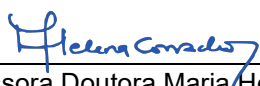


AVALIAÇÃO DO IMPACTO NA REDUÇÃO DOS CONSUMOS ENERGÉTICOS DE UMA PAREDE INOVADORA DE MADEIRA PARA A REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS

JUCYARA CARVALHO DE OLIVEIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM PROJETO INTEGRADO NA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS



Orientador: Professora Doutora Maria Helena Corvacho

Coorientador: Professor Doutor Rossano Albatichi
Department of Civil, Environmental and Mechanical Engineering
University of Trento - Italy

JULHO DE 2021

MESTRADO EM PROJETO INTEGRADO NA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS 2020/2021

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Projeto Integrado na Construção de Edifícios 2020/2021- Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2021*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Àqueles que amo

Só é útil o conhecimento que nos torna melhores
Sócrates

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Professora Doutora Helena Corvacho, pelo conhecimento transmitido e por ter tido sempre a maior das disponibilidades.

Ao meu coorientador Professor Doutor Rossano Albatici que possibilitou a boa realização desse trabalho no laboratório de projeto de edifícios (LBE) da Universidade de Trento.

Aos colaboradores do LBE, em especial ao Msc Nicola Callegaro, que se demonstrou sempre disponível para oferecer seu conhecimento e assegurar o bom desenvolvimento das simulações.

Um agradecimento muito especial a minha família – em especial: minha mãe, meu pai, meus irmãos e meus avós - que me ensinaram a lutar por aquilo que se acredita e nunca desistir.

Por fim, mas não menos especialmente, a todos os amigos que fiz no decorrer do curso.

Serei sempre muito grata aos meus amigos que se tornaram minha família no Porto: Ana Eliza, Beto, Bruno, Camila, Carol, Erick, João, Maria, Mariana, Marina, Nicolau, Lucas, Rodrigo e Silvia.

E também àqueles amigos que fiz na Universidade de Trento durante o desenvolvimento desse trabalho: Ana, Angelica, Ambra, Chiara, Erica, Gaetano, Hosein, Ilaria, Marco, Mattia e Pascal. Com certeza, tornaram o desenvolvimento deste trabalho e a minha estadia na Itália muito mais agradável.

RESUMO

Sabe-se que os edifícios são hoje responsáveis por 40% do consumo total de energia e pela emissão de 36% dos Gases de Efeito Estufa na União Europeia. A busca de soluções que melhorem o desempenho energético dos edifícios é hoje, portanto uma prioridade no sentido de alcançar metas de sustentabilidade energética. Uma das principais ferramentas para a análise de medidas de melhoria energética é a simulação energética de edifícios que, para darem resultados confiáveis, devem fazer uso de modelos calibrados. Neste cenário, o objetivo dessa dissertação foi avaliar, através de simulações dinâmicas com o uso do software EnergyPlus™, uma solução inovadora de reabilitação de edifícios que se dá através do implemento de uma parede de madeira (*Renew-Wall*) ao perímetro externo das edificações. Esta solução é proposta por uma empresa italiana e está sendo estudada em conjunto com a Universidade de Trento, Itália. No âmbito deste projeto, duas células de teste em alvenaria de blocos cerâmicos foram construídas e passaram a ser monitoradas. Após um ano de monitorização, uma destas células foi reabilitada com a parede. No desenvolvimento deste trabalho, foi realizada a simulação dinâmica do comportamento higrotérmico de uma das células não-reabilitada e o modelo energético foi calibrado considerando os dados reais provenientes do monitoramento. Utilizando-se do modelo calibrado, com o intuito de prever a redução do consumo energético com a medida de reabilitação, foi realizada a simulação dinâmica da célula que teve a adição da nova parede. Foi prevista uma redução de 45% do consumo energético da célula.

Palavras-Chave: (reabilitação de edifícios, simulação energética de edifícios, EnergyPlus, simulação dinâmica, eficiência energética)

ABSTRACT

Buildings are responsible for 40% of total energy consumption and for the emission of 36% of greenhouse gases in the European Union. The search for solutions that improve the energy performance of buildings is today, therefore, a priority towards achieving energy sustainability goals. One of the main tools for the analysis of energy improvement measures is the energy simulation of buildings that, to give reliable results, must make use of calibrated models. In this scenario, the objective of this dissertation was to evaluate, through dynamic simulations using the EnergyPlus™ software, an innovative solution for the rehabilitation of buildings that takes place through the implementation of a wooden wall (Renew-Wall) to the outer perimeter of buildings. This solution is proposed by an Italian company and is being studied together with the University of Trento, Italy. Within the scope, two test cells made of ceramic blocks masonry were built and started to be monitored. After a year of monitoring, one of these cells had the retrofit with the wall. In this work, a dynamic simulation of the hygrothermal behaviour of one of the non-rehabilitated cells was performed and the energy model was calibrated considering the real data from the monitoring. Using the calibrated model, to predict the reduction in energy consumption with the rehabilitation measure, a dynamic simulation of the cell that had the addition of the new wall was performed. A 45% reduction in the cell's energy consumption was predicted.

Keywords: (building retrofit, building energy simulation, EnergyPlus, dynamic simulation, energy efficiency)

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
Índice de Figuras	X
Índice de Quadros	xii
Índice de Símbolos e abreviaturas	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	2
2. SIMULAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.2.1. SUSTENTABILIDADE E CONSUMO ENERGÉTICO DE EDIFÍCIOS	3
2.2.2. SISTEMAS DE ENERGIA DE EDIFÍCIOS	5
2.2.3. SIMULAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS.....	6
2.2.4. PROGRAMAS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS	12
2.3. ESTADO DA ARTE RELATIVO A UTILIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS PARA AVALIAÇÃO DE MEDIDAS DE REABILITAÇÃO	15
2.3.1. IMPORTÂNCIA DA CALIBRAÇÃO DOS MODELOS	15
2.3.2. METODOLOGIAS DE SUPORTE A TOMADA DE DECISÃO	16
2.3.3. SIMULAÇÕES ASSOCIADAS A TRABALHOS EXPERIMENTAIS EM EDIFÍCIOS.....	16
2.3.4. IDENTIFICAÇÃO DO PERFIL DE CONSUMO DE ENERGIA DE PARQUES PREDIAIS	19
2.3.5. ANÁLISE DE ECMs APLICADAS EM EDIFÍCIOS ESCOLARES	19
2.3.6. ANÁLISE DE ECMs APLICADAS EM EDIFÍCIOS HISTÓRICOS.....	20
2.3.7. ANÁLISE DE ECMs APLICADOS A EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS	22
2.3.8. ANÁLISE DE ECMs APLICADOS A EDIFÍCIOS COMERCIAIS	25
2.3.9. ANÁLISE DE ECMs COM VISTAS A ATINGIR O NZEB	26
2.3.10. REABILITAÇÃO ATRAVÉS DO COMPORTAMENTO HUMANO	27
3. CÉLULAS DE TESTE – PROJETO RENEW-WALL.....	29
3.1. INTRODUÇÃO	29

3.2. APRESENTAÇÃO DO PROJETO	29
3.2.1. SISTEMA CONSTRUTIVO	31
3.2.2. MONITORIZAÇÃO	35
4. SIMULAÇÃO ANTES DA REABILITAÇÃO	37
4.1. INTRODUÇÃO	37
4.2. METODOLOGIA	37
4.3. MODELAGEM GEOMÉTRICA	38
4.4. MODELAGEM ENERGÉTICA	39
4.4.1. ESTRATIGRAFIA E MATERIAIS	39
4.4.2. SISTEMA AVAC	41
4.4.3. TEMPERATURA DO SOLO	43
4.4.4. DADOS CLIMÁTICOS	44
4.4.5. RESULTADOS NÃO CALIBRADOS	44
4.5. CALIBRAÇÃO	44
4.6. RESULTADOS	47
4.6.1. COMPORTAMENTO TÉRMICO	48
4.6.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	49
5. SIMULAÇÃO DEPOIS DA REABILITAÇÃO	51
5.1. INTRODUÇÃO	51
5.2. MODELAGEM GEOMÉTRICA	51
5.3. MODELAGEM ENERGÉTICA	51
5.4. RESULTADOS INICIAIS	52
5.5. VALIDAÇÃO DO MODELO COM DADOS REAIS	53
6. CONCLUSÃO	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
ANEXO 1	63
ANEXO 2	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 - Consumo de energia por setor na UE	4
Fig. 2 – Variáveis de um modelo de energia	7
Fig. 3 – Variáveis de um modelo de energia (Harish & Kumar, 2014).	9
Fig. 4 – Plugin <i>Openstudio</i>	15
Fig. 5 – Corte Construtivo Renew-Wall	29
Fig. 6 – Posicionamento das células de teste	30
Fig. 7 – Células de teste construídas	31
Fig. 8 – Células de teste em perspetiva	32
Fig. 9 – Paredes célula de teste.....	32
Fig. 10 – Corte dos diferentes tipos de paredes.....	33
Fig. 11 – Corte da cobertura	34
Fig. 12 – Corte do piso	34
Fig. 13 – Célula de teste modelada – Vista 01	38
Fig. 14 – Célula de teste modelada – Vista 02.....	39
Fig. 15 – Exemplo de definição de material no software	40
Fig. 16 – Exemplo de definição de estratigrafia.....	41
Fig. 17 – Sistema AVAC simplificado.....	42
Fig. 18 - Temperatura interna ao longo do ano na Célula A, resultados antes da calibração.	48
Fig. 19 - Temperatura interna ao longo do ano na Célula A, resultados depois da calibração.	48
Fig. 20 – Confronto de dados de temperatura interna	52
Fig. 21 – Confronto de dados de temperatura interna	53

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Valores limites de CV (RMSE) e (MBE) para calibração de modelos energéticos	12
Quadro 2 - Materiais definidos no modelo energético	40
Quadro 3 – Funcionamento do sistema AVAC.....	43
Quadro 4 – Temperatura do Solo.....	43
Quadro 5 - Dados medidos e simulados (antes da calibração) para o consumo médio das células	44
Quadro 6 - Performance do modelo (antes da calibração) para o consumo energético da célula A.....	44
Quadro 7 – Simulações realizadas	45
Quadro 8 - Validação da calibração	47
Quadro 9 – Materiais Definidos.....	51
Quadro 10 – Resultados de Consumo Energético	52

ÍNDICE DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ASHRAE - Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado

AEC - Arquitetura, engenharia e construção

CO₂ - Dióxido de carbono

GEE - Gases com efeito de estufa

UE - União europeia

MTEP - Tonelada equivalente de petróleo

PNIEC - Plano nacional integrado para energia e clima

AVAC - Aquecimento, ventilação e ar condicionado

BES - Simulação Energética de edifícios

MBE - Erro de polarização média

CV(RMSE) - Coeficiente de variação da raiz quadrada do erro médio

ECM - Medidas de conservação de energia

NZEB - Edifícios com necessidades energéticas quase nulas

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

O setor de Engenharia, Arquitetura e Construção (AEC) é atualmente responsável por mais de 40% do consumo energético e 36% das emissões de dióxido de oxigénio (CO₂) da União Europeia (UE) (Castaldo et al., 2017).

A requalificação energética de edifícios existentes pode, portanto, gerar uma economia de energia significativa, e ao mesmo tempo criar benefícios económicos, sociais e ambientais. Em particular, pode contribuir para melhorar a saúde, o conforto e o bem-estar das famílias.

A redução do consumo energético para atividades de aquecimento e resfriamento no setor de edifícios é um desafio chave para a sustentabilidade global e a reabilitação da envolvente de edifícios é um dos principais problemas. A maioria das envolventes dos edifícios existentes tem baixos níveis de isolamento, altas perdas térmicas devido a pontes térmicas e falta de estanqueidade, ausência de controle solar adequado, etc. [3]

Com o objetivo de oferecer uma solução tecnológica para a requalificação energética de edifícios, uma empresa italiana propõe uma parede externa pré-fabricada em madeira. Esta solução tem por objetivos gerais a requalificação energética, arquitetónica e das condições internas de conforto do edifício. Além de que, como se trata de uma solução não intrusiva, é possível fazer a intervenção de requalificação sem precisar retirar os inquilinos do imóvel.

Na Itália, em específico, não se veem ainda casos concretos de soluções inovadoras desta natureza. A empresa, deseja, portanto, ser um exemplo de sucesso ao propor uma solução que traz uma série de inovações a respeito daquelas existentes no mercado.

Modelos de simulação de energia de edifícios desempenham um papel significativo no projeto inicial e na reabilitação de edifícios, visto que podem ser usados para comparar o custo-benefício das medidas de conservação de energia no estágio de projeto, bem como avaliar várias medidas de otimização de desempenho durante o estágio operacional.

No entanto, para que os modelos sejam usados com algum grau de confiança, é necessário que o modelo existente represente de perto o comportamento real do edifício em estudo. Isso pode ser alcançado por meio da calibração do modelo, cujo objetivo é reduzir as discrepâncias entre a previsão do modelo energético e o desempenho medido do edifício.

Neste sentido, este trabalho busca utilizar a ferramenta de simulação energética de edifícios como forma de avaliar a redução de consumo energético que pode ocorrer após o uso da *Renew-wall*.

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral contribuir para o projeto de novas paredes de madeira para uma reabilitação rápida e fácil de edifícios com vista a se atingir uma construção nZEB (*Nearly Zero Energy Buildings*).

Neste sentido, em um primeiro momento, pretende-se realizar a simulação dinâmica do comportamento higratérmico de uma célula de teste construída em alvenaria de blocos cerâmicos em Malosco, Itália.

Em sequência, o modelo energético elaborado deverá ser calibrado considerando os dados reais provenientes do monitoramento daquela célula.

Na etapa final, se utilizando do modelo calibrado, será realizada a simulação dinâmica de uma outra célula de alvenaria de blocos cerâmicos que, no percurso do trabalho, teve a adição de uma parede externa, pré-fabricada em madeira, ao perímetro da fachada. Com isso, pretende-se obter o potencial de redução de consumo energético através da implementação dessa medida de reabilitação.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 1, se faz o enquadramento da temática, com referência à importância que o consumo de energia nos edifícios adquire em termos económicos, ambientais e sociais. Apresentam-se igualmente os objetivos da presente dissertação e a sua estrutura.

No Capítulo 2, é apresentado um referencial teórico a respeito dos principais assuntos abordados neste trabalho, assim como se apresenta um levantamento do estado da arte sobre a pesquisa relacionada com a simulação energética de edifícios realizada com o objetivo de avaliar a implementação de medidas de eficiência energética nos edifícios.

O Capítulo 3 é dedicado à descrição do caso estudado.

No Capítulo 4, se apresenta a metodologia e os resultados obtidos com a primeira simulação que permitiram validar o modelo utilizado e calibrá-lo.

O Capítulo 5, por sua vez, apresenta os resultados obtidos com a segunda simulação, referente à célula de teste que teve a adição da parede de madeira em estudo.

Finalmente, no Capítulo 6 são sintetizadas as principais conclusões do trabalho.

2

SIMULAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS

2.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo trata de uma análise bibliográfica que visa mostrar um referencial teórico sobre os temas tratados neste trabalho e o estado da arte da pesquisa científica realizada a respeito da simulação energética de edifícios aplicada a medidas de eficiência energética de edifício nos últimos 10 anos.

2.2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste referencial a princípio é abordado o tema da sustentabilidade com ênfase no consumo energético de edifícios, uma vez que esta temática é crucial no desenvolvimento de um mundo mais sustentável. Discute-se os principais componentes de um sistema de energia de um edifício e então se apresenta uma ferramenta importantíssima para a implementação de medidas de eficiência energética: a simulação computacional. Ressalta-se ainda a importância da calibração dos modelos e a boa escolha do *software* utilizado como meios de se obter de resultados fíáveis.

2.2.1. SUSTENTABILIDADE E CONSUMO ENERGÉTICO DE EDIFÍCIOS

Sustentabilidade é hoje uma meta que quase todas as organizações, instituições, negócios ou indivíduos afirmam se empenhar para alcançar. O *GreenGuide* da sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado (ASHRAE) (ANSI/ASHRAE, 2006) define sustentabilidade, em termos gerais, como "prover as necessidades do presente sem prejudicar a capacidade de atender às necessidades do futuro". Outros definiram sustentabilidade como "o conceito de maximizar a eficácia do uso de recursos, minimizando o impacto desse uso sobre o meio ambiente" e um ambiente em que "... um equilíbrio ... existe entre a sociedade humana e ecossistemas estáveis "(Castaldo et al., 2017).

Sustentar (ou seja, manter ou prolongar) os elementos dos quais a existência da humanidade e do planeta dependem, como energia, meio ambiente e saúde, são metas dignas (ANSI/ASHRAE, 2006).

A busca pela sustentabilidade e a eficiência dos edifícios representam um problema crucial. O setor de Engenharia, Arquitetura e Construção (AEC) é atualmente responsável por mais de 40% do consumo energético e de 36% das emissões de CO₂ na UE. Os edifícios, em especial os residenciais, registam o

maior consumo de energia na UE, seguidos pelos setores dos transportes e da indústria. Este é, também, o setor com o maior potencial de poupança de energia na Europa. A Fig. 1 apresenta uma repartição do consumo de energia por setor na União Europeia (UE) (EU, 2015):

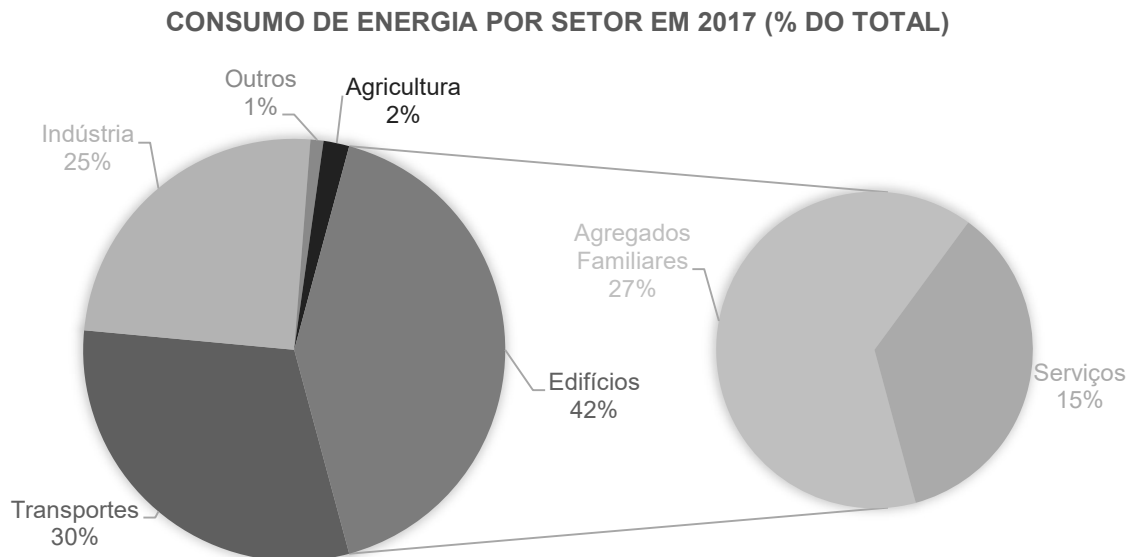


Fig. 1 - Consumo de energia por setor na UE

Em razão do aumento da população, da expansão da economia e da busca por melhoria de qualidade de vida, prevê-se que esta taxa de crescimento deva continuar crescendo. Este aumento causa uma maior emissão de gases com efeito de estufa (GEE), o que gera sérios impactos no meio ambiente. Este aumento da demanda de energia evidencia a importância da promoção de medidas de eficiência energética nos edifícios (Harish & Kumar, 2016; Maio et al., 2012).

Os edifícios podem ser utilizados por 50 anos ou mais e de 75% a 90% dos que existem hoje são esperados que ainda existam ainda em 2050. A requalificação energética de edifícios existentes pode, portanto, gerar uma economia de energia significativa, e ao mesmo tempo criar benefícios econômicos, sociais e ambientais.

A aplicação de medidas de eficiência energética se refere a um uso mais eficiente da energia sem reduzir os níveis de conforto, significando, portanto, a ação de identificar áreas de uso abusivo de energia e tomar medidas para reduzir o desperdício. A poupança de energia gerada pelas renovações dos edifícios resulta, normalmente, de um melhor isolamento, bem como de melhores sistemas de aquecimento e refrigeração e da iluminação.

Em geral, o consumo de energia na fase de operação e manutenção do setor de construção é responsável por grande parte do consumo total de energia do ponto de vista do ciclo de vida (Hong et al., 2015). O potencial de economias de energia nos edifícios é muito significativo, podendo, nalguns casos, as medidas de eficiência energética contribuir para uma redução de mais de 50 %.

Esta redução do consumo de energia traduz-se numa redução muito significativa das emissões de CO₂ no setor dos edifícios, contribuindo em simultâneo para cumprir os objetivos de eficiência energética e renováveis assumidos pela União Europeia.

Em Portugal, os setores doméstico e dos serviços, e o parque de edifícios associado, são responsáveis por mais de 30 % da energia final consumida. Segundo as estatísticas oficiais: 39,1% Cozinha; 23,5% AQS; 21,5% energia para aquecimento ambiente; 10,9% equipamentos elétricos; 4,5% iluminação; 0,5% arrefecimento ambiente (Resolução de Conselho de Ministros n.º 8-A/2021, 2021).

Do conjunto de problemas que afetam o desempenho energético dos edifícios portugueses, para além do envelhecimento natural dos materiais e da falta de manutenção, é possível destacar as características físicas do edifício, sobretudo o nível do baixo desempenho térmico da envolvente e a ineficiência dos sistemas energéticos instalados.

Na Itália, o consumo de energia no setor residencial, segundo dados divulgados pelo Eurostat em 2013, ultrapassaram os 34 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), o que equivale a 29% do consumo final (EU, 2015). O parque imobiliário italiano, apesar dos progressos alcançados nos últimos anos graças sobretudo aos mecanismos de incentivo, continua a ser caracterizado por um elevado consumo de energia, principalmente devido ao baixo desempenho energético dos edifícios existentes.

Para que o sector civil italiano cumpra os objetivos fixados pelo PNIEC (Plano de Energia e Clima 2030) é necessário que as novas soluções destinadas a melhorar o desempenho energético dos edifícios se centrem tanto na otimização da gestão dos sistemas, instalações e componentes existentes, como em novas soluções relacionadas, por exemplo, novos materiais e sistemas de geração de energia que maximizem a produção de fontes renováveis.

De facto, uma utilização mais generalizada de tecnologias inovadoras e eficientes, e uma gestão melhor e mais racional do consumo energético dos edifícios permitem benefícios económicos concretos e diretos ao nível da redução dos custos nas faturas do utilizador final, dos consumos da Administração Pública (afetando assim nos custos da comunidade indiretamente) e uma melhoria geral no conforto de vida.

No pacote de medidas sobre clima e energia (denominado "Energia Limpa para Todos os Europeus"), a Comissão Europeia destacou a importância do setor de aquecimento e refrigeração, que sozinho representa cerca de 50% do consumo de energia da UE (EU, 2015).

A redução do consumo energético para atividades de aquecimento e resfriamento no setor de edifícios é um desafio chave para a sustentabilidade global e a reabilitação da envolvente de edifícios é um dos principais problemas. A maioria das envolventes dos edifícios existentes tem baixos níveis de isolamento, altas perdas térmicas devido a pontes térmicas e falta de estanqueidade, ausência de controle solar adequado, etc.(Aste et al., 2015)

2.2.2. SISTEMAS DE ENERGIA DE EDIFÍCIOS

Os sistemas de energia de edifícios são aqueles que são responsáveis pelo consumo energético em geral: equipamentos físicos, maquinaria, processos ou uma combinação destes.

Para manter o conforto térmico, uma certa quantidade de energia precisa ser adicionada ou removida (aquecimento / resfriamento) para/ou do espaço do edifício. Esta energia depende das condições climáticas externas - como temperatura do ar externo, umidade relativa, características do vento – como

também das condições internas de ocupação, fluxo de calor e umidade através das paredes e interiores, etc. Essa energia atua como carga no sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) (para calor e umidade) instalado para condicionar o espaço do edifício (Harish & Kumar, 2016).

Deste modo, um edifício, do ponto de vista térmico, é geralmente visto como uma composição de várias zonas térmicas que constituem o conjunto de áreas climatizadas pelo mesmo sistema de climatização com fontes de calor semelhantes, sendo as propriedades psicrométricas controladas pelo mesmo sistema de controlo (termóstato, humidostato).

Matematicamente, a carga do espaço nada mais é do que a taxa (taxa de ganho de calor) na qual a energia está sendo adicionada (aquecimento) ou removida (resfriamento) para ou do espaço do edifício a fim de manter a temperatura do espaço nos níveis desejados.

Quando o objetivo é determinar o consumo energético de um dado edifício é necessário especificar todas componentes energéticas que dele fazem parte, tais como consumos de iluminação, computadores e outros equipamentos, bombagem de água, aquecimento de água quente sanitária, elevadores, ventilação, cargas térmicas e correspondentes consumos de aquecimento e arrefecimento, entre outros (Miguel & Saraiva, 2010).

