

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ENGENHARIA DE ENERGIA

**METODOLOGIA DE AUDITORIA ENERGÉTICA APLICÁVEL AO PARQUE DE  
PRÉDIOS DA UFRGS.**

por

**Gauthier Thibaud Noisette**

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, dezembro de 2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE ENERGIA

METODOLOGIA DE AUDITORIA ENERGÉTICA APLICÁVEL AO PARQUE DE  
PRÉDIOS DA UFRGS.

por

Gauthier Thibaud Noisette

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eng. Roberto Chouhy Leborgne  
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Prof. Eng. Dr. Paulo Smith Schneider

Banca examinadora:

Eng. Eduardo Alves Amado – PROMEC/UFRGS

Prof. Dra. Eng. Leticia Jenisch Rodrigues – DEMEC/UFRGS

Prof. Dr. Eng. Paulo Otto Beyer - ASBRAV

Porto Alegre, dezembro de 2018

## **AGRADECIMENTOS**

A todas as pessoas que me acompanharam ao longo destes dois anos de dupla diplomação na UFRGS e no Brasil, professores, colegas, amigos, familiares no Brasil e na França.

A meu orientador Paulo Smith Schneider pelos conselhos e pelo apoio na realização deste trabalho, e aos que me acompanharam, Professora Leticia Jenisch Rodrigues, Eduardo e Jakeline.

Aos professores e ao Serviço das Relações Internacionais da Ecole Centrale de Marseille que me ofereceram a oportunidade de realizar este intercambio no Brasil, na UFRGS

NOISETTE, G. T. **Metodologia de auditoria energética aplicável ao parque de prédios da UFRGS**. 2018. 42p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

## **RESUMO**

Este trabalho aborda o assunto da conservação de energia e eficiência energética para instituições públicas através do exemplo do setor educacional, considerando o caso da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Como na maioria das instituições públicas, a vontade de melhoria energética da UFRGS se enfrenta a uma falta de meios financeiros, humanos e técnicos para concretizar os projetos de conservação desejados. Assim este trabalho apresenta uma metodologia de auditoria energética aplicável ao parque de prédios da Universidade, permitindo caracterizar e classificar seus edifícios, avaliar as principais perdas e projetar soluções de conservação realista considerando as capacidades da instituição. O trabalho segue a lógica de definir um modelo de caracterização energética dos prédios da UFRGS, baseado no método ASHRAE CLTD/CLF, usando como entradas dados facilmente disponíveis para descrever o edifício, as zonas com usos diferentes, os níveis de ocupação e os equipamentos. O uso de tipologias de prédios, de janelas, de usos e de equipamentos permite calcular os parâmetros do modelo, e assim obter a estimativa do consumo e a repartição em usos finais e elaborar indicadores de desempenho. Uma aplicação num prédio do campus da UFRGS permite avaliar as respostas do modelo. A segunda etapa da auditoria proposta é uma análise comparativa dos indicadores de desempenho modelado com exemplos de bom uso baseados na etiquetagem de eficiência energética, permitindo num terceiro tempo estimar o potencial de melhoria e comparar diferentes prédios analisados, e por fim propor soluções de melhoria realistas para estimar o potencial de economia.

**PALAVRAS-CHAVE:** Eficiência energética, Auditoria energética, Prédios universitários, Parques de edifícios.

NOISETTE G. T., **Energy audit methodology applied to the UFRGS building stocks edifications**. 2018, 42p. Monography (Completion of Energy engineering course) – Engineering School, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018

## **ABSTRACT**

This work deals with energy saving and energy efficiency for public institutions through the example of the education sector considering the case of the Federal University of Rio Grande do Sul – UFRGS. Like most of the public institutions, sustainable policies face a financial, technical and human lacks, preventing any project concretization. Thus, this work was made to find a methodology for energy audit for the UFRGS building stock in order to characterize the energy use, classify the buildings, estimate the main loss and propose viable and realistic solutions for energy savings. The main thread of this work follows the main steps of an energy audit. First, a model was developed to characterize and estimate the energy use of the buildings of the UFRGS, based on the ASHRAE CLTD/CLF Method. It takes readily available data as inputs to characterize the building, specific use zones, occupation levels and equipment. The use of building, windows, zones, and equipment typologies permits to calculate the model variables and obtain outputs such as final consumption and repartition and elaborates energy efficiency indicators. The study and audit of a university building permits to evaluate the model. The second step of this auditory is a comparative analysis of these indicators with best-practices examples based on Energy efficiency labels. This allowed to evaluate the energy saving potential. The last step of the work consists in propose energy efficient solutions to evaluate the energy saving potential.

**KEYWORDS:** Energy efficiency, Energy Audit, University buildings, building stock.

## ABREVIACOES E SIGLAS

ASHRAE	American Society Of Heating, Refrigerating And Air Conditioning Engineers
COP	<i>Coefficient of Performance</i>
CLF	Cooling Load Factors
CLTD	<i>Cooling Load Temperature Differences</i>
CPD	Centro de Processamento de Dados
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalizao e Qualidade Industrial
LABEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LED	<i>Light Emitted Diodes</i>
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NBR	Norma Brasileira
NPD	<i>Normalized Potential Density of Illumination</i>
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PROCEL	Programa Nacional de Energia Elétrica
RTQ-C	Regulamento Técnico Da Qualidade - Comercial
SQL	<i>Structured Query Language</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USP	Universidade De São Paulo
VBA	<i>Visual Basic Application</i>

## NOMENCLATURA

$A$	Área da superfície (m <sup>2</sup> )
$AC$	Área útil de ambientes de permanência permanente climatizados (m <sup>2</sup> )
$A_{cob}$	Área da cobertura (m <sup>2</sup> )
$A_{fach}$	Área da fachada (m <sup>2</sup> )
$A_j$	Área de janela (m <sup>2</sup> )
$ANC$	Área útil de ambientes de permanência permanente não climatizados (m <sup>2</sup> )
$APT$	Área útil de ambiente de permanência transitória não climatizados (m <sup>2</sup> )
$AU$	Área útil (m <sup>2</sup> )
$b$	Pontuação de bonificação entre 0 e 1
$B, C$	Coefficientes de transmissão de calor para janelas
$CS$	Coefficiente de Sombra
$CLTD$	<i>Cooling Load Temperature Differential</i> (°C)
$CTIE$	Correção para temperatura interna e externa (°C)
$\Delta t_{cob}$	Diferença de Temperatura corrigida Cobertura (°C)
$DTCR$	Diferencial de Temperatura de Carga de Resfriamento (°C)
$EqNumCA$	Equivalente numérico de condicionamento do Ar
$EqNumDPI$	Equivalente numérico de iluminação
$EqNumEnv$	Equivalente numérico da envoltória
$EqNumV$	Equivalente numérico de ambientes não climatizados
$f$	Coefficiente de correção forro ventilado (0,75) ou não ventilado (1)
$F_a$	Fator de ajuste Esquadria / vidro
$FCR$	Fator de Carga de Resfriamento
$F_E$	Fator de umidade externo
$FGCS$	Fator de Ganho de Calor Solar (W/m <sup>2</sup> )
$F_i$	Fator de umidade interno
$FS$	Fator Solar
$IAC$	<i>Interior Solar Attenuation Coefficient</i>
$K_{cob}$	Coefficiente de correção de cor da cobertura
$K_{fach}$	Coefficiente de correção de cor da cobertura
$LM$	Latitude e Mês (°C)
$PVD$	Porcentagem de variação diária da temperatura de projeto
$\dot{Q}$	Carga térmica (W)
$\dot{Q}_{cob}$	Carga térmica da cobertura (W)

$\dot{Q}_{EL}$	Carga térmica de renovação do ar latente (W)
$\dot{Q}_{ES}$	Carga térmica de renovação do ar sensível (W)
$\dot{Q}_{fach}$	Carga térmica das fachadas (W)
$\dot{Q}_{Jconducao}$	Carga térmica de condução nas janelas (W)
$\dot{Q}_{radiação}$	Carga térmica de radiação nas janelas (W/m <sup>2</sup> )
$\dot{Q}_{SI}$	Carga térmica de ambiente não condicionado (W)
$R_i$	Resistências superficiais (termo de convecção) e resistências internas dos materiais (m <sup>2</sup> .°C /W)
$t_{ANC}$	Temperatura de ambiente não condicionados (°C)
$tbs_{EXT}$	Temperatura de bulbo seco exterior (°C)
$tbs_{max}$	Temperatura de bulbo seco máxima de projeto (°C)
$t_{conforto}$	Temperatura de conforto (°C)
$t_{EH}$	Temperatura horaria (°C)
$\overline{t_{ext}}$	Temperatura média externa
$t_i$	Temperatura interna do ambiente (°C)
$u$	Velocidade do vento local (m/s)
$U$	Transmitância térmica (W/m <sup>2</sup> .°C)
$U_{fach}$	Transmitância da fachada (W/m <sup>2</sup> . °C)
$U_{cob}$	Transmitância da cobertura (W/m <sup>2</sup> . °C)
$U_j$	Transmitância da janela (W/m. °C)
$\dot{V}$	Vazão de ar exterior (L/s)
$VD$	Variação diária da temperatura de projeto (°C)



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Motivação e justificativa .....	1
1.2	Objetivos .....	2
2	AUDITORIA ENERGÉTICA.....	2
2.1	Modelagem do consumo energético.....	2
2.1.1	Cálculo da carga de condicionamento ASHRAE.....	2
2.1.2	Métodos de cálculos simplificados ASHRAE: CLTD/CLF .....	4
2.1.3	Métodos empíricos de modelagem energética. ....	4
2.1.4	Parâmetros de modelo energético.....	5
2.1.5	Tipologias de Edificações.....	6
2.2	Usos finais de consumo energético para o setor educacional.....	6
2.2.1	Usos finais de Energia.....	6
2.2.2	Perfil de carga em função do tipo de prédio educacional.....	7
2.3	Etiquetagem.....	7
2.4	Soluções de melhoria energética .....	8
3	METODOLOGIA .....	8
3.1	Caracterização do consumo energético .....	8
3.1.1	Metodologia geral de modelagem energética. ....	8
3.1.2	Metodologia de simplificação do modelo térmico .....	9
3.1.3	Determinação dos parâmetros intermediários do modelo térmico e energético ....	10
3.1.4	Avaliação do modelo a partir do estudo do prédio da Farmácia .....	12
3.2	Análise da eficiência .....	12
3.3	Soluções de melhoria energética e Avaliação das perdas.....	12
3.4	Uma interface funcional para realizar a auditoria .....	13
4	RESULTADOS .....	13
4.1	Análise do modelo de previsão da carga térmica solar – ASHRAE CLTD/CLF.....	13
4.2	Base de cálculos mensal contra base de cálculo diária.....	13
4.3	Modelagem do prédio: tipologias e elementos construtivos .....	14
4.4	Modelagem Energética.....	14
4.4.1	Usos do prédio e potências instaladas .....	14
4.4.2	Horários de funcionamento e cargas térmicas de ocupação e renovação de ar .....	16

4.4.3	Processo de cálculo do consumo .....	17
4.5	Avaliação do desempenho – Etiqueta Simplificada .....	17
4.6	Opções de melhoria e análise Econômica .....	17
4.7	Processo de auditoria energética .....	17
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	20
5.1	Estudo de Caso: Prédio da Farmácia da UFRGS .....	20
5.1.1	Caracterização do prédio.....	20
5.1.2	Análise dos resultados.....	20
5.1.3	Comparação com as faturas Energéticas .....	22
5.1.4	Análise crítica da modelagem do prédio e do modelo.....	22
5.2	Análise crítica do processo de auditoria.....	23
5.3	Perspectivas de uso e melhoria da Ferramenta de Auditoria Energética.....	23
5.3.1	Estudos de casos e afinamentos dos parâmetros e constituir as bibliotecas .....	23
5.3.2	Elementos de análise Econômica e ambiental das opções de melhoria.....	23
5.3.3	Comparação do resultado simulado com uma simulação no Energy Plus.....	24
6	CONCLUSÃO .....	24
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	25
	APÊNDICE A: ANÁLISE ESTATÍSTICA BOX-BEHNKEN DESIGN .....	26
	APÊNDICE B: PROCESSO DE CÁLCULO DA CARGA SOLAR TÉRMICA .....	28
	APÊNDICE C: PROCESSO CÁLCULO DO CONSUMO ANUAL.....	29
	APÊNDICE D: FERRAMENTA DE AUDITORIA ENERGÉTICA.....	30
	ANEXO A: EQUACIONAMENTO ASHRAE CLTD/CLF .....	31
	ANEXO B: EQUACIONAMENTO ETIQUETAGEM ENERGETICA.....	32

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação e justificativa

Entre os maiores emissores de carbono, o setor energético representa uma alavanca essencial para atenuar as mudanças climáticas. A transição para as energias renováveis, a luta contra os desperdícios energéticos, um consumo mais responsável e uma melhoria da eficiência energética são os elementos chave para tornar o setor sustentável. Os setores residencial, industrial e terciário representam 9,7%, 33% e 4,9% do consumo energético do Brasil (EPE 2017). Segundo essa mesma fonte, este último setor inclui além dos comércios, escritórios, administrações e serviços públicos e representa 24% do consumo nacional de eletricidade e pode ser dividido em duas categorias: Privado e Público. O potencial de melhoria energética é elevado em ambas categorias, mas ao contrário do privado, o setor público tem dificuldades bem maiores em termo de meios humanos, econômicos e técnicos para avaliar este potencial e planejar ações e projetos de melhoria energética. Desta forma, trabalhos acadêmicos podem contribuir a esta missão.

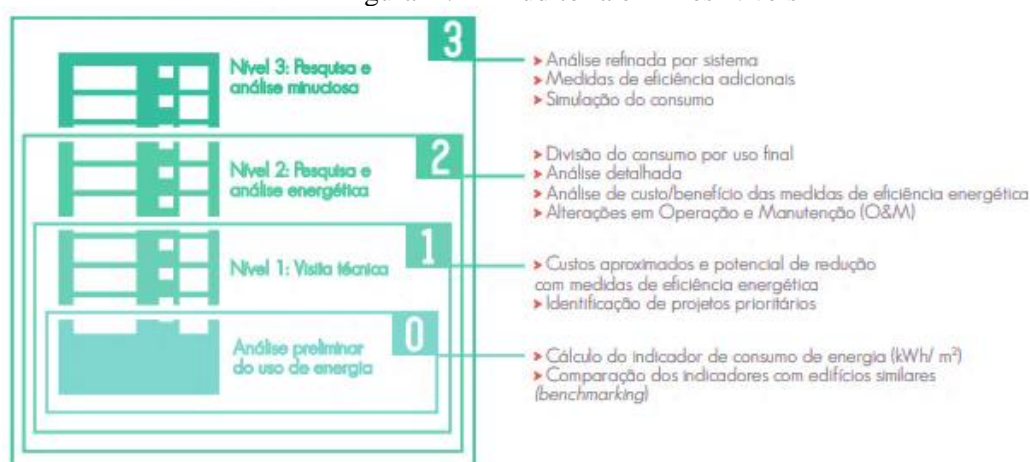
Várias instituições semelhantes à UFRGS possuem parques de edifícios que podem ser caracterizados, além de um uso comum, por sua antiguidade, carência de manutenção, grandes desperdícios e péssima eficiência energética. Se o potencial de economia é grande, a falta de técnicos dedicados e habilitados inibe qualquer projeto de melhoria energética. Este trabalho centra-se numa das etapas essenciais deste tipo de processo: a auditoria energética, mas especialmente sobre a metodologia a elaborar para realizar uma auditoria dos prédios da UFRGS. Esta auditoria deve ser adaptada à realidade da situação da universidade que corresponde ao contexto descrito precedentemente.

