

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo



Dissertação

**Influência do Comportamento do Usuário no Consumo de Energia em um
Prédio de Ensino Público na Zona Bioclimática 2**

Douglas Roschmidt Hax

Pelotas, 2020

Douglas Roschmidt Hax

**Influência do Comportamento do Usuário no Consumo de Energia em um
Prédio de Ensino Público na Zona Bioclimática 2**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo do Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Antonio César Silveira Baptista da Silva

Pelotas, 2020

RESUMO

HAX, Douglas Roschmidt. **Influência do Comportamento do Usuário no Consumo de Energia em um Prédio de Ensino Público na Zona Bioclimática 2**. Orientador: Antonio César Silveira Baptista da Silva. 2020. 93 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

Diante do elevado consumo energético em edifícios de ensino público, torna-se necessário entender o comportamento e o papel do usuário no desempenho energético das edificações. Este trabalho busca identificar a influência do usuário no desempenho energético de edificação pública de ensino. Foram criados três padrões de comportamento: ativo, intermediário e passivo. O usuário ativo busca o uso da luz natural, utilizando o sombreamento solar passivo e a integração da ventilação natural à artificial. O usuário intermediário não busca a integração da iluminação natural com a artificial, utiliza a ventilação híbrida como estratégia de ventilação. O usuário passivo não faz uso de nenhuma estratégia passiva, tanto para ventilação quanto para iluminação natural, neste caso, utiliza predominantemente o condicionamento artificial. Além disso, este usuário ajusta o setpoint da temperatura de resfriamento e aquecimento para valores fora das normativas. Além dos usuários, foi elaborado um modelo de edifício automatizado, no qual ocorre a integração da iluminação e da ventilação natural com a artificial, além do controle do dispositivo de sombreamento interno. As simulações energéticas foram realizadas no programa EnergyPlus com o arquivo climático de Pelotas-RS. A interação entre o sistema de condicionamento artificial e a ventilação natural foi controlada por meio do Energy Management System (EMS) e do componente de ventilação híbrida do EnergyPlus. A influência do comportamento do usuário foi analisada por meio do consumo de energia elétrica total, condicionamento e iluminação artificial durante o período de ocupação. Os resultados mostraram que os usuários do edifício situam-se entre o intermediário e o passivo, com tendência ao intermediário. O padrão de uso passivo dos sistemas pelos usuários pode ser visto como um potencial de intervenção e educação, com incentivos ao uso eficiente de energia. Assim, há um indicador do potencial de economia de energia. A automação do edifício representa um maior investimento, 259% ou duas e meia vezes. Comparado com o investimento de geração solar FV, pode-se prever uma menor relação custo benefício para a automação do que para a geração de energia FV.

Palavras-chave: Simulação computacional. consumo de energia. comportamento de usuário.

ABSTRACT

HAX, Douglas Roschmidt. **Influence of user behavior on energy consumption in a public school building in Brazilian Bioclimatic Zone 2.** Advisor: Antonio César Silveira Baptista da Silva. 2020. 93 f. Dissertation (Masters in Architecture and Urbanism) – College of Architecture and Urbanism, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2020.

In view of the high energy consumption in public education buildings, it is necessary to understand the user's behavior and role in the energy performance of buildings. This work seeks to identify the user's influence on the energy performance of public education buildings. Three patterns of behavior were created: active, intermediate and passive. The active one aims the integration of natural and artificial lighting using passive solar shading and natural ventilation. The intermediate one does not seek the integration of natural and artificial lighting, but uses hybrid ventilation as a ventilation strategy. The passive user does not use any passive strategy. This profile uses artificial conditioning and keeps the blinds fully open. In addition, this user adjusts the setpoint of the cooling and heating temperature to values outside the norms. Aiming to investigate the impact of users' behavior, this work developed an automated model of the building. This model uses the integration of natural and artificial lighting and ventilation, as well the control of an internal shading device was developed. The energy simulations were performed using EnergyPlus tool with the climate data of Pelotas-RS. The interaction between the artificial conditioning system and natural ventilation was controlled through the Energy Management System (EMS) and the EnergyPlus hybrid ventilation component. The influence of user behavior was analyzed through energy consumption for conditioning and artificial lighting during the occupation period. The results showed that the users of the building are located between the intermediate and the passive, with a tendency to the intermediate. The pattern of passive use of systems by users can be seen as a potential for intervention and education, with incentives for efficient energy use. Thus, there is an indicator of the potential for energy savings. Building automation represents a major investment, 259% or two and a half times. Compared with the investment in solar PV generation, it is possible to predict a lower cost-benefit ratio for automation than for PV energy generation.

Keywords: Computer simulation. energy consumption. user behavior.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Benefícios da Eficiência Energética (SE4ALL, 2014)	16
Figura 2	Frequência das temperaturas de acionamento do sistema artificial de ar.	24
Figura 3	Limites da zona de conforto da ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013)	31
Figura 4	Economia gerada com o PROBEN.	35
Figura 5	Consumo geral da UFPEL.	36
Figura 6	Fluxograma do método proposto.	40
Figura 7	Vista aérea do CEARTE - Centro de Artes UFPEL.	41
Figura 8	Vista da fachada Leste do edifício (Google Earth).	41
Figura 9	Registro fotográfico de salas de aula.	44
Figura 10	Registro fotográfico de laboratórios digitais.	45
Figura 11	Registro fotográfico das aberturas.	45
Figura 12	Modelo computacional no programa SketchUp.	46
Figura 13	Planta baixa do terceiro pavimento (PROPLAN).	47
Figura 14	Fotos do Sistema de iluminação.	48
Figura 15	Fotos do equipamento de ar condicionado.	48
Figura 16	Perspectiva do edifício e o entorno.	49
Figura 17	Processo de Ventilação Seletiva (SORGATO, 2015)	51
Figura 18	Controle de integração da ventilação natural e do sistema de condicionamento artificial (Adaptado de Sorgato (2015)).	52
Figura 19	Detalhes do edifício automatizado.	53
Figura 20	Fluxograma do usuário ativo.	54
Figura 21	Detalhes do usuário ativo.	55
Figura 22	Fluxograma do usuário intermediário.	56
Figura 23	Detalhes do usuário intermediário.	56
Figura 24	Fluxograma do usuário passivo.	57
Figura 25	Detalhes do usuário passivo.	58
Figura 26	Comparação de consumos Cearte e simulação.	63
Figura 27	Distribuição do consumo de energia por uso final.	64
Figura 28	Matriz desagregada de consumo de energia do modelo final.	65
Figura 29	Duas zonas de iluminação controladas independentemente, cada com 50% da área da zona térmica.	67
Figura 30	Consumo anual do Sistema de Condicionamento Artificial.	72
Figura 31	Consumo anual do sistema artificial de iluminação.	74
Figura 32	Consumo de energia elétrica total dos usuários e da automação.	75

Figura 33 Uso da ventilação natural e condicionamento artificial. 76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas(ABNT, 2005)	42
Tabela 2	Estratégias de condicionamento térmico passivo (ABNT, 2005)	42
Tabela 3	Propriedades ópticas do vidro.	58
Tabela 4	Cargas térmicas dos modelos simulados.	60
Tabela 5	Lista das Evidências Coletadas.	61
Tabela 6	Revisão das Versões.	62
Tabela 7	Indicadores de qualidade para diferentes normas (SILVA, 2018)	62
Tabela 8	Especificação dos parâmetros adotados na modelagem.	66
Tabela 9	Detalhes da modelagem do sistema de condicionamento artificial	68
Tabela 10	Temperaturas do solo.	69
Tabela 11	Características elétricas do módulo. Canadian Solar.	77
Tabela 12	Geração, consumo e compensação de energia elétrica.	78
Tabela 13	Estimativa de geração e consumo de energia anual.	78
Tabela 14	Valores obtidos pelos orçamentos de empresa de Pelotas e de outro estado.	79
Tabela 15	Custos da geração FV para o caso base,usuário ativo e automatizado.	80

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Justificativa	14
1.2 Objetivos	18
1.3 Objeto da Pesquisa	18
1.4 Estrutura do Trabalho	18
2 CONCEITOS E REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1 Iluminação natural	20
2.2 A influência do comportamento do Usuário no consumo de energia	23
2.3 Dispositivos de Sombreamento Interno	28
2.4 Geração de Energia Solar Fotovoltaica	30
2.5 Normas de Conforto Térmico	31
2.6 Ferramentas de Simulação Computacional	32
2.7 Recursos de controle avançado em simulação termoenergética	33
2.8 Programa do Bom Uso Energético (PROBEN)	34
2.9 Síntese da revisão de literatura	36
3 MÉTODO	39
3.1 Caracterização do Edifício	40
3.2 Características do Clima de Pelotas	42
3.3 Pesquisa Observacional	43
3.3.1 Levantamento de informações sobre a edificação	43
3.4 Modelagem Computacional	45
3.5 Identificação dos Ambientes Internos	47
3.5.1 Sistema de Iluminação	48
3.5.2 Equipamentos Elétricos	48
3.5.3 Sistema de Condicionamento Artificial	48
3.6 Geração de Energia Solar Fotovoltaica (FV)	49
3.7 Comportamento do Usuário e Automação	50
3.7.1 Automação	50
3.7.2 Comportamento do Usuário Ativo	53
3.7.3 Comportamento do Usuário Intermediário	55
3.7.4 Comportamento do Usuário Passivo	56
3.8 Propriedades Térmicas dos componentes da envoltória	58
3.9 Simulação do Desempenho Energético	59
3.9.1 Estratégias de configuração do Energy Management System (EMS)	59
3.9.2 Padrão de ocupação, equipamentos e iluminação artificial	59

3.9.3	Calibração da simulação do consumo de energia elétrica	60
3.9.4	Preparação para a calibração	60
3.9.5	Ajuste baseado em evidências	61
3.9.6	Consumo de Energia Real e Simulado	62
3.9.7	Modelagem da Ventilação Natural	65
3.9.8	Integração da iluminação natural e artificial	66
3.10	Modelagem do sistema de condicionamento artificial	67
3.10.1	Configuração de temperatura do solo	68
3.10.2	Modelagem do dispositivo de sombreamento das aberturas	69
3.10.3	Modelagem com ventilação Híbrida	69
3.11	Controle da integração da ventilação natural e sistema de condicionamento artificial	70
4	RESULTADOS OBTIDOS	72
4.1	Análise dos resultados das simulações	72
4.1.1	Análise do consumo do sistema de condicionamento artificial	72
4.1.2	Análise do consumo de energia da iluminação artificial dos usuários e da automação	74
4.1.3	Análise dos consumos totais dos usuários e da automação	75
4.1.4	Análise do uso do condicionamento artificial e natural	75
4.1.5	Análise de geração FV	77
4.2	Viabilidade Econômica	78
5	CONCLUSÕES	81
5.1	Limitações do Trabalho	83
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	83
REFERÊNCIAS		84
APÊNDICE A	DENSIDADES DE POTÊNCIA PARA ILUMINAÇÃO E EQUIPAMENTOS NOS AMBIENTES DE PERMANÊNCIA PROLONGADA	92

1 INTRODUÇÃO

A busca por soluções sustentáveis com o mínimo impacto ao meio ambiente tornou-se uma prioridade para o planeta. A produção de energia é responsável por 57% do efeito estufa e, conforme o Protocolo de Quioto, 79% das ações que visam reduzir a emissão mundial de gases envolvem o uso da energia. Desta forma, nos últimos anos, as preocupações relacionadas com a eficiência energética tomaram uma relevância significativa, tanto com relação aos aspectos ambientais quanto aos econômicos. A União Européia impôs objetivos energéticos e climáticos para 2020, 2030 e 2050. Os objetivos para 2020 são: 20% de redução, pelo menos, das emissões de gases com efeito de estufa relativamente aos níveis de 1990; 20% da energia obtida a partir de fontes renováveis; 20% de melhoria da eficiência energética. Com relação a 2030 o objetivo é reduzir 40% das emissões de gases com efeito de estufa e 30% de aumento da eficiência energética (ANEEL, 2017). Portanto, a implantação da melhoria da eficiência energética no setor público apresenta-se como uma das alternativas para reduzir as emissões de gases com efeito estufa. No Brasil, estão sendo aplicados alguns sistemas de etiquetagem de eficiência energética e sustentabilidade em edificações, sendo o PBE-Edifica obrigatório para edificações públicas federais, novas ou que passe por retrofit (IN nº2/2014). O Balanço Energético Nacional, ano base de 2016, indica que 21,4% do consumo de energia elétrica no País é proveniente dos edifícios residenciais e 7% proveniente do setor público e comercial 14,4%, englobando os edifícios (EPE, 2017).

Segundo o relatório de resultados do Programa Nacional de conservação de energia elétrica, ano 2016, estimava-se uma economia de energia de 15 bilhões de GWh, o que equivale a 3,29% da energia consumida no País (PROCEL, 2017). Esta quantidade de energia é suficiente para atender, durante um ano, a mais de 7,8 milhões de residências com o padrão de consumo médio brasileiro. Essa energia economizada evitou que 1,238 milhão tCO₂¹ equivalentes fossem liberadas na atmosfera. Os

¹Utilizou-se o fator de emissão médio de CO₂ equivalente disponibilizado em <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html> para o ano de 2016. Esse fator tem como objetivo estimar a emissão de CO₂ equivalente associada a uma geração de energia elétrica determinada.

resultados energéticos atingidos pelas ações contribuem para a eficiência dos bens e serviços, bem como possibilitam a postergação de investimentos no setor elétrico, reduzindo os impactos ambientais. Estas edificações, apesar de apresentarem grande potencial de economia de energia, não necessariamente refletem esse potencial em economia efetiva.

O desempenho térmico e energético das edificações é influenciado por vários fatores, como: características arquitetônicas; propriedades termofísicas da envoltória; orientação; equipamentos; sistema de iluminação, ventilação e de condicionamento artificial; dispositivos de sombreamento e condições externas do clima (SORGATO, 2015).

Diante dessa situação surge a necessidade de se estudar estratégias que possam ser empregadas visando melhorar o desempenho energético de uma edificação. Dentre essas estratégias se destacam o uso da iluminação natural integrada à iluminação artificial e da ventilação natural como forma de reduzir a carga térmica da edificação e, consequentemente, o consumo em sistemas de ar condicionado (RUPP; GHISI, 2013).

Além dos fatores supracitados, há também o papel fundamental do comportamento do usuário no desempenho térmico e energético das edificações, que através da presença e das interações com os sistemas de iluminação, ventilação, condicionamento artificial, controle de aberturas das janelas e com os dispositivos de sombreamento das janelas impactam no desempenho da edificação (FABI et al., 2012).

Segundo Ackerly e Brager (2013), um usuário ativo, que participa do controle ambiental de uma edificação e, principalmente, se consideradas as edificações mistas, o faz por meio da abertura de janelas, manutenção dos elementos de sombreamento, liga ou desliga os sistemas de refrigeração, aquecimento e iluminação artificial. Para algumas edificações, o comportamento do usuário pode apresentar maiores impactos que a envoltória da edificação (SORGATO, 2015). Há resultados de estudos recentes que associam negativamente o ar condicionado a uma espécie de vício despertado pela memória térmica de seus usuários. Assim, quanto mais uma pessoa é exposta ao condicionamento artificial, maior é o seu desejo de permanecer nestes espaços, e maior a sua intolerância às temperaturas mais altas (ROAF et al., 2010), (CÂNDIDO et al., 2010) e (DE VECCHI; CÂNDIDO; LAMBERTS, 2012).

As interações com os elementos internos de sombreamento configuram grande potencial de otimização de consumo. Estudos têm mostrado os padrões de interação dos usuários com elementos de sombreamento e/ou seus impactos no desempenho energético de edificações. Wymelenberg (2012) afirma que, apesar de não haver um consenso sobre os motivos que acarretam a interação dos usuários com os elementos de sombreamento, sabe-se que é necessário mais precisão nas previsões de consumo em edificações. Afinal, a posição e operação dos elementos de sombreamento

afetam os níveis de luz natural e transferência de calor para o interior e ambos influenciam no desempenho energético do edifício. Edificações que possuem horário de funcionamento diurno, aproveitar a luz natural no ambiente de forma correta é imprescindível para a obtenção de edificações energeticamente mais eficientes. Entretanto, um elemento de sombreamento interno é ajustado – ou não – pelos ocupantes do ambiente e, deste modo, sua influência no desempenho energético de edificações pode ser variável (BAVARESCO, 2016).

Para edificações que adotam estratégias passivas, como ventilação natural ou aquecimento solar passivo, as ações dos usuários são importantes para proporcionar condições aceitáveis de conforto térmico nos ambientes. A ventilação natural nas edificações tem função importante, tais como garantir a qualidade do ar e proporcionar conforto térmico aos usuários, quando as condições do clima externo forem favoráveis (SORGATO, 2015).

Uma forma de redução dos gastos com sistemas de resfriamento é a utilização de ventilação híbrida ou modo misto de ventilação. A estratégia de ventilação híbrida refere-se a uma abordagem híbrida para o condicionamento do espaço que utiliza uma combinação de ventilação natural das janelas operáveis (manual ou automaticamente controladas) e sistemas mecânicos, que incluem equipamentos de distribuição e refrigeração de ar. Portanto, com a utilização dessa estratégia há a integração do uso de ar condicionado e o uso da ventilação natural. São medidas que visam maximizar o conforto, evitar o uso significativo de energia e reduzir os custos operacionais com o ar condicionado ao longo do ano (BRAGER, 2006), (BRAGER; BORGESON; LEE, 2007), (BRAGER; BAKER, 2008) e (EMMERICH, 2006).

No Brasil, estudos como o de Benedetto (2007), Marcondes et al. (2010), Rupp e Ghisi (2013), Debiase (2016) e Pereira (2019), demonstram que as edificações com ventilação híbrida apresentam economia de energia quando comparadas com as edificações convencionais condicionadas artificialmente. Além disso, as edificações com ventilação híbrida ou modo misto de ventilação, desde que bem projetadas e operadas, também resultam em melhor conforto, produtividade e qualidade do ar em relação a edifícios com sistema de ar condicionado (BRAGER, 2006). O sistema híbrido de ventilação também é conhecido como sistema de modo misto.

Edificações que integram ventilação natural e condicionamento artificial, quando projetadas de forma adequada, certamente são obras factíveis e desejadas pelos usuários, que possuem maior controle das condições térmicas internas. Assim, o principal objetivo a ser atingido na operação de uma edificação com sistema misto é a obtenção de conforto térmico juntamente com a economia energética, funcionando como um sistema inteligente que aproveita as condições climáticas locais e características do projeto da edificação, explorando ao máximo os benefícios da climatização passiva sem comprometer a satisfação dos ocupantes. Não existe uma forma padro-

nizada de se operar as edificações com sistemas mistos de condicionamento, pois cada edifício funciona de maneira única, sendo na maioria das vezes impulsionada pela subjetividade dos ocupantes e disponibilidade de recursos quando não existe automatização (vento, sol, dispositivos portáteis, etc.) (VECCHI, 2015). Neste sentido, um edifício projetado de forma adequada, seja de uma edificação nova ou de um retrofit, as decisões tomadas durante o desenvolvimento de um projeto arquitetônico, influenciam diretamente no desempenho termoenergético do edifício, mostrando a importância de se atentar às soluções construtivas adotadas, desde soluções estruturais, especificações de materiais, funcionalidade arquitetônica, preceitos térmicos, visuais e acústicos, até equipamentos incorporados após a ocupação (PEREIRA, 2019).

A automação implica na diminuição da interação humana, através da adoção de tecnologias e equipamentos que contribuem tanto para suas finalidades específicas como no auxílio à sustentabilidade na etapa de operação. Como exemplo de equipamentos, existem sensores de iluminação natural que ajustam automaticamente a iluminação artificial como forma de compensação também são uma alternativa efetiva (COUNCIL, 2009).

A energia elétrica é, depois dos serviços terceirizados, a maior despesa da instituição de ensino, no caso a UFPel. A instituição tem um programa de eficiência energética estabelecido há mais de 10 anos, Programa de Bom Uso Energético- Proben,em que as medidas administrativas, técnicas e de educação são implementadas, bem como é fundamental buscar uma outra forma de reduzir o valor despendido com este insumo e aumentar a sustentabilidade energética da instituição (CLEFF et al., 2018). A geração de energia FV conectada à rede, aproveitando principalmente a área de cobertura disponível seria uma alternativa que poderia ser implementada na instituição com este objetivo. Assim, é importante buscar alternativas mais eficientes de geração de energia e usuários preocupados com o uso racional de energia auxiliam na redução dos custos de manutenção da instituição, liberando recursos para atividades fins.

Verificou-se que na literatura há uma carência de investigações da influência do usuário sobre o impacto no consumo de energia, bem como a necessidade de coleta de dados de edifícios reais, de forma a embasar pesquisas científicas. Dentro do contexto exposto, a pesquisa busca explorar a influência do comportamento do usuário no desempenho energético (consumo de energia) em edificação de ensino. Sendo assim, foram considerados cenários de comportamento de usuários onde foram analisadas as estratégias passivas sobre o desempenho do edifício como a integração da luz natural ao sistema de iluminação artificial através de dimmers e persianas automatizadas, ventilação natural integrada ao sistema de condicionamento artificial. Além disso, foi analisado o investimento para o edifício automatizado versus a geração de energia solar fotovoltaica (FV).

1.1 Justificativa

Com o intuito de produzir e difundir o conhecimento e promover a formação humana e profissional, a universidade possui papel fundamental na sociedade. Embora para as Instituições Federais de Ensino Superior (IFES) a questão econômica seja um item complementar à formação acadêmica, estes aspectos revelam-se de grande importância para a gestão administrativa, tanto para as instituições públicas quanto as particulares, já que a redução de custos energéticos pode ser revertida em investimentos para as atividades fins.

Vale a pena salientar que o rendimento acadêmico dos estudantes está diretamente vinculado às condições de conforto nas salas de aula como em outros ambientes acadêmicos, comentado nos estudos desenvolvidos por Jurado et al. (2014) e Satish et al. (2012). É de responsabilidade das universidades oferecer ambientes adequados como a iluminação e o conforto térmico, garantindo a satisfação de todos os usuários que se refletem no reconhecimento externo da universidade.

Para um processo mais eficiente, os projetos e a concretização de obras com premissas sustentáveis são fundamentais. Porém, devem estar alinhados ao consumo de uso da edificação para o qual raramente há metas estabelecidas tampouco uma avaliação de eficiência ou um processo de etiquetagem, ferramenta que existe apenas para as fases de projeto e edifício novo. O consumo real de energia em um edifício muitas vezes não reflete as metas previamente estipuladas devido a falhas de compatibilização entre os projetos conceitual e executivo, que podem se repetir também na fase da obra e no próprio funcionamento do edifício (CBCS, 2013).

Indicadores de projeto demonstram a capacidade de o edifício possuir um baixo consumo, mas não mostram resultados e números reais da fase de uso (CBCS, 2013). Assim, uma forma para entender o consumo real de um edifício é analisar de maneira detalhada a composição do consumo de energia, entender os perfis de consumo, dados estatísticos de consumo, bem como a avaliação do desempenho energético e térmico e assim, avaliar o potencial de melhoria do edifício. Para a avaliação do desempenho energético e térmico pode ser usado como referência a metodologia de Auditorias Energéticas aplicadas ao parque construído da Universidade Politécnica de Catalunya - UPC, na qual permite relacionar cada edifício com as diferentes fontes de energia com seus respectivos usos. Esta caracterização é obtida a partir de informações diferenciadas em dois níveis: os dados estáticos (características arquitetônicas, construtivas e dos equipamentos) e os dados dinâmicos, ou seja, que apresentam variações temporais, como o consumo de energia, uso e ocupação dos ambientes (PLAZAS, 2006).

Ao contrário dos usuários dos edifícios do setor residencial, usuários de ambientes de trabalho não possuem incentivos financeiros para minimizar uso de energia.

Além disso, motivações para usuários residenciais e usuários de edifícios públicos são diferentes. Uma possível motivação de mudar comportamento no uso de energia em residências poderia ser benefício pessoal, já que redução no consumo de energia resulta em economia financeira. Em prédios públicos, a estrutura de incentivo é diferente, porque não reflete como custo financeiro. Desta forma, o usuário pode agir sem nenhuma preocupação no consumo de energia elétrica. O usuário é o potencial consumidor de energia. Sem ganho financeiro não resultará diretamente em uma mudança em comportamentos. Pode-se citar como possíveis motivações para engajar no comportamento de economia de energia a estes ambientes, a economia de energia resultar em economia monetária e este valor ser aplicado em melhorias, aquisição de equipamentos ou retribuição financeira a quem economiza, bem como contribuir para proteção ambiental, com menos emissão de CO₂.

Outra motivação importante para a presente pesquisa é a preocupação ambiental. Nenhuma forma de geração de energia é totalmente limpa, ou seja, em todos os processos de geração de energia, o meio ambiente sofre algum tipo de impacto. Dados do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) apontam que o fator médio anual de emissão de CO₂ foi de 0,029 tCO₂/MWh em 2009, mas que a média dos primeiros oito meses de 2014 ficou em 0,132 tCO₂/MWh, chegando em um pico de 0,158 tCO₂/MWh em agosto de 2014 (BRASIL, 2014). A frequente escassez de chuvas gerou uma necessidade de utilização constante de centrais térmicas, geralmente utilizadas apenas para picos de demanda. Desta forma, a matriz de energia elétrica está cada vez mais "suja" com maiores emissões de gás de efeito estufa proveniente da geração de energia, além do aumento do custo de energia, com impacto no consumidor de todos os setores.