Os sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) têm um grande impacto no consumo líquido de energia dos edifícios. Não só consomem cerca de 40–60% da eletricidade total dos edifícios comerciais, mas também têm uma grande influência no conforto e comportamento dos ocupantes e, portanto, na rentabilidade do edifício (Harish & Kumar, 2016).

Estes sistemas destinam-se a promover as condições desejáveis de temperatura, humidade e de qualidade do ar (interior) – conforto térmico, necessárias para o bem-estar do ser humano, no interior dos edifícios, recorrendo para isso ao uso de uma ou mais fontes de energia que permitam obter as condições de conforto térmico (Alves, 2011).

É um grande desafio para os profissionais da construção lidar com sistemas AVAC e ao mesmo tempo tentar otimizar o consumo de energia sem comprometer o conforto térmico dentro das instalações do edifício (Harish & Kumar, 2016).

2.2.3. SIMULAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS

A demanda de energia do edifício, como espaço do edifício, sistemas AVAC, sistemas de iluminação, etc. afetam diretamente o custo operacional do edifício e indiretamente afetam o meio ambiente.

Embora o foco inicial das ferramentas de simulação energética de edifícios (BES) fosse principalmente a fase de projeto, a simulação agora está se tornando cada vez mais relevante nas fases de pós-construção do ciclo de vida da construção (LCC), como comissionamento e gerenciamento e controle operacional (Harish & Kumar, 2014).

Uma vez que estes modelos são baseados na realidade física em vez de formulações matemáticas ou estatísticas arbitrárias, eles têm uma série de vantagens inerentes. Um dos principais benefícios dos modelos de simulação detalhados em relação aos modelos estatísticos é sua capacidade de prever o comportamento do sistema, dadas as condições não identificadas anteriormente. Isso permite que os

analistas façam alterações no projeto ou na operação do edifício enquanto, simultaneamente, monitoram o impacto no comportamento e desempenho do sistema.

Apesar dos benefícios potenciais e do progresso significativo que tem sido feito no desenvolvimento de programas de simulação avançados capazes de modelar sistemas e ambientes complexos, ainda permanecem uma série de problemas que inibem sua adoção generalizada (Coakley et al., 2014).

Nesta seção se apresentam alguns conceitos importantes referentes a simulação energética de edifícios.

2.2.3.1. MODELAGEM ENERGÉTICA

Modelos de simulação de energia de edifícios desempenham um papel significativo no projeto e otimização de edifícios, visto que podem ser usados para comparar o custo-benefício das medidas de conservação de energia no estágio de projeto, bem como avaliar várias medidas de otimização de desempenho durante o estágio operacional.

Os modelos desenvolvidos para simular os sistemas de energia de edifícios podem ser divididos em vários tipos. Basicamente, os modelos são classificados como modelos físicos, simbólicos e mentais. Os modelos simbólicos são comparativamente menos complexos e, portanto, são usados com frequência. Os modelos podem ser modelos matemáticos e não matemáticos (Harish & Kumar, 2014).

O desenvolvimento do modelo matemático de um sistema envolve o mapeamento das leis físicas que regem a dinâmica do processo do sistema em relações matemáticas usando variáveis e constantes. Devido à facilidade de avaliação e manipulação, os modelos matemáticos são os mais adequados e a categoria de modelos mais amplamente utilizada (Škrjanc et al., 2001)

Em geral, um modelo de sistema de energia é um modelo matemático que descreve o comportamento do sistema. A estrutura de modelagem para qualquer sistema de energia é composta de três blocos de construção, a saber, variáveis de entrada, variáveis de saída e o próprio sistema (Škrjanc et al., 2001), como mostrado na Fig. 2.

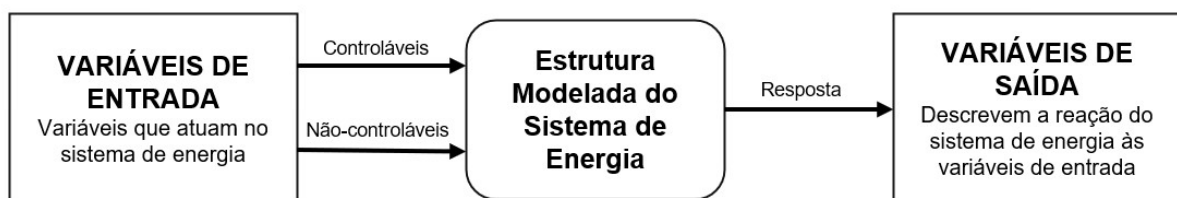


Fig. 2 – Variáveis de um modelo de energia

O processo de modelagem do sistema de energia envolve a determinação de qualquer um dos três blocos de construção, quando as informações adequadas sobre os outros dois blocos estão disponíveis. Isso é o que classifica os modelos de energia como modelos caixa-branca, caixa-preta ou caixa-cinza. Essa classificação dos modelos é descrita em detalhe nas seções seguintes deste referencial.

Como fica claro na Fig. 2, as variáveis de entrada, são o bloco de construção do sistema de modelagem que atua no sistema de energia do edifício. Variáveis como ganhos de calor internos (causais), configurações de ponto de ajuste do termostato, etc, que podem ser controladas pelo engenheiro do sistema, são consideradas variáveis de entrada controláveis. Por outro lado, a radiação solar, a temperatura do ar exterior e a velocidade do vento, etc. são algumas das variáveis de entrada cujas

características não podem ser controladas, mas no máximo só podem ser previstas usando técnicas adequadas.

A estrutura de modelagem descreve o sistema de energia do edifício completo, fornecendo toda a descrição higrótérmica necessária dos sistemas. Equações matemáticas de todos os processos de transferência de energia são usadas para construir a estrutura do sistema modelado.

Para um modelo de sistema de energia de edifício, a temperatura do ar ambiente e a umidade são as variáveis de saída. Essas variáveis descrevem a reação do sistema de energia do edifício às variáveis de entrada. O consumo útil de energia por exemplo pode ser uma saída para um modelo de sistema de energia de edifício.

Modelos caixa-branca: O desenvolvimento de um modelo energético usando abordagem progressiva, chamados de modelo caixa-branca, envolve a previsão das variáveis de saída usando estrutura detalhada e parâmetros do modelo sujeito a um conjunto específico de variáveis de entrada. Esses modelos são altamente precisos, pois a maioria dos processos de transferência de energia são mapeados no desenvolvimento da estrutura de modelagem (Coakley et al., 2014).

Além disso, com o aumento das tendências de sofisticação nas técnicas de computação, modelos desta natureza com alta precisão têm sido possíveis hoje em dia. A modelagem direta é praticada nas fases de projeto preliminar e análise durante o processo detalhado de auditoria energética. (Harish & Kumar, 2016) Propõe o passo a passo as etapas deste tipo de modelagem:

Etapla 1: Adquirir dados climáticos de acordo com a localização do edifício em estudo.

Etapla 2: Adquirir dados de projeto de construção.

Etapla 2.1: Adquirir as características geográficas da construção: localização, orientação, etc.

Etapla 2.2: Adquirir dados de construção de edifícios: Propriedades termofísicas dos materiais de construção, etc.

Etapla 3: Características da planta de aquecimento

Etapla 3.1: Tipo de sistema AVAC

Etapla 3.2: Tipo e características dos subsistemas AVAC: AHU, unidades de bobina, etc.

Etapla 4: Cronogramas operacionais de construção

Etapla 5: Simular o modelo de acordo com os períodos de simulação desejados

Etapla 6: Prever os padrões de consumo de energia útil (valores de pico ou médios).

Os softwares de simulação BES TRNSYS, DOE-2, EnergyPlus™ e ESP-r funcionam com este procedimento.

Modelos caixa-preta: este tipo de abordagem envolve o desenvolvimento de um modelo impulsionado pelo conhecimento dos dados de entrada e dos dados de saída. Estas informações deverão estar disponíveis ou por meio de medições adquiridas ou por meio de procedimentos experimentais ou, de alguma outra maneira, já são conhecidos (Coakley et al., 2014).

A estrutura do modelo é estimada usando uma análise de regressão de variável única ou multivariável realizada entre as variáveis de saída medidas do consumo útil de energia e os vários outros parâmetros de ocupação, dados solares, eólicos, etc (Harish & Kumar, 2014).

A forma dos modelos de regressão pode ser puramente estatística ou vagamente baseada em alguma formulação de engenharia básica do uso de energia no edifício. No caso de simulações de longo prazo (mensais ou trimestrais ou mais longas), é demorado e caro registar as variáveis ao longo dos períodos de simulação. Nesses casos, os parâmetros do modelo poderão ser estimados usando técnicas de aprendizado artificial, como redes neurais artificiais (RNA), série de Fourier, etc. Em tal situação, os parâmetros do modelo identificados têm muito pouca significância física (Škrjanc et al., 2001).

Com o advento da inteligência artificial ou técnicas de busca, os dados de desempenho a serem medidos são menores. Isso economiza muito tempo e memória de computação. Além disso, em edifícios comerciais ou de escritórios, as operações diárias de acordo com os horários de ocupação e valores de temperatura de ponto de ajuste são frequentemente repetitivas (Harish & Kumar, 2016).

Modelos caixa-cinza: Nesta abordagem primeiro se formula um modelo físico para representar a estrutura ou configuração física do edifício ou equipamento ou sistema de AVAC, para que, em seguida, se identifique variáveis importantes representativas de certos parâmetros físicos chave e agregados e características por análise estatística (Harish & Kumar, 2014). Isso requer um alto nível de experiência do usuário tanto na configuração das equações de modelagem adequadas quanto na estimativa desses parâmetros.

Frequentemente, um protocolo experimental intrusivo é necessário para a estimativa adequada dos parâmetros. Esta abordagem tem grande potencial, especialmente para detecção e diagnóstico de falhas e controle online, mas sua aplicabilidade ao uso de energia de todo o edifício é limitada (Harish & Kumar, 2016).

A Fig. 3 sintetiza as principais diferenças existentes entre estes três modelos apresentados.

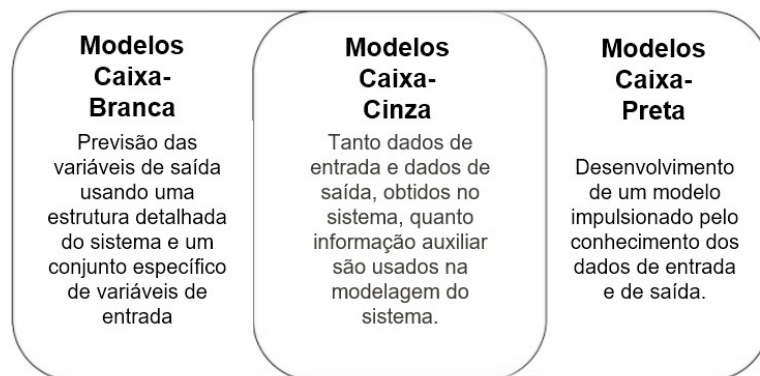


Fig. 3 – Variáveis de um modelo de energia (Harish & Kumar, 2014).

2.2.3.2. MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DO MODELO ENERGÉTICO

Devido à complexidade do ambiente construído e à prevalência de um grande número de variáveis de interação independentes, é difícil obter uma representação precisa da operação de construção no mundo real. Numerosos estudos (Coakley et al., 2014) indicaram discrepâncias, muitas vezes significativas (diferenças de até 100%), entre o modelo previsto e o uso real medido de energia do edifício.

Para que os modelos sejam usados com algum grau de confiança, é necessário que o modelo existente represente de perto o comportamento real do edifício em estudo. Isso pode ser alcançado por meio da

calibração do modelo, cujo objetivo é reduzir as discrepâncias entre a previsão do modelo energético e o desempenho medido do edifício.

A necessidade de calibração de modelos de edifícios não é uma indicação da capacidade limitada de previsão de modelos de edifícios; é, ao contrário, uma manifestação do conhecimento limitado que o desenvolvedor do modelo possui sobre os parâmetros operacionais da edificação, bem como sobre a natureza estocástica do comportamento dos usuários da edificação e sobre o descontrolo das patologias geradas na construção ou operação dos edifícios.

A calibração pode ser entendida como o processo de “ajuste fino” dos valores dos parâmetros desconhecidos de um modelo, a fim de minimizar as diferenças entre as saídas previstas e os dados observados. Devido ao grande número de parâmetros de entrada desconhecidos em um modelo detalhado, a calibração é um procedimento complexo caracterizado por uma solução não única (Coakley et al., 2014) e pode ter grandes incertezas.

As principais abordagens para a calibração do modelo de simulação de desempenho energético de edifícios foram classificadas pela primeira vez por Clarke et al. (Clarke et al., 1993) e adotado em uma revisão posterior da literatura de programas, ferramentas e técnicas de calibração por Reddy (Agami Reddy, 2006). As quatro classificações propostas são:

- (i) Calibração baseada em intervenção manual, iterativa e pragmática.
- (ii) Calibração baseada em um conjunto de telas comparativas gráficas informativas.
- (iii) Calibração baseada em testes especiais e procedimentos analíticos.
- (iv) Métodos analíticos/matemáticos de calibração.

Em muitos campos da engenharia, um modelo é geralmente calibrado implementando uma maximização/minimização de um dos indicadores estatísticos de adequação, por meio de um código de computador e explorando o espaço de entrada até que a convergência seja alcançada. No entanto, isso pode ser incômodo e complicado, especialmente no caso de modelos complexos e/ou parametrizados como o BES (Agami Reddy, 2006). Infelizmente, há um trabalho substancial associado à detecção de parâmetros de influência em modelos parametrizados e isso não pode ser feito de maneira direta.

Conforme destacado é quase impossível identificar a solução exata para o problema de calibração dos modelos energéticos. Nessa circunstância particular, há necessidade de se buscar estratégias alternativas que possam ser mais adequadas para esses modelos e que possam fornecer aos usuários informações adicionais para melhor compreender os *insights* dos modelos.

Uma revisão da literatura atual sobre este tópico revelou que não existe um método geralmente aceito para calibração seguindo outras abordagens. Alguns autores (Clarke et al., 1993), (Agami Reddy, 2006) abordaram metodologias de calibração baseadas no refinamento manual destes modelos. Estas metodologias seguiram padrões claramente definidos para fixação de tolerâncias máximas de desvios e para medição e verificação de economia de energia, porém, o refinamento dos modelos foi abordado com base na experiência do analista e nenhuma abordagem sistemática foi levada em consideração.

Recentemente, a calibração de modelos energéticos foi incluída em uma estrutura mais formal devido, em grande parte, aos avanços nos campos usualmente conhecidos como UA (Análise de Incerteza) e SA (Análise de Sensibilidade) que são vistos cada vez mais como pré-requisitos para qualquer campo que faz uso extensivo de previsões de modelo. A análise de sensibilidade aplicada à calibração de modelos pode auxiliar no entendimento da influência relativa dos parâmetros de entrada na saída (Agami Reddy,

2006). A combinação de ensaios de amostragem aleatória e análise de sensibilidade dos parâmetros parece ser uma boa abordagem para realizar a calibração.

2.2.3.3. Métodos para validação da performance da calibração

Nos primeiros anos de simulação de construção, cálculos simples de diferença percentual eram o principal meio de comparação de dados medidos e simulados. No entanto, como observado por Diamond e Hunn [17], isso geralmente leva a um efeito de compensação, em que as superestimações cancelam as subestimações. Bou-Saada e Haberl [18] propuseram a adoção de índices estatísticos padronizados que melhor representam o desempenho de um modelo:

Erro de Polarização Média (MBE): É uma medida de polarização não-dimensional (ou seja, soma dos erros), entre os dados medidos e simulados. O MBE é um bom indicador da tendência geral do modelo. Captura bem a diferença média entre os dados medidos e simulados. No entanto, as superestimações cancelam as subestimações (o efeito de compensação). Portanto, um cálculo adicional de erro do modelo também é necessário.

$$(MBE) = 100 \times \frac{\sum^n yi - \hat{y}i}{(n - p) \times \bar{y}}$$

Eq. 2

Onde: y_i e $\hat{y}_i$ são respetivamente dados medidos e dados simulados, $\bar{y}$ é a média de dados monitorados, n é quantidade total de dados e $p = 1$.

Raiz do erro quadrático médio (RMSE): é uma regra de pontuação quadrática que também mede a magnitude média do erro. É a raiz quadrada da média das diferenças quadradas entre a previsão e a observação real.

Coefficiente de Variação da Raiz do erro quadrático médio (CV(RMSE)): É basicamente a raiz do erro quadrático médio dividido pela média dos valores medidos (Eq. 2). Este índice permite saber o quão bem o modelo se ajusta com os dados medidos, quanto menor este índice, melhor a calibração.

$$CV(RMSE) = \frac{100}{\bar{y}} \times \sqrt{\sum \left[\frac{(yi - \hat{y}i)^2}{(n - p)} \right]}$$

Eq. 1

Onde: y_i e $\hat{y}_i$ são respetivamente dados medidos e dados simulados, $\bar{y}$ é a média de dados monitorados, n é quantidade total de dados e $p = 1$.

Usualmente, a calibração é considerada validada quando os valores destes índices, CV (RMSE) e (MBE), para dados horários ou mensais, atendem aos limites estipulados pelo guia 14 da ASHRAE (Quadro 1).

Quadro 1 – Valores limites de CV (RMSE) e (MBE) para calibração de modelos energéticos

Padrão/Guia	Critério Mensal		Critério Horário	
	MBE (%)	CVRMSE (mensal) (%)	MBE (%)	CVRMSE (horário) (%)
Guia 14 ASHRAE	5	15	10	30

Isso significa que, uma vez que haja um acordo razoável entre os dados medidos e simulados, o modelo pode ser considerado 'calibrado' de acordo com os atuais critérios de aceitação internacional para modelos.

No entanto, o modelo que atende a esses critérios não é único e, portanto, existem vários modelos do mesmo edifício que podem ser considerados 'calibrados'. Além disso, deve-se notar que os critérios de calibração atuais se referem apenas ao consumo de energia previsto e não levam em consideração a incerteza ou imprecisões dos parâmetros de entrada ou a precisão do ambiente simulado (por exemplo, perfis de temperatura).

2.2.4. PROGRAMAS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS

Programas de simulação de energia de edifícios permitem o cálculo detalhado da energia necessária para manter os critérios de desempenho especificados (por exemplo, temperatura e umidade do espaço), sob a influência de entradas externas, como clima, ocupação e infiltração. Cálculos detalhados do balanço térmico são realizados em intervalos de tempo discretos com base nas variáveis de entrada. Esses cálculos geralmente são realizados ao longo de um ano inteiro (Coakley et al., 2014).

A seleção de um programa de análise de energia de edifícios depende de sua aplicação, do número de vezes que será usado, da experiência do usuário e do hardware disponível para executá-lo. O primeiro critério é a capacidade do programador de lidar com a aplicação (Harish & Kumar, 2016).

Alguns dos principais softwares utilizados em BES são:

DOE-2 é uma ferramenta *freeware* de BES que simula o uso e o custo de energia por hora de um edifício com base em informações meteorológicas, em descrições geométricas e do sistema de AVAC do edifício, e em tarifas de serviços públicos. Seu desenvolvimento foi financiado pelo Departamento de Energia dos EUA (DOE), daí o nome.

EnergyPlus™ é uma ferramenta avançada de BES, desenvolvida com base no trabalho realizado no DOE-2. Ele incorpora a mesma funcionalidade do DOE-2, simulando custos de energia por hora (ou sub-hora) de um determinado edifício com informações de entrada do sistema. Ele também incorpora muitos recursos avançados não disponíveis no DOE-2, como fluxo de ar de várias zonas e recursos para uma especificação mais detalhada do sistema AVAC.

TRNSYS é um programa de BES com uma estrutura modular que implementa uma abordagem de simulação baseada em componentes. Os componentes podem ser sistemas simples, como bombas ou ventiladores, ou sistemas complexos, como edifícios com várias zonas.

ESP-r é uma ferramenta de modelagem integrada para a simulação do desempenho térmico, visual e acústico de edificações. Semelhante ao EnergyPlus™ e DOE-2, o ESP-r requer informações especificadas pelo usuário sobre a geometria do edifício, sistemas AVAC, componentes e cronogramas.

Suporta equilíbrio de energia explícito em cada zona e em cada superfície, bem como incorpora incertezas inerentes e recursos de análise de sensibilidade.

2.2.4.1. EnergyPlus™

O EnergyPlus™, acreditado pela norma (ANSI/ASHRAE Standard 140) é um dos programas de simulação mais completo e utilizado em todo o mundo. Foi fundado pelo Building Technologies Office, BTO, do United States Department of Energy's, DOE, e gerido pelo National Renewable Energy Laboratory, NREL, sendo desenvolvido em colaboração com esta última entidade, vários DOE National Laboratories, instituições académicas e empresas privadas (<https://EnergyPlus.net/>)

No entanto, o EnergyPlus™ não é um programa intuitivo nem de fácil aprendizagem, sendo que a definição da geometria do edifício e caracterização dos seus elementos construtivos, sistemas técnicos e a inserção dos dados de operação diretamente na interface IDF-Editor do EnergyPlus™ pode ser um processo moroso e complexo. Com o objetivo de facilitar o processo de criação do modelo de simulação foram criados vários programas, interfaces e outras ferramentas auxiliares, como por exemplo o DesignBuilder e o OpenStudio, que utilizam o EnergyPlus™ como motor de cálculo.

Criado pelo Departamento de Energia (DOE) dos Estados Unidos, o software *EnergyPlus™* é desenvolvido com o objetivo de substituir os softwares BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) e o DOE-2 desenvolvidos no fim da década de 70.

De um modo sucinto, o *EnergyPlus™* é um software de simulação energética com o intuito de determinar o consumo energético global de um dado edifício, sendo capaz de determinar as cargas térmicas e todos os restantes modos existentes de consumo energético.

Com o EnergyPlus™ procurou-se resolver os problemas que os seus antecessores tinham, nomeadamente “o código fonte baseado em versões mais antigas da linguagem de programação FORTRAN, a dificuldade que se tinha para a alteração de dados de entrada, a impossibilidade de lidar com respostas (feedback) do sistema AVAC nas condições das zonas climatizadas e o rápido e crescente desenvolvimento das tecnologias de AVAC”

Assim, o código do software foi desenvolvido de modo a tirar partido de uma das suas principais características – a capacidade de modularização das sub-rotinas. Para além desta modularização exaustiva, este software é de código aberto (Open Source) permitindo assim que programadores e investigadores possam modificar alguns dos módulos do software, sem serem obrigados a conhecer exaustivamente todo o código.

O programa possui ainda a capacidade de simulação diferenciada, tais como “time-step” de cálculo menor que uma hora, sistema modular, possibilidade de cálculo de infiltração de ar diferenciada para cada zona térmica, cálculo de índices de conforto térmico e integração com outros sistemas (fotovoltaico, aquecimento solar, etc...).

O EnergyPlus™ possui algumas características que o coloca a frente de diversos programas de simulação termoenergética, entre elas:

- Solução simultânea e integrada em que a resposta do edifício e os sistemas (primários e secundários) estão acoplados;

- Intervalos de tempo definíveis pelo usuário, para interação entre as zonas térmicas e o ambiente, além de intervalos de tempo variável para interação entre a zona térmica e o sistema AVAC;
- Arquivos de entrada, de saída e climáticos, que incluem condições ambientais horárias;
- Sistemas AVAC configuráveis que permitem aos usuários modelar sistemas típicos comuns.

Outro ponto forte deste software prende-se com a solução simultânea das cargas térmicas, sistemas de climatização e os equipamentos utilizados, ao contrário da maior parte dos outros softwares de simulação que executam um cálculo sequencial onde, inicialmente, se faz a determinação das cargas térmicas e apenas posteriormente se efetua um cálculo dos sistemas de climatização e dos equipamentos. Com este cálculo simultâneo é possível efetuar estudos de sub-dimensionamento mais rigorosos.

Este software encontra-se projetado e otimizado para ser utilizado como um algoritmo de cálculo, a ser incorporado noutros softwares de interface gráfica e apresentação amigável – GUI (Graphical User Interface), pelo que os seus parâmetros de entrada (Inputs) e de saída (Outputs) consistem em textos apresentados no formato ASCII (American Standard Code for Information Interchange), sendo também possível obter alguns dos ficheiros de saída no formato CSV (Comma Separated Values) e HTML (HyperText Markup Language).

No entanto, é possível efetuar simulações sem nenhuma interface, especialmente se estas forem efetuadas com fins de investigação. O interface utilizado na presente dissertação, quer para visualizar os dados de entrada quer para visualizar os dados de saída, foi o software *OpenStudio*, associado ao *Sketchup*.

Os dados para a simulação são inseridos através de dois ficheiros manipulados pelo utilizador: o ficheiro de dados climáticos “.epw” (EnergyPlus Weather File) e o ficheiro de dados de entrada IDF “.idf” (Input Data File) no qual se encontram todos os restantes, necessários à execução da simulação.

2.2.4.2. Openstudio

OpenStudio® é uma coleção de ferramentas de software de plataforma cruzada (Windows, Mac e Linux) que, funcionando como ferramentas de interface gráfica de usuário (GUI), dão suporte à modelagem energética de edifícios usando EnergyPlus™ e à análise avançada de iluminação natural usando Radiance™. É um projeto oferecido de forma gratuita e com código aberto.