Este trabalho integra-se no processo atual de envolvimento do curso de Engenharia de Energia e de seus professores para liderar propostas de melhoria energética a serem aplicada na UFRGS. Além disso, busca mostrar para a comunidade acadêmica e as demais instituições em situações parecidas a viabilidade de um tal projeto com meios muito limitados e assim contribuir para um movimento global de transição energética. Há a necessidade de estimar os consumos semelhantes de prédios da Universidade, compará-los, avaliar o desempenho e o potencial de economia através de uma modelagem energética simplificada, proposta dentro do processo de auditoria. A estimativa do consumo energético e do potencial de economia é uma etapa preliminar essencial do processo de melhoria energética de um parque de prédios, permitindo definir os elementos mais interessantes para uma análise detalhada e o desenvolvimento de um plano de eficiência energética.

A partir da crise energética de 1973, o mundo começou a tomar consciência da necessidade de conservar ao máximo os recursos energéticos. Além das razões econômicas ligadas a esta crise do petróleo, razões ambientais começaram a ser detalhadas e promovidas. A publicação do relatório Brundtland em 1987, a popularização do desenvolvimento sustentável e o início da diplomacia internacional sobre o meio ambiente no início dos anos 90 aceleraram, esse processo. Em 1975, a American Society of Heating and Refrigerating and Air Conditioned Engineers – ASHRAE publicou a primeira versão da norma ASHRAE 90.1 que define as primeiras regras de eficiência energética para edifícios. No Brasil foi a partir de 1985 e a criação do Programa Nacional de Energia Elétrica – PROCEL que as primeiras medidas de eficiência energética e conservação de energia foram implementadas (SIGNOR 1999). Junto com essas novas práticas, foram desenvolvidas metodologias de análise do desempenho energético e do funcionamento das edificações para avaliar medidas de melhoria: a auditoria energética.

Em seu guia prático de 2015, O Ministério do Meio Ambiente (MMA 2015) define como objetivos da auditoria energética, definir práticas de uso racional da energia, identificar os desperdícios nos processos e identificar as mudanças a serem feitas para melhorar a situação. De acordo com a ASHRAE 2011, o MMA identifica três etapas: a coleta dos dados, a análise dos equipamentos e a apresentação dos resultados. A ASHRAE 2011 também define três níveis de análise a serem realizados no processo de auditoria como é ilustrado na Figura 1.1

Figura 1.1 - Auditoria em Três Níveis



Fonte: MMA 2015 adaptado de ASHRAE 2011

O objetivo deste trabalho não é a realização de uma auditoria completa e detalhada respondendo as normas ASHRAE ou brasileiras, mas a metodologia a ser realizada se inspira em princípios gerais, e permitirá pelo menos ter a etapa preliminar realizada para o parque de prédios da UFRGS. No caso da análise de um parque de prédios, a estimativa do consumo energético e do potencial de economia na etapa preliminar tem uma importância ainda maior pois permitem definir os edifícios mais interessantes para uma análise detalhada e a realização das etapas mais avançadas do plano de eficiência energética apresentadas na Figura precedente.

## 1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é propor uma metodologia de auditoria energética de prédios da Universidade adaptada às capacidades técnicas e humanas da UFRGS. Os objetivos secundários são:

- Determinar um modelo de estimativa do consumo energético de um prédio compatível com os dados técnicos disponíveis
- Estabelecer uma lista de características arquitetônicas caracterizando os prédios da UFRGS
- Estimar a repartição de consumo do prédio da UFRGS selecionado (Farmácia)
- Identificar um grupo de indicadores permitindo comparar e classificar o desempenho dos prédios
- Propor um conjunto de ações de melhoria aplicáveis aos prédios da UFRGS.

## 2 AUDITORIA ENERGÉTICA

Benavides (2014) distingue quatro etapas na auditoria energética. A primeira tem como objetivo apresentar e caracterizar o consumo energético atual do edifício ou da empresa, realizando o levantamento dos dados de consumo energético, as características técnicas das infraestruturas e dos equipamentos e os hábitos de consumo. A segunda etapa é uma análise comparativa da situação atual com os padrões de boas práticas. Segue a avaliação das perdas, e por fim o desenvolvimento das medidas corretivas viáveis tecnicamente e economicamente. A auditoria se conclui com as conclusões e recomendações do autor.

### 2.1 Modelagem do consumo energético

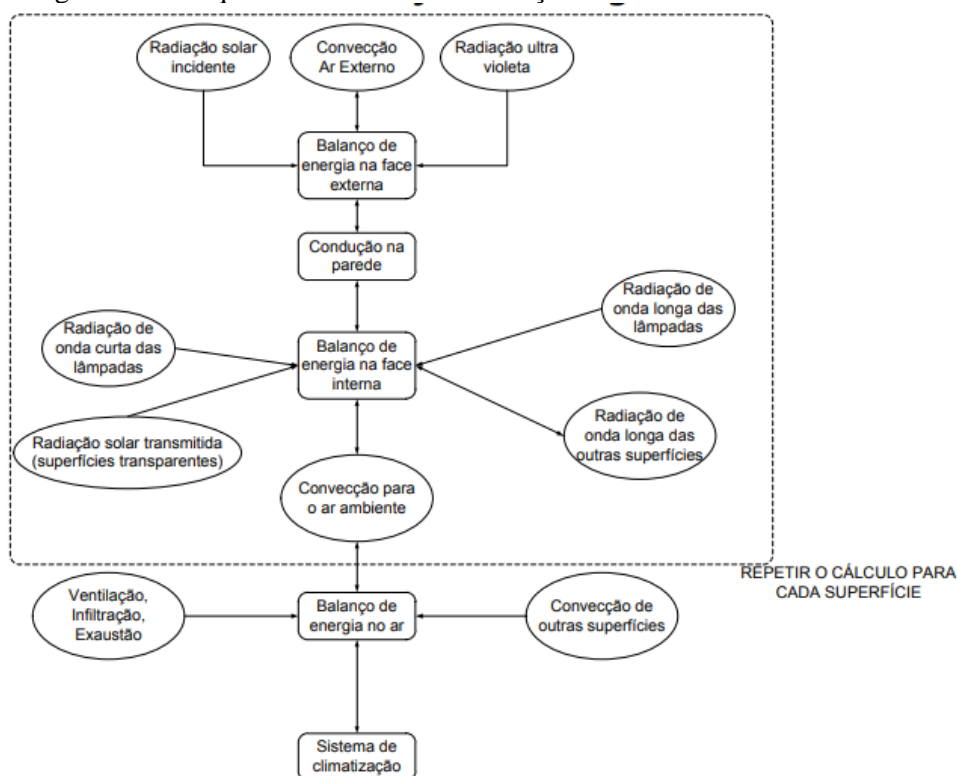
#### 2.1.1 Cálculo da carga de condicionamento ASHRAE

No domínio da modelagem do desempenho energético, da estimativa das cargas térmicas para dimensionamento ou operação, os trabalhos da ASHRAE estão entre os mais relevantes e mais usados. Da primeira edição em 1967 até agora, o “*Handbook of Fundamentals*” fornece a base teórica, as metodologias, e os dados fundamentais a serem usados para o engenheiro atuando na área de ar condicionado, aquecimento e refrigeração. Em cada edição um capítulo é conservado ao cálculo da carga térmica de ar condicionado.

Uma abordagem possível é dada pela modelagem completa dos ambientes do edifício em estudo, resolvendo os campos de temperatura, pressão, umidade e velocidades. Porém, isso demanda um esforço computacional que não se justifica para a etapa de dimensionamento de instalações ou cálculo de cargas. Por isso, foram elaboradas metodologias de cálculos adaptadas, realizando modelagens zonais, considerando, por exemplo, que o ar é suficientemente misturado para considerar a temperatura interna como uniforme. O conhecimento dos comportamentos físicos em ação permite também simplificar o equacionamento por meio de equações de comportamento adicionais, como os fenômenos de convecção nas paredes, por exemplo.

Nos *Handbooks of Fundamentals* da ASHRAE, todos os métodos de cálculo de carga de refrigeração baseiam-se no método de “Balanço Térmico” (*Heat Balance Method- HBM*) que consiste em aplicar relações de convecção, condução e radiação nos diferentes elementos, constituindo a zona em estudo, resolvendo as equações de balanço em regime transitório. Basicamente isso significa realizar para cada superfície o balanço energético na face externa, calcular a transferência de calor através da superfície a partir das equações de transferência de calor, realizar o balanço energético na face interna incluindo fontes internas, transferências de calor com as outras superfícies, e convecção do ar, e por fim realizar o balanço de massa e energia dentro da zona interna, as componentes sendo o termo convectivo do ar, os ganhos térmicos por infiltração ou renovação do ar, fontes internas e chegar finalmente na carga de condicionamento. Nesta última etapa, duas abordagens são possíveis: considerar a temperatura do ambiente desejada e deduzir a carga de condicionamento, ou entrar estes dados de funcionamento do condicionamento para determinar a temperatura resultante. (ASHRAE 2009). A Figura 2.1 apresenta o esquema simplificado deste método.

Figura 2.1 - Esquema do método de Balanço Térmico da ASHRAE



Fonte: NETO 2017, baseado em ASHRAE 2009 – Capítulo 18, Fig. 5.

Este método permite obter os perfis de carga horárias e dados médios, mas demanda um esforço computacional importante por precisar realizar um cálculo iterativo e apresenta uma complexidade de definição do problema muito grande. Atualmente, o Balanço Térmico é principalmente usado pelos softwares de Simulação Termo Energética, e entre eles o software Energy-Plus (ASHRAE 2009).

A primeira simplificação (1972) deste modelo foi o método “Transfer Function Method – TFM” (NETO 2017) no qual foram definidos coeficientes de ponderação aos ganhos resultantes das últimas horas

permitindo após um processo iterativo determinar a carga térmica instantânea. Desde 2005, a ASHRAE propõe um novo método de cálculo simplificado derivado do método HB, e inspirado do método TF: o “*Radiant Time Series Method*” – *RTS-Method*. O método é rigoroso e permite quantificar as componentes do ganho térmico. Necessita duas etapas de cálculo, primeiro o ganho térmico externo é calculado para as 24h de um dia de projeto, os ganhos são separados em componente radiativa e componente condutiva e para cada uma delas é aplicada uma ponderação horaria (Time Series), permitindo obter a contribuição das horas precedentes (inércia térmica), sem precisar iterar (SPITLER e BEREKET, 2010). Vários softwares de simulação termo energética também usam este método para cálculos de cargas de resfriamento (Comfie ou ClimaWin STD (APOGEE 2015))

### 2.1.2 Métodos de cálculos simplificados ASHRAE: CLTD/CLF

Além das técnicas de cálculo inspiradas do balanço térmico, a ASHRAE apresenta outros métodos simplificados, entre eles o “*Total Equivalent Temperature Differential Method – Time Averaging*” – método *TETD-TA* publicado em 1967. O método consiste em somar todas as componentes de ganho térmico, estimar a proporção de ganho radiativo e aplicar series temporais (*Time-Averaging*) para obter a carga instantânea (inércia térmica). O método também é complexo e necessita solução computacional. Para simplificar os métodos *TETD-TA* e *TF*, um método de cálculo direto foi desenvolvido e publicado em 1979: o “*Cooling Load Temperature Differential Method with Solar Cooling Load Factor – CLTD/CLF Method*”. Ele se baseia no cálculo dos ganhos térmicos realizados a partir de métodos mais complexos (método *TF*) para um conjunto de topologias de elementos construtivos com o objetivo de modelar os ganhos térmicos para cada elemento de superfície (Paredes externas, janelas, paredes internas, pisos internos, forros). A expressão para a carga térmica  $\dot{Q}$  (W) é apresentada na equação 2.1

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot CLTD \quad (2.1)$$

na qual  $U$  é o coeficiente de transferência de calor global (ou Transmitância Térmica) da superfície em  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ,  $A$  é a superfície em  $m^2$ , e  $CLTD$  é uma diferença equivalente de temperatura entre as faces externas e internas da superfície (*Cooling Load Temperature Differential*), tabelada para cada hora, material, orientação, sombreamento, e corrigida em função das cores das superfícies, da temperatura externa, da temperatura de conforto, da latitude e do mês considerado. No caso da fração radiativa do ganho solar através das janelas, foram determinados fatores de carga de resfriamento (*Cooling Load Factors – CLF*), associados aos ganhos solares médios mensais na superfície, corrigidos. O equacionamento completo é detalhado em Anexo A todos os coeficientes estão tabelados pela ASHRAE (1989) ou por Beyer (2015). Este método considera a inércia térmica, apresenta um perfil de carga de resfriamento, distinguindo a origem das cargas térmicas. O método pretende apenas calcular picos horários de carga de condicionamento, e não pretende modelar o comportamento real do sistema de condicionamento. O método é de simples implementação e é adaptado a um cálculo manual. A ASHRAE (1989) propõe adotar uma abordagem conservadora para o uso deste método, pois o grau de simplificação é elevado. O modelo é adaptado para aplicação a uma zona térmica com as seguintes características:

- Piso de concreto sem tapetes.
- Uma fachada com exposição externa com 30% de janelas.
- Geometria de 5m por 5m máximo com 3m de pé direito.
- Presença de forro interno e espaço superior condicionado.

A última versão atualizada foi apresentada pela ASHRAE (1989), e a partir de 2005 o método parou de ser detalhado, e foi substituído pelo método *RTS*. Porém isso não significa que o modelo não é mais válido, e pode ser adaptado respeitando a margem de aplicação (ASHRAE 2009).

### 2.1.3 Métodos empíricos de modelagem energética.

Berthou (2013) apresentou um panorama dos métodos de modelagem e previsão do consumo energético de um edifício terciário usando uma classificação em 3 categorias de modelos. O primeiro modelo é uma modelagem completa do edifício e de seus comportamentos a partir de regras físicas de comportamento. Neste caso, trata-se de “caixa branca” ou “modelo de conhecimento”, o comportamento é determinado a partir das regras físicas e das entradas físicas. Este método requer uma grande quantidade e qualidade de dados do edifício em estudo para a modelagem do comportamento físico e apresenta uma

complexidade elevada, induzindo um tempo de cálculo elevado. Além disso, a especificidade da construção torna o modelo inviável para aplicar a demais prédios. Na prática, este método corresponde a realização de simulações termodinâmicas de edifícios por meio de softwares como apresentado na seção anterior. Um método alternativo consiste em determinar o comportamento a partir de dados de entrada e saída usando funções matemáticas. Estas funções matemáticas podem ter um significado físico, neste caso trata-se de “Caixas cinzas” ou “semi físicas”, ou não ter sentidos físicos, e assim são chamadas “caixas pretas”. Signor (1999) usou este último método, usando uma equação não linear de 9 parâmetros, Santana (2006) analisou regressões multilíneas, representando comportamentos físicos, e Melo (2012) e Berthou (2013) usaram redes neurais. Todos estes trabalhos se baseiam em simulações numéricas para a determinação dos comportamentos, ou a aprendizagem das redes neurais.

Signor (1999) usou o software DOE 2.1E para realizar as simulações de prédios. Santana (2006) analisa escritórios em Florianópolis com um foco nos parâmetros arquitetônicos e a influência deles no consumo energético, e também se baseou em simulações computacionais, mas usou o software Energy-Plus, assim como Melo (2014). Lee *et al.* (2001) que estudaram prédios da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) usaram uma versão anterior ao mesmo. Benavides (2014) também usou softwares como ferramentas para definir os usos finais de energia, além do uso de normas técnicas. O conjunto destes trabalhos permite sintetizar e comparar modelos de simulação a serem aplicados ao assunto deste trabalho, assim como usar resultados de simulações termo energéticas e analisar a influência de vários parâmetros na repartição dos usos finais de energia

#### **2.1.4 Parâmetros de modelo energético**

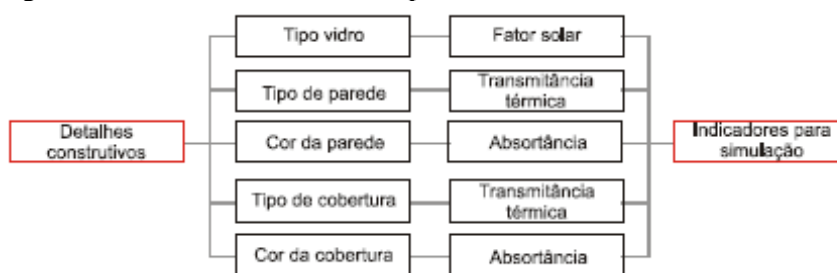
Signor (1999) desenvolveu um modelo de equacionamento da carga de um prédio de serviços permitindo obter resultados muito parecidos àqueles das simulações termo energéticas realizadas, considerando condições térmicas de 14 capitais federais. A partir de um prédio modelado e simulado, o autor procurou uma regressão multilinear a partir de 11 fatores arquitetônicos e suas combinações. A partir das regras de relevância estatística, foi possível simplificar o modelo e determinar coeficientes de regressão para dados climáticos de 14 capitais federais. Santana (2006) usou este modelo e os parâmetros de base do modelo de Signor (1999), mas decidiu analisar os parâmetros construtivos de maneira isolada, sem realizar combinações, e em vez de realizar um modelo de regressão, analisou a influência de cada um destes parâmetros no consumo final, assumindo os outros parâmetros como fixos, utilizando o Energy-Plus.

