico é definido por ASHRAE [2004] como um estado de espírito que reflete satisfação com o ambiente térmico. Assim, entende-se que a sensação térmica é relativa de um indivíduo para outro e depende do metabolismo de cada um. Segundo Frota e Schiffer [2003], conforto térmico é a sensação do ser humano quando perde para o ambiente, sem que ocorra qualquer mecanismo de

---

<sup>2</sup>A capacidade da fonte luminosa de reproduzir as cores dos objetos que ilumina é dada pelo Índice de Reprodução de Cor (IRC) que varia de 0 a 100, de modo que quanto mais alto o IRC melhor as cores se aparentam a um observador humano.

<sup>3</sup>A aparência da fonte de luz é dada pela temperatura de cor característica, ou, em lâmpadas de descarga, a temperatura de cor correlata. Uma temperatura de cor acima de 4000 K descreve uma fonte de luz azulada, enquanto que uma temperatura de cor inferior a 3000 K é característica de fontes mais avermelhadas.

termorregulação, o calor produzido por seu metabolismo. O calor é dissipado pelo corpo através de mecanismos de trocas térmicas entre o corpo e o ambiente, que podem ocorrer por condução, convecção, radiação e evaporação. Sendo limitada por diversos fatores como, por exemplo, vestimentas que representam uma barreira para as trocas por convecção. De maneira geral, as condições de conforto são relativas às variáveis ambientais, às atividades desenvolvidas, à vestimenta e à outros fatores relacionados com os usuários como sexo, idade, biotipo, entre outros.

Um sistema de climatização de ambientes deve ser capaz de adequar os condicionantes climáticos a padrões favoráveis ao metabolismo dos indivíduos, propiciando conforto térmico. A definição de quais são as condições climáticas características de uma situação de conforto, entretanto, não é tarefa trivial, dado o seu caráter subjetivo.

Segundo Frota e Schiffer [2003], os primeiros estudos acerca da influência das variáveis ambientais no rendimento do trabalho datam do início do século XX. Estes estudos constataram que para trabalhos físicos o aumento da temperatura de 20°C para 24°C diminui o rendimento em 15% e para 30°C de temperatura ambiente, com umidade relativa de 80%, o rendimento cai 28%. Ainda segundo os autores, nesta mesma época foram observadas variações nas produções industriais de acordo com as estações do ano.

Os diversos índices de conforto foram desenvolvidos ao longo dos anos e podem ser classificados em: (1) índices biofísicos, que se baseiam nas trocas de calor entre o corpo e o ambiente; (2) índices fisiológicos que se baseiam nas reações fisiológicas originadas por condições conhecidas de temperatura seca do ar, temperatura radiante média, umidade e velocidade do ar; e (3) índices subjetivos, que se baseiam em sensações de conforto [Frota e Schiffer, 2003].

Existem diversas métricas para a estimação do grau de satisfação que a maior parte das pessoas teria em um determinado ambiente. Um índice muito utilizado é o *Predictive Mean Vote*, ou Voto Médio Estimado. Este índice se baseia na necessidade do sistema termorregulador do corpo atuar, de forma a evitar variações significativas na temperatura corpórea quando as condições térmicas ambientais se afastam daquelas que proporcionam conforto, ou neutralidade térmica [ASHRAE, 2001a]. Este índice prediz a sensação térmica a partir da estimativa da atividade, da vestimenta e dos dados medidos de temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade absoluta.

Apesar de muito utilizado, segundo Pereira e Assis [2010], o índice *Predictive Mean Vote* não é adequado para estudos de conforto térmico no território brasileiro. As autoras explicam que este

índice não é capaz de estimar a real sensação de conforto térmico de indivíduos aclimatados a climas tropicais. O seu uso indica condições de desconforto térmico mais severo do que a realmente percebida pelos usuários. Como alternativa, ainda segundo a autora, estão sendo adotados diferentes índices adaptativos. Estes, se caracterizam por serem de uso simplificado por apresentarem, em geral, apenas uma temperatura de conforto térmico em função da temperatura média mensal registrada.

Segundo Lamberts et al. [1997] a ferramenta mais adequada para análises de conforto térmico em edificações brasileiras é o diagrama bioclimático de Givoni (índice biofísico). Este diagrama é construído sobre uma carta psicrométrica<sup>4</sup>. O diagrama bioclimático (ou carta) de Givoni divide a carta psicrométrica em zonas, uma de conforto, sete zonas com necessidades de estratégias bioclimática passivas, e duas zonas com necessidades de estratégias ativas, para o alcance de níveis iguais ou mais próximos ao da zona de conforto, representada na 2.1 [Lamberts et al., 1997]. O diagrama permite avaliar em qual zona está um ambiente quando este apresenta uma determinada condição térmica (temperatura e umidade).

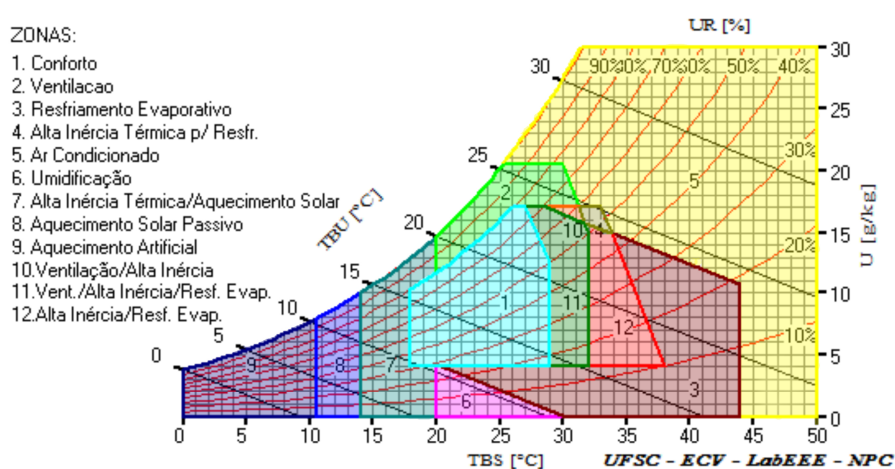


Figura 2.1: Diagrama Bioclimático de Givoni. Dados do programa **Analysis BIO**

A Carta de Givoni projetada sobre a carta psicrométrica para a cidade de Belo Horizonte é mostrada na figura 2.2.

Outra metodologia muito utilizada para análise de desempenho térmico é a de graus-hora de desconforto. Definida como sendo o somatório da diferença de temperatura horária, quando esta se encontra acima de uma temperatura base, no caso de resfriamento ou abaixo da temperatura base, no

<sup>4</sup>Diagrama no qual são representadas as propriedades termodinâmicas do ar a partir das quais identifica-se a melhor zona de conforto térmico. Ver Lamberts et al. [1997].



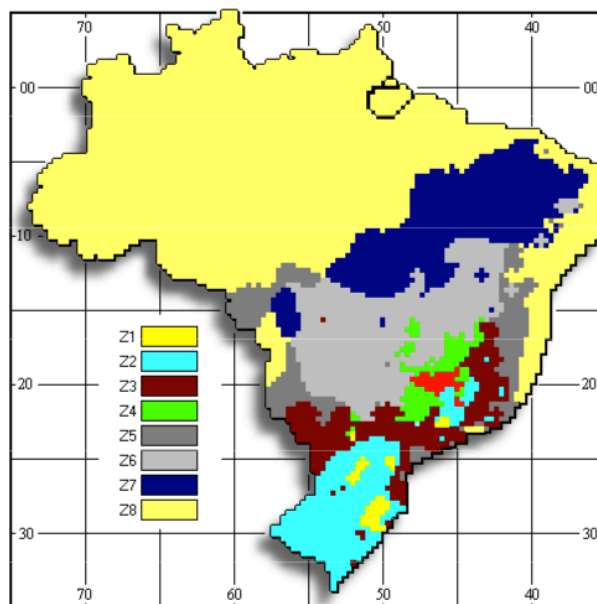


Figura 2.3: Zonas Bioclimáticas Brasileiras conforme norma NBR 15575.

Os procedimentos descritos na norma NBR 15575, para avaliação da adequação de habitações às zonas bioclimáticas brasileiras, são:

- Simplificado: verificação do atendimento aos requisitos e critérios estabelecidos para o envolvimento da edificação, com base na transmitância térmica e capacidade térmica de fachadas e coberturas.
- Simulação: verificação do atendimento aos requisitos e critérios estabelecidos neste documento, por meio da simulação computacional do desempenho térmico do edifício.
- Medição: verificação do atendimento aos requisitos e critérios estabelecidos neste documento, por meio da realização de medições em edificações ou protótipos construídos.

A norma estabelece as condições do ar no interior de recintos com permanência prolongada em dias típicos de verão e de inverno. Os valores apresentados consideram que (1) no verão: não haja presença de fontes de calor (e.g. pessoas e lâmpadas); (2) no inverno: haja uma fonte de calor a presença de 1 kW. Segundo a norma os níveis de conforto - Mínimo (M), Intermediário (I) e Superior (S) - são computados conforme a tabela 2.1.1.2.

Além da definição de valores mínimos e máximos para a temperatura, a norma NBR 15575 estabelece, para ambientes de permanência prolongada, a área mínima necessária para aberturas de

Tabela 2.1: Critérios para a definição de níveis de desempenho térmico: temperatura

Verão		
Nível de desempenho	Zonas Bioclimáticas 1 a 7	Zona Bioclimática 8
M	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$
I	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^{\circ}C)$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 1^{\circ}C)$
S	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 4^{\circ}C)$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^{\circ}C)$ e $T_{i,min} \leq (T_{e,min} + 1^{\circ}C)$
Inverno		
Nível de desempenho	Zonas Bioclimáticas 1 a 5	Zonas Bioclimáticas 6 a 8
M	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 3^{\circ}C)$	-
I	$T_{i,min} \leq (T_{e,min} + 5^{\circ}C)$	-
S	$T_{i,min} \leq (T_{e,min} + 7^{\circ}C)$	-

$T_{i,max}$  - Temperatura máxima diária do ar interior à edificação, em graus Celsius.  
 $T_{e,max}$  - Temperatura máxima diária do ar exterior à edificação, em graus Celsius.  
 $T_{i,min}$  - Temperatura mínima diária do ar interior à edificação, em graus Celsius.  
 $T_{e,min}$  - Temperatura mínima diária do ar exterior à edificação, em graus Celsius.

ventilação, como mostra a tabela 2.2. O cálculo da relação percentual entre a área de ventilação e a área do piso correspondente deve ser realizada considerando a área efetiva da abertura de ventilação do ambiente, ou seja a área da janela que permite a livre circulação do ar, devendo ser descontadas as áreas de perfis, vidros e de qualquer outro obstáculo.

Tabela 2.2: Critérios para a definição de níveis de desempenho térmico: ventilação

Abertura para ventilação (A)		
Nível de desempenho	Zonas 1 a 7	Zona 8
M	$A \geq 7\%$ da $A_p$	$A \geq 12\%$ da $A_p^a$ $A \geq 8\%$ da $A_p^b$

$A_p$  - área do piso.  
 Nota: nas zonas 1 a 6 as áreas de ventilação devem ser passíveis de serem vedadas durante o período de frio.

<sup>a</sup>Região Norte

<sup>b</sup>Regiões Nordeste e Sudeste

Em relação aos sistemas de ar condicionado, a norma brasileira é a NBR 16401 “Instalações de Ar Condicionado”. A norma é dividida em três partes. A primeira parte<sup>5</sup> estabelece parâmetros básicos e requisitos mínimos de projeto para sistemas de ar condicionado centrais e unitários, sendo utilizada também para instalações especiais como salas limpas, centros cirúrgicos e laboratórios. A segunda parte<sup>6</sup> especifica os parâmetros de conforto térmico do ambiente interno. Esta trata da sa-

<sup>5</sup>NBR 16401-1 Parte 1 “Instalações de Ar Condicionado - Sistemas Centrais e Unitários. Projeto das Instalações”.

<sup>6</sup>NBR 16401-2 Parte 2 “Instalações de Ar Condicionado - Sistemas Centrais e Unitários. Parâmetros de Conforto

tisfação térmica média de 80% das pessoas em relação ao conforto térmico em áreas providas de ar condicionado. A terceira parte<sup>7</sup> especifica os parâmetros básicos para a manutenção da qualidade de ar nos ambientes. Estabelece os requisitos mínimos para sistemas de ar condicionado, como vazões mínimas, níveis mínimos de filtragem de ar, requisitos técnicos e componentes relativos a qualidade do ar.

A análise do desempenho térmico de edificações pode ser realizada por meio de medições, de modelos matemáticos baseados no balanço de carga térmica, por meio de auditorias ou simulações. Uma metodologia de auditoria muito utilizada na arquitetura é a Avaliação Pós-ocupação. Esta metodologia analisa, entre outros fatores, o conforto ambiental de acordo com as características físicas da instalação e com a satisfação dos usuários.

### 2.1.1.3 Desempenho energético

Diversos fatores influenciam o desempenho energético de uma edificação, sendo que todos são limitados por suas características construtivas. Uma instalação somente irá alcançar sua máxima eficiência energética quando for construída com materiais apropriados à sua localização e características e de acordo com técnicas que permitam um máximo aproveitamento dos recursos naturais.

Os aspectos construtivos estabelecem, portanto, um limite além do qual não é possível aumentar a eficiência. Diversos outros fatores, estes sim passíveis de serem modificados, também, influenciam a maneira com que a energia é utilizada. Um fator determinante ao desempenho energético é a tecnologia dos equipamentos e sistemas existentes. Caso haja, no mercado, soluções similares com um menor consumo de energia, existe claramente um potencial para a redução do consumo de energia.

Ademais dos aspectos construtivos e tecnológicos, é necessário, ainda, que a edificação: (1) forneça os serviços e o conforto necessários para a sua atividade fim específica; e (2) opere com uma meta de demanda energética parcimoniosa, i.e., uma demanda mínima comparada com aquela de edificações semelhantes, com a mesma finalidade e conforto. Ambos os pré-requisitos supracitados inserem um fator novo na análise de desempenho das edificações: o usuário. É ele que mensura o nível de conforto de uma instalação e que a opera, caso não existam sistemas de automação instalados.

---

Térmico”.

<sup>7</sup>NBR 16401-3 Parte 3 “Instalações de Ar Condicionado - Sistemas Centrais e Unitários. Qualidade do Ar Interior”.

As subseções seguintes discutem o desempenho energético das edificações. Para isso, inicialmente é contextualizado o consumo energético ocorrido em edificações nos cenários brasileiro e mundial. Em seguida, a questão do usuário é introduzida. Por fim são apresentadas as metodologias de análise do desempenho energético.

### **Consumo energético**

O consumo de energético de edificações representa percentuais significativos do consumo nacional de energia. Em termos numéricos este consumo representa, em relação ao gasto total de energia: 23% para a Espanha, 25% para o Japão, 28% para a China, 57% para a Singapura, 37% para a União Européia (UE), 39% para o Reino Unido, 40% para a Polônia, 40% para os Estados Unidos (EUA) e 42% para o Brasil [Pérez-Lombard et al., 2008; Masoso e Grobler, 2010; Mihalakakou et al., 2002; Ziebig et al., 2005]. Sendo a média mundial dos consumos ocorridos nos setores comercial e residencial de 24% [Pérez-Lombard et al., 2008]. Segundo o EIA<sup>8</sup>, essa expressiva percentagem tende a crescer devido a diversos fatores como o crescimento populacional e a demanda crescente por serviços e conforto. Ainda de acordo com o órgão, o consumo de energia em edificações crescerá 34% nos próximos 20 anos [DOE, 2008].

Neste cenário de expansão da participação do consumo de energia em edificações, é interessante conhecer como a energia é utilizada nas edificações. O subsistema de serviço que apresenta maior consumo de energia nas edificações é considerado o de climatização do ar. De acordo com Pérez-Lombard et al. [2008] esta maior participação ocorre não só nas edificações comerciais, é fato, também, nas residenciais. Ainda segundo o autor, nos países desenvolvidos, os sistemas de climatização representam cerca da metade do consumo de energia em edificações e um quinto do total nacional.

O perfil de consumo das edificações brasileiras apresentado a seguir é baseado nos dados do relatório Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil, publicado pelo PROCEL [2007], referente a dados coletados no ano de 2005. Este estudo se baseou em informações sobre a posse de equipamentos, e hábitos de uso, relativas aos seguintes setores: residencial, comercial e público.

No Brasil, o consumo energético residencial tem, em média, o seguinte perfil: 24% referente ao aquecimento de água, 22%, à conservação de alimentos, 20%, ao condicionamento ambiental, 14%,

<sup>8</sup>Energy Information Administration (EIA) é uma agência vinculada ao Departamento de Energia dos EUA, cuja missão é prover dados, previsões e análises acerca do consumo de energia e sua interação com a Economia e o Meio-Ambiente.

à iluminação e o restante aos demais aparelhos eletrodomésticos.

Nos setores comercial e público, os subsistemas que mais contribuem para o gasto energético são: o de climatização do ar, que representa cerca de 50%<sup>9</sup> do total, e o de iluminação que representa cerca de 25%<sup>10</sup> do total.

Ainda segundo PROCEL [2007] o condicionamento do ar é realizado por meio de ventilação e exaustão em 33% dos edifícios comerciais e em 36% dos prédios públicos. As demais instalações são aclimatadas por equipamentos condicionadores de ar. Em relação ao sistema de iluminação, PROCEL [2007] relata que os ambientes internos são iluminados por lâmpadas fluorescentes tubulares (73% nas instalações comerciais e 88% nas públicas). Nas áreas externas dos edifícios comerciais, 28% das lâmpadas existentes são fluorescentes tubulares, 14% são de vapor de sódio e 13% são mistas. Nos prédios públicos, estas áreas são iluminadas por: lâmpadas mistas (24%), vapor de sódio (25%), fluorescentes tubulares (13%) e vapor de mercúrio (11%), sendo o restante composto por outros tipos de lâmpadas.

Além de caracterizar o gasto energético de edifícios em termos dos respectivos equipamentos consumidores, o supracitado relatório fundamentou-se em questionários aplicados aos usuários de instalações não residenciais. Em meio às questões propostas, uma perguntava quais seriam as maiores prioridades da instalação. Os usuários poderiam escolher dois itens, dentre os quais estavam, por exemplo, ampliação, reforma e troca de equipamentos. Ao responder a esta pergunta, 52% das pessoas em prédios públicos e 65% em edificações comerciais, escolheram a melhoria da eficiência energética. Entretanto, ao serem questionados se existia a possibilidade de redução no consumo sem afetar o nível de conforto, 34% dos usuários não souberam responder à pergunta. Dentre os que responderam, 21% nos prédios públicos e 40% nas empresas, não acreditaram que seria possível. A dificuldade apresentada pelos usuários de apontarem medidas de racionalização do consumo, pode ser um indicador de que a conscientização não é necessariamente traduzida em uso racional.

### **O uso de energia e o usuário**

A dinâmica existente entre o usuário e o consumo de energia elétrica é tema de estudos há diversas décadas. Pesquisadores da área de psicologia social contribuem, desde o final dos anos 70,

<sup>9</sup>Especificamente 47% no setor comercial e 48% no setor público.

<sup>10</sup>Especificamente 22% no setor comercial e 23% no setor público.

a ampliar o enfoque predominantemente tecnológico dos programas de conservação de energia. A conscientização da necessidade de uma abordagem holística sob esta temática surgiu do fracasso das políticas energéticas adotadas até então, no que se diz respeito à conscientização dos consumidores [Stern, 1992; Owens e Driffill, 2008].

O insucesso das campanhas de promoção da conservação de energia é atribuído ao fato destas serem embasadas em duas teorias de comportamento conservacionistas: o modelo de mudança atitudinal e o modelo econômico-racional. O primeiro modelo considera que a adoção de medidas de conservação é consequência direta de atitudes favoráveis à conservação de energia. Ou seja, que poderiam ser alcançadas por meio de campanhas publicitárias de massa. Já o modelo econômico-racional assume que os consumidores adotarão tais medidas caso elas sejam economicamente vantajosas.

A diversidade de fatores que influenciam o uso de energia pode ser vislumbrada nos trabalhos de [Lutzenhiser, 1993; Al-mumin et al., 2003; Druckman e Jackson, 2008; Brohmann et al., 2009]. Estes trabalhos relacionam o consumo energético com diversos fatores sócioeconômicos e demográficos. Brohmann et al. [2009] apresenta um resumo de diversos trabalhos empíricos realizados no âmbito residencial com o objetivo de identificar os fatores determinantes para a adoção de medidas de consumo sustentável. Segundo os autores, os trabalhos analisados sugerem uma possível correlação positiva entre uma maior pré-disposição ao consumo racional e: renda, grau de escolaridade, valor da tarifa de energia e número de moradores. Em relação às campanhas informativas, estudos sugerem que estas são mais efetivas quanto maior a credibilidade e quantidade de fontes.

Entre as diversas variáveis que determinam o comportamento dos usuários, uma merece destaque: suas condições de conforto. Estas são influenciadas por diversas variáveis como: temperatura, umidade, velocidade e qualidade do ar; odores; ruídos; nível e variações de luminosidade; características da fonte luminosa; cores do teto, piso, parede e mobiliário; e suas características ergonômicas, entre diversos outros. Apesar do grande número de fatores citados, os estudos voltados para a eficiência energética costumam considerar o conforto como determinado por três fatores principais: o conforto visual - referente ao desempenho lumínico, o conforto térmico, e a qualidade do ar interno - referentes ao desempenho térmico [Dounis e Caraiscos, 2009].

Segundo Martiskainen [2007] o comportamento humano é uma combinação complexa de hábitos, emoções, valores e de fatores sociais. Desta forma, a escolha de quais as medidas a serem tomadas para se atingir uma mudança comportamental no sentido de consumo racional de energia, não é

uma tarefa fácil. Segundo a autora, a adoção de atitudes energeticamente eficientes é mais provável quando: (1) estas novas atitudes são fáceis de serem realizadas, (2) não é necessário dispor de recursos, (3) vizinhos e amigos adotem as mesmas medidas, (4) são realizados compromissos públicos de mudança de atitude.

Martiskainen [2007] apresenta as seguintes medidas como meio de influenciar e modificar a forma com que a energia é consumida, promovendo um uso mais racional:

- Campanhas comportamentais: estudos mostraram que estas medidas não são capazes de modificar o consumo. Entretanto, combinadas com outros métodos como, por exemplo, o fornecimento de dados de *feedback* no modo com que a energia está sendo utilizada, podem contribuir para modificações comportamentais.
- Auditorias energéticas: as auditorias são capazes de promover algumas modificações comportamentais por fornecerem informações mais detalhadas e recomendações específicas para a instalação. Para serem efetivas, estas recomendações devem ser simples, claras e objetivas.
- *Feedback*: diversos estudos analisaram os ganhos alcançados com um maior fornecimento de dados de consumo. Pesquisas sugerem que medidas de *feedback* instantâneas, com o uso, por exemplo, de displays que mostrem o consumo energético corrente de equipamentos podem resultar em economias de 5-15% neste consumo [Martiskainen, 2007]. Já *feedbacks* indiretos proporcionam economias de 0-10% [Martiskainen, 2007]. Esta medida, apesar de muito efetiva, possui caráter provisório, visto que seu efeito é geralmente perdido ao parar de prover informações aos usuários.
- Gratificação e incentivos: o uso de incentivos econômicos pode ser efetivo, se bem planejados. Esta medida, assim como o *feedback* só são efetivas quando estão em curso.
- Influências Sociais: diversas medidas de cunho social podem ser tomadas, como por exemplo: *eco-teams*, compromisso e *marketing* social.

A complexidade dos fatores que determinam o modo com que a energia é consumida é alta, conforme apresentado nesta seção. Não é possível determinar o desempenho energético de uma edificação com relação ao uso de energia, a menos que elas sejam dotadas de sistemas automáticos. Estes sistemas permitem a implementação de regras para o acionamento de equipamentos que podem ser

focadas tanto na melhora do desempenho energético, quanto na satisfação dos usuários. As técnicas e os sistemas de automação predial serão discutidos na seção 2.1.2.

### **Análise do desempenho energético**

De maneira geral, as métricas encontradas na literatura para a análise do desempenho energético utilizam um ou mais dos seguintes procedimentos: (1) cálculo do consumo de energia baseado em dados coletados a partir de levantamentos de campo, (2) estimação do desempenho a partir de contas de energia, (3) medições de consumo realizadas continuamente ou em intervalos de tempo específicos.

O primeiro procedimento listado utiliza, para o cálculo dos indicadores de uso, dados colhidos em campo. Dentre os indicadores, mais utilizados estão: potência instalada por uso final, por setor ou por número de funcionários. Estes indicadores auxiliam a identificação de possíveis ganhos com medidas de *retrofit*. Exemplos de indicadores adequados para edificações educacionais, como a utilizada no estudo de caso deste trabalho, são potência instalada por metro quadrado de salas de aula e potência instalada por alunos ou professores. Estes índices são capazes de gerar diagnósticos preliminares, eles no entanto, possuem grande sensibilidade em relação às estimações realizadas durante o levantamento de campo [Ghiaus, 2006]. É necessário, portanto, que a coleta de dados seja realizada por meio de uma auditoria criteriosa da instalação. No entanto, mesmo com o levantamento criterioso de dados, estes índices não refletem a maneira com que a edificação é utilizada. Uma instalação com sistemas de iluminação ineficientes em termos energéticos pode ser, por exemplo, operada de maneira que seu desempenho energético seja superior ao de outra cujos equipamentos sejam mais eficientes. Isto pode ocorrer se, por exemplo, na segunda edificação, lâmpadas permaneçam acessas por longos períodos sem que os respectivos ambientes estejam ocupados e o mesmo não ocorra no primeiro edifício.

A estimação do desempenho a partir de contas de energia consiste na simples normalização do consumo em relação a uma, ou mais, variáveis de influência. Os índices derivados deste método são inerentemente insensíveis à dinâmicas menores que o período de medição das contas de energia, que é de cerca de 4 semanas. Dentre os índices mais comumente utilizados Landman e Haberl [1996] citam:

- Fator de Carga: indicado na própria conta de energia, mostra como a eletricidade é utilizada, no que se diz respeito à demanda de potência. É calculado como o quociente entre a demanda

média e a demanda máxima de uma unidade consumidora ocorridas no mesmo intervalo de tempo.

- Fator de Potência: relação entre a potência ativa e a potência aparente ou total consumida pela unidade consumidora.
- Fator de Ocupação: relação entre o número de horas que a edificação passou ocupada durante o período de medição da conta de energia e o número total de horas no período compreendido na conta de energia.
- Consumo por unidade de área construída da instalação e por número ou tipo de usuários.

Segundo Ghiaus [2006] o índice de desempenho mais utilizado na prática é o de consumo energético por unidade de área. Este não leva em consideração outras variáveis de influência como as características construtivas ou as condições de conforto e de operação da instalação. Ainda segundo o autor, análises estatísticas aplicadas ao consumo indicado pelas contas de energia, mostram que o consumo pode ser predito com 90% de confiança somente pela temperatura externa.

O método baseado em medições de consumo, realizadas continuamente ou em intervalos de tempo específicos, utiliza procedimentos de identificação de parâmetros para modelar o desempenho. Segundo Ghiaus [2006], um importante problema associado a este método é que dados amostrados em curtos intervalos de tempo podem ser menos correlacionados devido à influência de distúrbios aleatórios como ocupação e fluxos de ar. Estes distúrbios não possuem uma distribuição gaussiana, o que deve ser considerado ao estimar os parâmetros do modelo de desempenho da edificação.

Diversos trabalhos foram publicados sob a temática de análise do desempenho energético de edificações. Dimoudi e Kostarela [2009] analisa o desempenho energético de edificações escolares, aponta possíveis medidas para o *retrofit*<sup>11</sup> destas e os respectivos potenciais de redução do consumo energético, baseado em resultados de simulações computacionais. Um método para a determinação *offline* do desempenho energético de edificações escolares é apresentado por [Santamouris et al., 2007]. Dados coletados em 320 escolas na Grécia são utilizados para classificar o desempenho energético de acordo com um método baseado em técnicas fuzzy. Jota et al. [2007b] apresenta uma análise do desempenho energético do sistema de ar condicionado de uma edificação pública brasileira. Os autores apresentam um estudo do consumo em modo de espera do sistema de condicionamento do ar,

<sup>11</sup>Pode ser entendido por *retrofit* a prática de reformar/reprojetar equipamentos, máquinas ou sistemas com o objetivo de obter melhorias em seu desempenho.

explicitando sua influência na eficiência do sistema. Larsen et al. [2008] utilizou dados de condições meteorológicas (velocidade e direção do vento, temperatura externa e irradiação solar) e da temperatura interna coletados durante uma semana, para caracterizar o comportamento térmico de uma edificação e validar uma ferramenta computacional. Doukas et al. [2009] apresenta um método que utiliza dados de consumo energético de edificações combinados a dados operativos e a dados climáticos para o cálculo de índices. Estes índices são comparados com valores padrões para a identificação de medidas de intervenção a serem tomadas para o aumento da eficiência energética da edificação. Esta análise é então associada a dados econômicos coletados de um banco de dados externo para avaliar a viabilidade econômica das medidas de intervenção identificadas.

Os diversos trabalhos publicados sob a temática de análise do desempenho energético de edificações propõem diferentes soluções metodológicas, métricas e índices de desempenho para edifícios [Rey et al., 2007]. Dentre as diversas metodologias existentes duas serão destacadas a seguir: (1) a de auditoria energética e a proposta pelo Regulamento Técnico da Qualidade (RTQ) para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos.

### **Auditoria energética**

Existem, conforme apresentado, diversas métricas para a análise de desempenho energético de edificações. Estas métricas são frequentemente aplicadas dentro da metodologia de auditoria energética. O objetivo desta prática é o de caracterizar as condições de utilização de energia, com o objetivo de determinar possíveis oportunidades de racionalização dos consumos.

As auditorias energéticas são usualmente categorizadas em: auditoria *walk-through*; auditoria de custos de serviços (*utility cost*), auditoria padrão e auditoria detalhada [Karti, 2000; Thumann e Younger, 2003]. A auditoria *walk-through* consiste em um diagnóstico da instalação, efetuado com base em uma visita rápida à instalação. O auditor verifica os principais fluxos de energia, processos, formas de operar, preços de energia e principais equipamentos consumidores, com o intuito de produzir um relatório com identificação de áreas de oportunidade. É também chamada de medidas de operação e manutenção<sup>12</sup>.

O principal objetivo das auditorias de custos de serviços é a análise criteriosa dos custos operacionais da edificação. É recomendável, para exercê-la, realizar anteriormente a auditoria de *walk-*

<sup>12</sup>*Operating and maintenance (O&M) measures.*

*through*. De maneira geral esta auditoria pode determinar se é vantajosa, sob o ponto de vista econômico, a adoção de medidas de *retrofit*.

A auditoria padrão provê uma análise global dos sistemas energéticos existentes. Ferramentas simples de análise são utilizadas para desenvolver modelos - geralmente por meio de regressão linear - e para prever os ganhos a serem obtidos com medidas de eficiência. Análises de *payback* são usualmente utilizadas para determinar o custo/benefício de medidas de conservação.

A auditoria detalhada é o método mais abrangente de auditoria. Inclui o uso de instrumentos para a medição do consumo global e/ou específico - a determinados sistemas ou equipamentos - de energia. As medições podem ser realizadas com o uso de equipamentos portáteis durante uma visita à instalação, ou por meio de sistemas de aquisição de dados. Programas de simulação são frequentemente utilizados para comparar e avaliar o consumo das edificações. Neste tipo de auditoria, as análises econômicas realizadas são mais rigorosas.

As auditorias propostas na literatura se caracterizam, de modo geral, por serem práticas realizadas durante períodos de tempo determinados e voltadas para comparações de performance antes e após a aplicação de medidas de *retrofit*. A auditoria pode ser relacionada com as etapas de qualificação<sup>13</sup> realizadas durante um processo de validação (capítulo 3).

### **Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos**

A regulamentação brasileira que aborda o tema do desempenho energético de edificações é o Regulamento Técnico da Qualidade (RTQ) para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos lançada em 2009. O texto do regulamento é dividido em quatro volumes. O volume 1 contém um texto de apresentação do processo, o volume 2 apresenta o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C), o volume 3, o Regulamento de Avaliação da Conformidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RAC-C) e o volume 4 apresenta o manual referente ao RTQ-C e RAC-C.

A regulamentação estabelece metodologias a serem aplicadas na aferição do consumo energético dos sistemas de iluminação, condicionamento de ar e de desempenho térmico da envoltória (fachadas

<sup>13</sup>Também denominadas de auditoria ou pré-validação.

e cobertura). Estas três categorias serão classificadas em níveis de eficiência, que variam de A (mais eficiente) a E (menos eficiente). A classificação geral do edifício é obtida através da média ponderada da classificação obtida no sistema de iluminação (peso de 30%), na envoltória (peso de 30%) e no sistema de condicionamento de ar (peso de 40%).

A adoção de soluções que promovam a eficiência energética nos demais sistemas da edificação, não computados na regulamentação, poderá elevar o índice de eficiência da edificação. Dentre as possíveis soluções de racionalização de consumo, que comprovadamente aumentam a eficiência energética da edificação, são citadas na proposta de regulamentação:

- Uso racional da água por meio de economizadores de torneira do uso de sanitários com sensores e do aproveitamento de água pluvial;
- Uso de fontes alternativas de energia, como aquecimento solar de água, painéis fotovoltaicos e gás natural;
- Sistemas de cogeração.

Para ser elegível à etiquetagem a edificação deve possuir circuito elétrico dividido por sistema de uso final, exceto no caso de hotéis com desligamento automático para quartos e das edificações com múltiplas unidades autônomas de consumo. Outros requisitos mínimos necessários a uma classificação máxima de eficiência são a utilização de:

- Fontes alternativas de energia para o aquecimento de água, caso exista demanda. Dentre as fontes energéticas aceitáveis estão as que utilizam bomba de calor, aquecimento por reuso de calor; aquecimento solar com coletor e reservatório térmico, e aquecedores a gás com máxima classificação de eficiência pelo PBE.
- Controle inteligente de tráfego para elevadores, caso exista mais de um elevador com mesma finalidade e em um mesmo hall.
- Bombas de água centrífugas, quando existentes, classificadas com o índice máximo pelo PBE.

### **Iluminação**

A metodologia descrita pela regulamentação determina o cálculo do índice de eficiência no sistema de iluminação de acordo com a densidade de potência instalada por metro quadrado, com o nível

de iluminância de projeto e com os tipos de controle existentes no sistema de iluminação. Para ser elegível à classificação, todos ambientes existentes devem possuir níveis de luminosidade de acordo com a norma brasileira de Iluminância de Interiores (NBR 5413). O nível de eficiência da edificação (A, B, C, D e E) é determinado de acordo com a densidade de potência instalada no sistema de iluminação e com os critérios de controle existentes.

A densidade de potência instalada é calculada para cada ambiente separadamente e confrontada com os limites máximos aceitáveis para cada nível de eficiência. Os valores de eficiência encontrados para cada ambiente são ponderados, com suas respectivas áreas, para estimar o equivalente numérico final do sistema de iluminação e, portanto, o nível de eficiência do sistema de iluminação do edifício. Entretanto, para ser classificada em um determinado nível de eficiência, a edificação deve ainda satisfazer todos os pré-requisitos de controle do nível em questão. Os critérios de controle são:

- Divisão de Circuitos (níveis A, B e C): a instalação deve possuir dispositivos de controle manual para o acionamento independente da iluminação interna em cada ambiente.
- Contribuição da luz natural (níveis A e B): a instalação deve possuir controle manual ou automático para o acionamento da fileira de luminária mais próxima à janela, no caso de ambientes com janela voltada para o exterior, ou para pátio coberto, ou, ainda, para pátio de cobertura translúcida com mais de uma fileira de luminárias paralelas à janela.
- Desligamento automático do sistema de iluminação (nível A): a instalação deve possuir, em ambientes maiores que  $250 m^2$ , controle automático para desligamento da iluminação. Este controle pode ser horário, ou acionado por um sinal de controle indicando que a área está desocupada.

### **Sistema de Aquecimento e Resfriamento de Ar**

A regulamentação determina que a adequação do sistema de climatização às necessidades do ambiente deve ser comprovada pelo cálculo das cargas térmicas do sistema de aquecimento e de resfriamento de ar, de acordo com normas e manuais de engenharia de comprovada aceitação nacional ou internacional.

Em sistemas que possuem eficiência reconhecida pelo PBE, a eficiência do sistema será a determinada pelo próprio PBE. No caso dos sistemas de condicionamento de ar não regulamentados, bem como seus sistemas de resfriamento de líquido, condensadores e torres de arrefecimento, a classificação será determinada de acordo com requisitos mínimos de eficiência energética.

A regulamentação estabelece ainda que todo o sistema de condicionamento de ar deve ser equipado com sistemas que controlem automaticamente seu acionamento. O nível de controle exigido é tão mais sofisticado quanto maior for a edificação. Estabelece-se que, para ser etiquetada, uma edificação deve possuir, em seu sistema de condicionamento de ar, ao menos um dos seguintes tipos de controle:

- Controles que podem acionar e desativar o sistema sob diferentes condições de rotina de operação, para sete tipos de dias diferentes por semana, incluindo um controle manual que permita a operação temporária do sistema por até duas horas.
- Sensor de ocupação que seja capaz de desligar o sistema, quando nenhum ocupante é detectado por um período de até 30 minutos.
- Temporizador de acionamento manual, capaz de ser ajustado para operar o sistema por até duas horas.
- Integração com o sistema de segurança e alarmes da edificação, de forma a desligar o sistema de condicionamento de ar, quando o sistema de segurança for ativado.

### **Envoltória**

A regulamentação descreve uma metodologia para classificar a eficiência da envoltória baseada em um indicador de consumo, obtido por meio de uma equação desenvolvida a partir da determinação da zona bioclimática em que a edificação se encontra e de acordo com área de projeção dos edifícios.

#### **2.1.2 Sistemas de automação e controle de edificações**

O desempenho das edificações, conforme discutido nas seções anteriores, depende de diversos fatores. Dentre eles estão o modo de uso, operação manutenção e gestão da edificação. Assim sendo, o desempenho térmico, lumínico e energético de uma edificação só pode ser previsto se existirem meios de garantir que a edificação será utilizada de uma determinada maneira. Esta garantia pode ser obtida com o emprego de sistemas de automação e controle.

Uma lógica de automação que implemente estratégias de uso racional de insumos tem potencial impactante no desempenho térmico, lumínico e energético da instalação. Isto, pois, permite que os

equipamentos consumidores de energia - em especial os do sistemas de climatização e de iluminação - sejam acionados de acordo com restrições do ambiente, condições climáticas e definições gerenciais.

Além do acionamento automático de sistemas, a automação permite prover continuamente dados de tensão, corrente, demanda energética e qualidade de energia, entre outros. A metodologia a ser proposta nesta tese consiste na análise contínua dos dados energéticos e ambientais provenientes dos sistemas de automação. A partir desta análise, as técnicas de Validação permitem determinar o comportamento do perfil de consumo da edificação, e os possíveis padrões de comportamento. A caracterização pormenorizada das reais demandas de um determinado ambiente/edificação, quando escrutinadas adequadamente, podem, ainda, sinalizar necessidades de intervenções que resultem em uma melhora de desempenho.

Dada a sua importância para o desempenho das edificações os sistemas de controle automático de edificações serão apresentados a seguir.

A natureza exata do que sejam os sistemas de automação e controle dedicados à edificações, comumente denominados de Sistemas de Automação de Edificações (SAE), não é de fácil definição. Para Carter Myers os SAE viabilizam satisfazer as necessidades e vontades dos usuários resultando em um ambiente mais produtivo e flexível. Para melhor representar uma arquitetura de um SAE, pode-se dividi-lo em níveis, conforme mostra a figura 2.1.2.

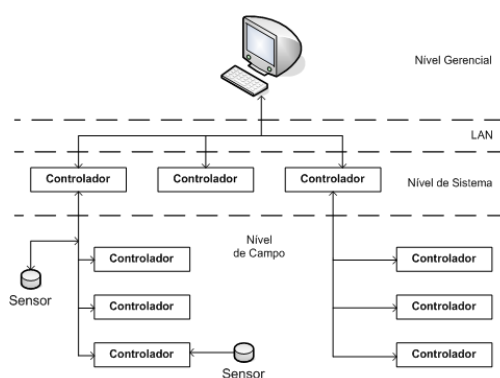


Figura 2.4: Arquitetura dos SAE

O nível Gerencial é responsável pela supervisão, sendo constituído por microprocessadores dotados de um software supervisor, que realiza o monitoramento e a gestão de todas as funções vitais do edifício. Logo abaixo deste, está o nível de Sistema, que é composto por controladores, interligados entre si, responsáveis, cada um, por um determinado setor. Dependendo do grau de sofisticação

necessário este nível pode ou não existir. O terceiro patamar, denominado nível de Controle, é composto por controladores de pequeno porte, utilizados para comandar os sistemas da instalação, como o de iluminação, o de ventilação e o de condicionamento de ar, por exemplo. No nível inferior, o de Campo, estão sensores e dispositivos de medição.

Esta organização hierárquica é herdada dos sistemas de automação industrial, que estruturam a sua arquitetura desde o chamado “chão de fábrica” até os níveis superiores de automação, voltados para a gestão da produção e a gestão do negócio [Johnsson, 2004; Filho, 2000].

Nas próximas seções os sistemas de automação serão analisados de acordo com os subsistemas a que são aplicados e com estratégias de controle que considerem o desempenho energético das edificações.

### **Sistema de iluminação**

Diversas são as estratégias de controle passíveis de serem aplicadas nos sistemas de iluminação para promover melhoras no desempenho energético das edificações. O uso dos sensores de presença, por exemplo, viabiliza reduções no consumo, visto que impedem que circuitos permaneçam acionados em ambientes não ocupados.

Outra estratégia é a de aproveitar a luz solar como fonte secundária de luminosidade. A integração entre a luminosidade natural e a artificial, é realizada com o auxílio de sensores de intensidade luminosa. Estes, indicam a fração de luminosidade artificial necessária para manter as condições de conforto visual no ambiente. Os possíveis ganhos com a adoção de estratégias elaboradas de controle aplicadas ao sistema de iluminação é mostrada por Silva et al. [2009]. Os autores utilizam redes neurais para a obtenção da luminosidade mínima recomendada pela NBR 5413 mantendo: (1) o máximo aproveitamento de luz solar e (2) a manutenção da variação de luminosidade dentro dos níveis adequados.

A preocupação com o desempenho do sistema em termos do conforto dos usuários é mostrada em Lah et al. [2006]. O estudo apresenta uma estratégia de controle em cascata para controlar um estore posicionado defronte a uma janela. O estore é utilizado visando um aproveitamento máximo da iluminação natural, prevenindo o ofuscamento causado pela incidência de luminosidade solar. O uso da iluminação natural, entretanto, deve ter sua adoção cuidadosamente analisada. A incidência de luz

solar acarreta em ganhos térmicos para os ambientes, o que pode ser um problema para edificações localizadas em climas quentes. Deve-se portanto quantificar o aumento de consumo ocorrido no sistema de condicionamento de ar e a redução trazida pela luminosidade solar.

### Sistemas de climatização

Diversas são as estratégias de controle voltadas para a eficiência energética passíveis de serem aplicadas nos sistemas de climatização. Exemplos são o acionamento de cargas por meio de algoritmos de controle baseados em variáveis como ocupação, horário e condições ambientais, e estados de portas e janelas (abertas / fechadas). Sistemas de climatização são, muitas vezes, compostos apenas por aparelhos ventiladores, comumente controlados por meio de comandos do tipo liga e desliga, que podem ser utilizados em estratégias de controle semelhantes às descritas para o sistema de iluminação.

Quando são dotados de equipamentos de condicionamento do ar, estes sistemas podem ser capazes de controlar as condições de conforto ambiental (umidade, temperatura e nível de  $CO_2$ ), além de manter níveis seguros de contaminantes no ar interno nas edificações. Normalmente, este controle é realizado de acordo com a diferença entre os valores de temperatura, umidade e pressão medidos no ambiente e aqueles pré-estabelecidos para essas variáveis.

Os primeiros sistemas de controle em malha fechada a serem aplicados em edifícios objetivavam o controle da temperatura do ar interno à edificação. O controle implementado, tipo liga-desliga do sistema de climatização, ou HVAC (*Heating, Ventilating and Air Conditioning*), era realizado a partir da leitura de um único termostato. Não existia ainda, entretanto, preocupação com a presença de *overshoots* no valor da variável controlada, fato que ocasionava um consumo desnecessário de energia [Levermore, 2007].

A crise de energia ocorrida no início da década de 70 e a conseqüente preocupação em eficiência energética impulsionou a adoção de estratégias de controle mais sofisticadas. Diversos trabalhos publicados abordam a adoção de estratégias adaptativas para o controle de sistemas de HVAC<sup>14</sup>. Seem [1998] propõe e implementa, nos sistemas de HVAC de diversas edificações, um controlador proporcional-integral adaptativo. Os controladores adaptativos se mostram adequados para o controle de edificações visto que possuem a capacidade de se adaptarem à natureza não-linear dos dados e às mudanças de perímetros inerentes aos sistemas prediais. Entretanto, poucos trabalhos foram

---

<sup>14</sup>Ver Nesler [1986].

realizados utilizando técnicas adaptativas para a aprendizagem do comportamento característico de edificações [Dounis et al., 1995].

Na década de 90, o aumento da preocupação com o compromisso entre o consumo de energia e o conforto do usuário, faz com que este último apareça como variável controlada nos sistemas de controle. Para que isto seja possível, índices de conforto, como o *Predictive Mean Vote* passam a ser analisados como sinais mensuráveis e controláveis.