Também é importante considerar o cenário das mudanças climáticas que já demonstram impactos em muitos casos, tais como: aumento na frequência e intensidade de eventos extremos, como ondas de calor ou períodos de secas. A combinação de tais impactos com as ilhas de calor provenientes do adensamento urbano pode aumentar a ocorrência de eventos críticos, como o aumento de temperatura (CBCS, 2013). Agência Internacional de Energia (IEA) constata que será necessário reduzir as emissões de CO₂ provenientes do setor de edificações em 77% até o ano 2050 para evitar uma mudança climática desastrosa e manter o aquecimento global abaixo de 2°C (PASQUIER; SAUSSAY, 2012).

Por fim, o uso racional de energia implica em benefícios: a IEA identifica 15 áreas principais afetadas, que podem ser vistas na Figura 1. A iniciativa internacional, iniciativa das Nações Unidas, Energia sustentável para todos, cita a necessidade de dobrar a eficiência energética (SE4ALL, 2014). Tanto o IEA quanto SE4All identificam o maior potencial setorial na área de edificações. Países na Europa já estão identificando possibilidade de implantação de edifícios Zero Net em energia. Tais edifí-

cios contam com geração própria de energia e interligado à rede, bem como possuem consumo reduzido. Observa-se na Figura 1, benefícios da melhoria da eficiência energética.



Figura 1 – Benefícios da Eficiência Energética (SE4ALL, 2014).

O Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica - ProGD, através das portarias MME nº 538/15, nº 13/2016 e nº 175/2016 visa promover e incentivar a geração distribuída (GD) de energia elétrica, com base de em fontes renováveis e cogeração em edifícios públicos como universidades e hospitais e privados (residenciais, industriais e comerciais). Um programa voltada a eficiência energética da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é o Programa de Eficiência Energética (PEE) cujo objetivo é promover o uso eficiente da energia elétrica em todos os setores da economia por meio de projetos que demonstrem a importância e a viabilidade econômica de melhoria da eficiência energética de equipamentos, processos e usos finais de energia. Busca-se maximizar os benefícios públicos da energia economizada e da demanda evitada, promovendo a transformação do mercado de eficiência energética, estimulando o desenvolvimento de novas tecnologias e a criação de hábitos e práticas racionais de uso da energia elétrica (ANEEL, 2017).

Pesquisas buscam entender e compreender o usuário através do monitoramento do comportamento identificaram a falta de interações com sistemas existentes na edificação, como por exemplo, no uso do sistema de iluminação artificial e persianas.

Além da falta de interações nos sistemas, há relatos de dificuldades no uso dos sistemas, seja por falta de manutenção, confusão no acionamento das luminárias, bem como posicionamento dos interruptores para atuar no sistema. Desta forma, entender o comportamento do usuário e como interage atuando nos sistemas existentes nos ambientes para promover uso eficiente e racional de energia elétrica.

A automação procura minimizar a participação do usuário nos sistemas e verificar o potencial de economia de energia. Há estudos, tanto de instituições públicas quanto de particulares que abordam o potencial de economia de energia com o emprego da automação na iluminação, como em salas de aula, corredores, entre outros ambientes. Atualmente existem diversas opções de automação, inclusive para casos de retrofit. Dentre as opções de automação pode-se citar o controle de subsistemas como a iluminação e temperatura. Além de controlar subsistemas, existem opções para controlar as persianas internas, controlar o acionamento de brise e a abertura de janelas para o aproveitamento da ventilação natural.

Um questionamento importante a ser feito é: Qual seria a economia de energia alcançada com automação de IFES? Outra questão a ser analisada envolve a automação de prédios públicos, visando a economia de energia e sua relação custo-benefício. Também é pertinente perguntar se investimentos destinados a geração solar fotovoltaica podem ser feitos sem nenhuma preocupação com o consumo de energia.

A construção civil mundial demanda 40% da energia e um terço dos recursos naturais; emite um terço dos gases de efeito estufa; consome 12% da água potável e produz 40% dos resíduos sólidos urbanos (CBCS, 2013). Desta forma, é de extrema importância buscar alternativas mais eficientes de geração de energia, de construção das edificações e de hábitos dos usuários, de forma a auxiliar na redução deste impacto.

Por fim, as despesas com energia elétricas na administração pública federal são elevadas. Dados do Ministério Planejamento, Desenvolvimento e Gestão (MP), ano referência 2017, apontam gastos por item de despesa na distribuição do montante da despesa administrativa, apoio administrativo técnico e o operacional (27,9%), material de consumo (12,7%), serviços de processamento de dados (7,5%), vigilância ostensiva (7,3%), serviços de limpeza e conservação (7,2%) e serviços de energia energia elétrica (6,1%), representando este uma despesa em uma quantia de mais de dois bilhões de reais (R\$ 2.083.399,824) na administração pública federal. A proporção dos gastos em relação ao total do órgão superior, caso do Ministério da Educação, o gasto com apoio administrativo, técnico e operacional (42,44%), serviços de limpeza e conservação (11,05%), vigilância ostensiva (10,85%) e serviços de energia elétrica representam 7,94%, quarta maior despesa no Ministério da Educação.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral analisar a influência do comportamento do usuário no desempenho energético de um edifício de ensino superior. Além disso, é implementada a automação do edifício com o auxílio de um programa computacional, bem como, será avaliado o investimento da automação e da geração solar fotovoltaica. Para o alcance do objetivo geral, pretende-se especificamente:

- Realizar a estimativa de energia elétrica do edifício existente;
- Definir os perfis de usuários;
- Analisar o desempenho energético para os diferentes perfis dos usuários;
- Analisar o consumo de energia do prédio automatizado em relação aos diferentes comportamentos dos usuários;
- Analisar o investimento da automação e da geração solar fotovoltaica.

1.3 Objeto da Pesquisa

O estudo de caso para o desenvolvimento do trabalho escolhido é o edifício de ensino, Centro de Artes (CEARTE), localizado no Campus Porto, Universidade Federal de Pelotas (UFPel).

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho divide-se em seis capítulos nos quais são apresentadas as etapas realizadas no desenvolvimento do trabalho. No **primeiro capítulo** é introduzido o tema através da contextualização dos problemas explorados e os objetivos a serem alcançados. No **segundo capítulo** é apresentada uma revisão de literatura e conceitos do tema abordado onde são destacados aspectos referentes à ventilação natural e híbrida nas edificações; estudos de caso em edificações que utilizam o sistema de ventilação híbrida; impacto do comportamento do usuário no desempenho termoenergético de edificações; interação do usuário no dispositivo de sombreamento e o programa de simulação utilizado nesta pesquisa (EnergyPlus).

O método utilizado é apresentado no **terceiro capítulo** e se concentra nas seguintes atividades principais: (i) definir as características da edificação através do levantamento de informações da edificação; (ii) coleta de dados da pesquisa de campo; (iii) ajustar a simulação; (iv) simular a automação predial; (v) utilizar a simulação computacional a fim de avaliar quantitativamente o consumo de energia elétrica total dos comportamentos dos usuários e da automação. Foram criados quatro padrões de comportamento de usuários que representam a operação do edifício: comportamento ativo, comportamento intermediário e comportamento passivo e o edifício automatizado a fim de quantificar o consumo de energia elétrica.

No **quarto capítulo** são apresentados os resultados obtidos os quais consideram a análise dos seguintes aspectos: consumo de energia do condicionamento artificial; consumo de energia elétrica total da edificação; consumo de energia da iluminação artificial com e sem dimmer; o uso do sistema de condicionamento artificial e o custo de implantação da automação e da geração solar FV.

O **quinto e último capítulo** apresenta as conclusões, as limitações do trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros. No final do trabalho são apresentadas as referências bibliográficas, bem como o apêndice.

2 CONCEITOS E REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão sobre os conceitos que servem como base à pesquisa. Foram revisados estudos que avaliam os seguintes aspectos: iluminação natural, influência do comportamento do usuário no consumo de energia em edificações, interação com os dispositivos de sombreamento interno, ventilação natural e híbrida nas edificações. Também foi revisado norma de conforto térmico. Em relação às simulações termoenergéticas é apresentado os recursos para controle avançado nas simulações. Finalizando, é apresentado o programa institucional de eficiência energética da Universidade Federal de Pelotas.

2.1 Iluminação natural

De acordo com Didoné e Pereira (2010), a utilização excessiva de sistemas de iluminação artificial em edificações contemporâneas é responsável por grande parcela do consumo energético das mesmas. Medidas simples, como inserção de iluminação e ventilação naturais, podem reduzir o consumo energético desses edifícios. Se integrada de maneira correta, a iluminação natural pode representar economia de energia com a redução do uso de sistemas artificiais de iluminação que, além de demandarem energia para seu funcionamento, podem representar acréscimo de carga térmica nos edifícios, implicando em maior consumo energético com sistema de resfriamento.

Hazboun (2018) avaliou o potencial de aproveitamento da luz natural em escritórios no Rio Grande do Norte. O ofuscamento e contraste com o monitor induziram o fechamento das cortinas, gerando insuficiência de luz natural, obstrução do contato com o exterior e aumento do consumo de energia elétrica. A avaliação in loco do comportamento dos usuários confirmou que a principal forma de interação em edifícios de escritórios é o acionamento das cortinas, seguido do controle da iluminação artificial. Os usuários ativos regulam o sistema de abertura para o uso da luz natural e contato com o meio externo, enquanto que os passivos dão preferência ao uso do sistema artificial e negligenciam o uso da luz natural. Entre os extremos(ativos e passivos), foram identificados usuários com comportamento intermediário, que acionam o sis-

tema de abertura principalmente ao entrar no ambiente. Assim, o aproveitamento da luz natural é definido pelo tipo de usuário, que pode aproveitar parcialmente (usuários ativos) ou bloquear o uso da luz natural (usuários intermediários e passivos) a partir da frequência de acionamento das cortinas.

Li (2010) avaliou que inserir luz natural no interior dos ambientes propicia melhores condições de conforto visual, criando um ambiente mais atrativo para os ocupantes e impactando positivamente no desempenho de suas atividades, além da redução no consumo energético por iluminação artificial. A vista para fora obtida com o emprego de elementos transparentes – responsáveis por permitir a penetração de luz natural ao interior dos edifícios – é de extrema importância e a maior parte dos usuários sente-se mais satisfeita quando ocupa lugares mais próximos às aberturas. Deste modo, considerando a importância no bem-estar dos ocupantes e o impacto positivo no desempenho energético pela redução de carga de iluminação artificial, empregar iluminação natural é imprescindível na obtenção de edificações mais eficientes.

Souza (2003) avaliou o potencial de aproveitamento de luz natural pela utilização de sistemas automáticos de controle de iluminação. No estudo, foram analisadas 63 salas localizadas em Florianópolis-SC, por meio de simulação computacional com o programa LuzSolar. O autor empregou três estratégias de controle da iluminação artificial: liga/desliga simultaneamente todas as lâmpadas do sistema de iluminação, liga/desliga individualmente as lâmpadas do sistema de iluminação e controle dimmerizável. Então, o PALN foi avaliado visando estimar a quantidade de energia economizada com o aproveitamento da luz natural. Como resultados, constatou-se que controles automatizados podem resultar em potenciais de aproveitamento de luz natural de até 87%. Comparando as diferentes formas de controle, com a estratégia que permite ligar/desligar parcialmente o sistema de iluminação artificial, tem-se um acréscimo de 9 pontos percentuais sobre o PALN da estratégia que só permite ligar/desligar o sistema completo. Além disso, o controle dimmerizável apresenta um acréscimo de 15 pontos percentuais sobre o PALN da estratégia liga/desliga do sistema de iluminação completo.

É possível encontrar na literatura estudos que quantificam o potencial de economia energética resultante da integração de luz natural à artificial em edificações.

Ghisi, Tinker e Ibrahim (2005) criaram um método de simulação computacional para avaliar o potencial de redução no consumo energético em ambientes com integração de iluminação natural e artificial. Com ele, os autores obtiveram áreas ideais de janelas considerando diferentes dimensões e variação das orientações da fachada, em condições climáticas de duas cidades: Leeds, no Reino Unido, e Florianópolis, no Brasil. No estudo, foram avaliados, modelos com cinco geometrias: 2:1, 1,5:1, 1:1, 1:1,5 e 1:2, com o intuito de comparar a variação entre a disponibilidade de luz natural no plano de trabalho de salas rasas e profundas. Como conclusões, expõem que sa-

las menores possuem melhor desempenho energético devido ao maior percentual de abertura em relação à área de piso. Os potenciais de economia de energia variaram de 10,8 a 44,0% para Leeds, e de 20,6 a 86,2% para Florianópolis. De maneira geral, as áreas ideais de janelas tendem a ser maiores nas orientações que resultem em menor incidência de radiação solar na fachada envidraçada.

Didoné e Pereira (2009) avaliaram, por meio de simulação computacional, o potencial da luz natural na economia de energia elétrica consumida pelo sistema de iluminação artificial. No estudo, foram avaliados ambientes de escritórios localizados em Florianópolis-SC e climatizados artificialmente por meio de simulações integradas entre os programas Daysim e EnergyPlus. Quanto à iluminação, optou-se por um sistema artificial dimmerizável para garantir a integração da iluminação natural à artificial. Como resultados, os autores expõem que os modelos com aberturas orientadas a sul apresentam os menores índices de autonomia de iluminação natural, enquanto a orientação norte é a que apresenta os maiores valores de autonomia de iluminação natural. Quanto à integração da iluminação natural à artificial, obteve-se uma redução de até 50% no consumo energético dos modelos, quando comparados aos que empregam iluminação artificial durante todo o período de simulação. Além disso, a influência da iluminação natural no consumo energético também pode ser avaliada pela autonomia de iluminação natural.

Signorini (2015) avaliou o aproveitamento da luz natural em salas de trabalho de prédio administrativo da Universidade Federal de Pelotas. O estudo envolveu o monitoramento do comportamento do usuário e percepção através de entrevista. Os resultados demonstraram que a integração entre a iluminação natural e o sistema artificial são fundamentais para que os níveis de iluminância mantida sejam alcançados melhora nos padrões de conforto visual e economia de energia; e que a interação do usuário com os dispositivos de controle das condições lumínicas está associada à percepção de desconforto visual, interferindo diretamente no potencial de aproveitamento da luz natural no interior dos espaços.

Fernandes (2015) desenvolveu um procedimento de análise de desempenho de estratégias de retrofit considerando o consumo de energia e o conforto térmico. O objeto de estudo foi o edifício localizado no campus da Universidade Estadual de Campinas, em Campinas/ SP. Dados de consumo total de energia e de temperatura e umidade de salas foram monitorados. O programa de simulação EnergyPlus foi utilizado para estimar o desempenho do edifício e das estratégias passivas: uso de dimmers e persianas automatizadas, chaminé térmica, ventilação natural noturna e diurna. A autora concluiu que não foi obtido melhoria no desconforto térmico durante o verão, devido às altas taxas de umidade. No entanto, o aproveitamento da luz natural e a ventilação diurna proporcionaram economias de 16% no consumo energético com iluminação e de 15% com resfriamento, respectivamente. Com a revisão de literatura referente à

aplicação de luz natural em edificações, percebe-se a importância do aproveitamento de luz natural na otimização do desempenho energético das edificações.

2.2 A influência do comportamento do Usuário no consumo de energia

Pesquisas mostram que o comportamento do usuário pode ter impacto no consumo de energia de uma edificação.

Convém ressaltar que nenhuma regulamentação por si só garante um edifício de qualidade. Maiores níveis de eficiência podem ser alcançados através de estratégias de projeto. Importantes e frequentemente esquecidos, os usuários têm participação decisiva no uso de edifícios eficientes através dos seus hábitos, que podem reduzir de forma significativa o consumo de energia, aumentando assim a eficiência das edificações e reduzindo desperdícios (CBCS, 2013). O comportamento do usuário frente aos sistemas instalados nas edificações está diretamente relacionado com o consumo de energia elétrica destes edifícios.

Nas avaliações do desempenho térmico e energético de edificações é comum adotar padrões de uso e de operação das edificações baseadas em suposições ou observações de usuários. O resultado da simulação é uma estimativa do desempenho da edificação, sendo que em muitas situações podem prever erroneamente o desempenho da edificação. O motivo do problema é que o comportamento do usuário e suas atividades possuem uma grande variação (SORGATO, 2015). Neste sentido, as suposições das variáveis de entrada dos modelos de simulação podem possuir incertezas. As incertezas não estão apenas na geometria, envoltória, construção e as condições de contorno externo e interno, bem como as variáveis microclimáticas e contextuais, além de padrões de presença e comportamento de usuários em edifícios. Especialmente, as duas últimas suposições (condições climáticas e processos envolvendo o usuário) representam desafios para a confiabilidade das estimativas relacionadas ao desempenho energético e ambiental do ciclo de vida dos edifícios (MAHDAVI, 2019).

Janda (2011) expõe que, usualmente, os estudos referentes à eficiência energética em edificações focam nas características físicas dos edifícios como principais responsáveis pelo seu desempenho energético. Entretanto, os usuários apresentam papel fundamental no consumo energético das edificações. Deste modo, além de critérios técnicos, os projetistas precisam trabalhar com os usuários dos edifícios, a fim de promover consumo energético mais consciente, obtendo resultados mais satisfatórios em relação ao consumo.

Moezzi e Janda (2014) expõem que tentar reduzir o consumo energético de edificações considerando apenas aspectos projetivos e técnicos pode configurar resultados pouco interessantes, dado que o comportamento do usuário apresenta papel funda-

mental no desempenho energético durante a vida útil das edificações. Os autores sugerem que a obtenção de edificações energeticamente mais eficientes está sujeita à integração do potencial técnico ao potencial comportamental.

Schneider et al. (2019) verificaram o comportamento do usuário e desconfortos visuais e térmicos no prédio administrativo da Universidade Federal de Pelotas (UF-Pel) localizado no campus Porto. A pesquisa de campo ocorreu na aplicação de um questionário para os servidores e análises da situação das salas. A coleta de dados teve amostra de 131 participantes e em torno de 60 salas analisadas. Os resultados mostram que devido ao reflexo e ofuscamento, normalmente os usuários mantinham as persianas verticais fechadas e acendiam as luzes. A atitude do usuário quando a iluminação é insuficiente: 39% acendem totalmente o sistema de iluminação, 37% abrem as cortinas, 12% reposicionam as cortinas, 10% acendem parcialmente o sistema de iluminação, 2% acendem apenas a iluminação de tarefa. Com relação às temperaturas mais frequentes em que os usuários acionaram o sistema de condicionamento artificial no verão foram 23 °C, 20 °C e 22 °C e no inverno 25 °C, 24 °C e 26 °C. A Figura 2 apresenta a frequência das temperaturas de setpoint em que os usuário acionaram o sistema de condicionamento artificial.

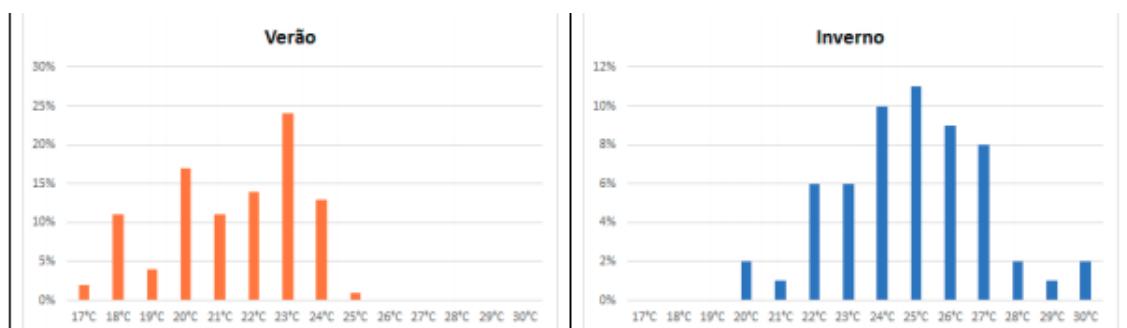


Figura 2 – Frequência das temperaturas de acionamento do sistema artificial de ar.

Outra questão importante do questionário foi “você já percebeu salas desocupadas com: luzes acesas(32%) e ar condicionado ligado (10%). As conclusões dos autores é sobre a conscientização do usuário sobre o uso de energia; quanto ao uso do ar condicionado 45% da amostra ajusta o setpoint de verão em temperaturas abaixo do recomendado e 43% ajusta o setpoint de inverno acima do recomendado pela NBR 16401 (NBR, 2008) e no desconforto por calor o usuário prefere utilizar o ar condicionado, 38%, do que a ventilação natural, 28%.

É possível encontrar estudos que avaliam a influência da presença e interação dos usuários com o ambiente no consumo energético dos mesmos. A pesquisa de Bonte, Thellier e Lartigue (2014) avaliou seis ações relacionadas ao consumo energético e sensação térmica de ocupantes em um ambiente de escritório: operação de elementos internos de sombreamento, sistema de iluminação, janelas, temperatura de

setpoint do sistema de resfriamento, ventiladores e ajuste de isolamento de vestimentas. Os resultados classificam a temperatura de setpoint como o principal responsável pelas variações no consumo energético. Além disso, a operação dos elementos internos de sombreamento mostrou-se impactante no consumo energético. De acordo com os autores, pode aumentar o consumo energético em até 20% considerando dois cenários, um com as cortinas fechadas e outro sempre abertas durante o ano todo. E se os ocupantes estejam expostos a situações de desconforto, haverá interação com o ambiente com o intuito de adequá-lo a fim de reduzir, ou sanar, a sensação. Essas interações serão impactantes no desempenho energético do edifício.

De acordo com O'Brien (2013), às edificações são concebidas para, em primeira análise, abrigar e, em segundo plano, promover altos níveis de conforto aos usuários. Para isso, diversos dispositivos podem ser inseridos em edificações visando adequações do ambiente para a obtenção de conforto, tais como: janelas operáveis, sistema de iluminação artificial, elementos internos e externos de sombreamento. O autor afirma que o comportamento dos usuários nas edificações é uma incerteza na predição de consumo energético. Além disso, a mudança de hábitos dos usuários não pode ser conduzida policiando suas atitudes no ambiente, pois a concepção de edifícios mais confortáveis contribuiria na melhora dos padrões comportamentais dos usuários.

De Vecchi, Cândido e Lamberts (2012) verificaram boas condições de conforto e aceitabilidade térmica em salas de aula que operavam com os ventiladores de teto e ar condicionado simultaneamente, bem como economia de energia. Durante as condições do experimento, os autores afirmaram que valores de velocidade do ar acima de 0,90 m/s eram bem aceitos quando associadas aos valores de temperatura operativa mais elevados - entre 25 °C e 28 °C. Tal cenário sugere um grande potencial de economia energética, já que de acordo com Hoyt, Arens e Zhang (2015) a mudança de temperatura de setpoint de 22 °C para 25 °C em edificações condicionadas artificialmente pode representar até 30% de economia no consumo energético final.

De Vecchi (2015) analisou três edificações comerciais públicas operadas de maneiras diferentes: uma que opera com sistema central de condicionamento artificial, e outras duas que operam com sistema misto de condicionamento. Os experimentos coletaram dados quantitativos e qualitativos de conforto térmico a partir dos votos subjetivos de ocupantes destas edificações. A coleta dos votos envolveu todas as estações do ano de 2014. Os dados coletados em edificações que funcionam de forma mista mostraram que a sensação e a preferência térmica, além da preferência pela velocidade do ar, são dependentes do modo de operação e variam significativamente quando se transita entre um modo e outro. Ao comparar a vestimenta entre os ocupantes da edificação condicionada artificialmente durante todo ano com os valores encontrados nas edificações que operam de forma mista, observa-se que os usuários apresentam

uma variabilidade de clo¹ visivelmente maior em edificações com sistemas mistos, o que provavelmente ocorre devido à semelhança entre as condições ambientais internas e externas durante as quatro estações do ano em que os experimentos foram realizados. Tal constatação reforça a tese de que, em edificações mistas, os ocupantes modificam sua vestimenta e se adaptam melhor às flutuações climáticas internas e externas. Além disso, é possível afirmar que na edificação com sistema central, a ocorrência de votos de desconforto por frio é maior quando comparada às edificações com sistemas mistos, onde o desconforto por calor ocorre em maior porcentagem. Outra conclusão importante é com relação a operação da edificação mista: durante o período em que o ar condicionado estava em operação constante, a média do voto de sensação térmica é constantemente negativa. Isto acontece também em situações semelhantes no inverno, sugerindo a má utilização ou desconhecimento da temperatura de setpoint ideal para estas situações, assim supostamente, os ocupantes acionam o condicionamento artificial em situações de desconforto térmico, o que geralmente faz com que eles utilizem um setpoint baixo de forma equivocada buscando amenizar a situação de forma rápida. Com o passar do tempo, esta situação pode inclusive extrapolar o limite de “leve desconforto por frio” e chegar a uma situação predominante de votos “com frio” ou “com muito frio”.

Vizzotto (2015) verificou em uma edificação de ensino que o setpoint de resfriamento de 20°C ocorre frequentemente, quando usuários chegam com temperatura mais elevada, ajustam o valor de setpoint bastante baixo, acreditando desta forma o sistema de climatização consiga reduzir a temperatura do ambiente de forma rápida.

Segundo Ackerly e Brager (2013), o usuário ativo, participa do controle ambiental de uma edificação, por meio da abertura de janelas, manutenção dos elementos de sombreamento, liga ou desliga os sistemas de refrigeração, aquecimento e iluminação artificial.