Carlo *et al.* (2004) identificaram que os fatores que tem a maior influência no desempenho energético de edificações brasileiras são a forma da estrutura, a altura, a porcentagem de janelas e o sombreamento.

Melo (2012) desenvolveu um modelo simplificado de simulação do consumo energético de edifícios comerciais usando redes neurais. As Redes Neurais usam parâmetros arquitetônicos como variáveis intermediárias, e assim realizou um análise da importância dos parâmetros, considerando várias tipologias de prédios em estudo. Os fatores com maior importância foram o número de andares, o pé direito, a área projetada da cobertura, a área não condicionada, o comprimento e a área de fachada. O autor analisou a sensibilidade do modelo em relação a modificação destes parâmetros, e encontrou que a área de fachada, a projeção da cobertura e o comprimento principal do prédio foram aquelas que induziram as maiores variações do consumo final.

Para identificar os indicadores a serem analisados na sua simulação, Santana (2006) definiu uma metodologia de análise dos detalhes construtivos e dos equipamentos. O organograma da Figura 2.2 identifica o caminho permitindo definir os indicadores a ser usados nos modelos, a partir dos elementos visíveis da estrutura.

Figura 2.2 - Indicadores obtidos a partir do levantamento dos detalhes construtivos

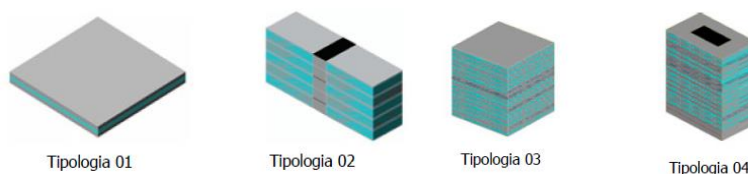


Fonte: SANTANA 2006

### 2.1.5 Tipologias de Edificações

No seu modelo, Melo (2012) usou 4 tipologias de prédios, de Comprimento, Largura, Altura e Área bem distintas, apresentadas na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Tipologias de prédios comerciais



Fonte: MELO 2012

Os modelos de Melo (2012) foram adaptados para estas tipologias, cujas formas são bem distintas, e assim tem parâmetros dominantes diferentes. Todas estas tipologias foram usadas para um mesmo uso. Santana (2006) decidiu usar uma tipologia predominante, de forma retangular. Esta tipologia foi caracterizada pela transmitância térmica em  $W/m^2.K$ , a capacidade térmica em  $kJ/m^2.K$ , a absorbância, e as características das janelas. As cargas internas foram determinadas pelas densidades de carga em  $W/m^2$ , as características do sistema de ar condicionado e a ocupação. A partir desta forma padrão, Santana (2006) estudou a possibilidade de realizar variações dos parâmetros apresentados no item precedente. Outro elemento importante foi o sombreamento devido ao entorno do prédio.

## 2.2 Usos finais de consumo energético para o setor educacional

### 2.2.1 Usos finais de Energia

Na literatura acadêmica, vários exemplos de estudo do consumo energético foram realizados, para edificações de serviços e comerciais (SIGNOR 1999, SANTANA 2006, MELO 2012), edificações públicas e mesmo edificações educacionais. (LEE *et al.* 2001 estudaram os prédios da UFSC, BENAVIDES 2014 para a USP). Benavides (2014), Santana (2006) e Signor (1999) identificam 3 pontos principais de consumo elétrico para um prédio universitário: a iluminação, o ar condicionado, e os equipamentos. A Tabela 2.1. apresenta repartições de uso finais de energia elétrica para dois prédios da USP:

Tabela 2.1 - Usos finais de energia para duas edificações da USP

Uso Final de Energia	Prédio de Engenharia Elétrica	Prédio de Zoologia
Equipamentos	17 %	31 %
Iluminação	46 %	41 %
Ar Condicionado	37 %	28 %

Fonte: O autor, adaptado de BENAVIDES 2014

LEE *et al.* 2001 estudaram os dois prédios do departamento de engenharia Civil da UFSC e avaliaram a eficiência de várias ações de melhoria energética. Apresentaram curvas de cargas de resfriamento, de iluminação e de equipamentos elétricos e compararam o simulado com medições nos dois prédios em estudo. A simulação realizada no VisualDOE permitiu determinar a repartição dos usos finais:

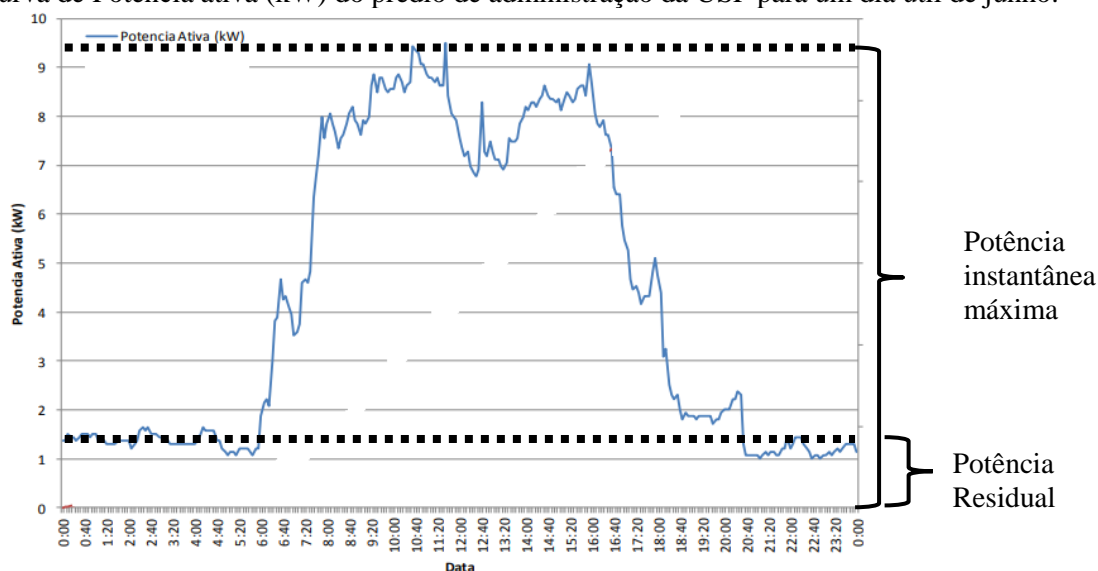


A carga de iluminação representou 28% do consumo, o ar condicionado 35% do consumo e os demais equipamentos elétricos representaram 37%. Esta repartição em 3 terços foi bem similar aos resultados obtidos para os prédios da USP.

### 2.2.2 Perfil de carga em função do tipo de prédio educacional.

Benavides (2014) realizou um levantamento da potência instantânea para o prédio de administração da USP durante o inverno. A Figura 2.4. apresenta o perfil da curva de carga para um dia útil.

Figura 2.4 - Curva de Potência ativa (kW) do prédio de administração da USP para um dia útil de junho.



Fonte: O autor, adaptado de BENAVIDES 2014

Na Figura 2.4. se identifica um perfil de consumo correspondente ao nível de ocupação de um escritório geralmente usado na literatura, observando um aumento progressivo (6h – 8h), dois platôs na manhã (8h – 11h30) e na tarde (14h – 16h30), uma diminuição durante o tempo do almoço (11h30 – 14h), e uma diminuição no fim da tarde (16h30 – 21h). Para este tipo de uso, a potência residual (*OFFSET* em Inglês) corresponde aos equipamentos que ficam ligados o tempo todo, representa 15% do pico de carga. Este valor corresponde ao valor constante observado num dia de fim de semana quando o prédio não está ocupado. Esta variação da amplitude entre o valor residual e o pico de demanda varia em função do uso do prédio: A Tabela 2.2 apresenta os valores de pico e residuais de prédio da Administração, do Instituto de Energia e do CPD da USP.

Tabela 2.2 - Potências instantâneas máximas e potências residuais para três prédios da USP

Prédio	Potência instantânea Máxima	Potência Residual (kW) ou <i>OFFSET</i>	Potência Residual (%) ou <i>OFFSET</i>
Administração	9,5 kW	1,4 kW	15 %
Instituto de Energia	20 kW	8 kW	40 %
CPD	505 kW	430 kW	85 %

Fonte: O autor, adaptado de BENAVIDES 2014

No caso do Instituto de Energia, cujos usos são laboratórios, salas de professores e salas de aula, o valor do offset medido é de 40%, e este valor sobe até 85% para o CPD, cujos equipamentos são servidores ligados em contínuo.

## 2.3 Etiquetagem

Em 2009 o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) publicou o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais,

de Serviços e Públicos (RTQ-C) para dar as bases necessárias a uma etiquetagem da eficiência energética de edificações no Brasil. Esta etiquetagem se materializa por uma classificação em 5 níveis de eficiência representados pelas letras de A (muito eficiente) a E (pouco eficiente). O RTQ-C define equações permitindo definir a eficiência da edificação, e de três subsistemas: a envoltória, os sistemas de iluminação e os sistemas de ar condicionado (MELO 2012). O Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) sob responsabilidade do Inmetro e o PROCEL-Edifica coordenam a etiquetagem no Brasil para promover uma produção cada vez mais eficiente. Para avaliar a eficiência energética do prédio, o RTQ-C estabelece um conjunto de equações permitindo calcular um número de pontos PT entre 0 e 5. Em função deste valor determina-se a classe energética do prédio de acordo com a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Classificação geral de Etiquetagem

Pontuação (PT)	$\geq 4,5$ a 5	$\geq 3,5$ a $< 4,5$	$\geq 2,5$ a $< 3,5$	$\geq 1,5$ a $< 2,5$	$< 1,5$
Classificação geral	A	B	C	D	E

Fonte: O autor, baseada no RTQ-C (INMETRO 2010)

O valor PT é decomposto em três componentes, com pesos diferentes: 30% para a envoltória e a iluminação, e 40% para o sistema de ar condicionado. O equacionamento é apresentado em Anexo B.

## 2.4 Soluções de melhoria energética

Benavides (2014) e Lee *et Al.* (2001) apresentaram soluções de melhoria para os prédios em estudo, e avaliaram os efeitos destas ações usando simulações numéricas. Benavides (2014) propôs principalmente soluções para tornar a iluminação mais eficiente, realizando a troca das luminárias, e usou o *software* DIALUX para avaliar a melhoria. Também realizou uma análise comparativa entre valores de normas, valores atuais e novos dados de iluminação e realizou uma análise financeira para determinar a viabilidade da troca de luminárias, comparando investimento e *payback* simples. LEE *et Al.* Apresentaram várias ações de eficiência, não somente na iluminação, com a troca de lâmpadas, mas também estudaram a transição para um sistema de ar centralizado, a instalações de brises solares, a instalação de refletores solares, para reduzir a carga térmica de resfriamento. Usaram o *software* Visual DOE para avaliar a eficiência destas propostas em termo de economias alcançadas. Nenhum dos trabalhos apresentou propostas de modificações significativas da envoltória.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Caracterização do consumo energético

#### 3.1.1 Metodologia geral de modelagem energética.

O objetivo do presente trabalho é apresentar uma metodologia de auditoria energética principalmente para estimar o consumo energético dos prédios, e o potencial de melhoria. O Objetivo não é realizar uma modelagem detalhada, mas determinar por meio de uma análise rápida, prédios alvos para realizar esta análise completa. A parte mais importante deste trabalho é a elaboração do modelo energético. Este modelo deve ser simples para ser implementado numa ferramenta computacional, ter entradas básicas e qualitativas que refletem a natureza e qualidade dos dados que um funcionário da UFRGS consegue coletar com uma visita simples do prédio ou com acesso a informações básicas disponíveis pelos serviços do patrimônio da universidade. Mas o modelo também deve ser o mais preciso possível, considerando estas entradas, para dar a aproximação mais fiel do comportamento real.

A elaboração de uma ferramenta computacional tem como intenção oferecer uma interface funcional necessária a realização da auditoria proposta por uma pessoa qualquer, sem precisar entrar nos detalhes do equacionamento e dos parâmetros internos. O modelo discrimina as zonas do prédio (salas de aulas, laboratórios, escritórios etc.) e pode ser classificado de método “Espaço por Espaço”, em oposição com o “Método da Edificação Completa”. Cada um dos espaços ou zonas tem comportamentos diferentes e parâmetros de modelagem diversos (densidades de iluminação ou de equipamentos diferentes) que influem sobre o consumo final. De acordo com a literatura acadêmica, foram considerados três tipos de usos finais neste trabalho:

- Carga de Ar Condicionado

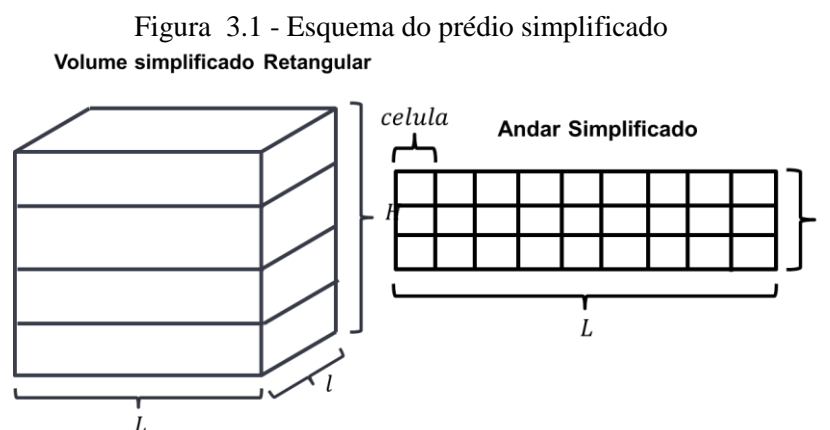
- Carga de Iluminação
- Carga de Equipamentos

Não foi analisada a carga de aquecimento neste trabalho, mas a sua integração faz parte dos pontos de melhoria para demais trabalhos.

Os elementos precedentes permitiram selecionar o método CLTD/CLF definido na ASHRAE (1989) como base de cálculo da carga de resfriamento. Esta técnica de cálculo permite obter a curva de carga de condicionamento necessária para manter o ambiente na temperatura de conforto desejada. Este método foi usado para estimar o consumo energético necessário para suprir a carga de Ar Condicionado do prédio, seguindo o equacionamento descrito por Beyer (2015) e pela ASHRAE (1989), detalhado em Anexo A.

### 3.1.2 Metodologia de simplificação do modelo térmico

Para simplificar o modelo, foi considerado um prédio retangular (fig. 3.1), cujas dimensões podem ser obtidas a partir do comprimento da fachada principal, da superfície total, do número de andares e do pé direito.



