

ESTRATÉGIA DE INTEROPERABILIDADE IFC-ENERGYPLUS PARA SIMULAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS HISTÓRICOS

Bruna Onety⁽¹⁾, Tatiana Zanni⁽²⁾, Maria Laura Leonardi⁽³⁾, Manuela Almeida⁽⁴⁾, Maria R. Valluzzi⁽⁵⁾, José Granja⁽⁶⁾, Miguel Azenha⁽⁷⁾

Universidade do Minho, ISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal, ID ORCID 0000-0002-9686-8757

Universidade de Pádua, Piazza Capitaniato 7, Pádua, Itália, ID ORCID 0009-0008-6700-5793

Universidade do Minho, ISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal, ID ORCID 0000-0003-3659-3955

Universidade do Minho, ISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal, ID ORCID 0000-0003-2713-6322

Universidade de Pádua, Piazza Capitaniato 7, Pádua, Itália, ID ORCID 0000-0003-0216-5549

Universidade do Minho, ISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal, ID ORCID 0000-0002-0858-4990

Universidade do Minho, ISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal, ID ORCID 0000-0003-1374-9427

Resumo

A avaliação do desempenho energético de edifícios nas fases iniciais de projeto é essencial para que os projetistas tomem decisões informadas e baseadas em dados, promovendo soluções construtivas mais sustentáveis. Contudo, avaliações manuais são demoradas e suscetíveis a erros. O Building Information Modeling (BIM) desempenha um papel fundamental ao permitir fluxos de trabalho interoperáveis e centrados no modelo, agilizando o processo de criação do Building Energy Model (BEM) e aumentando a sua precisão. A adoção do esquema Industry Foundation Classes (IFC) garante a comunicação consistente de componentes geométricos, espaciais e de desempenho entre disciplinas, entretanto, sua transição para motores de simulação, como o EnergyPlus, continua desafiadora, uma vez que os dois domínios adotam regras e frameworks conceituais distintos.

Este artigo apresenta uma metodologia de trabalho BIM escalável para simulação energética com foco em edifícios históricos existentes. O método define requisitos de modelação e inclui a implementação de um algoritmo em Python para realizar o mapeamento do IFC 4x3 para o Input Data File (IDF) do EnergyPlus 24.2.0, garantindo a interoperabilidade. A metodologia é validada através de um estudo de caso real, demonstrando a capacidade de gerar modelos de energia consistentes. A adoção desta abordagem aprimora a precisão e a reprodutibilidade dos fluxos de trabalho BIM-BEM e incentiva a escolha de soluções construtivas mais sustentáveis.

1. Introdução

Na Europa, cerca de 30% do parque edificado é composto por construções históricas, sendo que aproximadamente 75% destas são energeticamente ineficientes [1,2]. O parque edificado existente contribui para cerca de 40% do consumo total de energia da União Europeia, intensificando a dependência energética [3]. Para atingir as metas de descarbonização de 2050, é imperativo melhorar a eficiência destes edifícios através de estratégias de renovação baseadas em dados [4]. Neste contexto, a simulação do desempenho energético de edifícios (BEPS) surge como uma ferramenta essencial para análises não destrutivas e tomadas de decisão informadas [5], sendo o EnergyPlus amplamente utilizado devido à sua natureza de código aberto e conformidade com normas internacionais [6, 7].

A integração da metodologia BIM neste âmbito visa a criação de modelos de simulação energética (BIM-to-BEM) através de fluxos de trabalho interoperáveis. No entanto, embora o esquema *Industry Foundation Classes* (IFC) forneça uma base neutra para a troca de informações, persistem lacunas na tradução de dados alfanuméricos e geométricos entre o domínio BIM e o domínio BEM (*Building Energy Modeling*) [5,8], resultando frequentemente em intervenções manuais ou no uso de ferramentas intermédias para suprir falhas de exportação [9]. No contexto de edifícios históricos, a viabilidade prática destas rotinas é ainda mais complexa, sendo dificultada pela elevada heterogeneidade dos sistemas construtivos e pelas irregularidades geométricas inerentes ao património [10]. Consequentemente, observa-se que as propostas desenvolvidas até o momento ainda enfrentam barreiras críticas para atingir a escalabilidade e a aplicabilidade necessárias a esse tipo de edificação.