O uso do *Predictive Mean Vote*, em estratégias de controle baseadas em modelo, pode ser visto em [Kolokotsa et al., 2001]. O autor apresenta um sistema capaz de prever as condições ambientais. A partir desta previsão, o sistema seleciona as ações mais apropriadas para minimizar o consumo energético mantendo níveis de conforto adequados. Outro exemplo é o uso do *Predictive Mean Vote* como parte da função custo utilizada para gerar uma lei de controle de conforto térmico baseado nos fundamentos do controle preditivo baseado em modelo [Freire et al., 2008].

O uso dos controladores citados acima é dificultado por diversos fatores, como: (1) a necessidade de um modelo da edificação, (2) a necessidade de realizar estimações em tempo real devido à sensibilidade destes controladores ao ruído, (3) o fato de não lidarem com a questão do conforto, (4) o fato dos sistemas de controle resultantes não serem amigáveis ao uso [Dounis e Caraiscos, 2009].

Técnicas de controle baseadas em inteligência artificial passam a ser aplicadas em edificações a partir da década de 90. Diversos trabalhos foram publicados utilizando técnicas fuzzy para controlar edificações considerando o uso racional de energia, as condições de conforto necessárias e as preferências dos usuários. O desenvolvimento de controladores fuzzy para controle de conforto térmico, conforto visual, e ventilação natural, com o controle combinado desses subsistemas tem levado a resultados notáveis Dounis e Caraiscos [2009] aplicam um algoritmo de controle ao sistema de HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) que combina redes neurais, sistemas fuzzy e de controle preditivo para prever os parâmetros meteorológicos e o número de ocupantes na edificação. Estas previsões são então utilizadas para estimar o desempenho do edifício, a fim de reduzir o consumo de energia e manter as condições de conforto.

Conforme ilustrado, existe um grande número de pesquisas dedicadas à utilização de estratégias de controle sofisticadas para redução do consumo energético e a manutenção de níveis de conforto em edificações. Entretanto, a aplicação destes sistemas ainda permanece em âmbito acadêmico. Mesmo assim, poucos trabalhos aplicam as estratégias apresentadas em sistemas reais. Exemplos de trabalhos

aplicados em edificações reais, que apresentam os ganhos, em termos de economia de energia, obtidos com a adoção das estratégias de controle apresentada são: Atthajariyakul e Leephakpreeda [2004]; Loveday et al. [1997]; Alcalá [2003]; Lin et al. [2002]. Atthajariyakul e Leephakpreeda [2004] obtiveram a redução da carga do sistema de climatização a 17,5% da energia consumida com o uso de estratégias de controle e otimização. Loveday et al. [1997] alcançou reduções de cerca de 10% no consumo de energia com a adoção de estratégias de controle preditivas. Lin et al. [2002] obteve, com o uso de um controlador MISO (múltiplas entradas e única saída), uma economia de energia de 4 a 17%. Alcalá [2003] alcançou economia de 30% ao aplicar um algoritmo de controle MIMO (múltiplas entradas, múltiplas saídas).

### **Sistema de gestão energética**

O objetivo dos sistemas de gestão energética é, segundo Doukas et al. [2009], a realização de uma auditoria contínua, sistemática e organizada no consumo energético de uma determinada instalação. Esta auditoria deve ser focada na otimização do custo da energia em relação às demandas energéticas, características dos usuários, oportunidades de investimentos e reduções nas emissões de poluentes.

Os sistemas de gestão de energia dedicados às edificações, denominados internacionalmente de *Building Energy Management Systems (BEMS)*<sup>15</sup>, surgiram no início da década se 70, e inicialmente não se diferenciavam dos SAE. Desde então, com os avanços dos sistemas microprocessados e das redes de comunicação, os BEMS se tornaram parte estabelecida dos grandes edifícios comerciais dos países desenvolvidos [Levermore, 2007]. No caso brasileiro, entretanto, a situação é diferente, apesar do crescimento apresentado nos últimos anos, do mercado dos SAE, estes são usualmente empregados em sistemas de entretenimento e conforto. Os poucos sistemas em uso, denominados de gestão energética, se limitam à realizarem o controle de demanda, impedindo que esta ultrapasse o valor contratado com a empresa fornecedora de energia elétrica.

Apesar de estarem presentes em uma parte significativa dos grandes edifícios comerciais nos países desenvolvidos, os BEMS, não são operados de modo a promover efetivamente a eficiência energética. Segundo Levermore [2007]; Doukas et al. [2009], a maioria dos BEMS existentes simplesmente armazenam dados operacionais de edificações, sem realizarem qualquer tipo de processamento ou análise destes dados. Não são, portanto, utilizados para a determinação de medidas passíveis de

<sup>15</sup>Outras denominações comuns, segundo Levermore [2007], são: *Building Management Systems (BMS)* e *Energy Management Systems (EMS)*

promover reduções no consumo de energia. Esta realidade é comprovada por diversos autores que apontam potenciais significativos de conservação de energia em edificações já dotadas de BEMS. Kumar et al. [2001] levanta um potencial de 20 a 30% de economia de energia com a efetiva prática de gestão energética. Estes ganhos podem ser potencializados pela má condição em que os BEMS se encontram. Augenbroe et al. [2009] realizou uma análise em 60 edificações comerciais dotadas de sistemas de gestão energética. O autor levantou que mais de 50% dos edifícios apresentavam problemas em seus sistemas de controle. Entre estes, 40% possuíam problemas nos sistemas de HVAC, 30% possuíam problemas com medições de sensores, 25% problemas no sistema de gestão energética e os demais 5% possuíam equipamentos faltantes.

Para uma efetiva gestão energética é necessário coletar continuamente os dados energéticos e analisá-los de maneira adequada. A complexidade dos sistemas de monitoramento depende do número de pontos de medida, do método de medição e da frequência de amostragem. De acordo com o DETR [2008], para os propósitos de gestão energética não é necessária uma excessiva acurácia no valor dos dados coletados. É importante, entretanto, que os dados sejam confiáveis e que tenham repetibilidade. Além destes fatores, a frequência de coleta de dados é de extrema importância, conforme aponta [Wright e Firth, 2007]. Os autores comparam os efeitos do uso de diferentes intervalos de amostragem - 1, 5, 15 e 30 minutos - na análise dos dados de consumo de edificações residenciais. Dados amostrados com maiores intervalos de amostragem falham em indicar informações de grande interesse aos sistemas de gestão energética. A partir dos dados apresentados verifica-se que o intervalo de amostragem possui um efeito significativo nas características estatísticas básicas dos dados. Segundo os autores, o uso de intervalos de 1 ou 2 minutos são necessários para capturar os detalhes mais finos do padrão de consumo. Apesar de sua importância, poucos trabalhos encontrados apresentaram dados coletados com estes intervalos de amostragem. Os intervalos mais frequentemente encontrados são de 15 minutos e 1 hora.

Além da frequência com que são amostrados, é necessário também, para a boa prática da gestão energética, contrastar os dados de consumo com algumas de suas variáveis de influência. Esta análise comparativa ajuda a entender a dinâmica do consumo. Esta necessidade pode ser vista em [Firth et al., 2008]. Os autores apresentam um estudo realizado a partir de dados de consumo global monitorados com um intervalo de amostragem de 5 minutos durante 2 anos em 72 residências com características construtivas similares e localizadas na mesma área. O estudo analisou as diferenças no consumo de eletricidade entre as residências e apontou uma grande variabilidade no consumo de energia entre

as instalações. Os autores, no entanto, não conseguiram identificar, a partir dos dados coletados, as causas para esta variabilidade.

DETR [2008] apresenta as seguintes técnicas passíveis de serem aplicadas para a análise dos dados de consumo energético de edificações<sup>16</sup>:

- Indicadores de Desempenho: utiliza índices derivados do consumo de energia para realizar análises comparativas entre edificações.
- Comparações Históricas: utiliza comparações entre o consumo atual durante um período e o consumo ocorrido em períodos similares no passado.
- Linhas de Tendência: utiliza a visualização gráfica do uso de energia em função do tempo.
- Padrões Cíclicos de Consumo: utiliza comparações entre o consumo atual e o passado em função da sazonalidade existente nos dados.
- Linearização e Análises de Correlação: utiliza a linearização para definir o modelo matemático que descreve a relação entre a energia consumida e uma variável de influência.
- Análise de Variância: utiliza a discrepância existente entre o valor esperado para o consumo e o que foi efetivamente medido.
- Monitoramento: utilizam a coleta contínua de dados de modo a aplicar ferramentas estatísticas para a identificação de variações no modo com que a energia é utilizada. Exemplos são encontrados em [Puranik, 2007; Stuart et al., 2007; Swords et al., 2008]. Os autores usam análise de soma cumulativa (CuSum)<sup>17</sup> para monitorar como o consumo de eletricidade se modifica ao longo do tempo em relação aos seus valores históricos. Seem [2005] apresenta uma metodologia mais sofisticada, que consiste em agregar o consumo em dias com padrões similares e então aplicar CuSum para identificar modificações nestes parâmetros.

Os dados provenientes das análises de dados fornecem informações sobre a dinâmica do consumo de energia. Elas permitem comparar o desempenho energético com o de outras edificações por meio do uso de índices de desempenho representativos da edificação. Além de possibilitarem a identificação de possibilidades de ganhos com a troca de equipamentos mais eficientes em termos energéticos.

<sup>16</sup>Para exemplos de aplicações das técnicas descritas ver [DETR, 1988, 1998].

<sup>17</sup>A ser discutida em sessões seguintes.

### 2.1.3 Programas de simulação computacional

Programas de simulação do desempenho térmico energético de edificações são ferramentas poderosas na avaliação do conforto térmico e do desempenho energético de edificações. Existem mais de 290 programas de simulação listados no Building Energy Tools Directory<sup>18</sup>. As ferramentas existentes se baseiam em equações, princípios e pressupostos da termodinâmica de modo a emular os processos térmicos e energéticos que ocorrem nas edificações. Estes processos são complexos e não são totalmente compreendidos até hoje [Maile et al., 2007]. Os dados de entrada destas ferramentas de software consistem basicamente na geometria da edificação, materiais construtivos, cargas externas e internas, sistemas e componentes de climatização, dados meteorológicos, estratégias operacionais, *schedules* e parâmetros de simulação.

Alguns cuidados devem ser tomados ao se inserir dados nos softwares de simulação. A geometria da edificação, por exemplo, deve ser inserida levando em consideração as 'zonas térmicas', ou seja, as regiões dentro das quais o comportamento termodinâmico é o mesmo e não somente as informações de localização de paredes. A representação dos sistemas de climatização de ar - tão importantes para os cálculos de troca térmica - podem também se tornar um desafio ao se parametrizar o modelo. Além da configuração das partes componentes do sistema de climatização, é necessário entrar também com as cargas internas e externas existentes com detalhamento de informações o suficiente para as análises de balanço energético. As cargas externas são inseridas por arquivos climáticos contendo dados horários de um ano de diversas variáveis meteorológicas como temperatura, umidade, radiação solar, visibilidade e precipitação entre outros. Os arquivos climáticos podem ser montados com dados medidos ou coletados de estações meteorológicas ou pode ser utilizado o arquivo de um ano típico<sup>19</sup>. Este arquivo fornece uma referência estatística para os parâmetros meteorológicos típicos de um local específico.

Além das informações técnicas é necessário entrar também com informações sobre os horários de ocupação do edifício, os *schedules*. Esta informação influencia nas cargas internas como pessoas, luzes, equipamentos e sistemas. Esses dados contêm um alto grau de incerteza visto que a entrada de horários de ocupação estáticos dificilmente representa adequadamente o uso real da construção. Para tentar contornar esta limitação dos simuladores pode-se inserir um certo grau de aleatoriedade

---

<sup>18</sup>Página da internet do Departamento de Energia dos EUA que contém informações sobre as principais ferramentas disponíveis [DOE, 2013].

<sup>19</sup>Um arquivo climático de ano típico é composto por uma série de dados meteorológicos coletados por um longo período de tempo (10 anos ou mais) e compilados estatisticamente em um ano considerado o mais representativo para aquele local.

(normalmente distribuída) nos horários e perfis de ocupação de entrada da simulação, ou ainda inserir uma variabilidade aleatória nos dados de saída do simulador.

As ferramentas de simulação são usualmente submetidas a vários testes de validação, a ASHRAE Standard 140 - Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs especifica um método de avaliação para verificar programas de simulação térmica e energética, intitulado como Building Energy Simulation Test (BESTEST)[ASHRAE, 2001b].

## 2.2 Validação

O primeiro registro oficial do uso do termo validação encontra-se nas GMPs<sup>20</sup> (*Good Manufacturing Practices*) de 1978. Entretanto, somente no início da década de 80, o termo recebeu sua primeira definição: “validação é o estabelecimento da evidência documentada de que o desenvolvimento de um processo específico permite cumprir com o objetivo para o qual foi desenhado”. Em 1987 o FDA lança o guia intitulado: *Guideline on General Principles of Process Validation* [FDA, 2008].

Segundo Hojo [2004] validação é um termo utilizado na indústria médica para indicar que um processo foi submetido a uma metodologia de auditoria tão severa que os seus resultados, sejam eles produtos, serviços ou outros, podem ser praticamente garantidos.

O FDA define validação como sendo “uma evidência documentada e estabelecida que fornece um alto grau de confiança que um processo específico irá gerar de forma consistente um produto que esteja de acordo com especificações pré-determinadas e atributos de qualidade” [Rokembach, 2004].

Segundo o *32th Report* da Organização Mundial da Saúde WHO [1992], validação é o ato documentado que atesta que qualquer procedimento, processo, equipamento, material, operação ou sistema realmente conduz aos resultados esperados. A ANVISA<sup>21</sup>, na RDC 210/03 que trata de Boas Práticas de Fabricação (BPF), complementa, afirmando que a validação, por si só, não é capaz de melhorar os processos. Trata-se de indicativo que auxilia a melhoria [ANVISA, 2006].

Ainda segundo a ANVISA, os termos validação e qualificação possuem, essencialmente, o mesmo conceito. Sendo que, qualificação é a nomenclatura normalmente utilizada quando se analisa equipamentos, utilidades e sistemas, enquanto que validação é aplicada a processos [ANVISA, 2006].

<sup>20</sup>Guia de boas práticas do FDA (*Food and Drug Administration*)

<sup>21</sup>Agência Nacional de Vigilância Sanitária

A validação é, portanto, um indicativo de que determinado procedimento, processo ou sistema opera conforme esperado. Não se trata portanto de uma metodologia capaz de aumentar a performance de um determinado sistema, mas de um indicador de que este possui o desempenho considerado como esperado. O 'desempenho esperado' pode ser determinado pelas especificações de processo, pelas características de qualidade necessárias, ou, por suas limitações. De maneira análoga, a validação do desempenho de edificações permite somente estabelecer que determinada edificação opera com o desempenho descrito, não sendo capaz de, por si só, aumentar a performance.

### 2.2.1 Objetivos da validação

De acordo com Gibson e Powell-Evans [1998] a validação é uma tarefa demorada e dispendiosa. A prática da validação nas indústrias farmacêuticas e alimentícias é facilmente justificada pela existência de regulamentações que a torna mandatória. A necessidade de se validar estas indústrias é de entendimento direto, devido aos potenciais danos causados por produtos de má qualidade. Entretanto, para os casos em que não existe a imposição legal, por que validar?

Gibson e Powell-Evans [1998] respondem a esta pergunta afirmando que a validação é uma prática gerencial astuta. Ela demanda a avaliação e a reavaliação de todas as atividades envolvidas no processo, de maneira que quase inevitavelmente, melhorias são alcançadas. Informações sobre o custo, eficiência e necessidades são coletadas e registradas de forma familiar e compreensível. Erros são minimizados e se tornam mais rastreáveis. Necessidades de treinamento se tornam aparentes e gerenciáveis.

Além dos ganhos citados pelo autor, é possível acrescentar que esta prática permite: (1) a avaliação dos pontos críticos de controle; (2) a identificação das variáveis que influenciam a qualidade; (3) a racionalização de atividades e insumos; (4) a identificação e proposição de melhorias; (5) a redução de custos com reprocessos e reprovações; (6) a obtenção de informações sobre a performance de cada setor envolvido. Para auxiliar na decisão de validar ou não um processo, modelos de decisão, como o apresentado na figura 2.5, podem ser utilizados.

O modelo de decisão (figura 2.5) deve ser projetado de acordo com as seguintes recomendações: cada processo deve ter uma especificação tanto para seus parâmetros, quanto para a saída desejada. Deve-se averiguar se a saída pode ser verificada<sup>22</sup> por monitoramento ou medição (A). Se a resposta

<sup>22</sup>Verificação é o ato de revisão, inspeção ou testes, a fim de estabelecer e documentar que um produto, serviço ou sistema

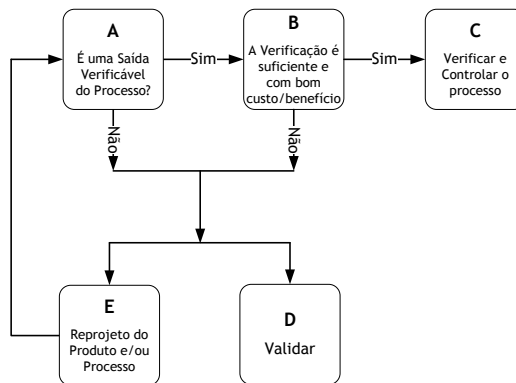


Figura 2.5: Árvore de Decisão para Validação  
Fonte: Hojo [2004]

for positiva, então deve-se analisar se somente a verificação é suficiente para eliminar riscos inaceitáveis e se é uma solução rentável (B). Em caso afirmativo, a saída deve ser verificada e o processo controlado. Se a saída do processo é verificável, deve-se validar o processo (D). Em alguns casos é possível que se chegue à conclusão que é necessário reprojeter o produto ou processo para reduzir a variabilidade (E).

### 2.2.2 Etapas do processo de validação

As etapas do Processo de Validação (PV), mostradas na figura 2.6 consistem em: Pré-Qualificação, Qualificação da Instalação; Qualificação da Operação (QO); Qualificação do Desempenho; e Revalidação [Gibson e Powell-Evans, 1998].



Figura 2.6: Etapas do Processo de Validação *Offline*

Antes de realizar a validação é necessário passar por uma etapa de pré-qualificação, na qual são definidos os sistemas a serem validados, os métodos de análise e os protocolos de validação. Nesta fase é desenvolvido o denominado Plano Mestre de Validação (PMV). Este documento resume a filosofia, intenções e abordagens a serem utilizadas para alcançar o desempenho adequado, devendo conter: os itens sujeitos à validação; a natureza e extensão dos testes a serem realizados; os protocolos atende seus requisitos.

e procedimentos a serem seguidos; as responsabilidades funcionais; e os requisitos definidos para a documentação. Em seguida, é realizada a etapa de qualificação. Esta é a parte da validação que avalia e documenta se equipamentos e sistemas estão bem instalados, operando de maneira correta e produzindo os resultados esperados. A qualificação fornece o ambiente adequado para a validação. Desta maneira, ela deve ser realizada antes que a validação seja iniciada.

A Qualificação da Instalação (QI) é a etapa na qual são realizadas análises para estabelecer que, sob condições especificadas, a instalação dos equipamentos, utilidades, instrumentos e áreas foi realizada de maneira adequada. Sempre que um novo equipamento for adquirido, este deverá ser instalado, testado e avaliado de modo a assegurar que é capaz de operar dentro dos limites e tolerâncias estabelecidos, bem como em todas as faixas de operações previstas. Os critérios a serem analisados são: (1) características físicas; (2) condições de instalação incluindo limpeza e manutenção; (3) calibração; (4) segurança; (5) documentação; (6) lista de peças de reposição; e (7) condições ambientais. No protocolo de qualificação devem constar as informações do fabricante de todos os equipamentos existentes; checagem de acessórios e manuais; checagem dos procedimentos de manutenção e limpeza.

A Qualificação Operacional (QO) consiste na verificação de que, sob condições especificadas, o sistema ou subsistemas apresentam desempenho conforme previsto. A qualificação operacional deve seguir um protocolo de procedimentos contendo os estudos a serem conduzidos nas variáveis de qualidade, sua sequência e os equipamentos de medição a serem utilizados. Além de também explicitar os critérios de aceitação a serem cumpridos. Os estudos das variáveis de qualidade devem incorporar detalhes específicos e testes que tenham sido desenvolvidos a partir do conhecimento de um especialista. Nesta fase os parâmetros de processo devem ser testados. As principais atividades a serem realizadas são: (1) a revisão e a verificação das especificações da matéria prima; (2) a revisão e a verificação dos procedimentos de operação; (3) o ajuste dos parâmetros das malhas de controle e dos softwares existentes; (4) a análise de estabilidade e capacidade do processo; e (5) os diagramas relacionais qualitativos pertinentes.

A etapa de Qualificação do Desempenho (QD) consiste na comprovação de que, sob condições especificadas, o processo ou sistema não interferiu adversamente no produto acabado e que este atende aos requisitos predeterminados. A QD deve fornecer evidência documentada de que as utilidades, sistemas e equipamentos e todos os seus componentes possam funcionar de forma consistente dentro de suas especificações em sua rotina de trabalho. Para realizá-la deve-se monitorar o processo durante um período de tempo de modo a comprovar o desempenho em condições normais de operação.

Durante esta etapa, devem ser realizados testes controlados de variação nas variáveis controláveis de modo a verificar a robustez do processo e seus limites de tolerância. Estas variações devem simular situações possíveis de serem encontradas durante a produção real.

Processos e procedimentos devem ser alvo de revalidações de modo a garantir que se mantenham capazes de atingir os resultados esperados. Estas devem ocorrer de maneira periódica e após modificações. As revalidações periódicas são realizadas pois ocorrem mudanças graduais ao longo de um período de tempo devido a diversos fatores como o desgaste de equipamentos. Elas devem ser realizadas de acordo com um cronograma definido. A frequência e a extensão da revalidação devem ser determinadas em uma avaliação de risco e na revisão de dados históricos.

A qualificação de edificações, em termos do seu desempenho energético, é similar às práticas realizadas na análise de desempenho das edificações (apresentadas na seção 2.1.1.3). Os passos metodológicos realizados durante esta etapa podem ser considerados como análogos aos de uma auditoria energética<sup>23</sup>. Independentemente da abordagem teórica utilizada, nesta etapa da validação, a edificação deve ser averiguada em termos de seus sistemas e equipamentos consumidores de energia, do modo em que é operada e de seu desempenho.

### 2.2.3 Validação *online*

A validação pode ser realizada de modo *offline* conforme descrito na seção anterior ou de forma *online*. Tradicionalmente, como indicado na literatura consultada ela é realizada *offline*. Para realizá-la de maneira continuada é necessário inserir, dentre as etapas apresentadas, uma nova, na qual é realizado o monitoramento do desempenho. As etapas do PV *online* são apresentadas na figura 2.7.

No processo de validação continuado de sistemas ou processos, as etapas de qualificação descritas na seção anterior podem ser consideradas, de maneira global, como uma etapa prévia de auditoria ou de pré-validação. Durante esta pré-validação o objeto da validação é averiguado de modo a identificar quais as características de qualidade consideradas como importantes, seu comportamento e método de análise. Além disso, esta etapa deve analisar como o objeto da validação influencia nestas características. Ao término das etapas de qualificação é possível iniciar o procedimento de monitoramento contínuo da qualidade. Este monitoramento é geralmente realizado utilizando Cartas de Controle – apresentadas mais adiante neste capítulo.

<sup>23</sup>Ver Krarti [2000] ou Thumann e Younger [2003]



Figura 2.7: Etapas do Processo de Validação *Online*

Braga et al. [2006] sugere a interpretação do Processo de Validação (PV) *Online* de acordo com o diagrama apresentado na figura 2.8.

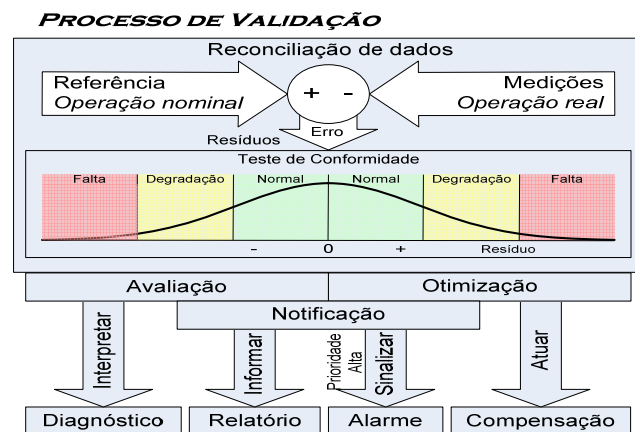


Figura 2.8: Funções associadas ao Processo de Validação

Fonte: Braga et al. [2006]

De acordo com os autores, o PV *online* inicia com a Reconciliação de Dados de referência a partir de medições reais do processo. Este procedimento, pode ser realizado pela simples comparação algébrica entre valores medidos e sinais de referência, ou, por métodos mais elaborados, como análise de resíduos. Esta análise é realizada com o uso de modelos estatísticos alimentados com dados medidos e inferidos de projeto. Na comparação por resíduos os dados são testados estatisticamente para verificar a conformidade com padrões pré-estabelecidos.

Após a reconciliação dos dados, é realizada a etapa de Avaliação e Diagnóstico que consiste na detecção, interpretação e classificação das informações presentes nos dados. Este procedimento pode ser Passivo, quando são utilizados dados de operação, ou Ativo, quando são utilizados dados

resultantes de perturbações aplicadas intencionalmente no sistema.

Segue-se a etapa de Otimização, que consiste em determinar as melhores condições de operação considerando as restrições existentes. Caso sejam detectadas necessidades de intervenção, uma função pode ser executada automaticamente para melhorar ou recuperar o desempenho.

Por fim, a etapa de Notificação consiste em repassar, aos níveis hierárquicos superiores, dados validados por meio de sinalizações (advertências ou alarmes) ou relatórios. Estes últimos podem ser do tipo corrente, com variáveis de tendência, ou global, com dados de parâmetros do sistema.

Segundo Passos [2009], as técnicas de validação descritas podem ser aplicadas a diversos tipos de equipamentos, como máquinas, linhas de produção, computadores, válvulas, sensores e controladores.

Em PVs *online*, os dispositivos validadores podem ser implementados de maneira remota com o uso de um sistema supervisor ou, de maneira autônoma, com métodos de autovalidação. Dispositivos autovalidadores são sistemas integrados que executam funções de validação internamente [Clarke, 1999]. O conceito de autovalidação é útil para o entendimento da validação ampla, discutida na seção 2.2.5. Antes de abordar a visão ampla da validação, as ferramentas de análise que viabilizam a validação serão discutidas.

#### **2.2.4 Ferramentas da validação de processos**

Conforme definido anteriormente, a validação consiste no procedimento de avaliação sistemática das condições de operação de um processo ou sistema. Para realizá-la é necessária a definição e o monitoramento de uma variável de qualidade, sua avaliação e diagnóstico, além da aplicação de medidas corretivas voltadas para a manutenção nos níveis de qualidade especificados. A Validação apresenta uma estrutura adequada para a realização das atividades descritas e as técnicas de Controle Estatístico de Processos (CEP) fornecem o ferramental técnico necessário para a prática da validação, em especial a *online*.

O CEP deriva dos trabalhos de Walter A. Shewhart que introduz o conceito de qualidade como inverso da variabilidade. É a partir da relação antagônica entre variabilidade e qualidade que se desenvolve a teoria de controle de processos. É, também, a partir da relação descrita que se justifica a potencialidade de melhora de qualidade dos processos industriais pelo uso de ferramentas estatísticas.

Inicialmente, a utilização da estatística no procedimento de avaliação da qualidade se limitava ao uso de técnicas de aceitação por amostragem. Estas, embora capazes de determinar a qualidade dos produtos, atuam somente após a ocorrência do defeito, o que impossibilita o rastreamento dos fatores que contribuíram para a sua ocorrência, ou seja, a detecção de quais as causas atribuíveis. A introdução dos conceitos e técnicas de CEP, entretanto, abriu caminhos para a avaliação da qualidade, não do produto em si, mas, do processo como um todo.

#### 2.2.4.1 Controle Estatístico de Processos (CEP)

Um processo industrial, visto como um sistema, pode ser representado como na figura 2.9. A figura apresenta o processo de manufatura visto como um sistema, conforme apresentado por Montgomery [2004]. No diagrama apresentado, o sistema transforma um determinado conjunto de entradas no produto final, representado por suas variáveis de qualidade. As entradas do sistema podem ser controláveis (variáveis de processo) ou não controláveis (condições ambientais ou propriedades da matéria prima, por exemplo). As características indicadoras de qualidade do processo são o alvo do CEP.

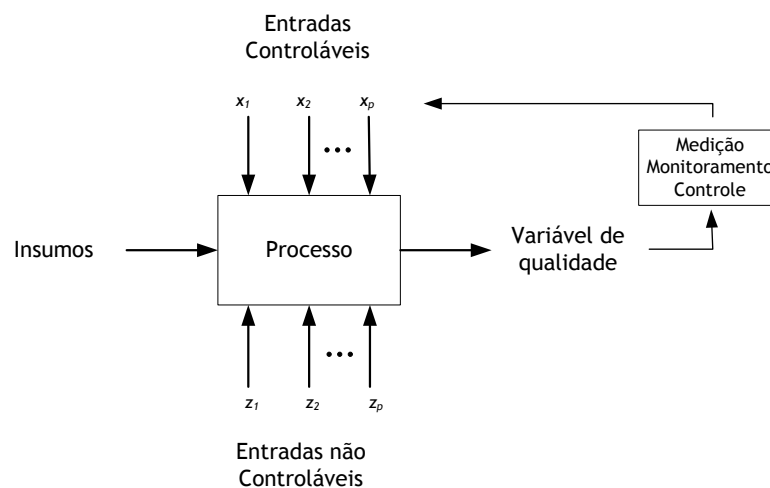


Figura 2.9: Representação do Processo industrial como um Sistema  
Fonte: Montgomery [2004]

A variabilidade inerente a qualquer processo industrial, é resultado do efeito cumulativo de diversas causas pequenas, essencialmente inevitáveis. É impossível isolar qualquer processo de manufatura do ambiente externo, como seria necessário para tratá-lo de maneira analítica. A metodologia

apresentada por Shewhart permite utilizar a variabilidade como parâmetro de qualidade do processo.

Cartas (ou gráficos) de controle são comparações gráficas do comportamento estatístico das variáveis de qualidade do processo ao longo do tempo (ou do número da amostra). A análise das cartas de controle consiste na verificação permanente da variabilidade das variáveis de qualidade do processo. Caso, estas se mantenham aleatoriamente distribuídas e dentro de limites previamente estabelecidos, o processo está sob controle estatístico. Ou seja, os valores assumidos pelas variáveis podem ser totalmente atribuídos a causas comuns.

A carta apresenta uma zona de controle delimitada pelos limites naturais do processo, denominados limite superior de controle (LSC) e limite inferior de controle (LIC). No centro da zona de controle está a linha central (LC). Os limites de controle são calculados de acordo com o comportamento estatístico do processo, estando ele em controle estatístico. Caso um ponto esteja fora dos limites de controle, este deve ser interpretado como uma possível indicação de presença de causas atribuíveis ou especiais. Assim sendo, é necessário investigar a causa responsável e, caso exista, eliminá-la. Além da existência de pontos exteriores à zona de controle, considera-se que um padrão de comportamento determinístico é indicativo da presença de causa atribuível e mesmo que um alarme ainda não tenha sido gerado, caso esta causa não seja removida, provavelmente um alarme será setado.

Antes de se utilizar as cartas de controle é imprescindível projetá-las de maneira correta. Para isso, é necessário conhecer o processo e suas variáveis de qualidade, além de levá-lo ao estado de controle estatístico, identificando e eliminando as causas especiais de variabilidade. O processo de projeto das cartas de controle, conforme descrito por Montgomery [2004] é apresentado a seguir.

O estado de controle estatístico é testado por meio de testes de hipóteses que auxiliam o processo de projeto. Inicialmente, são calculados limites de controle tentativos. Caso todos os pontos utilizados para o projeto, caiam dentro dos limites tentativos e não seja observado qualquer comportamento determinístico, pode-se concluir que a hipótese do processo estar sob controle estatístico é verdadeira. Assim sendo, os limites tentativos são considerados apropriados para o processo em questão e a carta é adotada para monitoramento. Entretanto, caso ocorram um ou mais pontos fora dos limites, a hipótese de que o processo está sob controle é descartada. É necessário então, examinar cada ponto fora dos limites e procurar por uma causa especial. Ao identificá-la, o ponto é descartado e os limites tentativos são recalculados. Em seguida, a nova carta é reexaminada. Este processo é repetido até que todos os pontos restantes estejam sob controle.

Ao realizar o projeto das cartas de controle as causas especiais encontradas devem ser identificadas, eliminadas e devem ser tomadas ações que previnam sua ocorrência. Após este processo, as cartas estão aptas a monitorar o desempenho do processo.

Os limites de controle devem ser revisados sempre que ocorram modificações no processo. Estas modificações podem ser, por exemplo: melhorias no padrão de operação por meio de re-sintonia das malhas de controle; mudança nas características da matéria-prima; desgaste natural dos dispositivos, entre outros.

Apesar de amplamente utilizadas, as cartas de Shewhart não possuem memória. Qualquer mudança ocorrida em instantes de tempo anteriores é ignorada, o que faz com que elas não sejam capazes de detectar variações com pequena amplitude. De modo a possibilitar análises que levassem em consideração valores passados, Paige desenvolveu em 1954 as cartas de soma cumulativa (CuSum)<sup>24</sup> Montgomery [2004].

### Cartas de soma cumulativa

As cartas de soma cumulativa testam a hipótese da soma cumulativa de uma distância calculada ser inferior ao limite determinado. Esta distância pode ser o resíduo entre o valor medido para uma variável e o estimado, ou o quadrado do resíduo - para ser sensível também à variância - conforme mostra a equação 2.1.

$$s_t = \varepsilon_t = y_t - \hat{\theta}_{t-1} \quad (2.1)$$

sendo  $s_t$  o resíduo computado no instante  $t$ ,  $y_t$  o valor medido e  $\hat{\theta}_{t-1}$  é o valor estimado para  $y_t$  baseado nos valores medidos até o instante  $t - 1$ . O teste de CuSum soma seu próprio valor ao valor calculado para o resíduo. Caso o valor desta soma ultrapasse o limite em teste,  $h$ , é considerado que o processo está fora de controle e é acionado um alarme. Para evitar que o teste acuse alarmes falsos quando vários testes estatísticos consecutivos possuam um valor positivo, um valor de tolerância,  $v$ , é subtraído à soma, conforme mostrado na equação 2.2. Para sinais negativos, que poderiam aumentar o tempo de detecção de mudanças, o teste estatístico é zerado [Gustafsson, 2000].

<sup>24</sup>Para exemplo de aplicação ver Corbett e Pan [2002] que aplica a carta de CuSum para o monitoramento de taxas de emissões de poluentes.

$$g_t = \text{maximo}(g_{t-1} + s_t - v, 0) \quad (2.2)$$

sendo  $g$  a estatística CuSum. A estatística é zerada sempre que o limite é ultrapassado de modo a viabilizar futuros alarmes como mostra a equação 2.3.

$$\text{Se } g_t > h \quad g_t = 0 \quad (2.3)$$

Os valores de limite  $h$  e de tolerância  $v$  são fatores de projeto e dependem do processo em teste. Mas uma referência para estes valores é determinar o valor de tolerância como a metade do valor crítico  $h$  que não deve ser ultrapassado, ou seja,  $k = 0.5\delta$ , sendo  $\delta$  o tamanho da mudança em unidades de desvio padrão. Sofisticações do teste de CuSum são mostrados por Gustafsson [2000]. O autor apresenta algoritmos baseados na análise conjunta do método de estimação do resíduo em teste com o teste de CuSum. Um exemplo mostrado pelo autor é o *CUSUM RLS Filter* que usa EWMA (*Exponentially Weighted Moving Average*, ou médias móveis exponencialmente ponderadas) para estimar o resíduo como mostra a equação 2.4.

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_t &= \lambda \cdot \hat{\theta}_{t-1} + (1 - \lambda)y_t \\ \varepsilon_t &= y_t - \hat{\theta}_t \end{aligned} \quad (2.4)$$

Duas estatísticas são calculadas, considerando limites  $h$  superior e inferior como mostra as equações 2.5 e 2.6.

$$\begin{aligned} s_t^{(1)} &= \varepsilon_t \\ g_t^{(1)} &= \text{maximo}(g_{t-1}^{(1)} + s_t^{(1)} - v, 0) \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} s_t^{(2)} &= -\varepsilon_t \\ g_t^{(2)} &= \text{maximo}(g_{t-1}^{(2)} + s_t^{(2)} - v, 0) \end{aligned} \quad (2.6)$$

As estatísticas calculadas são testadas em função do limite  $h$  e caso o ultrapassem, é gerado um alarme, as estatísticas zeradas, e a média é reinicializada como mostra a equação 2.7.

$$\begin{aligned}
 & \text{Se } g_t^{(1)} > h \quad \text{ou } g_t^{(2)} > h \\
 & g_t^{(1)} = g_t^{(2)} = 0 \\
 & \hat{\theta}_t = y_t
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

A carta de CuSum como descrita é univariável, ou seja, analisa o comportamento do processo de acordo com uma única variável de qualidade. Entretanto, existem casos em que é interessante trabalhar com cartas de controle multivariadas. Estas, levam em consideração o estudo simultâneo das relações de duas ou mais as variáveis estudadas, ou seja, a distribuição conjunta das variáveis. As cartas de controle multivariadas mais comuns são as cartas de controle  $T^2$  de Hotelling.

### Carta $T^2$ de Hotelling

A carta  $T^2$  foi proposta por Hotelling em 1931 [Mason e Young, 2002] como uma generalização da estatística *t Student*<sup>25</sup> e são um análogo direto à carta de média,  $\bar{X}$ , de Shewhart. A estatística  $T^2$  avalia o desvio de uma amostra - contendo  $p$  variáveis correlacionadas, medidas simultaneamente, e que supostamente seguem uma distribuição  $p$ -dimensional multivariada normal - à sua média estimada ponderada pelo desvio padrão. A suposição de normalidade é coerente e segue o Teorema do Limite Central.

Para uma amostra de  $p$  variáveis descritas no vetor  $X' = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , com vetor de médias  $\mu' = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n\}$  e matriz de covariância  $\Sigma$ , sendo  $\mu_i$  a média para a  $i$ -ésima característica e  $\Sigma$  uma matriz consistindo de variâncias e covariâncias das  $p$  características, a estatística  $T^2$  é dada por 2.8.

$$T^2 = n(\bar{X}_k - \bar{\bar{X}})' S^{-1} (\bar{X}_k - \bar{\bar{X}}) \tag{2.8}$$

Na maioria dos casos na prática  $\mu$  e  $\sigma$  são desconhecidos e são estimados pela média amostral e pela matriz de covariância amostral, dados por:

<sup>25</sup>Ver [Montgomery, 2004]

$$\bar{\bar{X}} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \bar{X}_k,$$

e

$$\bar{S} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m S_k,$$

com

$$S = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (X_i - \bar{X}_k)(X_i - \bar{X}_k)',$$

sendo que  $m$  representa o número de amostras de tamanho  $n$  retiradas do processo e  $X_i$  e a  $i$ -ésima observação da  $p$ -ésima variável referente à  $k$ -ésima amostra.

O projeto das cartas de Hotelling devem, portanto, testar retrospectivamente se o processo estava sob controle quando as  $m$  amostras foram retiradas de modo a estabelecer os limites de controle [Montgomery, 2004]. Nesta primeira fase, retrospectiva, o limite superior de controle (LSC) e o limite inferior de controle (LIC) são dados por:

$$\begin{aligned} LSC &= \frac{p(m-1)(n-1)}{mn-m-p+1} F_{\alpha;p;mn-m-p+1} \\ LIC &= 0 \end{aligned}$$

Após a confirmação que os dados estavam sob controle os novos limites passam a ser:

$$\begin{aligned} LSC &= \frac{p(m+1)(n-1)}{mn-m-p+1} F_{\alpha;p;mn-m-p+1} \\ LIC &= 0 \end{aligned}$$

sendo  $F$  o valor tabelado da estatística seguindo o nível de significância  $\alpha$  a ser determinado e os devidos graus de liberdade.

Para amostras individuais, i.e.  $n = 1$ , a estatística  $T^2$  é dada pela equação 2.9.

$$T^2 = (X_k - \bar{X})' S^{-1} (X_k - \bar{X}) \quad (2.9)$$

sendo  $\bar{X}$  e  $S$  as estimativas para o vetor de médias e a matriz de covariância do processo. Os limites da primeira fase de aplicação da carta de  $T^2$ , segundo Mason e Young [2002], é dado por:

$$\begin{aligned} LSC &= \frac{(m-1)^2}{m} \beta_{\alpha; p/2; (m-p-1)/2} \\ LIC &= 0 \end{aligned}$$

sendo  $\beta_{\alpha; p/2; (m-p-1)/2}$  o percentil de uma distribuição beta com parâmetros  $p/2$  e  $m-p-1/2$ .

Após esta primeira fase, para futuras observações, os limites de controle são calculados por:

$$\begin{aligned} LSC &= \frac{(p(m+1)(m-1)}{m^2-mp} F_{\alpha/2; p; m-p} \\ LIC &= 0 \end{aligned}$$

sendo que  $F_{\alpha/2; p; m-p}$  significa o percentil da distribuição  $F$  com  $p$  e  $m-p$  graus de liberdade.

Segundo Montgomery [2004], um problema significativo no caso de observações individuais é a estimação da matriz de covariância  $\Sigma$ . Um comparativo de vários estimadores é feito por Sullivan e Wooddall (apud [Montgomery, 2004]) e um deles, citado por Montgomery [2004], é o estimador “usual” obtido pela simples combinação de todas as  $m$  observações, i.e.:

$$\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (\sum) (x_i - \bar{x})(x_i - \bar{x}).$$

Hotelling foi o primeiro autor a perceber a necessidade de análises multivariadas dada a fragilidade do uso de diversas cartas univariadas nos casos em que há correlação entre as variáveis [Souza e Rigão, 2005]. Diversos autores vêm dedicando ao assunto desde então [Aparise, 1997; Ryan, 1989; Mason e Young, 2002].

Um ponto comum entre as cartas uni e multivariadas descritas é a suposição de que as variáveis, ou ao menos suas amostras, sejam estatisticamente independentes e identicamente distribuídas e que sigam uma distribuição normal com média  $\mu$  e desvio padrão  $\sigma$ . Entretanto, caso não haja interdependência entre as observações, os gráficos de controle convencionais não irão apresentar um bom desempenho. Segundo Montgomery [2004], caso exista autocorrelação nos dados, as cartas de controle convencionais irão apresentar resultados enganosos com a ocorrência de diversos alarmes falsos.

Existem diversas formas de lidar com este problema, como por exemplo o uso de limites de controle variáveis ou de técnicas com redes neurais artificiais [Guh, 2010; Pacella e Semeraro, 2007; Arkat et al., 2007]. Uma abordagem interessante é modelar a estrutura correlacional, utilizar o modelo para remover a autocorrelação dos dados e aplicar gráficos de controle aos resíduos. O uso de modelos de séries temporais ARIMA (Média Móvel Autoregressiva Integrada) é apresentado por [Montgomery, 2004]. Callao e Rius [2003]; Yang e Makis [1997]; Pan e Jarrett [2007]; Ord et al. [2009]; Claro et al. [2007] também preconizam a utilização de modelos para tal problema. Lima [2005]; Moreira Júnior [2005] apresentam uma revisão sobre o uso de modelos preditivos. Issam e Mohamed [2008]; Jarrett e Pan [2007]; Negiz et al. [1998] abordam a questão de dados autocorrelacionados e o uso de cartas multivariadas.

### 2.2.5 Validação ampla

Braga et al. [2006] apresenta uma abordagem de validação ampla de unidades e plantas industriais. Esta abordagem consiste em encapsular as técnicas de avaliação de desempenho e diagnóstico de um determinado tipo de elemento em uma classe, de maneira similar ao modelo de programação orientada a objetos. Esta prática, pode ser aplicada a diversos elementos do processo, mantendo uma mesma interface padronizada. Desta maneira, os diversos elementos validadores existentes podem interagir entre si, trocando informações.

A estrutura encapsulada para diversos níveis hierárquicos de automação, apresentada por Braga et al. [2006], é mostrada na figura 2.10. Nela, estão presentes os níveis clássicos da pirâmide hierárquica típica de um sistema de automação, numerados de 0 a 4. Em cada nível são apresentados, da esquerda para a direita: (a) a ordem de grandeza usual dos intervalos de amostragem de equipamentos e aplicativos de software; (b) o tipo de validação que pode ser realizado em cada nível; (c) as finalidades dos sistemas e equipamentos de automação (d) as atividades gerais executadas por operadores, sistemas e equipamentos típicos em cada nível; e (e) e os pacotes de software (PIMS<sup>26</sup>, SCADA<sup>27</sup>, MES<sup>28</sup> e ERP<sup>29</sup>) e software-hardware comerciais. O fluxo de dados entre os diversos níveis da pirâmide é apresentado por setas bidirecionais. Estas ilustram o aumento do volume de dados que ocorre

<sup>26</sup>*Process Information Management Systems*: sistemas que coletam dados de processo, os armazenam num banco de dados históricos e os disponibilizam por meio de diversas ferramentas.

<sup>27</sup>*Supervisory Control and Data Acquisition*: sistemas que monitoram e supervisionam variáveis e dispositivos de controle.

<sup>28</sup>*Manufacturing Execution System*: sistemas responsáveis por todo o acompanhamento da produção, da ordem ao produto final.

<sup>29</sup>*Enterprise Resource Planning*: sistemas que integram todos os dados de processos em um único sistema.

à medida em que níveis hierárquicos mais altos são alcançados.