Sorgato (2015) analisou cenários com comportamentos dos usuários em modelos de residências unifamiliares e multifamiliares. As edificações foram simuladas com três padrões de comportamento de operação dos usuários: comportamento ativo, comportamento intermediário e comportamento passivo. O comportamento ativo representa uma edificação com automação residencial, no qual controla a ventilação e os dispositivos de sombreamento das aberturas. No comportamento do usuário intermediário, o usuário controla os dispositivos de sombreamento durante o período de ocupação e quando não há ocupação as venezianas (dispositivos de sombreamento) permanecem abertas. Os dispositivos de sombreamento foram controlados pela temperatura externa. O comportamento do usuário passivo representa pessoas que não estão preocupadas com as condições térmicas do ambiente. Este ventila a edificação em condições inadequadas, temperatura interna maior do que a externa em 3°C e não utiliza

¹CLO: Unidade de medição da resistência térmica da roupa. (1 clo = 0.155m²°C/W)

adequadamente os dispositivos de sombreamento, temperatura de controle de acionamento em 3°C maior, comparado ao ativo. Segundo o autor, o comportamento do usuário intermediário e passivo apresentaram maior influência no consumo de energia para condicionamento artificial e piores condições de conforto térmico para as edificações multifamiliares. No entanto, para as edificações unifamiliares a influência do comportamento intermediário e passivo foi menor no desempenho termoenergético.

Em projeto de retrofit do edifício sede do Ministério do Meio Ambiente (MMA) e Ministério da Cultura (MinC), Bloco B da Esplanada dos Ministérios foram definidos ações de eficientização a serem implementadas no edifício em análise, considerando o usuário, equipamentos e sistemas de condicionamento de ar, iluminação, envoltória e os fechamentos internos da edificação. As medidas analisadas foram avaliadas observando a economia de energia (kWh) e na demanda (kW). Foram adotadas onze medidas de conservação de energia, dentre as quais podemos citar a medida de conservação cinco(5) - aumento da temperatura de setpoint (temperatura de ajuste) do sistema de ar condicionado e medida quatro(4)- padronização do funcionamento do sistema de proteção solar e implementação de controle de iluminação. O levantamento in loco do sistema de condicionamento de ar apontou a temperatura de 21°C como a de setpoint do atual sistema e de acordo com a medida cinco aumentou para 24°C a temperatura de setpoint, a qual encontra-se entre o intervalo recomendado pela NBR 16401(2008). Com a estratégia a redução obtida foi de 7% do consumo de energia. Além da redução de energia, análise do custo-benefício (RCB) para a medida de conservação cinco é considerada uma medida sem custos. Para a análise do Payback da medida é de retorno imediato, pois não possui custos agregados à medida (MMA, 2015).

Se os usuários tendem a atuar nos sistemas existentes ao chegar e sair dos ambientes ou quando estão incomodados, conclui-se que os melhores projetos são aqueles que menos necessitam ser alterados pelos usuários. Observou-se que um dos motivos de dúvidas no uso dos controles disponíveis para os sistemas é a falta de padronização dos mesmos. É recomendável que exista uma lógica no posicionamento destes controles, pois isso irá auxiliar no entendimento dos usuários. Válido se pensar na disponibilidade de informações acerca dos sistemas instalados e na existência de soluções eficientes e simples aos usuários, como maneiras de incentivar comportamentos, por isso é importante que este usuário encontre condições adequadas ao entrar neste ambiente – tanto de iluminação, quanto de ventilação e de controle da incidência solar (BRANDAO, 2015).

Gul e Patidar (2015) afirmam que os avanços da tecnologia estão colaborando para atingir as metas de redução no consumo de energia desejadas, mas a maneira como os ocupantes se comportam e interagem com a edificação tem grande impacto nos níveis de conforto e no consumo de energia da mesma. Segundo os mesmos

autores, o consumo de energia elétrica é de 60% a 70% maior do que o previsto em escolas e edifícios comerciais e até 85% maior em campus de universidades. No Brasil, os primeiros estudos da área apontam aumentos de 50% em muitos casos (CBCS, 2013). Tais resultados destacam a extrema importância de acompanhar e medir o desempenho operacional de edificações, a fim de poder atingir o desempenho potencial e evitar alto consumo devido à operação incorreta.

Bavaresco (2016) destacou a importância da conscientização dos usuários para que, mesmo em edificações que apresentem grandes trocas térmicas com o ambiente exterior, seus comportamentos no ambiente não resultem em desempenhos energéticos péssimos. Nesse sentido, estratégias passivas que melhorem o conforto nas edificações, pois usuários em sensação de conforto, como sugere a literatura, tendem a não ajustar o ambiente e minimizar seu impacto no desempenho energético dos edifícios.

Com a revisão de literatura percebe-se à influência do comportamento dos usuários no desempenho energético de edificações.

2.3 Dispositivos de Sombreamento Interno

Neste trabalho, buscou-se tratar também, da influência da interação dos usuários com os dispositivos de sombreamento internos no consumo de energia.

Bavaresco (2016) avaliou as interações dos usuários com os elementos internos de sombreamento de uma edificação de escritório, localizada em Florianópolis/SC. Foram criados três padrões de comportamento (dois passivos e um ativo). O primeiro dos passivos consiste na manutenção dos elementos internos de sombreamento abertos durante todo o ano. O segundo grupo de usuários passivos compreende os que mantêm os elementos fechados durante todo o ano. O usuário ativo tende a abrir os elementos internos de sombreamento no momento de chegada ao ambiente de trabalho e a fechá-los quando é percebida radiação solar superior a 50W/m^2 no plano de trabalho. Percebeu-se que o comportamento dos usuários passivos que mantêm os elementos internos de sombreamento sempre abertos resulta nos maiores aproveitamentos de luz natural. Entretanto, a radiação solar incidente é menos obstruída e o consumo com resfriamento tende a ser maior em relação aos outros dois usuários avaliados. Os usuários passivos que mantêm os elementos sempre fechados geram os menores aproveitamentos de iluminação natural, mas as maiores reduções na carga térmica interna. Dessa forma, como tendência geral, percebeu-se que o comportamento do usuário ativo resulta nos menores consumos de energia em comparação aos dois perfis de usuário passivo avaliados.

Wymelenberg (2012) apresentou uma revisão de literatura sobre os padrões de interação dos ocupantes com elementos de sombreamento. Foram revisadas diversas

publicações que tratam sobre a operação dos elementos de sombreamento. Ao todo, foram analisados dados de mais de 50 edifícios de todo o mundo. O estudo mostra que, além da posição dos elementos, o padrão de uso apresentado pelos ocupantes influência no desempenho energético dos edifícios. O autor concluiu que os ocupantes interagem com os elementos de sombreamento quando estão se sentindo desconfortáveis, tanto com o ambiente visual quanto com o térmico. Nas 50 edificações estudadas, verificou-se que orientação, condições do céu, estação, hora do dia, qualidade da vista para o exterior e tipo do sistema de resfriamento foram listados como influenciadores na interação entre os usuários e os elementos de sombreamento.

Foster e Oreszczyn (2001) estudaram o controle de venezianas internas por usuários de edificações de escritório naturalmente ventiladas localizadas no centro de Londres. Para tanto, foram realizados monitoramentos, por meio de filmagens, dos ajustes dos elementos de sombreamento no verão e inverno. Contatou-se que em períodos ensolarados, quando resfriamento interno e proteções solares são necessários, os elementos de sombreamento estão obstruindo as aberturas e ajudando na proteção contra a incidência solar. O estudo concluiu que a maioria dos usuários mantém as janelas obstruídas durante todo o período, o que dificulta a predição de ações prováveis dos ocupantes, tendo em vista que cada um interage considerando fatores individuais, e assim, a generalização pode resultar em estimativas de consumo energético pouco confiáveis. Além disso, os autores encontraram uma forte relação entre os ajustes dos elementos de sombreamento e a orientação do edifício.

Zhang e Barrett (2012) avaliaram os fatores que influenciam na operação dos elementos de sombreamento internos em uma edificação de escritório localizada em Sheffield, no norte da Inglaterra. Os resultados mostraram que, em dias mais nublados, os elementos de sombreamento não são erguidos pela dificuldade que os usuários têm em operá-los. Na fachada norte, os elementos tendem a ficar mais tempo erguidos, o que indica insatisfação com o brilho excessivo presente nas outras fachadas. Quanto ao momento do dia, pode-se afirmar que não possui muita influência nas interações, já que os usuários tendem a realizá-las apenas uma vez durante o dia. Com a pesquisa, os autores concluíram, com os questionários, que a vista para o exterior chega a representar 70% da preferência dos usuários; mais de 70% deles preferem estar sentados próximos à janela, pelo menos, às vezes; em torno de 60% dos usuários sentem-se incomodados com o brilho, às vezes ou raramente; e em torno de 70% relataram algum grau de dificuldade em operar os elementos de sombreamento.

A insatisfação com o ambiente visual é um motivador para as interações com os elementos de sombreamento, e que o excesso de radiação solar pode ser estimado como um limiar para a operação dos elementos de sombreamento. Além disso, operar os elementos de sombreamento pode ser difícil, e isso desmotiva os usuários a modificá-los. Nesses casos, os mesmos são operados apenas em situações de ex-

tremo desconforto.

Os padrões comportamentais podem ser usados nas simulações do desempenho térmico e energético de edificações para avaliar o impacto de diferentes comportamentos de usuários, mas não devem ser utilizados para provar uma situação real (SORGATO, 2015)

2.4 Geração de Energia Solar Fotovoltaica

A geração de energia solar FV já é realidade em várias universidades, tanto no Brasil quanto no mundo. A seguir alguns exemplos: Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) foi instalado um módulo conectado à rede de 2,1 kW de potência de pico, com células de silício policristalino (p-Si), que gerou, entre dezembro de 2011 e junho de 2014, 5,95 MWh. Em agosto de 2015 a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) inaugurou o maior estacionamento solar do país, com uma área de 652 m² e 414 painéis solares. Com capacidade para abrigar 65 veículos o "estacionamento solar" é capaz de gerar 140 mil kWh/ano.

O Instituto Federal da Paraíba - Campus João Pessoa - inaugurou em 2017 o seu sistema de geração FV integrado à rede. Os painéis FV, totalizando 95 kWp, foram instalados na cobertura de diversos prédios e em um estacionamento do campus e estima-se que poderão fornecer 5% da energia total anual consumida na instituição.

Cleff et al. (2018) avaliaram o potencial e tempo de retorno do investimento de geração de energia elétrica através da instalação de SFV na cobertura dos prédios da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo e do Centro de Artes da Universidade Federal de Pelotas. Os autores concluíram que toda a energia consumida pela instalação analisada poderá ser gerada pelo SFV projetado, além de um excedente de energia que poderá ser compensado em outra instalação da universidade e retorno do investimento em cerca de nove anos.

Em 2017, o IFSul (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense), Campus Bagé e Charqueadas também aderiram às usinas de geração de energia fotovoltaica. Para o campus Bagé a capacidade do sistema é de suprir 50% do consumo interno e economia com energia elétrica deve chegar a R\$ 34.800,00 por ano. Para o Campus Charqueadas o sistema deve suprir 54% do consumo da instituição e economia mensal estimada de oito a dez mil reais. Além de minimizar impactos ambientais, é esperada economia financeira.

Diante do exposto, é fundamental buscar uma forma de reduzir o custo de manutenção da instituição e aumentar a sustentabilidade energética. A geração de energia FV conectada à rede, aproveitando principalmente a extensa área de cobertura ou o solo disponível, seria uma alternativa que poderia ser implementada na instituição.

2.5 Normas de Conforto Térmico

Atualmente, a avaliação de conforto térmico em ambientes internos é feita principalmente segundo a norma americana ASHRAE 55 (última revisão publicada em 2013), que trata unicamente das condições térmicas ambientais para a ocupação humana (ASHRAE 55 - *Thermal environmental conditions for human occupancy*).

O modelo é baseado nas trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente, assumindo que as trocas térmicas são influenciadas exclusivamente por quatro fatores no ambiente, temperatura do ar, temperatura radiante, umidade e velocidade do ar, como também são considerados dois fatores pessoais: atividade e o isolamento das roupas (DE DEAR; BRAGER, 2002).

O método da aceitabilidade térmica para ambientes condicionados naturalmente, sem uso de sistemas de resfriamento e aquecimento. A zona de conforto é relacionada apenas com a média predominante do exterior (bulbo seco), não apresentando limites para valores de umidade e velocidade do ar. A faixa de temperatura de conforto varia de 17°C a 31°C, para 80% de aceitabilidade, e de 18,5°C a 30,5°C para 90% de aceitabilidade, conforme apresentado na Figura 3.

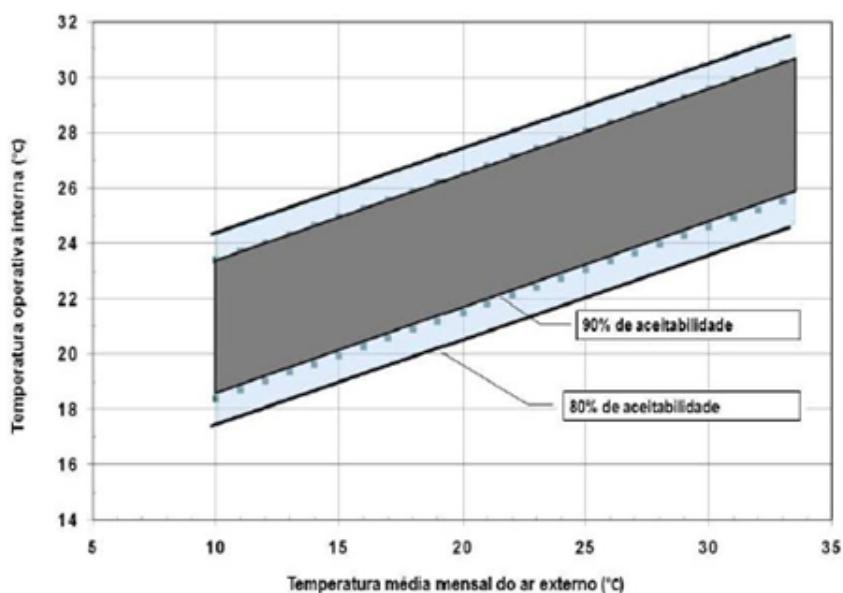


Figura 3 – Limites da zona de conforto da ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013).

No Brasil, não existe norma específica para a avaliação de conforto térmico. A norma que envolve alguns parâmetros de conforto térmico para espaços internos se restringe a parte dois da NBR 16401 – Instalações de ar-condicionado – sistemas centrais e unitários, revisada em 2006 e publicada pela última vez em 2008 (NBR, 2008). A NBR 16401 (2008) é focada no projeto de instalações de ar condicionado (parte 1), nos parâmetros de conforto térmico em ambientes condicionados (parte 2) e na qualidade do ar interior (parte 3). A norma define temperaturas operativas

internas que variam de 22,5°C a 25,5°C com umidade relativa de 65%, e 23,0°C a 26,0°C para umidade relativa de 35% e vestimenta de 0,5 clo (equivalente ao período mais quente do ano). Durante os períodos mais frios (1,0 clo), estes mesmos limites podem ser delineados da seguinte forma: a temperatura operativa e a umidade relativa devem estar dentro da zona delimitada por 21,0°C e 23,5°C para 60% e, 21,5°C e 24,0°C para 30% de umidade. O método adaptativo desta última revisão se restringe aos ambientes ventilados naturalmente, com aberturas controladas pelos usuários e sem nenhum tipo de condicionamento artificial instalado (ar condicionado, sistemas de resfriamento por meio de radiação, ou de desumidificação).

2.6 Ferramentas de Simulação Computacional

Existem diversos programas para simulação do desempenho térmico e energético de edificações que é um recurso que possibilita simular a interação dinâmica dos fenômenos de calor, de luz nas edificações, estimando o desempenho térmico e ambiental da edificação exposta ao clima, usuários, sistemas de condicionamento artificial e natural (CRAWLEY et al., 2000).

A simulação dinâmica possibilita simular em detalhes o desempenho térmico e energético das edificações em relação às características arquitetônicas, propriedades termofísicas dos materiais construtivos, condições climáticas, padrões de uso dos sistemas de iluminação, condicionamento ambiental e comportamento dos usuários. Entretanto, é comum representar o comportamento dos usuários como um padrão estático. O comportamento estático não tem a capacidade de reproduzir as diferentes interações e preferências dos usuários para as condições climáticas do ambiente. Como exemplo, numa edificação ventilada naturalmente o desempenho é altamente dependente da maneira de que a edificação é operada. As decisões dos usuários podem influenciar diretamente no desempenho térmico e energético das edificações (SORGATO, 2015).

Westphal e Lamberts (2005) destacam que os programas de simulação para análises de eficiência energética são pouco difundidos entre os profissionais, devido a complexidade dos programas, a dificuldade de utilização e demora para se formar um simulador.

O EnergyPlus é um dos programas de simulação de edificações bastante utilizado mundialmente. Este programa calcula as trocas térmicas, os índices de iluminação e de consumo energético das edificações a partir da modelagem física e seus sistemas de ventilação, iluminação, aquecimento e resfriamento (DOE, 2013). Além disso, é um programa gratuito, código aberto e que atende a ASHRAE 140, bem como vem sendo amplamente utilizado nas pesquisas sobre desempenho térmico e consumo de energia. Sendo assim, foi o programa escolhido para a modelagem termoenergética

realizada neste trabalho.

2.7 Recursos de controle avançado em simulação termoenergética

O Energy Management System (EMS) é um controle de alto nível disponível no EnergyPlus. Um EMS é capaz acessar uma grande variedade de dados de sensores e usar estes dados ordenar vários tipos de ações de controle. O conceito é emular, dentro do EnergyPlus, os tipos de controles possíveis com os sistemas de gerenciamento de energia digital usados em prédios reais (DOE, 2019).

Os programas de simulação computacional de desempenho termoenergético de edificações não possibilitam os controles avançados, como a integração do sistema de condicionamento artificial com a estratégia passiva de ventilação natural e sombreamento das aberturas. Uma forma de resolver este problema é a utilização do Energy Management System (EMS), pois permitem a integração de diferentes estratégias durante a simulação.

Zhang e Lam (2011) avaliaram o impacto de duas estratégias de controle de sombreamento das aberturas (persianas internas) na carga térmica e na iluminação artificial de uma edificação de escritório, para quatro climas dos Estados Unidos. Foram desenvolvidos dois algoritmos de controle. Para um clima, vidro possui fator solar de 0,39 e transmitância visível de 0,31. Para os demais climas, o vidro tem fator solar 0,25 e transmitância visível de 0,11. O dispositivo de sombreamento interno reduziu em 6,68% nas cargas totais quando comparada com o caso sem controle de sombreamento. A pequena redução na carga térmica da edificação ocorre devido às características dos vidros utilizados, fator solar baixo, parâmetro que reduz significativamente os ganhos de calor provenientes dos vidros, reduzindo, assim, o impacto do dispositivo de sombreamento.

O Energy Management System (EMS) é um recurso que possibilita controles avançados durante o processo da simulação no EnergyPlus. O EMS realiza a leitura e a troca de informações durante a simulação a cada passo de tempo (ELLIS et al., 2007). O EMS pode controlar diferentes sistemas no processo das edificações, como o sistema de condicionamento artificial, ventilação, aquecimento de água, iluminação artificial, geração de energia local, automação de sombreamento e atuadores de janelas (DOE, 2019).

Os principais componentes do Energy Management System são:

- Energy Management System: Sensor,
- Energy Management System: Actuator,
- Energy Management System: Program,

- Energy Management System: Subroutine,
- Energy Management System: Global Variable,
- Energy Management System: Output Variable

O Sensor é responsável por identificar os componentes da simulação que serão utilizados como critérios de decisão nos algoritmos do EMS, as temperaturas externa e operativa, por exemplo, são utilizadas como sensores para avaliar a condição climática em um determinado período da simulação. O Actuator (acionador em tradução literal), tem o papel de modificar um determinado componente no algoritmo EMS.

Desta forma, se utilizarmos a temperatura externa como critério (Sensor), podemos acionar (Actuator) ou não o condicionamento artificial, por exemplo. A combinação dos objetos configurados no campo Sensor com os objetos do campo Actuator permite interferir no comportamento da simulação em tempo de execução, com base nos critérios definidos no algoritmo. Este algoritmo, por sua vez, é implementado no campo Program do EMS, que ainda possibilita o uso de subrotinas (campo Subroutine) para descrever trechos da programação que serão repetidos com frequência no campo Program.

O EMS ainda possibilita definir variáveis globais que podem ser utilizadas no algoritmo (campo Global Variable) e novas variáveis de saída decorrentes das necessidades apresentadas pelo problema implementado via EMS no campo Energy Management System: Output Variable.

Os recursos do EMS permitem estabelecer condições de controle avançadas e personalizadas, transcendendo as opções de condições de controle tradicionais do EnergyPlus (SORGATO, 2015).

2.8 Programa do Bom Uso Energético (PROBEN)

O programa PROBEN (Programa do Bom Uso Energético) da Universidade Federal de Pelotas procura gerenciar e reduzir o consumo de energia elétrica dentro da instituição. A redução permanente do consumo de energia elétrica se dá através educação do usuário e do uso de tecnologias mais eficientes.

A redução do consumo de energia elétrica implica numa diminuição no valor da fatura de conta de energia, ou seja, redução de despesas no uso de energia, resulta em economia de recurso, que segundo o regulamento, poderão ser aplicadas em outras necessidades da instituição ou mesmo reinvestidos na busca de outras formas de redução do desperdício ou retribuição financeira a quem economiza.

Algumas ações neste programa são:

- Organização das informações disponíveis através da avaliação de grandezas elétricas das contas, como consumo ativo, fator de potência e demanda e caracterização

do perfil de consumo de energia elétrica da instituição;

- Campanha de conscientização e orientação da comunidade acadêmica;
- Revisão dos contratos de energia(demanda e estrutura tarifária)- com relação ao período de Setembro de 2006 a Junho de 2018 gerou uma economia de R\$ 7.341.753,48, conforme o gráfico abaixo (Figura 4).

Com alteração da modalidade tarifária de órgão Público para Rural, janeiro de 2014 a junho de 2018, gerou uma economia de R\$ 3.988.596,10.

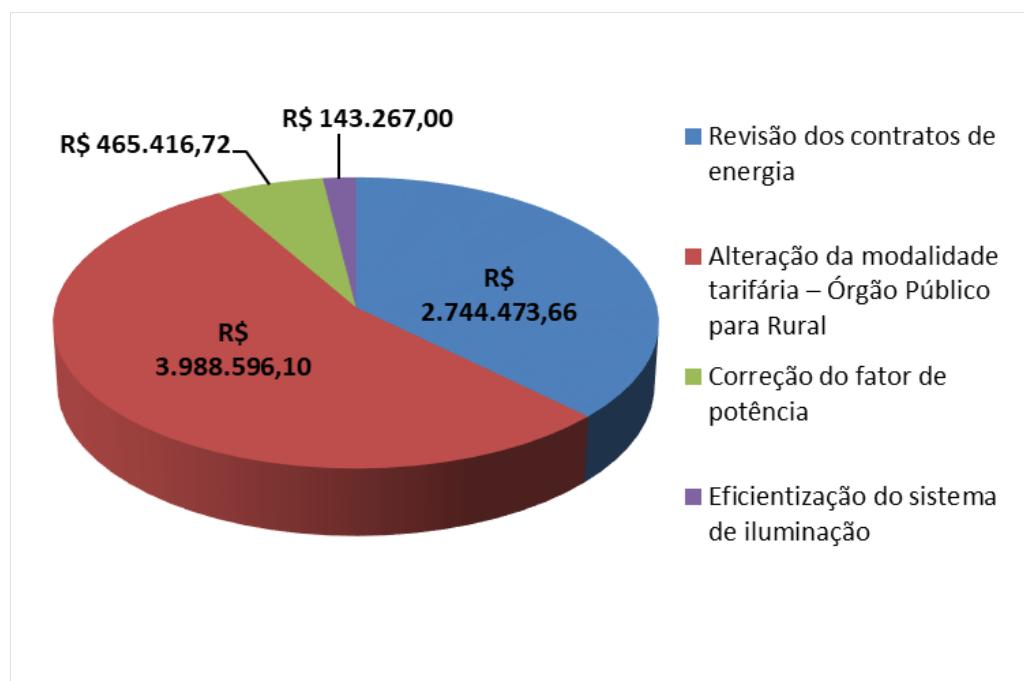


Figura 4 – Economia gerada com o PROBEN.

O Proben iniciou a conscientização do usuário, em meados de 2014, abordando as unidades com as estratégias de redução e as bonificações pertinentes à redução. Em 2015, pela primeira vez no histórico do consumo da UFPel, houve redução real no consumo de energia, mesmo tendo caráter voluntário de adesão ao Proben, sem metas nem sanções previstas. A Figura 5 demonstra o balanço geral da UFPel. Neste período houveram unidades que reduziram o consumo e algumas unidades aumentaram. Em 2016 o consumo retornou ao patamar de 2014.



Figura 5 – Consumo geral da UFPel.

Houve unidade acadêmica que reduziu até 37,88% seu consumo de energia no período de 2016/17. Disso, deduz-se que (1) é possível reduzir o consumo com através da educação do usuário; (2) que a abordagem ao usuário deve ser constante, para que este não retorne à hábitos de desperdício.