Este artigo detalha uma metodologia escalável para colmatar estas lacunas através de requisitos de modelação e de um algoritmo de mapeamento automatizado. A proposta define critérios para mitigar a perda de informação e minimizar o esforço manual no ambiente de simulação, viabilizando o uso do esquema IFC em contextos de elevada complexidade geométrica e construtiva.

2. Requisitos para Interoperabilidade IFC-EnergyPlus

Estes requisitos foram definidos para responder aos desafios da Simulação de Desempenho Energético de Edifícios (BEPS) em contextos de edificações históricas e estabelecidos em conformidade com os outputs esperados, com foco na avaliação das necessidades de energia útil para manutenção das temperaturas de conforto térmico do edifício, alinhando-se aos objetivos de sustentabilidade promovidos por iniciativas como a *Renovation Wave*.

2.1 Requisitos para o modelo de energia (IDF)

Esta secção estabelece os requisitos técnicos e a estrutura de dados que o modelo de energia deve possuir [11], de acordo com a metodologia proposta neste artigo. O referencial técnico aqui definido fundamenta a posterior especificação dos requisitos do modelo BIM, apresentados na Secção 2.2, assegurando que a informação flua sem perdas entre os domínios. O modelo é descrito por meio do Input Data File (IDF), um ficheiro em formato de texto que detalha sequencialmente diferentes tipos de objeto, categorizados por grupo, em que cada um segue uma ordem rigorosa de campos de entrada que consolidam as informações do modelo.

2.1.1 Caracterização Espacial e Modelação Geométrica

A definição espacial do modelo energético inicia-se pela localização da edificação através do objeto **Site:Location**, onde a latitude, longitude e elevação devem ser informadas para situar o modelo no globo. As coordenadas devem ser especificadas em graus decimais, com os minutos expressos como frações de 60, adotando valores positivos para Norte e Este. O objeto **Building**, por sua vez, identifica o edifício e estabelece os seus parâmetros globais, explicitando a orientação em relação ao Norte verdadeiro através do campo *North Axis*, a ser indicado em graus no sentido horário. Este campo é obrigatório sempre que o objeto *GlobalGeometryRules* utilize coordenadas (*Coordinate System*) do tipo *Relative*, permitindo que as superfícies modeladas num sistema ortogonal sejam rotacionadas para a sua posição geográfica real, garantindo o cálculo correto da incidência solar.

A modelação dos aspetos físicos do edifício representa uma das etapas mais críticas e desafiantes na criação de um modelo de simulação energética. No EnergyPlus, as superfícies definem a geometria de cada zona térmica, caracterizando assim a envolvente de toda a edificação. Cada zona térmica deve apresentar comportamento térmico semelhante e deve ser uma fronteira geometricamente fechada. Estruturalmente, cada objeto do tipo **Zone** pode integrar um ou mais objetos **Space**, que representam as divisões internas e os volumes espaciais. A estas zonas associa-se o objeto *HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem*, um sistema ideal que supre as necessidades de carga térmica para manutenção das temperaturas de conforto no edifício, sendo necessário para o cálculo final de energia útil.

As superfícies são descritas através da posição tridimensional de cada um dos seus vértices, que determina a sua localização e orientação, com base em um sistema de coordenadas cartesianas (X-Este, Y-Norte, Z-Vertical). Esta densidade de informação torna a modelação manual morosa e suscetível a erro, justificando também a necessidade de algoritmos de automatização. Sob estas diretrizes, as superfícies são descritas como planos bidimensionais sem espessura geométrica, embora essa informação seja contabilizada através da associação com os objetos do EnergyPlus que caracterizam as camadas de material e as respetivas construções.

A configuração da geometria é regida pelo objeto *GlobalGeometryRules*. Para garantir a consistência dos algoritmos de extração, a metodologia proposta exige que a posição do vértice inicial (*Starting Vertex Position*) seja configurada como o canto superior esquerdo (*UpperLeftCorner*) e a direção de inserção dos vértices (*Vertex Entry Direction*) siga o sentido anti-horário (*Counterclockwise*).

Além disso, exige-se a modelação através de superfícies detalhadas (*Building Surfaces - Detailed*), ao invés das descrições de superfícies retangulares simples disponíveis no esquema do IDF. Esta escolha é fundamental para garantir a flexibilidade geométrica necessária na representação de edifícios existentes com geometria irregular e complexa.