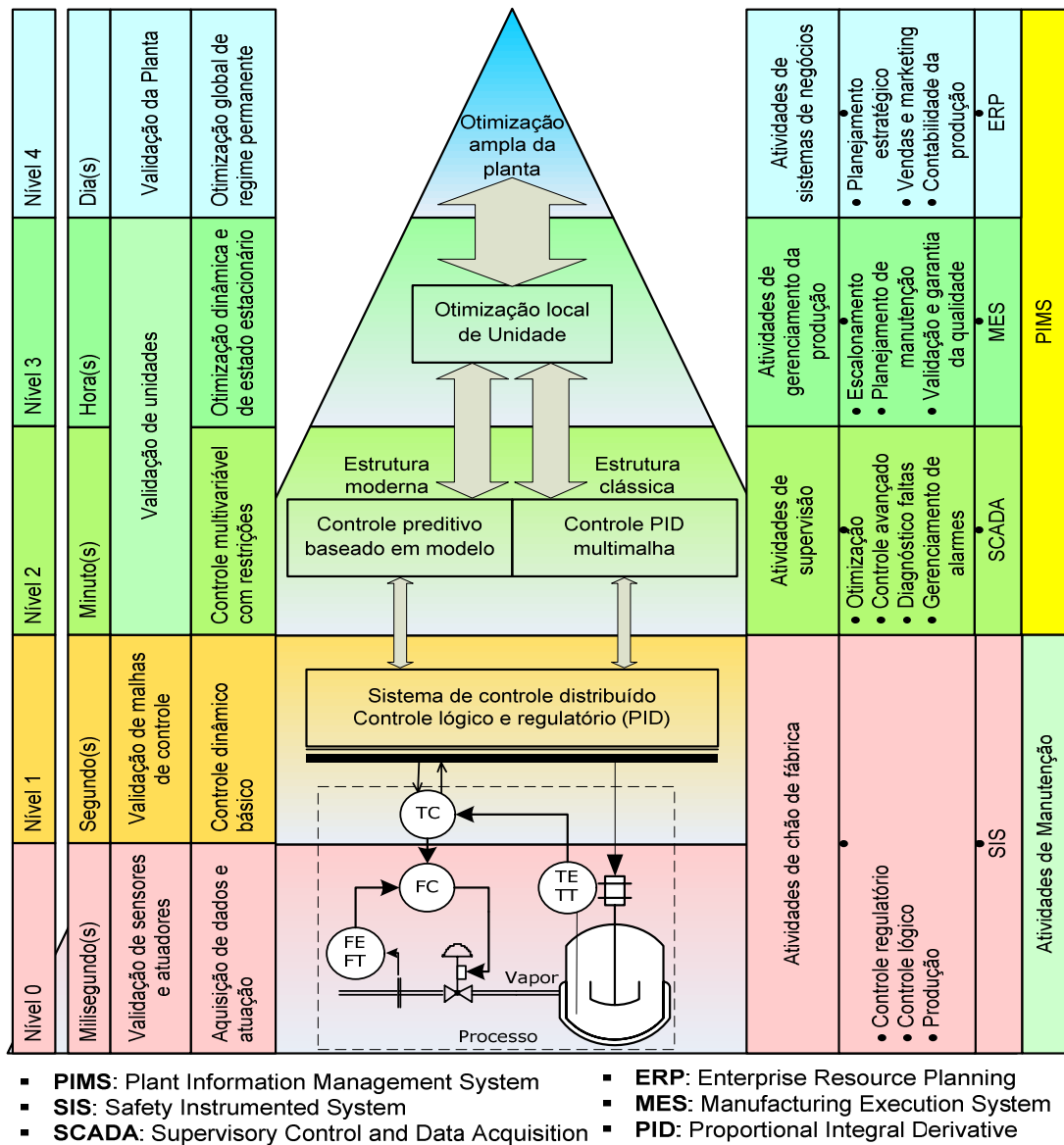


Figura 2.10: Hierarquia das funções de um sistema de controle de processos, atividades de gerenciamento da produção e sistemas de gerenciamento da informação usados em uma planta industrial. Fonte: Braga et al. [2006]

A filosofia de validação ampla pode ser muito útil para a concepção da ferramenta de software a ser desenvolvida. A organização da validação de edificações em estruturas capazes de encapsular complexidade simplifica as análises de desempenho a serem realizadas. Esta simplificação é de extremo interesse para a aplicação desejada, pois, em edificações, a presença permanente de especialistas em técnicas de validação e CEP não é viável. Deste modo, a ferramenta a ser desenvolvida deve

possuir interfaces simplificadas, de modo a possibilitar o seu uso por usuários comuns.

### 2.3 Considerações finais

A análise sistêmica das edificações e de seu desempenho não é uma prática trivial pois implica relacioná-las com o meio na qual estão inseridas e com os seus usuários. Esta visão generalista, extrapola o campo da engenharia elétrica e requer uma análise multidisciplinar. De fato a temática em discussão vem sendo alvo de estudos de diferentes áreas do conhecimento desde a década de 70, embora a abordagem holística necessária ainda não tenha sido alcançada. Entre os diversos esforços realizados, ao longo dos anos, para a redução do consumo em edificações construídas, os que abordam o usuário são provavelmente os mais complexos. É, entretanto, de extrema importância entendê-los já que são eles que determinam o modo com que a energia é utilizada. Assim como é necessário conhecer os fatores que os motivam a consumir mais ou menos energia, e os meios pelos quais é possível influenciá-los neste aspecto. Esta compreensão, no entanto, está longe de ser alcançada, vistos os resultados obtidos com as campanhas destinadas a promoção do uso consciente. A alternativa encontrada para solucionar a questão do modo de uso das edificações foi a de retirá-los do posto de operadores das edificações. Esta solução é alcançada com o uso dos SAE. Apesar de efetivamente retirarem dos usuários a função de operadores da edificação, os sistemas de controle e automação não podem ser programados para operarem alheios a eles. A função essencial à qualquer edifício é a de prover, aos seres humanos, ambientes com características adequadas às atividades a serem ali desenvolvidas. Portanto, a manutenção dos níveis de conforto dos usuários deve ser uma preocupação mesmo nas edificações providas de SAE e operando com foco em um mínimo consumo de energia. A necessidade de satisfazer esta premissa é refletida nos diversos estudos, realizados na área de controle, que buscam o equilíbrio da relação consumo x conforto. Estes estudos são geralmente aplicados no controle de sistemas de HVAC. As possibilidades de redução de consumo ao instalar sistemas automáticos, não são refletidas na prática. Diversos autores afirmam que os SAE não atuam com o foco na eficiência energética. Além do fato que em muitos dos edifícios providos de BEMS, estes se encontram em más condições de manutenção [Levermore, 2007; Doukas et al., 2009; Kumar et al., 2001; Augenbroe et al., 2009]. As constatações apresentadas indicam que a questão do consumo de energia nas edificações é, de fato, complexa. De tal forma que, o desempenho energético destas instalações não pode ser determinado pela simples análise de suas características

construtivas ou pelos equipamentos e sistemas instalados. O desempenho dado por estes fatores pode ser visto, simplesmente, como a melhor performance possível para o sistema. Sendo que, melhoras só poderiam ser alcançadas modificando o sistema, com reformas ou trocas de equipamentos. Ou seja, caso não sejam realizadas intervenções, qualquer edificação opera com um desempenho energético variável, que decresce continuamente com o passar dos anos, devido a desgastes de suas estruturas e de seus equipamentos e sistemas. Este decaimento, no entanto, não é facilmente previsível, pois ele varia de acordo com as condições de manutenção e limpeza de todos os componentes da edificação. Entretanto, não é razoável considerar que não sejam realizadas intervenções. As edificações são dinâmicas e estão em constante modificação. Novos equipamentos são instalados frequentemente, sendo que, diversos deles são instalados pelos próprios usuários, que não informam este fato aos gestores da edificação. Mudanças de layout são frequentemente necessárias e estas podem modificar o fluxo de ventilação natural ou a entrada de luz solar. São, portanto, diversos os fatores que determinam o desempenho energético das edificações. Entretanto, as métricas existentes para indicá-lo, o considera como uma característica estática.

A busca por qualidade nos processos industriais foi motivada por diversos fatores, como a busca por maior competitividade, redução de custos e retrabalhos e a necessidade de fabricação de produtos em conformidade com as suas especificações. Na indústria farmacêutica, o controle de qualidade surge como uma demanda social e regulamentada. Já as indústrias de automóveis japonesas utilizaram o controle de qualidade para o aumento de sua competitividade e a partir dela conseguiram se reerguer após a segunda guerra mundial. Este fato, por si só, demonstra a grande importância desta disciplina. O controle estatístico de processo (CEP) é um conjunto de ferramentas extremamente úteis para a avaliação da estabilidade dos processos, detecção de causas geradoras de não-conformidades e promoção de sua melhoria contínua. Suas sete ferramentas são o histograma, a folha de controle, o gráfico de Pareto, o diagrama de causa e efeito, o diagrama de concentração de defeito, o diagrama de dispersão e, a principal, a carta de controle.

## Capítulo 3

# Metodologia da pesquisa

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho e são apresentadas as edificações utilizadas tanto na etapa de proposições quanto a edificação real utilizada sobre a qual foi aplicada a metodologia de validação proposta por esta tese.

Este trabalho consiste em uma pesquisa que visa a ampliar o conceito de validação de sistemas, já consolidado no meio industrial, para o âmbito das edificações. Objetiva-se investigar a validação de uma edificação em relação ao seu consumo energético e às condições internas de luminosidade, temperatura e umidade.

A metodologia de pesquisa aplicada consiste na pesquisa quantitativa-descritiva e experimental através de estudo de verificação de hipóteses e relações de variáveis. O método utilizado consiste nos seguintes passos (figura 3.1):

1. **Revisão bibliográfica:** estudo das técnicas de validação de sistemas usualmente aplicada nas indústrias e revisão de como a temática do desempenho energético das edificações é tratada no mundo.
2. **Concepção da pesquisa:** definição dos conceitos a serem defendidos, dos objetivos específicos do trabalho e de suas limitações técnicas.
3. **Definição e instalação da infraestrutura:** definição da infraestrutura de automação para o monitoramento contínuo e automático das edificações. Instalação e calibração da rede de sensores.

4. **Preparação para as proposições:** identificação das variáveis chaves a serem utilizadas na validação e proposição de testes de verificação de hipóteses e de estudos de relações de variáveis. Desenvolvimento do modelo computacional das edificações de teste a serem utilizadas.
5. **Proposições:** proposição de uma metodologia para o monitoramento do consumo e das variáveis de temperatura, umidade e luminosidade.
6. **Testes das proposições:** testes simulados aplicando as proposições metodológicas nas edificações de teste.
7. **Análises de campo:** coleta, análise e interpretação dos dados de potência instalada, consumo energético e de outras variáveis de interesse. Averiguação dos hábitos dos usuários. Avaliação inicial de desempenho energético da edificação. Realização de experimentos programados para análises de relações de variáveis.
8. **Modelagem no EnergyPlus:** desenvolvimento de um modelo computacional da edificação real a ser validada. Este modelo é utilizado nas etapas de qualificação da edificação.
9. **Testes com dados reais:** aplicação da metodologia proposta na edificação real.
10. **Conclusões:** análise crítica dos resultados e do método empregado. Conclusões do trabalho e propostas de continuidade.

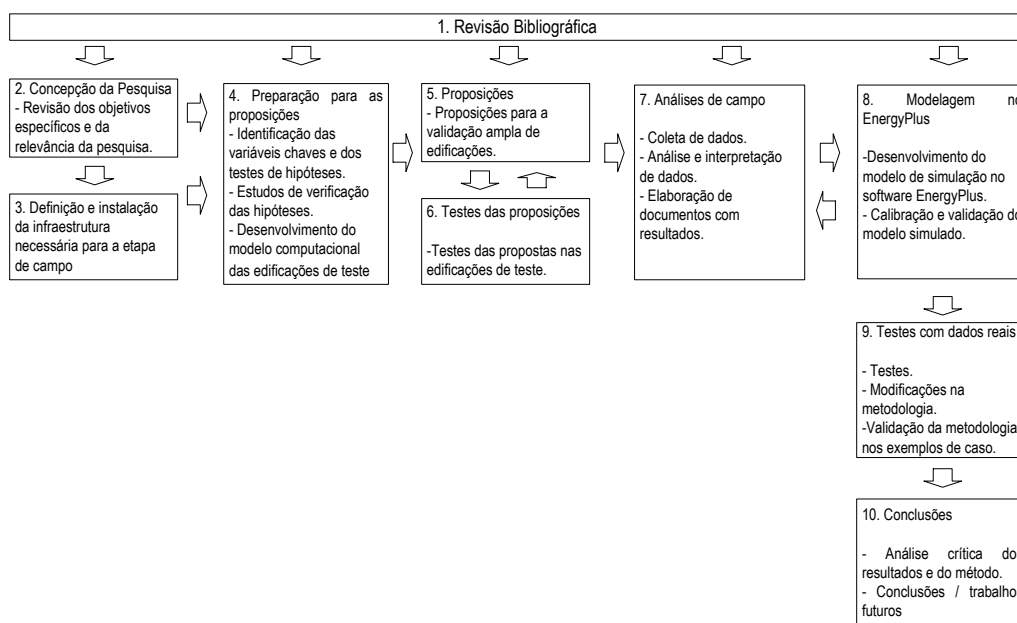


Figura 3.1: Metodologia de Pesquisa

### 3.1 Edificações de teste

A metodologia de validação proposta foi desenvolvida e testada inicialmente em edificações idealizadas e simuladas em no software de simulação EnergyPlus, adequado para as análises desenvolvidas. O uso das edificações simuladas permitiu a flexibilidade necessária para o teste de ferramentas diversas e aferição da mais adequada metodologia para a prática proposta.

#### 3.1.1 O software EnergyPlus

O EnergyPlus é uma ferramenta desenvolvida pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory* em sociedade com outros laboratórios para o Departamento de Energia Norte-Americano (U.S. Department of Energy - DOE). É considerado um dos mais conceituados programa de simulação energética de edificações. O software, lançado em 2001, combina as funcionalidades dos seus antecessores Blast (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) e DOE-2, concebidos pelo DOE no fim da década de 70. Tanto seus programas precursores quanto o EPlus foram validados por diversos métodos, inclusive o BESTEST<sup>1</sup> (Building Energy Simulation Test).

O software possui vários módulos de simulação que, em conjunto, permitem a simulação do comportamento energético de edificações. O ponto central da simulação é a integração do balanço térmico dos elementos constituintes do edifício e seus sistemas energéticos quando expostos a diferentes meios ambientes e condições de funcionamento.

A figura 3.2 mostra o diagrama de entradas e saídas do programa. Os dados de entrada para a simulação são aqueles relativos à descrição da edificação, como sua localização, entorno, orientação, dados climáticos e suas coordenadas para a concepção do desenho, a especificação de todos os materiais e suas formas de aplicação no projeto; rotinas de utilização pelos usuários do edifício durante o ano; dados dos ganhos térmicos internos gerados por pessoas, equipamentos e sistemas; e dados dos sistemas de iluminação e climatização existentes. Diversas saídas estão disponíveis como temperatura e umidade por zona e consumos de energia.

O arquivo climático, conforme o RTQ-R, deve no mínimo, fornecer valores horários para todos os parâmetros relevantes requeridos pelo programa de simulação, como temperatura e umidade,

<sup>1</sup>Testes de validação concebido segundo a ASHRAE Standard 140 - Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs

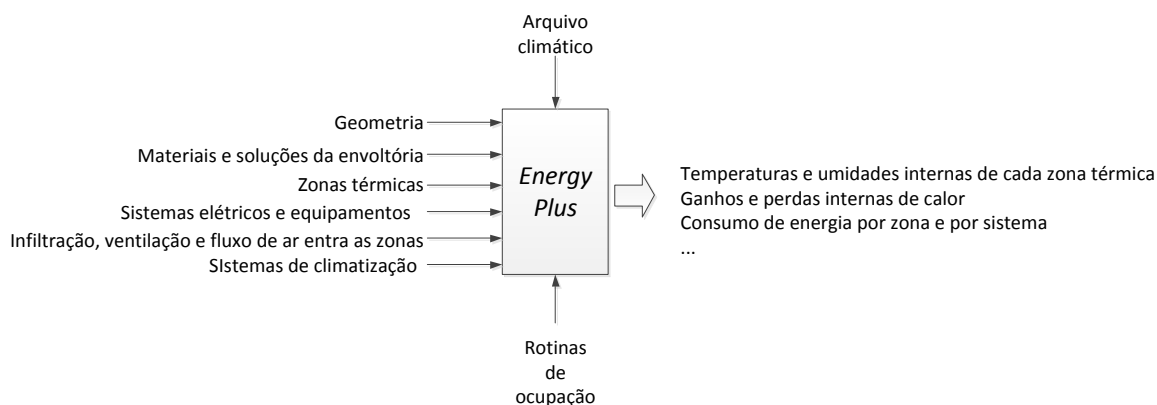


Figura 3.2: Diagrama de entradas e saídas do *Energy Plus*

direção e velocidade do vento e radiação solar [RTQ, 2010] . Devem ser utilizados arquivos climáticos disponibilizados pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos ou no site do PRO-CEL/ELETROBRÁS, como o TRY<sup>2</sup> e, além disso, os dados devem ser representativos da zona bioclimática onde o edifício está inserido.

As rotinas de ocupação da edificação são informações sobre o número de pessoas e acionamento de sistemas de acordo com os usos típicos da edificação, e.g. segunda a sexta-feira de 07 às 17 horas. Como o EnergyPlus não considera a aleatoriedade nessa rotina, foi criado uma plataforma no software MATLAB<sup>®</sup> que gera, a partir de um padrão de ocupação, todos os dias do ano, inserindo uma pequena variabilidade tanto no horário de início / término de atividades quanto no número de pessoas presentes.

### 3.1.2 Exemplo de caso de uma edificação residencial

Para a demonstração de uma tipologia residencial, um caso exemplo é modelado e simulado no EnergyPlus. A edificação do caso exemplo residencial (figura 3.3) é formada por quatro ambientes: sala, quarto, cozinha e banheiro, com área total de 30,25 m<sup>2</sup>. As propriedades construtivas das paredes e coberturas, assim como suas transmitâncias (U) e capacidades térmicas (CT), foram definidas com base nos materiais típicos utilizados em edificações residenciais brasileiras, detalhados pela NBR - 15220: Desempenho térmico de edificações [ABNT, 2005]. Para esta edificação foi adotada uma janela padrão para sala, cozinha e quarto com abertura retangular de 1,5 m de largura, 1,5 de altura e

<sup>2</sup>O arquivo TRY (*Test Reference Year*) representa um ano real de dados referentes a um período de registro disponível de 10 anos ou mais [Pereira et al., 2004].

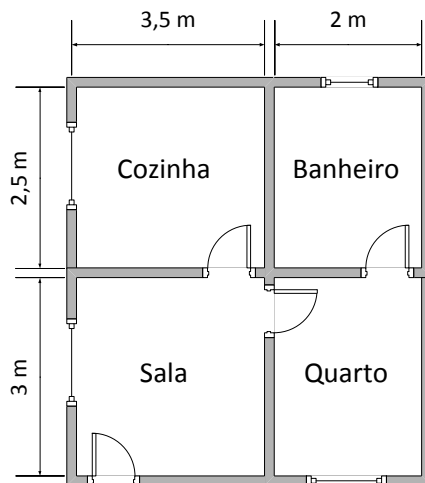


Figura 3.3: Caso exemplo residencial

1,0 m de peitoril. As janelas foram modeladas com área 100% envidraçada com vidro simples de 6 mm e nenhum sombreamento foi utilizado. Na janela do banheiro foi definida uma abertura retangular de 1,0 m de largura, 0,6 m de altura e 1,5 de peitoril. As aberturas de portas são iguais para todos os ambientes com aberturas de 2,1 m de altura e 0,8 m de largura.

O sistema de climatização modelado foi o *HVACTemplateZone*. Este dispensa modelagem de um sistema completo de climatização. As variáveis ambientais de temperatura e umidade relativa internas a cada uma das zonas assim como o consumo energético total da edificação foram simulados, utilizando o arquivo climático fornecido pelo DOE para a cidade de Belo Horizonte, pelo período de um ano com intervalo de amostragem de 1 hora.

### 3.1.3 Exemplo de caso de uma edificação comercial

Para a demonstração de uma tipologia de uma edificação comercial, um exemplo de caso é modelado e simulado no EnergyPlus. Este exemplo refere-se a uma edificação de 1800 m<sup>2</sup> divididos em três andares. A edificação é dividida em três zonas térmicas por andar como mostra a figura 3.4. A zona térmica central é onde estão as áreas recepção e de corredores, ou seja, áreas de passagem de pessoas. As zonas térmicas laterais consistem em dois grandes espaços para a colocação de baias e estações de trabalho.

As propriedades das construções de paredes e coberturas, assim como as transmitâncias (U) e capacidades térmicas (CT) das paredes e cobertura, utilizadas foram as mesmas da edificação resi-

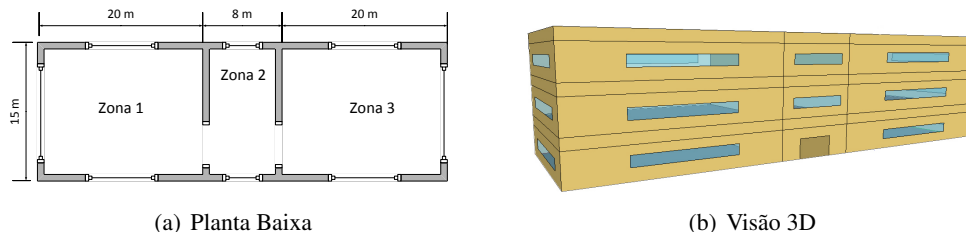


Figura 3.4: Caso exemplo de prédio comercial

dencial por se tratarem de características típicas de edificações brasileiras.

A edificação foi simulada em duas situações: operando (1) com ventilação natural e (2) com um sistema de climatização artificial de ar. A ventilação natural foi modelada pelo *Airflow Network*, multizona, sendo que os coeficientes de pressão do vento foram calculados pelo EnergyPlus. O sistema de climatização artificial foi modelado pelo *HVACTemplateZone*. As variáveis ambientais de temperatura e umidade relativa internas a cada uma das zonas assim como o consumo energético total da edificação foram simulados pelo período de um ano com intervalo de amostragem de 1 hora.

### 3.2 Edificação real a ser validada

A edificação real a ser validada faz parte do complexo educacional do Instituto de Ciências Biológicas (ICB) da UFMG. O ICB está localizado no campus Pampulha da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), em Belo Horizonte. Ao todo, a instalação, possui uma área construída de cerca de 44,5 mil  $m^2$ , sendo cerca de 12,5 mil  $m^2$  de área de ocupação. Para este estudo, foram selecionados quatro auditórios independentes, com características construtivas idênticas, dispostos lado a lado no centro do complexo educacional ICB, conforme mostra a planta baixa mostrada na figura 3.5. Cada auditório possui pouco mais do que 1 mil  $m^2$  de área construída, sendo esta constituída por subsolo, sala de projeção e área de acesso, além do auditório propriamente dito, cuja área é em torno de 250  $m^2$ .

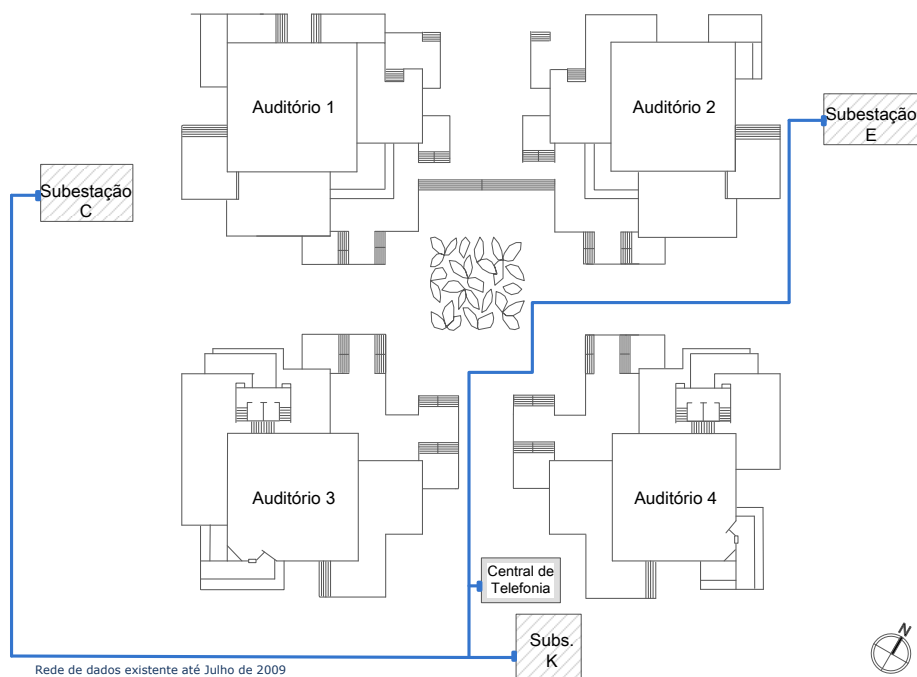


Figura 3.5: Layout da Edificação Estudada

Com capacidade para 300 pessoas, cada auditório possui um palco localizado em um de seus cantos. A plateia é organizada em fileiras de cadeira, dispostas em meio lua, em níveis ascendentes, não existem janelas, ou pontos de entrada de ventilação natural, exceto suas duas portas de entrada, localizadas ortogonalmente uma da outra. A visão do palco e dos fundos de um dos auditórios é apresentada nas figuras 3.8 e 3.9.

O fornecimento de energia elétrica para a edificação ICB é realizado em 13,8 kV por meio de três subestações abaixadoras de tensão, denominadas C, K e E (figura 3.5). São provenientes destas três subestações os circuitos de alimentação dos auditórios, sendo que o auditório 1 é alimentado pela subestação C, os de números 3 e 4 pela subestação K e o auditório 2 pela subestação E.

Os auditórios são dotados dos seguintes subsistemas de serviço: iluminação, climatização e bombeamento de água. A figura 3.6 apresenta o layout dos auditórios.

O sistema de iluminação é composto por luminárias aletadas contendo duas lâmpadas fluorescentes tubulares de 20 W cada – localizadas nos subsolos – e por luminárias de 4 lâmpadas fluorescentes tubulares de 40 W cada – situadas no interior dos auditórios de números 1, 2 e 4. Já o de número 3, reformado no ano de 2007, possui luminárias reflexivas com 2 lâmpadas fluorescentes tubulares de

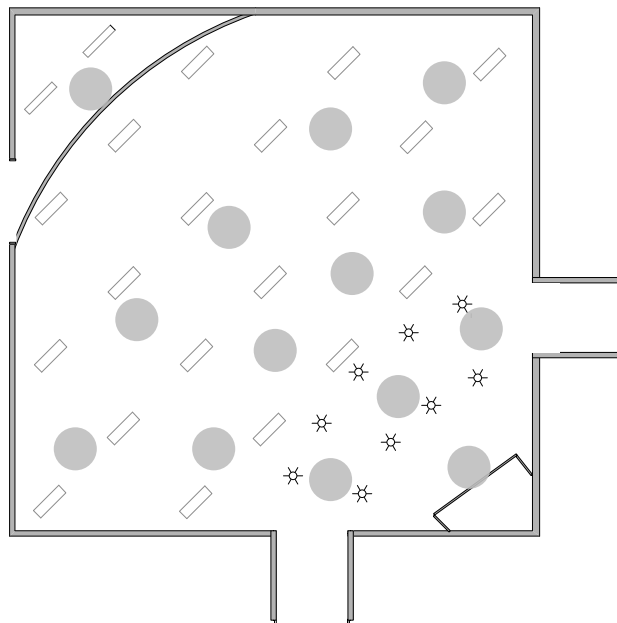


Figura 3.6: Layout dos auditórios

32 W cada, em seu interior.

O sistema de ventilação forçada de cada auditório é composto por dois conjuntos motor/ventilador localizados no subsolo dos auditórios. O layout deste sistema é apresentado na figura 3.7. Um deles destinado ao insuflamento de ar renovado no ambiente e outro para a exaustão de ar contaminado ou viciado do ambiente. O ventilador destinado ao insuflamento não possui dutos entre o ponto de coleta do ar externo e sua estrutura, sendo que as próprias paredes do subsolo canalizam o ar. Após o ventilador, o ar é direcionado, por meio de um duto para o teto do auditório. O ar é insuflado para o ambiente através de pontos de saída de ar localizados no teto. O ar de exaustão é coletado através de aberturas existentes entre os degraus das últimas três fileiras de cadeiras. A exaustão não possui dutos para a passagem de ar. Os motores do sistema de ventilação possuem 5CV cada.

Por estarem situados pouco abaixo do nível da rua e sobre um lençol freático, dois auditórios demandam um sistema de bombeamento de água para que não sejam alagados. Situação que é agravada em períodos chuvosos por se tratar de uma região com sistema de escoamento de água de chuva precário. O acionamento do sistema é realizado por meio de boias, que acionam uma bomba tipo sapo que controla o nível de água no subsolo dos auditórios.

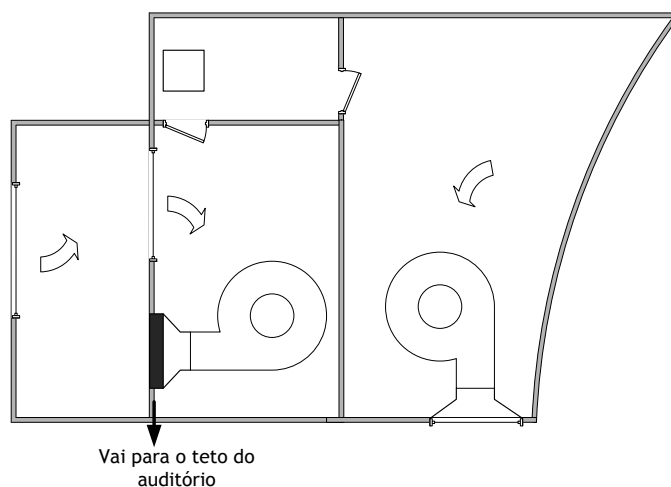


Figura 3.7: Layout do subsolo



Figura 3.8: Auditório:visão palco

### 3.2.1 Sistema de medição e monitoramento

O sistema de medição e monitoramento utilizado é o Centro de Monitoramento de Usos Finais (CMUF). O projeto CMUF é fruto de um convênio entre a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), o Grupo de Controle de Processos Industriais (da UFMG) e o Centro de Pesquisas em Energia Inteligente (do CEFET/MG). Trata-se de um sistema de medição, monitoramento, atuação e controle concebido para suprir a falta de dados setorizados de consumo energético de edificações. O



Figura 3.9: Auditório:visão fundos

método e dispositivo de medição e monitoramento são patenteados e se encontram em processo de transferência tecnológica. A descrição do sistema pode ser encontrada em suas patentes nacional Jota et al. [2008] e internacional Jota et al. [2009]. Aplicações são apresentadas em Jota et al. [2005, 2006, 2007a,b]; Batista [2006].

A plataforma CMUF consiste em uma solução de baixo custo e baixo consumo de energia desenvolvida para monitorar variáveis energéticas e ambientais via Internet, de maneira contínua, e em tempo real. Com o uso desta plataforma é possível acompanhar o desempenho de edificações de maneira setorizada.

O sistema consiste em um conjunto de microcontroladores com capacidade de realizar funções de conversão analógico-digital e comunicação. Estes microcontroladores, em conjunto com outros dispositivos eletrônicos, estão dispostos em estações que podem ter as funções de medição, atuação e/ou controle.

#### **3.2.1.1 Rede CMUF no Instituto de Ciências Biológicas**

Antes do início deste trabalho, a edificação ICB já possuía o seu consumo de energia global monitorado pelo sistema Centro de Monitoramento a Usos Finais (CMUF). Em julho de 2009, a rede CMUF foi alterada para atender às necessidades do presente estudo. A rede existente até então foi estendida até os quatro auditórios. A figura 3.5 mostra a rede CMUF antes e a figura 3.10 após o mês de julho de 2009.

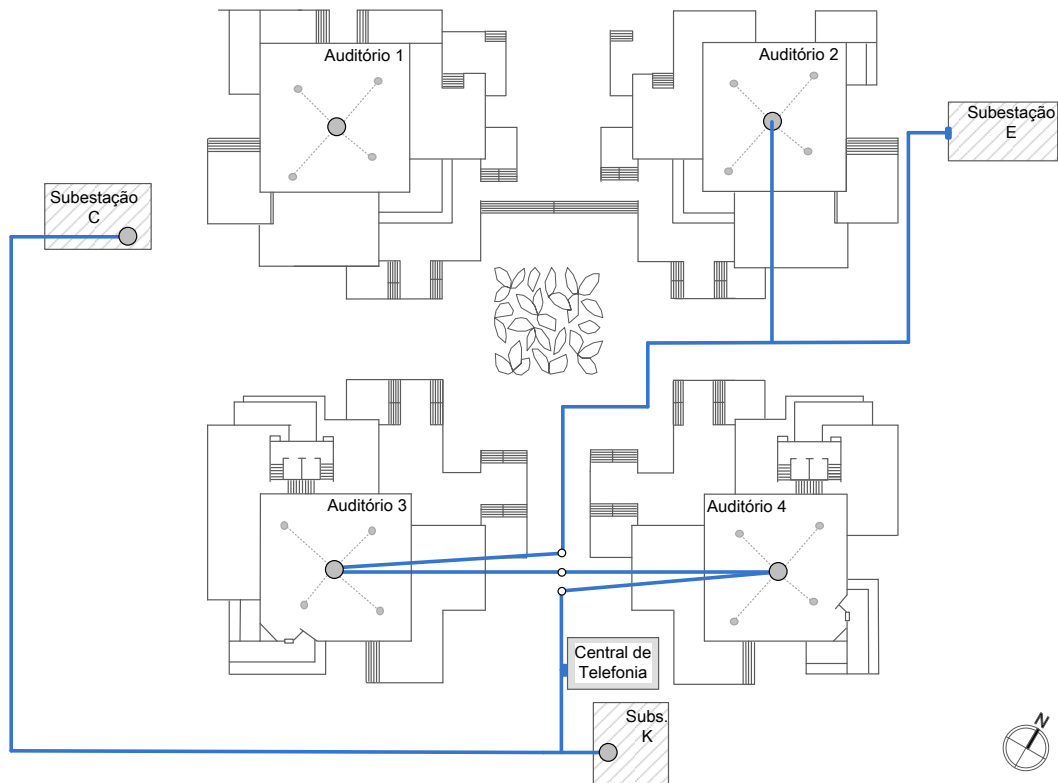


Figura 3.10: Rede CMUF - ICB

As variáveis monitoradas pelo sistema CMUF são: a corrente elétrica em cada fase das subestações E, K e C e em cada auditório; temperatura e umidade externas; e temperatura, umidade e luminosidade no interior de cada auditório. Todas as variáveis são medidas com um intervalo de amostragem de 1 min. A medição de corrente é realizada nas respectivas subestações, sendo que, em cada uma existe uma estação de medição (pontos de Nó da rede CMUF) para as medidas globais e outra para as específicas dos auditórios. Os valores de potência demandada e de consumo são calculados considerando a tensão fase-neutro de 127 V. A tabela 3.1 apresenta quais medidas elétricas são monitoradas neste estudo e sua respectiva nomenclatura.

Tabela 3.1: Relação dos dispositivos de medição

Variável	Referência	Nomenclatura
Corrente	subestação E - fase A	SE-EA
Corrente	subestação E - fase B	SE-EB
Corrente	subestação E - fase C	SE-EC
Corrente	subestação K - fase A	SE-KA
Corrente	subestação K - fase B	SE-KB
Corrente	subestação K - fase C	SE-KC
Corrente	subestação C - fase A	SE-CA
Corrente	subestação C - fase B	SE-CB
Corrente	subestação C - fase C	SE-CC
Corrente	auditório $n^*$ - fase A	$An^*$
Corrente	auditório $n^*$ - fase B	$Bn^*$
Corrente	auditório $n^*$ - fase C	$Cn^*$

(\*) A letra  $n$  se refere ao número do auditório: 1, 2, 3 ou 4.

As medidas externas de temperatura e umidade são coletadas em um dos corredores do andar térreo da edificação ICB. O local (indicado na figura 3.10) onde estão os sensores possui suas laterais abertas. Este fato o torna adequado a coleta dos dados, pois os sensores estão em ambiente externo, mas, ao mesmo tempo, em local protegido do sol e da chuva.

O ambiente interior ao auditório possui um ponto de medição de temperatura, umidade e luminosidade, que está localizado aproximadamente em seu centro e a cerca de 30 cm do teto. Os dados de luminosidade são coletados em outros quatro pontos: palco, lado direito, lado esquerdo e fundo dos auditórios. A distância dos pontos de luminosidade ao teto é de cerca de 55 cm. A figura 3.11 mostra a rede de sensores interna às instalações. O nó central dos auditórios é mostrado na figura 3.12.

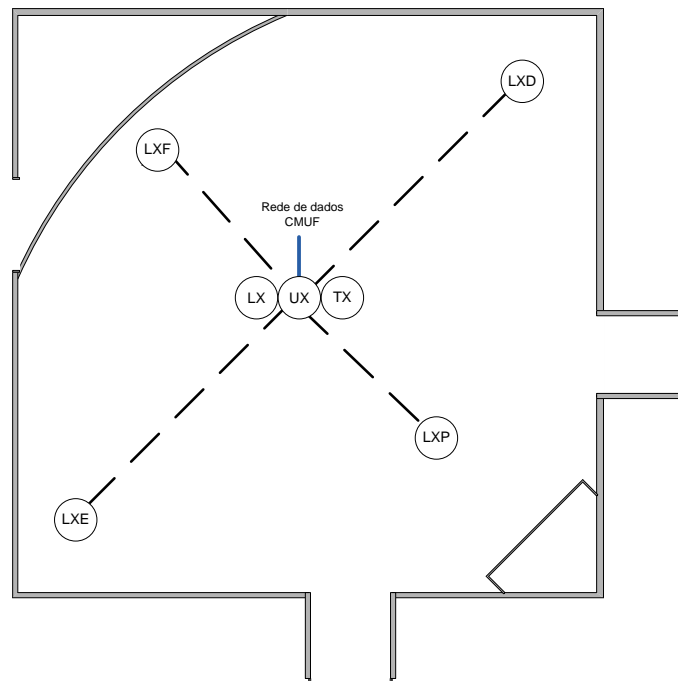


Figura 3.11: Rede CMUF - auditórios

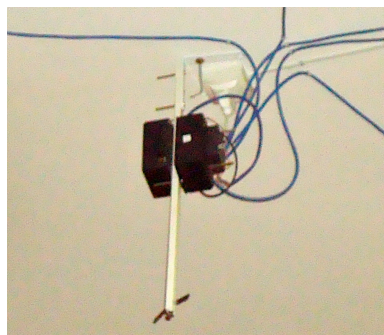


Figura 3.12: Nó de rede central dos auditórios

As medidas de luminosidade são realizadas por meio de circuito contendo um dispositivo foto-sensor do tipo resistor LDR (do inglês Light Dependent Resistor ou, em português, Resistor Dependente de Luz). Tais medidas não são rigorosamente de luminosidade, por não serem aferidas adequadamente para isso. Seria, então, mais correto chamá-las de medidas de claridade. Entretanto, acredita-se que para os propósitos deste trabalho a nomenclatura indicada seja adequada. Após serem instalados, os sensores de luminosidade foram calibrados de acordo com o valor de luminosidade, indicado por luxímetro, no plano de uso logo abaixo de cada sensor. A calibração dos sensores de luminosidade está apresentada no Anexo 1.

As medidas de temperatura são realizadas por sensores do tipo LM-35. Trata-se de um sensor de precisão que apresenta saída de tensão linear à temperatura em Celsius. De acordo com a folha dados (*datasheet*) fornecida pelo fabricante deste dispositivo, ele não necessita de qualquer calibração externa para fornecer valores com precisão de 0,25 °C em temperatura ambiente.

As medidas de umidade são coletadas por um sensor HIH-4000. Estes dispositivos foram adquiridos com calibração certificada pelo seu fabricante e, por este motivo, não foram submetidos a um processo de calibração.

A tabela 3.2 apresenta um resumo dos dispositivos de medição e a nomenclatura a ser utilizada neste estudo ao designá-los.

Tabela 3.2: Relação dos dispositivos de medição das variáveis ambientais

Variável	Referência	Nomenclatura
Temperatura	auditório $n^*$	$Tn^*$
Umidade	auditório $n^*$	$Un^*$
Luminosidade	auditório $n^*$ - centro	$Ln^*$
Luminosidade	auditório $n^*$ - palco	$LnP$
Luminosidade	auditório $n^*$ - direita	$LnD^*$
Luminosidade	auditório $n^*$ - esquerda	$LnE^*$
Luminosidade	auditório $n^*$ - fundos	$LnF^*$
Temperatura	externa	Text
Umidade	externa	Uext

(\*) A letra  $n$  se refere ao número do auditório: 1, 2, 3 ou 4.

### 3.2.2 Modelagem da edificação real pelo software EnergyPlus

Durante as etapas de Qualificação da Operação e de Qualificação do Desempenho descritas no capítulo 4, é utilizado um modelo computacional para simular o desempenho da edificação real estudada, para qual foi realizada a modelagem de um dos seus auditórios no software EnergyPlus. Este modelo, após ser calibrado e validado, também foi utilizado na etapa de validação *online* da edificação embora este não era o intuito inicial do modelo. A necessidade da utilização de dados simulados se deu por diversas dificuldades encontradas ao longo do estudo aplicado como o mau estado de ope-

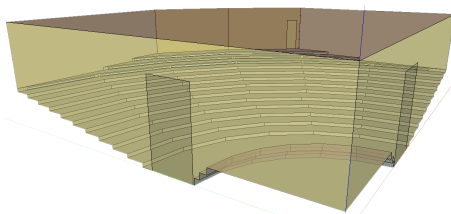


Figura 3.13: Modelo do auditório 2 no EnergyPlus

ração e manutenção que a edificação se encontrava no momento em que este trabalho foi realizado, e problemas com o sistema de monitoramento utilizado. Devido ao estado de inadequação às normas em que os auditórios se encontravam no momento em que este estudo foi realizado a edificação real foi simulada computacionalmente em dois estados de operação: atual - considerando a edificação tal como ela é - e após *retrofit* dos sistemas de climatização de ar e iluminação.

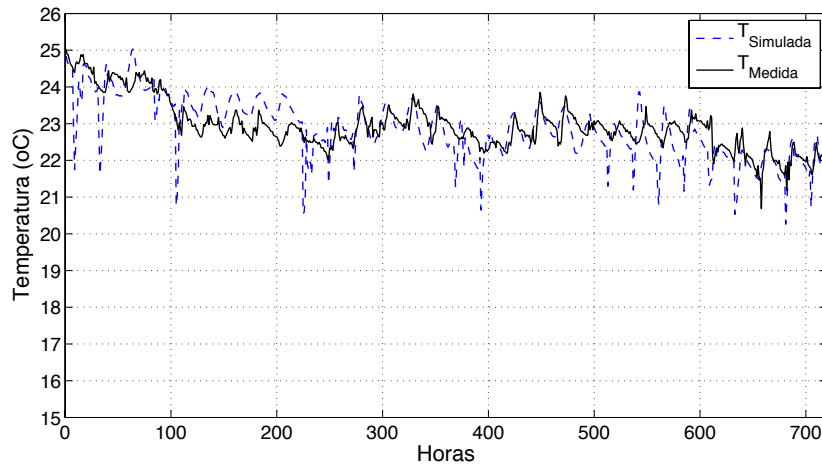
O auditório 2 da edificação ICB foi modelado pelo software EnergyPlus utilizando dados construtivos retirados de plantas e de aferições *in loco*. A figura 3.13 mostra a geometria modelada do auditório.

Para validar o modelo utilizou-se um arquivo climático formado por dados coletados pelo sistema CMUF e dados meteorológicos provenientes da estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) localizada no campus Pampulha da Universidade Federal de Minas Gerais em Belo Horizonte, mesmo local em que está a edificação do ICB. Para a validação do programa foi realizada uma análise comparativa entre os dados coletados durante o mês de abril de 2011 com os simulados para este período. Para isto, os dados de ocupação (existência ou não de pessoas) aferidos durante esse período foram inseridos manualmente no programa. Como não havia dados quantitativos com relação à ocupação, foi considerada uma ocupação média nos momentos em que foi verificada a existência de pessoas no auditório. A descrição detalhada dos dados de entrada do modelo computacional é feita no anexo 2.

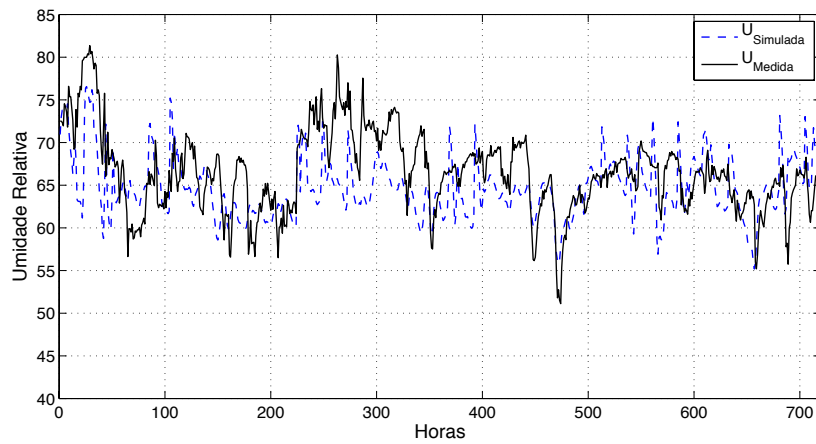
A figura 3.14 mostra os dados medidos e simulados para a temperatura e umidade do auditório durante o mês utilizado para a validação do modelo.

