XVIII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIV ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
AMBIENTE CONSTRUÍDO E USUÁRIO: PERSPECTIVAS LATINO-AMERICANAS

Protocolo para a modelagem energética horária de habitações in loco em tempo real usando dispositivo móvel e simulação em nuvem

Protocolo para el modelado energético horario de viviendas in situ en tiempo real usando un dispositivo móvil y simulación en la nube

Protocol for the hourly energy modeling of dwellings on-site in real time using a mobile device and cloud simulation

Desempenho Térmico do Ambiente Construído

Fernandes, Luciana Oliveira
Doutora, etiz, São Paulo, Brasil, luarq.fernandes@gmail.com

Cóstola, Daniel
Doutor, University of Strathclyde, Glasgow, Escócia, daniel.costola@strath.ac.uk

Resumo

A modelagem energética de habitações existentes é demorada, exigindo informações detalhadas sobre a construção. Este artigo apresenta um protocolo para coleta de dados in loco de residências, permitindo modelagem automatizada direta em ferramentas de simulação dinâmica de energia. O protocolo foi implementado em aplicativo Android, suportado por back-end em Node JS e front-end em Angular para gerenciamento de dados por diferentes partes interessadas. Simulações automatizadas foram realizadas com o programa ESP-r, gerenciadas por rotinas em Matlab. Um estudo de caso, com 10 avaliações de desempenho térmico conforme a NBR 15575-1, é descrito. Foram realizadas simulações energéticas do edifício real e de referência com e sem uso da ventilação natural, controle de dispositivos de sombreamento e abertura de janelas. Os resultados indicam que, para uma habitação de 2 quartos, relatórios de conformidade detalhados e confiáveis com simulações auditadas por terceiros estão disponíveis em 48 minutos a partir do acesso à propriedade.

Palavras-chave: Modelagem energética. Coleta de Dados. Desempenho Energético. Edificações Residenciais. Edificações existentes.

Resumen

El modelado energético de viviendas existentes requiere tiempo y datos detallados del edificio. Este artículo presenta un protocolo para la recolección de datos in situ de residencias, permitiendo el modelado automatizado directo en herramientas de simulación energética dinámica. El protocolo se implementó en una aplicación Android, con un back-end en Node JS y un front-end en Angular para la gestión de datos por diferentes partes interesadas. Se realizaron simulaciones automatizadas con el programa ESP-r, utilizando un simulador desarrollado en Matlab. Se describe un estudio de caso con 10 evaluaciones de desempeño térmico según la norma NBR 15575-1. Las simulaciones energéticas incluyen escenarios con y sin ventilación natural, control de dispositivos de sombreado y apertura de ventanas. Los resultados indican que, para una vivienda de dos habitaciones, los informes con simulaciones auditadas están disponibles a 48 minutos del acceso a la propiedad.

Palabras clave: Modelado energético. Recopilación de datos. Desempeño energético. Edificaciones residenciales. Edificaciones existentes.

Abstract

Energy modeling of existing housing is time-consuming and requires detailed information about the building. This paper presents a protocol for collecting on-site data from existing homes, allowing direct automated modeling in dynamic energy simulation tools. The protocol was implemented in an Android application, supported by a Node JS back-end and an Angular front-end for data management by different stakeholders. Automated simulations were performed with the ESP-r program using a simulator developed in Matlab. A case study of 10 thermal performance assessments according to NBR 15575-1 is described. Energy simulations of the real and reference building were performed with and without the use of natural ventilation, control of shading devices, and window opening. The results indicate that, for a 2-bedroom dwelling, detailed and reliable compliance reports with third-party audited simulations are available within 48 minutes from accessing the property.

Keywords: Energy modeling. Data collection. Energy performance. Residential buildings. Existing buildings.

1. Introdução

A simulação detalhada, multizona e dinâmica de energia de edifícios residenciais existentes pode ser uma ferramenta importante para informar proprietários, compradores, inquilinos, administradores de propriedades e autoridades sobre o desempenho ambiental de casas e apartamentos. Apesar de sua importância, a simulação raramente é realizada para habitações existentes, devido ao processo demorado (e consequentemente caro) de coleta de informações em campo, representação do edifício real usando desenhos, relatórios e/ou modelos BIM, desenvolvimento de modelos de simulação confiáveis em software adequado, relatórios e avaliação da conformidade com regulamentações complexas (por exemplo: LEED, BREEAM, PBE-Edifica, etc).