Neste contexto, os componentes opacos do edifício são então definidos através do objeto **BuildingSurface:Detailed**, o qual requer a atribuição obrigatória de diversos campos como a identificação da zona térmica (*Zone Name*) e do espaço (*Space Name*) a que pertencem, do tipo de superfície (*Surface Type*), abrangendo parede, piso, teto e cobertura, bem como a condição de fronteira (*Outside Boundary Condition*), a identificação do elemento adjacente (*Outside Boundary Condition Object*), quando aplicável, a construção que o caracteriza (*Construction Name*), e a exposição ao sol e ao vento (*Sun Exposure* e *Wind Exposure*).

Finalmente, a caracterização das aberturas é efetuada através do objeto **FenestrationSurface:Detailed**, no qual a metodologia contempla a definição de portas, janelas ou portas envidraçadas (*Surface Type*), integrando a condição de fronteira (*Outside Boundary*

Condition Object) e a respetiva construção (*Construction Name*). Adicionalmente, estas subsuperfícies devem possuir estritamente três ou quatro vértices e estar vinculadas ao respetivo objeto *BuildingSurface:Detailed*, assegurando a herança das propriedades da superfície hospedeira.

2.1.2 Caracterização Construtiva

A heterogeneidade inerente aos edifícios históricos exige uma representação precisa das propriedades dos componentes construtivos e das camadas que os compõem. A modelação destes sistemas multicamada é definida pelo objeto **Construction**, aplicável a paredes, coberturas, pavimentos, janelas e portas. As camadas são organizadas da face externa para a interna [12], sendo a primeira (*Outside Layer*) definida como a face mais afastada do ar da zona térmica que engloba a superfície, devendo incluir exclusivamente camadas termicamente relevantes, não devendo ser consideradas resistências superficiais, películas de ar, nem camadas extremamente finas ou altamente condutivas, como tintas ou membranas (ver Figura 1).

Além disso, importa destacar a exigência técnica na modelação de superfícies entre zonas. Para estes elementos, o motor de simulação exige a definição das camadas de materiais em ordem espelhada (“*mirroring*”), resultando na criação de dois objetos *Construction* simétricos para cada uma das superfícies adjacentes (Figura 1). Estes objetos constarão como *Construction Name* para cada uma das duas superfícies adjacentes, as quais devem estar identificadas reciprocamente no campo *Outside Boundary Condition Object* para garantir a consistência física do balanço térmico.

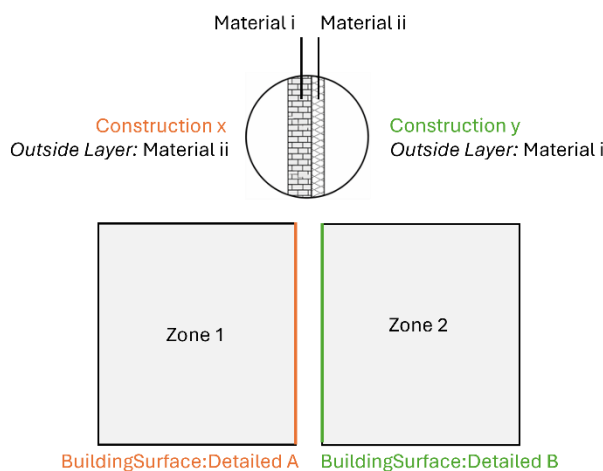


Figura 1: Regra de espelhamento das superfícies e construções (“*mirroring*”)

As propriedades de cada camada devem ser definidas através de objetos de material compatíveis com o nível de informação disponível. Para elementos opacos com massa térmica relevante, utiliza-se o objeto **Material**, sendo o **Material:NoMass** adotado em caso contrário ou perante a indisponibilidade de propriedades térmicas integrais. Para sistemas envidraçados, deve ser utilizado o objeto **WindowMaterial:SimpleGlazingSystem**, permitindo a representação do desempenho térmico através de parâmetros globais.

Visto que o motor de simulação admite apenas um valor único por parâmetro de entrada para cada superfície, qualquer heterogeneidade no elemento físico exige a sua subdivisão (“*splitting*”). Este processo garante a criação de um objeto para cada conjunto de dados. Tal situação ocorre, por exemplo, em paredes que apresentem trechos com diferentes composições

de materiais, cenário frequente na tipologia de edifícios em análise. Nestes casos, a metodologia decompõe uma única superfície física em várias superfícies digitais independentes, para que cada uma possa ser vinculada ao objeto *Construction* correspondente.