A tabela 3.1 mostra o erro médio absoluto e o erro médio quadrático computados.

$$EMA = \sum_i^n |x_i - \hat{x}_i|/n \quad (3.1)$$



(a) Temperatura



(b) Umidade

Figura 3.14: Dados de validação do modelo do auditório 2

$$EMQ = \sum_i^n (x_i - \hat{x}_i)^2 / n \quad (3.2)$$

Tabela 3.3: Validação do modelo

Variável	EMA	EMQ
Temperatura	0,44	0,59
Umidade	3,93	4,94

As rotinas de uso do auditório foram geradas a partir do padrão de ocupação mostrado na figura 3.15. Como dito anteriormente, foi gerada uma aleatoriedade neste uso em função do horário de início / término das aulas e do número de pessoas presentes.

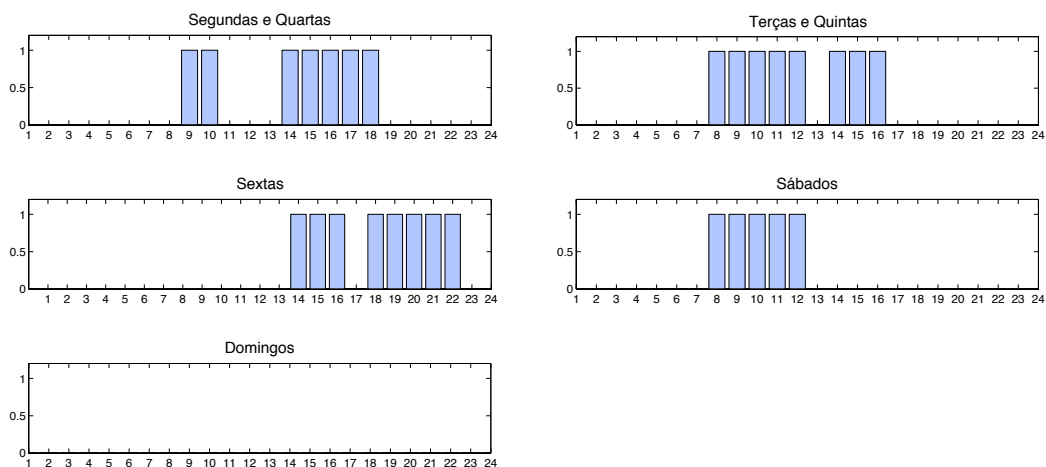


Figura 3.15: Padrões de ocupação simulados para o auditório 2

Devido às condições em que os auditórios se encontravam no momento em que este estudo foi realizado, após a validação do modelo, ele foi modificado considerando um *retrofit* nos sistemas de iluminação e climatização artificial do auditório. O dimensionamento dos sistemas simulados é apresentado no Anexo 3.

### 3.3 Considerações finais

A edificação real monitorada foi descrita por meio de dados de levantamento de campo. Este estudo exploratório mostrou que, no momento em que os dados foram coletados, os auditórios operavam em condições aquém às determinadas por normas. Foram propostas, então, edificações conceituais modeladas no software EnergyPlus, a serem utilizadas para exemplificar e validar a metodologia proposta. A ferramenta de software utilizada para a simulação de edificações se mostrou capaz de replicar o comportamento do auditório 2. No entanto, por se objetivar o estudo da operação da edificação foi necessário desenvolver uma plataforma para a inserção de aleatoriedade nas rotinas de uso a serem inseridas no programa. Além disso, foram desenvolvidos modelos de exemplo de caso, um comercial e outro residencial, para permitir o estudo e a demonstração das proposições.

Os passos metodológicos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho consistiram em etapas iniciais de revisão bibliográfica a partir da qual foram definidos os conceitos a serem defendidos, os objetivos específicos do trabalho e suas limitações técnicas. A partir destas definições e da bibliografia estudada foram propostos os passos metodológicos a serem seguidos para a validação de uma

---

edificação. As proposições da tese foram testadas nas edificações simuladas - descritas neste capítulo. A partir dos resultados encontrados nesta etapa de testes foram realizados ajustes nas proposições até que uma estrutura final foi definida. Esta estrutura foi, então, aplicada sobre a edificação real estudada - também descrita neste capítulo.

## Capítulo 4

# Metodologia Proposta para Validação de Edificações

Neste capítulo são descritos os procedimentos metodológicos para proceder a validação ampla *online* de edificações. Para isto, é feita uma releitura dos passos metodológicos da validação para sua aplicação em edificações. Além da definição dos passos a serem realizados são também definidas as análises a serem realizadas, considerações a serem feitas e a infra-estrutura necessária para a aplicação da metodologia proposta. Por fim são descritas as edificações de testes utilizadas para a aplicação e validação da metodologia proposta.

### 4.1 A validação da operação de edificações e suas delimitações

A metodologia proposta considera as edificações como um sistema complexo dentro do qual consome-se energia elétrica para promover as condições de conforto necessárias. A validação é portanto realizada em edificações em operação e considerando as variáveis consideradas chaves para a determinação das condições de conforto internas às edificações e de seu consumo energético.

Conforme exposto no capítulo de Revisão Bibliográfica diversos aspectos determinam o conforto dos usuários das edificações. Este trabalho avalia o desempenho térmico e lumínico de cada ambiente interno à edificação em função da temperatura e da umidade internas e da iluminância média determinada para o ambiente. O desempenho térmico é avaliado em função do conforto descrito pelo

Diagrama de Givoni, apresentado no capítulo anterior, e considerado o método mais adequado para o clima brasileiro [Lamberts et al., 1997; Assis, 2001]. O desempenho lumínico é avaliado em função da iluminância mínima determinada pelo norma brasileira ABNT NBR ISO/CIE 8995-1.

Já o consumo energético das edificações é avaliado de acordo com: (1) o contrato de fornecimento de energia existente entre a edificação e a concessionária energética, mais especificamente com a demanda contratada pela edificação; e (2) o perfil de consumo energético característico da edificação. Cada edificação possui um perfil típico de consumo que é determinado pelo tipo de atividades ali desenvolvidas, pelo modo com que são operadas, e pelos sistemas e equipamentos existentes. Ao monitorar este perfil é possível identificar e avaliar o modo com que a edificação é operada, viabilizando práticas de validação *online*.

## 4.2 Etapas da validação de operação de edificações

A metodologia proposta, representada no fluxograma da figura 4.1, é dividida em duas grandes etapas. Uma primeira etapa a ser realizada *offline* e uma segunda etapa a ser realizada de maneira contínua denominada *online*. É importante frizar que o termo *online* significa que esta etapa da validação é realizada de modo automático pelo sistema especialista desenvolvido para este fim, e intervenções são realizadas *just-in-time*.

A etapa *offline* é subdividida nas etapas de qualificação. As duas primeiras etapas consistem na análise sistêmica da edificação, sendo que a primeira (Qualificação da Instalação - QI), incorpora a etapa de pré-qualificação identificando as particularidades da edificação em análise para determinar o plano de validação. Nesta primeira etapa são avaliados os diversos sistemas que compõem a edificação, identificando equipamentos existentes e seus respectivos estados de operação e manutenção. Com base nestes dados a edificação é modelada em um software de simulação energética e térmica. O software viabiliza análises de desempenho da edificação, em diferentes condições de operação, proporcionando um maior entendimento das dinâmicas existentes na mesma. Estas análises são as realizadas na etapa de Qualificação da Operação (QO). Nesta fase, é estudado o modo com que as variáveis de consumo e ambientais interagem e como influenciam as condições de conforto do edifício. Após a compreensão da edificação de acordo com seus componentes e dinâmicas, é analisada a performance energética e ambiental da edificação. Nesta etapa, de Qualificação do Desempenho

(QD), o comportamento da edificação ao longo de um ano é simulado. Esta simulação permite avaliar como a operação da edificação interfere em sua performance.

Ao final das etapas de qualificação, pode ser iniciada a avaliação da edificação em tempo real na etapa denominada de 'Validação da Operação Edificação' ou 'Validação *Online* da Operação da Edificação'. Neste momento, inicia-se o monitoramento das características em análise. Caso não sejam detectados comportamentos considerados como não adequados, são gerados relatórios históricos informando este fato. No entanto, caso estes sejam encontrados, duas situações podem ocorrer: a geração de alarmes e/ou a atuação para correção do problema, ainda que por meio de orientações de procedimentos. Para que seja possível atuar sobre os sistemas é necessário que as edificações sejam dotadas de sistemas de controle e automação.

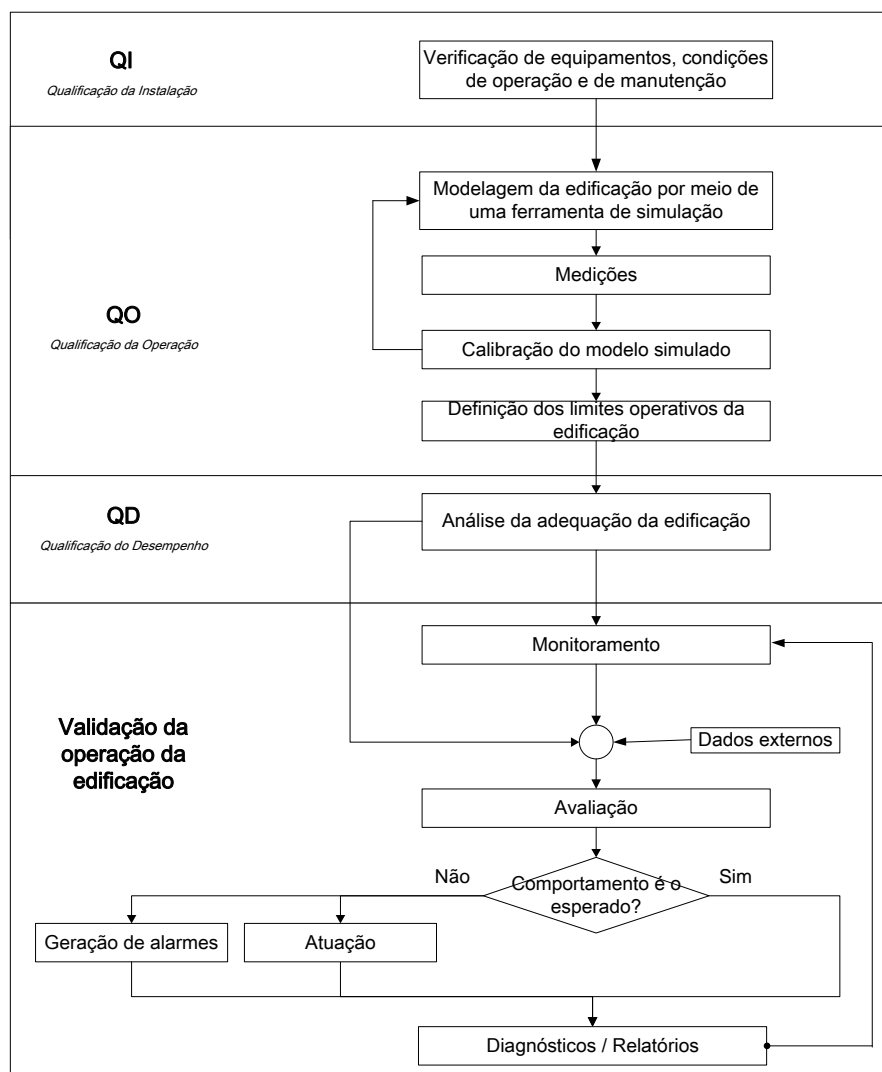


Figura 4.1: Fluxograma da validação

As seções subsequentes apresentam as etapas da validação e os procedimentos propostos para sua aplicação com o intuito desejado.

### 4.3 Qualificação da instalação (QI)

A qualificação de edificações, em termos do seu desempenho térmico, lumínico e energético se inicia com uma auditoria da edificação analisada. Esta auditoria consiste na coleta de dados construtivos e operacionais da edificação e dos sistemas existentes e não se difere muito das práticas de auditoria energética<sup>1</sup>.

Nesta etapa da validação, a edificação deve ser averiguada em termos de seus sistemas e equipamentos consumidores de energia, do modo em que é operada e de seu desempenho. A qualificação da instalação requer a identificação e a documentação dos seguintes itens:

- Documentação de engenharia: plantas da edificação, lista de equipamentos instalados e os respectivos manuais, desenhos do projeto de instalações elétricas, diagramas e malhas de controle, arquitetura do sistema de automação, programas de controle e automação, entre outros;
- Documentação de operação e manutenção: cadernos de operação, registros de ocorrência, atividades de conservação e limpeza (espaços internos e externos), programação de manutenção, identificação de responsabilidades da equipe de gestão, operação e manutenção, critérios de operação.

Ao final da QI deve ser feito, ou atualizado caso exista, o Manual de Uso, Operação e Manutenção da edificação conforme descrito na norma NBR 14037 - "Manual de operação, uso e manutenção das edificações - Conteúdo e recomendações para elaboração e apresentação". O manual deve conter:

- Informações com relação às características construtivas da edificação contendo a descrição dos materiais utilizados e seus fornecedores.
- Informações dos sistemas de serviço existentes, e.g. sistema de iluminação, de climatização, automação e de segurança, contendo informações sobre todos os componentes e modo de operação e limpeza.

---

<sup>1</sup>Ver Krarti [2000] ou Thumann e Younger [2003]

- Informações de limpeza e uso do imóvel contendo cronogramas e modos de limpeza de revestimentos, pisos, coberturas, jardins, esquadrias e vidros.
- Informações de manutenção contendo um programa de manutenção preventiva.

#### 4.4 Qualificação da operação (QO)

A qualificação da operação consiste no estágio exploratório do processo de validação, durante o qual o comportamento das variáveis de interesse é analisado por meio de medições *in loco* e por simulações computacionais. Objetiva-se o conhecimento sistêmico da edificação em análise e de suas dinâmicas.

Inicialmente, são realizadas medições *in loco* de modo a avaliar as variáveis energéticas e ambientais e o modo com que estão relacionadas. Estas relações são avaliadas em função do coeficiente de correlação de Pearson<sup>2</sup>.

A partir dos dados coletados na etapa de QI e no conhecimento adquirido da dinâmica dos sistemas de acordo com os dados de correlações a edificação é modelada e calibrada em um software de simulação térmica e energética. Este tipo de software<sup>3</sup> permite prever e estimar o consumo de energia, o custo e o impacto ambiental provocado por diferentes alternativas construtivas, sistemas e modos de operação. Eles são usualmente utilizados por arquitetos durante as etapas de projeto de edificações ou em processos de certificação. O uso da simulação no processo de validação, no entanto, não objetiva avaliar a edificação em função de suas características construtivas e sistemas existentes. A meta é analisar a edificação existente diante de diferentes condições operacionais de modo a estabelecer as capacidades da edificação e as melhores práticas de operação. Caso já exista um modelo computacional da edificação realizada durante seu projeto ou certificação, é necessário fazer uma adequação deste modelo de acordo com os dados coletados na QI. Nesta etapa são realizados testes *in loco* para a calibração do modelo e, uma vez calibrado, o modelo é validado comparando o comportamento das variáveis ambientais e de consumo reais com as simuladas.

Após a validação do modelo de simulação, estudos planejados são conduzidos de forma a identificar as condições limítrofes para a operação da edificação dentro das quais a edificação - propriamente

---

<sup>2</sup>Este coeficiente é capaz de medir o grau de relação entre duas variáveis. O índice varia entre -1 e 1, sendo que o valor -1 representa uma perfeita correlação negativa e o valor 1 representa uma perfeita correlação positiva. O valor 0 representa que os dados não estão correlacionados.

<sup>3</sup>Ver capítulo 2.

operada - é capaz de prover condições mínimas de conforto. Caso a edificação, como esteja construída, não for capaz de produzir um ambiente adequado, independentemente da situação operacional, a QO identifica os gargalos para esta situação.

### **Exemplo de aplicação**

Para exemplificar as análises realizadas na QO, considere o exemplo de prédio comercial apresentado na capítulo 3. Os dados apresentados nesta seção se referem à Zona 1 do primeiro andar do prédio e devem ser realizadas para todas as zonas térmicas existentes. Para esta edificação é considerada uma ocupação planejada de  $6 \text{ m}^2/\text{pessoa}$  nas Zonas 1 e 3.

Inicialmente avalia-se a necessidade do uso do sistema de climatização existente para cada período do ano. Para isso foi simulado o comportamento térmico da edificação ao ser operada com ventilação natural e com a ocupação planejada. A figura 4.2 mostra os valores encontrados para temperatura e umidade internas a Zona 1 plotados sobre o Diagrama Bioclimático de Givoni para Belo Horizonte<sup>4</sup>. Este diagrama, permite saber se estes valores estão ou não dentro da região delimitada como sendo de conforto. Verifica-se que nestas condições não é necessário utilizar o sistema de climatização de ar durante praticamente todo o inverno (figura 4.2 *b*) e em grande parte do período de meia estação (figura 4.2 *c*). Entretanto esse sistema deve ser utilizado em grande parte do verão (figura 4.2 *a*).

---

<sup>4</sup>Ver capítulo 2.

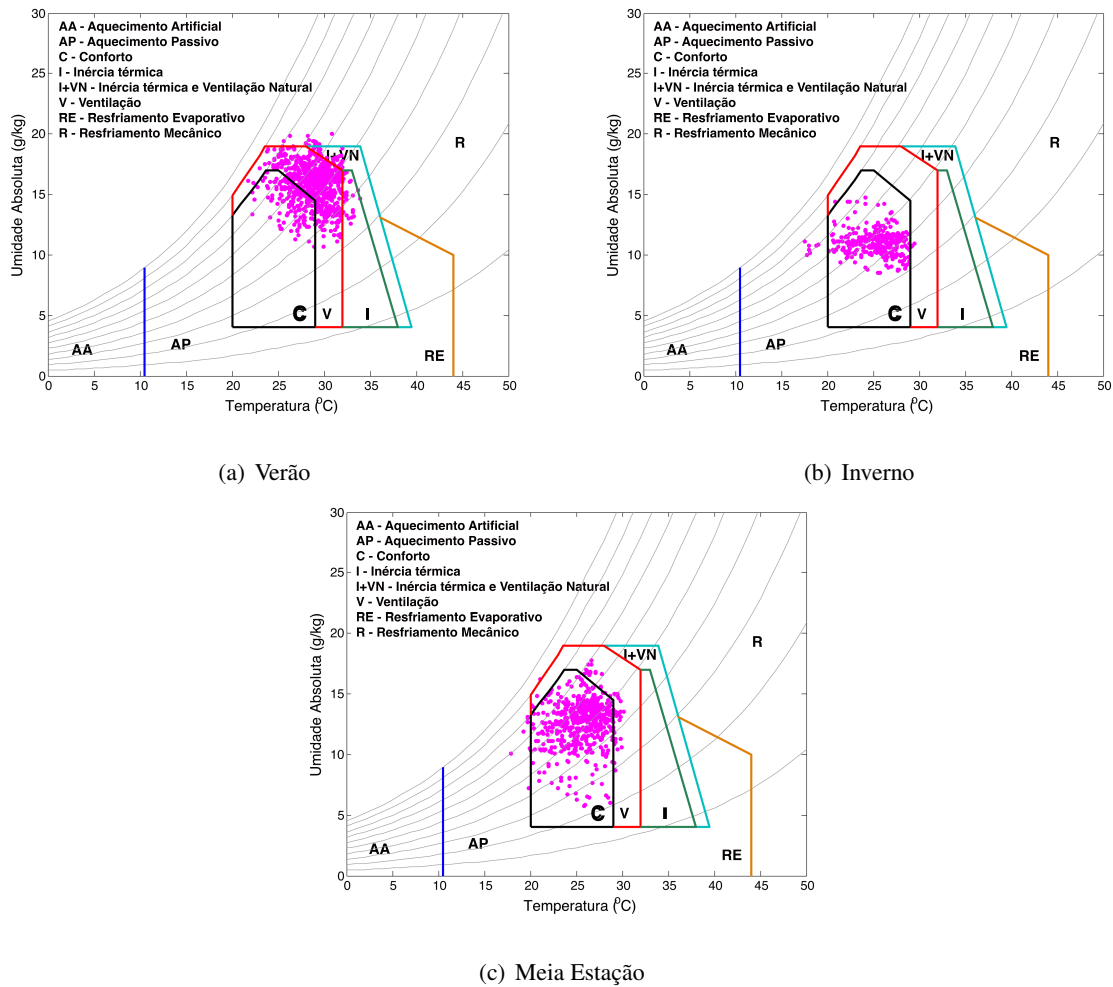


Figura 4.2: Gráfico de conforto do prédio comercial operando com ventilação natural e ocupação de  $6 \text{ m}^2/\text{pessoa}$

Após esta primeira análise verificam-se as condições de temperatura e umidade para avaliar o conforto térmico em diferentes cenários de ocupação. A figura 4.3 mostra o Diagrama Bioclimático de Givoni para os meses de inverno com a edificação operando com ventilação natural e com as ocupações de  $4 \text{ m}^2/\text{pessoa}$  (figura 4.3 a) e  $2 \text{ m}^2/\text{pessoa}$  (figura 4.3 b). A figura 4.3 mostra a degradação das condições de conforto ao se aumentar a concentração de pessoas (diminuir a relação  $\text{m}^2/\text{pessoa}$ ). A análise da figura mostra que uma ocupação maior do que a de  $4 \text{ m}^2/\text{pessoa}$  compromete, em muito, a satisfação térmica dos usuários quando a edificação opera com ventilação natural.

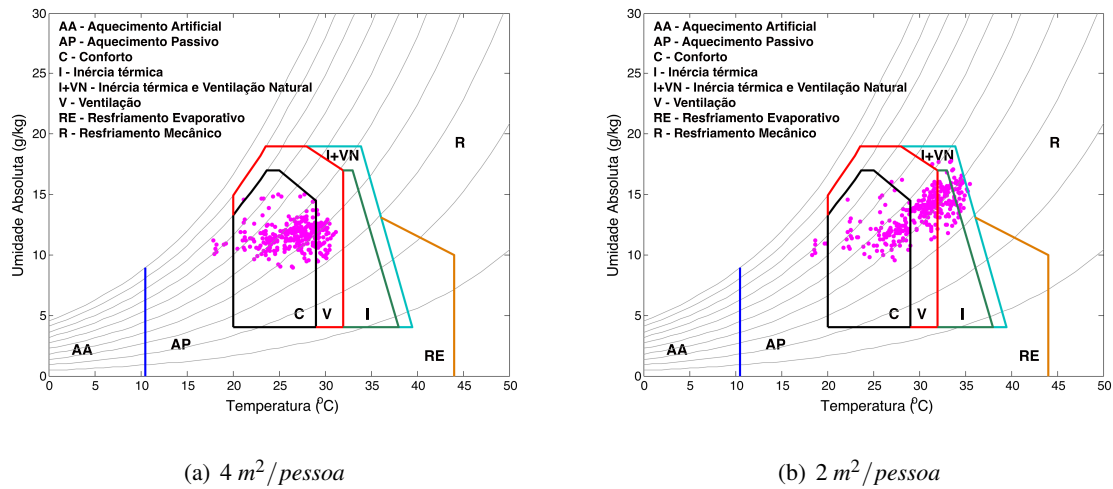


Figura 4.3: Gráfico de conforto do prédio comercial operando com ventilação natural no período de inverno

Já ao avaliar a edificação operando nas mesmas condições de ocupação, mas com o sistema de condicionamento do ar ligado, verifica-se que as condições de conforto são mantidas mesmo em períodos de verão para as ocupações de  $4 \text{ m}^2/\text{pessoa}$  e  $2 \text{ m}^2/\text{pessoa}$ . No entanto, ocupações superiores são inadmissíveis como mostrado na figura 4.4.

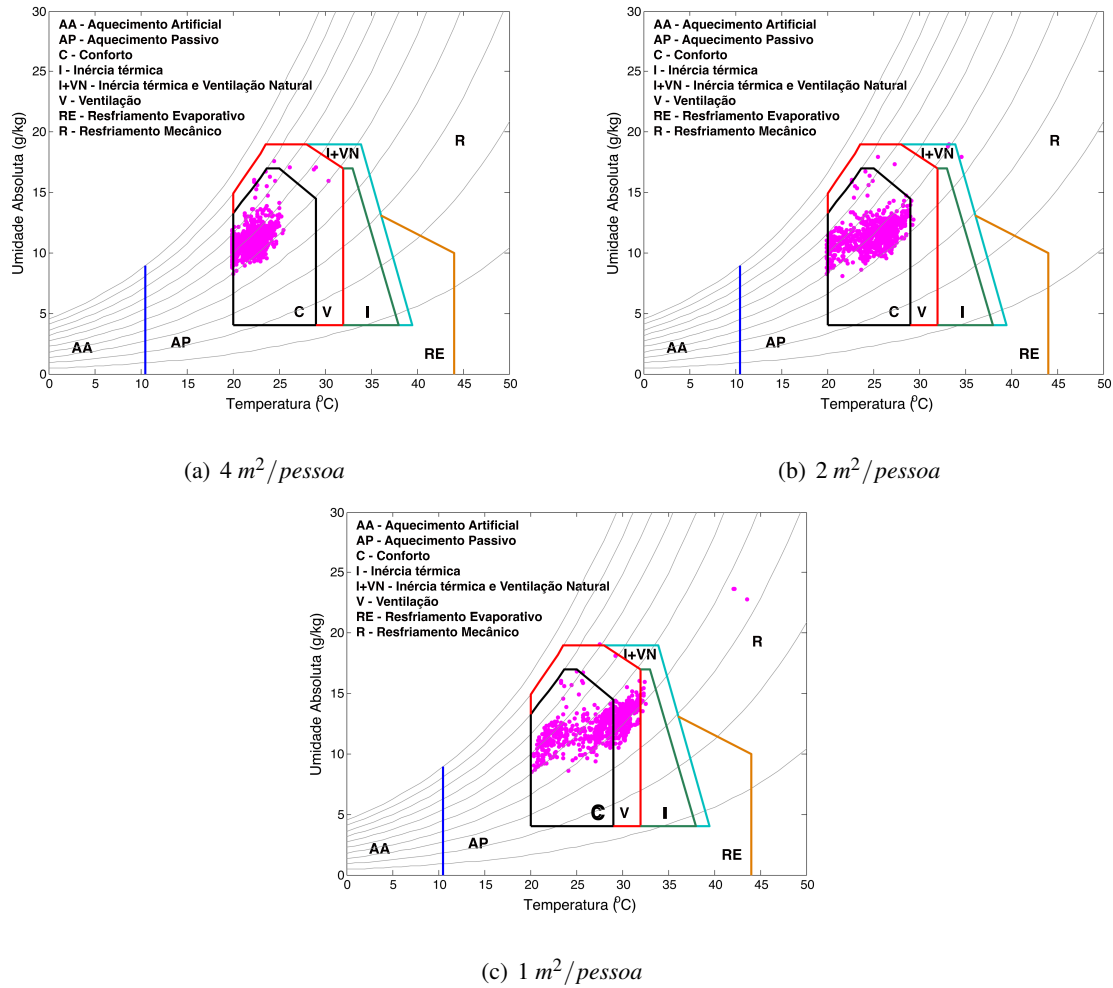


Figura 4.4: Gráfico de conforto do prédio comercial operando com climatização artificial no período de verão

De acordo com as simulações realizadas, uma diretriz geral de operação pode ser inserida no manual da edificação informando, de acordo com o período do ano e com a taxa de ocupação, se a edificação é capaz ou não de operar na região estendida de conforto. Estes dados podem ser apresentados como mostra a tabela 4.1 em que são mostradas as ocupações planejadas e limítrofes das regiões de conforto.

Tabela 4.1: Conforto térmico e condições operativas para o exemplo de prédio comercial

Operação com Ventilação Natural			
Ocupação	Verão	Inverno	Meia Estação
4 m <sup>2</sup> /pessoa	-	X	X
6 m <sup>2</sup> /pessoa	-	X	X
Operação com Climatização Artificial			
Ocupação	Verão	Inverno	Meia Estação
2 m <sup>2</sup> /pessoa	X	X	X
4 m <sup>2</sup> /pessoa	X	X	X
6 m <sup>2</sup> /pessoa	X	X	X

## 4.5 Qualificação do desempenho (QD)

A Qualificação do Desempenho é realizada de modo a avaliar quantitativamente, dentro das condições operativas definidas pela QO, a adequação da edificação em relação a normas, padrões ou contratos. Para isso três índices de adequação da edificação são propostos:

- **Índice de Adequação Térmica:** indica a adequação da edificação de acordo com a Carta de Conforto de Givoni.
- **Índice de Adequação Lumínica:** indica a adequação da edificação à norma ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 .
- **Índice de Adequação de Demanda:** indica a adequação da edificação ao contrato firmado com a concessionária de energia.

Os índices são calculados com base nos dados simulados para a edificação e passam a ser uma referência do desempenho máximo possível para a mesma considerando suas características construtivas e os sistemas e equipamentos existentes. A cada ano estes índices são calculados novamente em função de dados medidos. Caso os índices se depreciem consideravelmente considera-se que a edificação perdeu sua adequação contra padrões e é necessário iniciar novamente o processo de validação da mesma.

#### 4.5.0.1 Índice de adequação térmica

O índice de adequação térmica da edificação indica a percentagem de tempo em um ano em que as condições de conforto térmico de um ambiente estiveram dentro dos limites da zona de conforto de Givoni. O valor é computado por ambiente e o índice global da edificação é a média dos índices dos diversos ambientes existentes.

A verificação de adequação dos valores medidos para temperatura e umidade em um dado instante de tempo é realizada automaticamente por um algoritmo baseado do Método de Interseção de Ray que é derivado no Teorema da Curva de Jordan [Santos, 1994]. Este algoritmo verifica se o par ordenado  $(t_P, u_P)$  medido no instante de tempo  $P$  está dentro do polígono que descreve a região de conforto da Carta de Givoni.

O Método de Interseção de Ray consiste em desenhar um segmento de reta  $r$  qualquer a partir do ponto a ser testado e contar o número de interseções do segmento com as arestas do polígono (Figura 4.5). Um número ímpar de cruzamentos significa que o ponto é interno ao polígono, um número par significa que o ponto está externo ao polígono. Caso algum vértice ou aresta do polígono pertença ao segmento de reta  $r$ , basta realizar a análise com um outro ponto muito próximo ao ponto desejado.

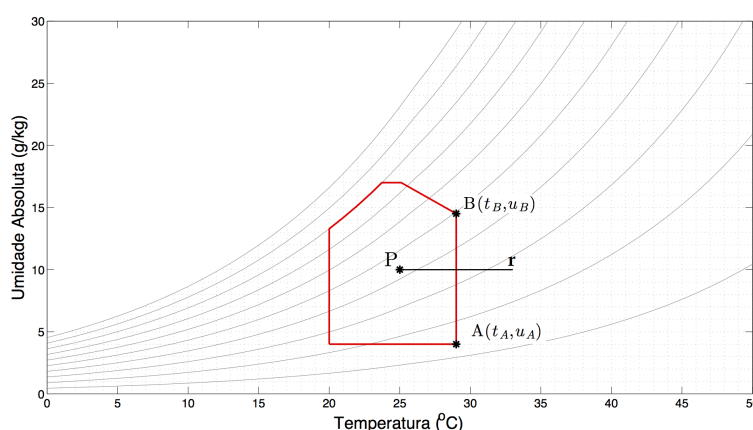


Figura 4.5: Verificação da posição de um ponto com relação a um polígono

Um exemplo é ilustrado na figura 4.5. Para verificar se o ponto  $P$  pertence a região de conforto o seguinte algoritmo é implementado:

1. É inicializado um contador com o valor 0 (zero).

2. São selecionados dois pontos ( $A$  e  $B$ ) de vértices das arestas da zona de conforto. Estes pontos são selecionados de forma que o ponto  $A$  seja sempre o de menor ordenada.
3. É verificado se a umidade do ponto em teste é a mesma dos pontos  $A$  ou  $B$ , ou seja, se a umidade é um ponto de vértice do polígono que descreve a zona. Caso seja, um valor pequeno ( $\epsilon\epsilon = e^{-4}$ ) é adicionado à umidade daquele ponto.
4. É verificado se a umidade do ponto em teste é inferior à da extremidade inferior da aresta ou se é superior à extremidade superior da aresta. Caso seja, sabe-se que a reta  $r$  não possui interseção com esta aresta e passa-se a avaliar uma nova aresta.
5. É verificado se a temperatura do ponto em teste é maior do que a máxima temperatura descrita no segmento  $AB$ . Caso seja, o ponto está a direita da aresta e não existe interseção. Passa-se a avaliar uma nova aresta.
6. É verificado se a temperatura do ponto em teste é menor do que a mínima temperatura descrita pelo segmento  $AB$ . Caso seja, o ponto está a esquerda da aresta e existe interseção. Neste caso o contador é acrescido de uma unidade.
7. Caso a temperatura do ponto em teste seja igual a temperatura de um dos vértices da aresta verifica-se:
  - se a temperatura em  $A$  é diferente da temperatura em  $B$ . Caso seja, é computado o coeficiente angular da reta  $AB$ . Este valor é guardado em uma variável auxiliar denominada  $aux1$ . Caso não seja, um número muito grande é armazenado nesta variável auxiliar
  - se a temperatura em  $A$  é diferente da temperatura do ponto em teste. Caso seja, é computado o coeficiente angular da reta  $AP$ . Este valor é guardado em uma variável auxiliar denominada  $aux2$ . Caso não seja, um número muito grande é armazenado nesta variável auxiliar.
  - se o coeficiente angular da reta  $AP$  for maior ou igual ao da reta  $AB$ . Caso seja, a reta  $AP$  está à esquerda da reta  $AB$  e existe interseção entre  $r$  e  $AB$ . Neste caso o contador é acrescido de uma unidade.
8. Os passos 2 a 7 são repetidos até que todas as arestas do polígono sejam testadas. Verifica-se então se o contador possui valor par ou ímpar. Caso seja ímpar o ponto  $P$  é interno à região de conforto.

Esta análise é realizada para todo o ano de simulação e a porcentagem de tempo em que o ponto esteve em conforto é computado. Nesta etapa a análise é realizada *offline*, mas na fase de validação *online* ela pode ser feita *online*. Ao final de cada ano o Índice de Adequação do Conforto Térmico para aquele ano é armazenado e o índice corrente é zerado.

### Exemplo de aplicação

Os valores do Índice de Adequação Térmica para o exemplo de caso residencial apresentado no capítulo 3 são mostrados na tabela 4.2. Os valores foram computados durante o período de um ano considerando duas condições: (1) a edificação operando com ventilação natural e (2) a edificação climatizada artificialmente.

Tabela 4.2: Índice de adequação térmica para o exemplo de caso residencial desconsiderando ocupação

Ambiente	Ventilação Natural	Climatização Artificial
Quarto	44,5%	77,7%
Sala	47,6%	87,1%
Cozinha	43,9%	34,0%
Banheiro	17,9%	28,4%
Média	38,5%	56,8%

O cálculo do índice de adequação foi aferido considerando a existência de pessoas nos ambientes, ou seja a real necessidade de se climatizar os ambientes. A tabela 4.3 mostra os valores obtidos para este caso.

Tabela 4.3: Índice de adequação térmica para o exemplo de caso residencial considerando ocupação plena

Ambiente	Ventilação Natural	Climatização Artificial
Quarto	26,2%	86,0%
Sala	30,1%	95,6%
Cozinha	24,7%	33,8%
Banheiro	1,9%	28,4%
Média	20,7%	61,0%

A discrepância dos valores obtidos nas simulação em que se considerou a existência de ocupação para aqueles obtidos sem ocupação mostra a importância desta informação ao avaliar o conforto térmico de edificações.

#### 4.5.0.2 Índice de adequação lumínica

O índice de adequação lumínica da edificação indica a porcentagem de tempo em que a iluminação natural provém, por si só, a iluminância necessária para o ambiente segundo a norma ABNT NBR ISO/CIE 8995:2013. O valor é computado por ambiente e o índice global da edificação é a média dos diversos ambientes existentes. De acordo com a norma ABNT NBR 15215-4 o número mínimo de pontos necessários para a verificação da iluminação natural em um ambiente é dada pela tabela 4.4.

Tabela 4.4: Quantidade mínima de pontos a serem medidos. Fonte: ABNT NBR 15215-4

$k$	Número de Pontos
$k < 1$	9
$1 \leq k < 2$	16
$2 \leq k < 3$	25
$k \geq 3$	36

Sendo  $k$  calculado pela equação 4.1.

$$k = \frac{C \cdot L}{H_m \cdot (C + L)} \quad (4.1)$$

Onde:  $L$  é a largura do ambiente, em metros,  $C$  é o comprimento do ambiente, em metros, e  $H_m$  é a distância vertical, em metros, entre a superfície de trabalho e o topo da janela.

Os pontos devem ser uniformemente distribuídos pelo ambiente e a iluminância média para cada ambiente será a média aritmética dos valores encontrados em todos os pontos medidos.

#### Exemplo de aplicação

Considere o exemplo de caso residencial apresentado na capítulo 3. A análise de luminosidade é realizada para a sala da edificação considerando um plano paralelo ao teto a 0,75 m acima do chão. Em função da geometria da sala, de acordo com a NBR:15215-4, são necessários 9 pontos de medição como mostrado na figura 4.6.

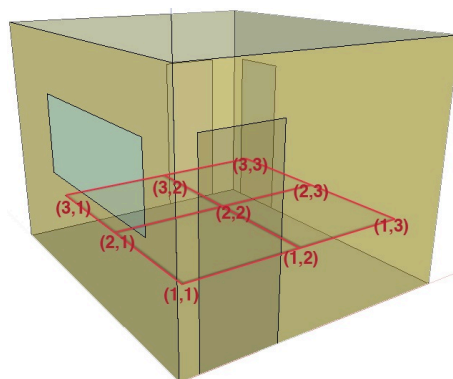


Figura 4.6: Mapa de Iluminância do caso exemplo residencial.

O índice de adequação foi calculado para cada um dos pontos de medição presentes na sala da edificação - mostrados na figura 4.6. A tabela 4.5 mostra o índice computado. Este índice indica a percentagem do tempo em um ano que a iluminação natural provém por si só a iluminância necessária para o ambiente. Por se tratar de iluminação natural este índice foi computado considerando o intervalo de 7 às 17 horas para todos os dias do ano. Horários noturnos foram desconsiderados.

Tabela 4.5: Índice de adequação lumínica para a sala do caso exemplo residencial

Ponto	IAL
(1,1)	94,5%
(1,2)	79,1%
(1,3)	55,7%
(2,1)	89,8%
(2,2)	74,1%
(2,3)	53,7%
(3,1)	91,2%
(3,2)	76,5%
(3,3)	55,6%

A substancial diferença nos valores do índice de adequação lumínica calculado para cada um dos pontos de medição sugere que, por se tratar de um índice de adequação, não se considere o valor médio de iluminância para o ambiente (que neste caso seria o 71,1%), como indicado pela norma, e sim o pior caso para o ambiente, no caso 45,6%. A análise conforme indicado pela ABNT é adequada para medições *offline* mas difícil de ser realizada no dia-a-dia de edificações. Sugere-se a medição *online* da iluminância no ponto de pior caso encontrado na QD.

### 4.5.0.3 Índice de adequação à demanda contratada

O índice de adequação da demanda de energia da edificação indica a porcentagem de tempo em um ano em que a demanda medida foi inferior à contratada pela edificação. Este índice mede a adequação do uso dos sistemas que consomem energia em função do contrato de energia da instalação. Caso não ocorram ultrapassagens de demanda durante o ano ou caso a edificação não possua contrato de demanda o índice será de 100%.

## 4.6 Validação *online* da operação da edificação

Denominou-se validação *online* da operação da edificação o processo de monitoramento, análise, diagnóstico e otimização (caso seja dotado de sistemas de controle) das características de desempenho em análise. Esta etapa se inicia no monitoramento das variáveis de interesse: temperatura, umidade, luminosidade e consumo energético. Os valores coletados são tratados e avaliados de acordo com as técnicas apresentadas nesta seção. O objetivo é determinar métodos *online* de avaliação da performance da edificação que apresentem baixo custo e baixa complexidade computacional. Para isto é proposto um sistema de monitoramento e validação descrito na seção seguinte.

### 4.6.1 Sistema de Monitoramento e Validação (SMV)

O sistema de monitoramento e validação *online* (SMV)<sup>5</sup> desenvolvido é capaz de automaticamente e continuamente medir, analisar e reportar o uso de energia, o conforto térmico e luminoso. O sistema, mostrado na figura 4.7, é composto por dois níveis hierárquicos que possuem as seguintes funcionalidades:

- Nível de Instrumentação e Controle ou Nível Inferior: neste nível estão os sensores e dispositivos de aquisição e processamento de dados, como ilustrado na figura 4.7 (identificados como SMV1, SMV2, SMVN). Estes dispositivos SMV operam como escravos coletando dados em uma estrutura multicanal, tal como apresentado nas seções seguintes. Os dispositivos SMV, armazenam dados de sensores locais e fornecem a sua própria interpretação preliminar dos dados

<sup>5</sup>Inicialmente o sistema foi denominado *Monitoring and Targeting System* como em [Braga et al., 2013]. Entretanto ao se expandir o conceito para a validação da edificação, avaliando não só o consumo mas sua capacidade de prover condições de conforto, o nome foi modificado para Sistema de Monitoramento e Validação Online.

ali armazenados. Todos os dispositivos escravos SMV operam de forma autônoma, mas são coordenados por um computador de supervisão através de uma rede local (ver figura 4.7).

- **Nível de Supervisão ou Nível Superior:** este nível é composto por um computador pessoal executando um sistema de supervisão, e.g. configurado em um sistema SCADA<sup>6</sup> capaz de comunicar com todos os dispositivos SMV através da rede local. O aplicativo de supervisão coordena e concentra a informação distribuída de modo a manter vigilância em tempo real em toda a planta e para gerar uma validação de dados integrada, interpretando o comportamento de toda a edificação.

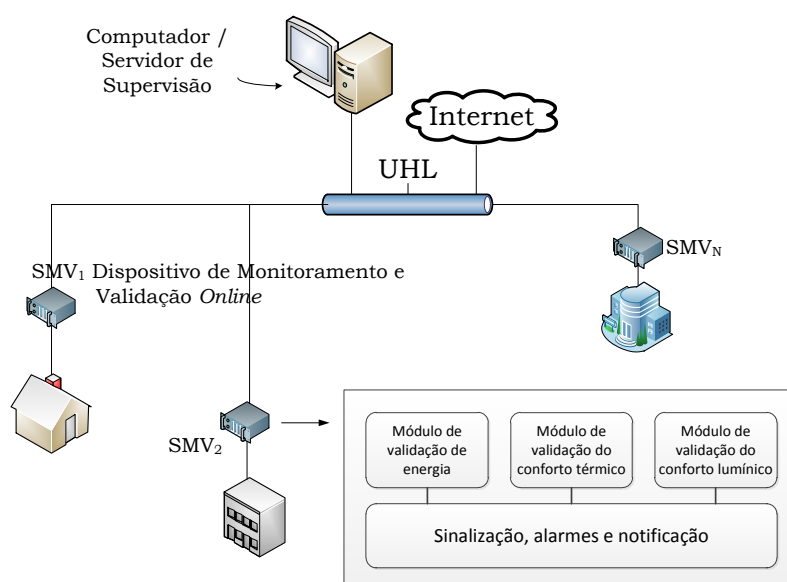


Figura 4.7: Diagrama de blocos do sistema de monitoramento e validação *online*.

A filosofia do sistema de monitoramento e validação *online* baseia-se no conceito de auto-validação proposto por Henry e Clarke no início dos anos 90 [Clarke, 1999]. Um instrumento auto-validado é capaz de detectar e corrigir suas próprias falhas além de fornecer a cada medição, uma estimativa de sua incerteza e indicadores de qualidade. Da mesma forma, o sistema proposto é capaz de fornecer dados de diagnóstico, além das medições de consumo de energia e de variáveis ambientais.

Cada dispositivo de monitoramento (SMV) é responsável por monitorar as variáveis de um edifício, um setor, um piso ou até mesmo um cômodo. O diagrama de blocos do dispositivo é mostrado

<sup>6</sup>Supervisory Control and Data Acquisition.

na figura 4.8. Além de blocos de processamento dos sinais o dispositivo é composto por quatro módulos: um Módulo de Monitoramento de Consumo de Energia, um Módulo de Monitoramento do Conforto Térmico e um Módulo de Monitoramento de Conforto Lumínico e um Módulo de Geração de Alarmes, Diagnósticos e Relatórios. Estes módulos serão descritos nas seções seguintes.

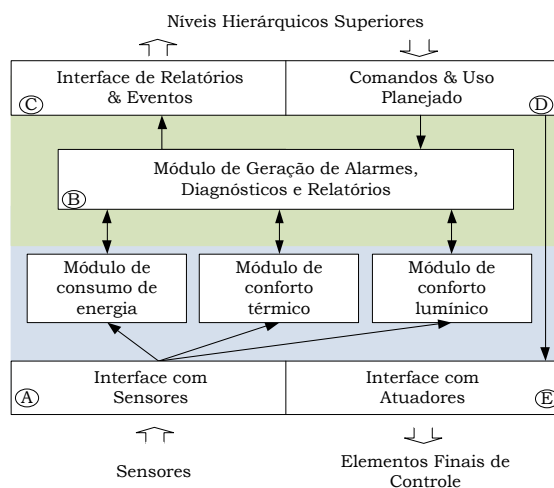


Figura 4.8: Diagrama de blocos do sistema de monitoramento e validação

A interface do dispositivo de monitoramento com os sensores, identificada na figura 4.8 com a letra A, é por onde os dispositivos recebem medições. As medidas de consumo, temperatura, umidade e luminosidade são passadas para o módulo adequado, onde são analisadas e são gerados alarmes de situação não conforme. Os dados e alarmes oriundos dos módulos de monitoramento são passados para o Módulo de Geração de Alarmes, Diagnósticos e Relatórios. Esta interface analisa os alarmes e define quais serão passados para a interface de Relatórios e Eventos (identificada na figura 4.8 com a letra C) com o supervisor. Comandos e informações sobre o Uso Planejado para a edificação, que serão utilizados pelo módulo de consumo de energia, são passados pelo supervisor pela interface homônima. Comandos são passados para elementos finais de controle pela interface com atuadores (identificada na figura 4.8 com a letra E).