Esta geometria permite representar de maneira realista a maioria dos prédios acadêmicos. O andar simplificado será dividido em células de dimensões iguais, calculadas a partir da superfície de zona recomendada pela ASHRAE 1989 para aplicação do modelo CLTD/CLF, ou seja, ambientes de 5m x 5m. Estas células podem corresponder à realidade das zonas encontradas em um prédio acadêmico, ou seja, salas de aula, escritórios e laboratórios. Esta modelagem permite estimar a superfície de paredes, pisos e lajes internos, necessários para o cálculo da carga térmica. Esta geometria permite estimar as seguintes superfícies:

- Superfície da cobertura
- Superfície de paredes externas (para cada fachada / orientação)
- Superfície de janelas (para cada fachada / orientação)
- Superfície de paredes internas
- Superfície de pisos internos
- Superfície de forros internos

Foi considerado que todos os ambientes condicionados são homogêneos, constituindo um único volume condicionado, repartido de maneira homogênea no prédio. Com esta abordagem, o volume condicionado recebe uma fração dos ganhos térmicos externos calculados através as superfícies precedentes, proporcional a fração de volume ocupado.

Para o volume condicionado foi considerado a temperatura de conforto de 23 °C, e para os ambientes não condicionados, o perfil de temperatura foi determinado pela Equação 3.1.

$$t_{ANC} = (tbs_{EXT} - 3) - (PVD(VD - 6)) \quad (3.1)$$

na qual  $t_{ANC}$  é a temperatura do ambiente não condicionado (°C),  $tbs_{EXT}$  é a temperatura de bulbo seco externa (°C),  $PVD$  é a porcentagem de variação diária e  $VD$  é a variação diária de temperatura em °C. Esta

equação é baseada no modelo senoidal de variação da temperatura cujos valores de variação são tabelados e podem ser encontrados no BEYER 2015 e ASHRAE 1989.

### 3.1.3 Determinação dos parâmetros intermediários do modelo térmico e energético

Os parâmetros do modelo desenvolvido se repartem em 6 categorias apresentadas nos seguintes parágrafos.

#### a) Elementos construtivos gerais

Para caracterizar a envoltória, os parâmetros seguintes foram usados:

- Área total em m<sup>2</sup>
- Numero de andares
- Pé direito em m
- Comprimento da fachada principal em m
- Orientação da fachada principal
- Sombreamento nas fachadas (árvores, brises, outros prédios)

#### b) Tipologias de envoltória

O método CLTD/CLF é baseado em tabelas representando o comportamento térmico - ou inércia térmica - de vários elementos construtivos. As paredes são caracterizadas por um grupo térmico classificando as paredes das mais leves (Grupo G) as mais pesadas (Grupo A) e pela condutividade térmica delas em W/m<sup>2</sup>.°C Estes dois elementos foram determinados por vários tipos de paredes e apresentados por Beyer (2015) e nas versões do *Handbook of fundamentals* da ASHRAE. Estes dados foram completados por valores calculados. Para isso, foi usada a metodologia de cálculo de transmitância térmica apresentada na ASHRAE, usando características térmicas de materiais definidas pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da UFSC para materiais construtivos típicos no Brasil. O grupo térmico foi determinado por comparação com os elementos tabelados pela ASHRAE. Este método também foi aplicado para a cobertura. Para os elementos internos apenas a transmitância é necessária pelo modelo. Para ajudar a realização da auditoria, exemplos típicos de paredes internas e pisos foram descritos e caracterizados para complementar a biblioteca de elementos construtivos.

O cálculo da Transmitância  $U$  em W/m<sup>2</sup>.°C, de um elemento de parede ou laje foi feito aplicando a Equação 3.2.

$$U = \frac{1}{\sum R_i} \quad (3.2)$$

na qual  $R_i$  são as resistências superficiais (termo de convecção) e resistências internas dos materiais constituindo a superfície (termo de condução). Os valores de resistências superficiais do Ar, ou as resistências Térmicas de materiais típicos de construção foram encontrados nas tabelas de referência da ASHRAE, ou nas tabelas produzidas pelo LABEEE da UFSC.

Para simplificar a obtenção dos dados arquitetônicos usados no modelo, a metodologia adotada consiste em definir tipologias padrões de prédios, representativas do parque da UFRGS. O objetivo é identificar os tipos de prédios com características arquitetônicas semelhantes e para cada tipo identificado definir um conjunto de elementos de paredes externas, paredes internas, coberturas e pisos intermediários.

#### c) Tipologias de janelas

Para determinar os parâmetros das equações de cálculo da carga térmica das janelas pelo método CLTD/CLF, é necessário caracterizar as janelas a partir dos elementos seguintes:

- Tipo de vidro e espessura (simples, duplo, fumê, 3 mm, 6mm)
- Tipo de esquadria (metálica, madeira, vidro 100%)
- Presença de proteção interna (Cortinas, persianas), tipo, opacidade e cor
- Presença de proteção externa (Brise)
- Sombreamento externo (Arvores outros prédios, brises)

Além disso, para cada fachada é necessário avaliar a porcentagem de janelas na fachada (PJF), para ajudar o auditor foram apresentados exemplos de fachadas com a porcentagem de janelas correspondente. Estes elementos descritivos, permitem por meio das tabelas fornecidas pela ASHRAE 1989 ou BEYER

2015 de calcular os parâmetros do modelo (Coeficiente de Sombra, Porcentagem de sombra, Fatores de Carga de Resfriamento, Fator de Ganho de Calor Solar, Transmitância da janela etc.)

d) Cargas de ar condicionado, iluminação e equipamentos

Os equipamentos de climatização usados são descritos por seu Coeficiente de Performance COP, sendo feita uma diferenciação dos aparelhos tipo “Janela”, Split e sistema centralizado. Em função do envelhecimento dos equipamentos, este valor é diferente. Os valores utilizados foram os dados fornecidos pelas tabelas de avaliação do desempenho de equipamentos *SPLIT* e janelas do INMETRO e valores de COP apresentados no RTQ-C.

Aplicando a descrição volume por volume, foi considerada para cada uso identificado uma densidade de iluminação obtida a partir de dois parâmetros:

- A eficiência da luminária, dependendo do tipo de lâmpadas usadas (Tubo fluorescentes T8, T5, LED), sendo neste trabalho a densidade de potência normalizada por 100 lux ( $W/m^2 \cdot 100lux$ ).

- A intensidade luminosa necessária para o ambiente, em lux/m<sup>2</sup> e definidos pela norma NBR5413

A densidade de potência de iluminação foi obtida pela multiplicação destes dois dados. Assim o valor obtido é representativo da intensidade necessária e da eficiência da lâmpada.

Para cada volume identificado, é aplicada uma densidade média de potência de equipamentos. Este valor médio pode ser calculado a partir de um levantamento de cargas e do conhecimento dos hábitos de funcionamento da zona, ou obtido na literatura científica e acadêmica. A ASHRAE (2009) propõe valores de potência para vários equipamentos e valores de potência média para vários tipos de usos. Considerando que este o valor a ser usado será um valor correspondente a um uso médio, o valor de potência instalada pode ser estimado a partir do fator de diversidade. Caso valores não possam ser encontrados na literatura, foram determinados a partir da modelagem de uma sala padrão com equipamentos típicos e com a aplicação de um fator de diversidade correspondente a realidade do tipo de uso considerado. De acordo com a análise das curvas de cargas de Benavides (2014), para cada tipo de uso ou zona, foi identificado a porcentagem de carga residual – ou *OFFSET*. A carga de equipamentos foi separada entre uma fração dependendo dos horários de funcionamento e do nível de ocupação e uma fração não variável ou residual.

Os valores de consumo de ar condicionado, iluminação e equipamentos são obtidos multiplicando as densidades em W/m<sup>2</sup> pelas superfícies em m<sup>2</sup> e pelas curvas de ocupação (% de ocupação para cada hora do dia).

e) Dados meteorológicos

Dois tipos de dados meteorológicos foram usados neste trabalho, com dois objetivos distintos. Primeiramente foram usados os dados de “dia de projeto” (*Design Day*) de verão representando os valores máximos, baseados na análise dos dados históricos, e desprezando 0,4% de horas anuais, para Porto Alegre. Esta última porcentagem é uma escolha que permite realizar uma eliminação dos extremos e diminuir a carga a ser instalada e os custos ocasionados. O valor de 0,4%, ou seja, 35 horas anuais é considerado como conservador (BEYER 2015). Os dados que foram usados são:

- Temperatura de bulbo seco máxima (°C)
- Amplitude diária de variação de temperatura no verão (°C)
- Conteúdo médio de umidade para o dia de projeto de verão ( $g_{\text{Água}}/kg_{\text{ArSeco}}$ )
- Velocidade do vento de 1m/s

Para a análise anual do desempenho do prédio foram usados dados meteorológicos mensais do Instituto de meteorologia INMET para a cidade de Porto Alegre:

- Média mensal das temperaturas máximas (°C)
- Média mensal das temperaturas mínimas (°C)
- Média mensal das temperaturas médias (°C)
- Média mensal da umidade relativa (%)
- Média mensal da velocidade do vento (m/s)

f) Dados de Ocupação

Para os usos gerais dos prédios, foi adotada uma curva de ocupação, representando uma porcentagem de ocupação para cada hora de funcionamento do prédio para as quatro categorias de dias

seguintes: Dias uteis, Sábados, Domingos e Feriados, Férias. Estes dados correspondendo ao calendário universitário da UFRGS do ano de estudo. Como o modelo usa um passo mensal, em vez de uma curva diária, foi calculado a curva de ocupação mensal, somando para cada faixa horaria o número de horas de ocupação.

### 3.1.4 Avaliação do modelo a partir do estudo do prédio da Farmácia

A última etapa para validar o modelo de previsão do consumo é a calibração. O modelo pretende estimar o consumo de um prédio de referência da UFRGS de maneira mais precisa possível e prever uma distribuição de do uso final coerente com as estimações baseadas no levantamento de cargas, assim como os resultados da literatura acadêmica (BENAVIDES 2014).

A aplicação da metodologia de auditoria apresentada neste trabalho para este caso prático responde aos objetivos seguintes:

- Capacidade a realizar a auditoria com um número de informações mínimo (de acordo com o objetivo geral do trabalho)
- Verificação da capacidade do modelo adotado a prever um consumo mais próximo da realidade (O prédio selecionado sendo monitorado por um relógio próprio da concessionária, as faturas elétricas do prédio estão disponíveis)
- Ilustração da metodologia adotada
- Identificar os pontos de divergência do modelo com a realidade medida
- Obter indicadores de consumo, cargas, tipo de equipamentos a partir das visitas técnicas realizadas
- Identificar as dificuldades de realização da auditoria.

## 3.2 Análise da eficiência

A eficiência energética do prédio foi analisada por meio de uma simplificação do método de Etiquetagem de prédios do PROCEL PBE Edifica, seguindo o equacionamento descrito pelo RTQ-C para cálculo dos diferentes parâmetros da equação de Etiquetagem. Os termos de projeções de sombreamento verticais e horizontais foram desprezados. De acordo com a metodologia seguida por PEREIRA *et al.* 2010, e usando a ASHRAE 2009, o Fator Solar (FS) foi aproximado pela multiplicação do coeficiente de sombra das proteções internas (CS – IAC em Inglês para *Interior Solar Attenuation Coefficient*) e do fator solar do vidro simples 3mm de 0,87 recomendado pelo RTQ-C. Os pré-requisitos de Transmitância e absorvância das paredes e da cobertura para a zona bioclimática de Porto Alegre também foram desprezados para simplificar o modelo computacional. Pela mesma razão os pré-requisitos dos sistemas de iluminação (dimerização, separação dos circuitos, automatização) foram desprezados. O objetivo é apenas apresentar um nível de eficiência afim de avaliar o desempenho do prédio. A última simplificação consiste em utilizar o método de avaliação do desempenho da iluminação considerando o uso do prédio inteiro (método da edificação completa), e não o método zonas por zonas. A densidade de iluminação é comparada aos níveis de eficiência definidos pelo RTQ-C para prédios acadêmicos.

Além destes parâmetros, todos os outros elementos do equacionamento foram calculados para aplicar a metodologia descrita pelo RTQ-C e obter um valor de eficiência do Prédio.

## 3.3 Soluções de melhoria energética e Avaliação das perdas

Para realizar uma estimativa preliminar do potencial de melhoria e de economias, três soluções foram aplicadas ao modelo desenvolvido. Estes cenários foram determinados para propor uma melhoria nas três categorias da etiquetagem: Envolvória, Ar condicionado e Iluminação, considerando modificações realistas. A auditoria presente não foca em equipamentos, assim a melhoria da eficiência dos equipamentos não foi avaliada, apesar de poder apresentar um grande potencial de economias em alguns casos. Em razão da dificuldade de modificações da envoltória do prédio, a modificação mais realista corresponde ao uso de uma tinta branca nas fachadas. Para o ar condicionado, foi avaliada a troca dos equipamentos para sistemas de alta eficiência. Isso também foi aplicado para o sistema de iluminação. Por fim as três soluções foram aplicadas separadas e juntas, ou seja, permitindo a análise de melhoria para 4 cenários. A eficiência das soluções de melhoria foi analisada sob dois aspectos.

- Aspecto Técnico
  - Ganho energético estimado (kWh de ganho, % de ganho)
  - Nova Etiqueta de Eficiência obtida (Prédio, Envolvória, Ar Condicionado e Iluminação)

- Aspecto Econômico
  - Economia anual estimada (R\$/ano)

### 3.4 Uma interface funcional para realizar a auditoria

Para responder ao objetivo de propor uma metodologia aplicável por um funcionário dos serviços administrativos, foi realizada uma ferramenta no Microsoft Excel. A linguagem de programação principal usada foi o próprio *Visual Basic for Application* para Excel – VBA e o *Structured Query Language* – SQL para a manipulação das bases de dados. Todos os parâmetros intermediários tabelados foram formatados em bases de dados, uma interface funcional foi realizada permitindo adicionar e caracterizar novos prédios por meio de formulários e botões e visualizar os resultados na forma de indicadores, dados chave e gráficos. Os formulários são chamados pelos botões e permitem selecionar as características do prédio e seus usos e equipamentos de forma didática e qualitativa. Os elementos e valores preenchidos são armazenados e o código realiza a correspondência entre estes dados e os valores tabelados correspondentes para realizar os cálculos de simulação e atualizar as informações de resultados na interface de visualização ou *Dashboard*.

## 4 RESULTADOS

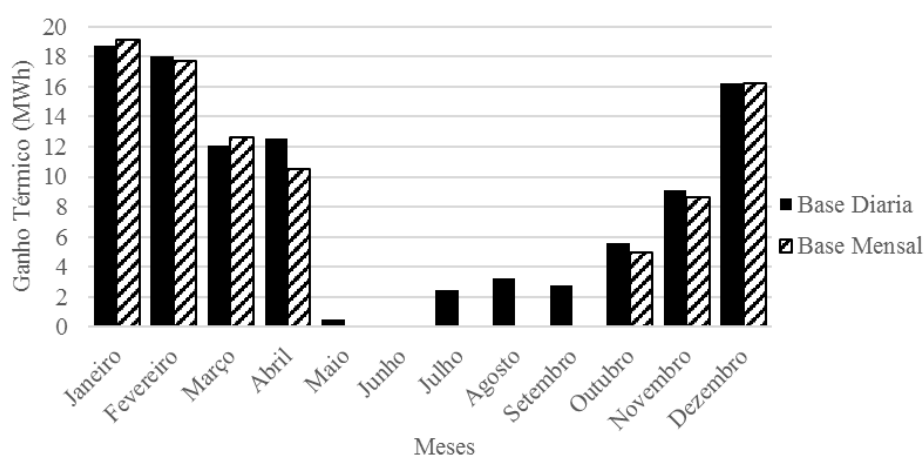
### 4.1 Análise do modelo de previsão da carga térmica solar – ASHRAE CLTD/CLF

Para verificar a influência dos parâmetros permitindo o cálculo da carga térmica exterior entre eles e sob o consumo total, foi realizada uma análise paramétrica a partir do método de análise estatística *Box–Behnken Design* para 3 fatores. Este método consiste em analisar um modelo de N parâmetros analisando a influência das combinações de fatores, cada um deles representando por seus valores extremos e um valor central. A análise foi realizada a partir do *software* MINITAB. A partir dos resultados apresentados em Apêndice A, foi concluído que uma ênfase na definição das janelas é fundamental, não somente na definição da porcentagem de abertura, mas também na descrição dos elementos de proteção e sombreamento, o que justifica o nível de detalhamento deste elemento construtivo para determinação dos parâmetros.