2.2 Requisitos para o modelo BIM (IFC)

A especificação dos requisitos para o modelo BIM fundamentou-se na identificação da informação necessária à geração do modelo de energia, conforme Secção 2.1, em conformidade com o conceito de Level of Information Need (EN ISO 7817-1:2024). Para tal, a estruturação do modelo baseia-se no IFC4x3, estabelecendo-se a caracterização espacial e decomposição da geometria, o que compreende a identificação dos componentes da edificação e a definição das respetivas informações geométricas, bem como a inclusão dos dados alfanuméricos.

2.2.1 Caracterização Espacial e Modelação Geométrica

O posicionamento global do projeto é caracterizado via *IfcSite* e *IfcMapConversion*, os quais especificam a localização precisa do modelo, alimentando diretamente os campos de coordenadas, elevação e orientação em relação ao norte verdadeiro (Secção 2.1.1). Ao nível global, é atribuída uma designação ao *IfcBuilding* e à respetiva localização, o que constitui uma integração da informação georreferenciada proveniente do “*IfcSite*” para assegurar a consistência do modelo no motor de simulação.

Para decomposição do modelo, a classe *IfcBuildingElement* e as suas subclasses relevantes (*IfcWall*, *IfcSlab*, *IfcRoof*, *IfcWindow*, *IfcDoor*, etc.) são utilizadas para representar os elementos do edifício que integram o modelo de energia, fornecendo a base para a criação dos objetos *BuildingSurface:Detailed* e *FenestrationSurface:Detailed* no IDF. Partindo do esquema IFC, os elementos verticais opacos são modelados como *IfcWall*, ao passo que os elementos horizontais são mapeados através da classe *IfcSlab*, sendo esta última aplicada tanto a pisos como a tetos na estrutura do “IDF”. Adicionalmente, as coberturas inclinadas são representadas via *IfcRoof*. Elementos de abertura, tais como *IfcDoor* e *IfcWindow*, são igualmente incorporados, permitindo a distinção entre componentes opacos e transparentes e a caracterização dos seus subcomponentes, tais como caixilharia e vidro, cada qual associado aos respetivos materiais.

Os requisitos geométricos são aplicados tanto aos objetos físicos como aos *IfcSpace*, exigindo-se uma representação tridimensional (3D). No âmbito do esquema IFC, a representação “Brep” revela-se preferível, uma vez que codifica o sólido através da sua fronteira topológica (faces, arestas e vértices) em conjunto com definições analíticas de superfícies e curvas. Contudo, na prática, observa-se que as ferramentas proprietárias BIM impõem frequentemente restrições na gestão da representação geométrica, dado que estas dependem de kernels específicos posteriormente traduzidos para IFC. Por conseguinte, os requisitos de modelação estipulam apenas a natureza tridimensional da geometria, conferindo à ferramenta a flexibilidade necessária para explorar, reconstruir e transformar automaticamente os elementos. Complementarmente, exige-se a exportação da *IfcBoundingBox*, um dado preparatório para a realização de diversos passos a serem implementados na Secção 3.

Concluída a definição da matriz geométrica, estabelecem-se as entidades *IfcSpace* para cada compartimento do modelo, originando relações de *IfcRelSpaceBoundary* de segundo nível, procedimento fundamental para assegurar o mapeamento rigoroso das superfícies e a correta identificação das condições de fronteira. Neste contexto, as entidades *IfcZone* são utilizadas para o agrupamento destes compartimentos em zonas térmicas.

2.2.2 Dados Alfanuméricos

No âmbito da metodologia proposta, os dados alfanuméricos fornecem os dados complementares necessários à definição de elementos, propriedades de materiais e zonas térmicas. No esquema IFC, esta informação é habitualmente modelada através da classe *IfcProperty*, sendo as propriedades organizadas em contentores *IfcPropertySet* e vinculadas aos objetos via *IfcRelDefinesByProperties*.

Importa referir que um *IfcPropertySet* e as respetivas propriedades podem ser vinculados tanto à instância do objeto (como *IfcWall*) como ao respetivo *IfcTypeObject*, que consiste num recurso reutilizável que define atributos padrão partilhados por múltiplas instâncias. No esquema IFC, as propriedades definidas ao nível da instância sobrepõem-se às do tipo, permitindo que a informação seja associada ao objeto e à sua tipologia. Esta versatilidade confere a flexibilidade necessária para representar a heterogeneidade construtiva característica de edifícios históricos, alinhando-se aos requisitos de modelação detalhados na secção 2.1.