Fernandes (2015) aborda alguns pontos para a viabilidade da implantação dos programas em instituições: existência de monitoramento do desempenho dos sistemas instalados nas unidades consumidoras, a figura do gestor de energia (especialista e responsável pelo monitoramento), a disponibilidade de informações históricas para possíveis auditorias e, principalmente, o envolvimento da comunidade acadêmica. Esse fatores são fundamentais para uma maior agilidade e eficácia das intervenções. Este cenário estimula o desenvolvimento de pesquisas, regulamentações e manuais de boas práticas a fim de orientar usuários e projetistas a reduzir o consumo de energia e a melhorar a qualidade ambiental dos edifícios através de projetos adequados, especificação e uso correto dos sistemas instalados.

2.9 Síntese da revisão de literatura

Foi apresentada a revisão de literatura que norteou a definição dos fatores avaliados na pesquisa. A revisão abordou as questões de iluminação natural, ventilação natural e híbrida, comportamento do usuário em edificações, operação de elementos internos de sombreamento e programas empregados nas simulações computacionais. A aplicação de uma estratégia de projeto – ou diversas delas – não é suficiente para garantir que uma edificação será eficiente. Atualmente, o estudo do comportamento dos usuários e sua consequente influência no desempenho energético dos edifícios ocupados é amplamente aceito.

Quanto ao aproveitamento da luz natural nos edifícios, embasando-se na revisão de literatura realizada, é possível afirmar que, apesar de conhecidas as vantagens, tanto do ponto de vista energético quanto das condições de conforto proporcionadas, a penetração da luz natural é, com frequência, barrada por elementos internos de sombreamento. Estes elementos são manipuláveis e sofrem influência das interações dos usuários. Deste modo, tem-se o conflito entre a influência positiva de uma estratégia bioclimática aos padrões de comportamento que os usuários podem apresentar. Afinal, um edifício que apresente mecanismos de aproveitamento de luz natural, porém ocupado por usuários que mantêm os elementos internos de sombreamento obstruindo a penetração de luz, tende a não apresentar bons resultados de desempenho energético (BAVARESCO, 2016).

Hazboun (2018) identifica os usuários ativos como aqueles consideram a luz natural e evitam o uso da luz elétrica, enquanto que os passivos desconsideram seu potencial de uso, não interagem com o sistema de proteção e acionam a luz elétrica na maior parte do dia. Estes fecham a cortina devido ao desconforto, e não abrem mais ao longo do horário de ocupação. Foi identificada uma situação intermediária entre os dois extremos, que considera o uso luz natural com menor frequência que usuários ativos, mas que não é totalmente passiva à variação das condições da luz natural, interagindo principalmente na entrada/saída do ambiente.

De maneira geral, pode-se concluir que a influência do comportamento dos usuários no desempenho energético de edificações é inquestionável. Nesse âmbito, tem-se que as interações com os elementos de sombreamento configuram grande potencial de otimização de consumo. Entretanto, a literatura ainda é restrita nessa área, e, além disso, os estudos existentes, geralmente, empregam metodologias bastante distintas, o que dificulta a comparação dos resultados. Enquanto alguns autores relacionam insatisfação com o ambiente visual às interações dos usuários com os elementos de sombreamento, outros as relacionam com questões ligadas ao desconforto térmico.

A operação e a interação do usuário com os sistemas da edificação podem alterar o desempenho de uma edificação projetada para baixo consumo. A operação de forma inadequada pode aumentar o consumo de energia, resultando em consumos superiores a edificações que não foram projetadas com estratégias para proporcionar eficiência energética. Uma forma de reduzir a importância do comportamento do usuário pode ser com o uso dos recursos de automação, com soluções que proporcionem a eficiência energética das edificações residenciais, por meio do controle e do gerenciamento dos sistemas da edificação. Outro recurso simplificado seria um manual para usuários, com informações de como ventilar e controlar os dispositivos de sombreamento da edificação (SORGATO, 2015).

Além da intervenção direta no edifício, é importante que se desenvolvam em conjunto, projetos de conscientização sobre o uso racional da energia. A participação

do usuário é fundamental para que se obtenha o resultado esperado das ações implementadas, já que muitos dos sistemas instalados no edifício dependem do manuseio e manutenção por seus usuários. A criação de programas internos às instituições facilita esse procedimento e seu sucesso está diretamente relacionado com o envolvimento das partes diretamente afetadas. Dentre as iniciativas de incentivo ao consumo racional de energia a partir de programas governamentais ou específicos de instituições de ensino (FERNANDES, 2015).

A escolha de integrar padrões comportamentais às simulações energéticas foi realizada com base nas recomendações do Anexo 66 da Agência Internacional de Energia (EBC, 2014), a qual afirma que é necessário implementar modelos de comportamento de usuários a ferramentas de simulação energética para realizar análises quantitativas sobre a influência dos usuários no desempenho energético de edificações. Nos capítulos a seguir são apresentados o método utilizado nas simulações e, em seguida, seus resultados.

3 MÉTODO

O método foi estruturado em etapas como pode ser visualizado na Figura 6. A escolha de um objeto de estudo serviu como base para a elaboração do procedimento. Assim, foi iniciado a coleta de dados desse objeto, que consistiu na primeira etapa. Esta forneceu subsídios para as etapas subsequentes de análise de desempenho e modelagem computacional. A análise de desempenho energético do modelo inicial compôs a segunda etapa. Segundo Degelman e Soebarto (1996), conciliar medidas de campo e simulação computacional é a melhor técnica conhecida para identificar com confiabilidade o problema de desempenho energético de um edifício. Após a preparação do modelo com os primeiros dados levantados, é necessário que sejam refinados para que o desempenho desse modelo seja representativo do desempenho do edifício real, na qual consiste a terceira etapa. Nessa mesma etapa, foram detalhados os padrões comportamentais dos usuários. Os padrões comportamentais foram variados a fim de estimar o desempenho energético da edificação ocupada por diferentes usuários. Nas simulações, foram fixadas as propriedades termofísicas da envoltória, padrões de ocupação, uso de equipamentos, sistema de condicionamento e iluminação artificial de acordo os dados coletados e refinados. Já para a automação do edifício, foram adotados controle de ocupação para acionar o sistema de condicionamento artificial, integração da ventilação natural e artificial e integração de luz natural à artificial, com controle dimerizável, concomitantemente à ocupação do modelo simulado. Por fim, será orçado o custo de implantação do sistema de automação e do sistema de geração fotovoltaica. A Figura 6 mostra o fluxograma do método proposto.

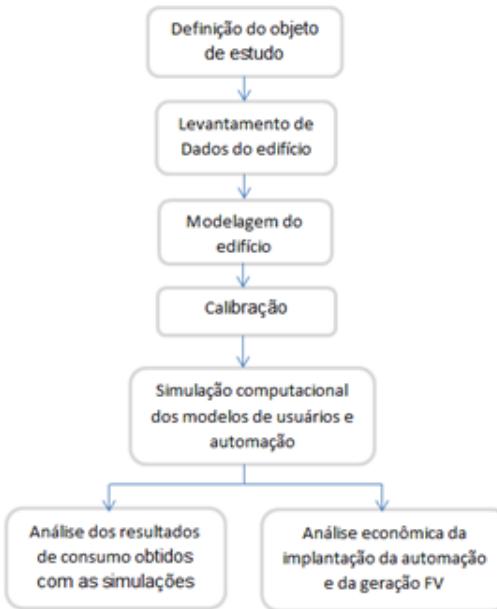


Figura 6 – Fluxograma do método proposto.

3.1 Caracterização do Edifício

O objeto de estudo para a pesquisa é um edifício de ensino que faz parte de uma unidade acadêmica denominada Centro de Artes (Cearte), constituído de dois edifícios - um mais novo e outro mais antigo. Ressalta-se que cada edifício possui alimentação da instalação individual. O edifício para estudo é o mais novo, construído em 2014, apresentado na Figura 7, possui os cursos de bacharelado em Música, licenciatura em Música, Design Digital, Design Gráfico, Cinema de Animação e Cinema e Audiovisual e um auditório multiuso para 225 pessoas à disposição da comunidade acadêmica. Em função do período de aquisição e instalação de equipamentos, o edifício será avaliado pelo Proben a partir de 2020, tendo como média de consumo os três últimos anos. Entretanto, segundo a Diretora do Centro há uma preocupação no uso racional da energia em todo o Centro. Por outro lado, o edifício mais antigo possui programa ou medidas voltadas à economia de energia. Com a economia de energia em 2017 foi possível adquirir 12 computadores, de acordo com o relato da secretária.

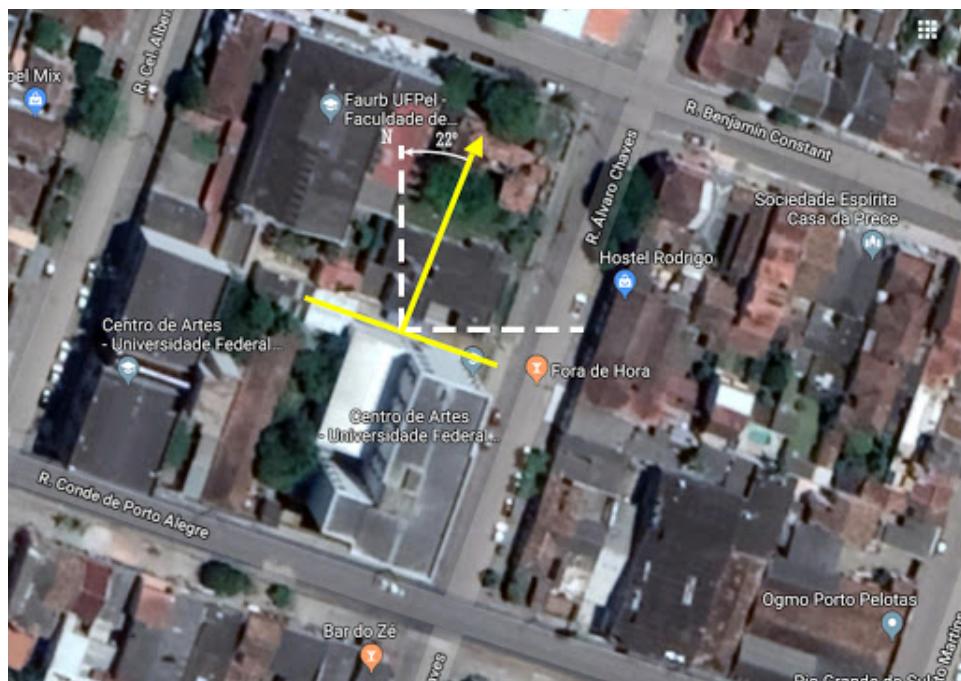


Figura 7 – Vista aérea do CEARTE - Centro de Artes UFPEL.

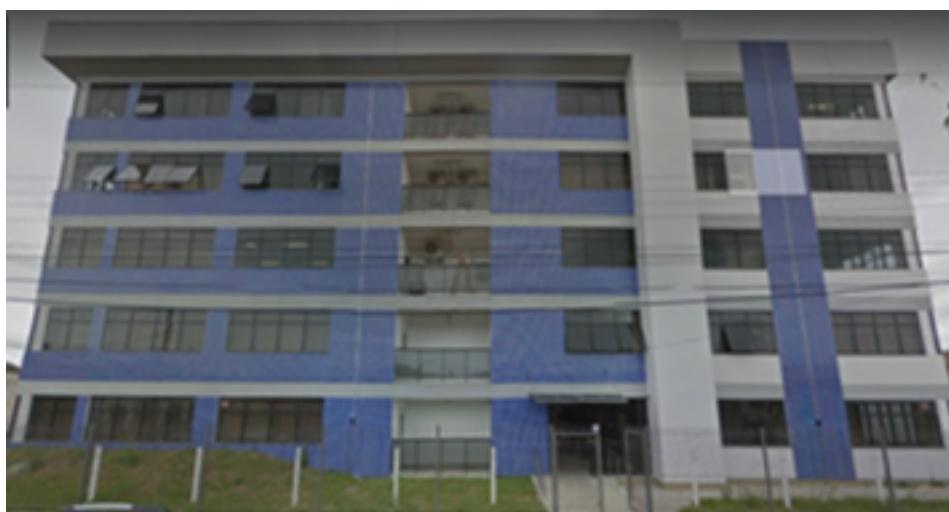


Figura 8 – Vista da fachada Leste do edifício (Google Earth).

A área informada pelo projeto do prédio aponta 2.880m². As áreas condicionadas totalizaram 1381 m², representa 48% da área edificada. O edifício possui 18 ambientes com o equipamento de ar condicionado instalado.

O calendário escolar para o ano de 2018 ocorreu de 06 de março a 21 de dezembro. O período de funcionamento é de segunda a sexta-feira, com aulas diurnas e noturnas. A maioria das aulas, quase que a totalidade, ocorre no período diurno, de acordo com o mapas de salas. As aulas diurnas, período matutino, é das 8h às 11:40h e no período vespertino, das 13:30h às 18:50h. Para o período noturno, as aulas ocorrem das 19h às 22:20h. Neste período, três salas eram ocupadas, duas

salas de aula e uma sala denominada laboratório digital. O período de recesso foi determinado regime de turno único, no horário das 8h às 14h.

A faixa horária entre as 7h e às 8h consiste no horário de chegada e começo das atividades da equipe de faxina. Às 23h ocorre o desligamento da iluminação interna e o fechamento do prédio, realizado pelo segurança.

3.2 Características do Clima de Pelotas

Pelotas, município situado na região sul do estado do Rio Grande do Sul, com Latitude 31º 46' 19" S e Longitude 52º 20' 33" W, com altitude de 7m. O clima de Pelotas/RS, caracterizado por possuir uma grande amplitude térmica ao longo do ano e que apresenta estações bem definidas, com baixas temperaturas nos períodos frios do ano e altas temperaturas nos períodos quentes (LEITZKE et al., 2018). Para o período de inverno, possuem temperaturas abaixo da zona de conforto, demonstrando a necessidade de se elevar a temperatura dos ambientes, por meio de ganho de calor. No verão, período na qual as temperaturas são elevadas, existe a necessidade de reduzir o ganho e permitir perdas de calor dos ambientes. De acordo com o Zoneamento Bioclimático Brasileiro da norma NBR 15220 (ABNT, 2005), a cidade de Pelotas está localizada na Zona Bioclimática 2. Na parte 3 da NBR 15220 (ABNT, 2005) é possível obter dados para orientar a formulação de diretrizes construtivas e para o estabelecimento de estratégias de condicionamento térmico passivo. Para a Zona Bioclimática 2, as recomendações são as seguintes:

Tabela 1 – Aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas(ABNT, 2005).

Aberturas para ventilação	Sombreamento das aberturas
Médias	Permitir sol durante o inverno

Tabela 2 – Estratégias de condicionamento térmico passivo (ABNT, 2005).

Estação	Estratégias de condicionamento térmico passivo
Verão	Ventilação cruzada
Inverno	Aquecimento solar da edificação
	Vedações internas pesadas (Inércia Térmica)

Para o clima de Pelotas, de acordo com as tabelas acima, as diretrizes que devem ser atendidas para um melhor desempenho térmico de edificações residenciais são: aberturas para ventilar no verão e sombreamento das aberturas no verão e ganho de calor no inverno. Considerando as diretrizes bioclimáticas da NBR 15220 (ABNT,

2005), adotou-se para esta pesquisa avaliar por meio da simulação computacional o uso da ventilação natural em conjunto com outras estratégias bioclimáticas.

3.3 Pesquisa Observacional

A pesquisa observacional inclui a identificação dos seguintes sistemas: iluminação, equipamentos elétricos e ar condicionado. Além da avaliação destas cargas, o prédio foi percorrido, em todos os ambientes, para o conhecimento do funcionamento dos equipamentos, bem como a quantidade, tipo e potência dos mesmos, conferência dos dados de planta e coleta de dados de iluminação, tipo, potência e quantidade , assim como para o sistema de climatização.

3.3.1 Levantamento de informações sobre a edificação

A primeira tarefa a ser realizada foi a obtenção de informações pertinentes à estrutura e ao funcionamento da edificação a ser estudada. Para que seja possível uma modelagem do edifício, é necessário o conhecimento da geometria,assim como uma caracterização detalhada de sua envoltória. Para tal foram consultados o projeto arquitetônico e memorial descritivo.

Durante o levantamento de campo observou-se as características da edificação(localização, orientação e tipo das aberturas, existência ou não de proteção solar externa e persianas internas) e a atuação dos usuários no ambiente (abertura e fechamento de janelas, persianas e uso do sistema artificial). Durante o período de levantamento, para o sistema de condicionamento artificial não foram feitas constatações reais de uso, pois a estação era amena. Essa fase contou com visitas in loco, conversas com usuários, funcionários e professores.

Os ambientes possuem janelas operáveis e disponíveis a todos os usuários. O conjunto de abertura apresenta vidro fixo na parte superior e folha de abrir do tipo maxim ar na parte inferior, com tamanho variável. Constatou-se que existem ambientes com aberturas em fachadas diferentes, em que o aproveitamento da ventilação natural pode ser realizada pela ventilação cruzada, já que apresentam entorno parcialmente desobstruído, e facilita o aproveitamento da ventilação oriunda do nordeste, direção predominante do vento. O entorno do edifício, para as fachadas leste, norte e sul possuem residências a cerca de 8m e a fachada oeste possui um prédio de três pavimentos a cerca de 20m, prédio mais antigo do Cearte. Com relação ao percentual de abertura de fachada(PAF),a fachada leste possui um PAF de 30%, a fachada sul tem um PAF de 32%, a fachada oeste tem um PAF de 19,79%. Não há proteção solar externa nas janelas. Possui persianas internas verticais de cor média, bege.

Além disso, foi necessário um dimensionamento da carga térmica interna, o que inclui equipamentos elétricos, ocupação e iluminação. Em se tratando da carga refe-

rente a equipamentos, deve-se fazer, preferencialmente, uma análise separada para os diferentes tipos de equipamentos presentes na edificação, e para cada uma das zonas térmicas a serem consideradas, tanto para salas de aula quanto os laboratórios digitais. Quanto à iluminação, deve-se levantar o tipo de lâmpada, potência instalada, além, é claro, do período de funcionamento das mesmas. Para o sistema de condicionamento artificial, deve-se verificar o nível de eficiência energética, a quantidade de equipamentos por ambiente e a capacidade de refrigeração e de aquecimento. Foi constatado durante o levantamento que os dois equipamentos do ar condicionado do auditório não são acionados devido ao ruído elevado. Assim, não foi considerado na simulação energética. O auditório é utilizado para aulas teóricas e práticas, inclusive possui um piano no centro do palco. Já para palestras, formaturas da instituição de ensino, é acionado o sistema de condicionamento artificial, segundo relato de professores e do responsável pelo agendamento do mesmo.

De forma resumida, os ocupantes possuem controle das condições térmicas internas em todos os ambientes. A operação das janelas, persianas e equipamentos condicionadores de ar é feita manualmente pelos ocupantes. O sistema de iluminação artificial possui separação por circuitos, e o controle da iluminação natural é feito por meio de persianas verticais. Cada ambiente possui em média duas unidades condicionadoras de ar, do tipo *split*.

Durante o levantamento *in loco*, foram observadas situações diferentes para o aproveitamento da luz natural apresentada na Figura 9. Durante uma aula do Curso de Teatro, sala localizada no pavimento térreo, percebe-se a iluminação artificial desligada. Esta sala possui aberturas voltadas para leste e sul. Ressalta-se, para os ambientes dos cinco pavimentos que possuem as aberturas voltadas para estas orientações são as maiores em área e quantidade, no caso quatro aberturas, uma voltada para sul e três para leste. Por outro lado, em outra sala, voltada para a fachada oeste, há aproveitamento da luz natural, mas a iluminação artificial está ligada, mesmo a sala possuindo circuitos independentes, inclusive para a fileira próxima à abertura. Mesma situação encontrada em outras salas, nas quais a luz natural não é aproveitada para a economia energética.

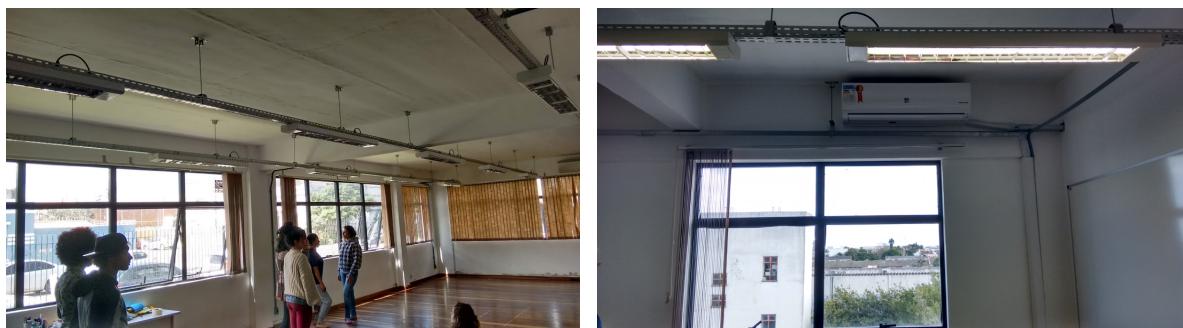


Figura 9 – Registro fotográfico de salas de aula.

Outra constatação durante o levantamento, ocorreu nos ambientes dos laboratórios digitais. Estas salas são ao total de cinco e possuem de 12 a 25 computadores. As persianas internas verticais permanecem totalmente fechadas durante a ocupação. Segundo relatos de professores, o motivo pelo qual as persianas ficam fechadas é devido ao ofuscamento na tela dos computadores.

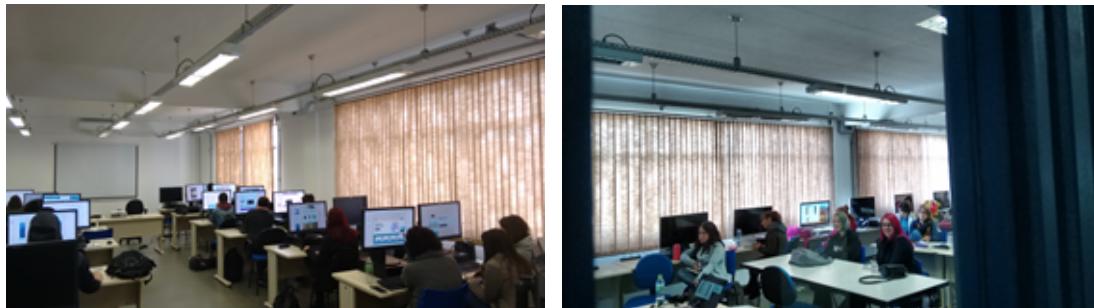


Figura 10 – Registro fotográfico de laboratórios digitais.

O Regulamento técnico (2012) apresenta os tipos de esquadrias e o percentual de abertura disponível para iluminação e ventilação, descontando-se os caixilhos. Para o tipo máximo ar, por exemplo, o percentual disponível para ventilação é de 80%, considerando a abertura da janela a 90º. Contudo, raramente são utilizadas com sua abertura máxima, seja pelo dimensionamento da folha operável, que dificulta a abertura total, ou mesmo pela existência de travas de segurança, que impedem a abertura total, o que pode prejudicar a eficácia da ventilação.

Por fim, foi verificado o ângulo de abertura para a ventilação natural para a janela do tipo maximar, Figura 10. O ângulo de abertura máximo é de aproximadamente 30º, o que representa área efetiva de ventilação de 13%. Parâmetro utilizado para as simulações computacionais.



Figura 11 – Registro fotográfico das aberturas.

3.4 Modelagem Computacional

Contempla a descrição da modelagem do edifício real (modelo base) para as análises de desempenho energético. O modelo foi elaborado com o programa Energy-Plus

e seu plug-in para o programa de modelagem SketchUp (Legacy OpenStudio) a partir dos dados obtidos na fase de levantamento. A simulação energética foi realizada no programa EnergyPlus, versão 8.7. As dimensões da envoltória, dos ambientes internos, portas, corredores, bem como as dimensões e a posição das janelas presentes na edificação, conforme apresentado na Figura 12, são fiéis às presentes no projeto arquitetônico disponibilizados pela PROPLAN (Pró-reitoria de Planejamento e Desenvolvimento). Cada ambiente do edifício foi modelado como uma zona térmica.

Introduzindo as informações da geometria, da ocupação, dos equipamentos elétricos instalados, do sistema de ar condicionado e iluminação foi possível obter uma primeira aproximação do funcionamento real da edificação, denominado modelo inicial. Ainda assim são necessários, alguns ajustes para que o modelo seja representativo da realidade, ou seja, ainda é necessária a calibração do modelo, que é feita comparando dados reais de consumo com aqueles simulados. Assim, com os ajustes obtém-se o modelo base utilizado como referência para as simulações energéticas. Os ajustes necessários para a calibração serão detalhados a seguir.

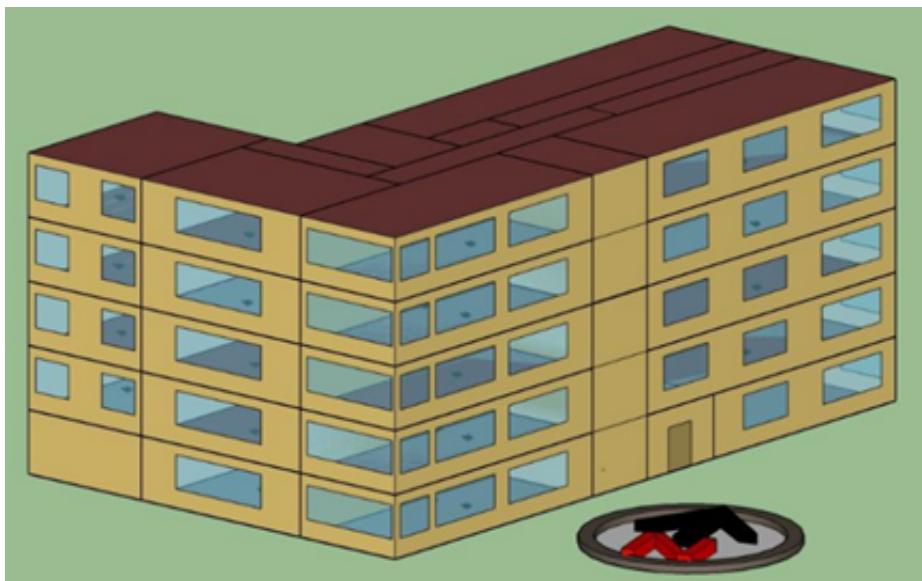


Figura 12 – Modelo computacional no programa SketchUp.