#### 4.6.1.1 Infraestrutura necessária para a implementação do sistema

O sistema de monitoramento e validação desenvolvido requer: um computador com licença SCADA para a execução do software de supervisão desenvolvido; dispositivos de hardware para a

coleta de dados; sensores de temperatura, umidade e luminosidade; e medidores de energia. Os dispositivos de hardware podem ser Controladores Lógicos Programáveis, microcontroladores como o módulo Tmote Sky[Michel et al., 2008] ou simplesmente uma placa de aquisição de dados. O sistema foi desenvolvido de modo a viabilizar o processamento distribuído de dados e um cenário ideal para sua implementação seria a instalação de um dispositivo microcontrolador dedicado em cada ambiente ou conjunto de ambientes da edificação. Este processamento distribuído permite a utilização de dispositivos de hardware com menores requisitos de processamento e banco de dados, além de viabilizar um rastreamento simplificado de problemas. É recomendável coletar, em cada ambiente, a temperatura e umidade em um ponto localizado no centro do ambiente e ao menos um ponto de luminosidade localizado no ponto crítico identificado na etapa de Qualificação de Desempenho da validação. O monitoramento de consumo energético também deve ser realizado de maneira distribuída, idealmente com a medição de consumo também realizada por ambiente.

#### **4.6.2 Módulo de monitoramento e validação *online* do consumo de energia**

O módulo de consumo de energia foi desenvolvido com o objetivo de modelar e monitorar o perfil de consumo de um ambiente ou edificação. A existência de um perfil estatístico característico para o consumo de edificações foi identificado por vários estudos. Trabalhos diferentes, envolvendo medição de uso final mostraram que, embora a magnitude do consumo total de energia oscile durante o dia, tanto o comportamento subjacente a este consumo quanto o montante final são altamente padronizados [Lutzenhiser, 1993]. Martinez-Ortiz et al. [2011] afirma que o comportamento característico do consumo pode ser categorizado de acordo com o tipo de atividades realizadas na edificação. O autor apresenta perfis característicos para quatro diferentes tipos de edificações como mostrado na figura 4.9. De acordo com Martinez-Ortiz et al. [2011] edifícios de escritórios (figura 4.9a) tendem a possuir um consumo maior durante as horas comerciais e um consumo reduzido durante noites e finais de semana. Hotéis (figura 4.9b) não apresentam diferenças substanciais entre o consumo em dias de semana e final de semana. Edifícios escolares (figura 4.9c) usualmente possuem dois diferentes padrões de comportamento durante os dias úteis. Esta diferença se dá pelos horários (*schedules*) característicos de aulas.

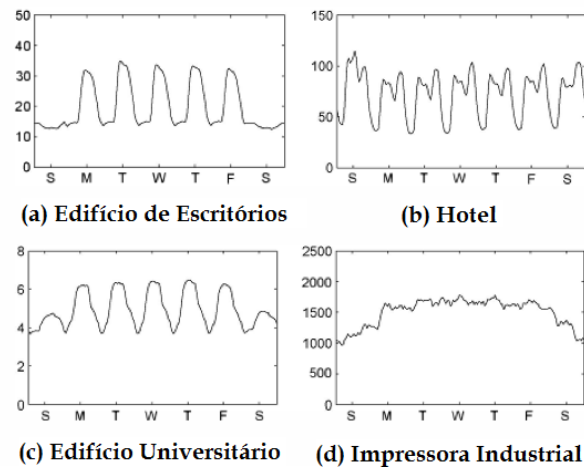


Figura 4.9: Perfis de consumo característicos para diferentes tipos de edifícios. Fonte: Martinez-Ortiz et al. [2011].

A estrutura utilizada para a modelagem de perfil de consumo é uma estrutura multicanal (a ser descrita nas seções seguintes). Estas estruturas são muito utilizadas na instrumentação eletrônica para a classificação de uma forma de onda de entrada em canais de acordo com um determinado parâmetro de entrada [Horowitz e Hill, 1989]. O uso da estrutura multicanal para a avaliação do perfil de consumo em edificações foi proposto por Braga [2007].

A estrutura (multicanal) proposta para a modelagem do perfil de consumo compacta o dado de consumo de acordo com o seu perfil estatístico. A compactação ocorre uma vez que, ao invés de ser armazenada toda a série temporal de consumo, armazenam-se o padrão típico e dados de desvio deste padrão. Um exemplo de como esta compressão de dados é realizada é mostrado na figura 4.10. A figura 4.10a mostra uma série temporal típica para o consumo de energia durante 3 meses e a figura 4.10b mostra o perfil estatístico deste consumo durante uma semana. Nota-se que a figura 4.10b apresenta a média semanal e o limite de variabilidade 3-sigma do dado mostrado na figura 4.10a.

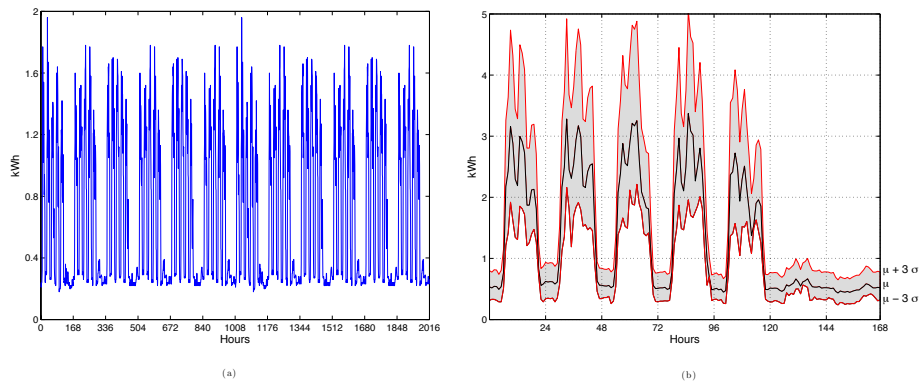


Figura 4.10: Série temporal de consumo de energia e seu comportamento estatístico.

A metodologia proposta reduz drasticamente a quantidade de dados a serem armazenados e a demanda por processamento de dados ao comprimir o dado em seu perfil típico (histórico). Esta metodologia dispensa o armazenamento de longas tendências de consumo ao armazenar o comportamento típico e seus desvios. Ela também facilita o uso de processos estatísticos automáticos de tomada de decisão, sinalização de alarmes e reporte de falhas e de comportamentos imprevistos ou incomuns. A identificação de desvios no comportamento previsto ou planejado para a instalação são diretamente projetados, sintonizados e implementados com os sistemas de microcontroladores de baixo custo com recursos computacionais limitados (memória e velocidade de processamento) [Michel et al., 2008].

A estratégia de monitoramento e validação implementada em cada módulo de consumo de energia do SMV é ilustrada na figura 4.11 e na figura 4.12 é mostrada a sua estrutura de dados.

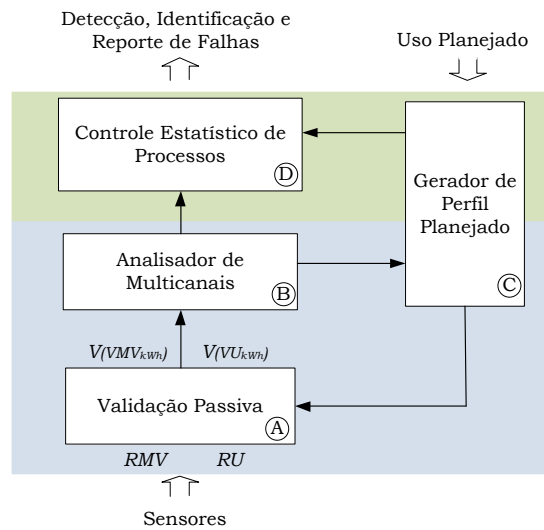


Figura 4.11: Estratégia de monitoramento e validação *online* do módulo de consumo de energia.

O módulo de consumo de energia recebe dados brutos providos pelos dispositivos sensores por meio da Interface com Sensores. Os dados coletados de consumo são validados passivamente pelo bloco de Validação Passiva (indicado como A na figura 4.11) conforme mostrado em seções seguintes. Os dados de consumo são então compactados em estruturas multicanais no bloco Analisador Multicanal (indicado como B na figura 4.11). Estas estruturas são então passadas para o bloco de Controle Estatístico de Processos (indicado como D na figura 4.11). Neste bloco, os dados são avaliados com ferramentas de Controle Estatístico de Processos. Sempre que necessário, alarmes e mensagens são enviados a níveis hierárquicos superiores. Do nível de supervisão, são enviadas informações sobre atividades planejadas que são modeladas em um Perfil Planejado pelo bloco Gerador de Perfil Planejado (indicado como C na figura 4.11). Esta informação é utilizada para estimar os mensurandos em caso de falha na comunicação com o sensor.

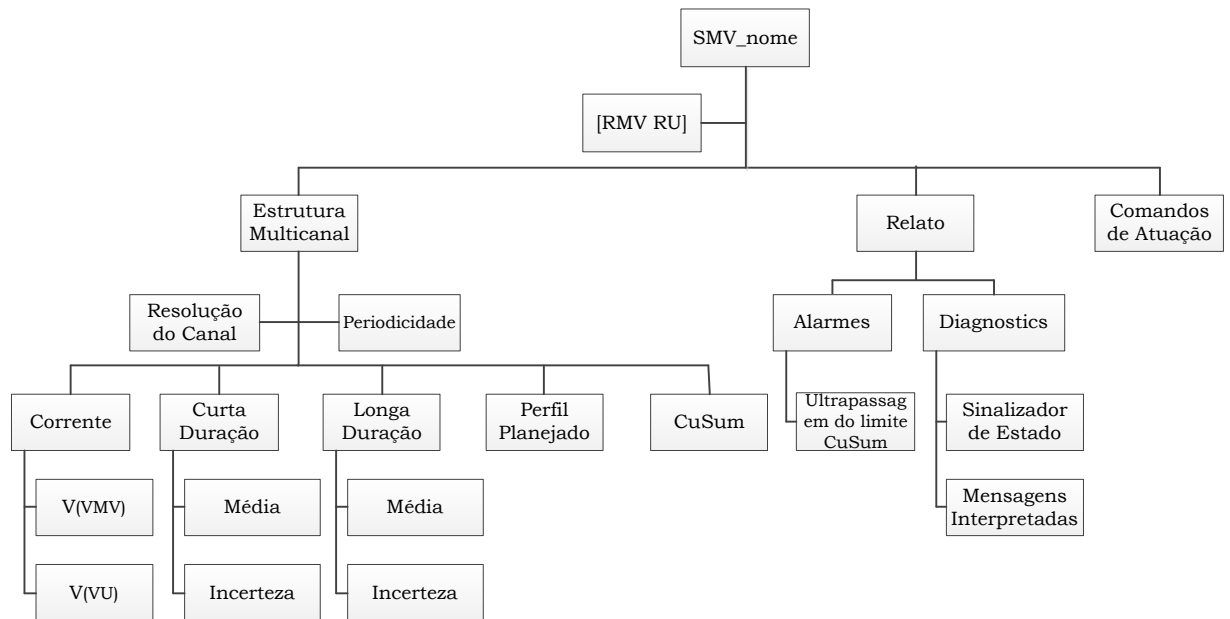


Figura 4.12: Estrutura de dados do módulo SMV de consumo de energia.

O objeto SMV é composto pelas variáveis mostradas na figura 4.12. Duas variáveis são designadas para cada sensor: o valor da medição propriamente dito, denominado valor medido bruto ou *Raw Measurement Value* (RMV) e sua incerteza denominada incerteza bruta ou *Raw Uncertainty* (RU). A incerteza bruta é estimada de modo *offline* de acordo com a calibração do sensor. Estas variáveis, após serem passivamente validadas são chamadas de valor medido validado ou *Validated Measurement Value* do consumo energético ( $V_{(VMV)_{kwh}}$ ) e incerteza validada do consumo energético ou *Validated Uncertainty* ( $V_{(VU)_{kwh}}$ ). Dois pares de estruturas multicanais são estimados para o consumo e passados para o Analisador Multicanal: a média e a incerteza de curta duração e a média e a incerteza de longa duração (ou histórica). Estas estruturas são utilizadas pelo bloco de Detecção, Identificação e Reporte de Falhas para gerar alarmes e diagnósticos. Além das variáveis supracitadas, o objeto SMV também é composto por variáveis auxiliares à estimação das estruturas multicanais, ao cálculo de índices de conforto e às análises estatísticas.

A estratégia de monitoramento efetuada pelo módulo de consumo de energia pode ser dividida nos seguintes cinco passos a serem descritos nas seções seguintes:

1. Pré-filtragem de dados e compactação em canais
2. Atualização dos modelos de curta e longa duração

3. Geração de Perfil Planejado
4. Sinalização de Status
5. Controle Estatístico de Processos

### Pré-filtragem de dados e compactação em canais

Os dados brutos são coletados de sensores (em intervalos de amostragem ajustáveis) por meio da Interface com Sensores. Como já dito, duas variáveis são designadas para cada sensor: a medida propriamente dita, denominada valor medido bruto ou *Raw Measurement Value (RMV)* e sua incerteza, ou *Raw Uncertainty (RU)*, que é dada pela calibração dos sensores. As variáveis brutas são validadas passivamente no bloco de Validação Passiva (figura 4.13). Este bloco filtra valores espúrios em um filtro de *spike*. Este filtro limita grandes variações do consumo atual em comparação com o consumo usual para aquele dia / horário. Após este filtro, caso seja necessário, o intervalo de amostragem é modificado utilizando um filtro de média. Este filtro é utilizado quando, por exemplo, o dado bruto é coletado com um intervalo de amostragem de 1 minuto mas entende-se que um intervalo de dados maior é suficiente para a análise. Intervalos de amostragem inferiores a 15 minutos são muitas vezes considerados desnecessários já que este é o intervalo de medição utilizado pelas concessionárias de energia.

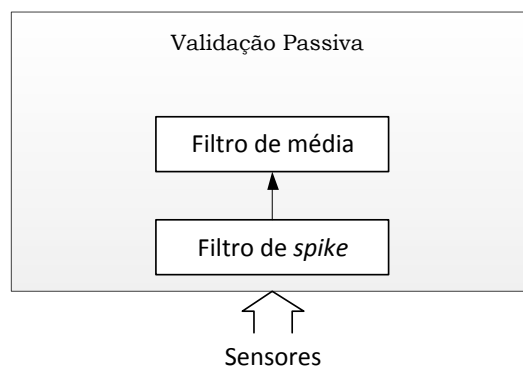


Figura 4.13: Validação Passiva

Depois desta primeira etapa de processamento de dados, o dado passa a ser chamado de valor medido validado, ou Validated Measured Value ( $V_{(VMV_{kwh})}$ ). A incerteza de medição, acrescida com

a incerteza dos processos de filtragem, é chamada de incerteza validada, ou Validated Uncertainty ( $V_{(VMV_{kwh})}$ ). As variáveis validadas de consumo  $V_{(VMV_{kwh})}$  e  $V_{(VU_{kwh})}$  são então passadas para o bloco Analisador de Multicanais.

A estrutura multicanal é composta de um número de canais colocados lado a lado como mostrado na figura 4.14.

Resolução: 1 hora

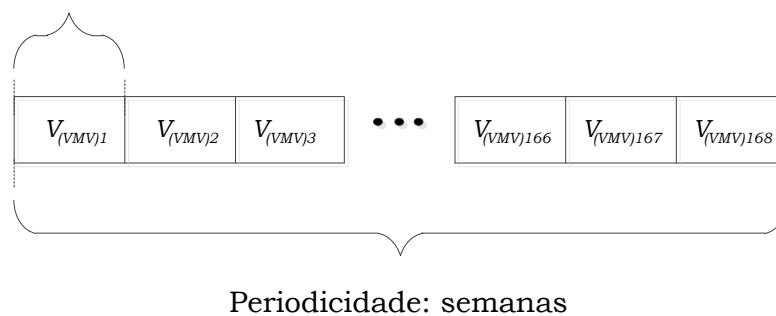


Figura 4.14: Estrutura multicanal

O número de canais contidos na estrutura depende de duas variáveis: a resolução de cada canal e a periodicidade da estrutura. A resolução é dada pelo intervalo de tempo contido em cada canal e é limitado pelo intervalo de amostragem. A periodicidade representa o comportamento cíclico característico desejado para a análise que pode ser de dias, semanas, meses ou anos. A figura 4.14 apresenta uma estrutura multicanal utilizada para modelar o consumo energético de uma edificação com periodicidade de uma semana e resolução de uma hora. A estrutura é portanto constituída de 168 canais, cada um deles contendo o consumo ocorrido durante uma das 168 horas da semana. O primeiro canal representa o consumo ocorrido na segunda-feira de 00:00 a 00:59 e o último canal o consumo ocorrido domingo entre 23:00 e 23:59. A estrutura multicanal ilustrada na figura 4.14 (com periodicidade de uma semana e resolução do canal de 1 hora) é utilizada para modelar as 5 semanas de dados mostrados na figura 4.10a. A figura 4.15a ilustra como o dado é modelado pela estrutura multicanal. A figura 4.15b mostra a tendência dos valores no canal 56 (consumo energético de quarta-feira entre 8:00 e 8:59) ao longo das semanas.

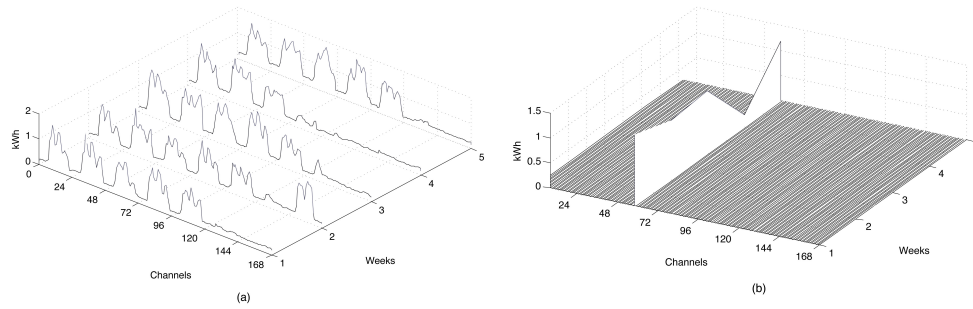


Figura 4.15: Visualização 3D da compactação de dados em uma estrutura multicanal: (a) dado 'dobrado' em períodos semanais e (b) o valor computado para um canal ao longo das semanas.

Os dados de valor medido validado  $V_{(VMV_{kWh})}$  e a incerteza validada  $V_{(VU_{kWh})}$  para o consumo são modelados por duas estruturas multicanais: uma para modelar a média do consumo ao longo do tempo e outra para modelar a sua incerteza. Ao se iniciar um monitoramento, tem-se somente um valor representando o consumo de cada canal. Ao longo do tempo, neste caso semanas, é possível estimar os valores de cada canal como mostrado na figura 4.16. É importante notar que a análise estatística (estimação da média e da incerteza) é realizada intra canais. Isto é, o consumo medido, por exemplo, na segunda-feira entre 1:00 e 1:59 ( $V_{(VMV_{kWh})_{12}}$ ) é comparado somente com os ocorridos nas segundas-feiras neste mesmo intervalo de tempo, ou seja:  $\dots, V_{(VMV_{kWh})_{22}}, V_{(VMV_{kWh})_{32}}, \dots, V_{(VMV_{kWh})_{n2}}$ .

	Segunda 0:00 a 0:59	Segunda 1:00 a 1:59	Segunda 2:00 a 2:59	...	Domingo 21:00 a 21:59	Domingo 22:00 to 22:59	Domingo 23:00 a 23:59
Semana 1	$V_{(VMV)11}$	$V_{(VMV)12}$	$V_{(VMV)13}$		$V_{(VMV)1(i-2)}$	$V_{(VMV)1(i-1)}$	$V_{(VMV)1i}$
Semana 2	$V_{(VMV)21}$	$V_{(VMV)22}$	$V_{(VMV)23}$	•••	$V_{(VMV)2(i-2)}$	$V_{(VMV)2(i-1)}$	$V_{(VMV)2i}$
Semana n	$V_{(VMV)n1}$	$V_{(VMV)n2}$	$V_{(VMV)n3}$		$V_{(VMV)n(i-2)}$	$V_{(VMV)n(i-1)}$	$V_{(VMV)ni}$
Média	$\hat{X}_{n1}$	$\hat{X}_{n2}$	$\hat{X}_{n3}$	•••	$\hat{X}_{n(i-2)}$	$\hat{X}_{n(i-1)}$	$\hat{X}_{ni}$
Incerteza	$\hat{U}_{n1}$	$\hat{U}_{n2}$	$\hat{U}_{n3}$	•••	$\hat{U}_{n(i-2)}$	$\hat{U}_{n(i-1)}$	$\hat{U}_{ni}$

Figura 4.16: Visualização 3D da compactação de dados em uma estrutura multicanal: (a) dado 'dobrado' em períodos semanais e (b) o valor computado para um canal ao longo das semanas.

O analisador multicanal gera dois modelos que são continuamente atualizados: um Modelo de Curta Duração e um Modelo de Longa Duração. Cada modelo é composto pelas estruturas de média e de incerteza. O Modelo de Longa Duração representa o comportamento médio por período passado mais longo, por exemplo, 20 semanas. Já o Modelo de Curta Duração é atualizado mais frequentemente, por exemplo, 2 semanas.

#### Atualização dos modelos de curta e longa duração

A cada novo ciclo (por exemplo, uma semana na figura 4.16), o consumo médio ( $\bar{X}$ ) é calculado para cada canal de acordo com a equação 4.2.

$$\hat{X}_{kWh_{j,i}} = \hat{X}_{kWh_{j,i}} + \alpha [V_{(VMV_{kWh})_{j,i}} - \hat{X}_{kWh_{j,i}}] \quad (4.2)$$

Onde  $i$  é o index do canal,  $j$  é o index do ciclo e  $\alpha$  é o fator de amortecimento ( $0 < \alpha < 1$ ). A incerteza estimada ( $U$ ) é computada como o máximo valor entre a incerteza validada e a variância

estimada para a amostra como mostrado na equação 4.4.

$$U_{kWh_{j,i}}^{\hat{}} = \max \left( \hat{\sigma}_{kWh_{j,i}}, V_{(VU)kWh_{j,i}} \right) \quad (4.3)$$

A variância estimada é calculada conforme a equação 4.4.

$$\hat{\sigma}_{kWh_{j,i}}^2 = \frac{2 - \alpha}{2(1 - \alpha)} \left[ \hat{X}_{kWh_{j,i}}^2 - \left( \hat{X}_{kWh_{j,i}} \right)^2 \right] \quad (4.4)$$

sendo

$$\hat{X}_{kWh_{j,i}}^2 = \hat{X}_{kWh_{j,i}}^2 + \alpha [V_{(VMV)kWh_{j,i}}^2 - \hat{X}_{kWh_{j,i}}^2]$$

Dois fatores de amortecimento diferentes são utilizados para gerar os modelos de Curta e Longa Duração. O parâmetro  $\alpha$  refere-se à média aritmética como  $\alpha = 2/(m_{av} + 1)$ , onde  $m_{av}$  é o número de pontos de dados. Como sugerido anteriormente, o Modelo de Longa Duração, que representa o comportamento médio por um período mais longo de tempo, pode ser computado usando um  $m_{av}$  de 20 semanas. Já o Modelo de Curta Duração, dá mais valor aos dados mais recentes, é calculado usando um  $m_{av}$  de 1 (nenhuma filtragem) ou 2 ciclos (e.g. semanas).

### Geração do perfil planejado

Se ocorrer uma falha e nenhum mensurando estiver disponível, o valor medido validado para o consumo e sua incerteza são estimados de acordo com o perfil de utilização habitual ou planejado para a edificação dado pelo Gerador de Perfil Planejado. O Perfil Planejado consiste em uma estimativa de percentagem do consumo habitual que está programado para ocorrer de acordo com informações das atividades planejadas a acontecerem na edificação.

A figura 4.17 mostra o Fator de Utilização de uma edificação para um período de uma semana em três cenários distintos. O primeiro (figura 4.17 - *Semana1*) representa uma semana típica, quando nenhuma mudança está prevista para ocorrer. Durante períodos de uso típico, o Fator de Utilização é igual a 1 durante os horários de trabalho. O segundo cenário ilustrado (figura 4.17 - *Semana2*)

descreve um período em que sabe-se que o uso da edificação vai ser superior ao típico nos dias úteis (de segunda ao meio dia de quarta-feira devido a um feriado). Neste caso, o Fator de Utilização é igual a 2 durante o horário de trabalho e 0 durante o feriado. No último cenário apresentado (figura 4.17 - *Semana3*), é mostrada a situação em que os serviços serão reduzidos em uma escala de 50% (devido a ausência de alguns funcionários que farão um treinamento). Neste caso, o Fator de Utilização é igual a 0,5 durante as horas de trabalho.

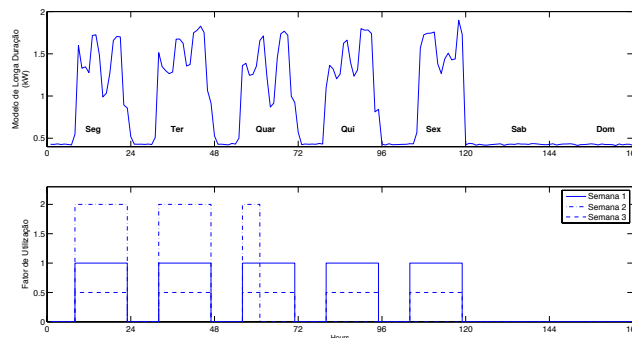


Figura 4.17: Fator de Utilização

Caso informações sobre o Fator de Utilização estejam disponíveis,  $V_{(VMV_{kWh})}$  e  $V_{(VU_{kWh})}$  podem ser estimados como mostrado na figura 4.18.  $V_{(VMV_{kWh})}$  é computado como uma percentagem do conhecido Modelo de Longa Duração (que pode também ser chamado de modelo histórico) da edificação, i.e., ele é a multiplicação do Fator de Utilização pelo consumo médio estimado de longa duração. A incerteza,  $V_{(VU_{kWh})}$  é inicialmente estimada como a incerteza do Modelo de Longa Duração. No entanto, ela é aumentada em função do tempo indicando uma redução na confiança que aquela é uma estimativa correta para o valor.

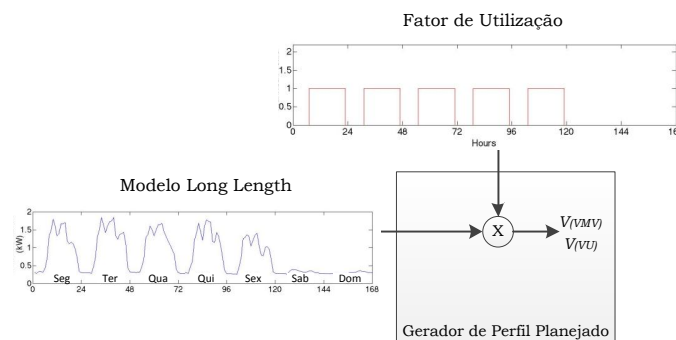


Figura 4.18: Gerador de Perfil Planejado

### Sinalização de estado

É interessante fornecer informação sobre as condições em que os valores de  $V_{(VMV)kwh}$  e  $V_{(VU)kwh}$  foram medidos ou estimados. Portanto, um sinalizador, i.e. uma medida da qualidade da medição, é gerado pelo sistema. Cinco sinalizadores de status da medição são fornecidos pelo sistema: seguro, ofuscado, embaçado, planejado e cego. Os critérios para a definição são apresentados na figura 4.19 e discutidos a seguir:

1. **Seguro:** este estado indica que o dado bruto está sendo coletado do sensor em boas condições e nenhuma falha foi detectada.  $V_{(VMV)kwh}$  é calculado normalmente.
2. **Ofuscado:** este estado indica que o dado bruto ainda está sendo coletado do sensor mas uma situação de falha é detectada.  $V_{(VMV)kwh}$  é projetado de valores históricos.  $V_{(VU)kwh}$  cresce com o tempo indicando uma redução na confiança no valor de  $V_{(VMV)kwh}$ . Este estado é temporário.
3. **Embaçado:** este estado é uma evolução do estado ofuscado. Se o dado é considerado ofuscado por um período de tempo maior do que o considerado adequado (na figura 4.19  $nO > nO_{max}$ ) para a instalação, o sinalizador evolui para embaçado e um alarme é ativado.  $V_{(VU)kwh}$  e  $V_{(VU)kwh}$  não são mais estimados.
4. **Planejado:** este estado indica que sabe-se que o valor medido não está de acordo com o valor esperado para a variável. Os modelos de curta e longa duração são computados usando um fator de amortização menor - dando um peso maior aos valores históricos (na figura 4.19  $\alpha = \alpha_{Planejado}$ ).
5. **Cego:** este estado indica que o dado bruto não está disponível, um alarme é acionado imediatamente. Inicialmente (durante  $nC$  canais), o valor de  $V_{(VMV)kwh}$  é projetado de valores históricos.  $V_{(VU)kwh}$  cresce com o tempo indicando uma redução na confiança no valor de  $V_{(VMV)kwh}$ . Caso o sensor permaneça cego por um período de tempo maior do que o determinado,  $V_{(VU)kwh}$  e  $V_{(VU)kwh}$  não são mais estimados.

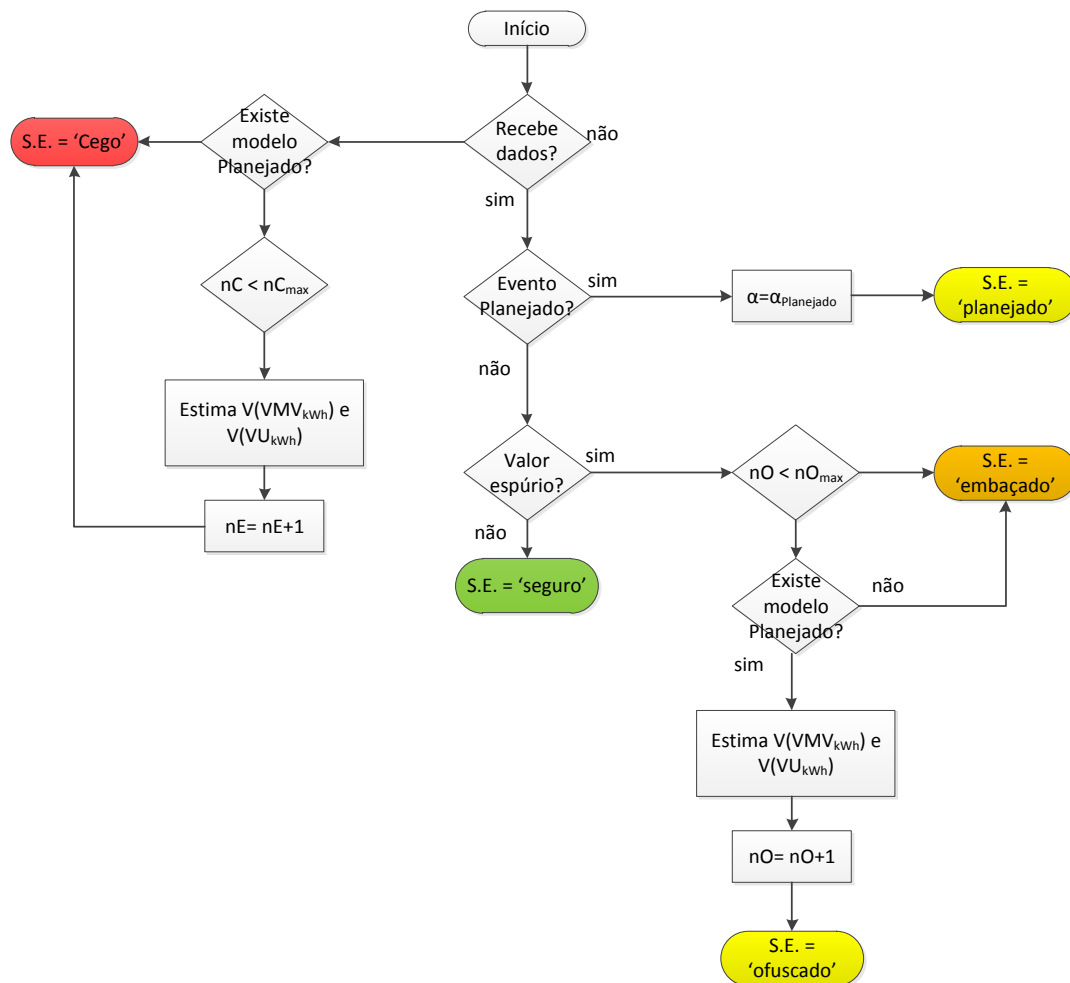


Figura 4.19: Sinalizador de estado: critérios para definição

### Controle estatístico de processos - CEP

Uma vez que as estruturas multicanais foram geradas, elas são transmitidas, em conjunto com os sinalizadores de estado, para o bloco de Controle Estatístico de Processos. Neste bloco, ferramentas de CEP são utilizadas para monitorar e avaliar a edificação. Para cada canal os resíduos entre o valor medido  $V_{(VMV_{kWh})}$  e o estimado para o modelo de curta duração são calculados. Em edificações altamente automatizadas os resíduos se aproximariam de zero. Já em edificações não automatizadas os resíduos podem alcançar valores significativos. Mas independentemente da magnitude do resíduo, contanto que o consumo possua um perfil cíclico característico, caso não ocorram mudanças, os resíduos vão se assemelhar a um ruído branco. Sempre que ocorrerem mudanças no modo em que a energia é consumida os resíduos vão se tornar 'maiores' em algum sentido (a média, a variância ou

ambas irão aumentar). Consequentemente, um algoritmo de detecção de falhas pode ser usado para localizar alterações substanciais e gerar alarmes e relatórios.

Diversos algoritmos de detecção de falhas podem ser utilizados. Atualmente é utilizado o teste de soma cumulativa (CuSum) [Gustafsson, 2000]. O CuSum analisa o resíduo de cada canal, i.e. desvios entre o valor medido validado ( $V_{(VMV_{kwh})_{j,i}}$ ) e o valor corrente de sua média de curta duração (equação 4.5).

$$\epsilon_{kwh_{j,i}} = V_{(VMV_{kwh})_{j,i}} - \hat{X}_{kwh_{j,i}} \quad (4.5)$$

O teste estatístico de CuSum  $g_{kwh_{j,i}}$  é computado para cada canal  $i$  a cada novo ciclo  $j$  (equação 4.6). Como o CuSum é computado intra canais ele é denominado **CuSum Multicanal**. O teste soma o seu próprio valor ao resíduo, daí o nome "soma cumulativa". Se o valor acumulado excede um limite  $h_{kwh}$  é gerado um alarme, como mostrado na equação 4.6.

$$s_{kwh_{j,i}} = (\epsilon_{kwh_{j,i}})^2$$

$$g_{kwh_{j,i}} = \max(g_{kwh_{j-1,i}} + s_{kwh_{j,i}} - v_{kwh}, 0) \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \text{Se } g_{kwh_{j,i}} &> h_{kwh} \\ g_{kwh_{j,i}} &= 0 \\ \text{Alarme}_{kwh} &= 1 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Caso não ocorram mudanças, a soma cumulativa irá se comportar aleatoriamente. Para evitar falsos alarmes quando diversos resultados do teste apresentarem um valor consecutivo positivo um pequeno termo de desvio  $v_{kwh}$  é subtraído do teste a cada iteração. Os valores do limite  $h_{kwh}$  e de desvio  $v_{kwh}$  são diferentes para cada edificação e devem ser ajustados na implementação do sistema.

#### 4.6.2.1 Exemplo de aplicação da metodologia de monitoramento do módulo de consumo energético

Para exemplificar a metodologia descrita é utilizado o exemplo de caso residencial apresentado no capítulo 3. Os dados foram simulados com intervalo de amostragem de 15 minutos, periodicidade semanal e resolução do canal de 1 hora. Portanto, a estrutura multicanal utilizada é composta por 168 canais.

Durante a primeira semana a média semanal é o próprio valor medido e a incerteza é a do sensor acrescida com a da validação passiva. A figura 4.20 mostra a Estrutura Multicanal de Média de Curta Duração, a Estrutura Multicanal de Incerteza de Curta Duração e o Sinalizador de estado durante esta semana.

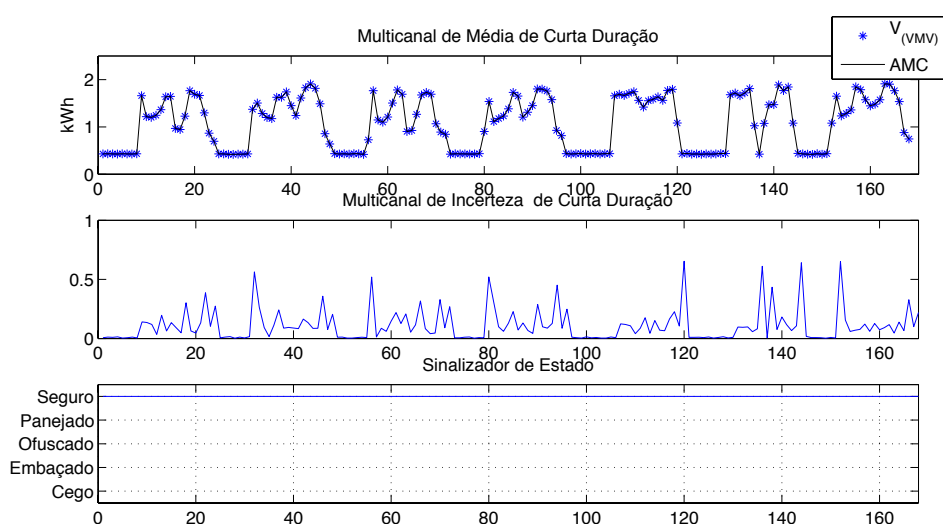


Figura 4.20: Estruturas multicanais de curta duração para a primeira semana de simulação

Nas semanas seguintes os valores de média e incerteza são calculados para cada canal. Na semana 5 (figura 4.29) às 8 horas da manhã da Segunda-Feira ocorre um *spike* no dado de consumo. Este valor espúrio é filtrado pelo filtro de *spike* do bloco de Validação Passiva, portanto não é possível vê-lo na figura (4.29) é possível, no entanto, ver que neste instante a incerteza é aumentada automaticamente, indicando uma perda de confiança do sistema no valor medido. Além de aumentar a incerteza o sistema muda o sinalizador de estado para Ofuscado de modo que esta situação fica sinalizada para o operador. Mais tarde nesta semana um evento não usual (ocupação zero) está programado para ocorrer. Durante o período de tempo em que o evento é programado, o fator de amortecimento

do modelo é atenuado para minimizar seu peso na estimação de média e incerteza das estruturas multicanais.

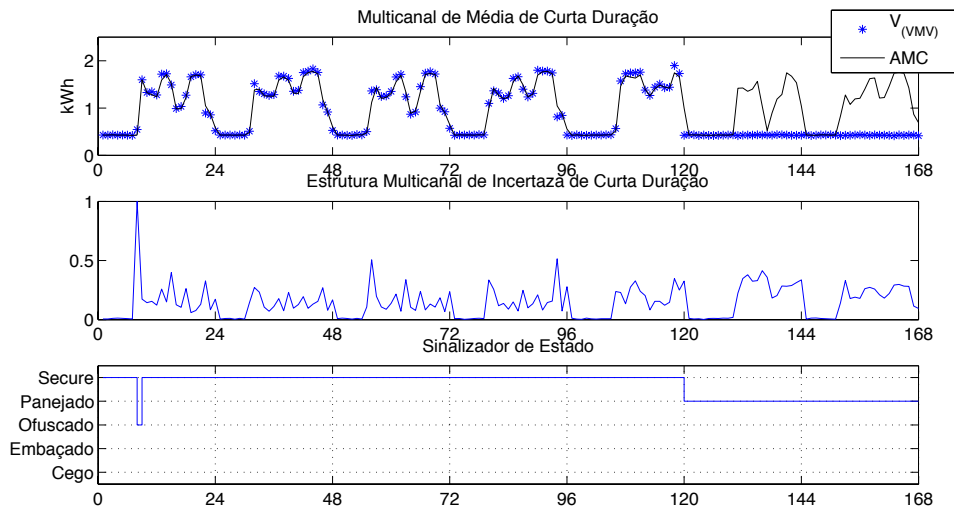


Figura 4.21: Estruturas multicanais de curta duração para a quinta semana de simulação

Uma situação de consumo não planejado acima do esperado é mostrado na figura 4.22. Neste caso foi simulada uma situação de festa quando o número de pessoas e o consumo de energia é afetado. A figura apresenta as estruturas multicanais de curta duração para a nona semana de simulação.

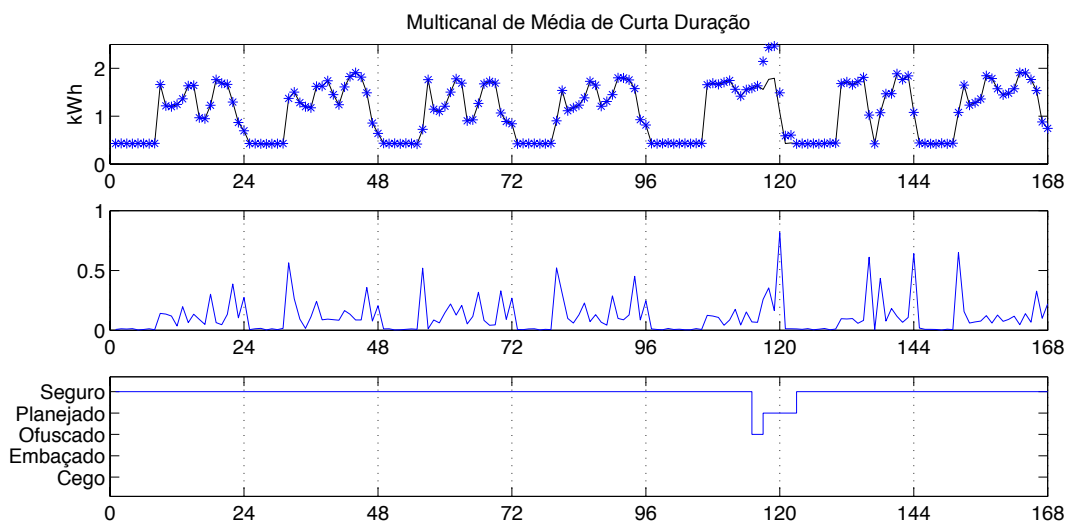
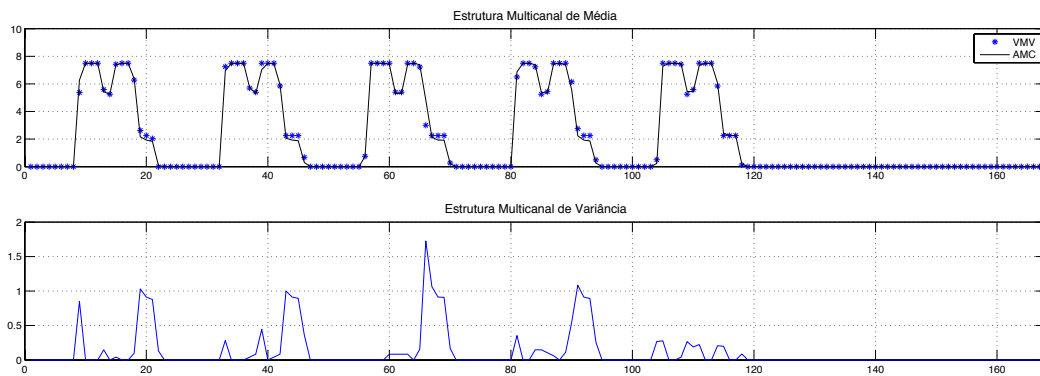


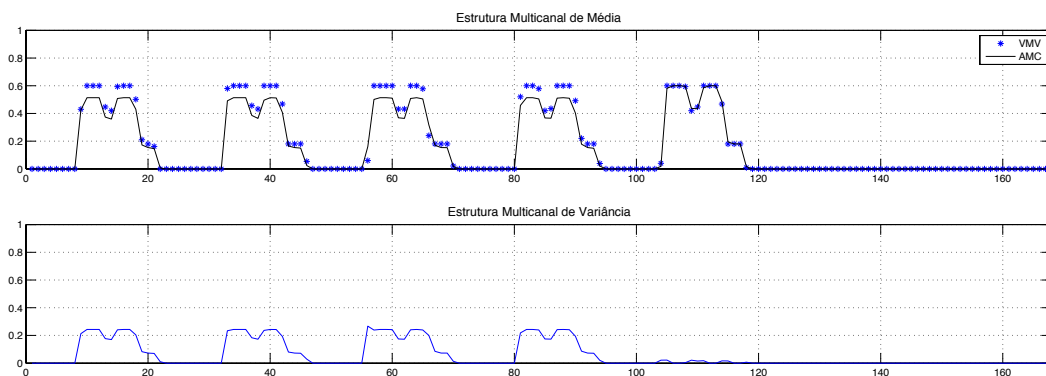
Figura 4.22: Estruturas multicanais de curta duração para a nona semana de simulação

Para ilustrar a característica modular da estrutura multicanal foram computadas as estruturas para o exemplo de caso de prédio comercial. O prédio comercial é formado por 3 andares, cada um deles

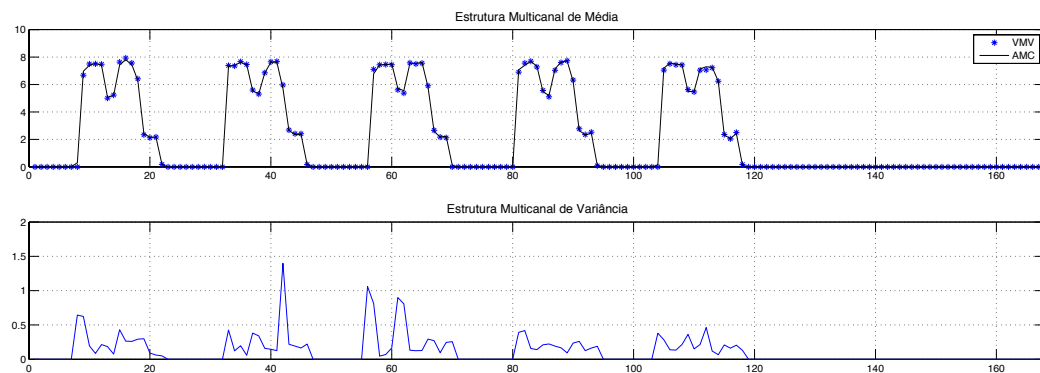
composto por 3 zonas climáticas. A situação simulada aqui considera o primeiro andar do prédio em que existem 2 empresas, uma ocupando a zona 1 e outra ocupando a zona 3. A zona 2 é a área comum de circulação entre as demais. Um dispositivo SMV é instalado em cada uma das zonas. As estruturas multicanais de média e variância de consumo computadas para a zona 1 é mostrada na figura 4.23a, a computada para a zona 2 é mostrada na figura 4.23b e a computada para a zona 3 é apresentada na figura 4.23c.