### 4.2 Base de cálculos mensal contra base de cálculo diária

O tempo computacional para aplicar o modelo dia por dia é bem mais elevado que um cálculo mês por mês. Para justificar a escolha desta simplificação, as duas abordagens foram comparadas, considerando a carga térmica externa para um prédio padrão de 2000 m<sup>2</sup>, condicionado quando a temperatura externa ultrapassa 23°C, para o ano 2016.

Figura 4.1 - Comparação do ganho térmico calculado por passo diário ou mensal



Fonte: O autor

A Figura 4.1 mostra que a principal divergência ocorre nos meses de inverno nos quais fenômenos meteorológicos extremos podem acontecer. Em alguns dias as temperaturas alcancem valores superiores a temperatura de ligamento do ar condicionado enquanto a temperatura máxima média do mês não ultrapasse

a temperatura de ligamento (nivelamento). Nos meses de verão, a diferença entre as duas abordagens fica desprezível, com erros absolutos inferiores a 2%. Estes episódios mais quentes acontecem regularmente e podem distorcer o valor da média, incitando o modelo a calcular uma carga de resfriamento num período no qual normalmente não se aplica condicionamento. A determinação dos parâmetros de funcionamento do ar condicionado (*Setpoint* e período de uso) permite obter uma representação mais realista do consumo de resfriamento. Estes resultados permitem justificar a adoção do modelo mês por mês.

### 4.3 Modelagem do prédio: tipologias e elementos construtivos

Considerando uma velocidade média do vento de 1m/s, foi aplicada uma resistência superficial para o ar em movimento do lado externo de 0,054 m<sup>2</sup>. °C/W. De acordo com Beyer (2015), foram usados valores de 0,11 m<sup>2</sup>. °C/W para fluxo interno ascendente, 0,16 m<sup>2</sup>. °C/W para fluxo descendente interno e 0,12 m<sup>2</sup>. °C/W para fluxo lateral interno. Valores de resistência de materiais foram obtidas por meio de ASHRAE 2009, LABEEE 2003 e BEYER 2015. Além dos elementos de paredes e forros já disponíveis foram calculados valores para elementos adicionais:

Tabela 4.1 - Exemplos de elementos construtivos calculados

Tipo	Descrição	Resistencia (m <sup>2</sup> . °C/W)	Transmitância térmica (W/m <sup>2</sup> °C)	Grupo
Parede Ext.	2,5 cm argamassa c/ areia + 60 cm tijolo maciço + 2,5 cm argamassa c/ areia	0,8725	1,15	A
Parede Int.	1,5 cm argamassa c/ areia + Ceram Tij 6 fur. quad (9 cm) + 1,5 cm argamassa c/ areia	0,2935	3,4	-
Piso Int.	Piso cerâmico (1 cm)+ Argamassa de reboco (2,5 cm) + Laje de concreto (20 cm)	0,417	2,4	-

Fonte: O autor

O grupo da parede externa de 60 cm de tijolos (Tab. 4.1) foi determinado considerando o peso importante desta espessura e a inércia térmica que deve resultar. Este tipo de parede é adaptado para caracterizar prédios históricos. Para simplificar o processo de análise de envoltória, foram adicionadas tipologias de envoltória de prédios que consistem a associar quatro elementos construtivos caracterizando a cobertura, as paredes externas, internas e os pisos intermediários. A Tabela 4.2 apresenta o exemplo de duas tipologias determinadas.

Tabela 4.2 - Exemplos de tipologias de prédio

Descrição	Cobertura	Paredes Externas	Paredes Internas	Pisos
Prédio Histórico	Madeira e isolamento	Tijolo maciço 60 cm	Tijolo maciço 10 cm + 5 cm argamassa	Piso madeira + laje mista (12 cm)
Prédio Típico	Terraço concreto	Tijolos face 10cm +Tijolo furado 20 cm	Tijolo furado 9cm + 3cm argamassa	Piso cerâmica + laje concreto (20cm)

Fonte: O autor

O objetivo destas tipologias é ajudar o funcionário na escolha dos materiais, mas a ferramenta permite definir independentemente cada material e adicionar novos elementos para completar a biblioteca.

### 4.4 Modelagem Energética

#### 4.4.1 Usos do prédio e potências instaladas

Foi adotada uma lista exaustiva de usos possivelmente encontrados num prédio acadêmico. Para cada um destes usos ou volumes, foi definida a intensidade de iluminação (ou iluminância), a densidade de



ocupação em m<sup>2</sup>/pessoa. Para caracterizar a carga de equipamentos, foi definida uma densidade de potência em W/m<sup>2</sup>, calculada para condições de utilização real, assim como a fração de carga residual (*offset*) que não depende do nível de ocupação e o fator de diversidade que corresponde a razão da potência usada sobre a potência instalada. A Tabela 4.3 apresenta a lista dos usos que foram identificados e as características associadas.

Tabela 4.3 - Caracterização dos usos possíveis para os volumes de um prédio educacional.

Uso	Iluminação		Equipamentos		
	Iluminância (lux)	Ocupação Densidade (m <sup>2</sup> /pessoa)	Densidade (W/m <sup>2</sup> )	Fração residual (%)	Fator de diversidade
Sala de Aula (Padrão)	300	2	5	0%	0,8
Sala de Aula (Comput.)	300	4	50	10%	0,8
Biblioteca	330	10	20	50%	1
Escritório - Administração	500	11,6	10,8	0%	0,8
CPD Pequeno Porte	200	-	250	90%	1
CPD Médio Porte (500 m <sup>2</sup> )	200	-	500	90%	1
Circulação	100	10	3	100%	1
Laboratório Pequeno Porte	350	20	30	33%	0,5
Laboratório Médio Porte (ensaios Químicos)	350	20	50	80%	0,5
Laboratório Grande Porte	350	10	160	60%	0,5
Serviços técnicos	100	-	100	50%	0,3

Fonte: O autor

Todos estes valores de intensidade luminosa foram obtidos a partir da norma NBR5413 (ABNT 1992). Para os laboratórios, a norma recomenda um valor de 500 lux para plano de trabalho e 200 lux para o resto do ambiente, neste trabalho foi usado um valor médio de 350 lux. Para salas de aula, foram considerados salas de 60 m<sup>2</sup> para 30 alunos, usando como carga um vídeo projetor (310 W térmico) e um computador com telas para cada sala (100 W térmico). Considerando um fator de diversidade de 80%, foi encontrado uma densidade de pessoas de 2m<sup>2</sup>/pessoas e uma densidade de potência de 5W/m<sup>2</sup>. Para salas com computadores foi considerada uma sala de 60 m<sup>2</sup>, com 15 postos informáticos de 200W, mais vídeo projetor e impressora. Foi considerado que 10% da carga não depende da ocupação (*offset*). Para as bibliotecas, o valor de iluminação foi calculado com uma ponderação correspondente a repartição das superfícies dos espaços da biblioteca no estudo de caso de Benavides (2014). O valor da potência média de um CPD de meio porte foi determinado a partir do estudo do CPD da USP (BENAVIDES 2014) (430 m<sup>2</sup>, potência média anual de 505 W/m<sup>2</sup>) e a carga residual foi determinada a partir da análise das curvas de carga do mesmo estudo de caso. Para os escritórios, foram utilizados os valores recomendados pela ASHRAE 2009 para uma densidade média de escritório (Cap. 18, Tab. 11). A ASHRAE 2009 descreve a potência média de um laboratório como sendo de 50 até 220 W/m<sup>2</sup>, com um valor de fator de diversidade em torno de 0,5 (valor conservativo). Como vários laboratórios em meio universitário servem para aulas práticas, ou possuem cargas com usos ocasionais (motores por exemplo), foi caracterizado um laboratório de carga leve, com cargas constantes correspondente a presença de servidores informáticos, e com uma carga intermediária entre o escritório e um laboratório correspondente ao valor baixo da faixa proposta pela ASHRAE (2009).

Para calcular a potência instalada e o consumo energético a partir das superfícies e das densidades, foi necessário definir os níveis de eficiência de iluminação e ar condicionado possivelmente encontrados num prédio, e apresentados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Eficiências possíveis de sistemas de Ar condicionado e iluminação.

Sistema de Ar condicionado	COP (W/W)	Sistema de iluminação	Eficiência (W/m <sup>2</sup> .100lux)
Condicionador Janela	2,55	Tubo Fluorescente ineficiente	5,5
Condicionador Split antigo	2,85	Tubo Florescente T5	2,6
Condicionador Split Eficiente	3,25	Lâmpadas LED	2,8
Chiller Água Eficiente	4,5		
Chiller Água ineficiente /antigo	3,8		

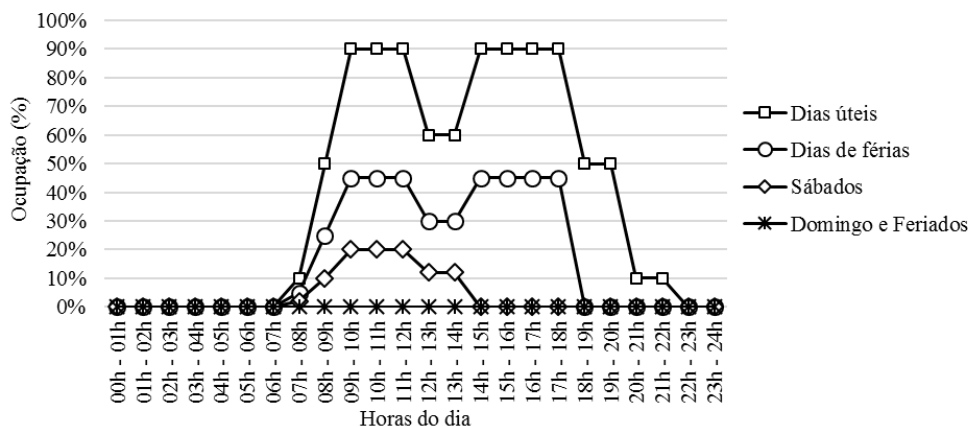
Fonte: O autor, baseado em INMETRO 2010 e BENAVIDES 2014

Para condicionadores tipo janela, será associado um COP correspondente a um aparelho de categoria 3, e de classe C de acordo com os critérios do programa de etiqueta Nacional de Conservação de Energia para o selo PROCEL de eficiência para splits janelas. Para equipamentos tipo split, serão usados valores correspondentes as categorias A e C. Para sistemas de ar centralizado, usando um chiller a água, serão identificadas duas categorias, uma eficiente para sistemas recentes, outra para sistemas antigos ineficientes (RTQ-C, Tabela 5.5, Condensação a agua compressor tipo parafuso, potência inferior a 264 kW, para nível A e tabela 5.10 para nível D)

#### 4.4.2 Horários de funcionamento e cargas térmicas de ocupação e renovação de ar

Para os quatro tipos de dias identificados, foi determinado a curva de ocupação representando para cada faixa horaria do dia a porcentagem do volume ocupado. A Figura 4.2 apresenta o perfil escolhido.

Figura 4.2 - Curvas de ocupação para os dias úteis, sábados, dias de férias e domingos e feriados.



Fonte: O autor

O dia de férias corresponde a 50% da curva de ocupação de um dia útil, com hora de fim do dia as 18h. No sábado, foi considerada uma abertura de manhã unicamente (até 14h) com nível de 20% do nível de dia util. Uma sondagens permitiram obter dados estatísticos de ocupação para consolidar estes dados.

O valor do ganho térmico de uma pessoa sentada foi obtido a partir das tabelas da ASHRAE (2009). O número de pessoas cumulado por faixa horaria num mês é obtido pela multiplicação dos horários dos dias do mês considerado(h/mês), pela superfície (m<sup>2</sup>), dividido pela densidade de pessoas (m<sup>2</sup>/pessoas). O valor da vazão de renovação do ar escolhida é o valor recomendado pela ANVISA para que a concentração de dióxido de carbono não ultrapasse 1000ppm, ou seja, 7,5L/s.pessoa. O valor do ganho térmico de renovação do ar é obtido considerando um ganho térmico por pessoa de 115 W/pessoa, aplicando o valor recomendado pela ASHRAE (2009) para trabalho leve em posição sentada (Cap. 18, Tab. 1).

#### 4.4.3 Processo de cálculo do consumo

O processo de cálculo implementado na ferramenta para realizar a simulação energética é o seguinte: Os detalhes do cálculo da parte térmica externa pelo método CLTD/CLF é descrita em Apêndice B. Este processo é integrado no processo de cálculo do consumo anual, realizado a partir de ciclos (*loop*) nos diferentes ambientes e nos diferentes meses do ano. O processo completo é detalhado em Apêndice C.

#### 4.5 Avaliação do desempenho – Etiqueta Simplificada

A avaliação do desempenho do prédio foi baseada na determinação da etiqueta energética do prédio, aplicando uma metodologia simplificada. O nível de eficiência do envoltório foi obtido a partir da equação proposta pela zona bioclimática 3 (INMETRO 2010). As faixas de avaliação do desempenho dependem do prédio em estudo, os valores serão apenas apresentados no estudo de caso realizado. Para a iluminação, as classes de eficiência já foram determinadas em função da potência de iluminação, considerando um prédio acadêmico, e o sistema de ar condicionado foi caracterizado pelo COP apresentado. A Tabela 4.5 seguinte apresenta estas faixas de valores para as diferentes classes de eficiência.

Tabela 4.5 - Faixas de Eficiência para Iluminação e Ar condicionado.

Elemento analisado	Nível A	Nível B	Nível C	Nível D	Nível E
Iluminação – Prédio universitário	$\leq 10,7 \text{ W/m}^2$	$\leq 12,3 \text{ W/m}^2$	$\leq 13,9 \text{ W/m}^2$	$\leq 15,5 \text{ W/m}^2$	
Ar Condicionado - COP	$\geq 3,23 \text{ W/W}$	$\geq 3,02 \text{ W/W}$	$\geq 2,81 \text{ W/W}$	$\geq 2,6 \text{ W/W}$	

Fonte: O autor, baseada no RTQ-C (INMETRO 2010)

#### 4.6 Opções de melhoria e análise Econômica

Para avaliar o potencial de melhoria do prédio, a simulação foi reproduzida para 4 cenários diferentes, aplicando modificações na envoltória, no sistema de ar condicionado e no sistema de iluminação. A tabela 4.6 apresenta as modificações operadas sobre s parâmetros do modelo. Os parâmetros identificados pela letra X não estão alterados.

Tabela 4.6 - Parâmetros otimizados para análise de soluções de melhoria

Cenário	Tinta Parede Externa	COP (W/W)	Iluminação (W/m <sup>2</sup> .100lux)
Cenário 1: Fachada clara	Branca	X	X
Cenário 2: Ar Cond. Eficiente	X	3,25	X
Cenário 3: Iluminação eficiente	X	X	2,8
Cenário 4: Todas as soluções	Branca	3,25	2,8

Fonte: O autor

O impacto destas modificações de eficiência no consumo final foi avaliado em termo de energia economizada (kWh) e economias de fatura (R\$).

#### 4.7 Processo de auditoria energética

Para resumir, o processo de auditoria a ser realizado do ponto de vista do funcionário que vai realizar a auditoria pode ser resumida as etapas seguintes:

##### PROCESSO DE AUDITORIA (Pelo Funcionário)

# ETAPA 0: Criação de um novo caso (Referências do prédio e do responsável)

# ETAPA 1: Caracterizar o prédio:

- 1. Geometria
  - a. Dados Gerais (Superfície, Andares, Pé direito)
  - b. Fachada Principal (Comprimento, Orientação)
  - c. Cores (Fachada e Cobertura)
- 2. Envoltório (Formulário apresentado na Figura 4.3)

Figura 4.3 - Formulário de caracterização da envoltória do prédio

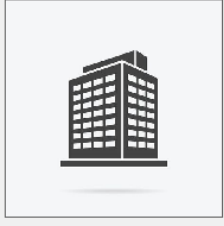
Caracterizar o prédio em estudo !