Foi criado pelo departamento de energia dos Estados Unidos da América e tem por objetivo ajudar proprietários de edifícios, engenheiros, arquitetos, desenvolvedores de softwares, pesquisadores ou quem quer que esteja ligado aos processos de projeto, construção e gerenciamento de edifícios, a implementar medidas capazes de aumentar a eficiência energética.

Os aplicativos gráficos incluem o plug-in OpenStudio SketchUp, o aplicativo OpenStudio, o ResultsViewer e uma ferramenta de análise paramétrica.

O plug-in OpenStudio SketchUp (Fig. 4) é uma extensão da popular ferramenta de modelagem 3D SketchUp da Trimble que permite aos usuários criar rapidamente a geometria necessária para o EnergyPlus™ ©.

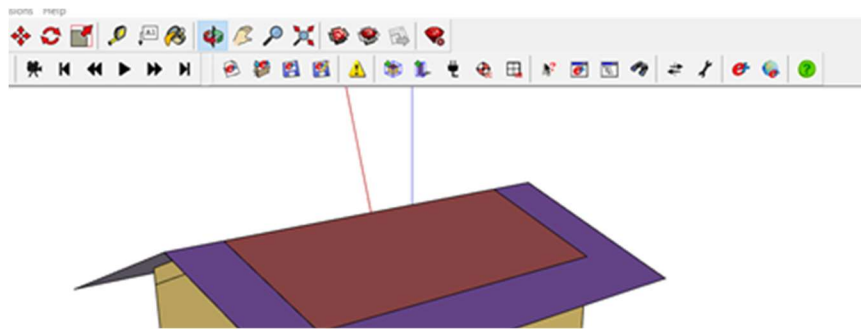


Fig. 4 – Plugin *Openstudio*

Além disso, o OpenStudio oferece suporte à importação de gbXML e IFC para criação de geometria. O aplicativo OpenStudio é uma interface gráfica completa para modelos OpenStudio, incluindo envolvente, cargas, cronogramas e AVAC.

O ResultsViewer permite navegar, traçar e comparar dados de saída de simulação, especialmente séries temporais.

A ferramenta de análise paramétrica permite estudar o impacto da aplicação de várias combinações de medidas do OpenStudio a um modelo básico, bem como exportar os resultados da análise para envio por EDAPT.

2.3. ESTADO DA ARTE RELATIVO A UTILIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS PARA AVALIAÇÃO DE MEDIDAS DE REABILITAÇÃO

Através da implantação de medidas de eficiência energética, o consumo de energia em um edifício pode ser reduzido, mantendo ou melhorando o seu nível de conforto. Foram revistos artigos literários e teses dos últimos 10 anos, em ordem cronológica por tema, os quais tratam a respeito da análise de medidas operacionais e de projeto com intuito de melhorar a eficiência energética em edifícios (ECMs), sendo estas medidas avaliadas através de simulações energéticas dinâmicas.

2.3.1. IMPORTÂNCIA DA CALIBRAÇÃO DOS MODELOS

(Parker et al., 2012) ilustraram a importância de um modelo de simulação calibrado para o processo de análise do comportamento energético de um grande edifício com ocupação altamente variável e com diversos perfis operacionais: o edifício de um terminal do aeroporto de Birmingham em Londres. Foram simulados cenários com o edifício como se encontra atualmente e com a implementação de ECMs. Os resultados da DTS foram confrontados com dados mensais da concessionária de energia e, deste modo, utilizados na calibração do modelo. Os resultados não calibrados mostraram grandes erros na estimativa de consumo de CO₂ e na economia de custos decorrente da implementação das ECMs. Ficando clara a necessidade de uma boa calibração do modelo para prever com precisão o comportamento do edifício.

Em (Heo et al., 2015) os autores formularam um conjunto de situações reais de tomada de decisão de ECMs e avaliaram o papel da calibração usando um estudo de caso de um edifício de escritórios que compara previsões e decisões de um modelo não calibrado com as de um modelo calibrado. O estudo de caso demonstra que a calibração reduz a incerteza das previsões do modelo. Apesar das discrepâncias

entre os resultados do modelo não calibrado e calibrado, o trabalho sugeriu que o modelo não calibrado pode realizar uma análise comparativa adequada para classificar os cenários de reabilitação em um nível agregado. Por outro lado, para avaliações de edifícios individuais, os resultados reafirmam a importância da calibração do modelo para a tomada de uma decisão consciente.

2.3.2. METODOLOGIAS DE SUPORTE A TOMADA DE DECISÃO

(Silenzi et al., 2018) propuseram uma metodologia para otimizar o processo de seleção de intervenções de reabilitação, aplicada a um estudo de caso do Pavilhão Monoblocco no Hospital San Martino em Genova, Itália. O comportamento térmico do edifício foi simulado dinamicamente por meio de um modelo EnergyPlus™ para avaliar as necessidades de energia para aquecimento e refrigeração. O cenário do caso base é avaliado em termos de indicadores-chave de desempenho (KPIs) e comparado com os valores de referência para selecionar as ações de intervenção mais adequadas. As ECMs foram combinadas em diferentes pacotes de intervenção que foram comparados em termos de economia de energia e sustentabilidade econômica por meio da estimativa dos valores horários de consumo de energia e da avaliação do *Simply Pay Back Period* (SPB) do investimento.

(Shen et al., 2019) propuseram um método de otimização multi-objetivo simples para o suporte à tomada de decisão para o planejamento da reabilitação de edifícios. Uma modelagem de simulação dinâmica horária SimBldPy é usada. O método de otimização sugerido é implementado para o planejamento da reabilitação de um prédio do campus em UPenn com diversas medidas de conservação de energia (ECM) e custos. Se concluiu que o esquema de apoio à tomada de decisão desenvolvido mostra robustez em lidar com o problema de otimização de reabilitação e é capaz de fornecer suporte para *brainstorming* e enumerar várias possibilidades durante o processo de tomada de decisão.

2.3.3. SIMULAÇÕES ASSOCIADAS A TRABALHOS EXPERIMENTAIS EM EDIFÍCIOS

(Ascione et al., 2011) sugeriram uma abordagem multicritério para a reabilitação energética de edifícios históricos, propondo metodologias de análise de desempenho, combinando diversos estudos experimentais e numéricos. O edifício analisado foi o “Palazzo dell'Aquila Bosco-Lucarelli”, uma construção histórica localizada em Benevento (sul da Itália). Foi realizada uma cuidadosa modelagem energética do edifício. Os resultados das simulações de energia forneceram demandas de energia que foram comparadas com as demandas históricas. Após a calibração do modelo numérico, diversas ações de reabilitação foram verificadas e testadas, tanto na eficácia do desempenho energético quanto na viabilidade econômica.

(Güçyeter & Günaydin, 2012) avaliaram e otimizaram estratégias de reabilitação de envolvente através de uma abordagem de simulação calibrada. Com base em uma auditoria e monitoramento de desempenho de energia, um edifício existente foi avaliado em níveis de desempenho e potenciais de melhoria com medidas básicas de conservação de energia (ECMs). O edifício existente foi monitorado por um ano inteiro e os dados de monitoramento são usados na calibração do modelo de simulação. A fim de obter uma envolvente de construção com melhor desempenho, três estratégias de reabilitação, incluindo vários ECMs, foram propostas. As estratégias de reabilitação são simuladas por meio de um modelo calibrado, e os resultados são avaliados de acordo com as mudanças nos parâmetros ambientais internos e medidas anuais de consumo de energia. A análise dos resultados indicou que as estratégias pré-avaliadas apresentam resultados próximos. Por fim, uma avaliação mais abrangente com base em

diferentes critérios decisivos foi usada na otimização da estratégia de reabilitação final, com a intenção de avaliar o efeito de ECMs individuais no consumo final anual de energia e no investimento.

(Stazi et al., 2012) apresentaram um estudo experimental e analítico em edifícios residenciais de vários andares sem isolamento térmico que foram construídos antes da introdução dos padrões de economia de energia (Lei italiana 373/1976). Várias atividades foram realizadas para identificar o reabilitação ideal em termos de conforto, consumo de energia e impacto ambiental: análise tipológica de 70 edifícios na província de Macerata (Itália Central) e análise energética de estudos de caso representativos; monitoramento de um estudo de caso selecionado durante o verão e inverno; simulação do edifício em condições dinâmicas com software EnergyPlus™ e calibração do modelo virtual por comparação com resultados experimentais; análises paramétricas para prever o efeito de várias soluções de reabilitação sem conforto e sem consumo de energia; impacto ambiental nas diferentes soluções. Foi possível identificar as soluções de reabilitação ideais para as envolventes dos edifícios estudados.

(Buonomano et al., 2014) investigaram várias ações para a reabilitação energética de alguns edifícios do Hospital Universitário Federico II de Nápoles. Foram investigadas ações como à instalação de: i) isolamento térmico das coberturas; ii) uma válvula climática de 3 vias da subestação; iii) válvulas termostáticas dos radiadores; iv) regulamento programável no tempo de AHU (unidade de tratamento de ar). Através da combinação de simulações de desempenho de energia dinâmica e medições experimentais, mostrou-se que economias significativas podem ser alcançadas, especialmente com a adoção de válvulas termostáticas de radiadores e regulamentos de AHU. Coerentemente, a instalação de uma válvula de 3 vias na subestação não determina uma economia adicional significativa quando as válvulas termostáticas dos radiadores já estão instaladas. Para prédios altos, o isolamento dos telhados retornou apenas reduções marginais das demandas de aquecimento e refrigeração.

Em (Terés-Zubiaga et al., 2015) o potencial de economia de energia com a implementação de diferentes ECMs para aprimorar a envolvente do edifício é apresentado e calculado por meio de simulações dinâmicas usando o *software* TRNSYS. Para isso, foi selecionado um edifício de referência. A fim de desenvolver um modelo preciso, uma habitação daquele edifício foi monitorada durante 3 meses, e os dados obtidos nesse estudo foram usados para calibrar e ajustar o modelo de simulação. Em seguida, diferentes medidas de economia de energia definidas para telhado, fachada e janelas, em 64 combinações são simuladas. Esses resultados, avaliados segundo critérios económicos e energéticos, são analisados com base nos requisitos térmicos de referência fixados pela regulamentação espanhola (tanto para edifícios novos como para renovações de edifícios). Estes resultados mostram como as renovações energéticas em edifícios envolvem benefícios importantes não apenas sob uma abordagem energética ou ambiental, mas também considerando as questões económicas.

Em (Evangelisti et al., 2015) um edifício do início dos anos 50 foi analisado através de estudos experimentais para investigar as características do edifício e sua vulnerabilidade. Em seguida, algumas alternativas de reabilitação foram simuladas e comparadas por meio de um modelo calibrado. Em relação às superfícies transparentes, três janelas diferentes foram testadas. Os resultados mostraram que um maior isolamento térmico permite obter as melhores reduções da demanda de aquecimento, mas o fator de ganho solar da janela desempenha um papel fundamental durante o verão. No que diz respeito às superfícies opacas, foi estudado o efeito de um revestimento isolante externo de poliestireno expandido. Os resultados mostram que um maior isolamento térmico permite atenuar as dispersões de calor invernal, mas, por outro lado, envolve um aumento da demanda de energia de resfriamento, que pode chegar a 45%. O uso simultâneo de esmaltes de controle solar e revestimento externo acaba sendo a melhor solução. No entanto, a instalação de novos elementos de janela requer custos muito elevados

e, portanto, a escolha deste tipo de intervenção precisa ser avaliada com precisão em função do orçamento econômico inicial.

(Cornaro et al., 2016) apresentaram um método envolvendo medições in loco e simulação dinâmica para avaliar soluções de renovação de um edifício extenso e complexo de grande valor artístico e histórico, Villa Mondragone, localizado na área de Colli Albani e propriedade da Universidade de Roma Tor Vergata. O trabalho demonstrou como uma calibração específica do modelo dinâmico usando apenas medições de temperatura interna pode superar esse problema. O modelo foi utilizado para avaliar o desempenho energético do uso real da Villa e dois casos possíveis de intervenção. Foi avaliada uma melhoria de aproximadamente 40% na demanda de energia com a adoção de soluções de reforma sem impacto no valor histórico do edifício.

(Jones et al., 2017) descreveram uma combinação de modelagem de energia e medições de campo para analisar o desempenho das casas antes e depois da reabilitação. Os resultados indicam que reduções significativas no uso de energia, emissões de CO₂ e custos de energia podem ser alcançados usando uma abordagem de casa inteira, combinando a eficiência energética com a geração integrada de energia renovável e armazenamento de energia. O artigo demonstra as vantagens do uso de uma combinação de simulação de energia e monitoramento de campo para investigar o desempenho de edifícios em uso, que neste caso diz respeito ao impacto da realização de reabilitações de energia em habitações.

(Rodrigues et al., 2018) apresentaram uma avaliação dos desempenhos teóricos e experimentais de um novo protótipo de sistema de isolamento de parede externa, desenvolvido para melhorar a eficiência energética em habitações "difíceis de tratar". O sistema foi projetado para ser usado principalmente para reformar a habitação social. Foi realizado um regime de teste exaustivo para testar a adequação e eficácia do novo produto nas tipologias de construção de habitação social mais comuns. Foram realizados: uma investigação do desempenho térmico teórico do produto protótipo por meio de modelagem de estado estacionário, um teste de protótipo em laboratório, uma análise de dados empíricos coletados de uma seção transversal de propriedades de habitação social em Nottinghamshire, Reino Unido, usados para informar a modelagem dinâmica de toda a casa, e o desenvolvimento de simulações dinâmicas para avaliar os impactos de redução de energia e carbono do novo produto. A modelagem teórica sugeriu que a integração do sistema resultou em melhorias de desempenho térmico para todos os tipos de construção com demanda de aquecimento ambiente reduzida em até 42%. Os resultados da avaliação da modelagem dinâmica de toda a casa também sugeriram que a adição do sistema resultou em uma redução da demanda de energia de aquecimento de até 49%. O teste de prototipagem mostrou que o sistema é fácil de instalar e requer habilidades mínimas de construção.

(Scorpio et al., 2020) usaram o *software* de simulação dinâmica TRNSYS para analisar os benefícios do uso de vidros elétricos dinâmicos para reformar as janelas de edifícios históricos do ponto de vista energético, ambiental e visual. Um escritório orientado para o sul dentro da Abadia de San Lorenzo ad Septimum, localizado em Aversa (sul da Itália), foi considerado para as simulações. As simulações foram realizadas considerando cinco estratégias de controle de janela, dois vidros elétricos baseados em cristal líquido e dois tempos de comutação de simulação. Os resultados da simulação associados às janelas elétricas foram comparados aos obtidos para uma janela de vidro duplo Low-E convencional, destacando que: (i) o uso do vidro dinâmico examinado pode ajudar a melhorar tanto a eficiência energética quanto o conforto visual interno, (ii) os efeitos da estratégia de controle estão fortemente relacionados às características térmicas e visuais da janela dinâmica e (iii) ao reduzir o tempo de comutação da janela, é possível melhorar a economia de energia, bem como o conforto dentro do escritório.

2.3.4. IDENTIFICAÇÃO DO PERFIL DE CONSUMO DE ENERGIA DE PARQUES PREDIAIS

A identificação do perfil de consumo de energia dos estoques prediais é uma etapa necessária para avaliar o impacto das ECMs. (Soutullo et al., 2018) Avaliaram o desempenho energético de habitações representativas do parque imobiliário residência de Madrid foi analisado para desenvolver uma plataforma orientada para o cidadão. Diferentes estratégias de renovação foram destacadas para avaliar a economia de energia em comparação com a situação inicial através de modelos desenvolvidos no Trnsys ©. O impacto da energia produzido pela implementação de estratégias de renovação selecionadas foi avaliado por meio de uma análise de sensibilidade. Baterias de simulações foram executadas acoplando os modelos TRNSYS com *GenOpt*. Como resultados obtiveram-se que as estratégias mais influentes para reabilitação neste caso são a tipologia das fachadas, o isolamento da cobertura, melhores envidraçamentos e o sombreamento exterior das janelas no verão.

2.3.5. ANÁLISE DE ECMs APLICADAS EM EDIFÍCIOS ESCOLARES

(Nuno & Bento, 2012) estudaram medidas de racionalização energética para o Edifício VIII do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, situado no campus da Faculdade de Ciências e Tecnologia, da Universidade Nova de Lisboa. Este estudo foi dividido em três partes. A primeira parte do estudo consistiu na análise das leituras efetuadas ao contador de energia elétrica do edifício VIII, referentes aos anos de 2007 a 2010. Os valores em análise, dos únicos anos com leituras completas (2008 e 2009), revelaram-se à partida desajustados dos valores esperados para a tipologia do edifício em causa. Para a segunda parte, o Ed.VIII foi submetido a uma simulação dinâmica detalhada multizona, utilizando para tal o software DesignBuilder que está associado ao EnergyPlus™ ©. A incoerência revelada pelas leituras anuais ao contador de energia elétrica, ganhou fundamento após o cálculo dos valores nominais. A última etapa da dissertação, teve como objetivo a apresentação de propostas de medidas de racionalização energética para o presente caso, sendo possível encontrar e apresentar poupanças significativas para o Ed.VIII do DEMI.

(Moço, 2013) efetuou uma simulação dinâmica de um edifício escolar existente em funcionamento pleno, e efetuou uma análise de sensibilidade relativamente ao grau de variação dos resultados obtidos através da aplicação de dois programas de cálculo térmico e energético. Foram utilizados, o programa VE-Pro da IES (Integrated Environmental Solutions) e o programa Trace 700 da TRANE. Foram ainda consideradas várias soluções de eficiência energética para o edifício, com vista a poupanças reais de energia, tendo sempre atenção ao conforto térmico dos ocupantes. Os resultados obtidos nas duas simulações foram analisados sob o ponto de vista do aquecimento, arrefecimento, ventilação, iluminação e equipamentos elétricos.

(Loreti et al., 2016) apresentaram uma análise comparativa de duas estratégias diferentes para melhorar o desempenho energético de um edifício existente, tentando melhorar também as condições de conforto interior. Uma das estratégias visava reduzir a transferência de calor por transmissão, e a outra diminuir a transferência de calor por ventilação. O estudo foi aplicado a uma escola localizada nos arredores de Bolonha, Itália. A economia potencial de energia foi calculada por DTS usando o software TRNSYS. As intervenções mais vantajosas resultaram ser aquelas envolvendo a reabilitação da envolvente do edifício, que resultaram em uma grande economia anual de energia, embora implicassem em grandes custos de investimento.

Em (Pagliano et al., 2016) a reabilitação energética de uma creche localizada em Milão (Itália) foi analisada com base em cenários climáticos futuros; a análise objetivava identificar em que medida as escolhas que são feitas hoje com base em um ano meteorológico típico (TMY) podem ter sucesso em fornecer energia e desempenho ambiental interno aceitáveis ao longo das décadas futuras. A análise confirmou que as mudanças climáticas podem exigir a instalação de sistemas de resfriamento ativo para compensar as condições mais adversas do verão em um horizonte de longo prazo, no entanto, no médio prazo, estratégias de resfriamento passivo combinadas com renovação de envelope podem ainda garantir condições termicamente confortáveis, o que reduzirá as necessidades de resfriamento de energia quando o resfriamento ativo for eventualmente instalado.

No caso de estudo apresentado em (Civil & Carvalho, 2017) foram identificadas as causas que deram origem às humidades encontradas num edifício escolar, através da caracterização e justificação das patologias existentes naquele edifício, recorrendo a levantamentos executados *in situ* e a bibliografia da especialidade. Utilizando a ferramenta informática de simulação dinâmica multizona de edifícios *Hourly Analysis Program* (HAP), foi feita uma primeira simulação do consumo energético do edifício na situação atual, conforme contruído e, posteriormente, foram simulados sucessivamente mais sete incrementos de melhorias, avaliando-se a contribuição de cada uma delas no desempenho energético do edifício e patologias na construção. Por último, foi realizado o apuramento da viabilidade económica de cada uma das melhorias introduzidas.

A análise do desempenho de um edifício escolar foi realizada através de simulação dinâmica (usando o DesignBuilder) (João & Pereira, 2020), sendo avaliado o impacto das medidas de reabilitação implementadas no comportamento termo-energético do mesmo, e analisadas as condições de conforto térmico nas salas de aulas de modo a verificar o impacto da reabilitação proposta nas condições de conforto térmico dos alunos. A análise das condições ambientais do espaço, sem climatização, permitiu verificar que, a implementação da solução de reabilitação no edifício melhorou as condições de conforto térmico de alguns espaços. Após a implementação da solução de reabilitação nZEB, sem sistema de climatização, é possível assegurar as condições de conforto em todos os espaços, no verão, mas, mesmo com sistema de climatização, não são asseguradas as condições de conforto, em todos os espaços, no inverno, devido a perdas por radiação para o enviaçado.

2.3.6. ANÁLISE DE ECMS APLICADAS EM EDIFÍCIOS HISTÓRICOS

Em (Ascione et al., 2015) os autores propuseram um método para o diagnóstico do comportamento energético, visando o projeto integrado de renovação energética de edifícios existentes, com referência a arquiteturas históricas. A abordagem está estruturada de acordo com três fases principais: (a) a avaliação do desempenho do edifício, através da combinação de monitorização *in situ* e informação documental; (b) os estudos numéricos por simulações de energia horária com aprofundamento da metodologia de calibração; (c) a investigação do potencial de economia de energia, benefícios ambientais e lucratividade económica de medidas selecionadas de eficiência energética. O estudo de caso foi um prédio educacional da Universidade de Sannio, localizado no antigo centro de Benevento (cidade do sul da Itália). O conhecimento das dados históricas de energia, combinado com várias medições e com investigação *in situ* permitiram a calibração do modelo numérico. Os resultados alcançados mostram que a seleção das medidas de eficiência energética é um problema de otimização multiobjectivo e que existem uma gama de opções capazes de gerar poupanças de energia satisfatórias.

Os desempenhos das seguintes ações de reabilitação em um edifício público histórico existente foram simulados dinamicamente usando o software de simulação TRNSYS (Ciampi et al., 2015): a) utilização de termostatos para controle de temperatura do ar interno com 20 ° C e 18 ° C como temperaturas alvo; b) incremento do isolamento térmico atual de paredes e janelas opacas; c) substituição da atual caldeira a diesel por uma caldeira a gás natural de condensação. Os resultados da simulação foram analisados do ponto de vista energético e econômico. A análise destacou que a melhor opção do ponto de vista energético e econômico é usar termostatos para regular a temperatura do ar interno; a adição de painéis isolantes e a substituição de janelas atuais fornecem um valor bastante grande do período de retorno simples; resultados intermediários podem ser obtidos usando uma caldeira de condensação a gás natural em vez da caldeira a diesel atual.

(Tadeu et al., 2015) descreveram a implementação de uma otimização de custos integrada e avaliação ambiental envolvendo pacotes ECMs alternativas para um edifício que data do início do século XX. Um edifício típico do parque imobiliário do centro de Coimbra foi utilizado para ilustrar a metodologia apresentada. Os resultados também foram analisados para o mesmo edifício em duas outras localidades. Um modelo de ciclo de vida (LC) foi implementado para avaliar diferentes medidas de eficiência energética para um apartamento. Demonstrou-se que, embora os edifícios históricos em Portugal não tenham de cumprir os códigos de energia da construção, podem ser alcançadas poupanças de energia significativas sem alterar o seu carácter histórico. Concluiu-se também que os custos econômicos e ambientais podem ser minimizados com a escolha das medidas de reabilitação de eficiência energética mais adequadas.

(Muñoz-González et al., 2016) descreveram diferentes técnicas ambientais para melhorar as condições de conforto térmico em igrejas preservando o patrimônio cultural desses edifícios. Diferentes estratégias e regimes foram testados usando monitoramento e simulação. O software utilizado foram o Design Builder ©, EnergyPlus™ ©, sendo o modelo de simulação validado por dados medidos. Através do modelo simulado, obteve-se o conhecimento detalhado sobre a resposta higrotérmica da igreja após a instalação do AVAC, que mostrou grande potencial de economia de energia e gerou um melhor conforto térmico interno.

(Mancini et al., 2016) centraram-se num edifício histórico propriedade da ANCE (Associazione Nazionale Costruttori Edili), situado em Roma. Hipóteses de reabilitação foram feitas a fim de melhorar os sistemas de climatização, envoltivo do edifício e gestão do edifício, sempre respeitando suas características arquitetónicas. A primeira etapa do estudo consistiu em uma bateria de medições realizada pela Avvenia para saber mais sobre o uso real do edifício. Em seguida, uma modelagem energética simplificada dinâmica do edifício foi construída usando o software *ArchiEnergy*. As simulações mostraram que seria possível alcançar uma redução das necessidades de energia fazendo mudanças simples no domínio de gerenciamento e, com custos mais elevados, atualizando os componentes da envoltiva. Concluiu-se também que em um edifício histórico, onde existem poucos graus de liberdade para intervenções, com uma boa análise é possível encontrar altos potenciais de economia com baixos investimentos e que é importante realizar medições para descobrir ineficiências de controle ocultas e desperdícios de energia.