Uma vez atingida uma aproximação satisfatória, pode-se definir o consumo desagregado do edifício, que distingue a parcela consumida de energia por cada um dos usos finais, sendo eles os equipamentos instalados, que engloba um elevador, o sistema de condicionamento de ar e iluminação. Uma vez ajustado o modelo, podem ser implementadas as soluções propostas, e mensurados os seus impactos no consumo de energia. A proposição de soluções depende, basicamente, da edificação, e do que nela já estiver instalado, é claro, de acordo com as tecnologias a disposição (AZEVEDO; SANT'ANA, 2015).

3.5 Identificação dos Ambientes Internos

A Figura 13 apresenta a planta baixa do terceiro pavimento com a identificação dos ambientes internos. No terceiro, quarto e quinto pavimento os ambientes são similares.



Figura 13 – Planta baixa do terceiro pavimento (PROPLAN).

A densidade do sistema de iluminação, densidade dos equipamentos elétricos e densidade de pessoas foram definidas conforme levantamento *in loco* e mapa de salas, visto que optou-se utilizar as cargas reais do prédio.

O perfil de funcionamento de equipamentos elétricos e sistema de iluminação foram definidos conforme o mapa de salas, levantamentos, conversas com professores e funcionários. Durante os levantamentos, observou-se que o nível de funcionamento de equipamentos e sistema de iluminação artificial de salas, nomeadas laboratórios digitais, comparada às demais salas são diferentes. Desta forma, foram criadas agendas específicas de funcionamento do sistema de iluminação artificial, equipamentos elétricos e condicionamento artificial para os laboratórios digitais. Outra constatação durante os levantamentos foi com relação ao nível de funcionamento da iluminação para os corredores ou circulação de todos os pavimentos, funcionando de maneira contínua, desde a chegada do primeiro funcionário que liga até o último funcionário que desliga o sistema de iluminação. Assim, foi criada agenda específica para sistema de iluminação artificial para os corredores dos cinco pavimentos.

A densidade luminosa dos espaços foi obtido da divisão entre a potência de iluminação do espaço e a respectiva área, advém de uma relação W/m^2 . Para a densidade de equipamentos elétricos é obtida da soma da potência dos equipamentos levantados de cada sala e a área (W/m^2), desconsiderando corredores e banheiros.

Dentre os usos finais de energia, destacam-se o sistema de condicionamento de ar, a iluminação interna, os equipamentos elétricos, engloba o elevador e as salas de aula e dos laboratórios digitais.

3.5.1 Sistema de Iluminação

O sistema de iluminação consiste de luminárias do tipo de sobrepor, composta com duas lâmpadas fluorescentes tubulares T8 de 32W, apresentado na Figura 14. A iluminação é mantida ligada no período de atividade da edificação, de forma variável. As luminárias com refletor geram um melhor aproveitamento do fluxo luminoso.

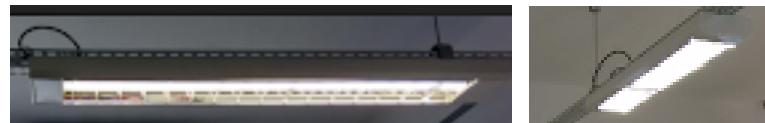


Figura 14 – Fotos do Sistema de iluminação.

3.5.2 Equipamentos Elétricos

O levantamento dos equipamentos elétricos baseou-se no levantamento *in loco*. O edifício apresenta alguns equipamentos de uso constante como computadores (laboratórios digitais), geladeira, um frigobar, bebedouros. Há outros tipos de equipamentos de uso eventual, como impressoras, tv, som, sala com teclados eletrônicos, cafeteira, jarra elétrica, projetor, entre outros.

3.5.3 Sistema de Condicionamento Artificial

Quanto aos equipamentos de ar condicionado, se encontram distribuídos ao longo do edifício, instalados em 18 ambientes. Além da marca, foram identificados nas etiquetas as seguintes informações nominais: capacidade de refrigeração/aquecimento e potência elétrica. O COP (coeficiente de desempenho) não está disponível na etiqueta do equipamento, assim a consulta deve ser realizada no site do fabricante.

Os equipamentos são classificados de acordo com as faixas de eficiência. A portaria do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) estabelece a faixa de eficiência para classificação de equipamentos de ar condicionado. Do total de equipamentos instalados no edifício, a maioria possui nível de eficiência energética A, apenas um ambiente possui equipamentos de ar condicionado nível de eficiência B. Este ambiente é o auditório, contém dois equipamentos de ar com capacidade de 58.000 Btu/h cada.

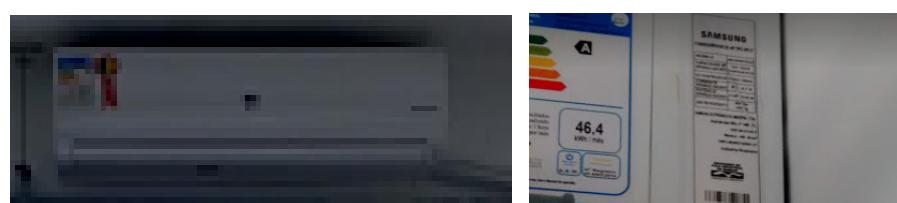


Figura 15 – Fotos do equipamento de ar condicionado.

Para o equipamento de ar condicionado do tipo split possuir Selo A, COP neces-

sita ser maior do que 3,23 (INMETRO, 2010). Os equipamentos de ar condicionado instalados possuem COP de 3,34 para a função de aquecimento e resfriamento.

3.6 Geração de Energia Solar Fotovoltaica (FV)

A unidade consumidora analisada, Cearte, possui com a concessionária de energia uma demanda contratada de 50 kW. De acordo com ANEEL (2012) é necessária uma potência instalada da geração de energia igual ou menor a demanda contratada. Neste tipo, há consumo no horário de ponta (entre 18 e 21hs nos dias úteis) e consumo no horário fora de ponta, que engloba os demais horários nos dias úteis e as 24hs em feriados e fins de semana. Assim, a UC pertence ao Grupo A, atendida e faturada em média tensão (MT). No grupo A há diferentes valores de quilowatt-hora (kWh), em função do horário em que a energia é consumida. O custo do kWh no horário de ponta é quase cinco vezes maior que o horário fora de ponta. No caso do sistema de energia solar, a geração acontece no período do dia (fora de ponta), e o excedente é compensado durante a noite (ponta) e acumulado nos meses seguintes. No momento que há excedente de energia gerado no horário fora de ponta, para que haja compensação no consumo do horário de ponta deve-se aplicar um fator de ajuste (FA). Este fator ocorre através da equação 1, conforme (ANEEL, 2012). A Figura 16 apresenta a cobertura do edifício e o entorno.

$$FA = TE(FP)/TE(HP) \quad (1)$$

Onde:

FP = Tarifa de Energia (TE) no horário fora de ponta.

HP = Tarifa de Energia (TE) no horário ponta.

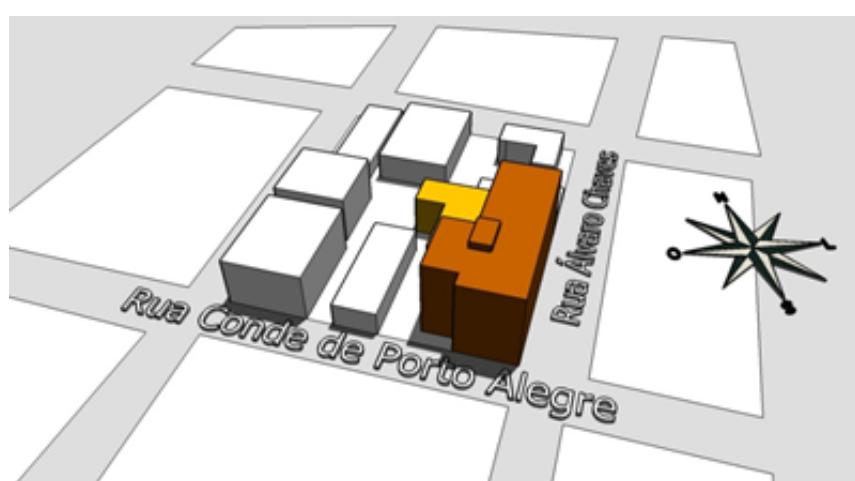


Figura 16 – Perspectiva do edifício e o entorno.

No primeiro momento define-se a área útil a ser utilizada para implantação dos

SFV. Com a área disponível é possível determinar a quantidade de módulos, cada módulo possui uma área aproximada de 2m². Para obter-se à quantidade de módulos, pode-se dividir a área total disponível pela área individual de um módulo. No segundo momento, é realizado a análise do sombreamento durante os solstícios de verão e inverno, bem como nos equinócios de outono e primavera. Desta forma, foram dimensionados 148 módulos com uma potência nominal instalada de 47,36 KWp.

A Resolução da ANEEL 482/2012 estabeleceu as condições gerais para o acesso a micro e minigeração distribuída, além do sistema de compensação de energia elétrica. A Resolução ANEEL 687/2015 ampliou a compensação dos créditos de energia em até 60 meses e permite a utilização do excedente de energia gerada pode ser aproveitada para reduzir o consumo de energia de outra instalação, unidade consumidora (UC), para tanto devem possuir a mesma titularidade.

3.7 Comportamento do Usuário e Automação

Para analisar o impacto do usuário em diferentes situações, a edificação foi simulada com três padrões de comportamento de operação: comportamento ativo, comportamento intermediário, comportamento passivo. Além do desenvolvimento de cenários dos comportamentos dos usuários, foi realizada a automação da edificação através de simulação computacional.

3.7.1 Automação

A automação utiliza controles externos para a obtenção do melhor uso dos sistemas, sendo a estratégia com menor interferência por parte dos usuários quando comparado com as demais apresentadas neste estudo.

O modelo automatizado visa maximizar as estratégias passivas, buscando minimizar o consumo de energia elétrica para condicionamento artificial e iluminação artificial, obtendo o máximo desempenho no que se refere à operação de sistemas. A edificação com automação predial, possui o controle da ventilação, condicionamento do ar, dispositivos de sombreamento de aberturas e integração da iluminação natural com a artificial. A interação do sistema no controle da ventilação natural é realizada pelo critério da diferença de temperatura do ambiente para a temperatura exterior. O controle da ventilação natural foi realizado por meio da estratégia de ventilação seletiva, que permite abrir as janelas conforme os critérios de temperatura.

As condições de controle da ventilação natural foram:

- 1) Verificar se a temperatura operativa do ambiente é superior à temperatura de setpoint de ventilação. O setpoint de ventilação adotado é de 23°C ($T_{amb} > 23^{\circ}C$).
- 2) Verificar se a temperatura operativa do ambiente é superior a temperatura externa ($T_{amb} > T_{ext}$).

Na Figura 17 são apresentados os critérios e a sequência das condições de controle da ventilação natural para o prédio automatizado.

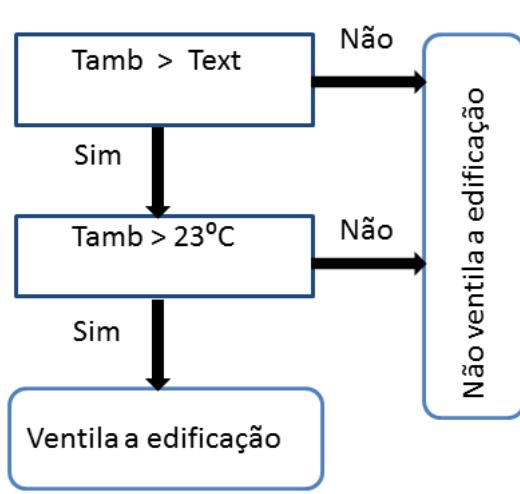


Figura 17 – Processo de Ventilação Seletiva (SORGATO, 2015).

As condições de controle foram aplicadas para os ambientes ocupados e a edificação é ventilada somente durante o período de ocupação. O comportamento de abertura das janelas é o mesmo durante todos os dias úteis da semana. Quanto às portas, de acordo com o uso real dos ambientes, a porta interna de acesso para um determinado ambiente permanece fechada.

A Figura 18 apresenta o fluxograma do algoritmo de controle do sistema de ventilação natural e condicionamento artificial.

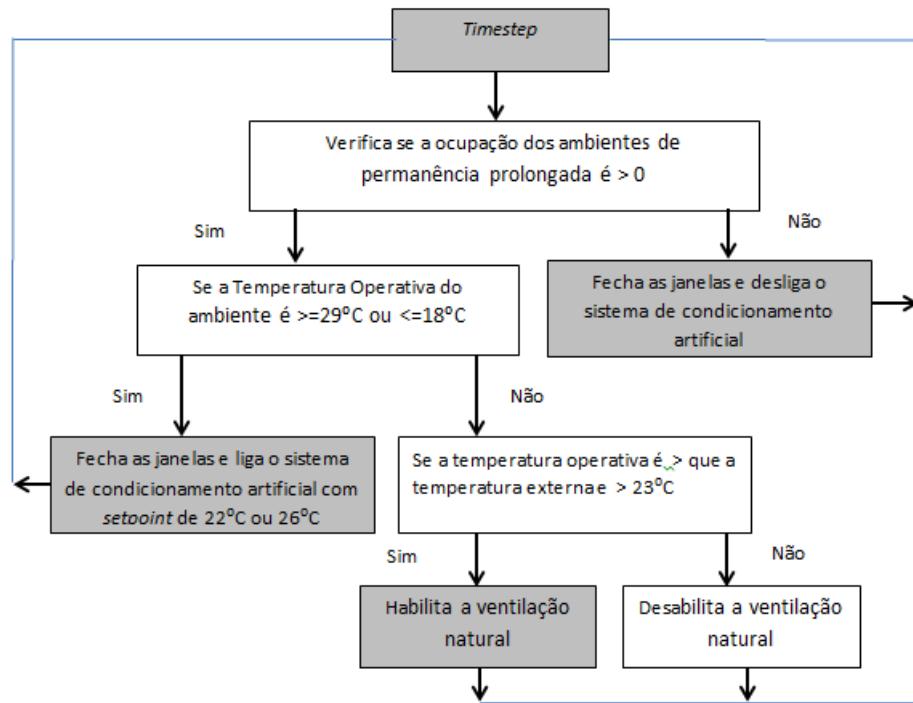


Figura 18 – Controle de integração da ventilação natural e do sistema de condicionamento artificial (Adaptado de Sorgato (2015)).

No modelo automatizado, os dispositivos de sombreamento são controlados pela temperatura externa e radiação solar incidente na fachada. Caso a radiação solar na fachada e temperatura externa atinjam os parâmetros definidos, o dispositivo de sombreamento é fechado. Os valores adotados foram 250W/m^2 e $26\text{ }^{\circ}\text{C}$. Foram utilizadas persianas automatizadas para o controle dos dispositivos de sombreamento interno e buscou-se sombrear os períodos quentes e garantir os ganhos de calor nos períodos frios.

Os detalhes do edifício automatizado são apresentados na Figura 19.

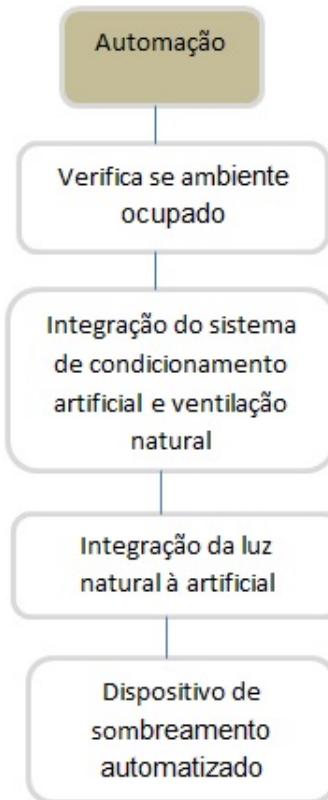


Figura 19 – Detalhes do edifício automatizado.

3.7.2 Comportamento do Usuário Ativo

No comportamento do usuário ativo, o usuário ventila a edificação buscando a melhor sensação térmica. Este usuário explora a integração da iluminação artificial com a natural e do sombreamento solar passivo, minimizando o consumo de energia elétrica nos sistemas de iluminação artificial e de condicionamento artificial, respectivamente.

O usuário ativo utiliza a ventilação natural e controla a operação dos dispositivos de sombreamento durante a ocupação. Com relação a ventilação natural, se a temperatura interna estiver dentro da faixa de conforto a ventilação natural é habilitada, diferente do modelo automatizado que possui o processo de ventilação seletiva. No período em que não há ocupação nos ambientes, o usuário ativo fecha as janelas e desativa o sistema de condicionamento de ar.

O funcionamento do sistema de condicionamento de ar ocorre em situações pré-definidas para o usuário ativo. Para aquecimento, o sistema entra em funcionamento assim que o usuário percebe que a temperatura interna atingiu valores menores do que 18 C, ou seja, este está em desconforto térmico por frio dentro do ambiente. Para o resfriamento, o sistema opera quando o usuário percebe que foi ultrapassado o limite superior de conforto térmico de 29C, desta forma, tenta-se reduzir o desconforto por calor ativando o sistema de condicionamento artificial.

De acordo com a ASHRAE 55 -2013, o método adaptativo para atender 80% dos

usuários, considera como temperatura neutra, ideal de conforto, a equação abaixo:

$$Tn = 17,8 + 0,31 \times Tmext \quad (2)$$

Onde:

$Tmext$ = Temperatura média mensal do ar externo ($^{\circ}\text{C}$).

Quanto aos limites estabelecidos para o conforto térmico, foi utilizado o conforto adaptativo da Standard ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013) com 80% de aceitabilidade por parte dos usuários, levando em consideração o valor de temperatura neutra obtida através da equação acima, $+3,5^{\circ}\text{C}$ para o limite superior e $-3,5^{\circ}\text{C}$ para limite inferior. Para o clima de Pelotas, o limite superior não ultrapassa $29,06^{\circ}\text{C}$ e para o limite inferior, não é registrado um valor limite abaixo de $18,11^{\circ}\text{C}$ ao longo do ano. Desta forma, considerando os períodos mais extremos do ano, foi considerado $29,06^{\circ}\text{C}$ e $18,11^{\circ}\text{C}$ os limites aceitáveis para o ano. Assim, quando a temperatura interna operativa está acima ou abaixo dos limites de $29,06^{\circ}\text{C}$ e $18,11^{\circ}\text{C}$ o sistema de resfriamento ou aquecimento é acionado. Definiu-se que a temperatura de termostato de refrigeração 26°C e para aquecimento 22°C .

O usuário ativo utiliza o controle de iluminância, ou seja, quando o nível da luz natural for maior que 500 lux, o sistema de iluminação artificial desliga. Quando o nível de iluminância for menor que 500 lux, a iluminação artificial liga.

A edificação é ventilada somente durante o período de ocupação. Na Figura 20 são apresentados os critérios e sequência das condições de controle da ventilação natural para o usuário ativo.

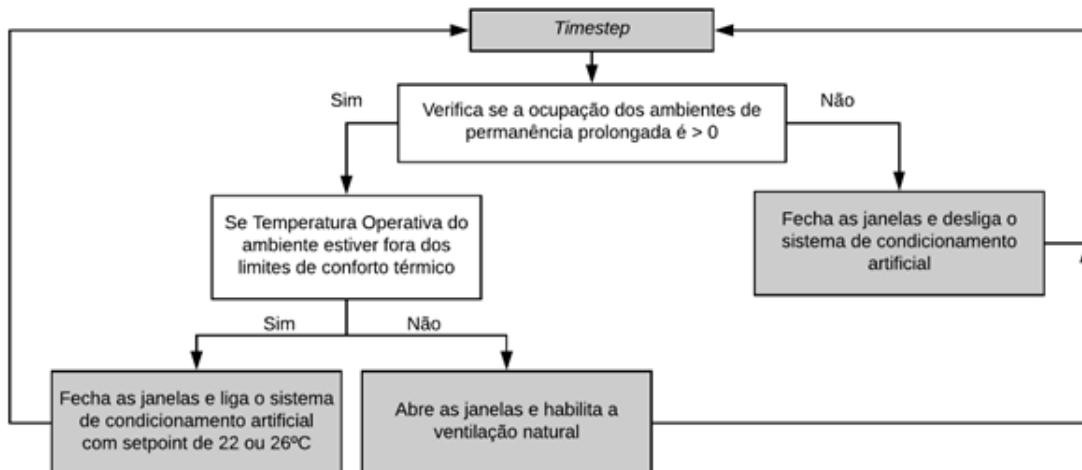


Figura 20 – Fluxograma do usuário ativo.

Os detalhes do usuário ativo são apresentados na Figura 21.

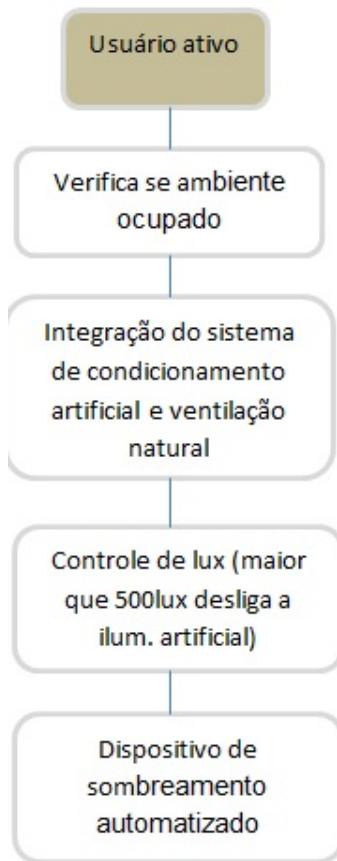


Figura 21 – Detalhes do usuário ativo.

3.7.3 Comportamento do Usuário Intermediário

O usuário intermediário ventila os ambientes buscando a melhor sensação térmica. Diferente da automação e do usuário ativo, a integração da ventilação natural e do sistema de condicionamento artificial é realizado por meio do objeto de ventilação híbrida do EnergyPlus. No período em que há ocupação na edificação, as persianas (dispositivos de sombreamento) permanecem totalmente abertas. O usuário intermediário mantém o sistema de iluminação artificial funcionando de maneira ininterrupta. Assim, este usuário não busca a integração com a luz natural. O funcionamento do sistema de condicionamento de ar também ocorre em situações pré-definidas para o usuário intermediário. Para aquecimento, o sistema entra em funcionamento assim que a temperatura interna atinge valores menores do que o limite inferior do conforto adaptativo da Standard ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013), enquanto que para o resfriamento, o sistema opera de acordo com o limite superior de conforto da mesma normativa. Desta forma, quando a temperatura operativa interna está acima ou abaixo da zona de conforto o usuário intermediário aciona o sistema de resfriamento ou aquecimento. A temperatura de termostato de resfriamento e para aquecimento foram as mesmas consideradas para o usuário ativo (Figura 22).

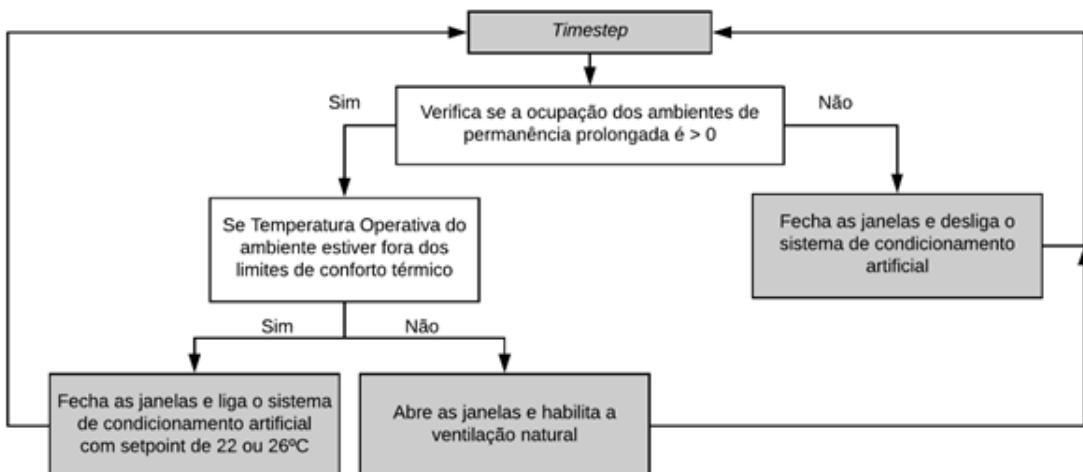


Figura 22 – Fluxograma do usuário intermediário.

No período em que há ocupação na edificação as persianas (dispositivos de sombreamento) permanecem totalmente abertas, bem como a utilização do sistema de iluminação artificial que fica sempre acionada. Este usuário, portanto, não busca a integração da iluminação artificial à luz natural. Detalhes na Figura 23.