Este processo complexo e caro, executado por especialistas, dificulta a adoção generalizada da simulação e pode ser um dos principais fatores responsáveis pelo uso atual de modelos simplificados para avaliação de conformidade com regulamentações energéticas. Modelos baseados em estado estacionário, ou baseados em metamodelos ainda são amplamente utilizados (Wang, 2012; Lopes, 2018). Esses modelos são incapazes de capturar o mesmo nível de detalhe apresentado por programas de simulação dinâmica, multizona do edifício (Vollaro, 2015). A norma brasileira de desempenho de edificações, NBR 15575-1:2021 (seção 11), permite a escolha entre dois procedimentos de análise do desempenho térmico da Unidade Habitacional (UH): o procedimento de simulação computacional (dinâmica) e o procedimento simplificado, baseado na comparação de características geométricas e térmicas da edificação com parâmetros de referência (ABNT, 2021). Fica, portanto, claro que existe a necessidade de investigar mecanismos para facilitar e modelagem energética de habitações construídas. Contudo, a revisão sistemática de literatura (utilizando diversas palavras-chave relacionadas ao tema), não identificou outras publicações dedicadas a protocolos para facilitar a modelagem dinâmica, confiável, detalhada, e multizona da habitação, dentro da escala de tempo (e consequentemente de baixos custos) necessária para sua adoção em massa. Esta é a lacuna abordada por este artigo.

O objetivo deste artigo é elaborar, implementar e testar um protocolo para coletar dados permitindo a modelagem automatizada direta em ferramentas de simulação dinâmica de energia. Adotamos como condicionantes que o protocolo: (1) seja mais rápido do que

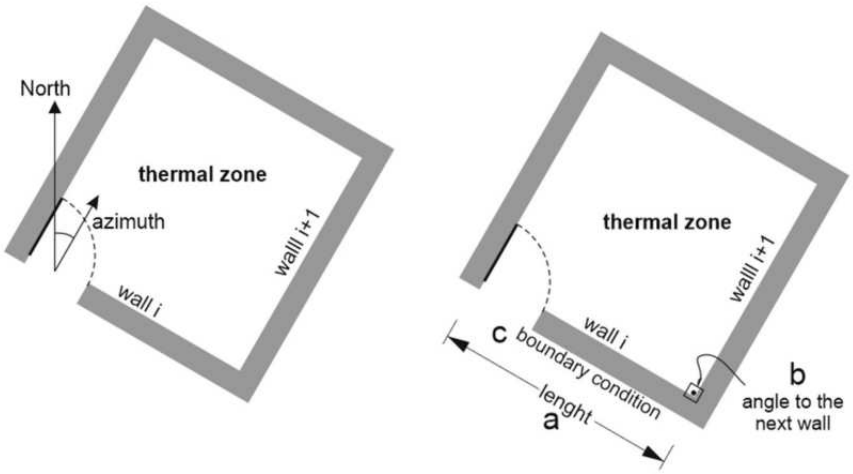
representar o edifício por meio de plantas, (2) exija um tempo mínimo de treinamento para novos inspetores encarregados de levantar dados in loco, e (3) forneça dados em um formato que facilite a implementação de modelagem automatizada sem necessidade de intervenção ou supervisão humana.

2. Protocolo para coleta de dados in loco de habitações para modelagem de energia dinâmica multizona

2.1. Geometria dos cômodos

O protocolo considera as superfícies das paredes das zonas como a entidade primária para a modelagem energética. Conforme exigido pela maioria das ferramentas de simulação energética, são coletados os seguintes dados para cada parede de cada cômodo: comprimento e altura, composição, condição de contorno e aberturas. Além disso, é registrado o ângulo entre paredes adjacentes, permitindo a reconstrução da geometria do cômodo com base nas informações de cada parede. O azimute da porta de entrada de cada cômodo também é registrado, possibilitando a rotação dos cômodos necessária para cálculos adequados de radiação solar. A Figura 1 ilustra os elementos da coleta de dados para a geometria.

Figura 1: Elementos necessários para a descrição da geometria do recinto.



Fonte: Autores (2025).

A abordagem tradicional para coleta de dados sobre a geometria de edifícios requer medições sucessivas de distâncias e o uso desses valores para representar o edifício em plantas e cortes. Normalmente, desenhos preliminares são produzidos in loco e posteriormente utilizados para criar desenhos finais no escritório. Esse processo é demorado e exige pessoas com experiência para lidar com o nível de abstração necessário para traduzir o espaço em desenhos. Pesquisas nessa área introduziram várias abordagens alternativas, principalmente baseadas em laser ou fotogrametria. Embora essas abordagens forneçam resultados promissores, nenhuma delas pode ser usada diretamente para gerar modelos energéticos multizonas, exigindo que um modelador experiente realize ou supervisione o processo.