Ao nível espacial, o preenchimento da propriedade *Pset_SpaceHVACDesign.AirConditioning* permite distinguir ambientes climatizados (*conditioned*) de não climatizados (*unconditioned*), assegurando pressupostos corretos de modelação de AVAC (Secção 2.1.1).

A caracterização dos materiais constitui um aspeto fundamental da estruturação do modelo, dada a necessidade de representar a natureza estratificada da maioria das instâncias de *IfcBuildingElement*. No âmbito do IFC, os materiais são definidos como classes de recursos vinculadas aos elementos via *IfcRelAssociatesMaterial*. A classe *IfcMaterial* pode representar um material isolado ou uma composição estratificada via *IfcMaterialLayerSet*, que pode ser articulada com *IfcMaterialLayerSetUsage* para a definição de espessuras, orientações e desvios (*offsets*). Adicionalmente, o esquema permite atribuições baseadas em perfis através de *IfcMaterialProfileSet* ou a definição de materiais multicomponentes via *IfcMaterialConstituentSet*. No caso da modelação de paredes, a distinção inequívoca entre as faces interior e exterior assume um papel crítico na modelação BIM, sendo o requisito essencial para viabilizar a regra de espelhamento de camadas (“mirroring”) discutida na Secção 2.1.2.

No que concerne aos elementos opacos, a definição de *IfcMaterial* exige a inclusão da condutividade térmica, densidade e calor específico, caracterizando o comportamento térmico requerido pelos objetos *Material* no arquivo IDF (Figura 2). Paralelamente, as entidades *IfcDoor* e *IfcWindow* incorporam propriedades de desempenho como a transmitância térmica, o fator solar SHGC e a transmitância da luz visível. Estas propriedades são fundamentais para a definição do objeto *WindowMaterial:SimpleGlazingSystem*; já para o objeto *Material:NoMass* (aplicável a portas opacas), apenas a transmitância térmica é utilizada.

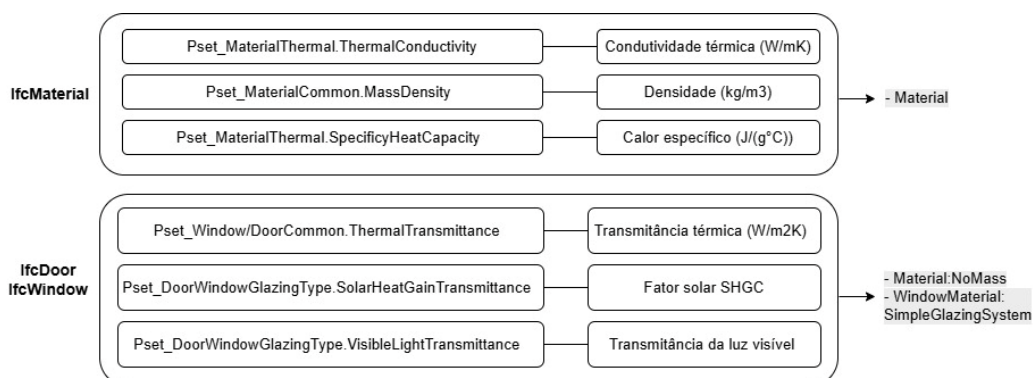


Figura 2: Propriedades térmicas no IFC por tipo de *IfcBuildingElement*

Por outro lado, grandezas como rugosidade e absorvância, necessárias aos materiais opacos, não possuem mapeamento direto no esquema IFC. Portanto, recomenda-se para trabalhos futuros a criação de um dicionário bsDD (*buildingSMART Data Dictionary*), visando garantir a padronização e a integridade na troca de informações.

3. Estratégia de mapeamento IFC→IDF

Para garantir a interoperabilidade semântica entre o esquema IFC e o IDF, foi desenvolvido um algoritmo baseado em Python, combinando as bibliotecas *IfcOpenShell* e *OpenCascade* para o processamento de ficheiros IFC com a biblioteca *Eppy* para a gestão dos ficheiros de entrada do *EnergyPlus*. A Figura 3 ilustra o fluxo de trabalho proposto, o qual se organiza em duas etapas principais.

A primeira etapa, processamento do modelo IFC, foca-se na extração e preparação de toda a informação necessária do modelo BIM para garantir o alinhamento com os requisitos do modelo de energia. Esta fase inicia-se com a recolha de informações essenciais do contexto geográfico, tais como latitude, longitude, elevação e orientação, que serão posteriormente mapeadas para os objetos *Site:Location* e *Building* no *EnergyPlus* (subpasso 1). Seguidamente, o fluxo de trabalho identifica os compartimentos internos e as respetivas adjacências, gerando a geometria sólida correspondente e organizando estes em zonas térmicas. Simultaneamente, recolhe informação geométrica e semântica sobre superfícies e condições de fronteira, que será traduzida nos objetos *Space*, *Zone*, *HVACTemplate* e *BuildingSurface:Detailed* no modelo IDF (subpasso 2).