Figura 23 – Detalhes do usuário intermediário.

3.7.4 Comportamento do Usuário Passivo

O usuário passivo representa ocupantes que não estão preocupados com as condições térmicas dos ambientes. O usuário passivo não utiliza estratégia passiva de condicionamento natural, ou seja, não ventila a edificação.

Da mesma forma que o usuário intermediário, o sistema de condicionamento artificial para aquecimento entra em funcionamento assim que a temperatura interna atinge valores menores do que o limite inferior do conforto adaptativo com 80% de aceitabilidade da Standard ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013), enquanto que para o resfriamento do edifício, o sistema opera de acordo com o limite superior da mesma normativa. A principal diferença do usuário passivo para o usuário intermediário está na busca pela sensação térmica de maneira rápida, para isso, este usuário aciona o condicionador de ar com setpoints de resfriamento e aquecimento que extrapolam os valores estabelecidos pelas normativas ou encontrados na literatura. Definiu-se que a temperatura de termostato de resfriamento 17°C e para aquecimento 28°C. A Figura 24 apresenta o fluxograma do usuário passivo.

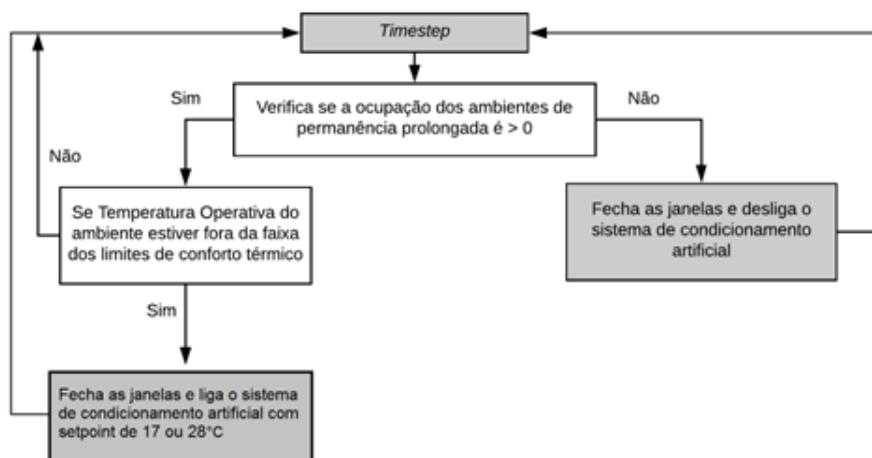


Figura 24 – Fluxograma do usuário passivo.

No período em que há ocupação na edificação as persianas (dispositivos de sombreamento) permanecem totalmente abertas, ou seja, o usuário passivo não se preocupa em sombrear o ambiente enquanto o ocupa. Da mesma forma que o usuário intermediário, o passivo utiliza apenas o sistema de iluminação artificial, sem buscar uma integração que reduza o uso da iluminação artificial através do uso da luz natural. Os detalhes do comportamento do usuário passivo são detalhados na Figura 25.

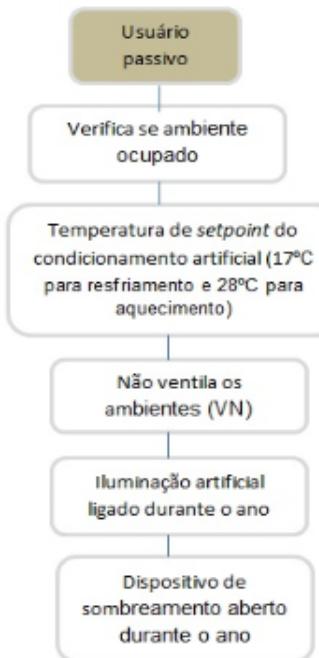


Figura 25 – Detalhes do usuário passivo.

3.8 Propriedades Térmicas dos componentes da envoltória

Os materiais dos componentes da envoltória, como paredes, cobertura, aberturas e piso, são os mesmos do edifício, disponibilizados no memorial descritivo.

As paredes internas e externas possuem a mesma composição. As paredes são compostas por argamassa de revestimento externo (2,5 cm), tijolo cerâmico de seis furos (9x14x19cm) , argamassa de revestimento interno (2,5cm).

A composição do piso possui um contrapiso (5cm), argamassa de nivelamento (2cm) e revestimento do tipo granitina. O piso das salas de aula possui uma camada de piso do tipo vinílico.

A cobertura do edifício possui composição telha de fibrocimento de 0,6cm e forro de laje de 10cm. Para a composição da cobertura do auditório possui telha tipo “sanduíche” metálica, trapezoidal de 0,65cm, isolamento térmico e acústico de poliuretano de 3cm e forro de gesso acartonado de 0,9cm.

As propriedades ópticas do vidro utilizado na composição são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades ópticas do vidro.

Vidro Simples	Espessura (m)	Transmitância		Refletância		Emissividade	Condutividade (W/m.K)
		Solar	Visível	Solar	Visível		
	0,005	0,775	0,89	0,071	0,08	0,84	0,9

3.9 Simulação do Desempenho Energético

Para analisar a influência do comportamento do usuário no desempenho energético de uma edificação pública de ensino foi adotado o programa EnergyPlus na versão 8.7. A edificação foi simulada com ventilação natural durante os períodos em que os ambientes atenderam as condições de conforto térmico. Por outro lado, nos períodos em que os ambientes não atenderam as condições de conforto térmico, os ambientes foram simulados com sistema de condicionamento artificial.

3.9.1 Estratégias de configuração do Energy Management System (EMS)

Utilizado na implementação do usuário ativo e do modelo automatizado, o EMS foi adotado como estratégia para o controle do sistema de ventilação (artificial e natural) e ocupação. Como sensores do EMS, 65 objetos foram criados para avaliar as condições de temperatura externa, temperatura operativa e ocupação dos ambientes de permanência prolongada. Como acionadores, 168 objetos foram criados a fim de verificar o comportamento de cada janela, bem como o acionamento do sistema de ar condicionado ou ventilação natural em cada um dos ambientes. Desta forma, o algoritmo do EMS verificou, com base nas condições descritas anteriormente para cada usuário, o comportamento de cada ambiente, tomando a decisão por fechar ou abrir as janelas, acionar ou não a ventilação natural ou o sistema de climatização artificial.

3.9.2 Padrão de ocupação, equipamentos e iluminação artificial

Por se tratar de um edifício de uma instituição de ensino, os horários de ocupação foram definidos entre 8h e 18h50, com intervalo das 11h40 às 13h30. O ambiente possui ocupação de 100% nos períodos definidos, com exceção do intervalo. Para o período noturno, a ocupação é das 19h às 22h40, nos dias letivos. Já para os finais de semana os ambientes não foram considerados ocupados, pois neste caso depende de prévia aprovação para o acesso. No período noturno, segundo mapa de salas do ano de 2018, três salas eram ocupadas, sendo duas salas de aula e um laboratório digital. O ambiente possui ocupação de 100% nos períodos definidos, com exceção dos intervalos. Foi considerado o recesso escolar, das 8h às 14h.

Com base nos valores fornecidos no projeto elétrico e constatado no levantamento foi possível calcular a densidade de potência de iluminação instalada em cada ambiente (DPI), através da soma da potência instalada de cada luminária e reatores dividido pela área do ambiente. É possível calcular a densidade de carga interna (DCI) de cada ambiente a partir da soma das potências dos equipamentos instalados, dividida pela área do ambiente. A taxa metabólica referente a uma pessoa sentada. Para a carga térmica proveniente de equipamentos e iluminação são variáveis, conforme levantamento in loco, apresentado Apêndice A. A Tabela 4 resume as cargas internas

dos modelos simulados.

Tabela 4 – Cargas térmicas dos modelos simulados.

Cargas Internas	Cargas Internas (W/m²)
Pessoas	60
Iluminação	Variável
Equipamentos	Variável

3.9.3 Calibração da simulação do consumo de energia elétrica

Para edifícios em fase de operação é necessário que a simulação passe por fase denominada calibração, ou seja, ajuste dos parâmetros de entrada de acordo com os dados reais do edifício para comparar o resultado simulado esteja de acordo com o real. A calibração do modelo computacional foi baseada nas contas de energia elétrica referentes ao ano de 2018. As contas de energia foram disponibilizadas pelo Proben, que faz o registro do consumo de energia de todos os edifícios da UFPel. Para fazer uma melhor comparação entre o modelo de simulação e o edifício real, no que diz respeito ao consumo de energia, é usual considerar-se período de doze meses. Assim, é possível comparar os consumos em todas as estações do ano (AZEVEDO; SANT'ANA, 2015). Não foi realizada medição de energia, portanto, não foi possível mensurar o consumo por uso final real.

3.9.4 Preparação para a calibração

As informações disponíveis acerca do edifício convertem-se em evidências a partir das quais a calibração se baliza. A Tabela 5 apresenta a lista com todas as evidências coletadas. A partir destas evidências, constrói-se um modelo inicial de simulação de consumo energético e com os ajustes necessários para a calibração, obtém-se um modelo, denominado de modelo base.

Tabela 5 – Lista das Evidências Coletadas.

Tipo de Evidência	Descrição
Levantamento Pontual	Levantamento e verificação física (pesquisa de campo) Tipo de lâmpadas do prédio e quantidade Identificação das características nominais nos splits, COP, capacidade de refrigeração/aquecimento, potência elétrica Identificação de áreas condicionadas Lista de equipamentos elétricos Fotografias
Entrevistas com professores/funcionários	Mapa de salas Funcionamento de equipamentos elétricos
Documento de instalação	projeto arquitetônico memorial descritivo
Normas, especificações e guias	NBR 15220-3 (2005) (ABNT, 2005)

A coleta de informações não se encerra nesta etapa, pois também é sugerida a busca por informações a partir de visitas in loco adicionais e conversas com funcionários e professores para refinamento das informações.

Foram utilizados o conjunto de materiais de acordo com o memorial descritivo, que definiu os tipos de materiais que foram usados na construção do prédio, como portas, janelas, vidros, parede, cobertura, entre outros detalhes construtivos. No memorial não especificou o tipo de vidro, simples ou duplo, transparente ou não. Todas as aberturas possuem dispositivo de sombreamento interno.

3.9.5 Ajuste baseado em evidências

Os ajustes baseados em evidências da fase inicial estão representados na Tabela 6. Pode-se perceber que prevê-se apenas ajustes nas cargas constantes e equipamentos de ar condicionado.

Tabela 6 – Revisão das Versões.

Versão	Mudança
Modelo Inicial	-
Modelo Intermediário	Alteração da densidade de equipamentos elétricos
Modelo Intermediário	Alteração da agenda de iluminação e equipamentos elétricos (inclusive o elevador)
Modelo Final	Alteração das características do ar condicionado e agenda

A Tabela 6 apresenta as alterações dos parâmetros de entrada dos modelos para comparar a resposta simulada com a sua resposta real, para verificar se a estimativa está de acordo com a realidade. Além disso, apresenta os ajustes necessários para obter o modelo final, denominado de modelo base. Desta forma, os dados de entrada são inseridos no programa de simulação e os resultados são analisados e comparados com dados de consumo. Se a diferença entre dados de consumo e simulados estiverem além de uma tolerância de erro recomendada, o modelo é ajustado e a simulação é executada novamente. Esse processo se repetiu até que fosse obtido o menor erro.

o caso de ausência de monitoramento no edifício, calibrações são feitas a partir de dados mensais (conta de energia). Para a determinação se a simulação está calibrada, ou não, são utilizados os limites preconizados pelas diretrizes de Medição e Verificação (MV). Para a ASHRAE (2002) e USDOE (2015), os limites correspondem para o Erro Sistemático Médio (ESM) , 5% na escala mensal e para o coeficiente de Variação do Erro Quadrático Médio, 15% na escala mensal e 30% na escala horária.

Os limites máximos aceitáveis desses indicadores de acordo com as três principais diretrizes de M & V estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Indicadores de qualidade para diferentes normas (SILVA, 2018)

Instrumentos Normativos	Resolução Mensal		Resolução Horária	
	ESM (%)	CV EQM (%)	ESM (%)	CV EQM (%)
Diretrizes - ASHRAE (2002)	± 5	15	± 10	30
Manual M & V- EVO (2011)	± 20	-	± 5	20
MANUAL M & V – USDOE (2015)	± 5	15	± 10	30

3.9.6 Consumo de Energia Real e Simulado

Os dados de consumo de energia do edifício fornecido pelo Proben, entre os meses de janeiro e dezembro de 2018, são apresentados na Figura 26.

No que diz respeito ao comportamento da curva do consumo real, na qual expõe

picos no período frio e quente do ano de 2018, meses de Julho e dezembro, com consumo de energia de 6.969KWh e 6.899KWh, respectivamente. Esses maiores consumos de energia, pode ser explicado, já que nesses períodos se intensificam o uso do ar condicionado, na função de aquecimento, período de inverno, e resfriamento, período de verão. Comparando-se os meses de julho e setembro, por exemplo, o aumento de 27,57% e entre os meses de dezembro e setembro, aumento de 26,83%. O mês de setembro encontra-se na estação amena. O mesmo pico não acontece para a simulação na qual foi considerado o recesso escolar em julho e final de dezembro até início de março. Vale ressaltar o elevado consumo no período de recesso escolar, mês de janeiro possui consumo de energia 3.168KWh e mês de fevereiro consumo de 4.585KWh. O elevado consumo pode ser explicado pelo andamento das atividades de pesquisa e pelo uso do sistema de condicionamento artificial no auditório, que possui dois condicionadores de ar com capacidade de 58.000 Btu/h cada, utilizado neste período para formaturas da instituição de ensino.

As duas curvas de consumo, real e simulada do edifício, entre os meses de janeiro e dezembro de 2018, são apresentadas na Figura 26. O consumo real de energia elétrica anual do edifício é 67.819KWh e o simulado de 68.134KWh, representa erro de 0,47%.

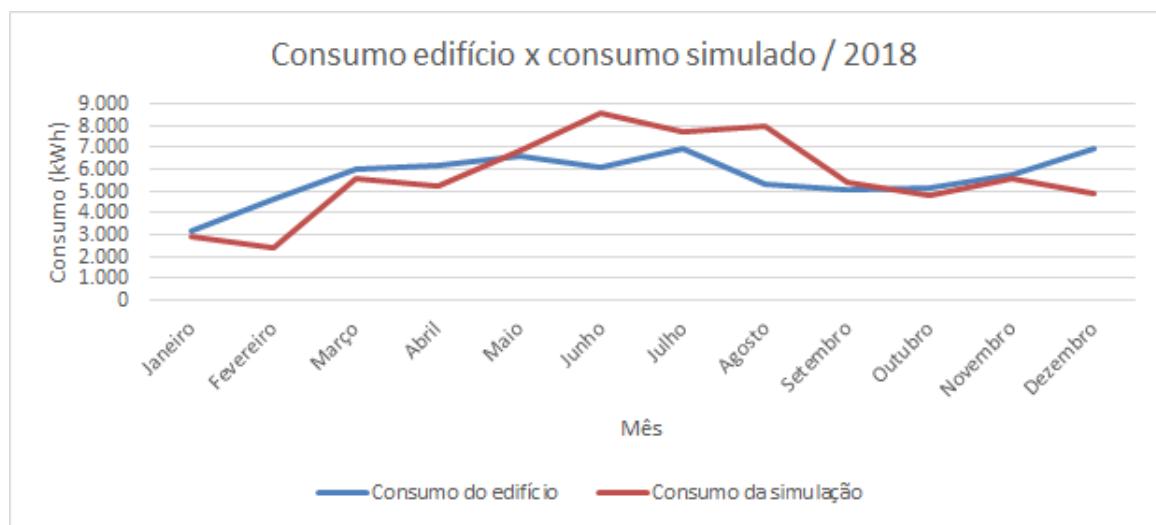


Figura 26 – Comparação de consumos Cearte e simulação.

Alguns dados podem não estar disponíveis para coleta, como a constituição de alguns componentes construtivos, ou podem ser difíceis de determinar, como a utilização de equipamentos e sistemas instalados em uma sala por seus ocupantes. Desta forma, a ferramenta de simulação deve ser utilizada apenas para ilustrar o perfil de comportamento da edificação e a diferença entre a mesma edificação em dois cenários distintos nas mesmas condições climáticas (FERNANDES, 2015).

Assim, considerando que todos os casos estarão sob mesmas condições físicas e

mesmo padrão de uso de equipamentos, alterando-se somente o padrão de uso dos sistemas de climatização, iluminação, ventilação e sombreamento, que são as variáveis efetivamente estudadas e analisadas, pode-se considerar que serão válidas as comparações de consumo anual dos casos simulados, tendendo estes a se aproximar do consumo anual real.

A partir da estimativa do uso final de energia, foi observado um potencial de economia de energia com iluminação e condicionamento de ar. No que diz respeito à distribuição dos consumos de energia, para os três usos finais principais, equipamentos, iluminação e condicionamento de ar, foi possível, a partir da simulação do modelo, obter a matriz de consumo desagregado do edifício. A Figura 27 apresenta a matriz de consumo desagregado.

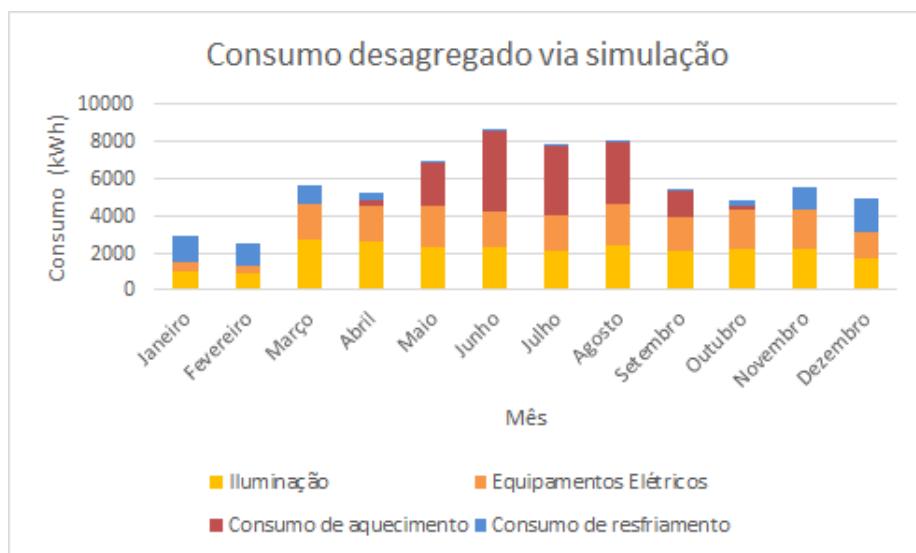


Figura 27 – Distribuição do consumo de energia por uso final.

Constata-se que o sistema de condicionamento artificial na edificação é utilizado praticamente todo o ano, com refrigeração no período de novembro a março, e aquecimento no período de maio a setembro. Com relação a abril e outubro, o sistema de ar condicionado é só eventualmente necessário, e talvez possa não ser acionado pelo usuário.

O que pode-se observar na Figura 28, é uma preponderância do consumo em 36% da iluminação do consumo total de energia, sobre os consumos de condicionamento de ar, 34%, e equipamentos, 30%. O consumo de energia anual do sistema de iluminação artificial é de 24.552KWh, equipamentos é de 20.515KWh e sistema de condicionamento artificial 22.789KWh, sendo para resfriamento 7.211KWh e para aquecimento 15.578KWh.

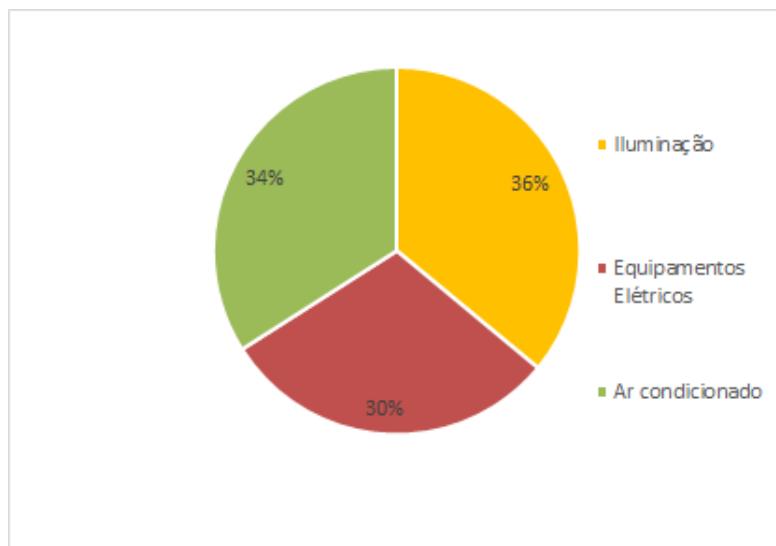


Figura 28 – Matriz desagregada de consumo de energia do modelo final.

3.9.7 Modelagem da Ventilação Natural

O trabalho aborda a modelagem da ventilação natural através do modelo de rede (AirFlowNetwork) no Energyplus. Para a modelagem da rede de ventilação natural é necessária a entrada de alguns parâmetros, como coeficiente de pressão(Cp), coeficiente de descarga(CD) e coeficiente de ar pelas frestas(Cq) .O programa EnergyPlus calcula os coeficientes de pressão através da equação de Swami e Chandra (1988) para edificações baixas. Santamouris (1998) e Liddament (1986), mencionam que o coeficiente de pressão (CP) é um parâmetro adimensional derivado empiricamente, que representa as mudanças de direção e pressão do vento, causado pelas influências das obstruções vizinhas nas características predominantes do vento local. O EnergyPlus não adota um valor padrão para o coeficiente de fluxo de massa de ar por frestas (CQ). Portanto, para este trabalho assumiu-se o valor do CQ=0,001 e n=0,65 como valores de referência do programa, esses valores são utilizados nos exemplos do programa.

Na literatura são apresentados diferentes coeficientes de descarga para diferentes tipos de aberturas. Allard e Alvarez (1998) o CD= 0,78 recomendado como valor médio. Aynsley (1999) define o valor médio do CD= 0,60 e o Clezar e Nogueira (1999) recomendam o CD=0,40 para aberturas com venezianas. A Tabela 8 apresenta a especificação dos parâmetros adotados na modelagem.

Tabela 8 – Especificação dos parâmetros adotados na modelagem.

Parâmetros	Valores
Coeficiente de Pressão	EnergyPlus
Coeficiente de Descarga	0,60
Coeficiente de frestas quando a janela está fechada	0,001; n=0,65

Foi criada uma agenda de ventilação durante a ocupação, com o setpoint de abertura de janelas de 23°C, conforme Sorgato (2015). Assim, quando a temperatura interna da zona for 23°C e a temperatura externa estiver menor que a interna até 5°C, as janelas abrem. A temperatura de setpoint de ventilação foi comparada com a de Martins et al. (2009) que sugeria 25°C para residências e, então, foram realizados testes para verificar a temperatura de controle da ventilação natural. O que apresentou melhor desempenho foi com base no trabalho do Sorgato (2015).

3.9.8 Integração da iluminação natural e artificial

São apresentadas as considerações que foram adotadas para a simulação da integração de iluminação natural e artificial.

3.9.8.1 Definição dos sensores de iluminância

Para aproveitamento da luz natural, foi proposto um sistema de dimmers com persianas internas automatizadas para os ambientes de permanência prolongada.

Foram definidos dois sensores, por ambiente de permanência prolongada, a uma altura de 0,75 m do piso, sendo que o sensor mais próximo da janela fica a uma distância de um quarto da profundidade do ambiente e o segundo a uma distância de três quartos da profundidade do ambiente. Esses sensores são necessários para que o programa calcule os níveis de iluminância e automatizam o sistema de iluminação artificial, que tem sua potência adequada de acordo com o aproveitamento de luz natural.

O nível de iluminância a ser mantido é 500 lux na superfície de trabalho, conforme recomenda a ABNT (2013). Para tanto, o sistema de iluminação consiste na integração da iluminação natural à artificial com controle dimmerizável e automatizado. Com a iluminação natural integrada à artificial, quando a luz natural garante a obtenção de 500 lux no plano de trabalho, a artificial é desligada. Por outro lado, nos momentos em que a luz natural for insuficiente, a iluminação artificial é acionada como complemento.

O método Split Flux, tipo de controle simulado no EnergyPlus, possui dois sensores que são controlados independentemente, sendo que cada sensor controla 50% da área da zona térmica. A Figura 29 expõe o controle de cada sensor.

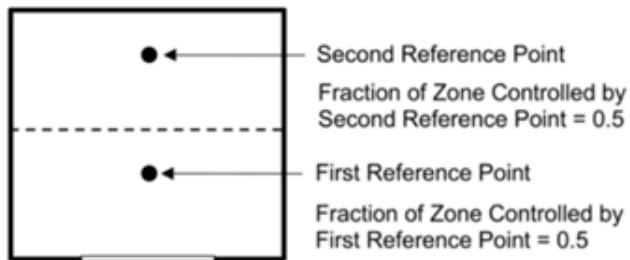


Figura 29 – Duas zonas de iluminação controladas independentemente, cada com 50% da área da zona térmica.

O método Split Flux não é recomendado para ambientes em que a profundidade medida a partir da janela seja maior que três vezes a altura do pé-direito. Nesse caso, o método pode superestimar em até duas vezes ou mais a iluminação interna refletida na parede dos fundos (WINKELMANN; SELKOWITZ, 1985). Os ambientes do edifício atendem ao quesito para utilização deste método.