(Gigliarelli et al., 2017) descreveram uma metodologia integrada, holística e multiescalar para abordar o tema da eficiência energética dos tecidos históricos, apoiada na utilização de tecnologias no domínio do Heritage BIM, simulações numéricas e sistemas de apoio à decisão, realizadas na zona histórica da cidade de Frigento na Itália. O Analytical Hierarchy Process, uma ferramenta de aplicação de análise multicritério, com base em quatro critérios principais (compatibilidade com princípios de restauração,

acessibilidade econômica, eficiência energética e sustentabilidade ambiental), foi usado para selecionar a melhor solução de reabilitação para um edifício histórico piloto entre um conjunto de alternativas propostas pela equipe de pesquisa e design, incluindo todas as partes interessadas envolvidas no processo. A metodologia proposta oferece um teste experimental e uma oportunidade de reflexão sobre a sistematização dos dados necessários para uma gestão adequada dos processos de transformação e conservação sustentáveis de tecidos urbanos históricos.

Em (Galatioto et al., 2019) um edifício público histórico “típico” que requer renovação energética foi investigado para identificar as soluções de reabilitação mais adequadas, que podem ser aplicadas de acordo com incentivos de financiamento governamentais. Sete estratégias de energia detalhadas foram aplicadas em um edifício de caso base (BC) em quatro zonas climáticas diferentes na Itália. De acordo com pesquisas anteriores e abordagem científica, um estudo rigoroso foi realizado neste trabalho, a fim de identificar o potencial de economia de energia de edifícios históricos públicos e, principalmente, para destacar as limitações das atuais políticas energéticas italianas sobre este tema. Este estudo indicou que nem todas as ações de reabilitação de energia são adequadas e eficientes em torno das zonas climáticas italianas.

2.3.7. ANÁLISE DE ECMS APLICADOS A EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS

Dentro de um contexto de mudança climática, (Mavrogianni et al., 2012) estudaram o efeito do superaquecimento interno em todo o estoque residencial existente de Londres. Foi demonstrado que a combinação de geometria e idade de construção pode funcionar como preditores confiáveis do risco de superaquecimento interno. Outra descoberta importante deste estudo foi que, embora medidas de isolamento interno combinadas pareçam diminuir as temperaturas internas, este tipo de isolamento pode aumentar potencialmente o superaquecimento durante um período quente se nenhuma ventilação noturna for fornecida. Uma implicação dessa descoberta é que uma consideração cuidadosa das opções de isolamento precisa ser feita no futuro dentro do contexto de estratégias de modernização da eficiência energética.

(Hall et al., 2013) investigaram um conjunto de tecnologias e abordagens em etapas para reabilitação de edifícios domésticos com paredes de alvenaria, no Reino Unido, as quais deveriam i) reduzir a demanda de energia operacional / emissões de carbono, e ii) serem aceitáveis e atraentes para os ocupantes do edifício. Cada cenário de reabilitação foi modelado usando uma abordagem de simulação de desempenho de edifício higratérmico energético (BPS) para determinar os efeitos combinados dos pacotes de reabilitação nas condições psicrométricas do ar interno, transferência de calor de envelope externo (dinâmico), eficiência energética operacional, conforto do ocupante. Foi proposto que esta abordagem poderá fornecer a base para uma estratégia de gerenciamento de risco inteligente para amparar tanto a fase de projeto quanto a de implantação de pacotes de reabilitação destinados a edifícios residenciais.

(Stazi et al., 2013) verificaram o desempenho dinâmico de três envoltórias caracterizadas por diferentes construções de paredes tradicionais adotadas em climas temperados. Em cada caso, é identificada a solução de reabilitação ideal do ponto de vista de conforto e economia de energia. Para o efeito, foram feitas comparações experimentais contemporâneas entre três edifícios que são característicos do patrimônio edificado existente. Todos foram construídos entre as décadas de 1940 e 1980, adotando envoltórias que usam diferentes construções de parede para lidar com as condições climáticas externas: capacidade (alta massa térmica), estratificação (diferentes camadas e uma cavidade) e resistência (o uso

de uma camada de isolamento). Foram realizadas análises paramétricas dinâmicas (EnergyPlus™ ©, CFD Fluent) para verificar o impacto de diferentes soluções de reabilitação nos edifícios estudados. Os resultados mostram que o comportamento das envolturas difere muito, pois elas interagem de maneiras diferentes de acordo com as mudanças climáticas. O uso de espessuras consideráveis de isolamento térmico causa problemas de superaquecimento quando associado a alta massa térmica. Foi sugerido que o problema do desconforto do verão pode ser resolvido com a adoção de estratégias de isolamento mistas, como uma camada de isolamento externo ventilado, que permite que os envelopes existentes mantenham seu comportamento dinâmico.

(Porritt et al., 2013) usaram simulação térmica dinâmica (EnergyPlus™ ©) para modelar uma gama de intervenções passivas em tipos de residência selecionados com o objetivo de evitar o efeito de superaquecimento de tipos de residência selecionados no cenário de uma onda de calor e no cenário de uso normal de energia de aquecimento ambiente. Os resultados demonstram a eficácia das intervenções que reduzem os ganhos de calor solar, sendo as persianas externas instaladas nas janelas a intervenção isolada mais eficaz em muitos casos. A modelagem demonstra ainda que as intervenções combinadas podem reduzir significativamente ou, em muitos casos, eliminar o superaquecimento. A exposição ao superaquecimento variou significativamente (até um fator de dez vezes) entre os tipos de moradia.

(Aelenei et al., 2014) abordaram o desempenho energético de um espaço solar anexo aplicado a um edifício residencial existente em Portugal. Quatro configurações são estudadas em seis zonas climáticas diferentes. Além disso, outros parâmetros-chave são considerados, como ventilação, dispositivos de sombreamento, número de camadas superficiais de vidro e orientação. A análise de desempenho térmico, realizada usando um código de simulação dinâmica, provou que a economia de energia para o projeto de reabilitação pode ser muito importante e que em climas com verões quentes o risco de superaquecimento pode ser reduzido consideravelmente através de uma análise precisa baseada em modelagem. A análise, que se baseou na estimativa da demanda de energia do edifício com e sem espaço solar para seis locais climáticos diferentes, revelou quais são as variáveis de projeto que impactam mais significativamente o comportamento térmico e quais são os valores esperados de economia de energia em cada um. caso. O design principal inclui: orientação, configuração do espaço solar, ventilação natural do espaço solar e posição e propriedades radiativas dos dispositivos de sombreamento.

(Gagliano et al., 2014) estudaram a exploração de um telhado verde para reforma de uma casa-férias existente localizada no sul da Sicília. O desempenho energético do edifício e o comportamento térmico dinâmico do telhado verde foram avaliados usando um programa de simulação transiente. Os resultados deste estudo indicam uma redução notável da carga de resfriamento e aquecimento, respectivamente, de cerca de 80% e 34%. Globalmente, os resultados deste estudo sugerem que o uso de telhados verdes pode ser altamente recomendado na renovação dos edifícios existentes.

(Stazi et al., 2015) estudaram o efeito de técnicas de alto isolamento térmico e alta massa térmica no comportamento dinâmico de edifícios em climas mediterrâneos. Investigações experimentais foram realizadas em uma casa unifamiliar para caracterizar o comportamento de duas paredes com diferentes inércias térmicas. As simulações térmicas possibilitaram explorar diferentes configurações de reabilitação, incluindo também estratégias dinâmicas. As soluções foram comparadas em conforto, economia de energia e custo global. O estudo mostra que a intervenção mais adequada é a maximização da capacidade térmica interna e a introdução de uma camada de isolamento externo selado no inverno e ventilado no verão, mantendo assim o comportamento dinâmico sazonal da envoltura maciça existente, maximizando alternativamente o efeito de barreira térmica e a perda de calor.

(Wu et al., 2017) apresentaram um método para uma otimização multiobjectivo e simultânea de sistemas de energia de edifícios e reabilitação. Feito sob medida para ser adequado para a ampla gama de edifícios existentes em termos de idade, tamanho e uso, este estudo combinou simulação de demanda de energia dinâmica para explorar cenários de reabilitação individuais com uma otimização de hub de energia. Devido à sua avaliação integrada e multi-objetiva das opções de transformação de edifícios e sua capacidade de capturar as características e tendências individuais dos edifícios em um bairro, este método teve como objetivo fornecer aos desenvolvedores, legisladores de bairro e cidades as informações necessárias para tomar decisões adequadas. Os resultados do nível de construção deste estudo forneceram orientações para proprietários de edifícios e investidores individuais, mostrando diferentes opções de transformação.

(Cascio et al., 2017) apresentaram as melhores medidas de conservação de energia para um edifício residencial australiano. Para isso, foi implementado e validado um modelo de simulação do edifício com base nas informações do relatório de auditoria energética. Além disso, um conjunto preliminar de medidas potenciais de conservação de energia foi identificado de acordo com informações específicas coletadas durante a fase de pesquisa de construção. O software DesignBuilder foi usado como ferramenta de simulação e os benefícios anuais de energia foram quantificados para cada intervenção. Por fim, foi realizada uma avaliação econômica com base nas ferramentas econômicas mais comuns. Como consequência, uma simulação final do desempenho do edifício foi conduzida para quantificar adequadamente o benefício energético potencial de toda a intervenção de reabilitação. Como resultados, este estudo destaca o quão árduo pode ser, em certos casos, alcançar uma intervenção de reabilitação econômica e como os índices econômicos podem levar os usuários a excluir a priori certas medidas de conservação de energia durante o processo de tomada de decisão, mesmo quando essas intervenções são necessárias para melhorar o conforto térmico e a eficiência energética.

(Dodoo et al., 2017) exploraram os principais valores de parâmetros, métodos e premissas usados para modelagem de balanço de energia de edifícios residenciais no contexto sueco. Os parâmetros estudados estão relacionados ao microclima, envoltório do edifício, comportamento de ocupação, ventilação e ganhos de calor de aparelhos elétricos e pessoas. Foi demonstrado que a temperatura do ar interno presumida, os ganhos de calor interno e a eficiência das unidades de recuperação de calor de ventilação têm efeito significativo no desempenho energético simulado do edifício estudado. Dos valores e suposições dos parâmetros do microclima considerados, a temperatura externa, a reflexão solar do solo e o sombreamento da janela têm impacto significativo nas demandas de aquecimento e resfriamento simuladas. Pelo contrário, os desempenhos energéticos simulados são menos afetados pelas variações na pressão do ar exterior e pela percentagem de carga do vento que atinge o edifício. Descobriu-se que os dados de entrada e as suposições usadas para cálculos de balanço de energia e análises de economia de energia variam significativamente no contexto sueco. Isso resulta em desempenho energético final calculado de edifícios e medidas de eficiência energética significativamente diferentes.

Em (Gomes et al., 2021) duas residências familiares representativas de um grande percentagem de agregados familiares em Portugal, foram monitorizados e a sua térmica foi modelada através do EnergyPlus™ ©. A análise das medidas de reabilitação foi realizada considerando diferentes soluções de reabilitação no que diz respeito à melhoria da envolvente e implementação de sistemas eficientes. Para contornar a questão da comparação de domicílios que não usam energia para climatização e, portanto, têm consumo de energia muito baixo, nos cenários de reabilitação considerou-se o valor de avaliação do conforto térmico para o caso real (pré-reabilitação) e comparou-se a energia consumo para atingir o mesmo nível de conforto médio (neste caso evitando picos de desconforto elevados). De acordo

com os resultados, as medidas que pagam mais rapidamente o investimento são aquelas relacionadas com a implementação de sistemas ativos. A abordagem usada neste artigo, deve ser usada em modelos melhores calibrados, a fim de se ter conclusões gerais sobre o processo de reabilitação em uma escala maior.

2.3.7.1. Análise de ECMs aplicadas à Habitação social

(Belpoliti & Bizzarri, 2015) realizaram uma profunda pesquisa de três anos do estoque de habitação social existente em Emilia Romagna, Itália, trabalhando sobre um reconhecimento completo de mais de 70 edifícios em termos de suas envolventes e das características dos sistemas de aquecimento. Na análise de resultados, um protocolo de cálculo paramétrico simplificado foi criado para operar uma auditoria preliminar e uma simulação de reabilitação de energia em todo o estoque de habitação social da Região. Os balanços de energia e os perfis de emissão de carbono foram calculados. Uma vez delineado o cenário de linha de base, três níveis crescentes de melhoria de energia foram simulados.

A reabilitação de habitações de interesse social costuma ser visto como uma forma de contribuir para a redução das emissões de carbono, visto que normalmente envolve intervenções em grande escala. (Teli et al., 2016) investigou o potencial de economia de carbono de uma reabilitação profundo em um bloco de plano de 107 propriedades, levando em consideração as estratégias de aquecimento dos inquilinos antes da reabilitação. Antes da reabilitação, o monitoramento da temperatura e da umidade relativa do ar foi realizado em 18 apartamentos por 35 dias. As medições foram então usadas para desenvolver perfis de aquecimento dos ocupantes nas 18 residências. A simulação térmica dinâmica dos apartamentos pré e pós-reabilitação usando os perfis dos sistemas de aquecimento dos usuários identificados destaca que a economia de carbono estimada da reabilitação tem o potencial de ser de até metade do que se emite com os perfis de aquecimento atuais.

Em (De Santoli et al., 2017) intervenções viáveis nas moradias dos anos 40 em Borgata Trullo, Roma foram projetadas e analisadas. As medidas de reabilitação energética propostas estão relacionadas com a envolvente do edifício, na instalação de camadas de isolamento, na substituição de janelas e na melhoria dos sistemas de climatização para aumentar a eficiência energética. Além do estudo de caso, foram apresentadas diretrizes de design para auxiliar os *stakeholders* em intervenções compatíveis e sustentáveis. As novas soluções de AVAC mostraram altos ganhos em economia de energia, mesmo se as modificações na envolvente do edifício fossem limitadas, em razão de preservar os valores do patrimônio cultural. Ao final, constatou-se que uma boa reabilitação do edifício pode atender com eficácia as metas atuais de eficiência energética.

2.3.8. ANÁLISE DE ECMS APLICADOS A EDIFÍCIOS COMERCIAIS

Em (Peng et al., 2014) O consumo anual de energia por hora de um prédio de escritórios em Nanjing foi investigado usando o Designer's Simulation Toolkit (DeST). Os efeitos do desempenho térmico da envolvente do edifício e das janelas exteriores, o volume de ar fresco, os ocupantes e a iluminação na carga de ar condicionado do edifício foram estudados. Medidas eficazes de economia de energia foram propostas com base nas características do edifício. A eficácia e a viabilidade dessas medidas foram examinadas usando o DeST. O presente estudo simulou o ambiente térmico do RRSAB usando o DeST, com base no entendimento da estrutura, funções e condições de operação do edifício. Os resultados foram posteriormente analisados. De acordo com as características de consumo de energia do RRSAB, várias medidas foram propostas para efetivamente reduzir o consumo de energia.

(Civil et al., 2014) abordaram um caso de estudo de um edifício deste tipo, localizado em Castelo Branco. É feita uma simulação energética do edifício em estudo, com recurso a software específico, de modelação e simulação (Google SketchUp e EnergyPlus™ respetivamente) e aplicadas alterações de modo a melhorar o desempenho energético do mesmo. O objetivo final foi o de encontrar soluções para alterar a classe energética do edifício, passando de B– para A.

(García Kerdan et al., 2016) apresentaram uma ferramenta de otimização multiobjetivo baseada em exergia que visa avaliar o impacto de uma ampla gama de medidas de reabilitação com foco em edifícios não residenciais. EnergyPlus™ foi usado como um mecanismo de cálculo dinâmico para análise de primeira lei, enquanto um add-on Python foi desenvolvido para vincular a análise de exergia dinâmica e um processo de otimização de algoritmo genético com o software mencionado. Dois estudos de caso de arquétipos do Reino Unido (um escritório e uma escola primária) foram usados para testar a viabilidade da estrutura proposta. Diferentes combinações de medidas com base na adaptação dos níveis de isolamento da envolvente e na aplicação de diferentes configurações de AVAC foram avaliadas. As funções objetivo neste estudo são o uso anual de energia, o conforto térmico dos ocupantes e a destruição total da exergia do edifício. Uma grande variedade de soluções ideais foi alcançada, destacando os recursos da estrutura.

(Valdiserri & Biserni, 2016) investigaram um edifício de escritórios existente, localizado em Bolonha - Itália, levando em consideração diferentes cenários de economia de energia. A primeira ação de reabilitação consistiu na substituição de todas as janelas (reduzindo a transferência de calor por transmissão) e a segunda na instalação de um sistema de recuperação de ventilação de energia total (diminuição da transferência de calor por ventilação). Além disso, o cenário denominado “Caso 3” contemplou tanto as ações acima mencionadas, a substituição das janelas e a implantação de um novo sistema de recuperação total de energia. A economia potencial de energia foi calculada por simulação transitória por meio do software TRNSYS. Por fim, foi realizada uma avaliação do tempo de retorno simples e do valor presente líquido.

2.3.9. ANÁLISE DE ECMS COM VISTAS A ATINGIR O NZEB

(Silva et al., 2013) apresentaram uma nova solução de módulo de reabilitação pré-fabricado para fachadas de edifícios existentes, e também as etapas tomadas para otimizar seu desempenho, que inclui uma escolha criteriosa de materiais, modelagem 3D, análise de custo-benefício, uso de diferentes ferramentas de simulação para otimização de desempenho e prototipagem. É também apresentada a implementação do módulo de reabilitação dentro de uma abordagem de reabilitação integrada, cujo objetivo final era obter um edifício com o mínimo possível de consumo de energia e emissão de gases com efeito de estufa.

Mesmo que as atuais estruturas de simulação de energia facilitem a simulação de energia do edifício incorporando o comportamento dinâmico do edifício, é importante analisar as necessidades de energia de todo o ciclo de vida do edifício investigando e compreendendo as várias interdependências. (Thomas et al., 2018) portanto, desenvolveram uma estrutura de simulação de sistemas para analisar o uso de energia do ciclo de vida em um edifício, incorporando os vários eventos dinâmicos ao longo do ciclo de vida. A principal contribuição deste estudo é uma abordagem para testar a eficiência energética de medidas de eficiência energética orientadas pelo NZEB ao longo de todo o ciclo de vida de um edifício, ajudando assim a escolher eficazmente as medidas de energia renovável e a determinar o excedente de energia.

(Martinopoulos, 2018) investigou o impacto dos sistemas de conversão de energia solar em uma casa unifamiliar pré-existente na Grécia sobre os recursos e o meio ambiente, e compara-o aos combustíveis fósseis convencionais, que esses sistemas substituem. Os sistemas de conversão de energia solar usados cobrem 100% das necessidades de energia, transformando a casa em um Edifício com Energia Zero Líquida (NZEB). Para tanto, é realizada uma Avaliação do Ciclo de Vida do berço ao túmulo (LCA) de sistemas ativos de conversão solar ao longo de sua vida útil de 25 anos com base em dois cenários. O estudo de caso emprega a simulação de energia dinâmica para a análise de energia, enquanto o software SimaPro e o banco de dados Ecoinvent foram usados para o LCA. A LCA mostra que o edifício reformado pode cobrir 100% de suas necessidades de energia, ao mesmo tempo em que se equilibra, em termos de emissões, em menos de 2 anos no pior cenário analisado.

2.3.10. REABILITAÇÃO ATRAVÉS DO COMPORTAMENTO HUMANO

Em (Pisello & Asdrubali, 2014) um trabalho numérico-experimental é realizado em uma vila de edifícios verdes no centro da Itália, onde as tecnologias mais inovadoras e eficientes já estão implementadas e, portanto, a princípio, outras reformas físicas ativas ou passivas não seriam econômicas. Este trabalho demonstrou que, através de uma modelagem teórico-experimental sofisticada, que uma economia substancial de energia ainda pode ser alcançada por meio de ações simples de custo zero, ou seja, retroajustes de energia de base humana. Ações ordinárias de redução do desperdício de energia são descritas dentro do modelo físico com o objetivo final de quantificar o efeito das operações de ocupação consideradas no mesmo nível dos cenários de reabilitação físicos tradicionais. Este trabalho mostrou que modelos teóricos de simulação dinâmica, usualmente realizados a fim de investigar o comportamento de energia térmica de edifícios e prever a eficácia de custo-benefício de reabilitações de energia física comum, também podem ser utilizados para avaliar reabilitações de energia humana simples e eficazes.

(Wei et al., 2017) realizaram a simulação de um edifício público do Reino Unido com base no perfil de comportamento dos ocupantes para prever o potencial de economia de energia que pode ser alcançado através de mudança neste parâmetro. Os resultados revelaram que, para o estudo de caso, o comportamento dos ocupantes do edifício tem um impacto significativo no potencial de economia de energia previsto de todas as medidas de renovação avaliadas: ao mudar de usuários de aquecimento passivos para usuários de aquecimento ativo, o potencial de economia de energia quase dobrou. Embora o comportamento de abertura das janelas dos ocupantes não tenha se mostrado tão importante quanto o comportamento do aquecimento para a reforma do edifício do estudo de caso, ele tem uma influência específica na medida de reforma de aumentar as camadas das janelas: quando as janelas são abertas por mais tempo, a eficácia do aumento da janela camadas sobre a promoção da eficiência energética do edifício é diminuída. De acordo com os resultados deste estudo, o comportamento dos ocupantes deve ser considerado um aspecto importante em projetos de reforma de edifícios

3

CÉLULAS DE TESTE – PROJETO RENEW-WALL

3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo se apresenta o estudo de caso desta dissertação, um projeto inovador de uma parede de madeira a ser utilizada na reabilitação de edifícios. O projeto é de uma empresa italiana e está sendo estudado em conjunto com a Universidade de Trento. Nesta seção se apresentam em detalhes o projeto construtivo de duas células de teste construídas para o estudo dessa parede e como é realizada a monitorização.

3.2. APRESENTAÇÃO DO PROJETO

O projeto Renew-Wall, proposto pela empresa Fanti Legnami, trata de um sistema modular inovador, que funciona como uma fachada externa não intrusiva, utilizada como segunda pele sobre a estrutura perimetral dos edifícios. Um corte construtivo da parede é apresentado na Fig. 5.

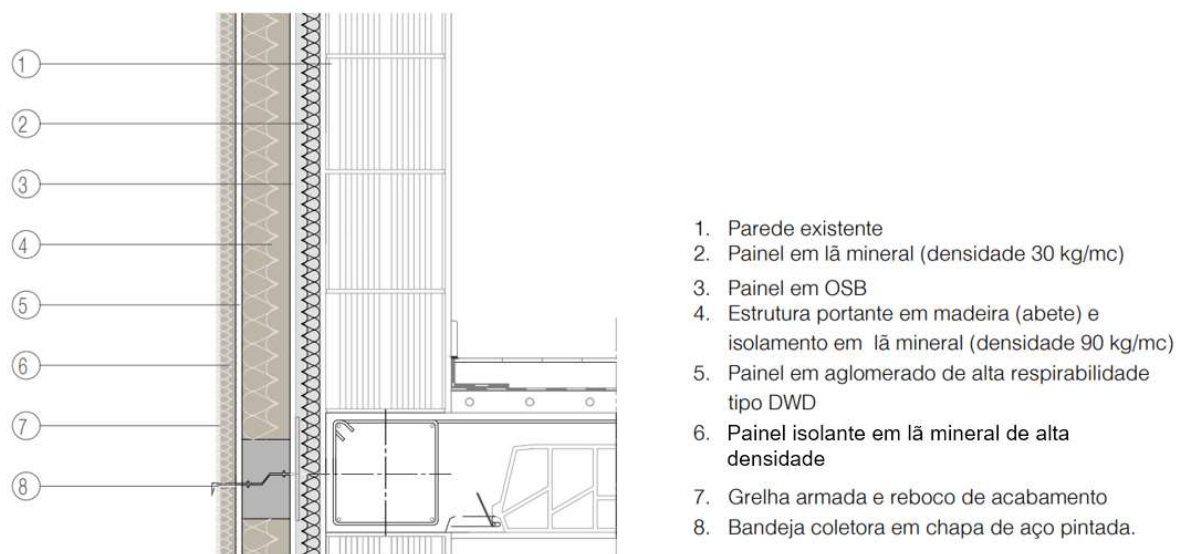


Fig. 5 – Corte Construtivo Renew-Wall

Esta solução tem por objetivos gerais a requalificação energética, arquitetónica e das condições internas de conforto do edifício. Além de que, como se trata de uma solução não intrusiva, é possível fazer a intervenção de requalificação sem precisar retirar os inquilinos do imóvel.

Na Itália, em específico, não se veem ainda casos concretos de soluções inovadoras desta natureza. A empresa citada, deseja, portanto, ser um exemplo de sucesso ao propor uma solução que traz uma série de inovações a respeito daquelas existentes no mercado.

No âmbito do projeto, a fim de mostrar o real e concreto benefício que a parede traz a uma construção existente, a empresa decidiu construir em um dos seus pátios, em Malosco-IT, dois edifícios idênticos, como se apresenta na Fig. 6 e na Fig.7, de pequenas dimensões com alvenaria de blocos cerâmicos e estrutura de betão.