A parte seguinte da primeira etapa aborda as aberturas, onde as geometrias de janelas e portas, juntamente com as suas posições, são extraídas e vinculadas às superfícies envolventes (subpasso 3), permitindo que sejam representadas como objetos *FenestrationSurface:Detailed*. Finalmente, o fluxo de trabalho reúne todos os dados de materiais relevantes, incluindo propriedades termofísicas e a ordem das camadas, preparando esta informação para o mapeamento direto para *Material*, *Material:NoMass*, *WindowMaterial:SimpleGlazingSystem* e definições de construção (*Construction*) no *EnergyPlus* (subetapa 4). Todos os dados gerados durante esta fase de processamento IFC são armazenados em bases de dados JSON dedicadas, que fornecem uma representação estruturada intermédia.

A segunda etapa, criação do modelo IDF, utiliza estas bases de dados JSON como entrada para gerar automaticamente o ficheiro IDF do *EnergyPlus* através da biblioteca *Eppy*. Neste passo, os dados do local, compartimentos internos, superfícies, aberturas e materiais extraídos do modelo IFC são instanciados sistematicamente como objetos do *EnergyPlus*. Assim, o método ilustrado na Figura 3 oferece uma *pipeline* automatizada de IFC para IDF, facilitando a interoperabilidade semântica e assegurando a consistência entre os ambientes de modelação BIM e as simulações energéticas do *EnergyPlus*.

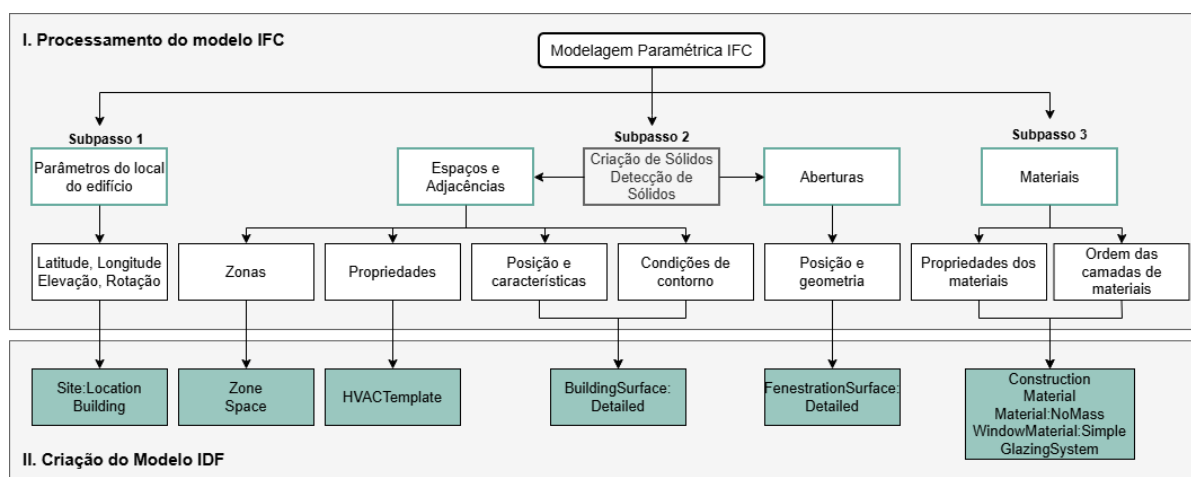


Figura 3: Estrutura lógica do algoritmo para mapeamento BIM-BEM

4. Aplicação Prática

A aplicação prática do algoritmo foi realizada no estudo de caso real da Villa Gazzotti (Vicenza, Itália), um exemplar do século XVI caracterizado principalmente por estruturas de alvenaria e aberturas em sistemas de madeira. O edifício foi modelado no Revit (v. 25.4.0.32), e o núcleo da implementação residuiu na extração e conversão de dados via IFC4x3 (nível *Complex*), repositório central de informações para a transição ao motor de cálculo do EnergyPlus. A exportação priorizou a preservação das coordenadas de origem interna, garantindo a integridade dos dados espaciais que alimentaram a ferramenta de conversão para a geração do ficheiro IDF. A validação focou-se no apartamento oeste, destinado à reabilitação habitacional, onde os compartimentos internos foram modelados como *Space* pertencentes a esta mesma *Zone*, mapeando as demais como zonas não condicionadas. A eficácia deste fluxo foi confirmada pela concordância total de volumes e áreas em todos os casos analisados, dados cruciais para a precisão do desempenho energético, e pela correta interoperabilidade de elementos como aberturas e coberturas inclinadas, assegurando a integridade geométrica (Figura 4).