2.2. Entorno

O entorno do edifício e as obstruções desempenham um papel fundamental na maioria dos mecanismos de transferência de calor e massa, afetando: perdas por radiação de onda longa; ganhos solares diretos, indiretos e refletidos; perfis de vento utilizados para calcular a velocidade de referência do vento à altura do edifício; fluxo de ar local, impactando perdas/ganhos por convecção; e também as pressões responsáveis pela infiltração de ar e ventilação. Consequentemente, é importante obter informações sobre o entorno do edifício e também sobre as obstruções causadas por autossombreamento e/ou elementos de sombreamento. Em muitos protocolos, essas informações são amplamente negligenciadas ou simplificadas, como no caso da análise pelo procedimento simplificado da NBR 15575-1:2021.

Para cada janela, o protocolo requer a coleta da distância e altura da obstrução (natural ou construída) posicionada ortogonalmente à abertura. Essa abordagem é adequada para grandes obstruções paralelas ao edifício, frequentemente encontradas em contextos urbanos. Elementos de sombreamento nas laterais e na parte superior da abertura são caracterizados com base na distância até a abertura e no comprimento.

2.3. Materiais de construção

Na modelagem energética de edifícios existentes, é prática comum adotar materiais e montagens de referência (Kelly et al, 2012). O protocolo atual segue uma abordagem

semelhante, adotando um banco de dados de componentes construtivos e materiais de construção como ponto de partida para a modelagem. Duas medidas adicionais são introduzidas para melhorar a qualidade do modelo. Primeiro, a espessura das paredes internas e externas é registrada durante a coleta de dados, e as propriedades construtivas são ajustadas automaticamente com base nesse valor. Em segundo lugar, pelo menos uma parede externa é perfurada a partir da face interna, com uma broca de 4 mm de diâmetro e 5 cm de profundidade. A cor e a consistência dos resíduos da perfuração são utilizadas para verificar a adequação das suposições sobre os materiais de construção. Além disso, uma pequena câmera é inserida na perfuração para verificar a existência de cavidades e preenchimentos, caso necessário. O inspetor indica materiais de construções pelos nomes comuns usados no setor, e todas as propriedades térmicas são inferidas com base nesta seleção. Desta maneira, o protocolo não requer do inspetor qualquer conhecimento com relação a simulação térmica e com relação aos procedimentos da NBR15575-1 Seção 11.

3. Descrição do estudo de caso com implementação de protótipo (solução full-stack)

3.1. Descrição do protótipo

O protótipo foi desenvolvido usando tecnologias robustas e flexíveis para permitir a implementação de mecanismos que facilitassem a coleta de dados e garantissem a qualidade dos dados coletados, conforme resumido na Tabela 1.

O protótipo conta com diversas medidas de garantia de qualidade, tais como:

- Restrição de local para a vistoria: o aplicativo móvel só habilita a vistoria se o inspetor estiver no endereço do imóvel.
- Restrições de horário para a pesquisa: os inspetores só podem prosseguir com a coleta de dados no horário agendado pelo cliente no portal da web.
- Desenho da planta de cada zona: uma vez que os dados de um determinado ambiente foram inseridos, o aplicativo gera uma planta deste ambiente permitindo que os inspetores sinalizem e corrijam eventuais erros na coleta de dados.

- Verificação das condições de contorno: o aplicativo móvel compara as condições de contorno inseridas para cada ambiente e sinaliza eventuais inconsistências.

- Integração Bluetooth com trena a laser: o aplicativo móvel captura as medições diretamente da trena a laser reduzindo erros na entrada de dados.

- Fotos: o aplicativo móvel solicita que o inspetor tire fotos em situações prescritas, garantindo que a documentação esteja completa, consistente e passível de verificação.

- Verificações de terceiros: uma vez que as simulações são concluídas, os resultados ficam disponíveis para o supervisor no portal da web. O supervisor usa o portal da web para avaliar a qualidade do modelo com base em uma lista predefinida de verificações.

Tabela 1: Principais características do protótipo.