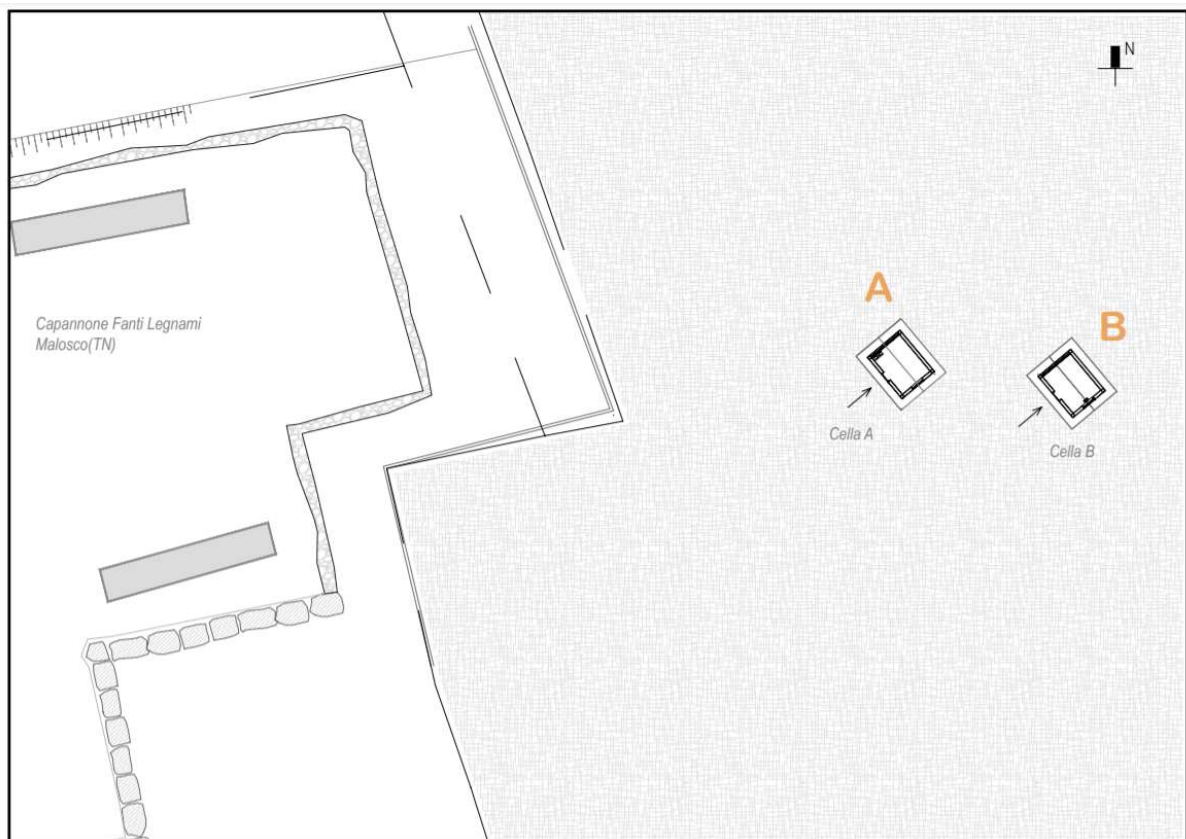


Fig. 6 – Posicionamento das células de teste



Fig. 7 – Células de teste construídas

Estas células de teste foram construídas no início do projeto sendo equipadas com instrumentação para medição de dados higrotérmicos. Após um ano de monitorização, uma das células recebeu a parede *Renew-Wall*, enquanto a outra permaneceu sem.

As duas células foram projetadas com o suporte da Universidade do Trento e monitoradas por todo o período previsto, mantendo sempre a condição climática interna padronizada. Nesta fase, a partir da documentação obtida se mede a qualidade do conforto obtido e a poupança de energia alcançada.

3.2.1. SISTEMA CONSTRUTIVO

No estágio inicial, as células de teste têm um sistema construtivo simples com paredes de vedação em alvenaria de blocos cerâmicos. Vistas em perspectiva dos edifícios são apresentadas na Fig. 8. A estrutura das paredes se compõe por pilares e vigas em betão armado. A cobertura tem estrutura de madeira com telhas cerâmicas. Tem-se ainda duas caixilharias: a porta de entrada e uma janela na parede lateral.



Fig. 8 – Células de teste em perspectiva

Das quatro paredes existentes, três têm alvenaria simples e uma alvenaria dupla, como se vê em planta baixa na Fig. 9 e em corte na Fig 10.

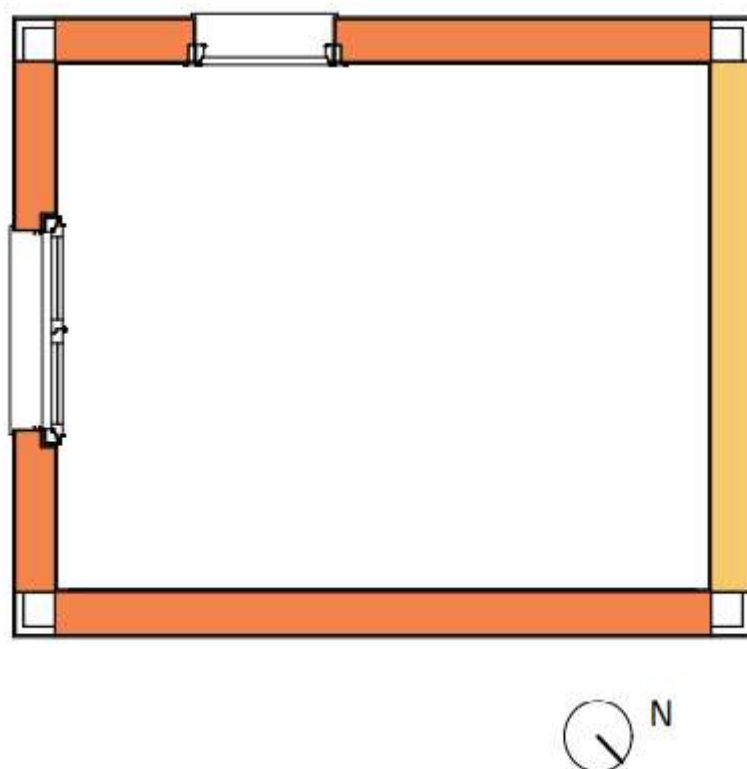


Fig. 9 – Paredes célula de teste

LEGENDA

- Sensor de Temperatura
- ▬ Termofluxímetro

 PAREDE 1

 PAREDE 2

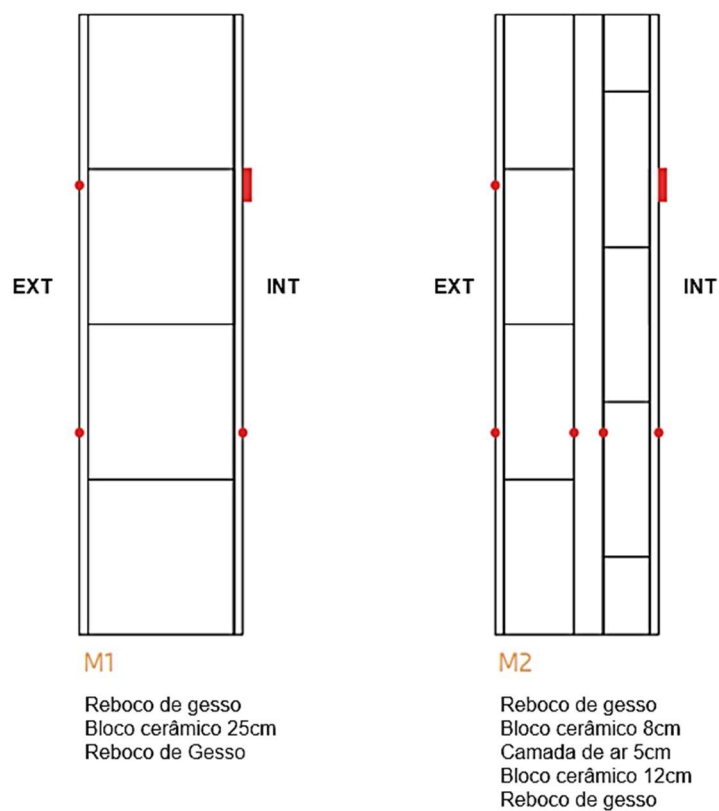
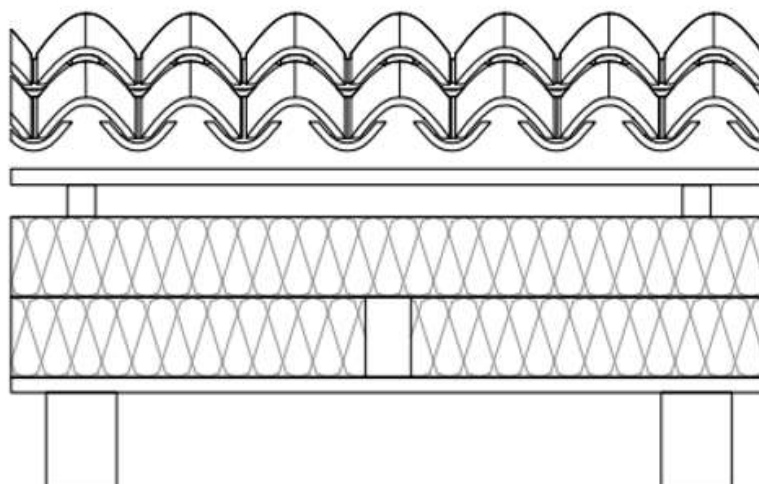


Fig. 10 – Corte dos diferentes tipos de paredes

Os pormenores construtivos da cobertura e do piso são apresentados nas Fig.11 e Fig. 12, respetivamente.

COBERTURA

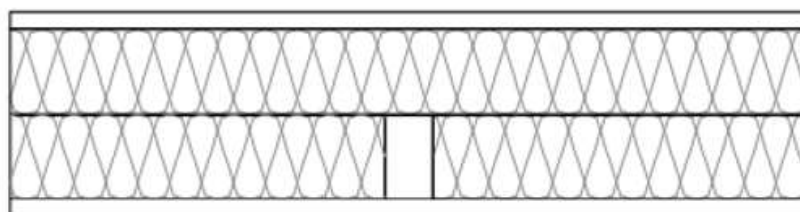


S2

Madeira (abeto) + Barreira de Vapor
Isolante EPS 20cm
Manta transpirável
Primeiro vão de ventilação
Madeira (abeto) + Manta Impermeabilizante
Estrutura em madeira e segundo vão de ventilação

Fig. 11 – Corte da cobertura

PISO



S1

Madeira (abeto) + Barreira de Vapor
Isolante EPS 10cm
Isolante EPS 10cm
Madeira (abeto)

Fig. 12 – Corte do piso

3.2.2. MONITORIZAÇÃO

Os dados recolhidos com a monitorização permitirão fornecer algumas informações de feedback para a otimização do sistema. Sendo aceita a possibilidade de que poderão ser realizadas atividades de correção e modificação, sempre tendo em vista obter a melhor solução e sem problemas.

A monitorização será efetuada no painel e no edifício, antes e depois da intervenção no que diz respeito à qualidade do ar interior, temperatura, humidade e consumo de energia.

Deste modo, objetiva-se fazer a comparação do comportamento das células com ou sem o painel *renew-wall*, através das seguintes etapas:

- 1 ano de monitoramento sem painel para ambas as células, construídas com tecnologia típica dos anos 1960-1970, e calibração de dados;
- 1 ano de monitoramento com painel montado na célula A;
- Análise de dados e verificação da reabilitação energética.

Os dados provenientes dos equipamentos serão acompanhados *online* através da plataforma de visualização *Envysion*®, organizados de acordo com os seguintes relatórios em tempo real:

1. Ambientes celulares A e B
2. Temperatura da parede NO células A e B
3. Parede Temp NE células A e B
4. Temp. Células A e B do telhado e do piso
5. Fluxo de células NO A e B
6. Fluxo das células NE A e B
7. Consumo Elétrico células A e B
8. Dados Meteorológicos
9. Velocidade e direção do vento

4

SIMULAÇÃO ANTES DA REABILITAÇÃO

4.1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é apresentar uma metodologia simplificada, que poderá ser utilizada por profissionais e também por pesquisadores, para a calibração de modelos dinâmicos de energia de edifícios.

4.2. METODOLOGIA

Em geral, processos de otimização aplicados à simulação de edifícios, consistem em encontrar os valores ótimos dos parâmetros para um melhor desempenho energético do edifício. Quando aplicada à calibração, a otimização diz respeito ao ajuste dos parâmetros para uma melhor correspondência com os dados medidos do edifício (Monetti et al., 2015).

O primeiro passo do trabalho foi realizar a modelagem geométrica da célula de teste, antes da reabilitação da célula, com o auxílio do software *Sketchup* versão 2019, tendo o plugin do *Openstudio* versão 5.5.0.12. Este modelo geométrico é então importado para o *EnergyPlus*™ versão 8.5 onde, através do *idf editor*, se insere os dados necessários para criação do modelo energético.

Uma vez criado o modelo energético, uma metodologia de calibração baseada em otimização, construída em uma metodologia de quatro etapas, foi estudada e aplicada às células de teste.

Na Etapa 1, a avaliação da energia do edifício é realizada por meio da ferramenta de simulação de energia dinâmica, o *EnergyPlus*™ ©. O modelo definido neste estágio não está calibrado e é baseado nos dados do projeto e nas condições de fronteira.

Da Etapa 2 à Etapa 4, é realizado o processo de calibração, manual, dividido em três subestágios (Pré-processamento, Otimização e Pós-processamento e Validação).

A Etapa 2 “Pré-processamento” representa a primeira etapa da calibração, referente à coleta de dados a serem usados para ajuste. Inicialmente, uma análise dos dados medidos e do modelo geométrico dados de entrada são realizados.

Para calibração, as funções objetivo de otimização são definidas como consumo de energia de aquecimento do edifício e temperatura interna. Estas funções foram simuladas para o período total de simulação e estes valores são comparados com os valores monitorados.

Durante a Etapa 3, é realizada a otimização do modelo. Diferentes execuções de otimização são realizadas para encontrar as "melhores estimativas" para calibração, variando dentro de cada execução, com base na experiência do programador, diferentes variáveis de entrada no modelo de energia, tais como: propriedades dos materiais, temperatura do solo, coeficiente de infiltração, entre outros. Este processo é interrompido quando a diferença mínima é encontrada, isto é, quando consumo de energia de aquecimento simulado do estudo de caso corresponde intimamente aos dados monitorados.

Finalmente, a Etapa 4 pós-processa as saídas de otimização para validar o modelo de construção calibrado com base em sua precisão.

O CV (RMSE) e o MBE são calculados e verificados para serem consistentes com os limites da diretriz 14 da ASHRAE (ANSI/ASHRAE, 2002), respetivamente $\pm 10\%$ e 30% por hora.

4.3. MODELAGEM GEOMÉTRICA

A modelagem geométrica da célula de teste, antes de ser reabilitada, é baseada no projeto construtivo disponibilizado pela empresa. A modelagem é realizada de forma simples com o auxílio das ferramentas do software *Sketchup*, tendo o *plug-in Openstudio*.

No modelo geométrico são definidos a posição geográfica, os componentes da edificação: piso, paredes, portas, janelas, cobertura e elementos de sombreamento, como se apresentam nas Fig. 18 e Fig. 19.

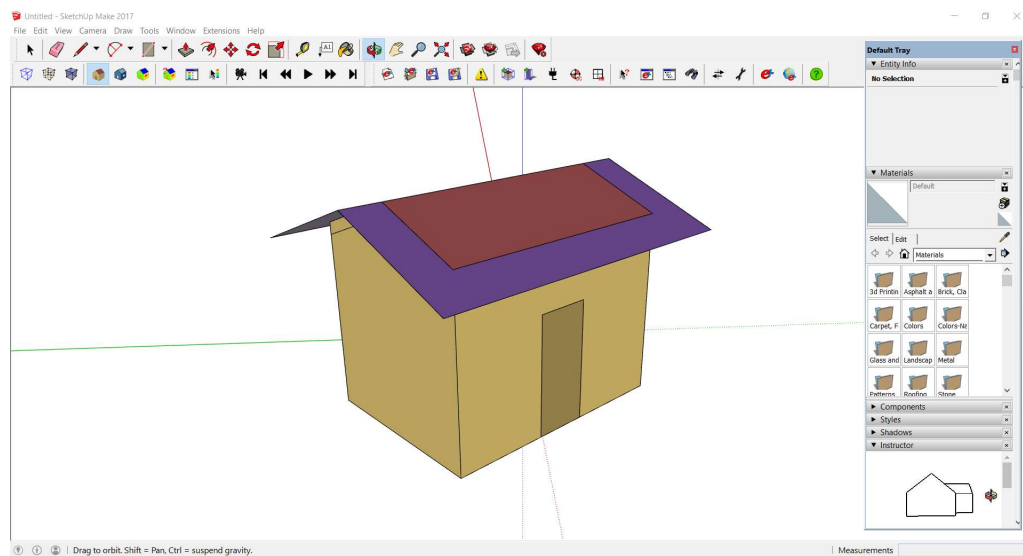


Fig. 13 – Célula de teste modelada – Vista 01

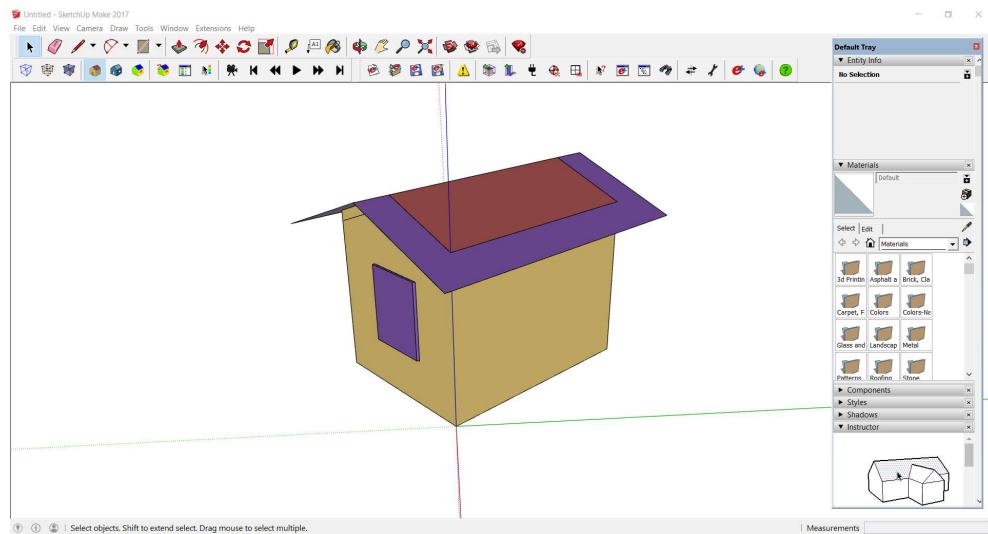


Fig. 14 – Célula de teste modelada – Vista 02

Como as células tinham dimensões reduzidas e a princípio tecnologias construtivas simples, esta etapa pôde ser realizada de modo rápido, sem grandes complicações.

Após esta modelagem gráfica o arquivo é exportado ao *IDF editor*, onde se complementam algumas das definições do edifício: tais como, estratigrafia das paredes, materiais, sistema AVAC.

4.4. MODELAGEM ENERGÉTICA

A completa modelagem energética da célula consiste na Etapa 1 da metodologia apresentada. Dadas as pequenas dimensões do edifício, e sendo determinada apenas uma zona térmica para a construção, a modelagem na ferramenta de simulação foi bastante detalhada. Como o edifício foi utilizado apenas para atividades experimentais, dados de ocupação não foram inseridos.

4.4.1. ESTRATIGRAFIA E MATERIAIS

Nesta etapa foram definidas as características construtivas dos vários elementos do edifício. Para a modelagem deste edifício foram necessários definir dez diferentes tipos de materiais e a camada de ar, os quais compuseram sete estratigrafias diferentes.

As propriedades dos materiais foram definidas com base nas fichas técnicas dos fornecedores, enquanto as estratigrafias foram definidas com base nos pormenores do projeto construtivo, a definição dos materiais é realizada como se apresenta na Fig. 15, e a definição da estratigrafia como se apresenta na Fig. 20.

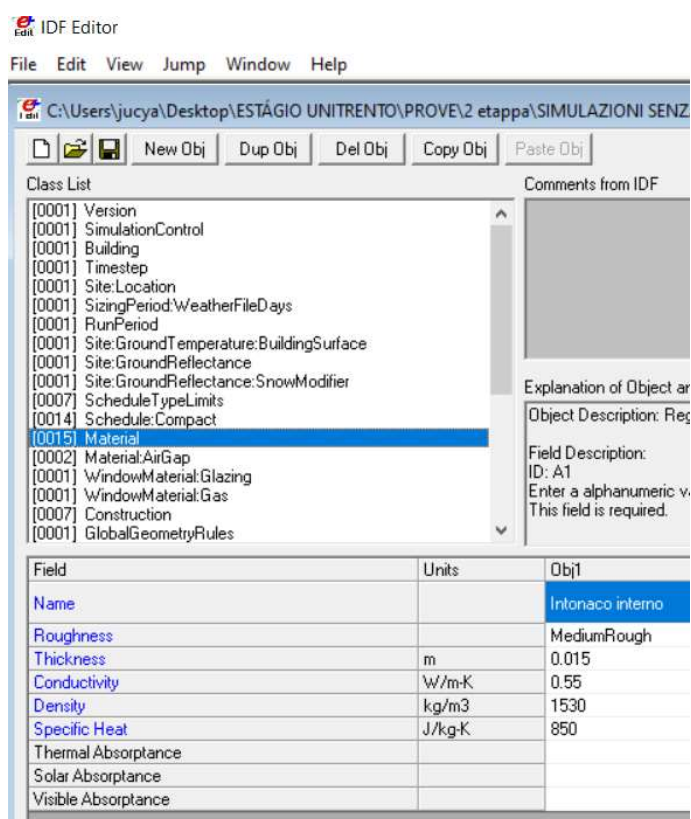


Fig. 15 – Exemplo de definição de material no software

Para essa simulação os materiais definidos são os que se apresentam no Quadro 2.

Quadro 2 - Materiais definidos no modelo energético

Nome	Espessura (m)	Condutibilidade (W/m.K)	Densidade (kg/m³)	Calor Específico (J/kg.K)
Reboco Interno	0.015	0.55	1530	850
Bloco cerâmico 25cm	0.025	0.181	908	840
Reboco Externo	0.015	0.55	1530	850
Bloco cerâmico L=8cm	0.08	0.212	942	840
Bloco cerâmico L=19cm	0.19	0.206	958	840
Isolante EPS 20cm	0.2	0.034	120	1030
Isolante EPS 10cm	0.1	0.034	120	1030
Pavimento Madeira	0.02	0.12	500	1500
Porta em Madeira	0.05	0.2	750	1340

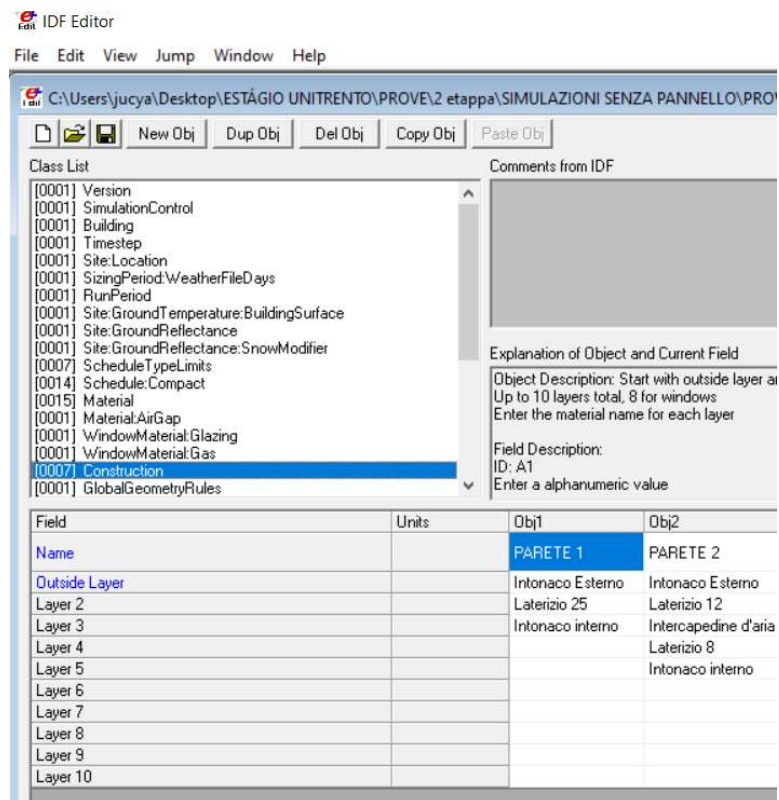


Fig. 16 – Exemplo de definição de estratigrafia

4.4.2. SISTEMA AVAC

O sistema AVAC no *EnergyPlus*TM pode ser configurado de forma detalhada, o que para um utilizador pouco experiente pode ser um processo muito complexo, ou de maneira simplificada, através de *templates*. Como o objetivo principal deste trabalho não era a especificação exaustiva desse sistema, optou-se por utilizar a modelagem através do *template* (Fig. 17).