Geometria | Envoltoria | Janelas | Sombreamento

Metodologia Adotada para Caracterização da Estrutura do prédio:

Elementos Personalizados  Tipologia Predefinida

Elementos Estruturais



**Forro:** Terraço (Sem rebaixamento)  
Numero Forro : F14 ; U Forro = 0,602 W/m<sup>2</sup>°C

**Paredes Externas:** 100mm tijolo face + 200mm tijolo furado  
Grupo : GRUPO\_C ; U Paredes Ext = 1,561 W/m<sup>2</sup>°C

**Paredes Internas:** 1,5 cm argamassa c/ areia + Ceram Tij 6 fur. qua  
U Paredes Internas = 3,4 W/m<sup>2</sup>°C

**Piso:** Piso cerâmico (1 cm) + Argamassa de reboco (2,5 c  
U Piso = 2,4 W/m<sup>2</sup>°C

**Guardar os dados !**

Fonte: O autor

- a. Selecionar uma tipologia de prédio
- a. Selecionar os materiais Paredes, pisos, cobertura
- 3. Janelas
  - a. Características gerais (tipo de vidro, espessura e esquadria)
  - b. Determinar a porcentagem de janelas de cada fachada
- 4. Sombreamento (Formulário apresentado na Figura 4.4)

Figura 4.4 - Formulário de caracterização do sombreamento do prédio

Caracterizar o prédio em estudo !

Geometria | Envoltoria | Janelas | Sombreamento

Fachada 1	Fachada 2	Fachada 3	Fachada 4
<b>ORIENTAÇÃO:</b> SO	<b>ORIENTAÇÃO:</b> SE	<b>ORIENTAÇÃO:</b> NE	<b>ORIENTAÇÃO:</b> NO
<b>SOMBREAMENTO:</b> <input type="radio"/> NAO <input checked="" type="radio"/> SIM	<b>SOMBREAMENTO:</b> <input checked="" type="radio"/> NAO <input type="radio"/> SIM	<b>SOMBREAMENTO:</b> <input type="radio"/> NAO <input checked="" type="radio"/> SIM	<b>SOMBREAMENTO:</b> <input checked="" type="radio"/> NAO <input type="radio"/> SIM
<b>Tipo:</b> ARVORES		<b>Tipo:</b> ARVORES	
<b>Andares impactados:</b> 4		<b>Andares impactados:</b> 4	
<b>PROTEÇÃO JANELAS:</b> <input checked="" type="radio"/> NAO <input type="radio"/> SIM	<b>PROTEÇÃO JANELAS:</b> <input checked="" type="radio"/> NAO <input type="radio"/> SIM	<b>PROTEÇÃO JANELAS:</b> <input type="radio"/> NAO <input checked="" type="radio"/> SIM	<b>PROTEÇÃO JANELAS:</b> <input checked="" type="radio"/> NAO <input type="radio"/> SIM
		<b>Tipo:</b> Cortina Opaca	<b>Tipo:</b> Cortina Opaca
		<b>Cor:</b> Clara	<b>Cor:</b> Clara

**Guardar os dados !**

Fonte: O autor

- a. Sombreamento Externo de cada fachada, tipo de sombreamento, andares impactados
- b. Sombreamento interno de cada fachada, tipo e cor

# ETAPA 2: Definir as zonas do prédio (Formulário apresentado na Figura 4.5 seguinte)

Figura 4.5 - Formulário de caracterização das zonas do prédio

Definir os usos do prédio !

Ferramentas

Definir um novo uso !

Lista dos usos

Uso	Repartição (%)	Ar Condicionado	Schedule AC
Circulação	20%	OFF	SCHEDULE_OFF
Sala de Aula (Padrao)	21%	ON	SCHEDULE_OCUP
Sala de Aula Com Computadores	2%	ON	SCHEDULE_OCUP
Escritorio Administração	25%	ON	SCHEDULE_OCUP
Biblioteca	3%	ON	SCHEDULE_OCUP
Laboratorio Pequeno Porte	21%	ON	SCHEDULE_OCUP
Laboratorio Médio Porte	7%	ON	SCHEDULE_H24
+ - Serviços técnicos	1%	OFF	SCHEDULE_OFF

Guardar os dados !

Fonte: O autor

- 1. Selecionar um tipo de zona predefinido
- 2. Definir a porcentagem de área ocupada (usar plantas baixas)
- 3. Definir se o ambiente é condicionado
- 4. Definir o tipo de condicionamento (Horário de ocupação ou 24 horas)

### # ETAPA 3: Definir os níveis de Eficiência






- 1. Definir a eficiência de iluminação
  - a. Escolher os tipos de luminárias (T8, T5, LED) e as proporções
  - b. Opcional: Entrar uma eficiência personalizada (W/m<sup>2</sup>/100lux)
- 2. Definir a eficiência do Ar Condicionado (Formulário apresentado na Figura 4.6)

Figura 4.6 - Formulário de caracterização do sistema de ar condicionado do prédio

Caracterizar o sistema de Ar Condicionado do prédio !

Escolher o tipo de aparelho de Ar Condicionado predominante

Valor COP Estimado   Valor COP Personalizado

Caso 1:	Caso 2:	Caso 3:	Caso 4:	Caso 4:
				
<input checked="" type="checkbox"/> SPLIT JANELA ANTIGO	<input checked="" type="checkbox"/> SPLIT PAREDE EFICIENTE	<input checked="" type="checkbox"/> SPLIT PAREDE ANTIGO	<input type="checkbox"/> AR CENTRALIZADO EFICIENTE	<input type="checkbox"/> AR CENTRALIZADO ANTIGO
COP : 2,5	COP : 3,25	COP : 2,85	COP : 4,5	COP : 3,5
30 %	20 %	50 %	0 %	0 %

Guardar os dados !

Fonte: O autor

- a. Escolher os tipos de Equipamentos (Janela, Split eficaz, Split Antigo, Ar centralizado) e as proporções
- b. Opcional: Entrar uma eficiência personalizada (COP)

#### # ETAPA 4: Caracterizar o Ano de análise (Somente se os dados não são disponíveis)

- 1. Dados meteorológicos INMET
  - a. Preencher os dados mensais (Temperaturas máxima média, Temperatura mínima média, Temperatura média, Umidade relativa média, Velocidade média do vento)
  - b. Selecionar o ano de estudo
- 2. Dados de Ocupação
  - a. Preencher as informações do calendário Acadêmico (Feriados e Férias)

#### # ETAPA 5: Lançar a Simulação (Usar o Botão – Ações realizadas automaticamente)

- 1. Cálculo da potência instalada a partir do dia de projeto de verão
- 2. Calcular a carga térmica solar aplicada ao prédio para o ano de estudo
- 3. Calcular os dados de consumo para o ano de estudo
- 4. Calcular os dados de consumo aplicando os 4 cenários de melhorias para o ano de estudo
- 5. Calcular a etiquetagem simplificada do prédio
- 6. Atualizar o dashboard e os gráficos de análise

#### # ETAPA 6: Análise dos resultados (Interface apresentada em Apêndice D)

- 1. Dados de consumo, consumo por zona, consumo por uso específico, variações mensais
- 2. Dados de Potências instaladas, máxima média, contratada
- 3. Análise das cargas térmicas externas no prédio (por elemento do prédio e por mês do ano)
- 4. Análise da fatura anual de eletricidade estimada
- 5. Análise da eficiência (etiqueta simplificada, geral, envoltório, Ar condicionado e iluminação)
- 6. Análise dos cenários de melhoria (economia estimada e eficiência estimada)

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.1 Estudo de Caso: Prédio da Farmácia da UFRGS

#### 5.1.1 Caracterização do prédio

O prédio da Farmácia da UFRGS apresenta 7 andares, para uma superfície útil de 4500 m<sup>2</sup>. A fachada principal é orientada para o sudoeste e tem um comprimento de 40 m. O consumo energético foi analisado para o ano 2017, considerando uma temperatura de conforto de 23°C e uma temperatura externa de ligamento do ar (*Setpoint*) de 25°C. A eficiência média do sistema de ar condicionado foi de 2,8 W/W e de 4,5W/m<sup>2</sup>.100lux para o sistema de iluminação.

Tabela 5.1 - Parâmetros característicos das fachadas do prédio Farmácia

Parâmetro	Fachada 1	Fachada 2	Fachada 3	Fachada 4
Superfície Fachada	1680 m <sup>2</sup>	675 m <sup>2</sup>	1680 m <sup>2</sup>	675 m <sup>2</sup>
Orientação	SO	SE	NE	NO
Porcentagem de Janelas	45%	50%	45%	50%
Porcentagem de sombra	57%	0%	57%	0%
Proteções Internas	-	-	Cortinas opacas	Cortinas Claras

Fonte: O autor

Para caracterizar a envoltória do prédio, foi utilizada a topologia “Prédio Típico” definida precedentemente.

#### 5.1.2 Análise dos resultados

A ferramenta desenvolvida foi utilizada para realizar a auditoria deste prédio, cujas informações foram obtidas a partir de visitas técnicas. A tabela 5.2 apresenta a distribuição dos ambientes encontrados, com as superfícies correspondentes, o esquema de climatização, e os resultados da simulação energética em termo de consumo e consumo normalizado.

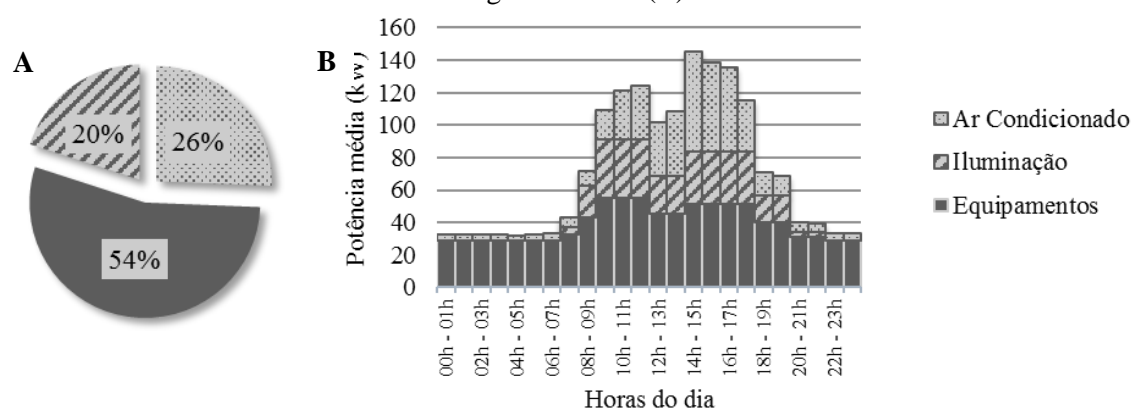
Tabela 5.2 - Lista dos usos do prédio Farmácia, repartição da superfície e do consumo final

Uso	Superfície (m <sup>2</sup> )	Ar Condicionado	Consumo (kWh)	Consumo (kWh/m <sup>2</sup> . ano)
Sala de Aula (Padrão)	945 (21%)	Sim (Ocupação)	78 138 (12%)	83
Sala de Aula C. Computadores	90 (2%)	Sim (Ocupação)	18 850 (3%)	209
Biblioteca	135 (3%)	Sim (Ocupação)	21 666 (3%)	160
Escritório - Administração	1125 (25%)	Sim (Ocupação)	98 912 (16%)	88
Laboratório Pequeno Porte	945 (21%)	Sim (Ocupação)	171 019 (27%)	181
Laboratório Médio Porte	315 (7%)	Sim (24 Horas)	186 558 (30%)	592
Circulação	900 (20%)	Não	31 473 (5%)	35
Serviços técnicos	45 (1%)	Não	24 446 (4%)	543

Fonte: O autor

A tabela permite identificar os ambientes responsáveis pelas maiores partes do consumo. Assim os laboratórios se destacarão por ter altas densidades energéticas juntas com superfícies consequentes, apresentando por fim 57 % do consumo total. O consumo total obtido foi de 631 064 kWh ao ano. A repartição anual do consumo e a curva de carga média anual foram representado na Figura 5.1

Figura 5.1 - Repartição do Consumo anual por tipo de carga (%) (A) e Curva de carga média anual ao longo de um dia (B)



Fonte: O autor

Esta repartição varia ao longo do ano em função das condições climáticas, a carga de ar condicionado representando 44 % do consumo em janeiro cai para 9 % em junho. O consumo de ar condicionado residual sendo explicado pelo condicionamento permanente do laboratório de médio porte (ensaios Químicos).

A aplicação do método simplificado de eficiência energética permitiu determinar que a eficiência da envoltória é de classe C, e os sistemas de ar condicionado e iluminação são de classe D. Foram aplicados os quatro cenários de melhoria permitindo obter os resultados apresentados na tabela 5.3

Tabela 5.3 - Resultados dos cenários de melhoria no consumo energético e na fatura.

Cenário	Economia (kWh)	%	Economias (R\$)	%	Etiqueta
Cenário 1: Fachada branca	1 175	0,19 %	R\$ 831	0,18 %	C
Cenário 2: Ar Cond. Eficiente	22 388	3,55 %	R\$ 15 828	3,49 %	B
Cenário 3: Iluminação eficiente	54 307	8,61 %	R\$ 38 395	8,47 %	B
Cenário 4: Todas as soluções	76 793	12,17 %	R\$ 54 293	11,98 %	A

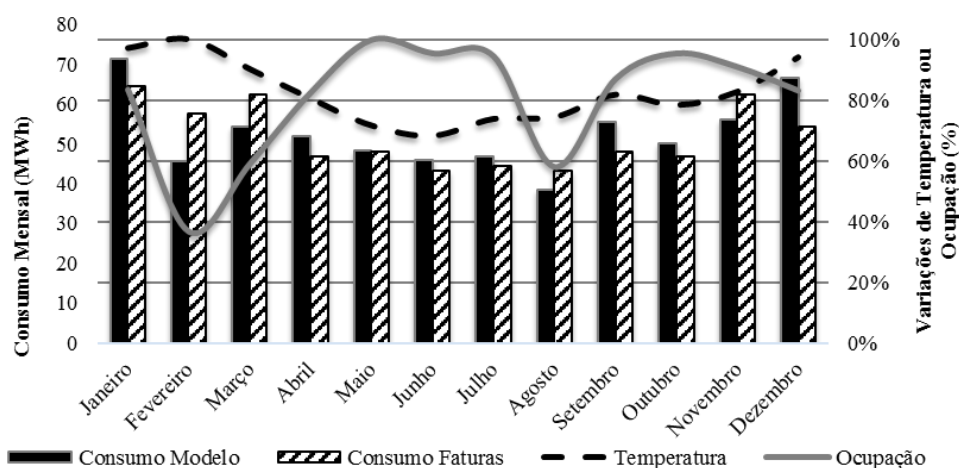
Fonte: O autor

O cálculo da economia foi realizado a partir dos preços da CEEE (tarifa em vigor o 21/12/2017) para a Tarifa VERDE A4 considerando um valor médio de ICMS/PIS/COFINS de 35%. Para a ponta o preço é de 2,206 R\$/kWh, 0,493 R\$/kWh para a energia fora da ponta e 31,092 R\$/kW para a demanda. A análise hora por hora mostrou que 87,5% do consumo é realizado em horários fora ponta, ou seja, o preço composto de energia usado foi de 0,707 R\$/kWh. A combinação das soluções 2 e 3 pode teoricamente permitir atingir o nível de eficiência máximo da etiqueta PROCEL PBE Edifica. Esta informação deve ser interpretada com muita precaução, o modelo simplificado não inclui a análise dos pré-requisitos.