3.10 Modelagem do sistema de condicionamento artificial

O sistema de condicionamento artificial (ar condicionado) foi modelado através do sistema Packaged Terminal Heat Pump (PTHP), no objeto HVAC: TemplateZone do EnergyPlus. O sistema modelado reproduz o desempenho de condicionadores de ar do modelo Split.

Os detalhes do sistema de condicionamento de ar são apresentados na Tabela 9, como: temperatura de termostato de resfriamento, aquecimento, taxa de fluxo de ar por pessoa, capacidade de refrigeração e aquecimento, razão entre o calor retirado ou fornecido para o ambiente em relação à energia consumida pelo equipamento de condicionamento (COP- Cooling Coil Rated, Heat Pump Heating Coil Rated).

Tabela 9 – Detalhes da modelagem do sistema de condicionamento artificial

Parâmetro	Condição
Termostato de resfriamento	26°C
Termostato de aquecimento	22°C
Taxa de fluxo de ar por pessoa	0,0075 (m ³ /s)
Modo de operação do ventilador	Contínuo
Efiéncia do ventilador	0,7
Efiéncia do motor	0,9
Pressão de ventilador	75 (Pa)
Capacidade de refrigeração	Auto dimensionamento
Capacidade de aquecimento	Autodimensionamento
COP de refrigeração	3,34 W/W
COP de aquecimento	3,34 W/W

De acordo com a NBR 16.401 (2008) o setpoint de temperatura adotado foi de 22°C para aquecimento e 26°C para a função de resfriamento. O coeficiente de desempenho(COP) utilizado na simulação é o mesmo dos equipamentos de ar condicionado instalados no edifício. Possuem nível A de eficiência energética.

Para realizar o autodimensionamento o EnergyPlus requer o dia de projeto para o inverno e o dia de projeto para o verão. A taxa de renovação do ar interior foi definida de acordo com a Norma RES-9 (resolução nº 9 de 16/01/2003) da ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária) que regulamenta que em ambientes climatizados é imprescindível garantir uma taxa de renovação do ar interior no mínimo de 27m³/h/pessoa. Essa taxa, segundo a NBR 16401-3 (2008), garante que 80% ou mais das pessoas que acabam de entrar no ambiente climatizado considerem a qualidade do ar interno (nível de odores) aceitável. Porém, como o EnergyPlus usa outra unidade de medida (m³/s/pessoa) foi necessário converter esse valor. Assim, o valor utilizado foi de 0,0075 m³/s/pessoa.

Por meio dos recursos de controles avançados do Energy Management System(EMS) foi realizado o controle da integração da estratégia de condicionamento passivo com o sistema de condicionamento artificial.

3.10.1 Configuração de temperatura do solo

As temperaturas do solo foram determinadas por meio do programa Slab, ferramenta vinculada ao EnergyPlus. Foi feita inicialmente simulação para estabelecer as temperaturas médias mensais do ar interno do edifício. Em seguida essas temperaturas foram usadas como entradas da rotina de pré-processador slab. A temperatura do solo é um parâmetro importante, devido a troca de calor entre o piso e solo. A modela-

gem da transferência de calor do solo é um aspecto que influencia consideravelmente os resultados das edificações naturalmente ventiladas (RACKES et al., 2015). Na Tabela 10 são apresentadas as temperaturas do solo.

Tabela 10 – Temperaturas do solo.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temp. do Solo °C	29	28	26	24	19	16	17	17	19	22	26	28

3.10.2 Modelagem do dispositivo de sombreamento das aberturas

Os dispositivos de sombreamento das aberturas foram modelados por meio de uma persiana vertical interna. No EnergyPlus a configuração foi realizada por meio do componente Interior Blind.

Os dispositivos internos de sombreamento são verticais de cor média. Este foi o tipo encontrado nas observações em campo e inserido nas simulações. O dispositivo de sombreamento deste tipo obstruem 100% da radiação direta e permitem a passagem de 25% da radiação difusa, quando estão completamente fechados (NIEMASZ, 2016).

3.10.3 Modelagem com ventilação Híbrida

Na estratégia de ventilação híbrida, as aberturas (utilizadas para ventilação natural) e o sistema de ar condicionado possuem funcionamento alternado a fim de evitar o consumo significativo de energia. Para tanto, os ambientes com sistema de condicionamento artificial, total de 18 ambientes, utilizam a estratégia de ventilação híbrida.

Para a modelagem de sistema de ventilação híbrida, o programa de simulação EnergyPlus possui o AvailabilityManager:HybridVentilation. O uso deste gestor impede que a ventilação mecânica e natural ocorra ao mesmo tempo e permite que os usuários examinem várias estratégias de ventilação para maximizar a ventilação natural, a fim de reduzir as cargas de aquecimento / resfriamento. Assim, fornece ao usuário a oportunidade de testar formas de controle (DOE, 2019). O controle entre os dois sistemas pode ser baseado na temperatura interna, externa, ponto de orvalho, entalpia, temperatura operativa usando os limites de conforto adaptativo de 80% e 90% de aceitabilidade e dióxido de carbono(CO₂).

O modo de controle baseado na temperatura operativa usando os limites de conforto adaptativo de 80% de aceitabilidade funciona da seguinte forma: é verificado se a temperatura operativa está dentro da faixa dos limites superior e inferior do conforto de 80% de aceitabilidade especificado na ASHRAE 55-2010, a ventilação natural é permitida e o sistema mecânico é desativado. Se a temperatura operativa está fora dos limites superior e inferior, a ventilação mecânica é acionada e a ventilação natural

é desativada. Caso a temperatura da zona está acima do limite superior de conforto de 80% de aceitabilidade as janelas são fechadas e o sistema de ar condicionado é acionado na função de resfriamento. Caso a temperatura da zona está abaixo do limite inferior da condição de conforto térmico as janelas são fechadas e o sistema de ar condicionado é acionado na função de aquecimento.

O controle do AvailabilityManager:HybridVentilation foi utilizado durante os dias letivos e no timestep estipulado. O valor de timestep estipulado foi de 4. Isso significa que foi utilizado quatro cálculos de transferência de calor a cada hora.

3.11 Controle da integração da ventilação natural e sistema de condicionamento artificial

Os recursos tradicionais de controle do EnergyPlus não possibilitam o controle avançado da integração da ventilação natural com o sistema de condicionamento artificial. Desta forma, não é possível estabelecer uma condição que fuja das agendas tradicionais para definir quando será desligado sistema de condicionamento artificial (SORGATO, 2015). Para realizar estas condições no programa de simulação é necessário utilizar os recursos de controle avançados, como o EMS ou a ventilação híbrida (modo misto).

O recurso do EMS foi adotado para controlar a integração da ventilação natural e do sistema de condicionamento artificial no EnergyPlus. Assim, o EMS foi usado para estabelecer a operação de modo misto e a programação implementada para controlar a abertura de janelas e o funcionamento do ar condicionado baseou-se nas seguintes condições:

- O sistema de ar condicionado é ligado e as janelas são fechadas quando a zona está ocupada e o sensor da zona indica que a temperatura operativa está fora dos limites superior e inferior(29°C e 18°C);
- O sistema de ar condicionado é desligado e as janelas são abertas quando a zona está ocupada, o sensor da zona indica que a temperatura operativa está dentro dos limites de 29°C e 18°C e a temperatura externa está abaixo da temperatura operativa da zona;
- O sistema de ar condicionado é desligado e as janelas são fechadas se a zona estiver desocupada.

No período que a temperatura interna do ambiente exceder o limite superior de conforto de 29 °C e o limite inferior de 18 °C para o clima de Pelotas, o algoritmo interrompe a simulação da estratégia de condicionamento natural, altera as condições e segue a simulação com o sistema de condicionamento artificial. Neste caso, para aquecimento,

o sistema entra em funcionamento assim que a temperatura interna atinge valores menores do que 18°C, enquanto que para resfriamento a temperatura interna operativa está acima da zona de conforto o sistema de resfriamento é acionado. Quando um dos ambientes de permanência prolongada não está sendo ocupado, o sistema de condicionamento de ar é desligado.

O algoritmo de controle da integração do sistema de ventilação natural à sistema de condicionamento artificial foi baseado no trabalho de Sorgato (2015). O fluxograma do algoritmo de controle do sistema de ventilação natural e condicionamento artificial foi apresentado anteriormente. Os resultados das simulações são apresentados a seguir.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados das simulações energéticas realizadas para verificar a influência do comportamento do usuário no desempenho energético de edificação escolar.

4.1 Análise dos resultados das simulações

4.1.1 Análise do consumo do sistema de condicionamento artificial

A primeira análise de consumo de energia é realizada entre os usuários para o consumo de condicionamento artificial.

A Figura 30 apresenta a variação de uso final de energia para condicionamento artificial para o usuário ativo, intermediário, passivo e com automação, considerando o consumo de aquecimento e o consumo de resfriamento.

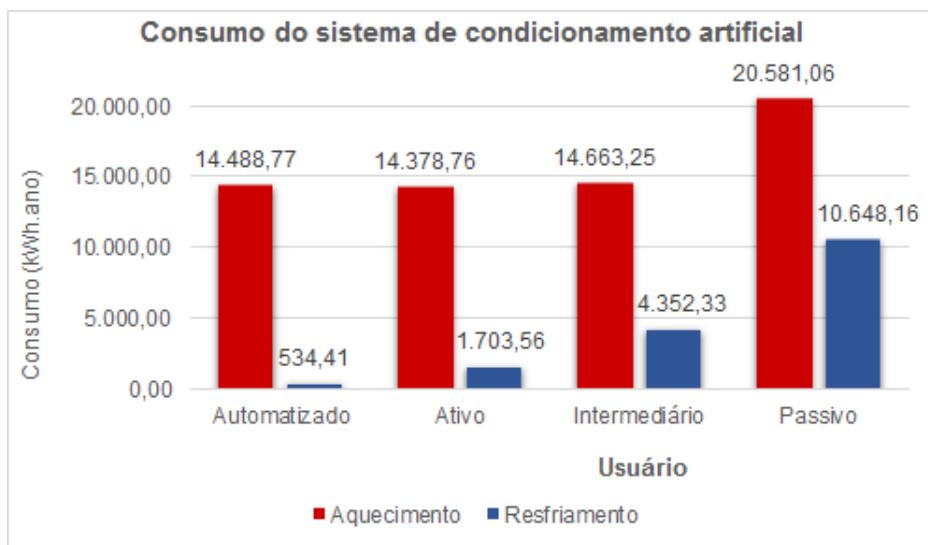


Figura 30 – Consumo anual do Sistema de Condicionamento Artificial.

De acordo com os resultados apresentados, percebe-se que o consumo anual de energia elétrica para aquecer os ambientes de permanência prolongada mantiveram-se elevados, mas inferiores ao modelo base. Relembrando que o consumo do modelo

base para aquecimento é de 15.578KWh e resfriamento 7.211KWh. A redução média do consumo de aquecimento é de 1.000KWh. Assim, as estratégias adotadas tiveram pouca influência para a redução do consumo de aquecimento. O elevado consumo de aquecimento ocorre devido a alta transmitância térmica das fachadas e cobertura, havendo maior perda de calor pelo edifício.

Entretanto, para resfriamento observa-se que há uma significativa redução no consumo de energia elétrica com os diferentes usuários. Neste sentido, comparando os usuários ativo e intermediário, uma redução em aproximadamente 61% do consumo foi obtida, em relação ao usuário intermediário. Já para o usuário intermediário e passivo, uma redução em aproximadamente 59% do consumo foi obtida, em relação ao usuário passivo. E para o usuário ativo e passivo, uma redução em 84% no consumo de resfriamento foi obtida, em relação ao usuário ativo. O usuário passivo alterou o setpoint da temperatura de resfriamento de 26 °C (modelo base, automatizado, usuários ativo e intermediário) para 17 °C e setpoint da temperatura de aquecimento de 22 °C para 28 °C. Assim, esta alteração nos setpoints de aquecimento e resfriamento ocasiona um aumento significativo no consumo de energia elétrica. Comparando ao caso base, o aumento do consumo de energia para aquecimento é de 132% e o para o resfriamento é de 148%. Demonstrando, desta forma, o impacto do setpoint de aquecimento e resfriamento no consumo de energia para condicionamento de ar.

As temperaturas mais altas do ar externo, mais o ganho de calor pelas cargas internas e a radiação solar incidente nas fachadas, faz com que parte das temperaturas operativas nas zonas nos meses mais quentes fique acima do limite superior para 80% de aceitabilidade nos casos simulados. Isso demonstra a necessidade da participação do condicionamento artificial para reduzir as temperaturas internas nas zonas, e mantê-las dentro da faixa de conforto.

A remoção de carga térmica da edificação através da ventilação natural contribui com a redução do consumo de energia para resfriamento decorrente da utilização de sistemas de condicionamento de ar.

No que se refere à automação, comparando-se o desempenho do modelo automatizado e o usuário ativo (melhor desempenho energético entre os usuários), o consumo de energia para aquecimento manteve-se praticamente constante. Por outro lado, ocorreu redução no consumo de energia de resfriamento do usuário ativo em relação ao modelo automatizado. A redução no consumo foi de aproximadamente 69%, comparando a automação em relação ao ativo. Para o automatizado, a redução no consumo de resfriamento foi de 88%, em relação ao intermediário. Já para o automatizado em relação ao passivo, obteve-se redução no consumo de 95%.

A redução significativa no consumo de energia com refrigeração do edifício automatizado pode ser explicado pela adoção de duas estratégias passivas simultaneamente (iluminação natural e ventilação natural). Assim, o consumo em iluminação

artificial diminuiu, devido ao aproveitamento da luz natural, o que conduz a uma redução na carga térmica interna do ambiente, proveniente da dissipação de calor das lâmpadas. Além disso, neste caso, a carga térmica interna do ambiente também é reduzida devido ao uso da ventilação natural e consequentemente, a temperatura interna. Deste modo, o consumo do sistema de condicionamento artificial na função de resfriamento é duplamente afetado. Entretanto, para o consumo de aquecimento, as estratégias adotadas tiveram pouca influência para a redução do consumo.

4.1.2 Análise do consumo de energia da iluminação artificial dos usuários e da automação

Esta análise de consumo de energia será realizada entre a automação e os usuários para o consumo de iluminação artificial para o ano inteiro de acordo com a Figura 31.

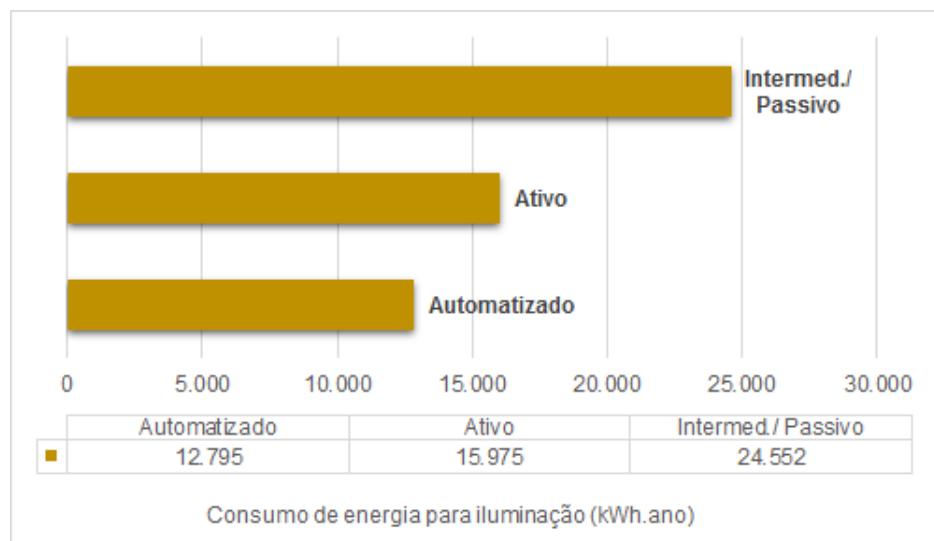


Figura 31 – Consumo anual do sistema artificial de iluminação.

O sistema de iluminação apresenta integração de luz natural à artificial, com controle dimmerizável, para o caso do edifício automatizado. Foram instalados dimmers, controle automático, em 22 ambientes. A redução do consumo de energia elétrica em iluminação artificial é de 48%. Para o usuário ativo, utiliza o controle de iluminância, a redução do consumo de energia em iluminação artificial é de 35%. O consumo em iluminação artificial diminui devido ao aproveitamento da luz natural. O controle de iluminância foi implementado nos mesmos 22 ambientes. Para o usuário intermediário e passivo o sistema de iluminação artificial permanece aceso durante o período de ocupação. Assim, pode-se afirmar que há uma significativa economia de energia elétrica quando utiliza-se da integração da iluminação artificial com a natural.

Convém destacar que, na Figura 31, 3.000kWh do consumo anual de energia elétrica é decorrente da iluminação dos corredores que fica ligada das 07h às 23h.

4.1.3 Análise dos consumos totais dos usuários e da automação

Esta análise de consumo de energia será realizada entre a automação e os usuários para o consumo total de energia apresentados na Figura 32.

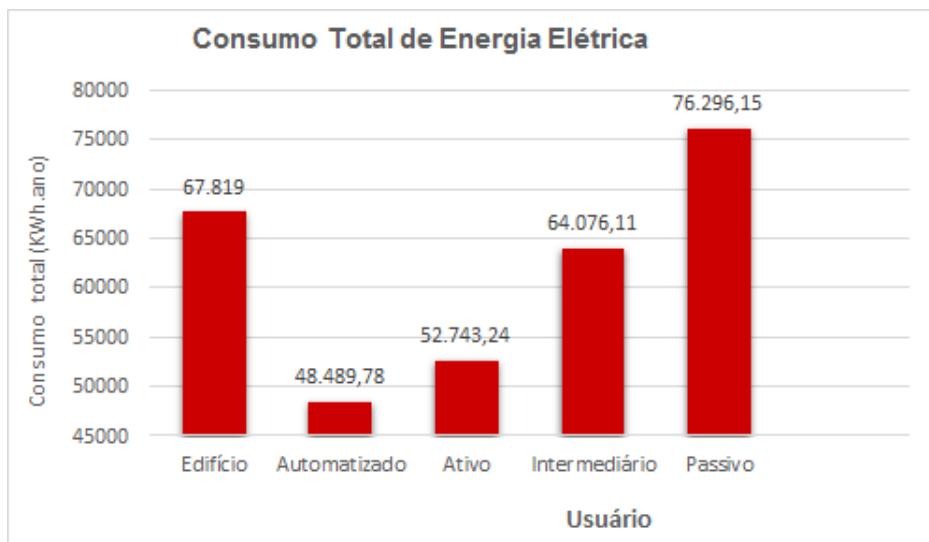


Figura 32 – Consumo de energia elétrica total dos usuários e da automação.

De acordo com a Figura 32, percebe-se redução de 8% no consumo total de energia do automatizado em relação ao usuário ativo. Para o automatizado em relação ao usuário intermediário, a redução no consumo total de energia foi de quase 25%. Já para o automatizado em relação ao passivo, a redução no consumo total de energia foi de aproximadamente 37%. O aumento no consumo total de energia elétrica do usuário passivo em relação ao usuário ativo foi de aproximadamente 145%, pois este não utiliza estratégias de condicionamento e iluminação naturais.

Através da análise dos consumos de energia, pode-se afirmar que, os usuários do edifício caracterizam-se entre o intermediário e o passivo, com tendência ao intermediário. Assim, percebe-se um indicador do potencial de economia de energia com educação do usuário.

4.1.4 Análise do uso do condicionamento artificial e natural

Para o uso do condicionamento artificial (aquecimento e resfriamento) e natural, com base na análise dos resultados da Figura 33, percebe-se enorme diferença nos resultados simulados para o ano inteiro, ou seja, 8760 horas. Para o modelo automatizado, verifica-se que o uso da ventilação natural foi maior e para uso de condicionamento artificial foi menor, quando comparado aos usuários. O uso da ventilação natural foi de 3019h, o que representa quase 35% de uso da estratégia natural e para o uso de condicionamento artificial foi de 546h, que representa quase 7% para o ano todo. O baixo uso do condicionamento artificial justifica o menor consumo de energia

elétrica.

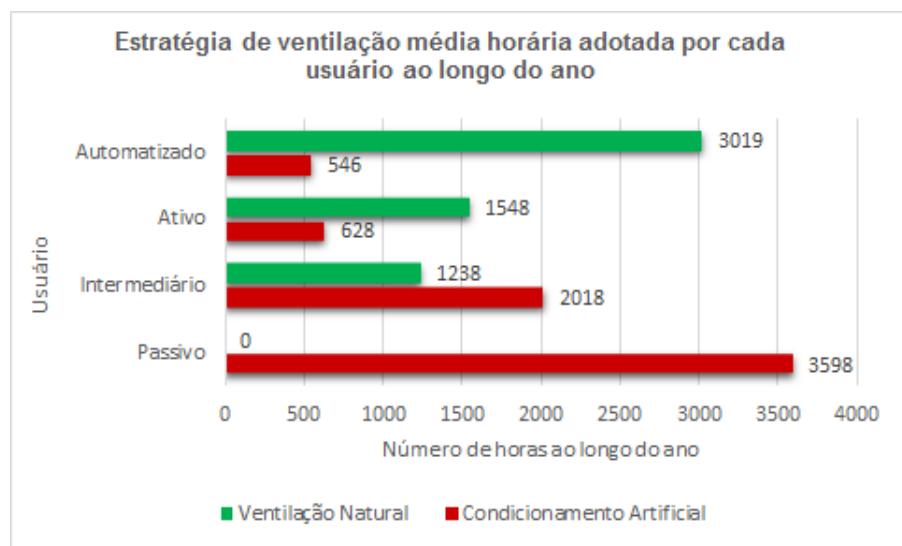


Figura 33 – Uso da ventilação natural e condicionamento artificial.

Analizando o uso da ventilação natural e condicionamento artificial do usuário ativo (melhor desempenho energético dos usuários) e automatizado, usuário ativo apresentou 51% menos uso de ventilação natural ao longo do ano e 13% mais no uso de condicionamento artificial, comparado ao automatizado. Mesmo com a redução de 51% do uso da ventilação natural ao longo do ano, representa um aproveitamento da ventilação natural equivalente a 193 dias e necessidade do ar condicionado em 66 dias (considerando 260 dias letivos no ano).

O uso da ventilação natural e do condicionamento artificial para o usuário ativo, intermediário e passivo, de acordo com a Figura 33, o usuário ativo é que mais usa a estratégia passiva de ventilação e menos utiliza o ar condicionado, motivo pelo qual o consumo de energia elétrica é o menor dentre os usuários. Comparando o usuário ativo e passivo no uso do condicionamento artificial percebe-se uma redução de quase 83%, em relação ao passivo. O usuário passivo não utiliza ventilação, assim, as janelas não foram abertas e, consequentemente, sem entrada do ar externo para auxiliar no resfriamento dos ambientes, houve um aumento do consumo com resfriamento desses.

Com a incorporação da ventilação híbrida, há uma redução no número de horas que o sistema de ar condicionado fica ligado e consequentemente no consumo de energia elétrica, quando comparado ao modelo base, evidenciando, desta forma, a importância do uso da estratégia de ventilação híbrida na redução do consumo de energia elétrica na edificação. Por outro lado, a redução do uso da ventilação natural aumenta a necessidade de condicionamento artificial, aumentando o consumo de energia elétrica.

4.1.5 Análise de geração FV

De acordo com o exposto no item 3.6, a geração de energia fica limitada a duas condições para o consumidor do Grupo A: área disponível para instalação dos módulos e demanda contratada junto a concessionária de energia. A demanda contratada é de 50 kW e a cobertura apresenta uma área disponível de 566,26m² para inserção de módulos. A radiação real é que incide no sistema proposto (desvio azimutal igual a 22 N e inclinação 10) e apresenta diferentes orientações, em virtude da cobertura analisada, voltada a leste e oeste. Assim, foram utilizadas 148 módulos com uma potência instalada de 47,36 kWp. Ressaltando, devido a orientação da cobertura, 74 módulos voltada a oeste (23,68 kWp) e 74 módulos voltada a leste (23,68 kWp)).

Para a escolha dos módulos, buscou-se por tecnologias cuja eficiência energética classificação possua nível A, para a avaliação do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). Sendo assim, o módulo adotado foi o Módulo Diamond CS6U-320P, marca Canadian Solar. A Tabela 11 apresenta as características elétricas do módulo utilizado.

Tabela 11 – Características elétricas do módulo. Canadian Solar.

Dados Elétricos	
Potência Nominal	320W
Tensão de Operação	36,6V
Corrente de Operação	8,61A
Tensão de Circuito Aberto	45,1V
Corrente de Curto Circuito	9,18A
Eficiência	16,20%

A Tabela 12 expõe e compara para cada mês a quantidade de energia consumida do ano inteiro para o caso simulado frente à geração de energia solar FV, de acordo com a potência instalada e assim chega-se aos períodos que há excedente de energia.

Tabela 12 – Geração, consumo e compensação de energia elétrica.

Mês	Energia Gerada (KWh)	Energia Consumida fora de ponta (KWh)	Energia Consumida ponta (KWh)	Excedente de energia
Jan	7869	2652	230	4987
Fev	6763	2185	392	4186
Mar	5914	5132	600	168
Abr	4507	4650	574	
Mai	3659	6318	549	
Jun	2768	7627	942	
Jul	3083	6881	850	
Ago	3946	7137	793	
Set	5592	4957	430	
Out	6078	4405	383	1106
Nov	7246	4986	554	1442
Dez	8004	4344	537	2867

A análise da Tabela 13 mostra que, não é possível gerar toda a energia anual consumida pela instalação, nem tampouco há excedente de energia. Por outro lado, a energia gerada supre aproximadamente 93% do consumo total anual. Destaca-se que a energia consumida total no horário de ponta leva em conta o fator de ajuste do consumo.