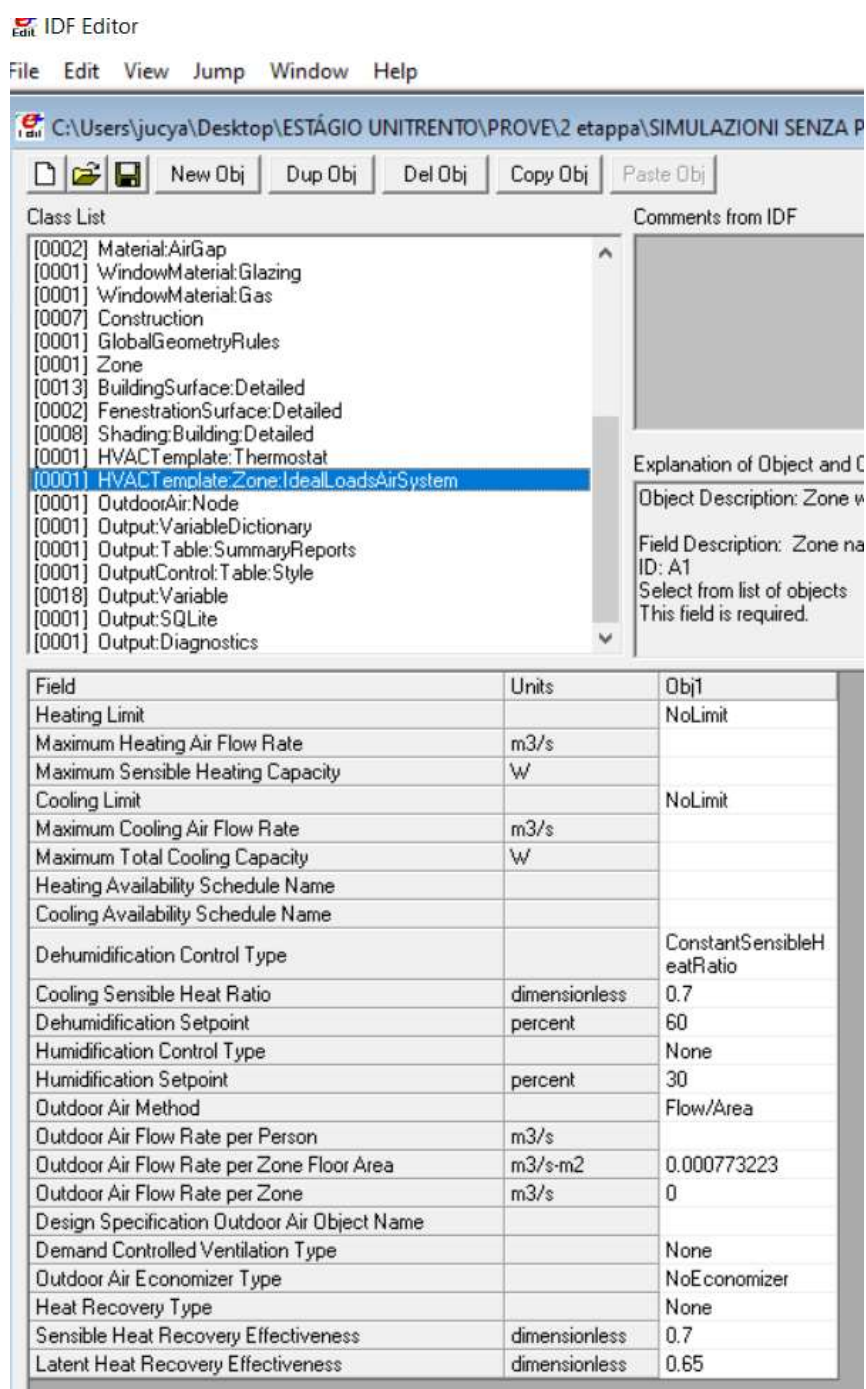


Fig. 17 – Sistema AVAC simplificado

O sistema AVAC tem a ele associado um horário de funcionamento que, de acordo com as observações do monitoramento, foi definido de acordo com o Quadro 3.

Quadro 3 – Funcionamento do sistema AVAC

Período de Funcionamento	Sistema Ligado	Temperatura de SetPoint
01/01/2020 – 22/04/2020	Sim	25
23/04/2020 – 08/05/2020	Não	-
08/05/2020 – 11/05/2020	Sim	30
11/05/2020 – 02/10/2020	Não	-
02/10/2020 – 31/12/2020	Sim	25

4.4.3. TEMPERATURA DO SOLO

Na primeira simulação a temperatura do solo foi estimada como sendo a temperatura interna do ambiente (monitorada) subtraída de 2 °C, como recomenda a própria documentação do *EnergyPlus*™ ©. Os dados inseridos são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 – Temperatura do Solo

Mês	Temperatura (°C)
Janeiro	21
Fevereiro	23.7
Março	23.7
Abril	19.9
Maio	14.1
Junho	13.7
Julho	13.5
Agosto	17.1
Setembro	13.4
Outubro	21.6
Novembro	21.9
Dezembro	22.4

4.4.4. DADOS CLIMÁTICOS

Foram utilizados os dados climáticos horários para o local das células, obtidos diretamente através do equipamento de monitoração.

4.4.5. RESULTADOS NÃO CALIBRADOS

A simulação foi realizada para o período de um ano, de 01/01/2020 a 31/12/2020. Para o consumo energético foram obtidos os resultados apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 - Dados medidos e simulados (antes da calibração) para o consumo médio das células

Consumo energético	Consumo Médio das Células
Medido (kWh/ano)	4515.40
Simulado (kWh/ano)	3527.71

Em relação ao consumo energético, observa-se que o valor simulado ainda está muito aquém do valor monitorado.

Calculando-se os coeficientes estatísticos, obtiveram-se os resultados apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 - Performance do modelo (antes da calibração) para o consumo energético da célula A.

Índice Estatístico	Consumo Energético	Temperatura Interna
MBE	21.87%	20.67%
CV(RMSE)	79.45%	38.51%

Como se observa os valores obtidos são muito superiores aos limites da ASHRAE 14, o que demonstra que esse modelo não representa a situação com fiabilidade.

4.5. CALIBRAÇÃO

De acordo com a etapa 2 "Pré-processamento", se compara as variáveis de saída do modelo com os dados de monitorização. Ficou constatado que os dados horários referentes ao consumo energético eram muito diferentes daqueles monitorados, muito menores. Ao passo que os dados de temperatura interna eram muito superiores daqueles medidos em campo.

Sendo assim, passa-se à etapa 3, onde foi determinado, com base na experiência do programador, um conjunto de parâmetros considerado como o mais influente para a mudança do comportamento térmico simulado.

Como forma de obter resultados mais aproximados foram realizadas sucessivas provas onde se alteravam os parâmetros climáticos e/ou parâmetros como temperatura do solo, coeficiente de infiltração e condutividade dos materiais.

Foram realizadas 57 provas, conforme de apresenta no Quadro 7.

Quadro 7 – Simulações realizadas

GRUPO	ARQUIVO CLIMÁTICO	PROVA	DESCRIÇÃO	CONSUMO ENERGÉTICO [kWh]
1	WF1 - Malosco solo rad da jrc	PROVA 01	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2;	3527.71
		PROVA 02	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 10% aumento na condutividade do material	3696.4
		PROVA 03	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 15% aumento na condutividade do material	3777.05
		PROVA 04	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 20% aumento na condutividade do material	3855.58
	WF2 - Malosco solo rad da auxiliary program	PROVA 05	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2;	2997.48
		PROVA 06	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 10% aumento na condutividade do material	3138.6
		PROVA 07	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 15% aumento na condutividade do material	3206.23
		PROVA 08	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 20% aumento na condutividade do material	3272.18
	WF3 - Malosco solo rad da auxiliary program - radiation reduced	PROVA 09	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2;	3026.03
		PROVA 10	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 10% aumento na condutividade do material	3167.52
		PROVA 11	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 15% aumento na condutividade do material	3235.29
		PROVA 12	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 20% aumento na condutividade do material	3301.37
2	WF1 - Malosco solo rad da jrc	PROVA 13	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 1 (Máximo)	2807.18
		PROVA 14	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 10% aumento na condutividade do material; Reflectância do Solo: 1 (Máximo)	2949.86
		PROVA 15	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 15% aumento na condutividade do material; Reflectância do Solo: 1 (Máximo)	3018.22
		PROVA 16	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 20% aumento na condutividade do material; Reflectância do Solo: 1 (Máximo)	3084.86
	WF2 - Malosco solo rad da auxiliary program	PROVA 17	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 1 (Máximo)	2153.8
		PROVA 18	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 10% aumento na condutividade do material; Reflectância do Solo: 1 (Máximo)	2266.66
		PROVA 19	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 15% aumento na condutividade do material; Reflectância do Solo: 1 (Máximo)	2320.81
		PROVA 20	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 20% aumento na condutividade do material; Reflectância do Solo: 1 (Máximo)	2373.67
	WF3 - Malosco solo rad da auxiliary program - radiation reduced	PROVA 21	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 1 (Máximo)	2179.08
		PROVA 22	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 10% aumento na condutividade do material; Reflectância do Solo: 1 (Máximo)	2291.85
		PROVA 23	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 15% aumento na condutividade do material; Reflectância do Solo: 1 (Máximo)	2345.9

		PROVA 24	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 20% aumento na condutividade do material; Reflectância do Solo: 1 (Máximo)	2398.63
3	WF1 - Malosco solo rad da jrc	PROVA 25	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	3725.17
		PROVA 26	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 10% aumento na condutividade do material; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	3901.36
		PROVA 27	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 15% aumento na condutividade do material; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	3985.58
		PROVA 28	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 20% aumento na condutividade do material; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	4067.59
		PROVA 29	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	3256.94
		PROVA 30	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 10% aumento na condutividade do material; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	3406.45
	WF2 - Malosco solo rad da auxiliary program	PROVA 31	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 15% aumento na condutividade do material; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	3478.02
		PROVA 32	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 20% aumento na condutividade do material; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	3547.81
		PROVA 33	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	3277.12
		PROVA 34	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 10% aumento na condutividade do material; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	3427.04
	WF3 - Malosco solo rad da auxiliary program - radiation reduced	PROVA 35	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 15% aumento na condutividade do material; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	3498.84
		PROVA 36	Infiltração de ar externo/área: 0.000472052 m3/s-m2; 20% aumento na condutividade do material; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	3568.81
4	WF1 - Malosco solo rad da jrc	PROVA 37	Infiltração de ar externo/área: 0.000289959 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	3624.86
		PROVA 38	Infiltração de ar externo/área: 0.000471666 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	3900.25
		PROVA 39	Infiltração de ar externo/área: 0.000579918 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	4064.31
		PROVA 40	Infiltração de ar externo/área: 0.00067657 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	4210.78
		PROVA 41	Infiltração de ar externo/área: 0.000773223 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	4357.24
		PROVA 42	Infiltração de ar externo/área: 0.000966529 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	4750.11
		PROVA 43	Infiltração de ar externo/área: 0.001449794 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	4931
	WF2 - Malosco solo rad da auxiliary program	PROVA 44	Infiltração de ar externo/área: 0.000289959 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	3159.36
		PROVA 45	Infiltração de ar externo/área: 0.000471666 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	3432.03
		PROVA 46	Infiltração de ar externo/área: 0.000579918 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	3594.73
		PROVA 47	Infiltração de ar externo/área: 0.00067657 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	3740.16
		PROVA 48	Infiltração de ar externo/área: 0.000773223 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	3885.71
		PROVA 49	Infiltração de ar externo/área: 0.000966529 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	4177.14
		PROVA 50	Infiltração de ar externo/área: 0.001449794 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	4907.28
	WF3 - Malosco solo rad da auxiliary	PROVA 51	Infiltração de ar externo/área: 0.000289959 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	3178.63
		PROVA 52	Infiltração de ar externo/área: 0.000471666 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	3452.21

program - radiation reduced	PROVA 53	Infiltração de ar externo/área: 0.000579918 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	3615.45
	PROVA 54	Infiltração de ar externo/área: 0.00067657 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	3761.35
	PROVA 55	Infiltração de ar externo/área: 0.000773223 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	3907.35
	PROVA 56	Infiltração de ar externo/área: 0.000966529 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	4199.56
	PROVA 57	Infiltração de ar externo/área: 0.001449794 m3/s-m2; Reflectância do Solo: 0 (Mínimo)	4931

As simulações foram realizadas com três diferentes tipos de arquivos climáticos: WF1 que combinava dados meteorológicos medidos em campo, com valores de radiação solar da base de dados JRC. O WF2 que combinava valores medidos em campo, com valores de radiação solar obtidos através de uma equação sugerida pelo programa. O WF3, por sua vez, também combinava valores medidos em campo com valores de radiação solar obtidos através de uma outra equação.

No grupo 1 as variáveis alteradas foram a condutividade dos materiais para diferentes arquivos climáticos. No grupo 2 e 3, além da condutividade dos materiais, se varia do mínimo ao máximo os valores de reflectância do solo, para diferentes dados climáticos. Deve-se deixar claro que, no mundo real, não se encontram materiais com valor de reflectância igual a 1 ou igual a 0. Estes são os valores limites do intervalo de variação. No grupo 4, definindo-se fixa a reflectância do solo como mínima, realiza-se a simulação para diferentes coeficientes de infiltração de ar e diferentes arquivos climáticos.

Dentre as simulações realizadas, escolheu-se a de número 41 como a que mais se adequava as condições reais monitoradas.

Para avaliar a precisão do modelo escolhido foram calculados o CV(RMSE) e o MBE.

4.6. RESULTADOS

MBE e CV (RMSE) foram calculados e verificados com base nos resultados de consumo energético do edifício. O Quadro 8 relata os resultados da Etapa 4 do processo de calibração (validação) relacionados à execução de calibração 41.

Quadro 8 - Validação da calibração

Variável	Consumo Energético	Temperatura Interna
MBE%	6.30%	4.65%
CV (RMSE)%	16.92%	13.1%

As execuções de calibração iniciais não alcançaram bons resultados (MBE e CV(RMSE)) sempre fora dos limites). Após a calibração, os valores ficaram dentro dos limites permitidos, o que indica que o modelo pode ser considerado validado para indicar um comportamento próximo do real do sistema analisado.

4.6.1. COMPORTAMENTO TÉRMICO

Além da validação da calibração do modelo através de ferramentas estatísticas, foi avaliado o comportamento da temperatura interna nas células. Antes de tudo, deve-se dizer que os pontos nos gráficos em que a temperatura é zero correspondem a falhas no equipamento de monitorização. Como se observa na Fig. 23, antes da calibração (Prova 1) a discrepância entre os valores era visivelmente grande.

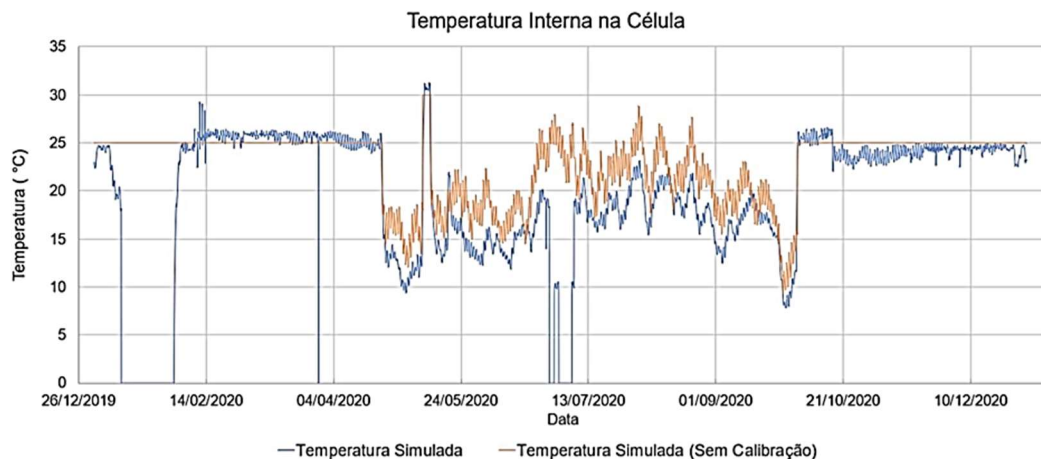


Fig. 18 - Temperatura interna ao longo do ano na Célula A, resultados antes da calibração.

Após a calibração (Prova 41), Fig. 24, a temperatura monitorada e a temperatura simulada passam a ter um comportamento semelhante.

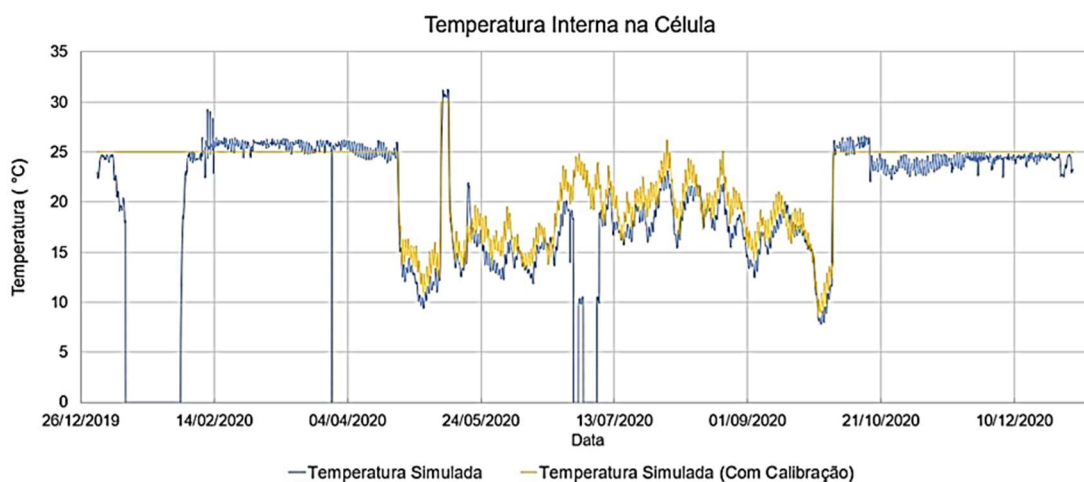


Fig. 19 - Temperatura interna ao longo do ano na Célula A, resultados depois da calibração.

Apesar de o modelo apresentar resultados próximos aos monitorados e ter sido validado por meio dos critérios da ASHRAE. Ainda assim, pode se observar uma variação de poucos graus entre a temperatura monitorada e a temperatura simulada.

4.6.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Uma calibração baseada em otimização foi conduzida em um edifício de teste por um período de monitoramento de longo prazo. A abordagem manual foi preferida pela disponibilidade de tempo para avaliar o comportamento das simulações. A validação do modelo energético foi baseada nos valores limites dos índices estatísticos MBE e CV (RMSE). Apesar de se ter obtido um modelo validado, outras melhorias poderiam ser feitas para refinar o processo de calibração:

1. Fazer uma modelagem mais detalhada das esquadrias;
2. Implementar um cronograma do sistema AVAC de forma ainda mais detalhada de acordo com os dados monitorados;
3. Modelar as pontes térmicas;
4. Estudar a influência, que pode existir nos resultados, em razão de que a altura onde se é medida temperatura interna com o sensor na célula é diferente daquela de onde o *software* calcula.

5

SIMULAÇÃO APÓS A REABILITAÇÃO

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo se apresenta a simulação dinâmica do comportamento da célula com a adição da parede de madeira, utilizando-se como base o modelo energético calibrado obtido no Capítulo 4 e apresenta-se a poupança de energia anual esperada com essa medida de reabilitação através deste modelo. Em uma segunda etapa, faz-se outra tentativa de calibração do modelo energético através de dados monitorados mais recentes. Por fim, obtém-se o modelo final que representa o comportamento energético da célula com a Renew-Wall e faz-se uma estimativa do consumo energético da célula com este modelo.

5.2. MODELAGEM GEOMÉTRICA

O arquivo utilizado na modelagem anterior foi complementado com a estratigrafia nova. Não foi preciso utilizar o *SketchUp* nesta etapa visto que se pode adicionar as novas camadas às paredes existentes diretamente no *EnergyPlus*™ ©.

5.3. MODELAGEM ENERGÉTICA

Além dos materiais definidos no Quadro 9, para a construção das novas estratigrafias foram definidos novos materiais.

Quadro 9 – Materiais Definidos

Nome	Espessura (m)	Condutibilidade (W/m.K)	Densidade (kg/m³)	Calor Específico (J/kg.K)
Lã Mineral (1)	0.08	0.038	30	1030
OSB	0.015	0.13	600	1500
Abete + Lã Mineral	0.12	0.043	110	1161
Madeira Aglomerada	0.016	0.09	565	2100

Lã mineral (2)	0.1	0.038	100	1030
Reboco Armado	0.008	0.55	1530	850

O sistema AVAC não sofreu alterações no template, apenas no cronograma de funcionamento. A esta altura, a temperatura do solo também se manteve inalterada. Em relação aos dados climáticos, se utilizou o os últimos dados climáticos utilizados na calibração da simulação anterior.

5.4. RESULTADOS INICIAIS

Foi simulado com o modelo anterior, supondo-se o mesmo cronograma de funcionamento do sistema AVAC, para o período de um ano, o comportamento da célula com a adição do painel de madeira. Para o consumo energético obtiveram-se os resultados apresentados no Quadro 10.

Quadro 10 – Resultados de Consumo Energético

Consumo energético	Célula A
Medido (kWh/ano)	4515.40
Simulado sem painel (kWh/ano)	4357.24
Simulado com painel (kWh/ano)	2496.16

Em relação ao consumo energético, observa uma redução considerável de 45% do valor da energia monitorada ao ano anterior.

Na Fig. 25 é possível observar a simulação do comportamento térmico da célula antes e depois da reabilitação.

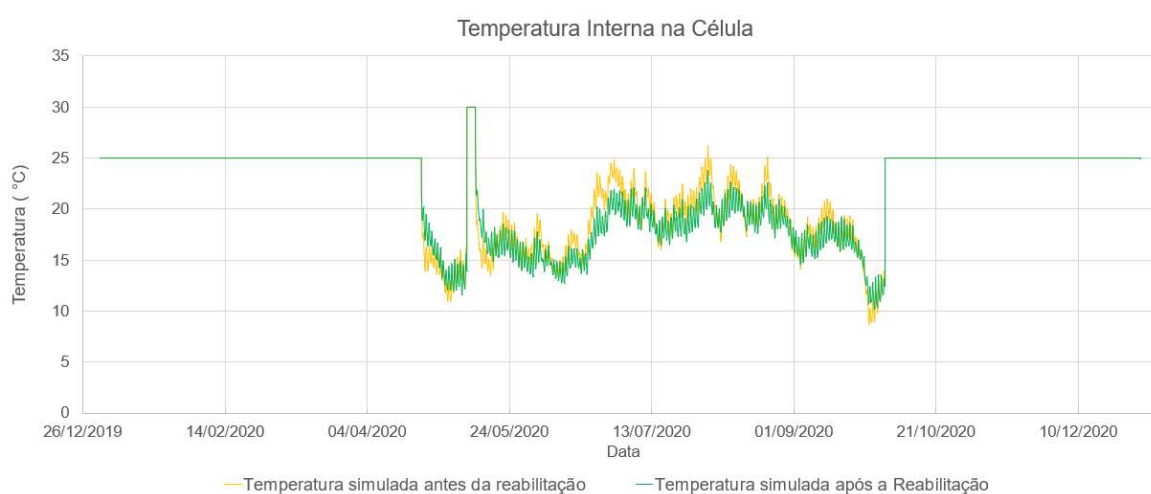


Fig. 20 – Confronto de dados de temperatura interna

Nos meses de verão, quando o sistema de aquecimento não está ligado, se observa uma redução da temperatura na célula em relação ao cenário anterior.

5.5. VALIDAÇÃO DO MODELO COM DADOS REAIS

Para avaliar a performance do modelo foi avaliada usando como base os dados monitorados de temperatura interna para o ano de 2021, após a adição da parede (28/05/2021), com o sistema de aquecimento desligado (desligado desde o dia 13/06/2021).

De acordo com as datas mencionadas, para avaliar o comportamento do modelo, foi realizada a simulação para o período das três últimas semanas de monitoramento 28/06/2021 a 18/07/2021.

Foi confrontando o comportamento térmico monitorado com o comportamento térmico simulado. O resultado é apresentado na Fig. 26.

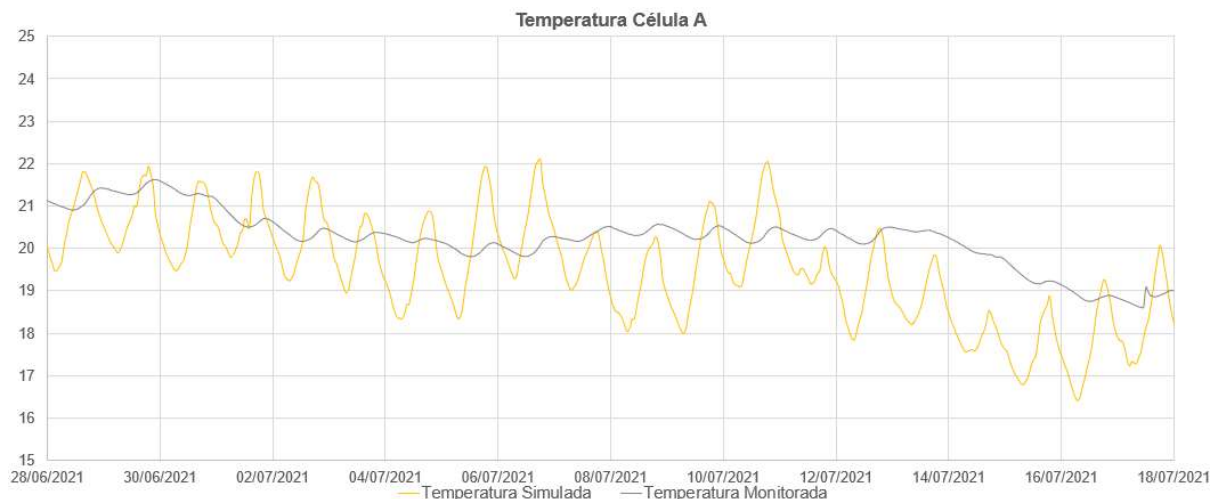


Fig. 21 – Confronto de dados de temperatura interna

Observa-se que a temperatura do modelo apesar de tendencialmente se assemelhar ao comportamento real, apresenta ainda grandes picos de variação. O que indica que para obter dados mais fiáveis é necessário refinar o modelo. Além de que se deve realizar uma comparação em um período maior.