Componente	**Características**
Aplicativo móvel	Aplicativo Android em Java, com rastreamento GPS, bússola, e suporte para trena a laser Bluetooth, aproveitando API de back-end para recuperação e envio de dados.
Front-end	Portal web em AngularJS para clientes, inspetores, supervisores, e administradores de sistemas.
Back-end	Servidor NodeJS, oferecendo RESTful APIs para gerenciamento de dados pelo front-end e aplicativo móvel, suportado por um banco de dados (MongoDB) e também acionando as simulações no ESP-r.
Simulador	Aplicação compilada desenvolvida usando Matlab, fornecendo uma interface entre o back-end e o ESP-r, com modelagem, simulação e pós-processamento totalmente automatizados.
Serviços de localização	API de georreferenciamento do Google Maps.
Infraestrutura de TI	Dois pequenos servidores Ubuntu de baixo custo (16 Gb de RAM, 500 Gb de disco rígido) hospedando o front-end, e o back-end e simulador.
Dispositivos móveis	Tablet Samsung SM T290 de baixo custo com tela de 8”.
Trena a laser	Bosch GLM50C com suporte Bluetooth para entrada direta no aplicativo móvel.

Fonte: Autores (2025).

A coleta de dados com o protótipo, o simulador Matlab e os bancos de dados do ESP-r foram adaptados para atender aos requisitos da norma brasileira para avaliação de eficiência energética de edifícios residenciais (NBR 15575-1:2021). A norma exige quatro modelos por

habitação. Os modelos devem considerar os cenários: (1) com condicionamento de ar durante todo o ano e (2) com ventilação natural, incluindo controles para abertura de janelas. Cada cenário deve ser modelado usando um edifício de referência e o edifício real. A implementação no protótipo automatizou uma série de decisões de modelagem geralmente tomadas pelo modelador de energia, como: dados climáticos a serem usados, esquema numérico, *time-step*, escolha do coeficiente de pressão com base nos edifícios circundantes, estimativa dos coeficientes de descarga com base no tipo de janela e obstruções ao redor da janela, posição e quantidade de nós na rede de fluxo de ar, fator de redução de vento com base nos edifícios circundantes, modelagem de plenum e sótãos como zonas térmicas, etc. Este artigo não discute os detalhes das muitas decisões de modelagem adotadas no protótipo, pois elas podem ser revisadas a qualquer momento e para qualquer aplicação específica. O fato a ser destacado é a consistência na aplicação de estratégias de modelagem devido ao processo totalmente automatizado. O simulador gera automaticamente relatórios em formato PDF com dados do modelo e resultados, facilitando a verificações das simulações por terceiros antes da liberação de resultados ao cliente.

3.2. Casos de teste, treinamento de supervisores e inspetores e mecanismo de verificação por supervisores

Um total de 10 moradias foram modeladas. As moradias estavam localizadas em várias cidades do Brasil, variando entre 53 e 90 m², e compreendem apartamentos de 2 quartos, casas isoladas e geminadas com um ou dois andares. Dois inspetores realizaram 5 coletas de dados cada um, após receberem 8 horas de treinamento online usando vídeos e um estudo de caso. Ambos os inspetores são formados em arquitetura, com 10 e 20 anos de experiência, respectivamente. Antes da coleta de dados, cada inspetor teve que realizar de forma independente outras 4 coletas para se familiarizar com o aplicativo móvel. Essas coletas não foram verificadas quanto à qualidade e tem por objetivo apenas aumentar a familiaridade com o fluxo de trabalho do aplicativo móvel.

Verificações de terceiros foram realizadas por um dos coautores deste artigo, que atuou como supervisor neste estudo de caso. O supervisor tem amplo conhecimento em simulação de energia, bem como na regulamentação de conformidade para NBR 15575-1:2021, sendo também um dos desenvolvedores do protocolo e do protótipo. O supervisor não teve acesso

aos detalhes de cada habitação pesquisada antes da coleta in loco. No dia agendado para a pesquisa, o supervisor entrou no portal da web e prosseguiu com as verificações assim que os dados foram enviados pelo inspetor.

A amostra de 10 casos não se propõe a representar todo o estoque construído brasileiro. Trata-se de uma amostra que permite demonstrar o potencial do protocolo, e que ao mesmo tempo possibilita a análise detalhada de cada modelo gerado. A modelagem segundo a NBR 15575-1:2021 é bastante complexa, portanto, não se deve subestimar o trabalho necessário para garantir que cada um dos 4 modelos gerados automaticamente para cada uma das 10 moradias do estudo de caso atenda não só aos requisitos da norma, mas também represente de maneira fidedigna o edifício real.