### 5.1.3 Comparação com as faturas Energéticas

Foi realizada uma análise comparativa do perfil de consumo simulado e estimado a partir das faturas (7 faturas disponíveis para o ano 2017, os outros meses sendo obtidos replicando os meses simétricos, para os meses de agosto, setembro, outubro e novembro foram usados os consumos de junho, maio, abril e março, e pra dezembro foi usada a fatura de 2016). A Figura 5.2 apresenta os resultados:

Figura 5.2 - Comparação do consumo energético mensal (MWh/mês) modelado e faturado e comparação com os níveis de variação relativa de temperatura e ocupação



Fonte: o autor

A análise comparativa mostra que o modelo consegue simular de maneira muito representativa o consumo energético do prédio. O valor do consumo faturado estimado foi de 622 MWh ou seja 1% de diferença por ano. O erro quadrático médio obtido foi de 13,3%. Os erros máximos foram obtidos para os meses de fevereiro (-20,8%) e dezembro (+22,6%). A análise mês por mês também mostrou que o impacto das férias no consumo não foi tão importante como predito pelo modelo, de acordo com a análise para o mês de fevereiro. Isso pode ser explicado pelo fato que o prédio é principalmente ocupado por laboratórios não tão afetados pelas férias como salas de aula.

### 5.1.4 Análise crítica da modelagem do prédio e do modelo

A principal dificuldade de modelagem do prédio de farmácia resulte da grande quantidade de laboratórios presentes no edifício, cujos horários de funcionamento não são fiéis aos horários de ocupação do prédio. Além disso, como a carga de equipamentos pode variar muito, em função do perfil de uso de laboratório (ensaios químicos, ensaio mecânicos etc.) e as cargas podem variar drasticamente. Isso ilustra as dificuldades de encontrar indicadores gerais facilmente replicáveis para outros casos. A autoaprendizagem realizada pela realização de visitas técnicas e estudos de casos permitirá conhecer de maneira mais realística o funcionamento dos usos de prédios, tipos de laboratórios, afim de completar as bibliotecas e aumentar a eficiência da fermenta de auditoria.

A outra dificuldade encontrada é ligada a construção mesma do prédio. A grande quantidade de janelas tem um impacto no modelo, pois limite da faixa de aplicação desta técnica recomendada pela ASHRAE



(2009) para aplicar o método CLTD/CLF é atingida (O modelo foi feito para valores entorno de 30% de janelas).

A análise dos histogramas de consumo energético e das curvas de ocupação e temperatura externa mostra que a influência da ocupação não parece tão importante como o modelo parece simular. Seria interessante distinguir os períodos de férias com ocupação reduzida, e os períodos de recesso nos quais a universidade fica fechada.

## **5.2 Análise crítica do processo de auditoria**

A aplicação da metodologia de auditoria num caso prático demonstrou a capacidade da ferramenta de apoio desenvolvida a caracterizar os prédios, entrar os dados pertinentes de entrada permitindo a simulação do consumo energético e a avaliação da eficiência e do potencial de melhoria.

Mas, apesar de permitir umas liberdades de implementação, adicionando novos usos possíveis para o prédio, ou novos materiais ou tipologias, o sistema não oferece muitas liberdades para o utilizador mais experiente. A parte mais problemática concerne o uso dos horários. Contrariamente aos *softwares* de simulação como o Energy Plus, a ferramenta usa apenas um tipo de “*Schedule*”, e não permite combinar funcionamento de equipamentos ou iluminação diferentes do nível real de ocupação. A parte de soluções também não oferece outras alternativas de análise além dos quatro cenários analisados, e em particular não propõe opções de melhoria relativas a carga de equipamentos.

## **5.3 Perspectivas de uso e melhoria da Ferramenta de Auditoria Energética**

### **5.3.1 Estudos de casos e afinamentos dos parâmetros e constituir as bibliotecas**

Para que a ferramenta se torne eficiente, é necessário enriquecer as bibliotecas de dados usadas por ela, em particular descrever e qualificar os elementos construtivos realmente usados no parque de prédios da UFRGS, paredes e pisos em particular. A biblioteca de usos ou zonas também deve ser enriquecida a partir das visitas, análises e projetos académicos realizados sobre prédios da universidade. Os parâmetros de iluminação podem ser ajustados por meio de simulações em softwares como o DIALUX para obter valores mais precisos de densidade normalizada de potência de iluminação.

Estruturalmente, vários pontos de melhoria da ferramenta são possíveis. Seria interessante fornecer outros indicadores de desempenho, como densidade de consumo energético por uso (kWh/m<sup>2</sup>), assim como adicionar uma interface de comparação prédio a prédio. A Etiquetagem também deve ser melhorada, integrando a análise dos pré-requisitos e realizando a transição para a avaliação da eficiência do sistema de iluminação para o método “Volume por Volume”. Também seria interessante adicionar um módulo de cálculo da carga de aquecimento, pois vários equipamentos de condicionamento usados em escritórios são usados no ciclo reverso (inversão da função de evaporador e condensador dos trocadores dos equipamentos tipo split). Tanto BEYER 2015 como a ASHRAE 2209 propõem modelos simplificados facilmente aplicáveis.

Outra mudança estrutural pesada pode ser pertinente: Com o modelo mensal, a informação de coincidência dos dados de ocupação e dos dados climáticos é perdida. Uma transição para um passo de cálculo diário permitiria integrar este fator. Em efeito, um dia de forte calor terá um efeito diferente se o dia fosse na semana ou no fim de semana ou em período de férias. Por fim, para estabilizar a ferramenta, a criação de um software independente permitiria ganhar eficiência, rapidez de cálculo e mais segurança que o Excel.

### **5.3.2 Elementos de análise Económica e ambiental das opções de melhoria**

Na versão final apresentada neste trabalho, a ferramenta de auditoria energética apresenta somente indicadores económicos de melhoria em termo de potencial de economia na futura. Seria interessante incrementar ferramentas de análise económica mais avançadas, integrando custos de investimentos, manutenção, previsão de ajuste de tarifas, soluções de financiamento para comparar as soluções com outros elementos de análise económica como TIR, payback descontado, valor de investimento, Valor presente líquido. Para isso será necessária efetuar um trabalho de revisão de literatura para encontrar os elementos de avaliação de custo realistas. Uma análise do impacto ambiental também seria pertinente, considerando o contexto mundial de conscientização sobre problemáticas ambientais e mudanças climáticas.

### 5.3.3 Comparação do resultado simulado com uma simulação no Energy Plus

O método de modelagem energético apresentado neste trabalho foi escolhido por sua capacidade a ser implementado computacionalmente numa ferramenta de maneira a permitir a realização da simulação energética por uma pessoa não especialista em cálculos energéticos. Mas o método CLTD/CLF da ASHRAE pode ser visto como obsoleto, em comparação com os softwares de simulação termo energética atuais, como o Energy Plus por exemplo. Seria interessante avaliar e calibrar o modelo atual, realizando uma comparação com o resultado a ser obtido no Energy Plus.

Um trabalho interessante complementar poderia consistir em modelizar um conjunto de prédios representativos do parque de prédio da UFRGS no Energy Plus, e realizar uma análise paramétrica para identificar parâmetros de normalização. Isso é a ideia sugerida por muitos trabalhos (SIGNOR 1999, SANTANA 2006 por exemplo) e com objetivo de equacionar comportamentos energéticos para aplicar a estimativa a prédios similares.

## 6 CONCLUSÃO

O setor acadêmico, e em particular as universidades, devem enfrentar cada vez mais a pressão dos órgãos públicos para diminuir custos de funcionamento. De maneira geral as edificações são ineficientes, e assim contas de energia podem representar despesas consequentes. Programas de eficiência energética podem contribuir para reduzir os custos de maneira significativa, mas raramente os serviços administrativos responsáveis dispõem de informações básicas sobre o consumo energético do parque de prédios deles, permitindo identificar os alvos prioritários para implementação de projetos de melhoria.

Antes mesmo da implementação de um projeto, é necessário realizar uma auditoria energética, e antes mesma desta etapa, uma auditoria preliminar rápida que permite identificar uma primeira seleção de alvos. O Objetivo deste trabalho foi exatamente elaborar uma metodologia de auditoria para realizar esta etapa preliminar. Foi adotada uma abordagem de análise de um prédio volume por volume. Uma biblioteca de ambientes foi elaborada, reunindo valores de ocupação, iluminação, equipamentos e padrão de funcionamento do Ar condicionado. Uma geometria simples foi selecionada para aplicar o método ASHRAE CLTD/CLF para avaliar a carga térmica de condicionamento do prédio. Para determinação das propriedades físicas de materiais constituindo os parâmetros do modelo CLTD, também foi documentada uma biblioteca.

Para ligar os elementos e garantir a realização das etapas da metodologia elaborada, foi desenvolvida uma ferramenta permitindo realizar a apreensão das entradas do modelo, e por meio das bibliotecas e das equações escolhidas, simular o consumo energético, descrevê-lo através de vários indicadores, calcular uma etiqueta de eficiência simplificada, testar um conjunto de soluções de melhoria para avaliar um potencial de melhoria. A realização de um estudo de caso no prédio da Farmácia da UFRGS permitiu validar a facilidade de aplicação da metodologia de auditoria, e a capacidade da ferramenta a realizar a simulação e apresentar resultados, e fornecer indicadores e elementos de análise do potencial de economias. Este exemplo prático permitiu mostrar que a metodologia respondeu aos objetivos principais do trabalho, ou seja, realizar uma avaliação do consumo energético, da eficiência e do potencial de economias de um prédio a partir de dados básicos facilmente acessíveis.

Os resultados foram positivos, mas para ser totalmente funcional e mais eficiente, será necessário analisar novos casos, que além de permitir avaliar o modelo de simulação, permitirão enriquecer as bibliotecas. Existem vários pontos de melhoria, integrando mais funcionalidades e elementos de análise comparativa de prédios, mas na sua versão atual, a ferramenta já permite realizar auditorias energéticas preliminares e assim trazer uma resposta ao problema inicial, oferecendo aos serviços da universidade, mais um elemento de avaliação energética, e mais uma ferramenta ao serviço de futuros projetos de eficiência energética.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 5413. **Illuminância de interiores**. Janeiro, 1992.
- APOGEE. **Revue pratique des logiciels de simulation énergétique dynamique. (Revista Prática dos softwares de simulação energéticas dinâmicas)**. Groupe de travail APOGEE sur la garantie de performance énergétique intrinsèque. Paris, 2015
- ASHRAE, AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Handbook of Fundamentals**. Atlanta, 2009.
- ASHRAE, AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Handbook of Fundamentals**. Atlanta, 1989.
- ASHRAE, AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Procedures for Commercial Building Energy Audits**, 2ª edição. Atlanta, 2011. ISBN-13: 978-1936504091
- BENAVIDES, J.R.R. **A auditoria energética como ferramenta para o aproveitamento do potencial de conservação da energia: o caso das edificações do setor educacional**. 2014. Dissertação – (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Energia, Instituto de energia e ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014
- BEYER P. O. **Climatização e Refrigeração**. 2015. Apostila da disciplina “Climatização II”, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. **RTQ-C : Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Pública**. Portaria nº372/2010.
- LABEEE, ORDENES, *et al.* **Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e componentes construtivos brasileiros para simulações no visualdoe-3.1**. LABEEE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003
- LEE, A.S. WESTPHAL, F.S. LAMBERTS, R. **Verificação da eficiência energética de um edifício de escritórios através de simulação computacional: estudo de caso no departamento de engenharia civil da UFSC**. LABEEE Universidade Federal de Santa Catarina. In: VI Encontro Nacional sobre conforto no Ambiente Construído, São Pedro, SP, Brasil, novembro de 2001
- MELO, A.P. **Desenvolvimento de um modelo simplificado para estimar o consumo de energia de edificações comerciais através da aplicação de redes neurais**. 2012. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA **Guia prático: conceitos e ferramentas de gestão e auditoria energéticas**. 1ª edição. Brasília. 2015. 80 p. ISBN 978-85-7738-251-4
- NETO, A. H. **Carga Térmica – Definições**. 2017, PME 2515 - Ar Condicionado e Ventilação, Brasil, 2017
- PEREIRA, F. LAMBERTS, R. and MARINOSKI, D. L. **Determinação do Fator Solar em vidros e elementos de sombreamento para janelas**. 2010. Projeto de Iniciação Científica, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010
- SANTANA, M.V. **Influência de parâmetros construtivos no consumo de energia de edifícios de escritório localizados em Florianópolis – SC**. 2006. Dissertação de Mestrado, , Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006
- SIGNOR, R. **Análise de regressão do consumo de energia elétrica frente a variáveis arquitetônicas para edifícios comerciais climatizados em 14 capitais brasileiras**. 1999. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999
- SPITLER, J. D. and BERKETT A. N. **Refinements and improvements to the Radiant Time Series Method**. 2010, ASHRAE Transactions, vol. 116, no. 1, p. 542+, 2010.

## APÊNDICE A: ANÁLISE ESTATÍSTICA BOX-BEHNKEN DESIGN

Em razão das limitações do software em termo de número de parâmetros a ser analisados (o número de combinações sendo exponencial), foi necessária realizar umas simplificações nas liberdades de parâmetros na entrada. Foram selecionados apenas 10 parâmetros construtivos, e alguns deles foram reunidos, por exemplo no caso de parâmetros variáveis em função das paredes. Uma primeira análise foi realizada usando as variáveis seguintes, para um prédio padrão simplificado de 2000 m<sup>2</sup>, orientado pelo Norte, com uma fachada principal de 35m, 5 andares para o mês de janeiro:

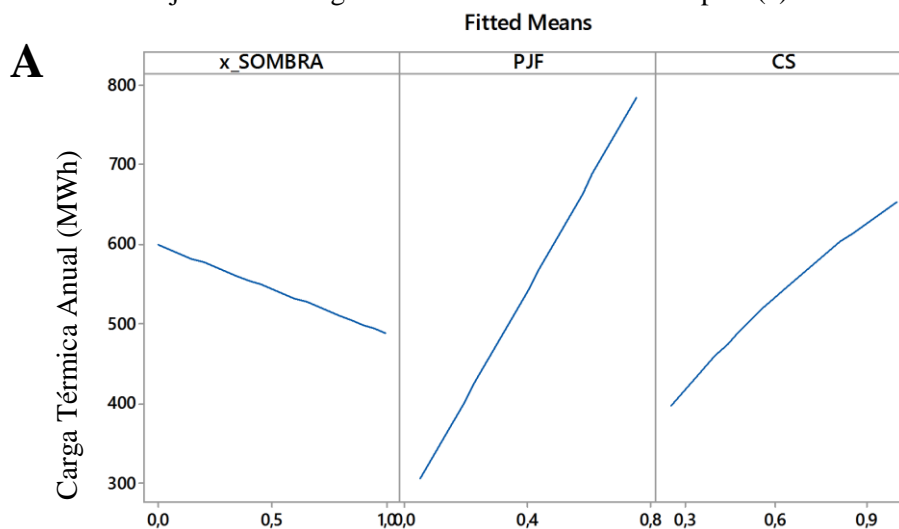
Tabela A.1 - Parâmetros de análise *Box-Behnken Design*

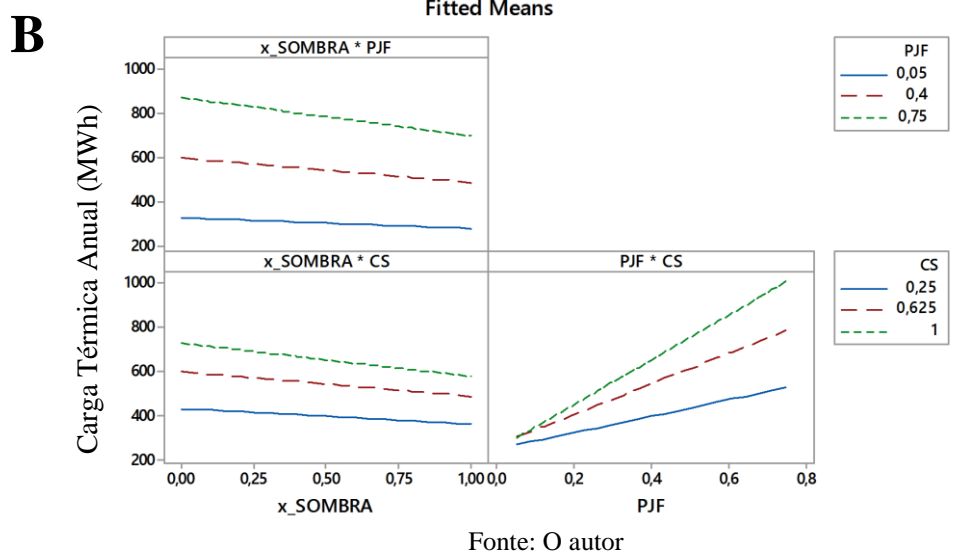
	% sombra	Classe Forro	Cor Forro	PJF	CS	U Parede Ext	Cor Parede Ext	Grupo Parede Ext	U Parede Int	U Piso
Máx	0	4	0,5	0,05	0,25	0,5	0,5	1	0,5	0,5
Mín	1	16	1	0,75	1	4	1	7	4	3

Fonte: O autor

Os parâmetros de porcentagem de sombra, porcentagem de janelas e coeficiente de sombra usados nesta análise são dados simplificados aplicados de maneira igual as quatro fachadas. O forro é classificado do mais leve ao mais pesado e as paredes externas das mais pesadas as mais leves. Os valores de consumo resultante servem apenas a avaliar a influência destes parâmetros e não pretendem representar qualquer realidade. A análise dos resultados mostrou que os fatores que influenciam mais o consumo final caracterizam as janelas. A Figura A.1 apresenta resultados relativos aos três parâmetros qualificando as janelas.