6

CONCLUSÃO

Esta dissertação teve como objetivo geral contribuir para o projeto de novas paredes de madeira para uma reabilitação rápida e fácil de edifícios com vista a se atingir uma construção nZEB (*Nearly Zero Energy Buildings*).

Em princípio, com o objetivo de enquadrar o trabalho, foi realizada uma revisão bibliográfica a respeito da simulação energética de edifícios aplicada a medidas de eficiência energética de edifício nos últimos 10 anos.

Em sequência foi apresentado o estudo de caso analisado, que se trata de um projeto inovador de uma parede de madeira, Renew-Wall, a ser utilizada na reabilitação de edifícios. O projeto é de uma empresa italiana e está sendo estudado em conjunto com a Universidade de Trento. Foram apresentados em detalhes o projeto construtivo de duas células de teste construídas para o estudo dessa tecnologia e como é realizada a monitorização.

Foi realizada a simulação dinâmica do comportamento higrotérmico de uma das células de teste construídas em alvenaria de blocos cerâmicos. Uma calibração baseada em otimização foi conduzida em um edifício de teste por um período de monitoramento de longo prazo. A abordagem manual foi preferida pela disponibilidade de tempo para avaliar o comportamento das simulações.

A validação do modelo energético foi baseada nos valores limites dos índices estatísticos MBE e CV (RMSE). As execuções de calibração iniciais não alcançaram bons resultados. Após sucessivas etapas de calibração, os valores ficaram dentro dos limites permitidos, o que indica que o modelo pode ser considerado validado para indicar um comportamento próximo do real do sistema analisado.

Na etapa final, se utilizando do modelo calibrado foi realizada a simulação dinâmica de uma outra célula de alvenaria de blocos cerâmicos que, no percurso do trabalho, teve a adição de uma parede externa, pré-fabricada em madeira, ao perímetro da fachada. Supondo-se o mesmo cronograma de funcionamento do sistema AVAC, observou-se que a medida de reabilitação é capaz de garantir uma redução considerável de 45% do valor de consumo energético.

Ainda, para avaliar o comportamento do modelo, foi realizada a simulação para o período das três últimas semanas de monitoramento 28/06/2021 a 18/07/2021. Observou-se que a temperatura do modelo apesar de tendencialmente se assemelhar ao comportamento real, apresenta ainda grandes picos de variação. O que indica que para obter dados mais fiáveis é necessário refinar o modelo. Além de que se deve realizar uma comparação em um período maior.

Apesar de se ter obtido um modelo validado, outras melhorias poderiam ser feitas para refinar o processo de calibração:

1. Fazer uma modelagem mais detalhada das esquadrias;
2. Implementar um cronograma do sistema AVAC de forma ainda mais detalhada de acordo com os dados monitorados;
3. Modelar as pontes térmicas;
4. Estudar a influência, que pode existir nos resultados, em razão de que a altura onde se é medida temperatura interna com o sensor na célula é diferente daquela de onde o *software* calcula.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aelenei, D., De Azevedo Leal, H., & Aelenei, L. (2014). The use of attached-sunspaces in retrofitting design: The case of residential buildings in Portugal. *Energy Procedia*, 48, 1436–1441. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.162>
- Agami Reddy, T. (2006). Literature review on calibration of building energy simulation programs: Uses, problems, procedure, uncertainty, and tools. *ASHRAE Transactions*, 112 PART 1(4844), 226–240.
- Alves, A. P. de A. M. (2011). *Simulação térmica multizona de um edifício escolar: uma comparação de programas no âmbito do RSECE*. 256.
- ANSI/ASHRAE. (2002). ASHRAE Guideline 14-2002 Measurement of Energy and Demand Savings. *Ashrae*, 8400, 170.
- ANSI/ASHRAE. (2006). *ASHRAE Green Guide*.
- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., De’Rossi, F., & Vanoli, G. P. (2015). Energy retrofit of an educational building in the ancient center of Benevento. Feasibility study of energy savings and respect of the historical value. *Energy and Buildings*, 95, 172–183. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.072>
- Ascione, F., De Rossi, F., & Vanoli, G. P. (2011). Energy retrofit of historical buildings: Theoretical and experimental investigations for the modelling of reliable performance scenarios. *Energy and Buildings*, 43(8), 1925–1936. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.040>
- Aste, N., Leonforte, F., Manfren, M., & Mazzon, M. (2015). Thermal inertia and energy efficiency - Parametric simulation assessment on a calibrated case study. *Applied Energy*, 145(2015), 111–123. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.084>
- Belpoliti, V., & Bizzarri, G. (2015). A parametric method to assess the energy performance of the social housing stock and simulate suitable retrofit scenarios: An Italian case study. *Energy and Buildings*, 96, 261–271. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.017>
- Buonomano, A., Calise, F., Ferruzzi, G., & Palombo, A. (2014). Dynamic energy performance analysis: Case study for energy efficiency retrofits of hospital buildings. *Energy*, 78, 555–572. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.042>
- Cascio, E. Lo, Ma, Z., Borelli, D., & Schenone, C. (2017). Residential Building Retrofit through Numerical Simulation: A Case Study. *Energy Procedia*, 111(September 2016), 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.011>
- Castaldo, V. L., Pisello, A. L., Boarin, P., Petrozzi, A., & Cotana, F. (2017). The experience of international sustainability protocols for retrofitting historical buildings in Italy. *Buildings*, 7(2). <https://doi.org/10.3390/buildings7020052>
- Ciampi, G., Rosato, A., Scorpio, M., & Sibilio, S. (2015). Energy and economic evaluation of retrofit actions on an existing historical building in the south of Italy by using a dynamic simulation software. *Energy Procedia*, 78, 741–746. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.085>
- Civil, E., & Carvalho, S. (2017). *Comportamento Termo higrométrico e Desempenho Energético de uma Escola – Medidas de Reabilitação*.
- Civil, E., Filipe, T., & Gon, D. E. S. (2014). *Área Departamental de Engenharia Civil Reabilitação Energética de um Edifício de Serviços*.
- Clarke, J. A., Strachan, P. A., & Pernot, C. (1993). Approach to the calibration of building energy

- simulation models. *ASHRAE Transactions*, 99(pt 2), 917–927.
- Coakley, D., Raftery, P., & Keane, M. (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 123–141. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.007>
- Cornaro, C., Puggioni, V. A., & Strollo, R. M. (2016). Dynamic simulation and on-site measurements for energy retrofit of complex historic buildings: Villa Mondragone case study. *Journal of Building Engineering*, 6, 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.job.2016.02.001>
- De Santoli, L., Mancini, F., Nastasi, B., & Ridolfi, S. (2017). Energy retrofitting of dwellings from the 40's in Borgata Trullo -Rome. *Energy Procedia*, 133, 281–289. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.389>
- Dodoo, A., Yao Ayikoe Tettey, U., & Gustavsson, L. (2017). On input parameters, methods and assumptions for energy balance and retrofit analyses for residential buildings. *Energy and Buildings*, 137, 76–89. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.033>
- EU. (2015). Evaluation of the Energy Performance of Building Directive 2010/31/EU. *W*. http://ec.europa.eu/smart-regulation/evaluation/index_en.htm
- Evangelisti, L., Guattari, C., & Gori, P. (2015). Energy retrofit strategies for residential building envelopes: An Italian case study of an early-50s building. *Sustainability (Switzerland)*, 7(8), 10445–10460. <https://doi.org/10.3390/su70810445>
- Gagliano, A., Detommaso, M., Nocera, F., Patania, F., & Aneli, S. (2014). The retrofit of existing buildings through the exploitation of the green roofs - A simulation study. *Energy Procedia*, 62, 52–61. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.366>
- Galatioto, A., Ricciu, R., Salem, T., & Kinab, E. (2019). Energy and economic analysis on retrofit actions for Italian public historic buildings. *Energy*, 176, 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.167>
- García Kerdan, I., Raslan, R., & Ruyssevelt, P. (2016). An exergy-based multi-objective optimisation model for energy retrofit strategies in non-domestic buildings. *Energy*, 117, 506–522. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.041>
- Gigliarelli, E., Calcerano, F., & Cessari, L. (2017). Heritage Bim, Numerical Simulation and Decision Support Systems: An Integrated Approach for Historical Buildings Retrofit. *Energy Procedia*, 133, 135–144. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.379>
- Gomes, R., Ferreira, A., Azevedo, L., Costa Neto, R., Aelenei, L., & Silva, C. (2021). Retrofit measures evaluation considering thermal comfort using building energy simulation: two Lisbon households. *Advances in Building Energy Research*, 15(3), 291–314. <https://doi.org/10.1080/17512549.2018.1520646>
- Güçyeter, B., & Günaydin, H. M. (2012). Optimization of an envelope retrofit strategy for an existing office building. *Energy and Buildings*, 55(2012), 647–659. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.031>
- Hall, M. R., Casey, S. P., Loveday, D. L., & Gillott, M. (2013). Analysis of UK domestic building retrofit scenarios based on the E.ON Retrofit Research House using energetic hygrothermics simulation - Energy efficiency, indoor air quality, occupant comfort, and mould growth potential. *Building and Environment*, 70, 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.015>
- Harish, V. S. K. V., & Kumar, A. (2014). Techniques used to construct an energy model for attaining energy efficiency in building: A review. *International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication, CIEC 2014*, 366–370. <https://doi.org/10.1109/CIEC.2014.6959111>

- Harish, V. S. K. V., & Kumar, A. (2016). A review on modeling and simulation of building energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1272–1292. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.040>
- Heo, Y., Augenbroe, G., Graziano, D., Muehleisen, R. T., & Guzowski, L. (2015). Scalable methodology for large scale building energy improvement: Relevance of calibration in model-based retrofit analysis. *Building and Environment*, 87(2015), 342–350. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.12.016>
- Hong, T., Koo, C., Kim, J., Lee, M., & Jeong, K. (2015). A review on sustainable construction management strategies for monitoring, diagnosing, and retrofitting the building's dynamic energy performance: Focused on the operation and maintenance phase. *Applied Energy*, 155, 671–707. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.06.043>
- João, M., & Pereira, T. (2020). *Maria João Teles Pereira Alexandre Integração de Sistemas Solares na Reabilitação de um Edifício Escolar para Atingir os nZEB*.
- Jones, P., Li, X. J., Perisoglou, E., & Patterson, J. (2017). Five energy retrofit houses in South Wales. *Energy and Buildings*, 154, 335–342. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.032>
- Loreti, L., Valdiserri, P., & Garai, M. (2016). Dynamic Simulation on Energy Performance of a School. *Energy Procedia*, 101(192), 1026–1033. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.130>
- Maio, J., Zinetti, S., & Rod, J. (2012). Energy Efficiency Policies in Buildings- the Use of Financial Instruments at Member State Level. *Buildings Performance Institute Europe (BPIE)*, 1–44. <http://bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR-Financing-Paper1.pdf>
- Mancini, F., Cecconi, M., De Sanctis, F., & Beltotto, A. (2016). Energy Retrofit of a Historic Building Using Simplified Dynamic Energy Modeling. *Energy Procedia*, 101(September), 1119–1126. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.152>
- Martinopoulos, G. (2018). Life Cycle Assessment of solar energy conversion systems in energetic retrofitted buildings. *Journal of Building Engineering*, 20(August), 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.07.027>
- Mavrogianni, A., Wilkinson, P., Davies, M., Biddulph, P., & Oikonomou, E. (2012). Building characteristics as determinants of propensity to high indoor summer temperatures in London dwellings. *Building and Environment*, 55, 117–130. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.12.003>
- Miguel, L., & Saraiva, O. (2010). *Simulação dinâmica de um edifício de acordo com as exigências do DL 79-2006 RSECE , usando o software de cálculo " EnergyPlus " Instituto Electrotécnico Português*.
- Moço, P. M. F. (2013). *Análise de Sensibilidade na Simulação Dinâmica de um Grande Edifício Escolar Existente*. 1–147. https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/6312/1/DM_PedroMoco_2013_MES.pdf
- Monetti, V., Davin, E., Fabrizio, E., André, P., & Filippi, M. (2015). Calibration of building energy simulation models based on optimization: A case study. *Energy Procedia*, 78, 2971–2976. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.693>
- Muñoz-González, C. M., León-Rodríguez, A. L., & Navarro-Casas, J. (2016). Air conditioning and passive environmental techniques in historic churches in Mediterranean climate. A proposed method to assess damage risk and thermal comfort pre-intervention, simulation-based. *Energy and Buildings*, 130, 567–577. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.078>
- Nuno, P., & Bento, B. (2012). *Pedro Nuno Brites Bento da Silva Soluções de racionalização energética*

do Edifício do DEMI / FCT / UNL à luz do RSECE.

- Pagliano, L., Carlucci, S., Causone, F., Moazami, A., & Cattarin, G. (2016). Energy retrofit for a climate resilient child care centre. *Energy and Buildings*, 127, 1117–1132. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.092>
- Parker, J., Cropper, P., & Shao, L. (2012). A Calibrated Whole Building Simulation Approach to Assessing Retrofit Options for Birmingham Airport. *First Building Simulation and Optimization Conference, September*, 49–56.
- Peng, C., Wang, L., & Zhang, X. (2014). DeST-based dynamic simulation and energy efficiency retrofit analysis of commercial buildings in the hot summer/cold winter zone of China: A case in Nanjing. *Energy and Buildings*, 78, 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.023>
- Pisello, A. L., & Asdrubali, F. (2014). Human-based energy retrofits in residential buildings: A cost-effective alternative to traditional physical strategies. *Applied Energy*, 133, 224–235. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.049>
- Porritt, S. M., Cropper, P. C., Shao, Li, & Goodier, C. I. (2013). Heat wave adaptations for UK dwellings and development of a retrofit toolkit. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 4(3), 269–286. <https://doi.org/10.1108/IJDRBE-08-2012-0026>
- Resolução de Conselho de Ministros n.º 8-A/2021. (2021). Estratégia de Longo Prazo para a Renovação dos Edifícios. *Diário Da República*, 2. <https://dre.pt/application/file/a/156397180>
- Rodrigues, L., White, J., Gillott, M., Braham, E., & Ishaque, A. (2018). Theoretical and experimental thermal performance assessment of an innovative external wall insulation system for social housing retrofit. *Energy and Buildings*, 162, 77–90. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.020>
- Scorpio, M., Ciampi, G., Rosato, A., Maffei, L., Masullo, M., Almeida, M., & Sibilio, S. (2020). Electric-driven windows for historical buildings retrofit: Energy and visual sensitivity analysis for different control logics. *Journal of Building Engineering*, 31(March), 101398. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101398>
- Shen, P., Braham, W., Yi, Y., & Eaton, E. (2019). Rapid multi-objective optimization with multi-year future weather condition and decision-making support for building retrofit. *Energy*, 172, 892–912. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.164>
- Silenzi, F., Priarone, A., & Fossa, M. (2018). Hourly simulations of an hospital building for assessing the thermal demand and the best retrofit strategies for consumption reduction. *Thermal Science and Engineering Progress*, 6(September 2017), 388–397. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.01.015>
- Silva, P. C. P., Almeida, M., Bragança, L., & Mesquita, V. (2013). Development of prefabricated retrofit module towards nearly zero energy buildings. *Energy and Buildings*, 56, 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.034>
- Škrjanc, I., Zupančič, B., Furlan, B., & Krainer, A. (2001). Theoretical and experimental FUZZY modelling of building thermal dynamic response. *Building and Environment*, 36(9), 1023–1038. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00053-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00053-6)
- Soutullo, S., Giancola, E., & Heras, M. R. (2018). Dynamic energy assessment to analyze different refurbishment strategies of existing dwellings placed in Madrid. *Energy*, 152, 1011–1023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.017>
- Stazi, F., Bonfigli, C., Tomassoni, E., Di Perna, C., & Munafò, P. (2015). The effect of high thermal insulation on high thermal mass: Is the dynamic behaviour of traditional envelopes in Mediterranean climates still possible? *Energy and Buildings*, 88, 367–383.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.056>

- Stazi, F., Vegliò, A., Di Perna, C., & Munafò, P. (2012). Retrofitting using a dynamic envelope to ensure thermal comfort, energy savings and low environmental impact in Mediterranean climates. *Energy and Buildings*, 54, 350–362. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.020>
- Stazi, F., Vegliò, A., Di Perna, C., & Munafò, P. (2013). Experimental comparison between 3 different traditional wall constructions and dynamic simulations to identify optimal thermal insulation strategies. *Energy and Buildings*, 60, 429–441. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.032>
- Tadeu, S., Rodrigues, C., Tadeu, A., Freire, F., & Simões, N. (2015). Energy retrofit of historic buildings: Environmental assessment of cost-optimal solutions. *Journal of Building Engineering*, 4, 167–176. <https://doi.org/10.1016/j.job.2015.09.009>
- Teli, D., Dimitriou, T., James, P. A. B., Bahaj, A. S., Ellison, L., & Waggott, A. (2016). Fuel poverty-induced “prebound effect” in achieving the anticipated carbon savings from social housing retrofit. *Building Services Engineering Research and Technology*, 37(2), 176–193. <https://doi.org/10.1177/0143624415621028>
- Terés-Zubiaga, J., Campos-Celador, A., González-Pino, I., & Escudero-Revilla, C. (2015). Energy and economic assessment of the envelope retrofitting in residential buildings in Northern Spain. *Energy and Buildings*, 86, 194–202. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.018>
- Thomas, A., Menassa, C. C., & Kamat, V. R. (2018). A systems simulation framework to realize net-zero building energy retrofits. *Sustainable Cities and Society*, 41(May), 405–420. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.045>
- Valdiserri, P., & Biserni, C. (2016). Energy performance of an existing office building in the northern part of Italy: Retrofitting actions and economic assessment. *Sustainable Cities and Society*, 27, 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.07.009>
- Wei, S., Hassan, T. M., Firth, S. K., & Fouchal, F. (2017). Impact of occupant behaviour on the energy-saving potential of retrofit measures for a public building in the UK. *Intelligent Buildings International*, 9(2), 97–106. <https://doi.org/10.1080/17508975.2016.1139538>
- Wu, R., Mavromatidis, G., Orehounig, K., & Carmeliet, J. (2017). Multiobjective optimisation of energy systems and building envelope retrofit in a residential community. *Applied Energy*, 190, 634–649. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.161>