(a) Zona 1



(b) Zona 2



(c) Zona 3

Figura 4.23: Estruturas multicanais de curta duração para as 3 zonas do primeiro andar do prédio comercial

O consumo e as estruturas multicanais para o consumo agregado das três zonas, ou seja, para o primeiro andar - figura 4.24 - são obtidos somando os consumos, a média e a variância de cada uma das três zonas.

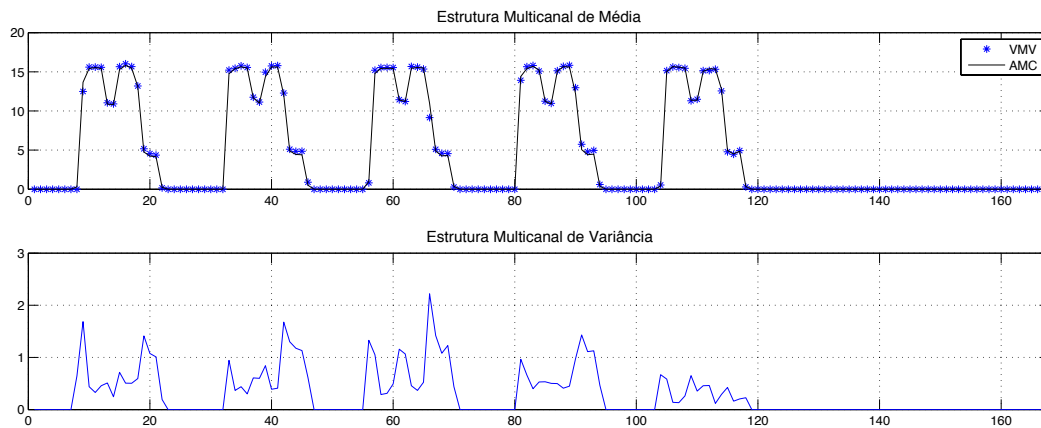


Figura 4.24: Estruturas multicanais de curta duração para o primeiro andar do prédio comercial

### 4.6.3 Módulo de monitoramento e validação *online* do conforto térmico

A estratégia de monitoramento e validação implementada em cada módulo de conforto térmico do SMV é ilustrada na figura 4.25.

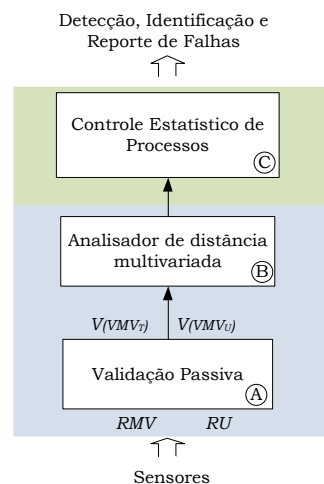


Figura 4.25: Estratégia de monitoramento e validação *online* do módulo de consumo de energia.

O módulo de consumo de energia recebe dados brutos providos pelos dispositivos sensores por meio da Interface com Sensores. Os dados coletados de temperatura e umidade são validados pas-

sivamente pelo bloco de Validação Passiva (indicado como A na figura 4.25). Assim como o bloco homônimo do módulo de consumo, este bloco filtra valores espúrios e modifica o intervalo de amostragem utilizando um filtro de média. Além desta primeira etapa de processamento de dados, este bloco sinaliza as medidas recebidas, no caso do módulo de conforto quatro sinalizadores de estado são utilizados: seguro, ofuscado, embaçado e cego. Os critérios para a definição do sinalizador são:

1. **Seguro:** indica que o dado bruto está sendo coletado do sensor em boas condições e nenhuma falha foi detectada.
2. **Ofuscado:** indica que o dado bruto está sendo coletado do sensor mas uma situação de falha é detectada.  $V_{(VMV)_T}$  ou  $V_{(VMV)_U}$  é considerado como sendo o mesmo da última medição segura e o valor da incerteza cresce com o tempo indicando perda na confiança do valor medido.
3. **Embaçado:** indica uma evolução do estado ofuscado. Se o dado é considerado ofuscado por um intervalo maior do que o considerado adequado o sinalizador evolui para embaçado e um alarme é gerado. A medida real passa a ser mostrada pelo sistema.
4. **Cego:** indica que o dado bruto não está disponível, um alarme é acionado.

As medidas de temperatura e umidade validadas são então passadas para o bloco analisador de distância multivariada, que calcula a distância multivariada das medidas recebidas de temperatura e umidade à zona de conforto do Diagrama de Givoni. O monitoramento destas distâncias ao longo do tempo permite uma análise *online* do conforto e fornece uma medida de quão distante uma situação está do estado de conforto térmico, o que não é possível com o Diagrama Bioclimático de Givoni.

### Cálculo da distância $T^2$

Para quantificar o quão próximo um ambiente encontra-se da operação em estado de conforto térmico propõe-se o uso de uma técnica de estatística multivariada. Esta técnica calcula a distância estatística das medidas de temperatura e umidade em um dado instante  $t$ , plotadas sobre a carta psicrométrica, à zona de conforto descrita por Givoni<sup>7</sup>. Para isto, supõe-se que a função de densidade de probabilidade condicional de um ponto  $(t, u)$  pertencente à zona de conforto é Normal bivariada, dada pela equação 4.8.

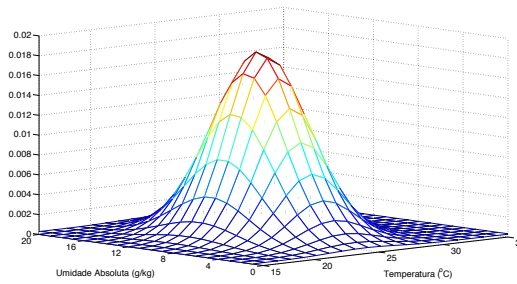
---

<sup>7</sup>Ver capítulo 2.

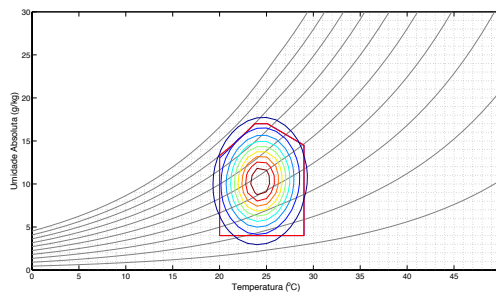
$$f(x|Z_C) = \frac{1}{(2\pi)^{|\Sigma_{Z_c}|^{1/2}}} e^{-\frac{1}{2}(x - \mu_{Z_c})' \Sigma_{Z_c}^{-1} (x - \mu_{Z_c})} \quad (4.8)$$

em que  $\mu_{Z_c}$  é o ponto de média da zona de conforto e  $\Sigma_{Z_c}$  é a matriz de covariâncias desta região.

Os pontos de média e covariâncias da zona de conforto propostas para a zona de conforto de Givoni - mostradas na tabela 4.6 - foram determinados experimentalmente utilizando milhares de pontos pertencentes à região de conforto. As curvas de nível<sup>8</sup> encontradas para a função de probabilidade estimada foram então plotadas sobre a carta psicrométrica (figura 4.26b) e os valores de média e covariâncias foram ajustados. A função de probabilidade encontrada para a zona de conforto encontrada é mostrada na figura 4.26a.



(a)



(b)

Figura 4.26: Função de Probabilidade e Curvas de Nível da Zona de Conforto de Givoni

<sup>8</sup>Cada curva de nível é uma linha que une todos os pontos de igual distância à Zona de Conforto.

Tabela 4.6: Médias e Covariâncias da Zona de conforto

Variável	Valor
Temperatura Média $t_{Z_c}$	24,4
Umidade Média $u_{Z_c}$	10,3
Variância Temperatura $\sigma_{T_{Z_c}}$	8,2
Variância Umidade $\sigma_{U_{Z_c}}$	12,0
Covariância $\sigma_{TU_{Z_c}}$	0,5

Uma vez determinadas as características estatísticas da zona de conforto é possível calcular a distância de qualquer ponto da carta psicrométrica à região de conforto de forma a obter uma medida quantitativa do conforto. Para isto é utilizada a distância  $T^2$  já apresentada no capítulo 2. Esta medida incorpora as correlações entre as variáveis e as diferenças nas variâncias, atribuindo menos peso às variáveis com alta variância e com alto grau de correlação entre si, de forma que todas as características possam ser tratadas igualmente em ordem de importância. Na prática, a distância estatística, computada pela equação 4.9, mede a distância Euclidiana ao quadrado ponderada pela matriz inversa de covariâncias.

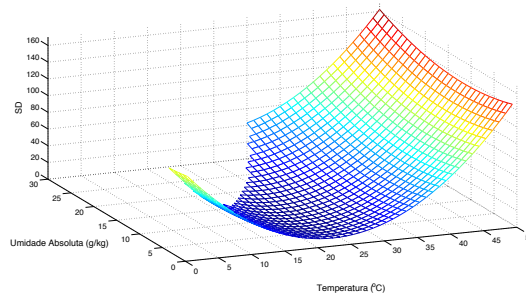
Como a distância estatística é uma medida ponderada pelas covariâncias das variáveis de temperatura e umidade, uma mesma variação nos valores de temperatura e de umidade implicam diferentemente no valor da distância estatística. Esta característica pode ser facilmente visualizada na figura 4.26 *b* que mostra as curvas de nível da Zona de Conforto, como estas curvas são elipses e não círculos é fácil ver esta diferença.

A distância estatística à região de conforto é dada por:

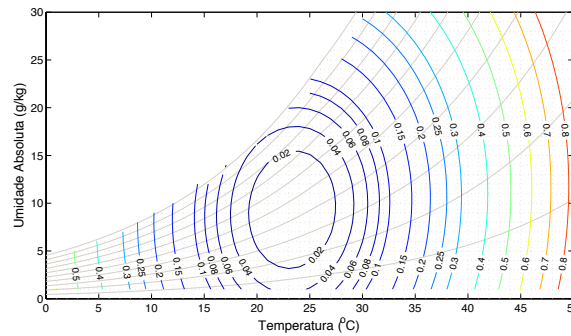
$$T_{P,Z_c}^2 = (P - \mu_{Z_c})' \Sigma_{Z_c}^{-1} (P - \mu_{Z_c}) \quad (4.9)$$

em que  $P = (V_{(VMV)_T}, V_{(VMV)_U})$  são as coordenadas do ponto em análise,  $\mu_{Z_c} = (t_{\mu_{Z_c}}, u_{\mu_{Z_c}})$  são as coordenadas do ponto de média da zona de conforto e  $\Sigma_{Z_c}^{-1}$  é o inverso da matriz de covariância desta zona.

A figura 4.27*a* mostra a variação do valor da distância estatística à medida que o ponto se distancia do ponto médio desta zona.



(a) Perfil da distância estatística



(b) Curvas de nível da distância estatística

Figura 4.27: Carta Psicrométrica com curvas de nível de desconforto

Para facilitar a análise, a distância estatística foi normalizada pelo valor máximo,  $SD = 162,4$ , encontrado ao se excursionar toda a carta psicrométrica, ou seja, variando-se a temperatura de 0 a  $50^{\circ}C$  e a umidade absoluta de 0 a  $30g/kg$ . Assim sendo o conforto térmico é calculado na forma de um índice, a estatística bivariada entre a temperatura e a umidade, ou o índice  $T^2$  de conforto.

O índice  $T^2$  de conforto é então passado para o bloco de Controle Estatístico de Processos onde é monitorado pela carta de Hotelling.

### Controle estatístico de processos

O monitoramento da tendência do índice de conforto  $T^2$  é feito por meio de carta de controle de Hotelling, onde o limite superior de controle ( $LSC_C$ ) indica o limite da zona de conforto de Givoni. Este limite foi determinado de maneira empírica calculando-se a distância estatística de milhares de pontos e verificando qual o valor máximo da distância para os pontos interiores à Zona de Conforto. O  $LSC_C$  é:

$$LSC_C = 0,02$$

Ao testar o limite determinado com milhares de pontos - temperatura variando de 0 a 50°C com intervalo variabilidade de 0,1° e umidade absoluta variando de 0 a 30 g/kg com intervalo de variação de 0.1 g/kg - encontrou-se uma taxa de acerto de 96,4% ao utilizar o limite de 0,02.

#### 4.6.3.1 Exemplo de aplicação da metodologia de monitoramento do módulo de conforto térmico

Para exemplificar a metodologia descrita é utilizado o exemplo de caso residencial apresentado no capítulo 3. A figura 4.28 mostra a carta de conforto  $T^2$  para a situação de festa mostrada no exemplo do módulo de consumo de energia, em que o número de pessoas e o consumo é superior ao esperado. Nesta situação, o conforto térmico da sala da casa também é afetado visto que o sistema de climatização foi dimensionado para as cargas térmicas usuais da casa.

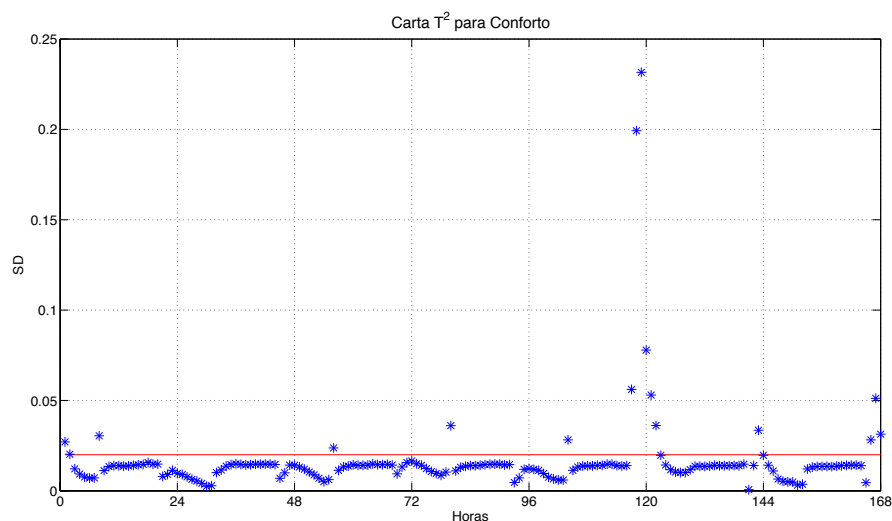


Figura 4.28: Carta  $T^2$  para a nona semana de simulação

Na figura 4.29 é mostrada uma semana em que o conforto térmico permaneceu em grande parte do tempo dentro do limite de conforto.

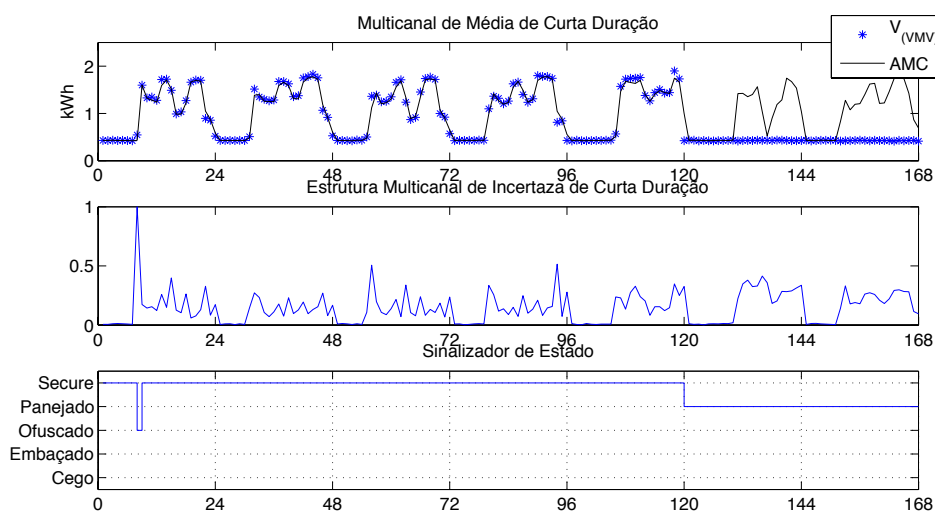


Figura 4.29: Estruturas multicanais de curta duração para a quinta semana de simulação

#### 4.6.4 Módulo de monitoramento e validação *online* do conforto lumínico

O monitoramento da luminosidade é realizado considerando níveis mínimos de luminosidade previstos por norma. O objetivo deste monitoramento é alarmar quando os níveis de luminosidade ficaram abaixo de um determinado valor, que pode ser, por exemplo, 90% do valor normalizado. Luminosidades acima do valor mínimo não são avaliadas. Considera-se que o sistema de luminosidade existente esteja dimensionado adequadamente.

Os dados brutos de luminosidade coletados pelos sensores são inicialmente, como ocorre nos outros módulos, validados passivamente. Assim como nos demais módulos valores espúrios são filtrados, o intervalo de amostragem é ajustado conforme desejado, e as medidas são sinalizadas. Os critérios para a definição do sinalizador são os mesmos do bloco de conforto térmico.

Após a validação passiva, como mostra a figura 4.30 os valores de iluminância medidos  $V_{(VMV_{L_{j,i}})}$  são acomodados em uma estrutura multicanal. Esta estrutura é adequada para o monitoramento, pois os valores de luminosidade variam de acordo com a hora do dia. Portanto, não faz sentido, e.g. comparar a luminosidade de 17hrs com a de 18hrs, mas todas as ocorridas às 17hrs. Somente o par de estruturas multicanais correntes são passadas para o bloco de Controle Estatístico de Processos.

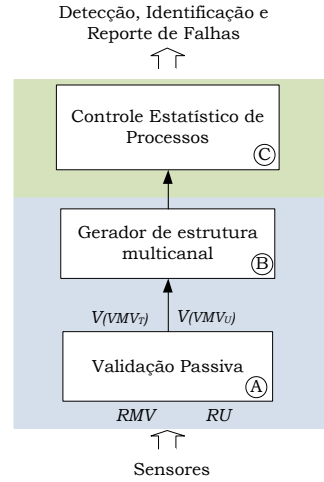


Figura 4.30: Diagrama de blocos do módulo de conforto lumínico

No bloco de CEP é realizado o monitoramento do conforto lumínico. Este é feito em função dos valores de iluminância mínima determinados por normas. A análise é feita calculando-se o resíduo normalizado entre o valor mínimo requerido de luminosidade,  $LIC_L$ , e o valor medido  $V_{(VMV_{L_{j,i}})}$  conforme mostra a equação 4.10.

$$s_{L_{j,i}} = \frac{LIC_L - V_{(VMV_{L_{j,i}})}}{LIC_{L_{j,i}}} \quad (4.10)$$

Caso o resíduo seja menor ou igual a zero ( $s_{L_{j,i}} \leq 0$ ) o ambiente atende à norma, apresentando uma iluminância superior à mínima necessária. Caso o resíduo varie entre zero e 1 ( $0 \leq s_{L_{j,i}} \leq 1$ ) o valor medido de iluminância é menor do que o estabelecido por norma e o valor do resíduo representa uma medida de quão distante a medição está do valor desejado, sendo que a medida em que o  $V_{(VMV_{L_{j,i}})}$  se afasta de  $LIC_{L_{j,i}}$ ,  $s_L$  se aproxima de 1. O resíduo é utilizado para identificar degradações no sistema de iluminação e indicar recomendações como troca de lâmpadas ou limpeza de luminárias ou paredes. O monitoramento de degradações é realizado calculando a soma cumulativa de  $s_{L_{j,i}}$  como mostrado na equação 4.11.

$$g_{L_{j,i}} = \max(g_{L_{j-1,i}} + s_{L_{j,i}} - v_L, 0) \quad (4.11)$$

O teste estatístico de CuSum para iluminância  $g_{L_{j,i}}$  é computado de acordo com o CuSum Mul-

ticanal, i.e. para cada canal  $i$  a cada novo ciclo  $j$  (equação 4.11). Sempre que o valor do teste for superior a um limite, por exemplo 0,1 (10% inferior a  $LIC_L$ ) o valor do teste é zerado e um alarme de luminosidade é acionado como mostrado abaixo.

$$\begin{aligned} \text{Se } g_{L_{j,i}} &> h_L \\ g_{L_{j,i}} &= 0 \\ \text{Alarme}_L &= 1. \end{aligned}$$

#### 4.6.4.1 Exemplo de aplicação da metodologia de monitoramento do módulo de conforto luminoso

Para exemplificar a metodologia descrita é utilizado o exemplo de caso residencial apresentado no capítulo 3. Como o programa EnergyPlus simula somente iluminação natural, a aplicação da metodologia é mostrada considerando um valor mínimo requerido de luminosidade,  $LIC_L = 150lux$ . A figura 4.31 mostra o resultado do teste de CuSum para as 13hrs durante todo o mês de fevereiro. Verifica-se que para este horário no mês de fevereiro somente o ponto (3,3) nos dias 11/02 e 14/02 não satisfizeram a luminosidade mínima. Já para a mesma hora do mês de setembro, como é mostrado na figura 4.32 vários pontos não alcançam o limite estabelecido em diversos dias.

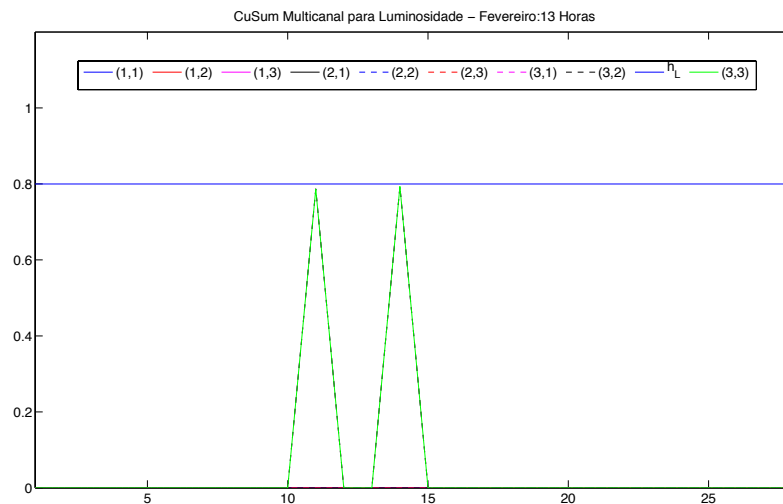


Figura 4.31: Teste de CuSum durante o mês de fevereiro no caso residencial

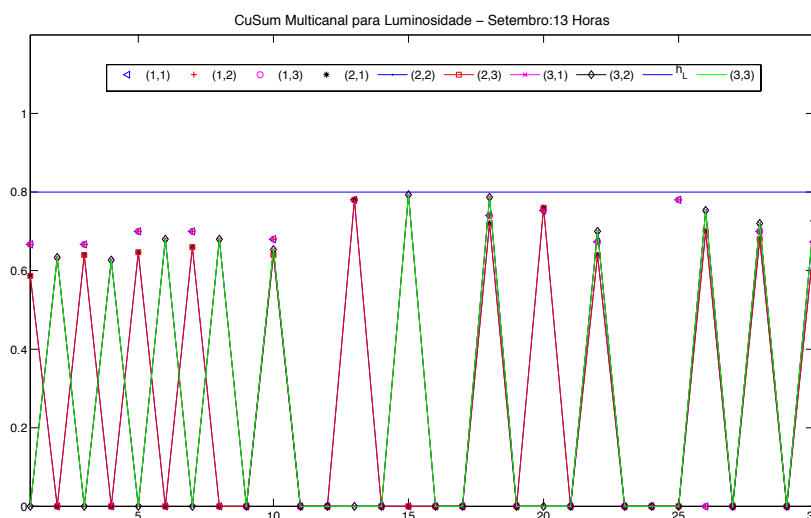


Figura 4.32: Teste de CuSum durante o mês de setembro no caso residencial

#### 4.6.5 Módulo de geração de alarmes, diagnósticos e relatórios

A primeira etapa de detecção de falhas é realizada durante a validação passiva dos dados quando eles recebem o sinalizador de estado. Após a avaliação estatística dos dados de consumo, conforto e luminosidade, os dados de alarmes gerados por estas análises são cruzados com os do sinalizador de estado de modo a reprimir alarmes indevidos.

A figura 4.33 mostra a análise realizada pelo bloco de Geração, Diagnóstico e Relatório quando a carta de controle multicanal de CuSum para consumo é alarmada. Sempre que um alarme é gerado pela carta de CuSum o SMV verifica qual o *status* do sinalizador de estado. Caso ele esteja sinalizado como seguro, embaçado ou cego o alarme é confirmado. No entanto, caso exista um evento planejado, é verificado se o valor medido está dentro do que foi estimado pelo Gerador de Perfil Planejado. Caso esteja, o alarme é suprimido. Caso o valor medido não esteja dentro do planejado ou caso o sensor esteja ofuscado o alarme é substituído por uma notificação.

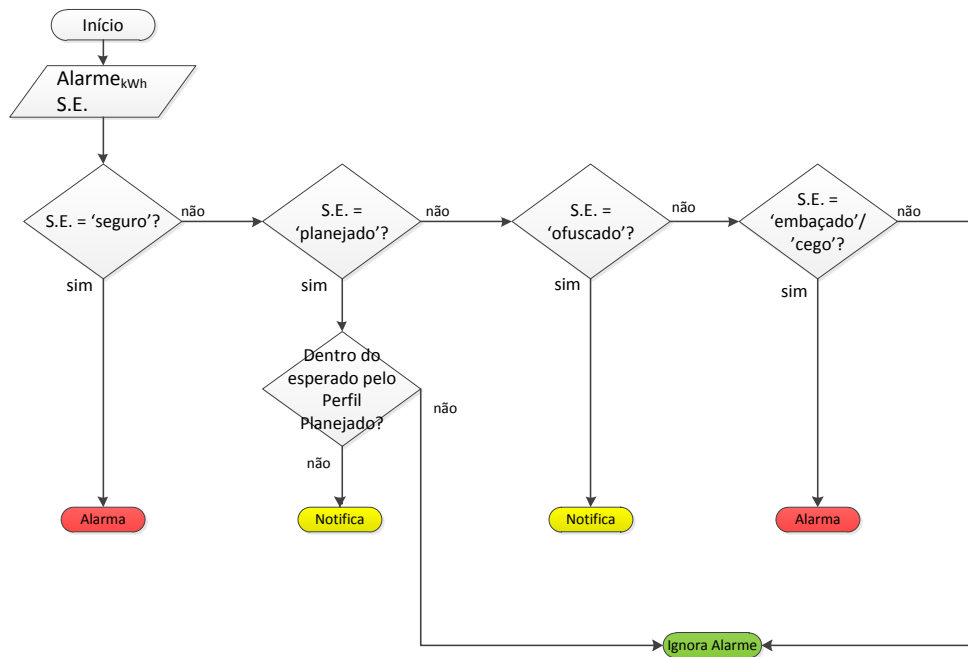


Figura 4.33: Sinalização e alarme para os estados de consumo

Já para o alarme de conforto, verifica-se inicialmente se o sensor está ofuscado ou cego, conforme mostrado na figura 4.34. Caso ele esteja ofuscado o alarme é suprimido e nenhuma ação é tomada. Caso o sensor esteja cego o alarme é confirmado. Não estando, verifica-se se o par ordenado (temperatura, umidade) se encontra sobre a região de ventilação da carta de Givoni. E, caso esteja, verifica-se qual é o estado das janelas: abertas ou fechadas. Se elas estiverem fechadas e o sistema de climatização desligado é gerado um sinal ou uma notificação para a abertura das janelas. Se as janelas estiverem fechadas e o sistema de climatização acionado verifica-se a possibilidade de ajustar o *setpoint* do ar condicionado. Caso não seja possível nenhuma ação pode ser tomada e a situação é relata ao supervisor. No entanto, se as janelas estiverem abertas, o SMV gera um sinal para o fechamento das janelas, acionamento do ar condicionado e relato da situação para o Supervisor. Se, o par ordenado (temperatura, umidade) estiver em um outro ponto da carta - excluindo-se a região de conforto já que o alarme está indicando condições fora de conforto - a primeira verificação a ser realizada é do estado do sistema de climatização (se está acionado). Caso ele não esteja as janelas são fechadas, o sistema de climatização acionado e o alarme suprimido. Caso o sistema de climatização estiver ligado ajusta-se o *setpoint* do sistema, caso seja possível. É importante frisar que a inércia térmica do ambiente deve ser conhecida e considerada. É gerado um comando ou uma notificação para

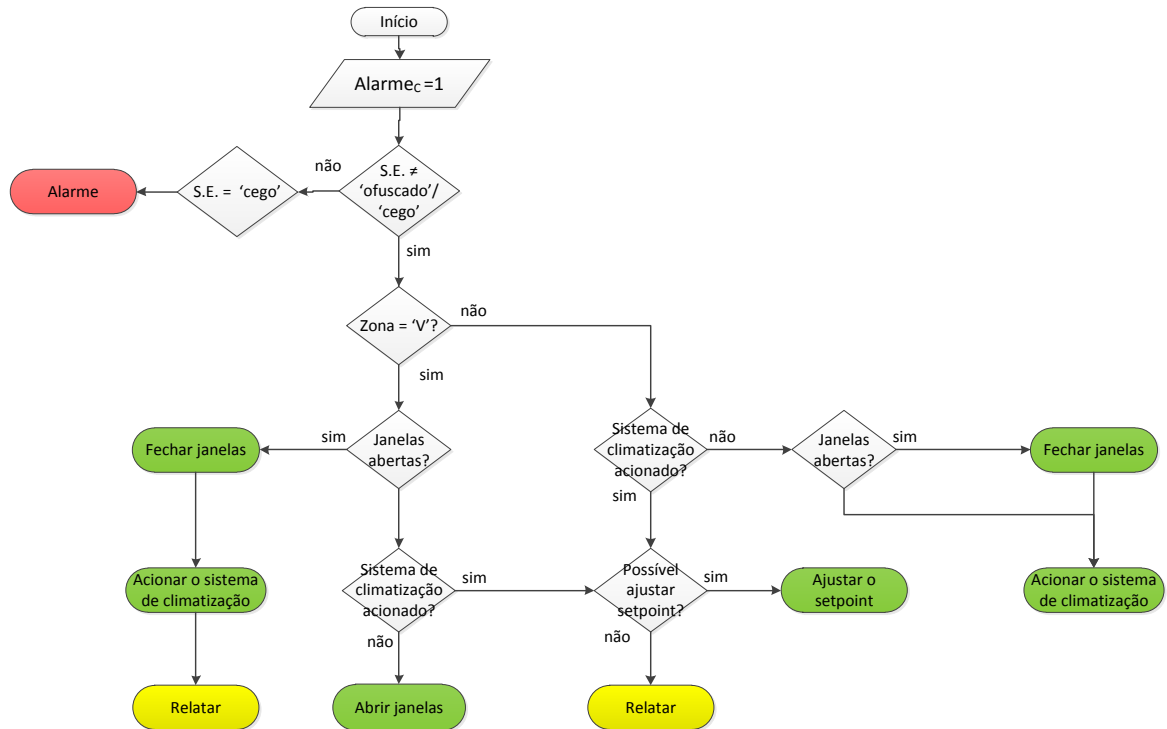


Figura 4.34: Sinalização e alarme para os estados de conforto térmico

Já o alarme gerado pelo CuSum de iluminância, conforme apresentado na figura 4.35, somente é confirmado se o sensor de luminosidade estiver cego. Caso ele não esteja, são verificados em sequência a existência de pessoas no ambiente, o estado das janelas e o estado das luminárias. Caso após essas verificações e eventuais medidas corretivas, o ambiente ainda esteja com uma luminosidade aquém da requerida, é gerado um relato pelo sistema supervisor.

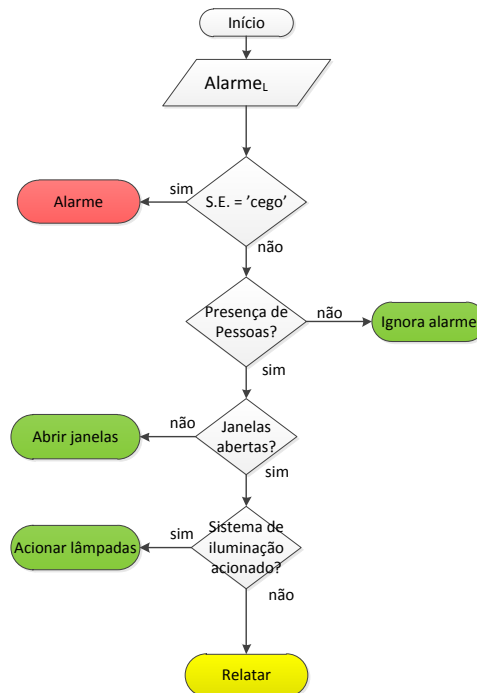


Figura 4.35: Sinalização e alarme para os estados de conforto lumínico

#### 4.6.6 Sistema supervisorio

O sistema supervisorio é responsável pelo armazenamento, integração e mapeamento de dados. O supervisorio é capaz de agregar os dados de diversos ambientes maiores ou unidades de consumo criadas virtualmente no servidor. Em uma edificação provida, por exemplo de módulos SMV em todos os seus ambientes, o consumo de seus andares é a soma do consumo de cada ambiente. Os índices de conforto são a média aritmética dos índices de cada um dos seus ambientes, de modo que é possível analisar a edificação como um todo e rapidamente rastrear setores e ambientes.

A ferramenta desenvolvida para a validação *online* da operação de edificações é apresentada nas seções seguintes.

##### 4.6.6.1 Interface do sistema de validação *online* da operação de edificações

A interface foi desenvolvida no software Eclipse com o objetivo de facilitar a tarefa de validação *online* da edificação. A ferramenta é dotada de telas de monitoramento que mostram de maneira global as condições operativas das edificações.

Na tela principal, mostrada na figura 4.36, existe um menu de seleção de configurações do sistema e uma barra inferior com *links* para as demais telas. As opções do menu de seleção (indicadas pelos números 1-9 na figura 4.36) foram adicionadas para fins de desenvolvimento. Elas permitem ao usuário simular a coleta de dados por meio de um banco de dados contendo medições e dados simulados pelo EnergyPlus. Para simular a coleta de dados o usuário deve: selecionar o modo de operação do software para *offline* (indicado pelo número 2 na figura 4.36), escolher a edificação que se deseja simular (indicado pelo número 3 na figura 4.36), a fonte de dados e as datas de início e fim da simulação (indicado pelo número 4 na figura 4.36). Existem também botões para iniciar a simulação (indicado pelo número 9 na figura 4.36), parar (indicado pelo números 8 na figura 4.36) e pausar (indicado pelo número 7 na figura 4.36) uma simulação em andamento. Os botões indicados pelas letras A-I abrem as seguintes telas:

- A: Tela inicial
- B: Tela de supervisão
- C: Tela de alarmes
- D: Tela de monitoramento
- E: Tela de agendamento
- F: Tela de análise do consumo energético
- G: Tela de Controle Estatístico
- H: Botão de login
- I: Sair

A tela de supervisão (4.37) apresenta uma análise visual de todas as edificações que compõem o complexo em análise. Complexos, edificações e ambientes são mostrados em uma representação de árvore e seu estado em tempo real é mostrado pela sua cor. Caso não haja alarmes e as variáveis de conforto estejam dentro de valores aceitáveis, o ambiente é mostrado em verde. Caso existam alarmes mas as condições de conforto ainda estejam satisfeitas, o ambiente se apresenta em amarelo. E caso as condições de conforto não sejam mais adequadas o ambiente é mostrado em vermelho. As cores das edificações e complexos serão verdes se todos os ambientes estejam verdes, amarelos se não existem



Figura 4.36: Tela Geral do Validador

ambientes em vermelho e vermelho caso contrário. Caso a comunicação com o SMV seja perdida o ambiente / edificação / complexo é mostrado em cinza.

Na tela existe a opção de visualização de ambientes reais e virtuais. Ambientes virtuais são gerados a partir da característica do multicanal de agregar consumos. Para o exemplo de caso do prédio comercial por exemplo, é possível instalar um dispositivo em cada uma das zonas em cada andar, de modo que o consumo de cada andar é obtido pela soma algébrica dos consumos dos multicanais das zonas, o consumo da edificação é dado pela soma dos consumos de todas as zonas. É possível também verificar o consumo de todas as zonas similares, por exemplo.

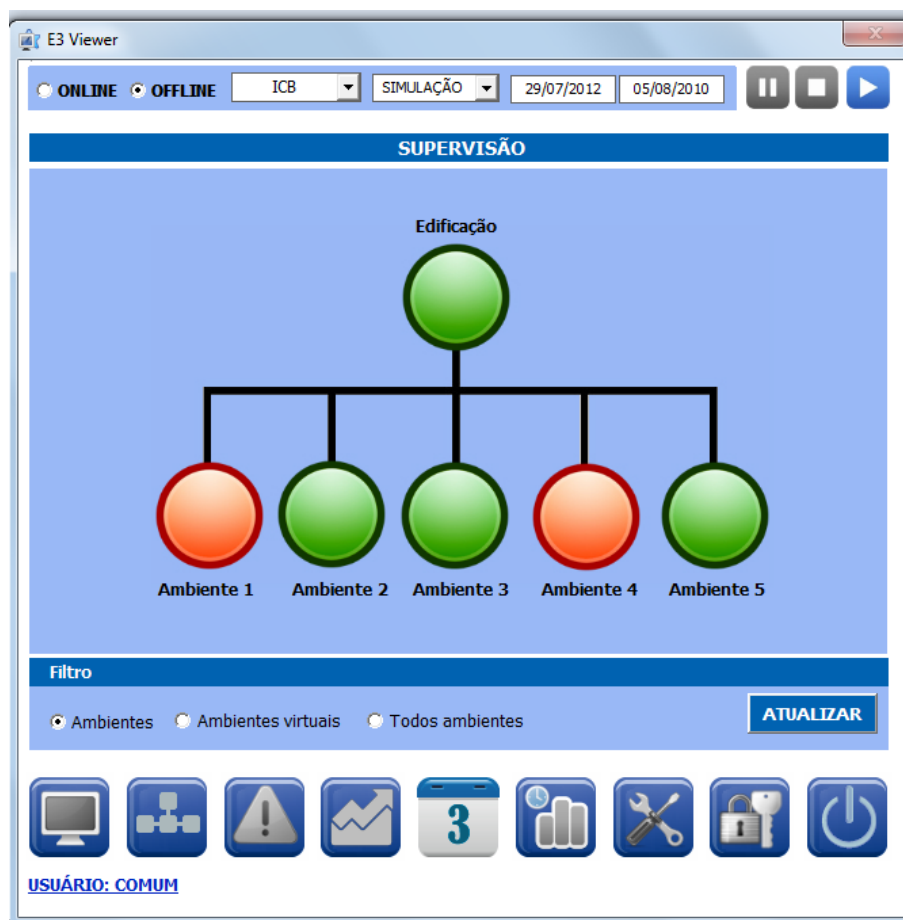


Figura 4.37: Tela de supervisão do Validador

A tela de alarmes, mostrada na figura 4.38, apresenta uma lista de todos os alarmes gerados pelo sistema. Os alarmes podem ser filtrados por ambiente e por data de ocorrência para facilitar a visualização histórica dos alarmes.



Figura 4.38: Tela de alarmes do Validador

A tela de tendência (figura 4.39) apresenta barras de opções à esquerda onde se pode escolher a edificação / ambiente e a variável que se deseja visualizar. O menu de eventos planejados apresenta um resumo dos eventos planejados (e.g. férias e feriados) da semana. O menu de alarmes apresenta um resumo dos últimos alarmes.

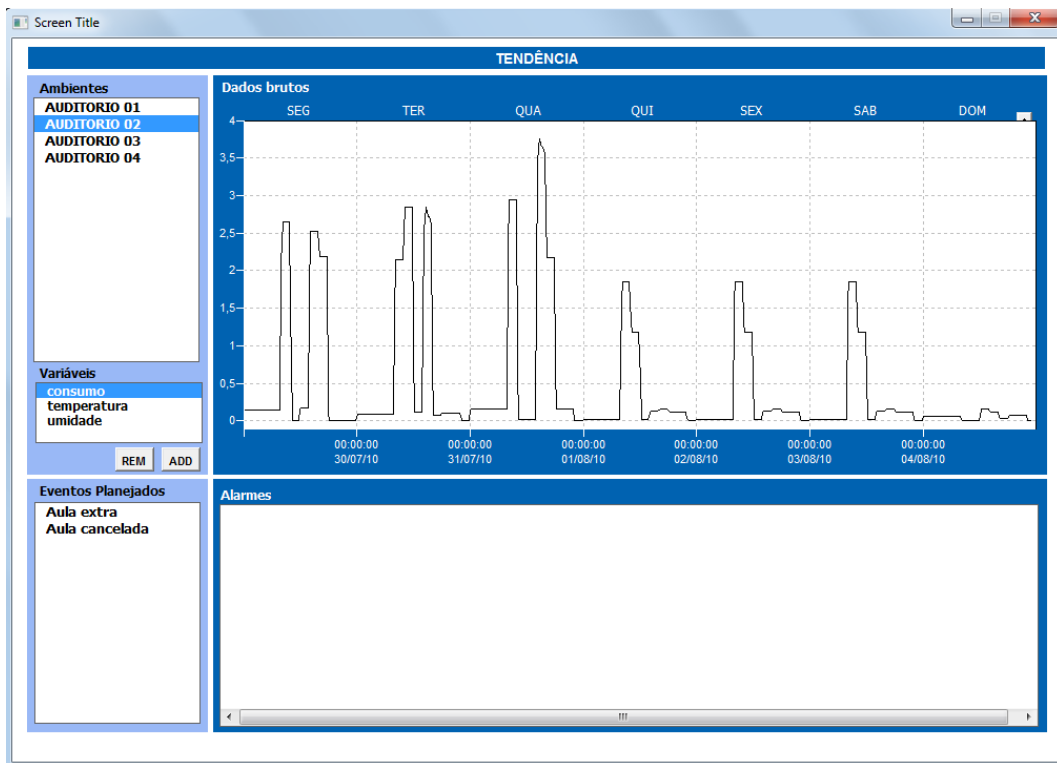


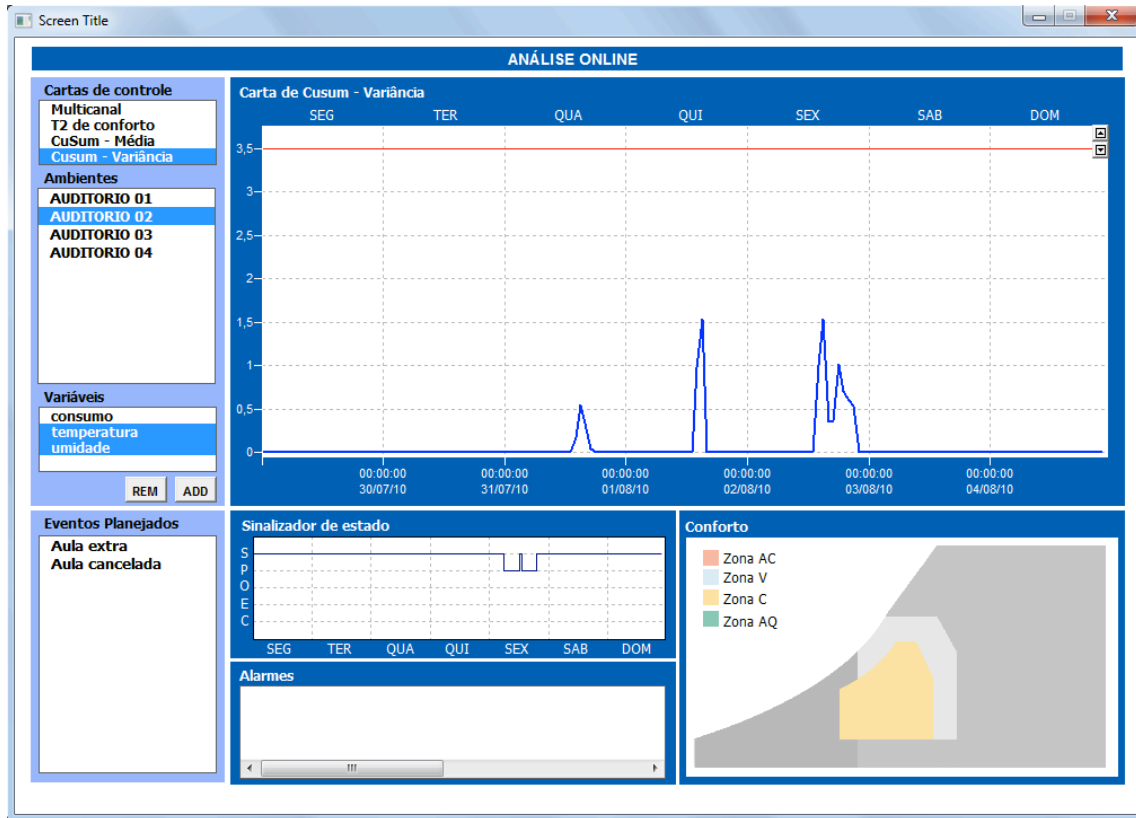
Figura 4.39: Tela de tendência do Validador

A tela de agendamentos (4.40) permite a criação dos chamados eventos programados que irão criar o perfil do Fator de Utilização da edificação e definir o sinalizador de estado dos medidores para 'planejado' caso seja inserido um evento. Ao se inserir um evento deve-se criar um nome e uma descrição para facilitar análises posteriores. O evento pode ter duração de horas ou dias e pode ser programado para repetir de maneira cíclica. Ao inserir um evento é inserido também o fator de utilização a ser considerado para aquele evento. Os eventos existentes podem ser visualizados pelo calendário.