Figura A.1 - Análise da influência do sombreamento, da porcentagem de janelas e das proteções internas de janelas na carga térmica externa. Análise simples (a) e combinada (b).





Os gráficos precedentes mostram que os comportamentos que a inclinação da curva do consumo em função do PJF é a mais importante dos parâmetros analisados (Fig. A.1.A), e é a configuração que consegue atingir o maior valor de consumo. A análise combinada (Fig. A.1.B) mostra que a presença de sombreamento interno (Vidro eficiente, Cortinas) ou externo (brises, árvores) permitem atenuar a capacidade do PJF a aumentar o consumo, ou no caso oposto a aumentar o efeito. Foi concluído que uma ênfase na definição das janelas é fundamental, não somente na definição da porcentagem de abertura, mas também na descrição dos elementos de proteção e sombreamento, o que justifica o nível de detalhamento deste elemento construtivo para determinação dos parâmetros.

## APÊNDICE B: PROCESSO DE CÁLCULO DA CARGA SOLAR TÉRMICA

### # ETAPA 0: Obtenção dos parâmetros intermediários

- 1. Parâmetros climáticos, temporais e geográficos
  - a. Temperaturas máximas, mínimas, de conforto
  - b. Velocidade do vento
  - c. Mês e latitude
- 1. Superfícies (m<sup>2</sup>)
  - a. Fração de volume condicionado
  - b. Porcentagem de janelas e fração de sombreamento por fachada
  - c. Superfícies de paredes/janelas para cada fachada, orientação, sol e sombra, multiplicado pela fração de volume condicionado
  - d. Superfícies internas com ambiente não condicionado (paredes e pisos intermediários)
- 2. Transmitâncias (W/m<sup>2</sup>. °C)
  - a. Paredes e forros (Predeterminado): função das topologias ou elementos construtivos selecionados
  - b. Janelas: (Calculado): função do vento, esquadria, proteções internas e externas
- 3. Fatores de correção
  - a. Paredes externas: função da cor
  - b. Forro: função da cor, da presença de rebaixamento e da presença de ventilação forçada
  - b. Janelas: coeficientes de sombra (vidro e proteção interna)

### # ETAPA 1: Cálculo das cargas de Resfriamento

- 1. Temperaturas – Valor horário
  - a. Temperatura externa horaria em função dos dados climáticos e da curva padrão de variação diária
  - b. Temperatura dos ambientes não condicionados
  - c. Temperatura externa corrigida em função da temperatura de conforto selecionada (CTIE)
- 2. Diferença de Temperatura da carga de Resfriamento (DTCR) e Fator de Carga de Resfriamento (FCR) - Valor horário.
  - a. Forro: função do grupo
  - b. Paredes Externas: função do grupo, da orientação e do sombreamento
  - c. Janelas, parte radiativa: Fator de Carga de Resfriamento, depende da orientação, sombreamento e presença de proteção interna
- 3. Correções para o Mês e Latitude – Valor Mensal
  - a. DTCR: função do mês, latitude, orientação e sombreamento
  - b. FCR: valor do fator de Ganho de calor solar (FGCS) função do mês, latitude, orientação, sombreamento externo

### # ETAPA 2: Aplicação das equações

- 1. Para cada superfície, orientação, fração ensolarada ou na sombra, convectiva e radiativa.
- 2. Somatório hora por hora.
- 3. Obter o perfil de carga térmica para resfriar o volume condicionado

**APÊNDICE C: PROCESSO CÁLCULO DO CONSUMO ANUAL****# ETAPA PRELIMINAR: Selecionar os elementos de Entrada predefinidos**

- 1. Parâmetros construtivos, materiais, Superfícies, Temperaturas de conforto
- 2. Seleção dos usos selecionados (tipo e %), junto com as densidades (ocupação, iluminação, equipamentos)
- 3. Seleção dos dados mensais (Temperaturas, Vento, número de dias uteis, sábados, domingos, férias)

**# LOOP nos 12 meses do ano considerado**

- 1. Calcular o perfil horário de temperatura externa e da quantidade de umidade do ar
- 2. Calcular o perfil horário de carga térmica externa para o Volume Condicionado
- 3. Calcular o perfil horário integrado de ocupação para o mês considerado (Schedule de cada categoria de dias multiplicados pelo número de dias de cada categoria + Número de horas do mês)

**# LOOP para todos os usos identificados do prédio em estudo**

- 1. Recuperar a superfície e as densidades de iluminação, ocupação, equipamentos (parte variável e offset)
- 2. Calcular o consumo energético mensal de iluminação aplicando a eficiência de iluminação (kWh/faixa horaria)
- 3. Calcular o consumo energético mensal de equipamentos (kWh/faixa horaria)
- 4. Calcular o consumo energético mensal de ar condicionado (kWh/faixa horaria)

# LOOP para cada hora do dia

# SE Ar Condicionado permanente usar o valor total de horas

# SENÃO usar perfil de ocupação integrado e verificar se Temperatura externa < Setpoint Ar condicionado

- a. Ganho térmico de pessoas
- b. Ganho térmico de Ar de renovação (Sensível e latente)
- c. Ganho térmico de iluminação
- d. Ganho térmico de equipamentos
- e. Ganho térmico externo (Ganho solar) aplicando a fração do volume condicionado ocupado
- f. Ganho térmico do moto ventilador (1/23 da carga parcial)
- g. Calcular o ganho térmico total (kWh/faixa horaria)
- h. Calcular o consumo energético mensal elétrico de Ar condicionado, aplicando o COP (kWh/faixa horaria)

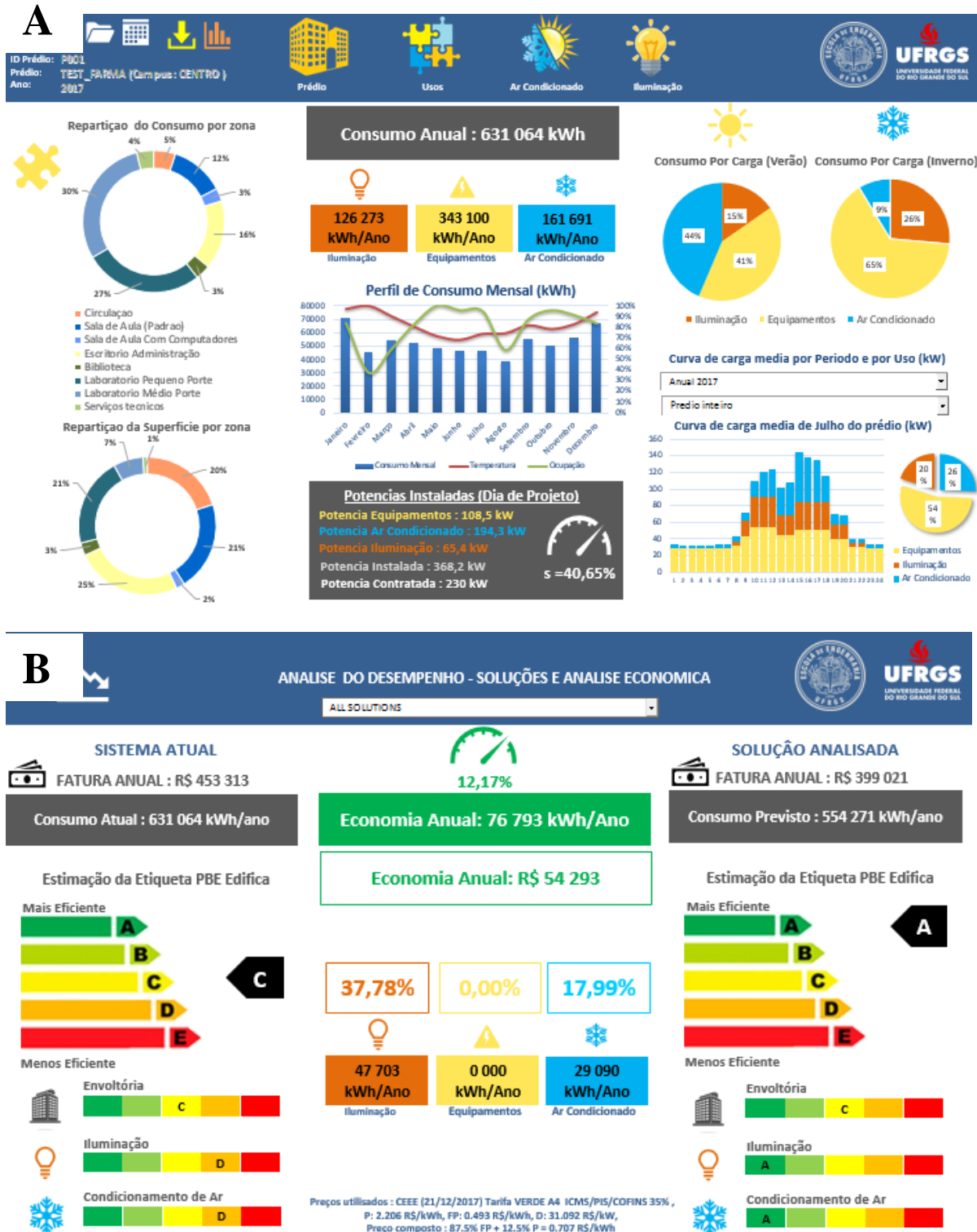
- 5. Calcular o consumo energético mensal total (kWh/faixa horaria)

**# END LOOP usos**

**# END LOOP mês**

APÊNDICE D: FERRAMENTA DE AUDITORIA ENERGÉTICA

Figura A.2 Interface principal de comandos da auditoria e visualização dos resultados de consumo energético (a) e de análise do desempenho e das soluções de melhoria (b).



Fonte: o autor



## ANEXO A: EQUACIONAMENTO ASHRAE CLTD/CLF

BEYER 2015 apresentou a metodologia de cálculo da carga de refrigeração baseada no método ASHRAE LCTD/CLF, adaptado para o clima brasileiro. A metodologia aplicada consiste em determinar os ganhos de calor em paredes, cobertura, fachadas, piso, janelas, para cada hora ou dia do ano, em função de dados construtivos (parâmetros arquitetônicos), de conforto térmico e meteorológicos. As equações usadas para cada elemento estão apresentadas abaixo:

- **Coberturas**

$$\dot{Q}_{cob} = U_{cob} \cdot A_{cob} \Delta t_{cob} \quad (A.1)$$

$$\Delta t_{cob} = [(DTCR + LM)K_{cob} + CTIE]f \quad (A.2)$$

$$CTIE = (25,5 - t_{conforto}) + (\overline{t_{ext}} - 29,5) \quad (A.3)$$

$$\overline{t_{ext}} = tbs_{max} - \frac{VD}{2} \quad (A.4)$$

- **Paredes Externas**

$$\dot{Q}_{fach} = U_{fach} \cdot A_{fach} \Delta t_{fach} \quad (A.5)$$

$$\Delta t_{fach} = [(DTCR + LM)K_{fach} + CTIE] \quad (A.6)$$

- **Janelas**

$$\dot{Q}_{J_{conducao}} = U_J \cdot A_J (t_{EH} - t_i) \quad (A.7)$$

$$\dot{Q}_{radiao} = FGCS \cdot A_J \cdot CS \cdot FCR \quad (A.8)$$

$$t_{EH} = tbs_{max} - PVD \cdot VD \quad (A.9)$$

$$U_J = (C + Bu)F_a \quad (A.10)$$

- **Ar de Renovação**

$$\dot{Q}_{ES} = 1,2 \dot{V} (t_{EH} - t_i) \quad (A.11)$$

$$\dot{Q}_{EL} = 3 \dot{V} (F_E - F_i) \quad (A.12)$$

- **Superfícies internas**

$$\dot{Q}_{SI} = UA (t_{ANC} - t_i) \quad (A.13)$$

$$t_{ANC} = tbs_{EXT} - 3 \quad (A.14)$$

$$t_{ANC} = (tbs_{EXT} - 3) - (PVD(VD - 6)) \quad (A.15)$$

Além destes elementos, tem que considerar as cargas térmicas dos equipamentos, e da iluminação para determinar o ganho total de calor em W, ou seja, a carga térmica de refrigeração necessária.

As tabelas fornecendo os valores dos parâmetros  $DTCR$ ,  $LM$ ,  $PVD$ ,  $FGCS$ ,  $CS$ ,  $FCR$  estão disponíveis em BEYER 2015 ou em ASHRAE 1989.

## ANEXO B: EQUACIONAMENTO ETIQUETAGEM ENERGETICA

Para avaliar a eficiência energética do prédio, o RTQ-C estabelece um conjunto de equações permitindo calcular um número de pontos PT entre 0 e 5. Em função deste valor determina-se a classe energética do prédio de acordo com a tabela 1.

Tabela A.2 - Classificação geral de Etiquetagem

Pontuação (PT)	$\geq 4,5$ a 5	$\geq 3,5$ a $< 4,5$	$\geq 2,5$ a $< 3,5$	$\geq 1,5$ a $< 2,5$	$< 1,5$
Classificação geral	A	B	C	D	E

Fonte: O autor, baseada em RTQ-C

O valor PT é decomposto em três componentes, com pesos diferentes: 30% para a envoltória e a iluminação, e 40% para o sistema de Ar condicionado. As grandezas usadas na Equação de classificação são as seguintes:

$EqNumEnv$	Equivalente numérico da envoltória
$EqNumDPI$	Equivalente numérico de iluminação
$EqNumCA$	Equivalente numérico de condicionamento do Ar
$EqNumV$	Equivalente numérico de ambientes não climatizados
$APT$	Área útil de ambiente de permanência transitória não climatizados
$ANC$	Área útil de ambientes de permanência permanente não climatizados
$AC$	Área útil de ambientes de permanência permanente climatizados
$AU$	Área útil
$b$	Pontuação de bonificação entre 0 e 1

Os números equivalentes de iluminação, e do ar condicionado correspondem as características dos equipamentos (nível A = 5 pontos, nível E = 1 ponto). O índice da envoltória é obtido a partir de uma regressão linear dependendo dos parâmetros arquitetônicos, da superfície e da zona bioclimática do edifício, definida pelo RTQ-C. A equação geral de PT é dada pela equação 3, obtida pelas tres componentes definidas precedentemente, ponderadas em função das superfícies apresentas precedentemente, e descritas nas equações A.1, A.2, A.3 e A.4

$$E_{envoltoria} = EqNumEnv \cdot \frac{AC}{AU} + \frac{APT}{AU} \cdot 5 + \frac{ANC}{AU} EqNumV \quad (A.16)$$

$$E_{iluminação} = EqNumDPI \quad (A.17)$$

$$E_{ArCondicionado} = EqNumCA \cdot \frac{AC}{AU} + \frac{APT}{AU} \cdot 5 + \frac{ANC}{AU} EqNumV \quad (A.18)$$

$$PT = 0,30 E_{envoltoria} + 0,3 E_{iluminação} + 0,4 E_{ArCondicionado} + b_0^1 \quad (A.19)$$

Fonte: RTQ-C