ANEXO 1

MONTAGEM DA PAREDE



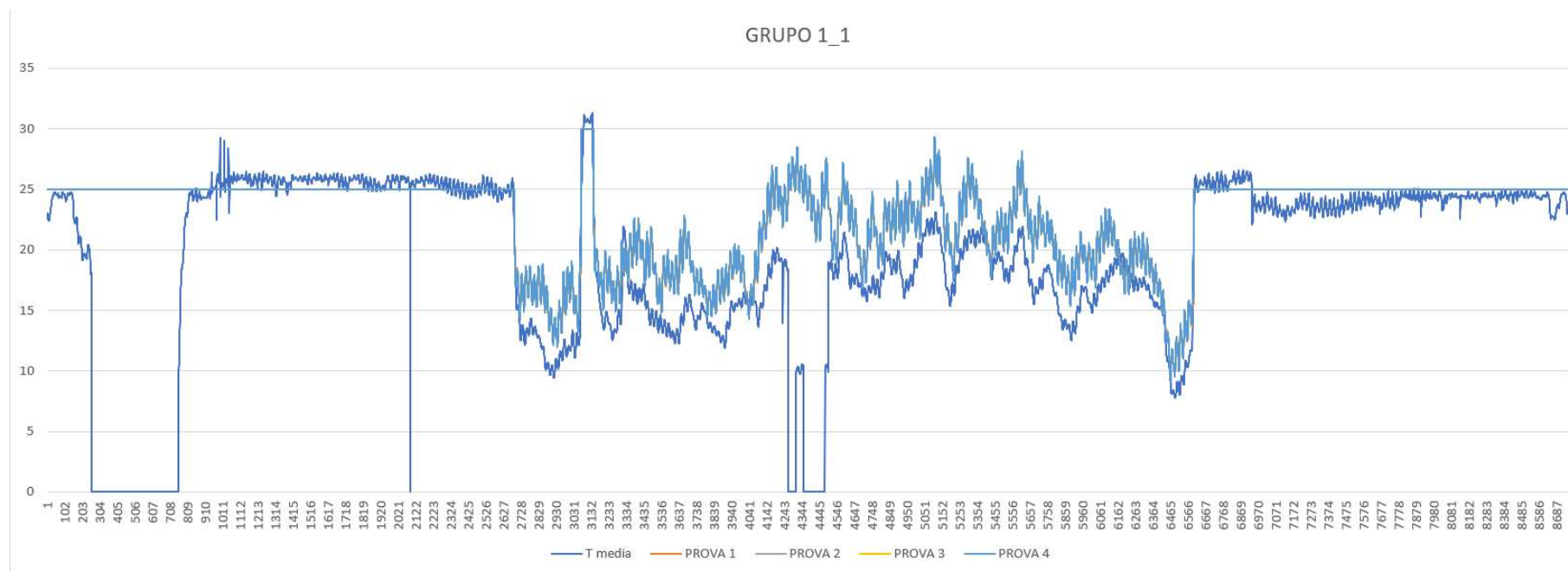
Fig. A1. Montagem em fábrica



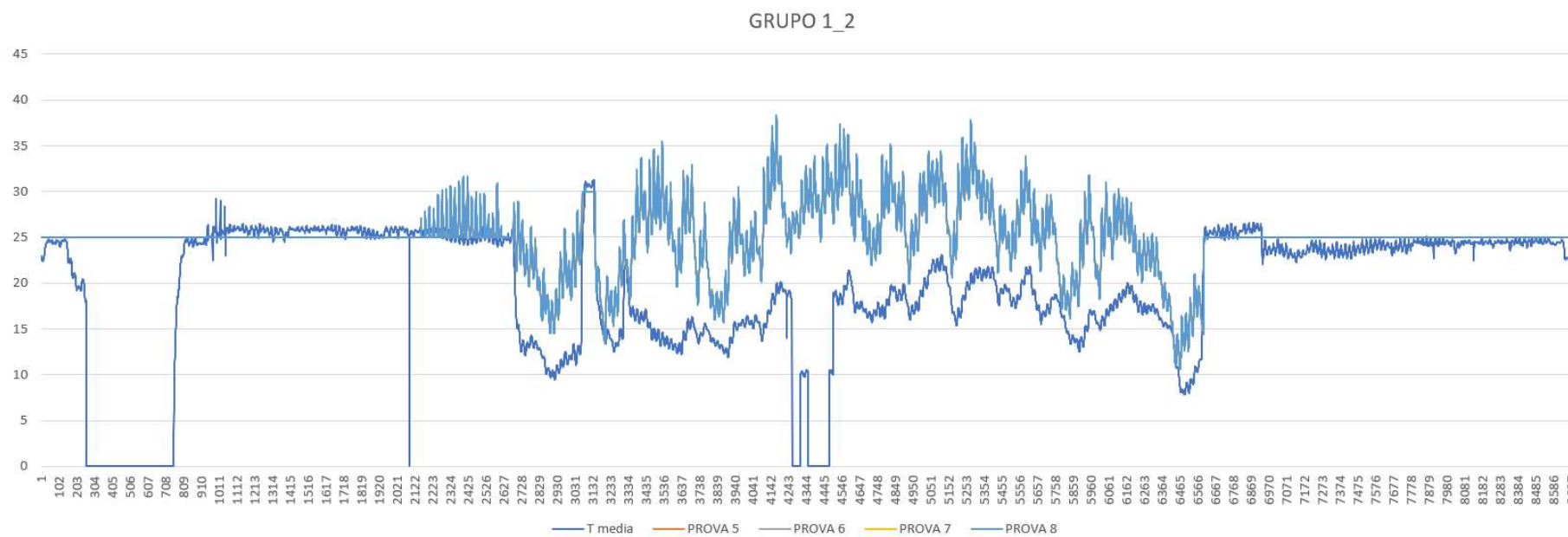
Fig. A2. Montagem em campo

ANEXO 2

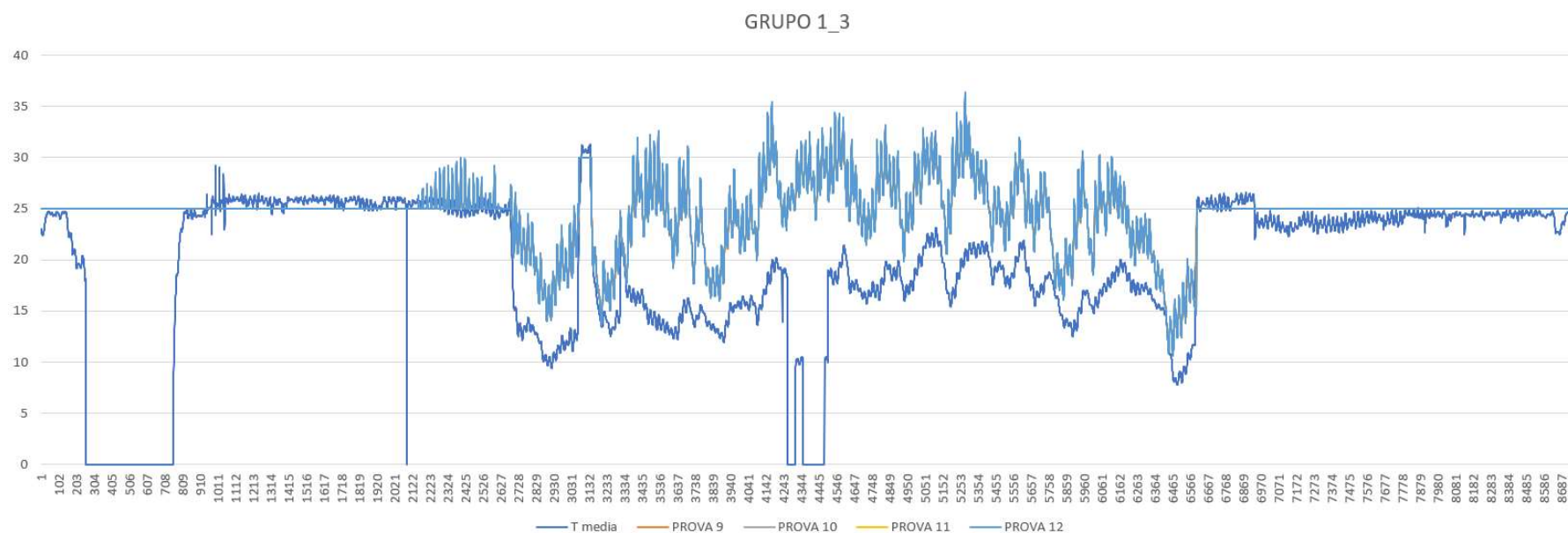
COMPORTAMENTO TÉRMICO POR GRUPOS



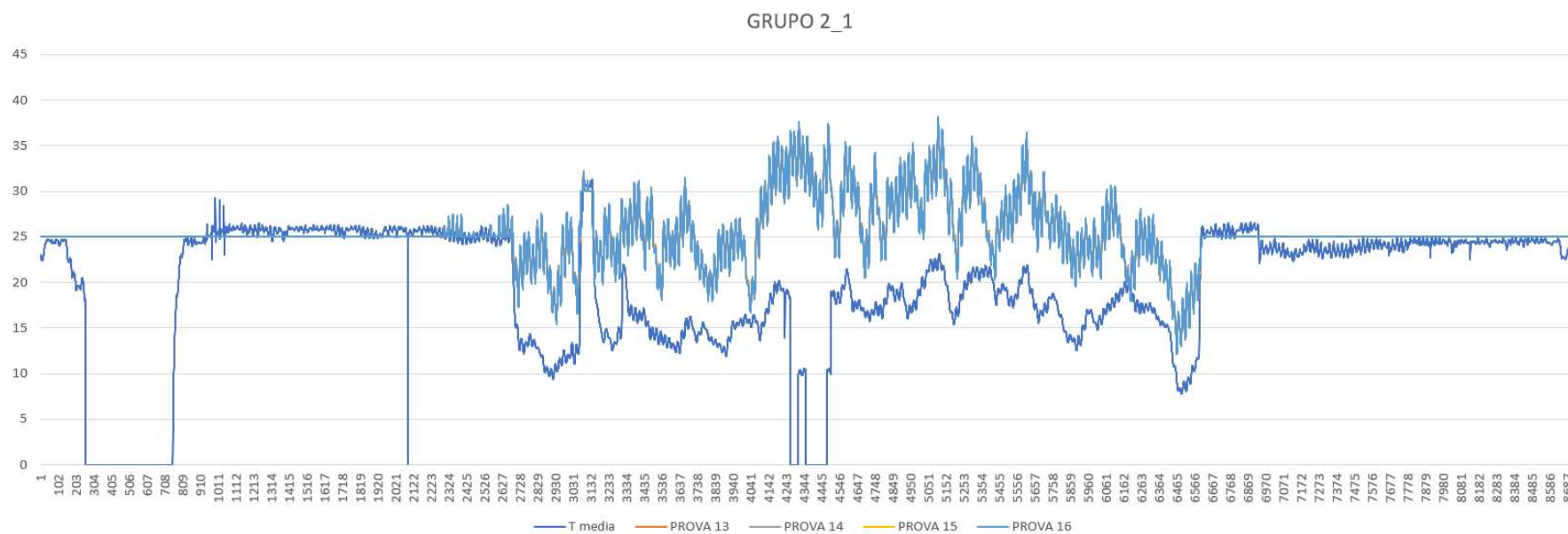
Avaliação do impacto na redução dos consumos energéticos de uma parede inovadora de madeira para a reabilitação de edifícios



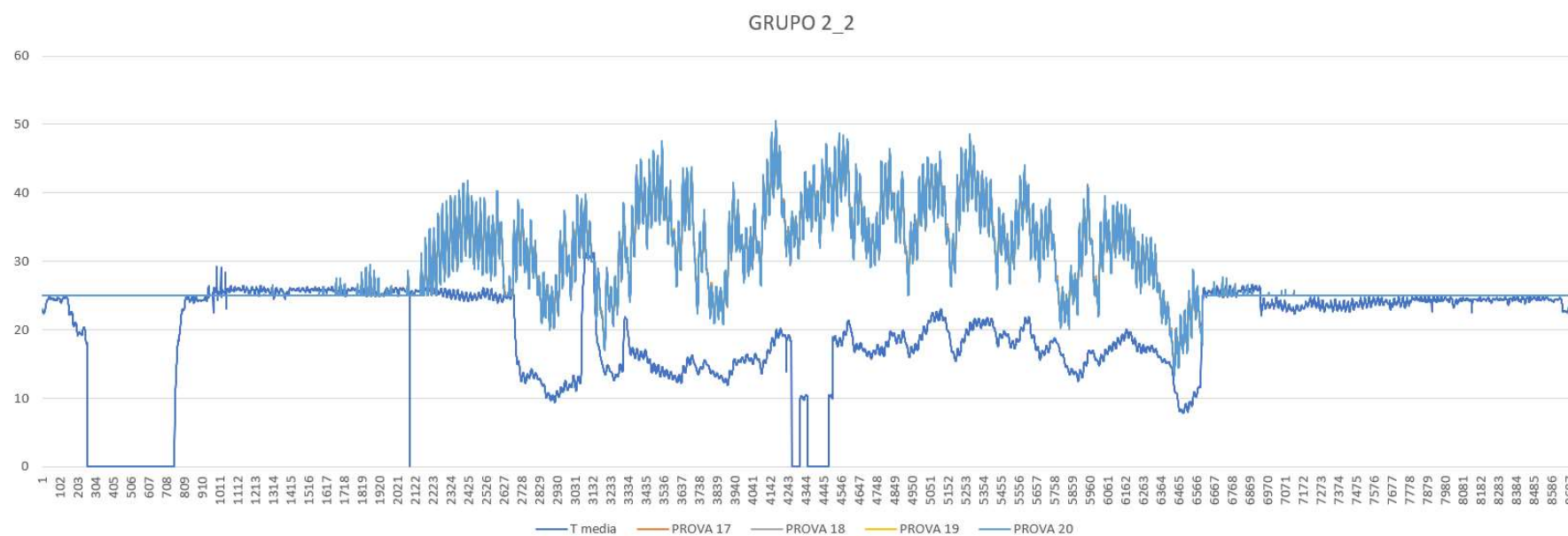
Avaliação do impacto na redução dos consumos energéticos de uma parede inovadora de madeira para a reabilitação de edifícios



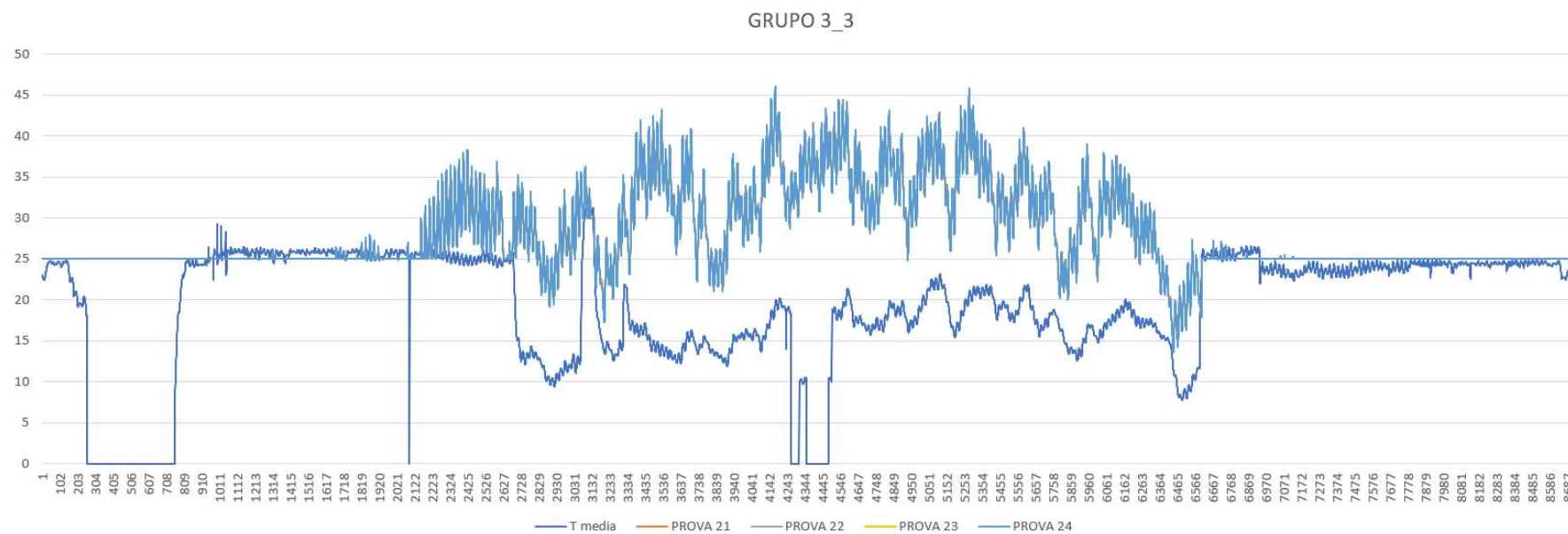
Avaliação do impacto na redução dos consumos energéticos de uma parede inovadora de madeira para a reabilitação de edifícios



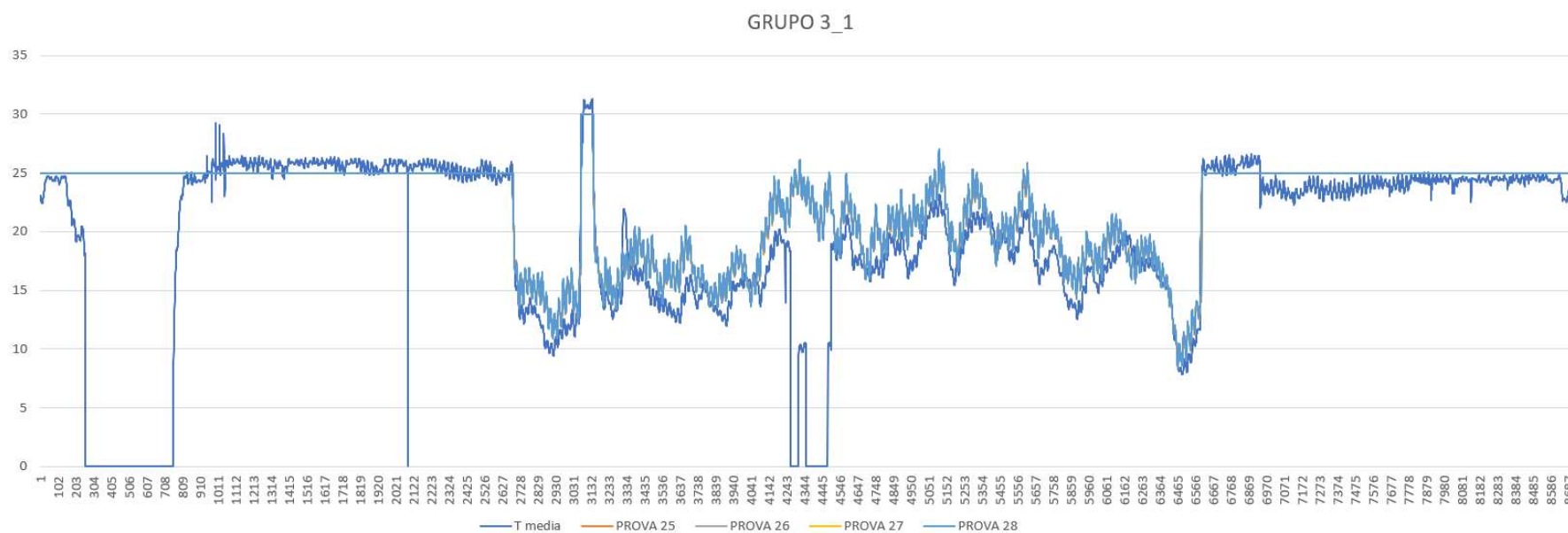
Avaliação do impacto na redução dos consumos energéticos de uma parede inovadora de madeira para a reabilitação de edifícios



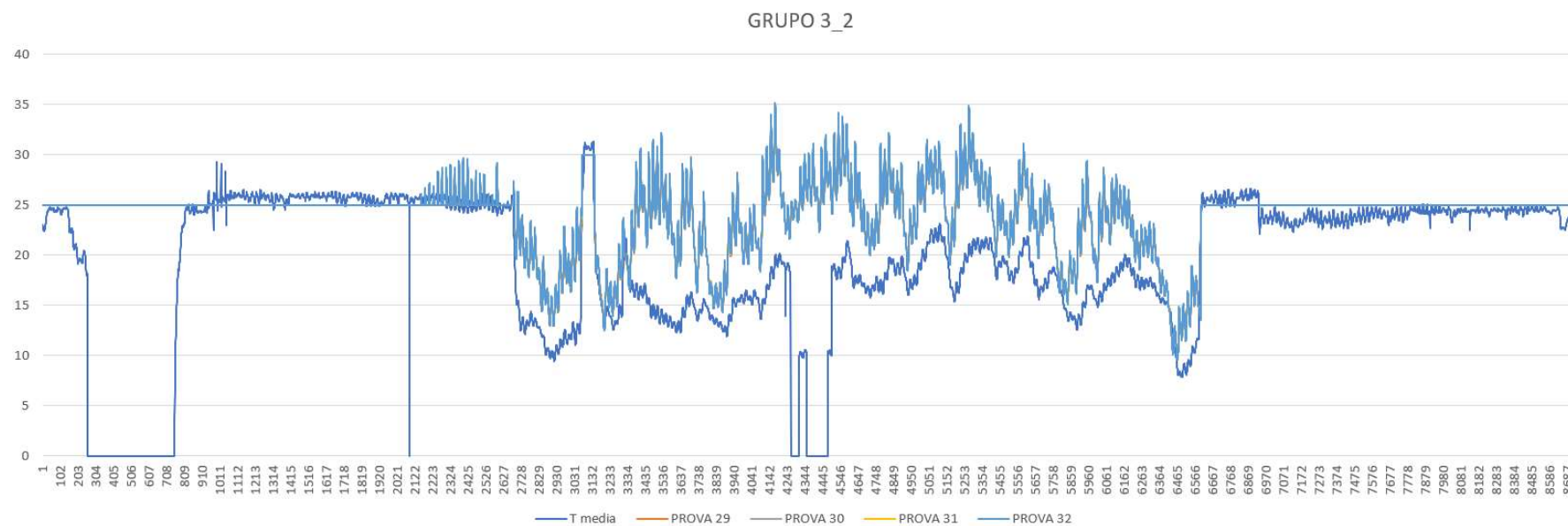
Avaliação do impacto na redução dos consumos energéticos de uma parede inovadora de madeira para a reabilitação de edifícios



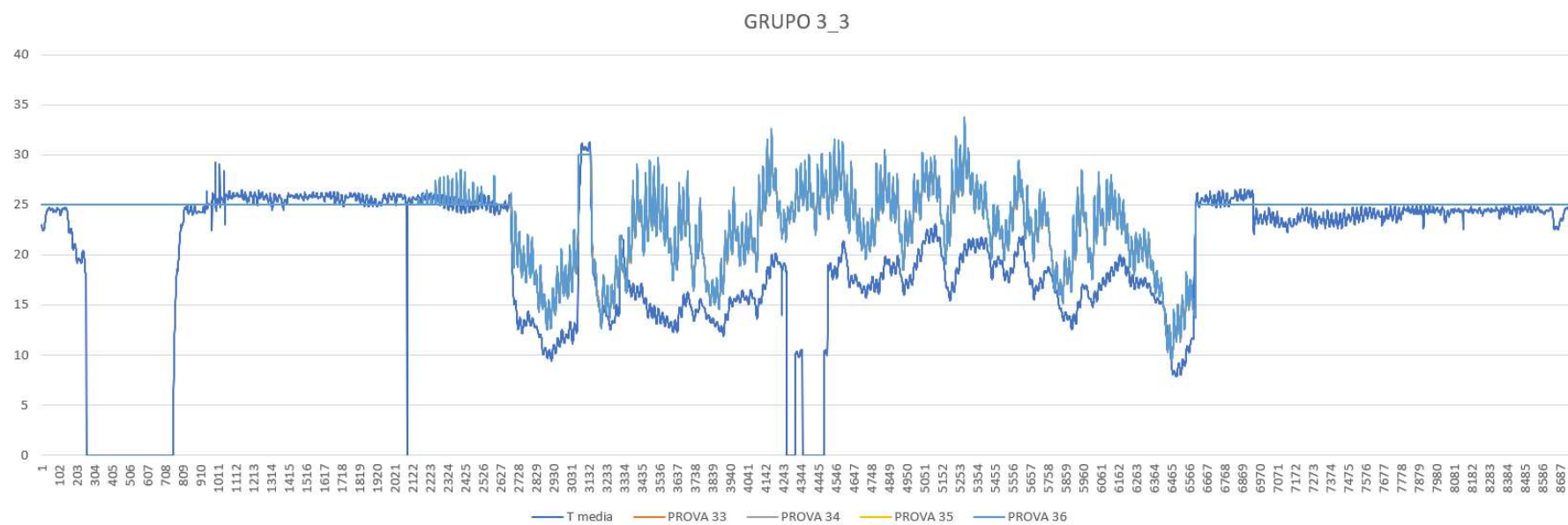
Avaliação do impacto na redução dos consumos energéticos de uma parede inovadora de madeira para a reabilitação de edifícios



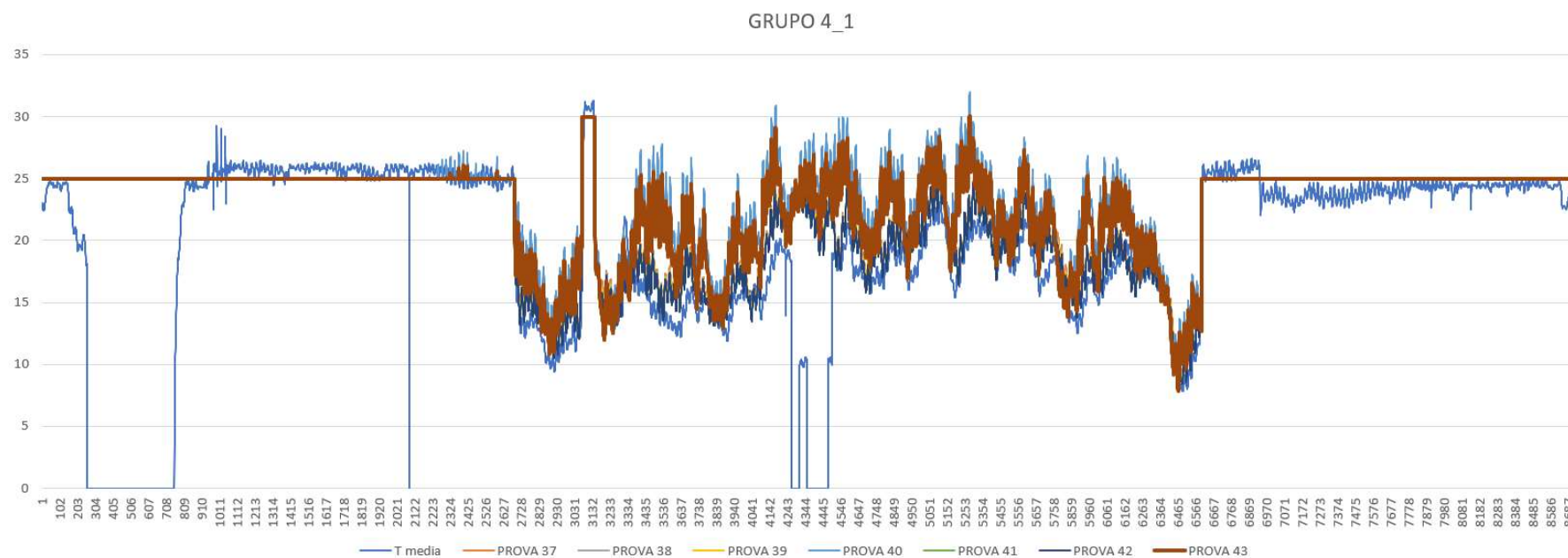
Avaliação do impacto na redução dos consumos energéticos de uma parede inovadora de madeira para a reabilitação de edifícios



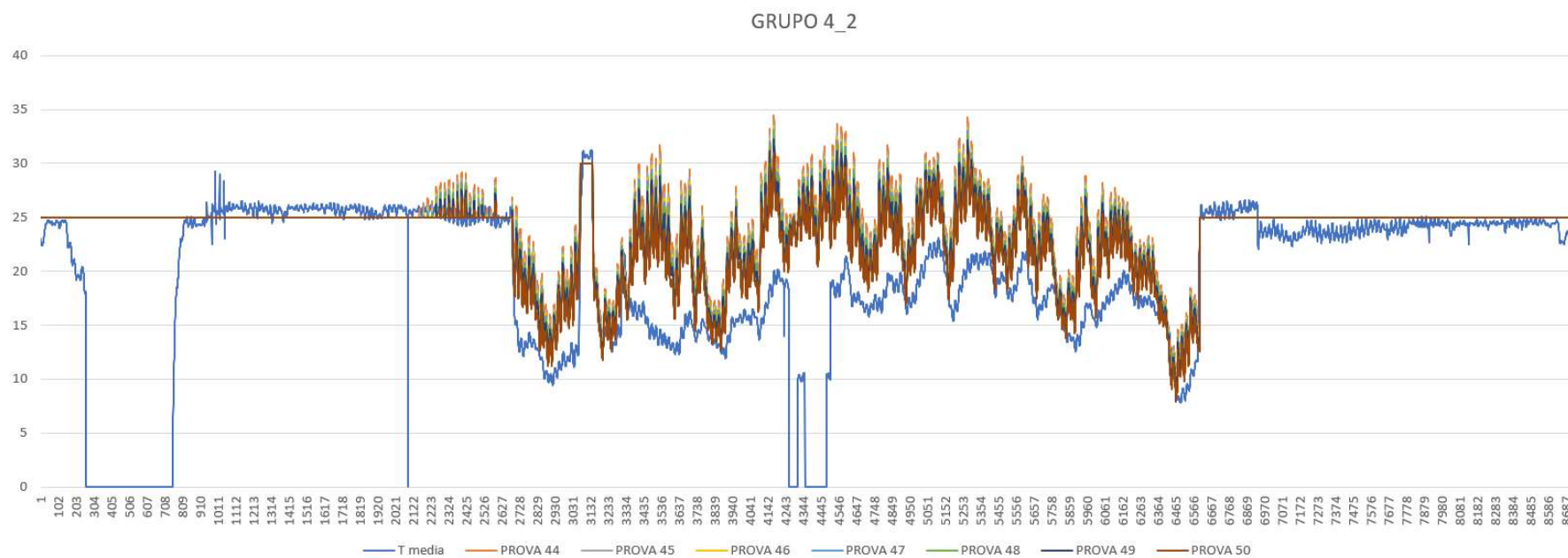
Avaliação do impacto na redução dos consumos energéticos de uma parede inovadora de madeira para a reabilitação de edifícios



*Avaliação do impacto na redução dos consumos energéticos de uma parede inovadora de
madeira para a reabilitação de edifícios*



Avaliação do impacto na redução dos consumos energéticos de uma parede inovadora de madeira para a reabilitação de edifícios



*Avaliação do impacto na redução dos consumos energéticos de uma parede inovadora de
madeira para a reabilitação de edifícios*