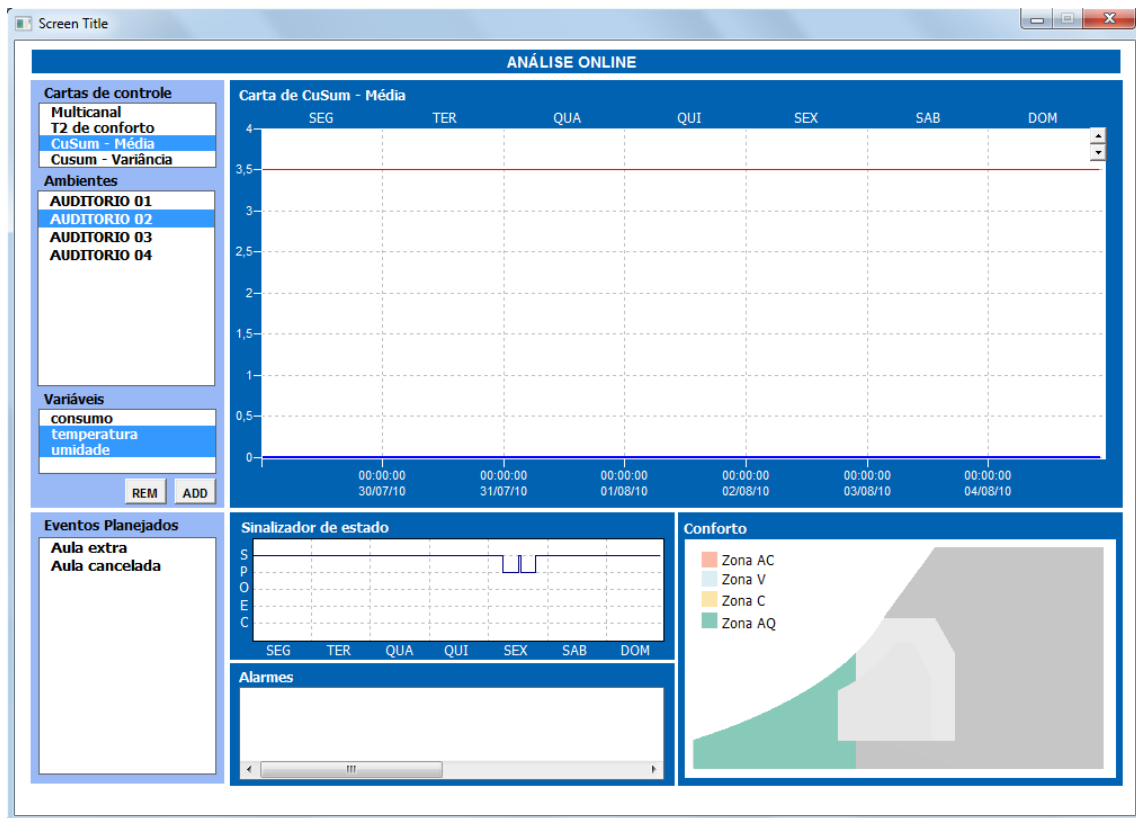


Figura 4.40: Tela de agendamento do Validador

A tela de controle estatístico (figura 4.41) apresenta os gráficos de CuSum e de  $T_2$ , o sinalizador de estado, um resumo dos últimos alarmes, e um menu de conforto onde é apresentado um gráfico de Givoni simplificado de acordo com as possibilidades operativas das edificações. A cada instante do tempo, verifica-se em qual região de Givoni o ambiente se encontra e a região é realçada permitindo uma fácil identificação da medida a ser tomada para a melhoria do conforto térmico. A figura 4.41a mostra um instante em que a indicação da carta de controle é a de conforto. Já a figura 4.41b mostra uma situação em que a indicação é de aquecimento.



(a)



(b)

Figura 4.41: Tela de CEP do Validador

Nas telas de configurações (figura 4.42), os usuários autenticados, inserem os dados necessários para a metodologia. Estas configurações são armazenadas pelo supervisor e enviadas para os módulos SMV.

**E3 Viewer**

ONLINE  OFFLINE
 COMPLEXO
HISTÓRICO
DATA INICIAL
DATA FINAL

---

**CONFIGURAÇÕES**

**Análise Multicanal**

Periodicidade: semanal
Resolução: 1 horas

Usar modelo diferente para período letivo e período de férias?  SIM  NÃO

Início do primeiro semestre: 01/01/2010
Início do segundo semestre: 01/08/2010  
 Fim do primeiro semestre: 20/06/2010
Fim do segundo semestre: 20/12/2010

**Memória dos modelos**

Rápido Período Letivo: 4 ciclos
 Histórico Período Letivo: 36 ciclos  
 Rápido Período de Férias: 2 ciclos
 Histórico Período de Férias: 12 ciclos  
 Memória em caso de eventos: 96 ciclos

**Parâmetros do CuSum-Média** **Parâmetros do CuSum-Variância**

Limiar (h): 3,5 Drift (v): 1,5
Limiar (h): 3,5 Drift (v): 1,5

**Estimativa da medida**

Número máximo de canais consecutivos em que a medida é estimada em caso de

Falha de comunicação com o sensor: 2 canais  
 Ocorrência de spike: 2 canais

---

UFMG
ICB
 Dados Tarifários
 Análise Multicanal
 Dados Físicos/Operacionais

**USUÁRIO: COMUM**

(a) Tela 1

**E3 Viewer**

ONLINE  OFFLINE
 COMPLEXO
HISTÓRICO
DATA INICIAL
DATA FINAL

---

**CONFIGURAÇÕES**

**Dados Físicos/Operacionais**

Modalidade Tarifária: CONVENCIONAL

Subgrupo: A4
Demanda Contratada (KW): 00000

Ambiente: AUDITORIO 02
◀ ▶

Área de Ocupação (m²): 250
Números de Usuários: 300

Iluminação média - norma NBR5413: 300
 Consumo Energético  
 Potência instalada - sistema de iluminação: 4
 Umidade  
 Potência instalada - sistema de climatização: 7.4
 Temperatura  
 Potência instalada - demais sistemas: 0
 Luminosidade

Intervalo de Amostragem: 15 minutos

Ambiente virtual: 
◀ ▶

---

UFMG
ICB
 Dados Tarifários
 Análise Multicanal
 Dados Físicos/Operacionais

**USUÁRIO: COMUM**

(b) Tela 2

Figura 4.42: Telas de configurações do Validador

## 4.7 Considerações finais

Foram propostos uma metodologia e um sistema para a validação da operação da edificação. A etapa de qualificação, se assemelha muito às diversas metodologias existentes de auditorias energéticas em edificações. O importante é realizar uma auditoria criteriosa e coletar todos os dados necessários para as demais etapas. A estrutura multicanal se mostrou adequada para acomodar as não linearidades do consumo e para moldar sua característica cíclica. Ela permite também analisar unidades de consumo, computando o consumo agregado como a soma dos consumos individuais. O perfil de consumo modelado pela estrutura multicanal é monitorado utilizando CuSum para detectar mudanças e alarmar quando as mudanças entre o perfil esperado de consumo e o que realmente ocorreu for maior do que o limite desejado para a estatística. Os ajustes dos parâmetros do CuSum são realizados de forma a ajustar a sensibilidade do modelo em relação ao tamanho da mudança que se deseja identificar. Caso ocorra a instalação de novos equipamentos ou sistemas, diz-se que a edificação mudou de estado de operação, e é necessário ajustar os parâmetros do algoritmo de CuSum para o novo estado operacional. A estrutura multicanal se mostrou adequada também para o monitoramento da luminosidade visto que os valores típicos de iluminância variam durante o dia. Não faria sentido, portanto, monitorar a luminosidade com uma tendência temporal simples, a não ser que o ambiente monitorado não receba nenhum tipo de luminosidade natural. O monitoramento do índice  $T^2$  de conforto permite uma análise temporal do conforto e fornece uma medida de quão distante uma situação está do estado de conforto térmico.

## Capítulo 5

# Aplicação da metodologia de validação a uma edificação real

Apresenta-se a aplicação da metodologia proposta à edificação estudada. Os resultados obtidos e possibilidades de uso das ferramentas propostas são discutidos. Conforme apresentado no capítulo 3, a edificação estudada é composta por quatro auditórios do ICB. Os auditórios possuem  $250m^2$ , ocupação máxima de 300 pessoas e sistemas de iluminação, climatização e bombeamento. O auditório 2 foi modelado no EnergyPlus. Os dados simulados obtidos do modelo calibrado do auditório 2 são utilizados na etapa de validação *online* devido à escassez de dados reais.

### 5.1 Qualificação da instalação

A potência instalada nos auditórios do ICB, apresentada na tabela 5.1, foi inferida de acordo com levantamentos de campo, valores de placa de motores (no caso do sistema de ventilação) e leituras de corrente demandada (no caso das bombas).

Tabela 5.1: Potência instalada nos auditórios (em kW)

	Iluminação (kW)	Ventilação (kW)	Bombeamento de água (kW)	Total (kW)
Auditório 1	4,0	7,4	-	11,4
Auditório 2	4,0	7,4	-	11,4
Auditório 3	2,1	7,4	1,3	10,8
Auditório 4	4,0	7,4	1,1	12,5

### **Condições de uso e manutenção da edificação**

Os auditórios são usualmente utilizados em disciplinas introdutórias de diversos cursos da área das ciências biológicas. Além de aulas, os auditórios também são utilizados em outros eventos como palestras e seminários. Portanto, seus usuários típicos são: docentes e alunos da universidade e sua equipe operacional.

A dinâmica de operação dos auditórios é a seguinte: os laboratórios são mantidos trancados nos períodos em que não são utilizados e sua chave mantida sob a guarda do Departamento de Serviços Gerais. O seu planejamento de uso é realizado pela Seção de Ensino, que reserva os dias / horários em que os auditórios são utilizados de acordo com as disciplinas ali ministradas e com a demanda do corpo docente e administrativo da universidade. Este planejamento é repassado semanalmente para o Departamento de Serviços Gerais, que fica em cargo dos agendamentos ocorridos na semana corrente.

Não existe planejamento de manutenção dos auditórios. Não há cadernos de ocorrência, lista de equipamentos ou manuais de nenhum dos equipamentos instalados. A manutenção corretiva é realizada por funcionários terceirizados, sendo que as relacionadas com o sistema elétrico são coordenadas por um engenheiro eletricitista funcionário da universidade. Este engenheiro é o responsável pela manutenção elétrica de todo o campus Pampulha. Não é realizada limpeza no subsolo dos auditórios e os responsáveis não sabem dizer qual a última limpeza realizada no sistema de ventilação. O auditório 3, que teve o seu sistema de iluminação reformado em 2007, se encontra no mesmo estado dos demais.

O sistema de ventilação, além de não ser alvo de manutenção ou limpezas, funciona só parcialmente. Em nenhum dos auditórios o sistema de insuflamento está funcionando. Não se conseguiu, entretanto, descobrir se esta foi uma decisão gerencial, dada a sujeira em que se encontra, ou se os respectivos motores estão queimados. Pelo que foi aferido não há nem ao menos ciência deste fato. A entrada de ar nos auditórios ocorre, portanto, somente por suas portas. Outro fato preocupante foi constatado: em um dos auditórios foram observadas marcas de água de inundação até a metade da instalação do ventilador insuflador de ar.

A luminosidade média de cada auditório foi aferida de acordo com a norma ABNT NBR 5382: Verificação de iluminância de interiores e, posteriormente, comparada com o valor determinado pela norma NBR 5413: Iluminância de interiores ABNT [1985, 1992]. Esta última apresenta valores

distintos para a luminosidade média recomendada em salas de aula (300 *lux*) e em plateias de auditório (200 *lux*). Os valores de luminosidade média aferidos para cada auditório – apresentados na tabela 5.2 – se encontram bem inferiores aos de referência. Uma diferença entre os valores recomendados e medidos já era esperada, visto que o número de luminárias existentes não é adequado para as dimensões e condições dos auditórios. Os auditórios 1, 2 e 4 possuem paredes escuras, luminárias com aletas em péssima condição de manutenção. Nestes ambientes a situação é agravada com um alto número de lâmpadas queimadas. Mesmo o auditório 3 possuindo paredes mais claras, luminárias reflexivas em bom estado de manutenção, não apresenta níveis de luminosidade adequados devido ao número inadequado de luminárias.

Tabela 5.2: Luminosidade aferida nos auditórios

Local	Luminosidade Média (lux)	Luminosidade Máxima (lux)	Luminosidade Mínima (lux)
Auditório 1	65	94	34
Auditório 2	62	103	10
Auditório 3	157	193	86
Auditório 4	83	132	26

A atuação dos sistemas de iluminação e ventilação é realizada de maneira manual e de responsabilidade dos usuários da edificação. Durante o período de levantamento de dados observou-se que os usuários, ao entrarem no auditório acionam os sistemas de ventilação e de iluminação, que permanecem acionados por todo o tempo em que são utilizados. Percebeu-se que, mesmo com o controle de acesso existente, frequentemente, ao serem desocupados, estes ambientes permanecem com algum de seus equipamentos acionado.

## 5.2 Qualificação da operação

Neta etapa foi realizado o monitoramento das variáveis de: corrente demandada, temperatura, umidade e luminosidade de cada um dos auditórios descritos no capítulo 3. Além dos dados internos aos auditórios, são monitorados, o consumo total das subestações das quais derivam os circuitos de alimentação dos auditórios (responsáveis pela alimentação de toda a edificação ICB) e as variáveis de temperatura e umidade externa. Os dados apresentados neste trabalho compreendem o período de 24 de outubro de 2009 à 04 de março de 2010 e de 01 de janeiro de 2011 a 31 de abril de 2011.

O consumo energético da edificação ICB é influenciado pelas condições ambientais externas,

como mostram os valores de correlação entre a potência demandada em cada uma de suas subestações e as variáveis de temperatura e umidade externa, apresentados na tabela 5.2. Os valores mostram que o consumo da edificação possui uma correlação positiva com a temperatura externa.

Tabela 5.3: Correlações: subestações

	Potência demandada E	Potência demandada K	Potência demandada C
Umidade externa	-0,45	-0,48	-0,42
Temperatura externa	0,56	0,61	0,54

As condições ambientais, no entanto, não realizam o mesmo efeito no consumo dos auditórios conforme mostrado nas tabelas 5.4, 5.5, 5.6, e 5.7, referentes respectivamente aos auditórios 1, 2, 3 e 4. Os valores de correlação indicam que os sistemas de ventilação forçada dos auditórios pouco ou nada afetam as condições ambientais internas (determinadas pelas variáveis externas). Este comportamento evidencia que estes sistemas não são capazes de atuar nas condições de conforto ambiental dos auditórios. Como estes possuem as mesmas características construtivas e sistemas de ventilação forçada idênticos, a diferença apresentada nos valores de correlação entre as variáveis de umidade e temperatura internas aos auditórios não era esperada. Uma explicação possível para tal comportamento é a existência de diferenças nas condições de manutenção e limpeza.

Tabela 5.4: Correlações: auditório 1 - dados de medições

	Potência demandada	Umidade interna	Temperatura interna
Umidade interna	-0,16	-	-
Temperatura interna	-0,19	-0,67	-
Luminosidade	0,85	-	-
Umidade externa		0,68	-0,59
Temperatura externa		-0,53	0,64

Tabela 5.5: Correlações: auditório 2 - dados de medições

	Potência demandada	Umidade interna	Temperatura interna
Umidade interna	-0,18	-	-
Temperatura interna	-0,08	-0,58	-
Luminosidade	0,88	-	-
Umidade externa		0,62	-0,60
Temperatura externa		-0,45	0,65

A tabela 5.9 apresenta um resumo do comportamento estatístico dos valores medidos de temperaturas e a tabela 5.8 apresenta os valores de umidade. A análise dos dados mostra que os auditórios

Tabela 5.6: Correlações: auditório 3 - dados de medições

	Potência demandada	Umidade interna	Temperatura interna
Umidade interna	0,03	-	-
Temperatura interna	-0,22	-0,79	-
Luminosidade	0,58	-	-
Umidade externa		0,71	0,65-0,59
Temperatura externa		-0,59	0,65

Tabela 5.7: Correlações: auditório 4 - dados de medições

	Potência demandada	Umidade interna	Temperatura interna
Umidade interna	-0,10	-	-
Temperatura interna	-0,05	-0,84	-
Luminosidade	0,86	-	-
Umidade externa		0,73	-0,61
Temperatura externa		-0,57	0,63

possuem valores característicos de temperatura e umidade superiores aos valores externos. Já era esperado este comportamento da umidade, visto que, conforme apresentado no capítulo 4, eles estão abaixo do nível da rua e sobre um lençol freático. Os auditórios 3 e 4 possuem, inclusive, um sistema de bombeamento de água para evitar que tenham seu subsolo inundado.

Tabela 5.8: Estatística descritiva: umidade dos auditórios - dados de medições

	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Externa	80,5	8,40	54,4	100,00
Auditório 1	80,7	6,04	58,3	100,00
Auditório 2	83,9	5,76	58,1	100,00
Auditório 3	81,6	7,08	55,8	100,00
Auditório 4	81,3	5,97	59,5	100,00

Os altos valores de umidade também eram esperados, dado o período no qual os dados foram coletados. A superioridade dos valores de temperatura pode ser explicada pelo fato dos auditórios permanecerem fechados boa parte do tempo e por não possuírem frestas que viabilizem a circulação de ar.

A aferição da luminosidade artificial foi realizada verificando-se, durante o período monitorado, qual a relação entre tempo de operação com luminosidade acima de um determinado nível pelo tempo total de uso do auditório. Os níveis verificados foram de 300, 200 e 100 lux. A tabela 5.10 mostra os valores encontrados para o nível de 100 lux, único nível satisfeito pelos auditórios. Os pontos de medição são os descritos no capítulo 3. Os valores encontrados mostram a precariedade de condições

Tabela 5.9: Estatística descritiva: temperatura dos auditórios - dados de medições

	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Externa	24,5	1,95	20,0	30,3
Auditório 1	26,0	1,91	20,5	29,5
Auditório 2	25,6	1,45	22,0	29,5
Auditório 3	26,0	1,86	21,2	30,0
Auditório 4	25,9	1,68	22,1	29,8

de operação dos auditórios.

Tabela 5.10: Índices de Adequação Lumínica com relação a uma luminosidade artificial de 100 lux

Ponto	Aud 1	Aud 2	Aud 3	Aud 4
Centro	66,9	77,8	30,8	58,6
Direita	13,7	2,9	85,4	59,7
Esquerda	61,7	87,2	77,3	1,7
Fundos	62,3	74,8	100	61,3
Palco	30,3	69,2	45,4	54,1

Após a coleta de dados *in loco* e com os dados monitorados, o auditório 2 considerado o de melhor condições pelas suas características construtivas, foi modelado no software EnergyPlus. O modelo foi calibrado e validado em função dos dados monitorados. Os erros encontrados para o modelo validado<sup>1</sup> de cerca de 0,5°C para a temperatura, 5% para a umidade relativa foram considerados aceitáveis.

### 5.3 Qualificação do desempenho

Conforme descrito no capítulo 4 a QD consiste em avaliar a instalação de acordo com 3 índices de adequação, um com relação ao conforto, um em relação a luminosidade e outro com relação ao contrato de demanda firmado com a concessionária de energia. Como os auditórios fazem parte de uma instalação maior e não possuem uma medição isolada de consumo - para a concessionária - não existe contrato e esta análise não será realizada.

Os índices de adequação são avaliados por meio de simulações do modelo EnergyPlus para o auditório 2 e representam a melhor condição possível de operação do auditório. O índice de conforto térmico do auditório 2 foi avaliado com relação a quatro condições de ocupação: ocupação mínima,

<sup>1</sup>Ver capítulo 3.

de 50 pessoas; ocupação média, de 150 pessoas, ocupação máxima, de 300 pessoas. Os resultados encontrados são apresentados na tabela 5.11.

Tabela 5.11: Índices de Adequação do Auditório 2

Ocupação	Índice
Mínima	48,03
Média	76,35
Máxima	76,35

Como apresentado no capítulo 3, foi simulada também uma situação de *retrofit* do auditório com a substituição dos sistemas de iluminação e climatização existentes por outros mais eficientes. Nestas condições os índices seriam significativamente elevados como mostra a tabela 5.12

Tabela 5.12: Índices de Adequação do Auditório 2 com *retrofit*

Ocupação	Índice
Mínima	96,3
Média	96,8
Máxima	97,1

A adequação lumínica dos auditórios, com relação à luminosidade natural, é extremamente pequena visto que ele não possui janelas e como o *retrofit* não contempla mudanças estruturais, os índices serão os mesmos em ambos os casos. Por isso não foram simulados os níveis de luminosidade em todos os pontos indicados pela NBR 5413, mas somente nos pontos onde a luminosidade foi monitorada de forma a verificar qual a influência da luminosidade natural. Os valores encontrados foram inferiores a 5 % em todos os pontos.

## 5.4 Validação *online* da operação da edificação

Ao se realizar a etapa de qualificação dos auditórios, a ser apresentado na próxima seção, encontrou-se uma condição operativa muito aquém daquela requerida para os ambientes. Esta situação, aliada às dificuldades com o sistema de coleta de dados, e inatividade de parte dos auditórios para reformas, levou à decisão de se realizar uma simulação do processo de monitoramento, utilizando dados simulados para o auditório 2 no software EnergyPlus, já utilizado para as etapas de qualificação. Para isso foi simulado um ano de operação do auditório 2 em duas condições globais de operação, na situação atual, modelando o auditório tal como ele é - e calibrado a partir de dados de medições, e uma situação de *retrofit* dos ambientes. Dados das simulações e do *retrofit* realizados são encontrados no capítulo

3 e no anexo 3. As próximas seções descrevem portanto as técnicas de monitoramento de consumo energético e do conforto térmico propostas e aplicadas em dados simulados do auditório modelado.

### 5.4.1 Monitoramento *online* do conforto térmico

A figura 5.1 mostra a carta multivariada de controle térmico com relação a temperatura (Temp) e umidade relativa (UR), considerando o número de pessoas (N) existentes no ambiente. Nela, são mostradas as condições térmicas, do auditório quando este opera com ocupação máxima e no verão. Observa-se que o índice  $T^2$  (distância estatística à região de conforto de Givoni) é, durante toda a semana, superior ao limite de conforto térmico. Isto ocorre mesmo nos períodos noturnos em que o auditório não é utilizado.

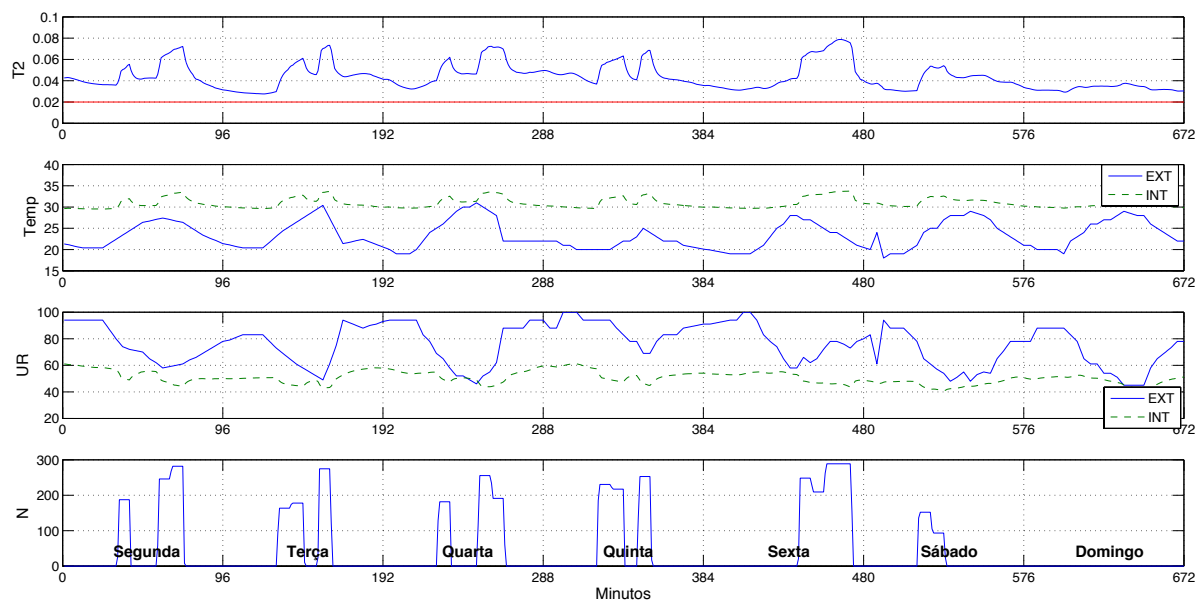


Figura 5.1: Condições térmicas do auditório 2 no verão com ocupação máxima para dados simulados

Durante a semana mostrada, o valor máximo encontrado para o índice  $T^2$  é de 0,0788. A interpretação deste valor é facilmente visualizada ao traçá-la sobre a carta psicrométrica, juntamente com a região de conforto de Givoni como mostra a figura 5.2.

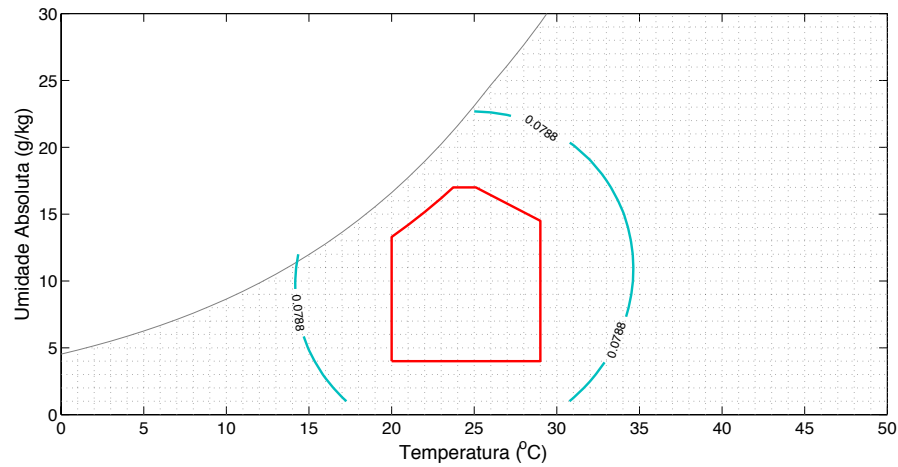


Figura 5.2: Distância estatística máxima para verão com ocupação máxima para os dados simulados do auditório 2

A sensação de desconforto permanece mesmo para sub-ocupações como pode ser verificado na figura 5.3. Nesta figura são mostradas as condições térmicas e o índice  $T^2$  representado na Carta de Conforto Térmico.

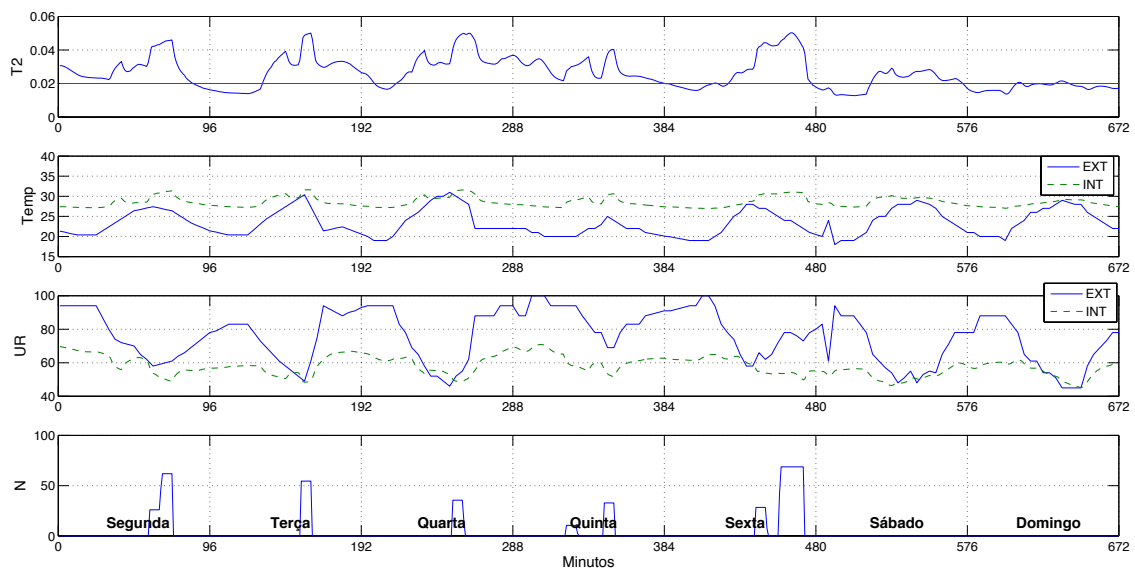


Figura 5.3: Condições térmicas do auditório no verão com ocupação mínima para os dados simulados do auditório 2

O comportamento do índice  $T^2$  para a semana ilustrada anteriormente com ocupações mínima e máxima, é mostrado novamente na figura 5.4, agora com o auditório operando a vazio, ou seja, sem pessoas mas com todos os sistemas em uso. É possível verificar que nem mesmo ao operar a

vazio - sem cargas térmicas internas relativas à presença de pessoas - o auditório é capaz de fornecer um ambiente termicamente agradável. O auditório opera com índice de conforto  $T^2$  ultrapassando o Limite de Controle em muitos períodos e/ou permanentemente abaixo mas muito próximo do limite.

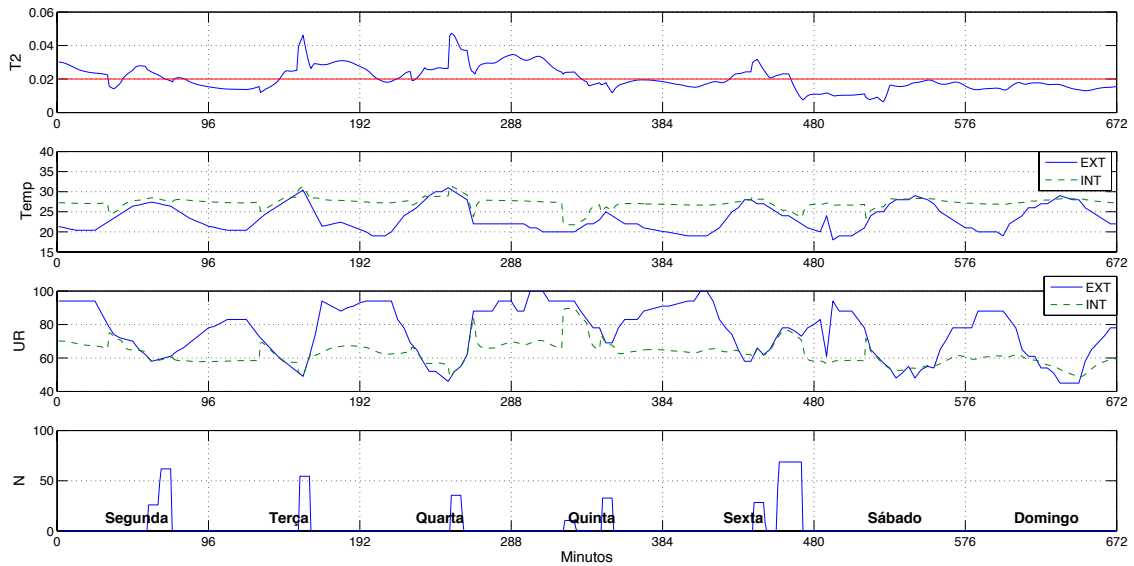


Figura 5.4: Condições térmicas do auditório no verão sem ocupação para os dados simulados do auditório 2

A figura 5.5 mostra os valores máximos encontrados para a estatística  $T^2$  nas seguintes condições operacionais: a vazio (0.473), com 50 pessoas (0,0502), 150 pessoas (0,0532) e 300 pessoas (0.0788). Nota-se que a diferença no desconforto não aumenta linearmente com o aumento do número de pessoas.

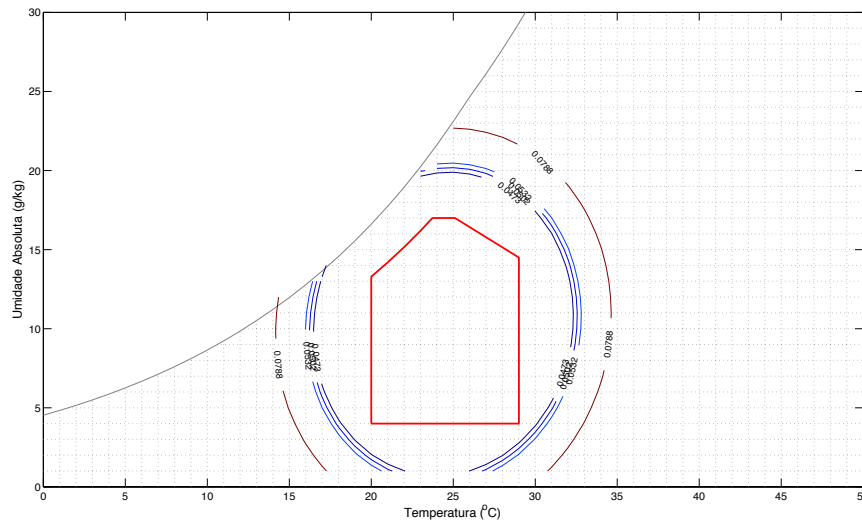


Figura 5.5: Distância estatística máxima para o verão para os dados simulados do auditório 2

O valor máximo da estatística  $T^2$  mostra o pior cenário ocorrido durante a semana e sua análise pode ser complementada com o valor das distâncias médias, mostrado na figura 5.6. No entanto, a discrepância entre os dois casos mostra a necessidade do monitoramento *online*, correlacionado com a informação de uso dos ambientes - presença de pessoas. O indicativo de conforto totalizado para um período anual, como feito no estado da prática e na fase de qualificação do desempenho da edificação, é somente um indicativo da capacidade da instalação de fornecer condições de conforto e não uma representação das reais condições operativas.

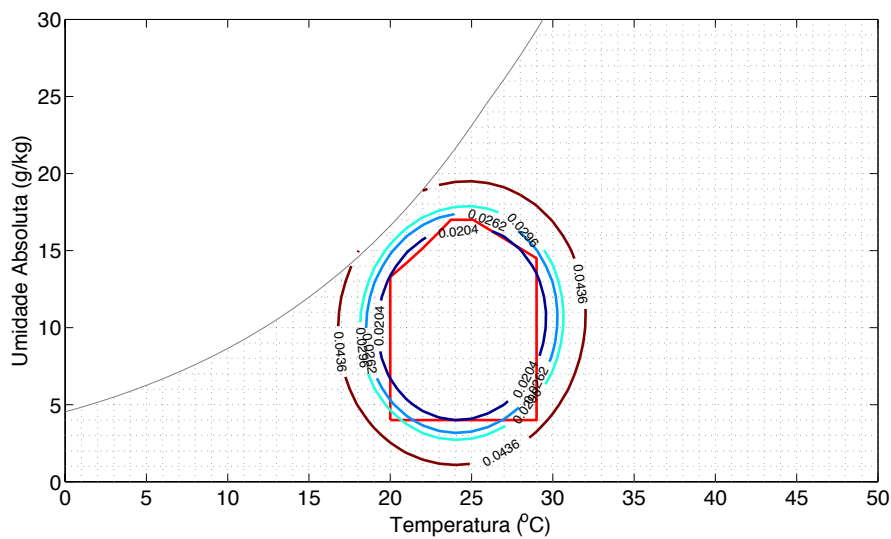


Figura 5.6: Distância estatística média para o verão para os dados simulados do auditório 2

A análise da carta de Givoni para uma semana típica de verão com ocupação máxima, como mostrado na figura 5.7 fornece uma indicação da estratégia a ser tomada na tentativa de solucionar o desconforto. Como os pontos de temperatura e umidade interna se localizam na região da carta que indica a ventilação noturna como estratégia para alcançar o conforto, o acionamento do próprio sistema de exaustão do auditório durante parte da noite é uma possível ação para diminuição do desconforto durante o verão.

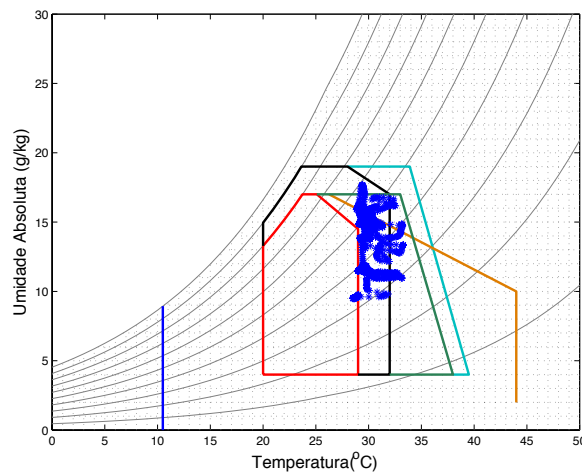


Figura 5.7: Diagrama de Givoni no verão com ocupação máxima para os dados simulados do auditório

2

Mesmo no inverno, o auditório, ao ter sua ocupação máxima, não é capaz de fornecer condições térmicas agradáveis. Observa-se ao verificar o índice  $T^2$  de conforto para uma semana típica se inverno, como mostrado na figura 5.8, que, ao ser ocupado, a temperatura interna do auditório se eleva, levando o índice  $T^2$  para além do limite de conforto.

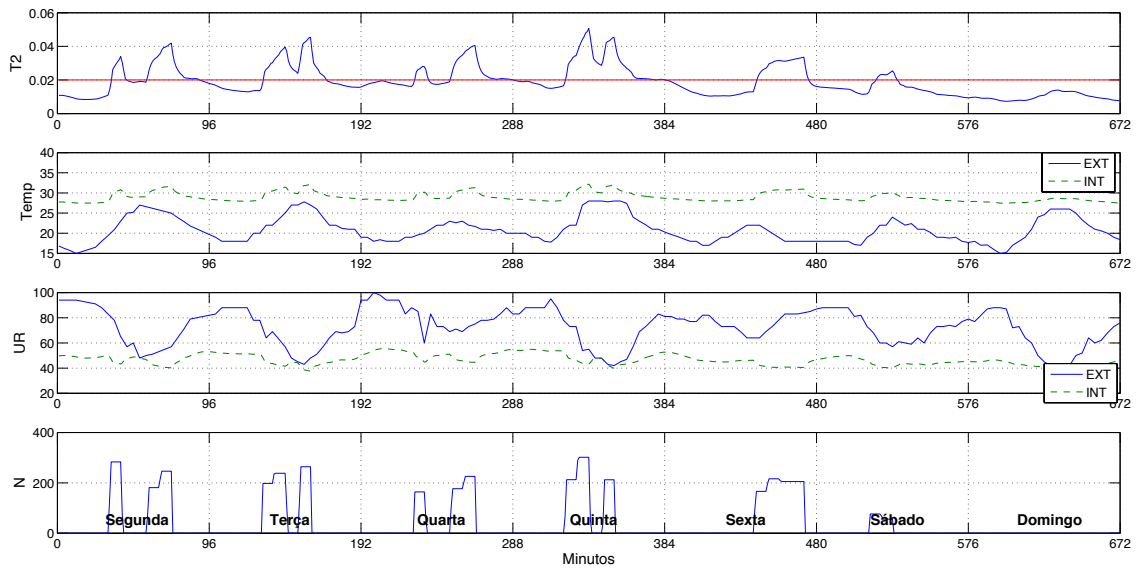


Figura 5.8: Condições térmicas do auditório no inverno com ocupação máxima para os dados simulados do auditório 2

A diferença entre os valores médios e máximos encontrados para a estatística  $T^2$  nas situações de: nenhuma ocupação (0,006 de média e 0,0252 de máximo), ocupação de 50 (0,007 de média e 0,0277 de máximo) e de 300 pessoas (0,0192 de média e 0,0506 de máximo) são mostrados nas figuras 5.10 e 5.9. Estes resultados reforçam a dificuldade de se analisar as condições de conforto considerando valores médios ou desconsiderando períodos sem ocupação.

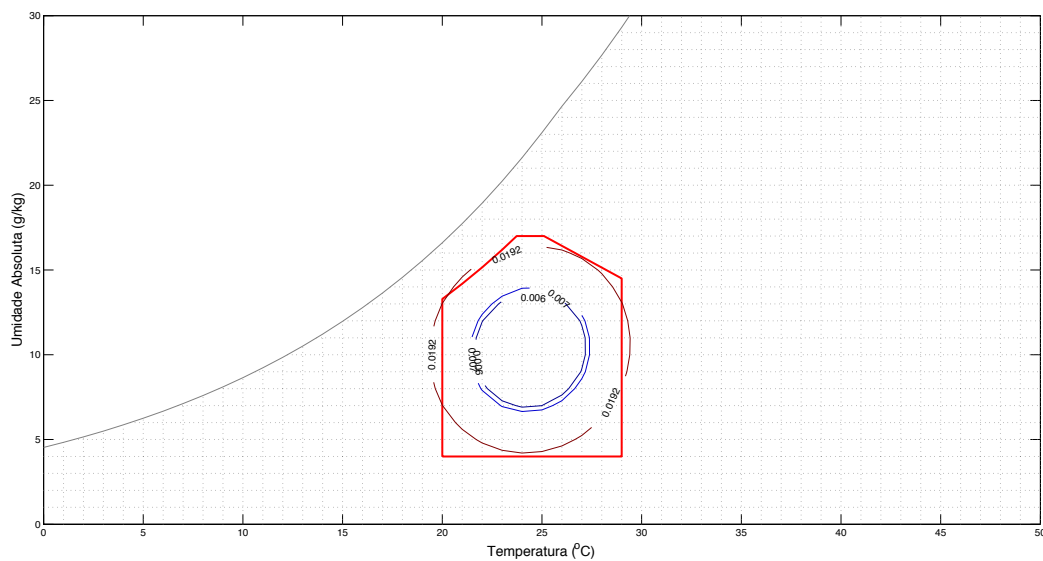


Figura 5.9: Distância estatística máxima no inverno para os dados simulados do auditório 2

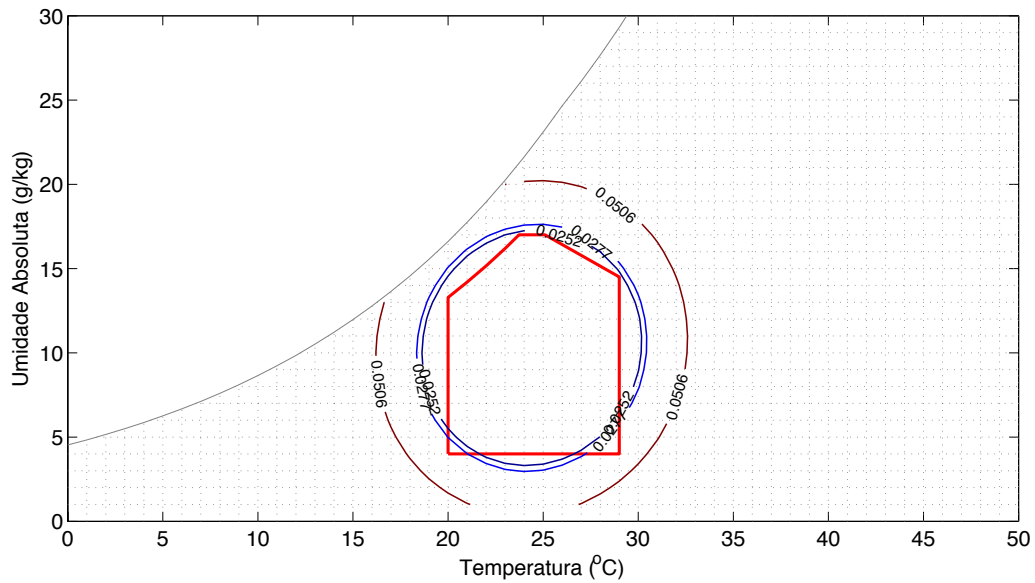


Figura 5.10: Distância estatística média no inverno para os dados simulados do auditório 2

Conforme discutido no capítulo 3, uma situação de *retrofit* foi simulada para o auditório. Nesta condição, como esperado, os valores de temperatura e umidade ficam mais próximos aos desejados e uma menor influência imediata da ocupação é identificada na estatística  $T^2$ . Somente em ocupações extremas a carga térmica é suficiente para levar o índice para além do limite estipulado, como pode ser visto na figura 5.11.