Figura 4: Modelo IFC (BIMVision) e Modelo IDF (OpenStudio) da Villa Gazzotti

Um dos desafios centrais superados por este fluxo de trabalho foi a discrepância recorrente entre a representação física no BIM e a necessidade de superfícies analíticas discretas para que a simulação energética ocorresse sem erros, seguindo as regras do IDF, diminuindo a intervenção manual, o tempo de modelação e a possibilidade de erros. O desafio da heterogeneidade construtiva e geometria irregular da Villa foi solucionado através da subdivisão automática das superfícies (“*splitting*”) e da automatização de objetos via regra de espelhamento (“*mirroring*”). A Figura 5 ilustra este procedimento em uma parede divisória: a parede identificada em azul foi replicada (em verde) e ambas referenciam-se mutuamente no

campo *Outside Boundary Condition Object*, conforme as regras de modelação apresentadas na Secção 2. A partir da construção “W85INT”, o algoritmo gerou a versão invertida “W85INTinv” (em vermelho). Como pode ser observado na imagem, os parâmetros destacados em amarelo nos objetos *Construction* demonstram a inversão das camadas de materiais, garantindo que a sequência esteja correta em relação à zona térmica em que cada superfície está presente. No domínio alfanumérico, as propriedades térmicas também foram traduzidas corretamente, mitigando erros de balanço térmico por identificação errônea de atributos.

BUILDINGSURFACE:DETAILED,		BUILDINGSURFACE:DETAILED,	
Space7 Face 3 Sub 0,	!- Name	Space9 Face 1 Sub 0,	!- Name
Wall,	!- Surface Type	Wall,	!- Surface Type
W85INTinv,	!- Construction Name	W85INT,	!- Construction Name
NC1B,	!- Zone Name	NC3E,	!- Zone Name
Space7,	!- Space Name	Space9,	!- Space Name
Surface,	!- Outside Boundary Condition	Surface,	!- Outside Boundary Condition
Space9 Face 1 Sub 0,	!- Outside Boundary Condition Object	Space7 Face 3 Sub 0,	!- Outside Boundary Condition Object
NoSun,	!- Sun Exposure	NoSun,	!- Sun Exposure

CONSTRUCTION,		CONSTRUCTION,	
W85INTinv,	!- Name	W85INT,	!- Name
Plasterinterior,	!- Outside Layer	Brickstones85,	!- Outside Layer
Brickstones85;	!- Layer 2	Plasterinterior;	!- Layer 2

Figura 5: *Printscreen* do IDF simulado (Villa Gazzotti)

5. Conclusão

Este trabalho propõe uma metodologia BIM-to-BEM escalável para edifícios históricos, otimizando a interoperabilidade entre o esquema IFC e o EnergyPlus. Através de regras de modelação, mapeamento entre os domínios e um algoritmo em Python, o fluxo automatiza a extração de dados termofísicos, superando a complexidade geométrica e a heterogeneidade construtiva inerentes a esse tipo de edifício. No entanto, ainda subsistem algumas limitações na gestão de geometrias curvas, como abóbadas e arcos, que serão abordadas em desenvolvimentos futuros. O foco na criação de superfícies analíticas, usando principalmente os métodos de “*splitting*” e “*mirroring*”, para atender às regras do IDF, minimiza intervenções manuais e assegura a precisão do balanço térmico. A aplicação à Villa Gazzotti (Itália) validou a redução de erros de simulação e a fidelidade estratigráfica do modelo. Embora parâmetros como rugosidade e absorvância exijam desenvolvimentos futuros via *buildingSMART Data Dictionary* (bsDD), o uso de bases JSON garante a transparência do processo. Em suma, a metodologia agiliza o BPS em fases iniciais, fundamentando decisões que conciliam a preservação patrimonial com as metas europeias de descarbonização.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo PRR (Plano de Recuperação e Resiliência) e pelos Fundos Europeus Next Generation EU, ao abrigo do sistema de incentivos «Agendas para a Inovação Empresarial», no âmbito do projeto “R2U Technologies|modular systems”, com a referência C644876810-00000019. Este trabalho foi também apoiado pela FCT/MCTES no âmbito da Unidade de I&D Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Estruturas de Engenharia (ISISE), com as referências UID/4029/2025 (<https://doi.org/10.54499/UID/04029/2025>) e UID/PRR/04029/2025 (<https://doi.org/10.54499/UID/PRR/04029/2025>), e no âmbito do Laboratório Associado Produção Avançada e Sistemas Inteligentes ARISE com a referência LA/P/0112/2020. Este trabalho foi também financiado pela FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia, ao abrigo do contrato da bolsa 2025. 01492.BD atribuída ao 1º autor.