Tabela 13 – Estimativa de geração e consumo de energia anual.

Energia Gerada (KWh)	Energia Gerada (KWh)	Energia medida fora de ponta (KWh)	Consumo medida ponta (KWh)	Energia medida ponta (KWh)	Consumo medida ponta (KWh)	Excedente de energia
65430	61274	6848		70919		-

4.2 Viabilidade Econômica

Foram solicitados orçamentos a empresas para verificar os custos de implantação da automação com o intuito de analisar a viabilidade financeira, ou seja, se seria economicamente viável. Dos orçamentos solicitados, dois são de empresa que atua na instalação dos equipamentos na região de Pelotas e um de outro estado. O edifício automatizado possui cortinas/persianas rolô, sensor de luminosidade (dimmer) e a

ventilação natural controlada. O sistema de ventilação natural controlada possui atuadores elétricos (abre e fecha a abertura), sensor de temperatura interna e externa, sensor de chuva e demais dispositivos do sistema. Já para automação das persianas existentes no edifício, devem ser substituídas por cortina do tipo rolô. De acordo com a empresa a persiana existente não pode ser automatizada. A cortina rolô possui tela solar 5% sem bandô. Para a integração da luz natural à artificial, através do sensor de luminosidade(dimmer), o sistema possui uma central de automação, sensor de luminosidade, entre outros dispositivos.

Do total de ambientes do edifício, 18 são condicionados artificialmente, 22 possuem sensores de luminosidade (dimmer). Com relação as cortinas rolô, 70 aberturas foram automatizadas. O investimento total para automatizar o edifício é de R\$ 518.648,00 (quinhentos e dezoito mil seiscentos e quarenta oito reais), valor inclui a instalação. Apesar do elevado investimento inicial houve uma redução significativa no consumo de energia elétrica, economia de 19.330 kWh. Tabela 14 apresenta os valores obtidos através de orçamentos.

Tabela 14 – Valores obtidos pelos orçamentos de empresa de Pelotas e de outro estado.

Automação	Custo unitário (R\$)	Investimento (R\$)
Sensor luminosidade (dimmer)	6.484,00	142.648,00
Cortina rolô	3.000,00	210.000,00
Ventilação natural controlada	-	166.000,00
Total		518.648,00

Também foi verificado o custo de implantação de um sistema de geração solar FV. Para tanto, o custo levantado tem como referência o estudo sobre ‘O mercado brasileiro de geração distribuída fotovoltaica’. O estudo disponibiliza os valores fornecidos pelas empresas, ano de 2018, de acordo com a faixa de potência nominal e por região (IDEAL, 2019).

A tabela 15 apresenta o investimento da geração FV para o modelo base, consumo similar ao real, e o usuário ativo (melhor desempenho energético), consumo de energia 52.743 kWh, redução no consumo de 15.071 kWh, em relação ao consumo real do edifício. Como é possível observar, o investimento do sistema de geração FV para o modelo base é de R\$ 201.754,00 (duzentos e um mil reais setecentos cinquenta e quatro reais) e para o usuário ativo R\$ 164.155,00 (cento e sessenta quatro reais e cento cinquenta cinco reais). Houve uma diminuição no investimento para o sistema de geração FV de quase 19%.

Tabela 15 – Custos da geração FV para o caso base,usuário ativo e automatizado.

Geração Solar FV	Investimento (R\$)
Caso Base	201.754,00
Usuário Ativo	164.155,00
Automatizado	150.774,00

Ainda de acordo com a tabela, além da diminuição no custo de implantação de um sistema de geração FV, no caso para usuário ativo, consumo de energia menor, é possível gerar toda a energia anual consumida. No caso da implantação de um sistema de geração com capacidade estimada anual de 65.430kWh, haveria um excedente de 10.687kWh, que poderia ser utilizada no prazo de 60 meses ou compensado em outra unidade consumidora da instituição de ensino.

Comparando o investimento para a geração FV e a automação, o investimento para automatizar o edifício é 259% maior ou duas vezes e meia comparado ao sistema de geração de energia.

5 CONCLUSÕES

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a influência do comportamento dos usuários na eficiência energética de edifício de ensino situado em Pelotas-RS. A influência do comportamento do usuário foi analisada por meio de simulação. Para tanto, recorreu-se à literatura para criar cenários de comportamento de usuário. Foram criados três padrões de comportamento de usuários em relação às interações com as estratégias adaptáveis no edifício: ativo, intermediário e passivo. Além dos três cenários de usuários, foi realizada a automação do edifício.

O consumo de energia para condicionamento artificial, comparando os usuários ativo e intermediário, alcançou uma redução de aproximadamente 61% do consumo, em relação ao usuário ativo. Já entre o usuário intermediário e passivo, uma redução em aproximadamente 59% do consumo foi obtida, em relação ao usuário passivo. E para os usuários ativo e passivo, uma redução de 84% no consumo de resfriamento foi obtida em relação ao usuário passivo. Convém ressaltar que o usuário passivo alterou o setpoint da temperatura de resfriamento de 26°C para 17°C e setpoint da temperatura de aquecimento de 22°C para 28°C. Comparando o consumo de energia para resfriamento no edifício automatizado em relação ao usuário ativo (melhor desempenho energético), a redução no consumo foi de aproximadamente 69%. O edifício automatizado utiliza duas estratégias passivas simultaneamente (iluminação natural e ventilação natural). Assim, o consumo em iluminação artificial diminui, devido ao aproveitamento da luz natural, o que conduz a uma redução na carga térmica interna do ambiente, proveniente da dissipação de calor das lâmpadas e há redução da carga térmica devido ao uso da ventilação natural.

Para o consumo de energia da iluminação artificial, a redução anual do consumo de energia elétrica em iluminação artificial é de 48%, no caso o automatizado. Para o usuário ativo, que utiliza o controle de iluminância, a redução do consumo de energia em iluminação artificial é de 35%.

O consumo total de energia dos usuários variou mais de 30%. Considerando o consumo dos diferentes usuário ativo (52.743kWh), intermediário (64.076kWh) e usuário passivo (76.296kWh) e comparando com o consumo real do edifício (67.814kWh),

percebe-se que os usuários do edifício caracterizam-se entre o intermediário e o passivo, com tendência ao intermediário. Esta caracterização pode ser vista como um potencial de intervenção e educação, com incentivos ao uso eficiente de energia. Assim, obtém-se um indicador do potencial economia de energia através do usuário.

Conforme a bibliografia já apontava, a postura do usuário determina o consumo de energia na edificação. Porém, através deste estudo foi possível verificar o quanto esta postura do usuário pode influenciar no consumo energético de um prédio público de ensino superior.

Além disso, foi possível observar que estratégias passivas de condicionamento apresentam potencial sob o ponto de vista energético para edifícios de ensino. Entretanto, se não forem utilizadas de forma correta por seus usuários, podem se tornar ineficientes ou insuficientes.

Assim, também foi avaliada a hipótese de automação do edifício, reduzindo a influência do comportamento do usuário. A automação proporcionou os melhores resultados de consumo de energia, reduzindo o uso da climatização artificial e potencializando o uso do condicionamento natural. Além de apresentar redução de consumo de quase 40%, a atuação da automação ainda poderia ser ampliada às horas que o edifício não está ocupado, proporcionando o resfriamento a noite por meio da ventilação noturna.

Entretanto, por tratar-se de retrofit, adaptando-se um sistema de automação em um prédio existente, os custos de implantação praticamente a tornam inviável neste cenário, no qual o investimento em geração solar FV apresenta-se muito mais atraente e viável.

Com relação a geração FV, pôde-se observar que o perfil do usuário irá influenciar significativamente nos custos de instalação e, consequentemente, no tempo de retorno do investimento. Para o usuário ativo, melhor desempenho dos usuários, a energia consumida poderá ser toda gerada pelo sistema FV, além de obter um excedente de energia que poderá ser compensado em outra instalação da universidade. A possibilidade de gerar quase toda a energia consumida, além de reduzir o custo que a universidade deve pagar à concessionária, possibilitará a instituição dispor de mais recursos para aplicação nas atividades fins. Disso também pode-se concluir que a instalação de geração FV, sem uma precedente educação do usuário, irá custar mais, encobrir desperdícios e, o que é pior, estimular o mau uso da energia por parte dos usuários.

Cabe ressaltar que os resultados do presente estudo se referem a edificação de ensino, em que a ventilação natural e o sistema de ar condicionado funcionaram com a condição de ventilação seletiva, realizada precisamente nas condições preestabelecidas. Diferentes características construtivas, cargas térmicas internas e de ocupação podem influenciar nos resultados obtidos.

5.1 Limitações do Trabalho

Esta pesquisa apresenta as seguintes limitações:

- Não foi realizada medição de consumo de energia para identificar o consumo desagregado de energia e verificar possíveis desperdícios de energia, como luzes que ficam acesas e ar condicionado ligado;
- Não foi realizada monitoramento do usuário, para verificar o perfil do usuário do edifício;
- Cada perfil de usuário é representado estaticamente, comportando-se todo tempo, sempre da mesma forma;
- Utilizou apenas uma edificação como amostra da influência do usuário;
- Não realizou mais do que um orçamento para a automação, tampouco considerou qual seria o custo, caso a automação já estivesse na concepção do projeto;
- Na simulação computacional da edificação não foi considerado o entorno.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

No intuito de complementar este trabalho, sugerem-se alguns trabalhos que poderiam ser realizados:

- Realizar levantamentos de comportamento dos usuários com medições nos ambientes;
- Aplicar a metodologia em outras edificações com diferentes características de envoltória e em outros climas;
- Desenvolver estudos em ambientes reais, com automação e usuários em interação com os dispositivos e sistemas de ajuste das condições de conforto térmico e visual.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. **Rio de Janeiro**, [S.I.], 2005.
- ACKERLY, K.; BRAGER, G. Window signalling systems: control strategies and occupant behaviour. **Building Research & Information**, [S.I.], v.41, n.3, p.342–360, 2013.
- ALLARD, F. **National Ventilation in Buildings**: A Design Handbook. [S.I.]: James & James, Science Publisher Ltd, London, 1998.
- ANEEL. **Programa de Eficiência Energética** - ANEEL. Acessado em 30 de Setembro de 2020, Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/programa-eficiencia-energetica>.
- ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482**. Acessado em 30 de Setembro de 2020, Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>.
- ASHRAE. **Standard 55-2013 - Thermal environmental conditions for human occupancy**. [S.I.]: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2013.
- AYNSLEY, R. Unresolved issues in natural ventilation for thermal comfort. In: HYB-VENT FORUM'99, 1999. **Anais...** [S.I.: s.n.], 1999.
- AZEVEDO, E. A. N.; SANT'ANA, D. Caracterização dos usos-finais do consumo de água em edificações do Setor Hoteleiro de Brasília. **Revista de Arquitetura IMED**, [S.I.], v.3, n.2, p.156–167, 2015.
- BAVARESCO, M. V. **INFLUÊNCIA DA INTERAÇÃO DOS USUÁRIOS COM ELEMENTOS INTERNOS DE SOMBREAMENTO NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES COMERCIAIS**. 2016. 158p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC., Florianópolis.
- BENEDETTO, G. S. **Avaliação da aplicação do modo misto na redução da carga térmica em edifícios de escritórios nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro**.

2007. 203p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Arquitetura) — Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo., São Paulo.

BONTE, M.; THELLIER, F.; LARTIGUE, B. Impact of occupant's actions on energy building performance and thermal sensation. **Energy and Buildings**, [S.I.], v.76, p.219–227, 2014.

BRAGER, G. Mixed-mode cooling. , [S.I.], 2006.

BRAGER, G.; BAKER, L. Occupant satisfaction in mixed-mode buildingsProceedings of Conference: Air Conditioning and the Low Carbon Cooling Challenge. **Anais... Cumberland Lodge: Windsor, UK**, [S.I.], p.27–29, 2008.

BRAGER, G.; BORGESON, S.; LEE, Y. Summary report: control strategies for mixed-mode buildings. , [S.I.], 2007.

BRANDAO, G. C. Estudo de caso do sistema de iluminação da Escola de Arquitetura da UFMG: análise do uso de energia e de medidas de conscientização. , [S.I.], 2015.

BRASIL. **Fatores de emissão de CO2 para utilizações que necessitam do fator médio de emissão do Sistema Interligado Nacional do Brasil, como, por exemplo, inventários corporativos**. Acessado em 30 de Setembro de 2020, Disponível em: <http://mct.gov.br>.

CÂNDIDO, C.; DE DEAR, R.; LAMBERTS, R.; BITTENCOURT, L. Cooling exposure in hot humid climates: are occupants 'addicted'? **Architectural Science Review**, [S.I.], v.53, n.1, p.59–64, 2010.

CBCS. **Diretrizes de Ação**. Acessado em 30 de Setembro de 2020, Disponível em: http://www.cbcs.org.br/_5dotSystem/userFiles/Sobre%20CBCS/CBCS_Diretrizes%20de%20Acao_rev1.pdf.

CLEFF, V. M.; SILVA OLIVEIRA, L. da; DUTRA, L. P.; SALAMONI, I. APLICAÇÃO DE SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO EM INSTITUIÇÃO FEDERAL DE ENSINO SUPERIOR NO EXTREMO SUL DO BRASIL. , [S.I.], 2018.

CLEZAR, C. A.; NOGUEIRA, A. C. R. **Ventilação industrial**. [S.I.]: Editora da UFSC, 1999.

COUNCIL, U. G. B. **Green building design and construction**: LEED reference guide for green building design and construction. [S.I.]: US Green Building Council, 2009.

CRAWLEY, D. B.; LAWRIE, L. K.; PEDERSEN, C. O.; WINKELMANN, F. C. Energy plus: energy simulation program. **ASHRAE journal**, [S.I.], v.42, n.4, p.49–56, 2000.

DE DEAR, R. J.; BRAGER, G. S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. **Energy and buildings**, [S.I.], v.34, n.6, p.549–561, 2002.

DE VECCHI, R.; CÂNDIDO, C.; LAMBERTS, R. Thermal history and its influence on occupants' thermal acceptability and cooling preferences in warm-humid climates: a new desire for comfort. In: WINDSOR CONFERENCE: THE CHANGING CONTEXT OF COMFORT IN AN UNPREDICTABLE WORLD CUMBERLAND LODGE, WINDSOR, UK, 7., 2012. **Proceedings...** [S.I.: s.n.], 2012. v.1215.

DEBIASI, R. **Análise da estratégia de ventilação híbrida para a redução do consumo de energia elétrica em edificações comerciais para o clima de Florianópolis**. 2016. 228p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC., Florianópolis.

DIDONÉ, E. L.; PEREIRA, F. O. R. O potencial da luz natural na economia de energia elétrica para a iluminação artificial. **Revista Tecnológica**, [S.I.], p.25–35, 2009.

DIDONÉ, E. L.; PEREIRA, F. O. R. Simulação computacional integrada para a consideração da luz natural na avaliação do desempenho energético de edificações. **Ambiente Construído**, [S.I.], v.10, n.4, p.139–154, 2010.

DOE. v8.1 Input/output reference: The encyclopedic reference to EnergyPlus input and output. **US Department of Energy**, [S.I.], 2013.

DOE. v8.7 Input/output reference: The encyclopedic reference to EnergyPlus input and output. **US Department of Energy**, [S.I.], 2019.

EBC. **EBC Annex 66 Text - Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings**. Acessado em 30 de Setembro de 2020, Disponível em: https://annex66.org/sites/default/files/pictures/EBC%20Annex%2066%20Text_0.pdf.

EMMERICH, S. J. Simulated performance of natural and hybrid ventilation systems in an office building. **Hvac&R Research**, [S.I.], v.12, n.4, p.975–1004, 2006.

EPE, E. D. P. E. Balanço energético nacional 2017: ano base 2016. **Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE**, [S.I.], 2017.

FABI, V.; ANDERSEN, R. V.; CORGNATI, S.; OLESEN, B. W. Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models. **Building and Environment**, [S.I.], v.58, p.188–198, 2012.

- FERNANDES, L. O. **Procedimento para retrofit do desempenho termoenergético de edifícios de ensino através da aplicação de estratégias passivas de condicionamento.** 2015. 193p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Campinas, Unicamp, Campinas.
- FOSTER, M.; ORESZCZYN, T. Occupant control of passive systems: the use of Venetian blinds. **Building and Environment**, [S.I.], v.36, n.2, p.149–155, 2001.
- GHISI, E.; TINKER, J. A.; IBRAHIM, S. H. Área de janela e dimensões de ambientes para iluminação natural e eficiência energética: literatura versus simulação computacional. **Ambiente Construído**, [S.I.], v.5, n.4, p.81–93, 2005.
- GUL, M. S.; PATIDAR, S. Understanding the energy consumption and occupancy of a multi-purpose academic building. **Energy and Buildings**, [S.I.], v.87, p.155–165, 2015.
- HAZBOUN, V. D. **Desempenho da luz natural em ambientes com aberturas voltadas para leste considerando a influência dos usuários.** 2018. 117p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- HOYT, T.; ARENS, E.; ZHANG, H. Extending air temperature setpoints: Simulated energy savings and design considerations for new and retrofit buildings. **Building and Environment**, [S.I.], v.88, p.89–96, 2015.
- IDEAL, I. **O Mercado Brasileiro de Geração Distribuída FV - Edição 2019.** Acessado em 30 de Setembro de 2020, Disponível em: https://issuu.com/idealeco_logicas/docs/o_mercado_brasileiro_de_gera_o_distribu_da_fv_-e.
- INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicos, RTQ-C.** [S.I.]: Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, Rio de Janeiro, 2010.
- INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, RTQ-R.** [S.I.]: Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, Rio de Janeiro, 2012.
- JANDA, K. B. Buildings don't use energy: people do. **Architectural science review**, [S.I.], v.54, n.1, p.15–22, 2011.
- JURADO, S. R.; BANKOFF, A. D.; SANCHEZ, A. Indoor air quality in Brazilian universities. **International journal of environmental research and public health**, [S.I.], v.11, n.7, p.7081–7093, 2014.

- LEITZKE, R. K. et al. Optimization of the Traditional Method for Creating a Weather Simulation File: The Pelotas. epw Case. **JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE (ONLINE)**, [S.I.], v.12, p.741–756, 2018.
- LI, D. H. A review of daylight illuminance determinations and energy implications. **Applied Energy**, [S.I.], v.87, n.7, p.2109–2118, 2010.
- LIDDAMENT, M. W. **Air infiltration calculation techniques**: An applications guide. [S.I.]: Air infiltration and ventilation centre Berkshire, UK, 1986.
- MAHDAVI, A. In the matter of simulation and buildings: some critical reflections. **Journal of Building Performance Simulation**, [S.I.], v.13, n.1, p.26–33, 2019.
- MARCONDES, M. P. et al. Conforto e desempenho térmico nas edificações do novo centro de pesquisas da Petrobras no Rio de Janeiro. **Ambiente Construído**, [S.I.], v.10, n.1, p.7–29, 2010.
- MARTINS, D. J. et al. Ensaio sobre a utilização da automação de aberturas na simulação do desempenho térmico de edificações. **X ENCAC. Anais do evento. Natal**, [S.I.], 2009.
- MMA. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente. **br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>. Acesso em: 01 de Outubro de 2020**, [S.I.], v.25, 2015.
- MOEZZI, M.; JANDA, K. B. From “if only” to “social potential” in schemes to reduce building energy use. **Energy Research & Social Science**, [S.I.], v.1, p.30–40, 2014.
- NBR, A. 16401. **Instalações de ar condicionado–Sistemas centrais e unitários–Parte**, [S.I.], v.1, 2008.
- NIEMASZ, J. **DIVA for Rhino**: Environmental Analysis for Buildings.
- O'BRIEN, W. Occupant-proof buildings: can we design buildings that are robust against occupant behaviour. In: CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION, 13., 2013. **Anais...** [S.I.: s.n.], 2013. p.1746–1754.
- PASQUIER, S. B.; SAUSSAY, A. Progress Implementing the IEA 25 Energy Efficiency Policy Recommendations. , [S.I.], 2012.
- PEREIRA, F. A. **Influencia da Estratégia de Ventilação Natural no Desempenho Termoenergético de Edifícios de Escritórios de Modo Misto**. 2019. 161p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) — Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

PLAZAS, F. L. Sobre el uso y la gestión como los factores principales que determinan el consumo de energía en la edificación: una aportación para reducir el impacto ambiental de los edificios. , [S.I.], 2006.

PROCEL. **Relatório de resultados do Procel 2017 - Ano base 2016.** Acessado em 30 de Setembro de 2020, Disponível em: http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2017/docs/rel_procel2017_web.pdf.

RACKES, A. et al. Avaliação do potencial de conforto térmico em escolas naturalmente ventiladas. **XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. Anais...** São Paulo/SP. Universidade de São Paulo, [S.I.], p.2–10, 2015.

ROAF, S. et al. Twentieth century standards for thermal comfort: promoting high energy buildings. **Architectural Science Review**, [S.I.], v.53, n.1, p.65–77, 2010.

RUPP, R. F.; GHISI, E. Potencial de economia de energia elétrica em edificações comerciais híbridas localizadas em Florianópolis, SC. **Ambiente Construído**, [S.I.], v.13, n.1, p.143–160, 2013.

SATISH, U. et al. Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance. **Environmental health perspectives**, [S.I.], v.120, n.12, p.1671–1677, 2012.

SCHNEIDER, P. Comportamento do usuário quanto a energia eletrica estudo de caso nas salas do Campus Anglo-UFPel. Congresso de Iniciação Científica - CIC - UFPel. , [S.I.], 2019.

SE4ALL. **Sustainable Energy for All 2013-2014** : Global Tracking Framework. Acessado em 30 de Setembro de 2020, Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/16537>.

SIGNORINI, V. B. **O aproveitamento da luz natural em prédios públicos administrativos:** Estudo de caso em prédio da UFPel. 2015. 220p. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

SILVA, P. P. F. d. **Calibração do consumo de energia elétrica simulado por um modelo EnergyPlus:** estudo de caso do Hospital Universitário da Universidade de São Paulo. 2018. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) — Universidade de São Paulo.

SOEBARTO, V. I.; DEGELMAN, L. A calibration methodology for retrofit projects using short-term monitoring and disaggregated energy use data. , [S.I.], 1996.

- SORGATO, M. J. **A influência do comportamento do usuário no desempenho térmico e energético de edificações residenciais.** 2015. 260p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC., Florianópolis.
- SOUZA, M. B. **Potencialidade de aproveitamento da luz natural através da utilização de sistemas automáticos de controle para economia de energia elétrica.** 2003. 234p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- SWAMI, M.; CHANDRA, S. Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow. **ASHRAE transactions**, [S.I.], v.94, n.3112, p.243–266, 1988.
- VAN DEN WYMELENBERG, K. Patterns of occupant interaction with window blinds: A literature review. **Energy and Buildings**, [S.I.], v.51, p.165–176, 2012.
- VECCHI, R. de. **Avaliação de conforto térmico em edificações comerciais que operam sob sistemas mistos de condicionamento ambiental em clima temperado e úmido.** 2015. 237p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC., Florianópolis.
- VIZZOTTO, M. R. **Análise do uso de estratégias para melhoria de eficiência energética e conforto térmico em edificações com sistemas de automação predial.** 2015. 143p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre.
- WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. Building simulation calibration using sensitivity analysis. In: NINTH INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 2005. **Anais...** [S.I.: s.n.], 2005. p.1331–1338.
- WINKELMANN, F. C.; SELKOWITZ, S. Daylighting simulation in the DOE-2 building energy analysis program. **Energy and Buildings**, [S.I.], v.8, n.4, p.271–286, 1985.
- ZHANG, R.; LAM, K. P. Comparison of building load performance between first principle based and implementable shading control algorithms. In: BUILDING SIMULATION, 2011. **Anais...** [S.I.: s.n.], 2011. v.4, n.2, p.135–148.
- ZHANG, Y.; BARRETT, P. Factors influencing occupants' blind-control behaviour in a naturally ventilated office building. **Building and Environment**, [S.I.], v.54, p.137–147, 2012.

Apêndices

APÊNDICE A – Densidades de potência para iluminação e equipamentos nos ambientes de permanência prolongada

Ambientes de permanência prolongada (salas de aula e salas de laboratórios digitais) com densidade de potência de iluminação e densidade de potência dos equipamentos.

Ambiente	Densidade de potência de iluminação (W/m²)	Densidade de potência dos equipamentos (W/m²)
Sala atelier metal	12,56	6,54
Sala atelier plásticos	11,13	2,89
Auditório	4	1,63
Sala laboratório digital	12,56	77,23
Sala laboratório digital	11,35	9,75
Sala dos professores	11,52	79
Sala atelier metal	12,56	20,39
Sala laboratório digital	12,46	113
Sala laboratório digital	11,35	213
Sala de professores	11,52	70
Sala laboratório digital	13,25	190
Sala laboratório digital	11,15	161,28
Sala laboratório de música	12,56	67,48
Sala laboratório prática	11,35	71,85
Sala LAPER- laboratório de percussão	11,52	122,52
Sala laboratório educação musical	8,37	88,32
Sala de desenho	8,94	84,48
Sala teórica / prática	12,76	109,35
Sala laboratório de composição musical	11,35	73,47
Sala de aula teórica	11,52	89,46
Sala laboratório de teclados	6,98	72,29
Sala de estudos	6,35	52,64