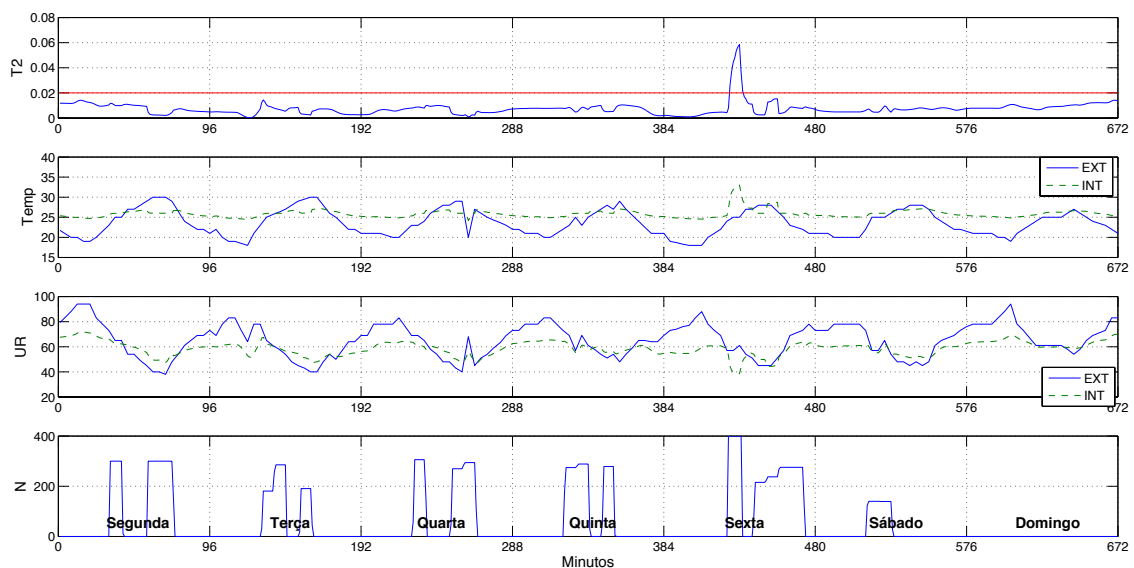


Figura 5.11: Condições térmicas do auditório 2 com retrofitting no verão com ocupação máxima

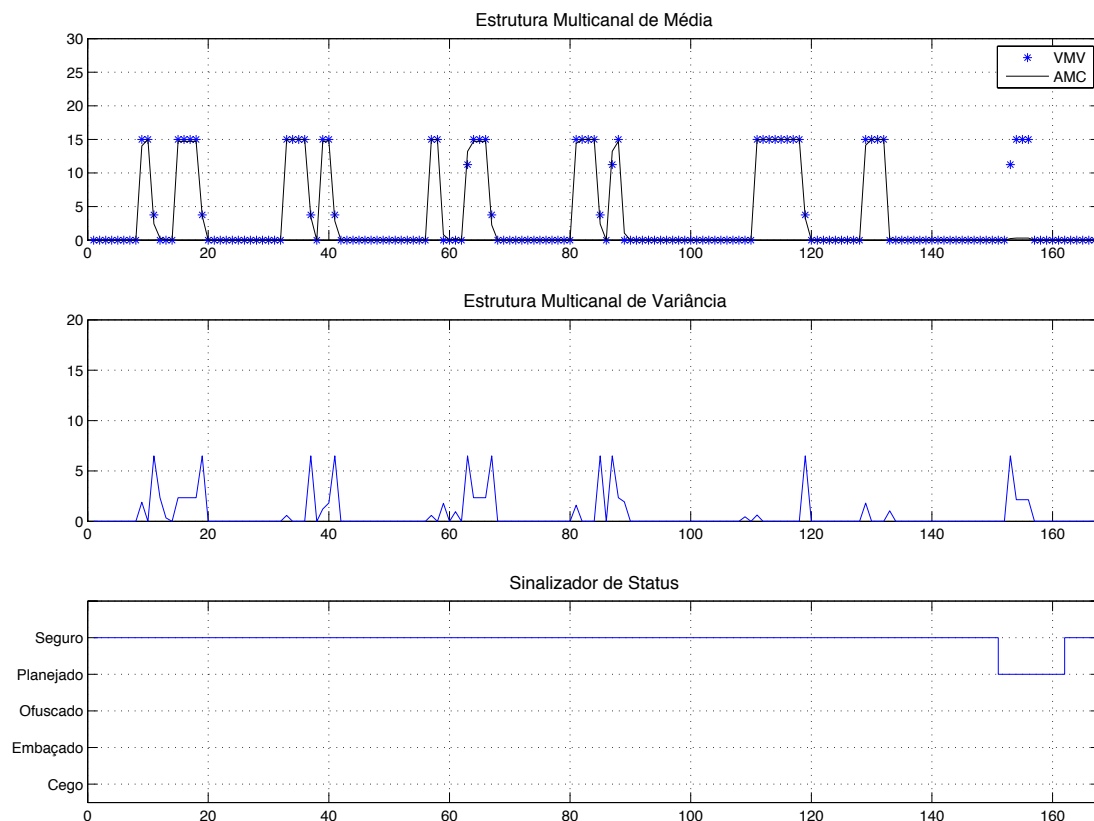


Figura 5.12: Estruturas multicanais para média e variância e sinalizador de estado para os dados simulados do auditório 2

### 5.4.2 Monitoramento *online* do consumo

As figuras 5.12 e 5.13 mostram uma situação em que o auditório é utilizado no domingo. Como este evento foi programado, a taxa de amortização do modelo é reduzida para diminuir a influência destes valores no modelo. Caso o evento não fosse planejado, os valores de média e variância aumentariam significativamente de valor e alarmes seriam gerados. Mas, como esta informação foi passada ao sistema, o sinalizador de estado do sinal de consumo muda para 'planejado', os fatores de amortização dos modelos de curta e média duração são atenuados, e os alarmes gerados pela estatística de CuSum são ignorados.

Outro evento planejado foi simulado considerando, neste caso, um feriado durante a quinta e a sexta-feira. Como pode ser visto nas figuras 5.14 e 5.15 o consumo abaixo do esperado ocorrido nestes dias foi identificado pelos testes de CuSum e para variância. Como no caso anterior, essa situação não é alarmada pois foi programada.

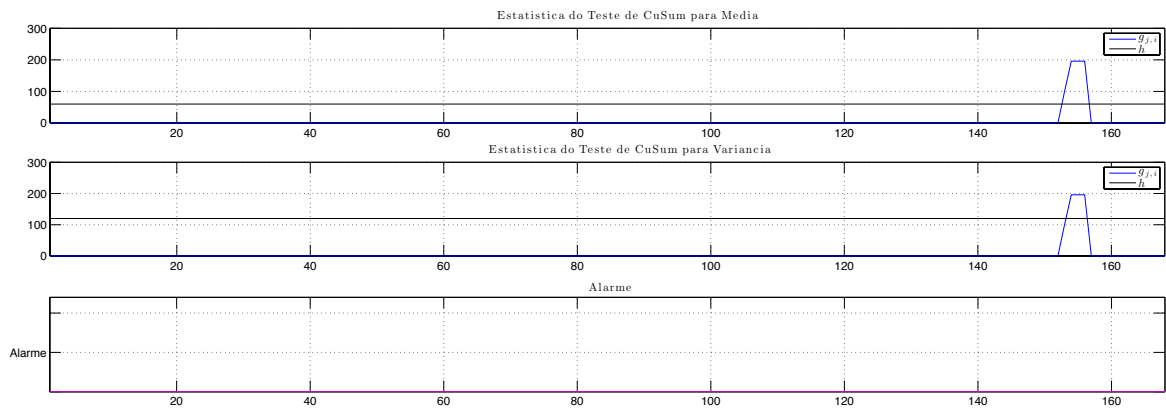


Figura 5.13: Resultado dos testes de CuSum e alarmes para os dados simulados do auditório 2

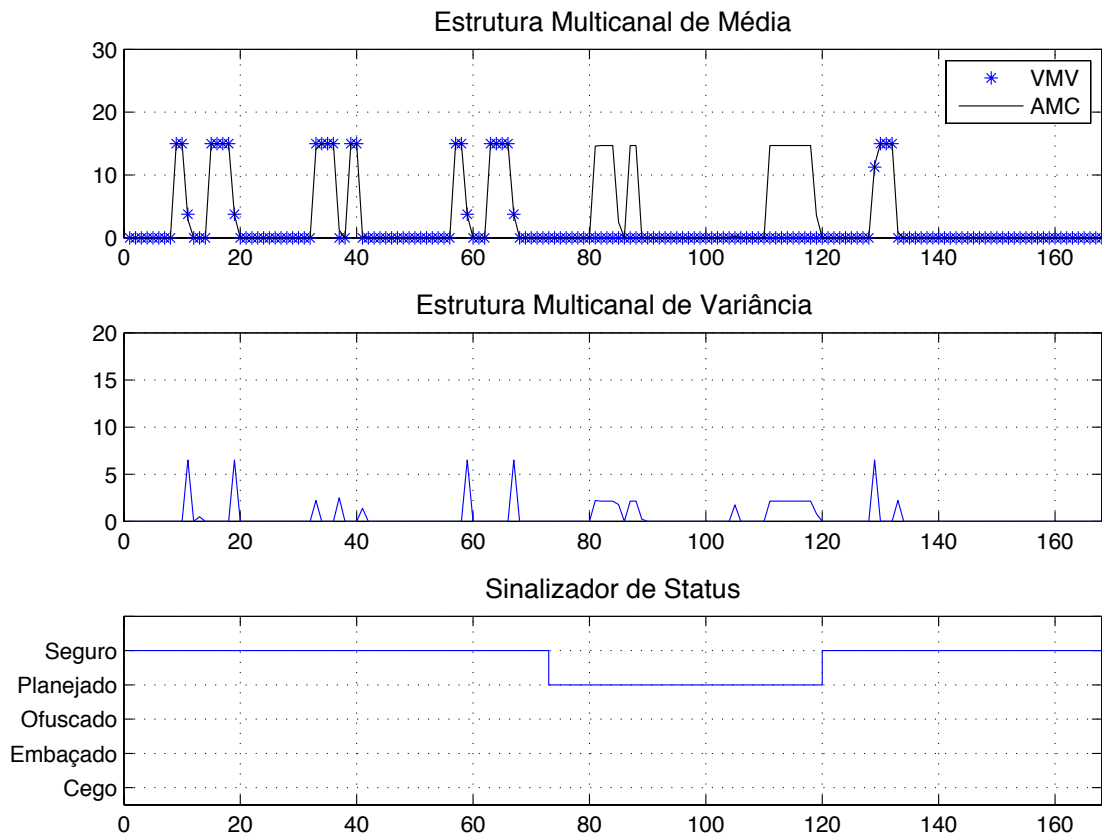


Figura 5.14: Estruturas multicanais para média e variância e sinalizador de estado para os dados simulados do auditório 2

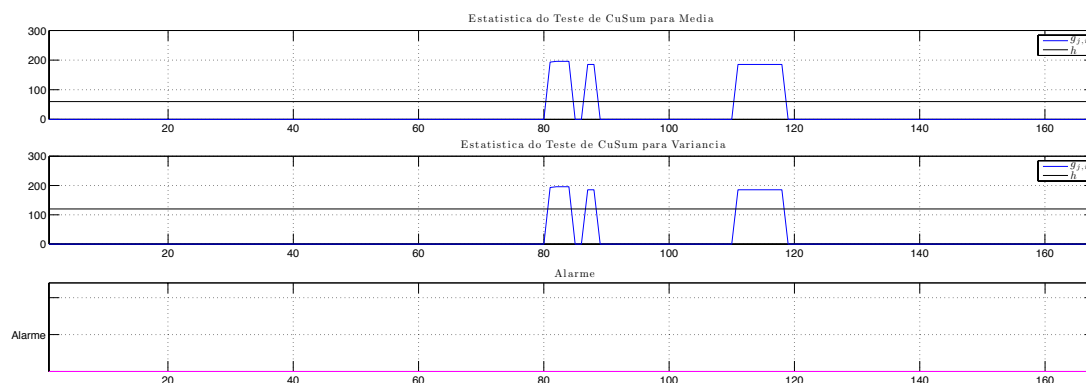


Figura 5.15: Resultado dos testes de CuSum e alarmes

Como o sistema atual é acionado manualmente, e com toda sua potência, não é possível relacionar o consumo com o número de pessoas, somente com o fato de existirem ou não pessoas no auditório.

No caso simulado do auditório após *retrofit*<sup>2</sup>, no entanto, as variações de carga térmica interna influenciam diretamente o esforço de controle do sistema de ar condicionado para manter a temperatura desejada, ou seja, o consumo. As figuras 5.16 e 5.17 mostram o caso de uma semana de verão em que ocorrem ocupações acima das usuais na segunda-feira. Neste caso, como a medida está sinalizada como segura, o alarme indicado pelas cartas de CuSum de média e de variância é confirmado. Já na sexta-feira pela manhã - quando normalmente não há ocupação - ocorre uma aula com ocupação bem acima da característica. Neste caso, ao ser acionado o sistema, a medida é inicialmente considerada um *spike* e sinalizada como 'ofuscada'. Neste caso o valor medido para média e variância são substituídos por valores históricos e nenhuma alteração é vista nas estruturas multicanais. Para ilustrar, o número máximo de canais que a medida pode ficar ofuscada foi ajustado para 2. Após isso, o sinalizador muda automaticamente para embaçado e os valores de média e variância passam a ser os provenientes das medidas. É possível ver que quando a medida esteve sinalizada como ofuscada a média e a incerteza não foram afetadas. No entanto, assim que o sinalizador muda para embaçado, os valores de média e incerteza aumentam. Neste caso o alarme só ocorre quando a medida passa a ser sinalizada como embaçada.

<sup>2</sup>Ver capítulo 3.

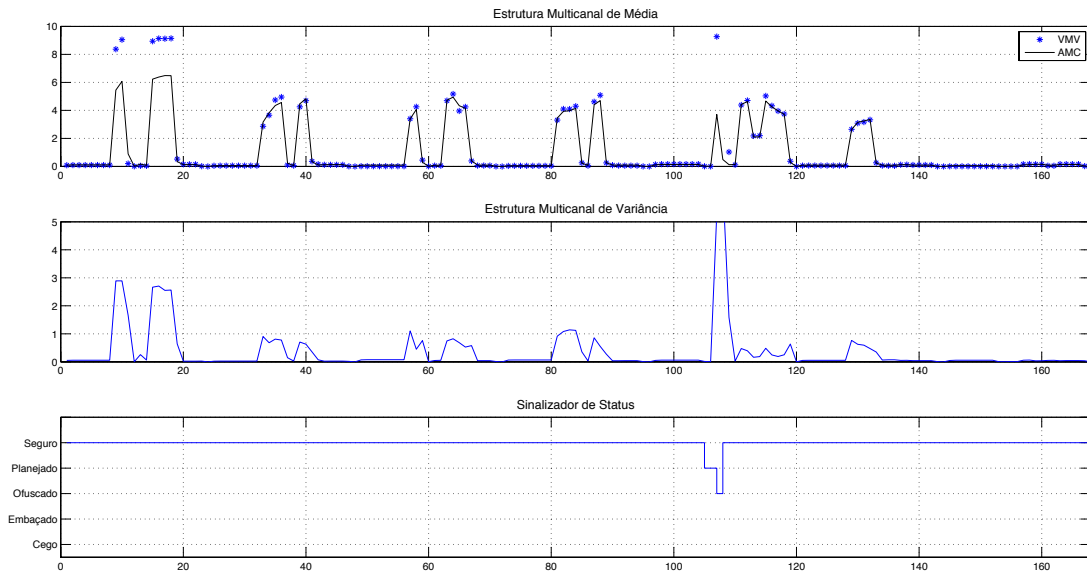


Figura 5.16: Estruturas multicanais para média e variância e sinalizador de estado

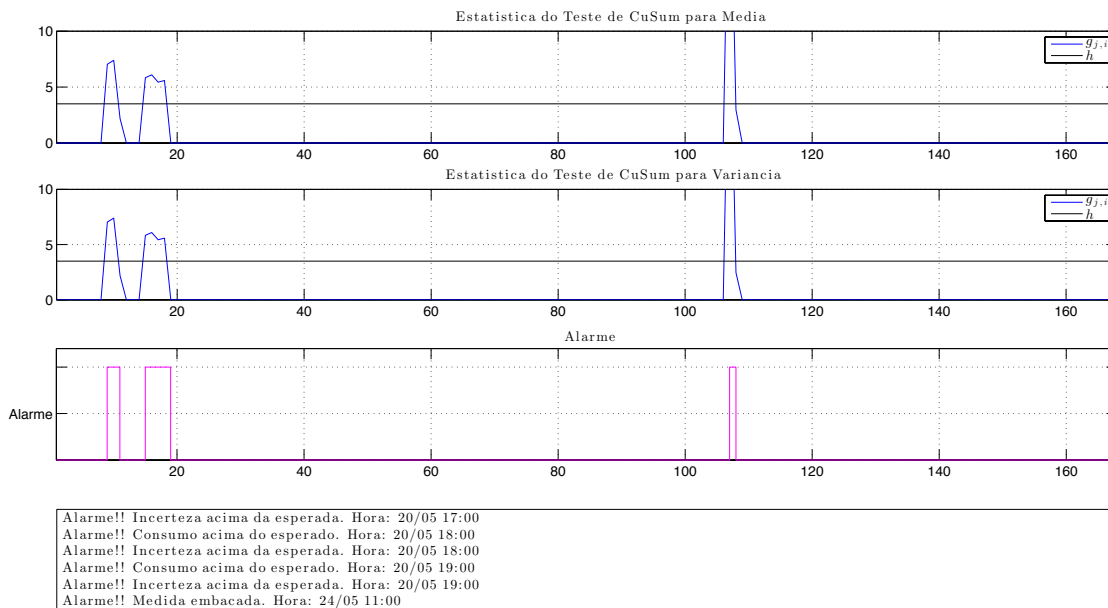


Figura 5.17: Resultado dos testes de CuSum e alarmes

## 5.5 Considerações finais

A metodologia proposta foi aplicada, passo a passo, no auditório 2 do ICB. Inicialmente, as condições físicas e operativas dos auditórios foram auditadas nas etapas de qualificação. Esta auditoria

expôs a precariedade das condições operativas dos auditórios e a necessidade de melhorias estruturais e nos sistemas de iluminação e climatização. A análise das precárias condições dos auditórios impossibilita validá-los com relação a padrões e normas. Apesar desta impossibilidade, a implementação da metodologia de monitoramento não é descartada e pode ser utilizada como um método para aferir ganhos com a adoção de melhorias. No entanto, dificuldades com o sistema de coleta de dados impôs a necessidade de se utilizar o modelo calibrado no EnergyPlus na etapa de validação da edificação. Para isso foi simulado um ano de operação em um dos auditórios em duas condições globais de operação, na situação atual, modelando o auditório tal como ele é - e validado a partir de dados de medições, e uma situação de *retrofit* dos ambientes. Os resultados obtidos ilustram as possibilidades da metodologia proposta. O monitoramento do índice de conforto mostrou que ele é sensível às variações simuladas de carga térmica. O monitoramento do consumo mostrou o sistema capaz de alarmar mudanças no consumo da edificação.

## Capítulo 6

# Conclusões

Edificações são sistemas de grande importância por proporcionarem abrigo às atividades humanas, devendo fornecer ambientes confortáveis, agradáveis e adequados às atividades ali desenvolvidas. Para serem capazes de desempenhar o seu papel as edificações consomem um montante significativo de energia. De fato, os edifícios são responsáveis por mais de 40% do consumo energético brasileiro. Devido à importância das edificações para o conforto humano e ao expressivo consumo energético ocorrido nelas é importante possuir métricas que permitam aferir, melhorar e garantir que o ambiente interior às edificações é adequado às atividades ali desenvolvidas e que o consumo de energia é realizado de maneira racional.

Encontram-se no estado da prática diversas técnicas para aferir o conforto ambiental e a eficiência dos sistemas consumidores de energia. Estas práticas são, no entanto, realizadas de modo *offline*, em momentos chave da vida útil da edificação como, por exemplo, no momento em que são inicialmente habitadas. Elas não permitem, portanto, um acompanhamento das condições de operação do edifício, identificando necessidades de atuação e garantindo a manutenção do estado operativo.

A inexistência de métodos que possibilitem uma aferição das condições operativas da edificação ao longo de sua vida útil e da pronta atuação de modo a garantir uma manutenção destas condições motivaram este trabalho. Esta tese teve por objetivo a releitura dos conceitos de validação *online* de sistemas, técnica já consagrada na indústria de processos, para o âmbito residencial. Para isto foram propostos, testados e aplicados todos os passos metodológicos necessários para a validação *online* da operação de edificações. Foi também desenvolvida uma ferramenta de software para viabilizar a implementação automática da metodologia proposta.

A metodologia de validação desenvolvida é composta por duas grandes etapas, uma primeira etapa *offline* e uma segunda etapa *online*. Para a etapa *offline* foram descritos os passos metodológicos a serem seguidos que foram testados nas edificações simuladas e aplicados na edificação real conforme apresentado nos capítulos 4 e 5 respectivamente. Para a etapa *online* foram propostas metodologias para o monitoramento, a análise automática dos dados coletados e a geração de notificações, alarmes e sinais de controle. Foi desenvolvida uma ferramenta de software para a implementação destas metodologias. A metodologia de monitoramento e geração de alarmes também foi testada nas edificações simuladas e aplicada na edificação real.

A metodologia desenvolvida avalia o edifício em função de seu consumo energético e leva em consideração as condições de conforto térmico e lumínico. Um dos pilares da metodologia proposta é o fato do modo de uso ou operação da edificação ser refletido no seu consumo energético, que frequentemente apresenta um padrão cíclico característico. Ao identificar este padrão é possível acompanhar mudanças no modo em que a energia é consumida identificando mudanças e viabilizando intervenções. O padrão de uso da edificação, ou em outras palavras, o consumo energético típico do edifício é modelado por uma estrutura multicanal. Esta estrutura se mostrou extremamente adequada para a análise realizada além de ser de baixa complexidade computacional e de permitir compactação de dados, o que resultou em uma ferramenta de software com baixas requisições de processamento e banco de dados. A estrutura multicanal fornece também uma dimensão maior à análise pois ela armazena não só o valor médio da energia mas também a variabilidade da mesma. A estrutura multicanal permite portanto um armazenamento de dados inteligível. O uso de ferramentas automáticas de análise do consumo, integrados ao sinalizador de estados proposto, permite a compactação de diversas informações em poucas variáveis. Além de compactar e agregar dados de análise de falhas no monitoramento do consumo, a metodologia e a ferramenta de software desenvolvidas possuem uma arquitetura distribuída que permite uma rápida análise do consumo global por unidades de consumo. Além disso, o consumo agregado é computado como a soma dos consumos individuais. Ou seja, em um edifício, cujo consumo de seus ambientes seja modelado por estruturas multicanais, o consumo por andar é dado pela soma dos consumos dos ambientes daquele andar e o consumo do edifício pela soma do consumo de todos os andares.

Mudanças no perfil de uso da edificação são identificadas automaticamente no software desenvolvido por meio de cartas de soma cumulativas multicanais. Estas cartas fornecem um monitoramento de mudanças bidimensional pois permite a visualização das mudanças de maneira temporal, e todas

as análises matemáticas são realizadas em função do momento em que ocorreram. Esta característica simplifica o processamento necessário para as análises realizadas. Notificações e alarmes são gerados em função da análise combinada das cartas de CuSum e dos sinalizadores de estado que indicam as condições de coleta de dados. Esta análise combinada impede a geração de alarmes desnecessários e permite o fornecimento de informações interpretadas aos operadores o que é extremamente válido visto que na área de edificações é rara a existência de operadores com elevados conhecimentos técnicos.

A aferição da adequação dos ambientes fornecidos pela edificação é realizada em função das condições de conforto térmico e lumínico. Como medida de conforto térmico utilizou-se o Diagrama Bioclimático de Givoni, considerado por diversos autores o mais adequado para edificações brasileiras. No entanto, esta ferramenta não é adequada para a análise *online*. Foi, portanto, desenvolvida uma metodologia para o monitoramento do conforto em função do Diagrama Bioclimático de Givoni utilizando o conceito de distância estatística. A modelagem da Zona de Conforto Bioclimática por meio de uma função de densidade de probabilidade bivariada forneceu sofisticação matemática ao Diagrama Bioclimático de Givoni, desenvolvido de maneira empírica pelo autor. A distância estatística fornece também uma medida quantitativa do desconforto o que não é possível na análise tradicional. O monitoramento da distância estatística multivariada por meio da Carta  $T^2$  de Conforto desenvolvida permite identificar degradações nas condições climáticas internas permitindo uma atuação preventiva do sistema de climatização artificial. A ferramenta de software desenvolvida utiliza as mesmas ferramentas de análise automática de dados utilizada no monitoramento do consumo para o monitoramento de conforto, o que permite um armazenamento inteligível de dados e um rastreamento facilitado de faltas.

O conforto lumínico foi avaliado em função da manutenção dos níveis de iluminância exigidos pela norma brasileira ABNT NBR ISO/CIE 8995-1. Os valores de luminosidade são modelados em uma estrutura multicanal e em seguida é computada a distância cumulativa entre a luminosidade medida no ambiente e a determinada pela norma. A estrutura multicanal se mostrou adequada também para o monitoramento da luminosidade visto que os valores típicos de iluminância variam durante o dia. Não faria sentido, portanto, monitorar a luminosidade com uma tendência temporal simples, a não ser que o ambiente monitorado não receba nenhum tipo de luminosidade natural.

A ferramenta de software desenvolvida para a validação online permite a inserção amigável de informações pelos operadores. As telas foram desenvolvidas para viabilizar a análise das condições

de consumo e de conforto por pessoas leigas. A modularidade viabilizada pela estrutura multicanal faz com que o rastreamento de problemas seja feito de maneira fácil e eficaz, uma vez que o consumo é computado em camadas. Toda estrutura e a metodologia de análise de falhas foi feita de maneira a permitir o acionamento automático dos sistemas existentes.

A carta de estrutura multicanal é adequada ao monitoramento de qualquer variável cíclica. Facilitando sua visualização, a identificação de falhas e a compactação de dados. Diversos algoritmos de detecção de mudanças podem ser utilizados nesta estrutura, no entanto, a carta de CuSum multicanal proposta se mostrou extremamente adequada.

## 6.1 Sugestões de trabalhos futuros

Vislumbra-se como primeira, e mais direta, possibilidade de trabalho futuro, a implementação da estrutura multicanal em hardwares de baixo custo para monitoramento distribuído, conforme a metodologia proposta. Além disso, é oportuna implementação de estratégias de controle para a atuação nos sistemas de climatização, buscando a manutenção dos estados de conforto térmico com um mínimo de consumo energético. É importante ainda, consolidar a estratégia CuSum de monitoramento de luminosidade que, por falta de dados, não pode ser avaliada considerando-se a iluminação artificial.

A metodologia proposta de monitoramento multicanal pode ser implementada para diversos tipos de variáveis que possuam um padrão característico. Entre estas, o monitoramento multicanal se mostra particularmente interessante para as variáveis com padrão cíclico. No contexto doméstico, vislumbra-se o uso do multicanal para monitorar o consumo de água. Esta variável é similar à de consumo energético por ser intrinsecamente influenciada pelo comportamento humano e, portanto, sujeita a rotinas de uso.

Vislumbra-se, também, o aprimoramento da estratégia de controle estatístico do conforto, com a inserção do método de graus hora e a ponderação da distância  $T^2$  de conforto em função da zona de Givoni, em que as variáveis de temperatura e umidade se encontrem.

Os dados obtidos da implementação desta metodologia em edificações certificadas com o selo PROCEL podem indicar pontos em que a certificação deva ser modificada / melhorada, portanto esta possibilidade deve ser avaliada em casos reais, dada a importância crescente das certificações.

# Referências Bibliográficas

“Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética em Edificações Residenciais”, 2010.

ABNT. “NBR 5382: Verificação de iluminância de interiores”, 1985.

ABNT. “NBR 5413: Iluminância de interiores”, 1992.

ABNT. “NBR 15220: Desempenho térmico de edificações”, 2005.

Al-mumin, A., Khattab, O., e Gopiseti, S. “Occupants’ behavior and activity patterns influencing the energy consumption in the Kuwaiti residences”. *Energy and buildings*, 35:549–559, 2003.

Alcalá, R. “Fuzzy Control of HVAC Systems Optimized by Genetic Algorithms”. *Applied Intelligence*, 18:155–177, 2003.

ANVISA. “Guias Relacionados à garantia de qualidade”. Relatório técnico, ANVISA, 2006.

Aparise, F. “Sampling plans for the multivariate T2 control chart”. *Quality Engineering*, 10:141–147, 1997.

Arkat, J., Niaki, T., e Abbasi, B. “Artificial neural networks in applying MCUSUM residuals charts for AR(1) processes”. *Applied Mathematics and Computation*, 189:1889–1901, 2007.

ASHRAE. *Handbook of Fundamentals*. American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2001a.

ASHRAE. “Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs. ASHRAE Standard 140”, 2001b.

ASHRAE. “Standard 55 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy”, 2004.

- Assis, E. S. “Método integrado de análise climática para arquitetura aplicado à cidade de Belo Horizonte”. In *VI Encontro latino-americano sobre conforto no ambiente construído*, 2001.
- Atthajariyakul, S. e Leephakpreeda, T. “Real-time determination of optimal indoor-air condition for thermal comfort, air quality and efficient energy usage”. *Energy and Buildings*, 36:720–733, 2004.
- Augenbroe, G., Castro, D., e Ramkrishnan, K. “Decision model for energy performance improvements in existing buildings”. *Journal of Engineering Design and Technology*, 7:21–36, 2009.
- Batista, A. P. “Monitoramento e Controle de Processos Térmicos em Edificações por meio de um sistema distribuído”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.
- Beraldo, J. C. “Eficiência energética em edifícios: avaliação de uma proposta de regulamento de desempenho térmico para a arquitetura do estado de São Paulo”. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2006.
- Bertalanffy, L. V. *Teoria Geral Dos Sistemas - Fundamentos, Desenvolvimento e Aplicações*. Vozes, 2008.
- Braga, C. M. P., Braga, A. R., Miranda, M. F., e Jota, F. G. “Validação ampla de plantas industriais: uma proposta metodológica”. In *XII Latin-American Congress on Automatic Control*, 2006.
- Braga, L. C. “Estudo de aspectos de eficiência energética de edificações com uma abordagem de automação predial”. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- Braga, L. C., Braga, A. R., e M. C. “On the characterization and monitoring of building energy demand using statistical process control methodologies”. *Energy and Buildings*, 65:205 – 219, 2013.
- Brohmann, B., Heinzle, S., Rennings, K., Schleich, J., e Wüstenhagen, R. “What’s Driving Sustainable Energy Consumption? A Survey of the Empirical Literature”. ZEW Discussion Papers 09-013, ZEW - Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung / Center for European Economic Research, 2009. URL <http://ideas.repec.org/p/zbw/zewdip/7538.html>.
- Callao, M. P. e Rius, A. “Time series: a complementary technique to control charts for monitoring analytical systems”. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 66:79–87, 2003.

- Clarke, D. “Sensor, Actuator and Loop Validation”. *IEEE Control Systems Magazine*, 15:39–45, 1999.
- Claro, F. A. E., Costa, A. F. B., e Machado, M. A. G. “Gráficos de controle de EWMA e de X-barra para monitoramento de processos autocorrelacionados. 2007, vol.17, n.3 [cited 2010-06-12], pp. 536-546.”. *Prod. [online].*, 17:536–546, 2007.
- Corbett, C. J. e Pan, J.-N. “Evaluating environmental performance using statistical process control techniques”. *European Journal of Operational Research*, 139:68–83, 2002.
- DETR. “Good Practice Guide 112: monitoring and targeting in large companies.”. Relatório técnico, Department of the Environment, Transport and the Regions. United Kingdom., 1988.
- DETR. “Good Practice Guide 125: monitoring and targeting in small and medium-sized companies.”. Relatório técnico, Department of the Environment, Transport and the Regions. United Kingdom., 1998.
- DETR. “Good Practice Guide 231: introducing information systems for energy management”. Relatório técnico, Department of the Environment, Transport and the Regions. United Kingdom., 2008.
- Dimoudi, A. e Kostarela, P. “Energy monitoring and conservation potential in school buildings in the C climatic zone of Greece”. *Renewable Energy*, 34:289–296, 2009.
- DOE. *International Energy Outlook*. U.S. Department of Energy, 2008.
- DOE. “Building Energy Tools Directory”. [www.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory](http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory), 05 2013.
- Doukas, H., Nychtisa, C., e Psarrasa, J. “Assessing energy-saving measures in buildings through an intelligent decision support model”. *Building and Environment*, 44:290–298, 2009.
- Dounis, A. I., Santamouris, M. J., Lefas, C. C., e Argiriou, A. “Design of a fuzzy set environment comfort system”. *Energy and Buildings*, 22:81–87, 1995.
- Dounis, A. e Caraiscos, C. “Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment: a review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13: 1246–1261, 2009.

- Druckman, A. e Jackson, T. “Household energy consumption in the UK: A highly geographically and socio-economically disaggregated model”. *Energy Policy*, 36:3177–3192, 2008.
- FDA. “Guidance for Industry Process Validation: General Principles and Practices”. Relatório técnico, Food and Drug Administration (FDA), 2008.
- Filho, C. S. “A automação nos anos 2000: uma análise das novas fronteiras da automação”. In *Congresso e Exposição Internacional de Automação*, 2000.
- Firth, S., Lomas, K., Wright, A., e Wall, E. “Identifying trends in the use of domestic appliances from household electricity consumption measurements”. *Energy and Buildings*, 40:926–936, 2008.
- Freire, R. Z., Oliveira, G. H. C., e Mendes, N. “Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings”. *Energy and Buildings*, 40:1353–1365, 2008.
- Frota, A. B. e Schiffer, S. R. *Manual de conforto térmico: arquitetura e urbanismo*. Studio Nobel, 2003.
- Ghiaus, C. “Experimental estimation of building energy performance by robust regression”. *Energy and Buildings*, 582-587, 2006.
- Gibson, W. e Powell-Evans, K. *Validation fundamentals: how to, what to, when to validate*. Interpharm/CRC, 1998.
- Givoni, B. “Comfort, climate analysis and building design guideines”. *Energy and*, 18:11–23, 1992.
- Guh, R.-S. “Simultaneous process mean and variance monitoring using artificial neural networks”. *Computers & Industrial Engineering*, 58:739–753, 2010.
- Gustafsson, F. *Adaptive Filtering and Change Detection*. John Wiley and Sons Ltda, 1 edition, 2000.
- Hojo, T. “Quality management systems: process validation guidance”. Relatório técnico, The Global Harmonization Task Force, edition 2, 2004.
- Horowitz, P. e Hill, W. *The Art of Electronics*. Cambridge University Press, 2 edition, 1989.
- Issam, B. K. e Mohamed, L. “Support vector regression based residual MCUSUM control chart for autocorrelated process”. *Applied Mathematics and Computation*, 201:565–574, 2008.
- Jarrett, J. E. e Pan, X. “The quality control chart for monitoring multivariate autocorrelated processes”. *Computational Statistics & Data Analysis*, 51:3862–3870, 2007.

- Johnsson, C. “Isa 95 - how and where can it be applied?”. In *Isa Expo 2004: Technical Conference And Emerging Technologies Conference.*, 2004.
- Jota, F. G., da Silva Jota, P. R., e Nobre, E. C. “Method and device for measuring and monitoring”, 2009.
- Jota, F. G., da Silva Jota, P. R., e NobreP, E. C. “Método para Medição e Monitoramento”, 2008.
- Jota, F. G., Jota, P. R. S., Costa, H. F. F., e Nobre, E. C. “Centro de Monitoramento de usos finais”. In *Anais do Congresso Brasileiro de Eficiência Energética*, 2005.
- Jota, F. G., Jota, P. R. S., e Nobre, E. C. “Gerenciamento efetivo de energia por uso final: um sistema de monitoramento de baixo custo via internet”. In *XVII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica*, 2006.
- Jota, F. G., da Silva Jota, P. R., Martins, E. C., e Nobre, E. C. “Gerenciamento efetivo de energia por meio de monitoramento remoto e contínuo por uso final”. In de Eficiência Energética, A. B., editor, *Anais do II Congresso Brasileiro de Eficiência Energética*, 2007a.
- Jota, P. R. S., Freitas, M. E. A., dos Santos Bracarense, M. S., Silva, A. A. P., e Jota, F. G. “Análise dos índices de desempenho energético em sistemas de ar condicionado em edificação pública”. In de Eficiência Energética, A. B., editor, *Anais do II Congresso Brasileiro de Eficiência Energética*, 2007b.
- Kolokotsa, D., Tsiavos, D., Stavrakakis, G. S., Kalaitzakis, K., e Antonidakis, E. “Advanced fuzzy logic controllers design and evaluation for buildings’ occupants thermal-visual comfort and indoor air quality satisfaction”. *Energy and Buildings*, 33:531–543, 2001.
- Kouloura, T., Genikomsakis, K., e Protopapas, A. “Energy management in buildings: A systems approach”. *Systems Engineering*, 11:263–275, 2008.
- Krarti, M. *Energy audit of building systems: an engineering approach*. CR, 2000.
- Kumar, S., Sinha, S., Kojima, T., e Yoshida, H. “Development of parameter based fault detection and diagnosis technique for energy efficient building management system”. *Energy Conversion and Management*, 42:833–854, 2001.
- Lah, M. T., Zupancic, B., Peternejl, J., e Krainer, A. “Daylight illuminance control with fuzzy logic”. *Solar Energy*, 80:307–321, 2006.

- Lamberts, R., Dutra, L., e Pereira, F. O. R. *Eficiência Energética na Arquitetura*. Editora PW - São Paulo, 1997 - 192 p., São Paulo, 1997.
- Landman, D. S. e Haberl, J. S. “Monthly indices: a procedure for energy use display creating monthly indices for comparing the energy consumption of buildings”. Relatório técnico, Energy Systems Laboratory - Texas A&M University, 1996.
- Larsen, S. F., Filippín, C., Beascochea, A., e Lesino, G. “An experience on integrating monitoring and simulation tools in the design of energy-saving buildings”. *Energy and Buildings*, 40:987–997, 2008.
- Levermore, G. J. *Building energy management systems: applications to low energy HVAC and natural ventilation control*. 2nd ed. E & FN Spon, 2007.
- Lima, M. W. P. “Modelos de previsão aplicados no controle estatístico de processo”. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2005.
- Lin, C., Auslander, D., e Federspiel, C. “Multi-sensor single-actuator control of HVAC systems”. In *ICEBO - International Conference for Enhanced Building Operations*, 2002.
- Loveday, D. L., Virk, G. S., Cheung, J. Y. M., e Azzi, D. “Intelligence in buildings: the potential of advanced modelling”. *Automation in Construction*, 6:447–461, 1997.
- Lutzenhiser, L. “Social and Behavioral Aspects of Energy Use”. *Annual Review of Energy Environ.*, 18:247–289, 1993.
- Maile, T., Fischer, M., e Bazjanac, V. “Building Energy Performance Simulation Tools - a Life-Cycle and Interoperable Perspective”. Relatório técnico, Stanford University, 2007.
- Martinez-Ortiz, C., Beck, M., e de Wilde, P. J. C. J. “EWMA based approaches for automated building energy analysis”. In *ISSPIT'11*, pp. 562–566, 2011.
- Martiskainen, M. “Affecting consumer behaviour on energy demand”. Relatório técnico, Sussex Energy Group, 2007.
- Mason, R. L. e Young, J. C. *Multivariate Statistical Process Control with Industrial Applications*. SIAM, Philadelphia, 2002.

- Masoso, O. e Grobler, L. “The dark side of occupants’ behaviour on building energy use”. *Energy and Buildings*, 42:173–177, 2010.
- Michel, H. C. C., Braga, A. R., Braga, C. M. P., e Braga, L. C. “Caracterização do Perfil de Sistemas Domóticos Via Redes de Sensores Sem-Fio”. In *Congresso Brasileiro de Automática*, 2008.
- Mihalakakou, G., Santamouris, M., e Tsangrassoulis, A. “On the energy consumption in residential buildings”. *Energy and Buildings*, 34:727–736, 2002.
- Montgomery, D. C. *Introduction to Statistical Quality Control*. John Wiley & Sons, Inc., 4th edition, 2004.
- Moreira Júnior, F. J. “Proposta de método para o controle estatístico de processo para observações autocorrelacionadas”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.
- Negiz, A., Ramanauskas, P., Çinar, A., Schlessler, J. E., e Armstrong, D. J. “Modeling, monitoring and control strategies for high temperature short time pasteurization systems: statistical monitoring of product lethality and process sensor reliability”. *Food Control*, 9:29–47, 1998.
- Nesler, C. G. “Adaptative Control of Thermal Processes in Buildings”. *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 9–13, 1986.
- Ord, J. K., Koehler, A. B., Snyder, R. D., e Hyndman, R. J. “Monitoring processes with changing variances”. *International Journal of Forecasting*, 25:518–525, 2009.
- Owens, S. e Driffill, L. “How to change attitudes and behaviours in the context of energy”. *Energy Policy*, 36:4412–4418, 2008.
- Pacella, M. e Semeraro, Q. “Using recurrent neural networks to detect changes in autocorrelated processes for quality monitoring”. *Computers and Industrial Engineering*, 52:502–520, 2007.
- Pan, X. e Jarrett, J. “Using vector autoregressive residuals to monitor multivariate processes in the presence of serial correlation”. *International Journal of Production Economics*, 106:204–216, 2007.
- Passos, L. F. D. “Metodologia para Auditoria e Validação Ampla de Malhas de Controle : estudo de caso para uma caldeira industrial”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

- Pereira, I., Alves, T., Pinheiro, R., e Assis, E. S. “Metodologia de tratamento de dados climáticos para a inserção em softwares de simulação energética de edifícios”. In *X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, 2004.
- Pereira, I. M. e Assis, E. S. “Avaliação de modelos de índices adaptativos para uso no projeto arquitetônico bioclimático”. *Ambiente Construído*, 10:31–51, 2010.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., e Pout, C. “A review on buildings energy consumption information”. *Energy and Buildings*, 40:394–398, 2008.
- PROCEL. “Avaliação do mercado de eficiência energética do Brasil”. Relatório técnico, ELETROBRAS - PROCEL, 2007.
- Puranik, V. S. “CUSUM quality control chart for monitoring energy use performance”. In *Proc. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, pp. 1231–1235, 2–4 Dec. 2007.
- Rey, F., Velasco, e Varela, F. “Building Energy Analysis (BEA): A methodology to assess building energy labelling”. *Energy and Buildings*, 39:709–716, 2007.
- Rheingantz, P. A. *Aplicação do modelo de análise hierárquica COPPETEC-COSENZA na avaliação do desempenho de edifícios de escritório*. Tese de Doutorado, COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000.
- Rokembach, C. F. Q. “Proposta para elaboração de um plano mestre de validação de processos farmacêuticos”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.
- Ryan, T. P. *Statistical methods for quality improvement*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1989.
- Santamouris, M., Mihalakakou, G., Patargias, P., Gaitani, N., Sfakianaki, K., Papaglastra, M., Pavlou, C., Doukas, P., Primikiri, E., Geros, V., Assimakopoulos, M., Mitoula, R., e Zerefos, S. “Using intelligent clustering techniques to classify the energy performance of school buildings”. *Energy and Buildings*, 39:45–51, 2007.
- Santamouris, M. e Wouters, P. *Building Ventilation: the state of the art*. Earthscan, London, 2006.
- Santos, B. d. S. “Um discurso sobre as ciências na transição para uma ciência pós-moderna”. *Estudos Avançados*, 2, 1988.

- Santos, E. T. “Avaliação do Algoritmo de "Ray Tracing" em Multicomputadores”. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1994.
- Seem, J. E. “New pattern recognition adaptive controller with application to HVAC systems”. *Automatica*, 34:969–982, 1998.
- Seem, J. E. “Pattern recognition algorithm for determining days of the week with similar energy consumption profiles”. *Energy and Buildings*, 37:127–139, 2005.
- Silva, I., Tostes, M. E., e Silva, R. “Alternativa para iluminação eficiente usando inteligência computacional.”. In *Anais do III Congresso Brasileiro de Eficiência Energética*, 2009.
- Souza, A. M. e Rigão, M. H. “Identificação de variáveis fora de controle em processos produtivos multivariados”. *Revista Produção*, 15:74–86, 2005.
- Stern, P. C. “What psychology knows about energy conservation”. *American Psychologist*, 47:1224–1232, 1992.
- Stuart, G., Fleming, P., Ferreira, V., e Haris, P. “Rapid analysis of time series data to identify changes in electricity consumption patterns in UK secondary schools”. *Building and Environment*, 42:1568–1580, 2007.
- Swords, B., Coyle, E., e Norton, B. “An enterprise energy-information system”. *Applied Energy*, 85:61–69, 2008.
- Thumann, A. e Younger, W. J. *Handbook of energy audits. Sixth Edition*. Fairmont Press, 2003.
- WHO. “Specifications for Pharmaceutical Preparations”. Relatório técnico, WHO Technical Report Series, 1992.
- Wright, A. e Firth, S. “The nature of domestic electricity-loads and effects of time averaging on statistics and on-site generation calculations”. *Applied Energy*, 84:389–403, 2007.
- Yang, J. e Makis, V. “On the performance of classical control charts applied to process residuals”. *Computers & Industrial Engineering*, 33:121–124, 1997.
- Ziebig, A., Hoinka, K., e M.Kolokotroni. “Systems approach to the energy analysis of complex buildings”. *Energy and Buildings*, 37:930–938, 2005.