Referências

- [1] C. Cornaro, G. Bovesecchi, F. Calcerano, L. Martinelli, e E. Gigliarelli, "An HBIM Integrated Approach Using Non-Destructive Techniques (NDT) to Support Energy and Environmental Improvement of Built Heritage: The Case Study of Palazzo Maffei Borghese in Rome," *Sustainability*, vol. 15, p. 11389, Julho 2023. doi: 10.3390/su151411389.
- [2] Eurostat, "Census Hub HC53," Comissão Europeia, 2011. Disponível em: <https://ec.europa.eu/CensusHub2/query.do?step=selectHyperCube&qhc=false>.
- [3] Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia, "Diretiva (UE) 2024/1275 do Parlamento Europeu e do Conselho de 24 de abril de 2024 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação)," *Jornal Oficial da União Europeia*, 2024. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32024L1275>.
- [4] Joint Research Centre (JRC), "DELIVERING THE EU GREEN DEAL Progress towards targets 2025," Comissão Europeia, 2025. Disponível em: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC140372>.
- [5] E. Gigliarelli, F. Calcerano, F. D'Uffizi, C. Di Biccari, G. Mangialardi, e M. Campari, "From Heritage BIM to BPS, a computational design-based interoperability approach," em *Proceedings of the 16th IBPSA Conference (2019)*, Roma, Itália, 2019, pp. 129-136. doi: 10.26868/25222708.2019.210442.
- [6] E. Verticchio, L. Martinelli, E. Gigliarelli, e F. Calcerano, "Current practices and open issues on the whole-building dynamic simulation of historical buildings: A review of the literature case studies," *Building and Environment*, vol. 258, p. 111621, 2024. doi: 10.1016/j.buildenv.2024.111621.
- [7] U.S. Department of Energy, *EnergyPlus™ Version 24.2.0 Documentation: EnergyPlus Essentials*. Washington, D.C., EUA: U.S. Department of Energy, Outubro 2024.
- [8] F. Calcerano, S. Thravalou, L. Martinelli, K. Alexandrou, G. Artopoulos, e E. Gigliarelli, "Energy and environmental improvement of built heritage: HBIM simulation-based approach applied to nine Mediterranean case-studies," *Building Research & Information*, vol. 52, pp. 225-247, 2024. doi: 10.1080/09613218.2023.2204417.
- [9] J. B. Picott, L. Vieira, M. Coelho, J. Granja, J. C. Matos, e M. Azenha, "Desafios de interoperabilidade entre BIM e BEM," em *4º Congresso Português de Building Information Modelling (ptBIM) (2022)*, Braga, Portugal, 2022, pp. 265-276. doi: 10.21814/uminho.ed.32.22.
- [10] M. Gutland, S. Bucking, e M. Santana Quintero, "Hygrothermal modelling of historic rubble masonry walls: Accounting for geometric and compositional variability," *Journal of Building Engineering*, vol. 48, p. 103929, Março 2022. doi: 10.1016/j.job.2021.103929.
- [11] U.S. Department of Energy, *EnergyPlus™ Version 24.2.0 Documentation: Input Output Reference*. Washington, D.C., EUA: U.S. Department of Energy, Outubro 2024.
- [12] B. Onety, T. Zanni, M. R. Valluzzi, M. Almeida, J. Granja, e M. Azenha, "From BIM to BEM: Decoding IFC Material Layers for Accurate Energy Simulations," em *Proceedings of the 6th International Conference on Civil Engineering Fundamentals and Applications (ICCEFA 2025)*, Barcelona, Espanha, 2025, p. 141. doi: 10.11159/iccefa25.141.