3.3. Forma de análise dos resultados

Os modelos de energia gerados usando o protótipo foram analisados em termos de produtividade e qualidade. A produtividade foi medida em termos de tempo gasto nas seguintes etapas: (1) coleta de dados a partir do momento em que o inspetor obtém acesso à moradia até o momento em que os resultados são verificados e aprovados pelo supervisor, (2) modelagem automatizada dos 4 casos exigidos pela NBR 15575-1:2021, execuções de simulação e geração de relatórios, e (3) verificações de controle de qualidade pelo supervisor.

A qualidade do modelo foi avaliada posteriormente pelos autores com base no exame detalhado de cada modelo gerado, apoiado por dados adicionais sobre a habitação não disponíveis para os inspetores nem supervisores (plantas, seções transversais, materiais de construção e dados detalhados sobre os arredores). O modelo foi verificado usando a interface do ESP-r Project Manager em relação à geometria, condições de contorno, materiais e componentes, ganhos internos, *schedules*, *set-points*, controles de janela, sombreamento externo, operação de venezianas, obstruções e topologia da rede de fluxo de ar. Os resultados de cada modelo foram analisados usando gráficos para temperatura, fluxos de calor e condições de contorno, bem como taxas de fluxo de ar e pressão em nós de contorno, considerando uma semana no inverno e uma no verão. Essa auditoria detalhada do modelo é um processo demorado, portanto, esse foi o principal motivador para a pequena amostra de edifícios usada para testar o protótipo.

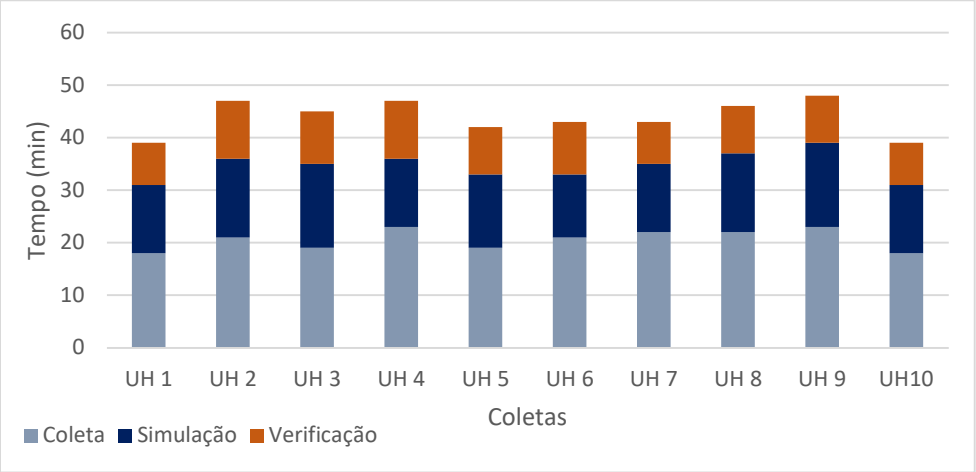
4. Resultados do estudo de caso

4.1. Produtividade

A Figura 2 mostra os resultados para coleta de dados, tempo de execução e de verificação, com tempo total de até 48 minutos. É notável que a coleta de dados leva apenas metade do tempo total, resultado que foi possível por meio de diversos aprimoramentos no aplicativo móvel durante a fase de desenvolvimento. É também notável que tal resultado foi obtido com poucas horas de treinamento do inspetor, demonstrando que a solução tem boa escalabilidade e pode ser facilmente estendida a todo o país em curto espaço de tempo caso análises de conformidade com a legislação energética se tornem obrigatórias para todas as habitações comercializadas, similarmente ao que ocorre em diversos países da comunidade europeia. A pesquisa não abordou os fatores de cada tipologia que causaram acréscimo no tempo gasto.

O tempo de simulação é afetado pelo pequeno time-step necessário para simulações adequadas de ventilação natural, mas esse tempo poderá no futuro ser bastante reduzido pelo uso de computadores mais rápidos, e por otimizações no simulador Matlab. A etapa de verificação, de cerca de 10 minutos, é bastante rápida devido ao relatório gerado para conferência estar alinhado com os pontos do checklist usado pelo supervisor, facilitando o controle de qualidade de diversos elementos do modelo.

Figura 2: Dados de produtividade para cada habitação do estudo de caso.

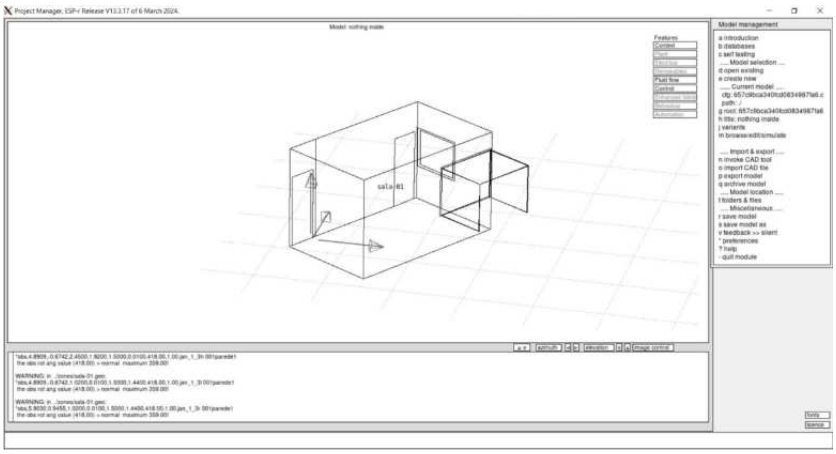


Fonte: Autores (2025).

4.2. Qualidade dos modelos gerados

A Figura 3 mostra o Project Manager do programa ESP-r com a geometria de uma zona térmica de um dos modelos gerados automaticamente. Investigação detalhada dos 10 modelos revelou que em todos os casos os modelos foram gerados corretamente e que os mesmos seguem as orientações descritas na NBR 15575-1:2021. Ganhos de produtividade só devem ser avaliados conjuntamente com a qualidade dos modelos gerados, de forma a evitar a adoção de práticas que aumentem a produtividade, mas que gerem resultados inadequados.

Figura 3: Zona térmica com sombreamento gerada no ESP-r.



Fonte: Autores (2025).

5. Conclusões

Esse artigo descreve um raro estudo sobre a produtividade da modelagem dinâmica de energia para habitações existentes, particularmente em relação à conformidade com a norma de desempenho de edificações vigente, a NBR 15575-1:2021.

O artigo descreve um protocolo, sua implementação em um sistema informático, e testes deste sistema em campo. Os resultados mostram que a modelagem confiável de energia pode ser concluída em até 48 minutos para um total de 4 variantes de modelo de uma habitação sem grande complexidade, contados a partir do momento em que o inspetor obtém acesso à propriedade. Como o presente artigo traz as primeiras implementações do protocolo, ainda pode haver espaço para ganhos significativos de produtividade, particularmente na experiência do usuário do aplicativo móvel de coleta de dados e na paralelização da simulação. Trabalhos futuros devem se concentrar na melhoria da coleta de dados das propriedades dos componentes, a fim de reduzir a incerteza da simulação.

6. Agradecimentos

Este estudo foi parcialmente apoiado pelo SENAI.

7. Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1**: Edificações habitacionais — Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

BRASIL. Ministério da Economia. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Portaria n° 309, de 6 de setembro de 2022. [Aprova as Instruções Normativas e os Requisitos de Avaliação da Conformidade para a Eficiência Energética das Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas e Residenciais – Consolidado]. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 30, 12 set. 2022.

Fabbri, Kristian; Marinosci, Cosimo. EPBD independent control system for energy performance certification: The Emilia-Romagna Region (Italy) pioneering experience. **Energy**, Vol. 165, 2018, p. 563-576.

Kelly, Scott; Crawford-Brown, Doug; Pollitt, Michael G. Building performance evaluation and certification in the UK: Is SAP fit for purpose? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Vol. 16, 2012, p. 6861-6878.

Lopes, Mauricio Nath; Lamberts, Roberto. Development of a Metamodel to Predict Cooling Energy Consumption of HVAC Systems in Office Buildings in Different Climates. **Sustainability**, Vol. 10 (12), 2018, p. 4718.

Shengwei, Wang; Chengchu, Yan; Fu, Xiao. Quantitative energy performance assessment methods for existing buildings. **Energy and Buildings**, Vol. 55, 2022, p. 873-888.

Vollaro, Roberto De Lieto; Guattari, Claudia; Evangelisti, Luca; Battista, Gabriele; Carnielo, Emiliano; Gori, Paola. Building energy performance analysis: A case study. **Energy and Buildings**, Vol. 87, 2015, p. 87-94.