



## **DESAFIOS E POTENCIALIDADES DE ABORDAGENS INTEGRADAS NO CICLO DE VIDA PARA PROJETO DE EDIFICAÇÕES COM FOCO NO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO E NAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

**Maria Andrea Triana (1); Roberto Lamberts (2); Paola Sassi (3)**

- (1) Arquiteta, Doutora pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, andrea@labeee.ufsc.br,  
(2) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil, roberto.lamberts@labeee.ufsc.br,  
Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de  
Eficiência Energética em Edificações, Caixa Postal 476, Florianópolis - SC, 88040-900, Tel.: (48)  
3721-5184  
(3) PhD, Professora da *School of Architecture*, psassi@brookes.ac.uk, *Oxford Brookes University*,  
Headington Campus Gypsy Lane, Oxford, OX3 0BP.

### **RESUMO**

O objetivo geral deste artigo é discutir o uso de abordagens integradas no ciclo de vida tendo como foco o desempenho termoenergético da edificação e as mudanças climáticas, frente às potencialidades e desafios para sua implementação no cenário nacional. Para tanto foi selecionado um projeto representativo de habitação de interesse social considerando as cidades de São Paulo e Salvador. A metodologia proposta para a abordagem integrada incluiu como indicadores de desempenho o consumo energético, custos, emissões de CO<sub>2</sub> e graus-hora de resfriamento e aquecimento, considerando o ciclo de vida da edificação de 50 anos. Foram considerados o cenário climático atual e de mudanças climáticas com uso de simulação termoenergética na fase operacional da edificação. A discussão dos resultados deu ênfase aos desafios e potencialidades encontrados para implementação desse tipo de análise no cenário nacional. Entre os principais desafios encontram-se a carência de dados nacionais com relação aos impactos nos materiais e incertezas associadas a cenários futuros. Os resultados mostrados deixaram em evidência a importância da seleção inicial de materiais nos projetos, considerando seus impactos e o desempenho termoenergético associado na etapa operacional, em especial frente às mudanças climáticas. Igualmente, os resultados contribuem na mudança de paradigmas frente aos critérios estabelecidos nos programas habitacionais.

Palavras-chave: avaliação de ciclo de vida energético, mudanças climáticas, custos no ciclo de vida.

### **ABSTRACT**

The main goal of this paper is to discuss the use of integrated approaches in the life cycle focusing on the thermal and energy performance of the building and climate change, facing the potentialities and challenges for its implementation in the national scenario. For this purpose, a representative project of social housing was selected considering the cities of São Paulo and Salvador. The proposed methodology for the integrated approach included as performance indicators: energy consumption, costs, CO<sub>2</sub> emissions and cooling and heating degree-hours, considering the 50-year life cycle of the building. For the operational phase of the building it was considered the current climate and climate change scenarios with the use of thermal and energy simulation. The discussion of the results emphasized the challenges and potentialities found for the implementation of this type of analysis in the national scenario. Among the main challenges are the lack of national data regarding material impacts and uncertainties associated with future scenarios. The results showed the importance of the initial selection of materials in the projects, considering their impacts and thermal and energy performance associated in the operational phase, especially in face of climate change. Likewise, the results contribute to changes in the established criteria for housing programs.

Key-words: life cycle energy analysis, climate change, life cycle costs.

## 1. INTRODUÇÃO

As habitações de interesse social (HIS) apresentam-se como um dos setores mais relevantes no desenvolvimento do país devido ao alto déficit habitacional, estimado pela Fundação João Pinheiro (2015) em 5,8 milhões de habitações, onde a maior porcentagem do déficit encontra-se na população com renda de até três salários mínimos. Por outro lado, o uso da energia mostra-se como um dos principais temas a serem abordados no panorama atual do setor de habitações do país. Algumas pesquisas têm deixado em evidência a necessidade de melhoria de projetos de HIS (BODACH; HAMHABER, 2010; LINCK; DE ALBERNARD; GRIGOLETTI, 2013; TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2015). Os resultados da avaliação de Triana, Lamberts e Sassi (2015), sugeriram a importância de aprofundar-se no estudo de medidas de eficiência energética no setor. Igualmente mostraram que projetos representativos de habitações de interesse social, elaborados muitas vezes sem diferenças significativas entre as diversas zonas bioclimáticas, apresentaram tendência a um baixo desempenho termoenergético, em especial para habitações nas faixas de menor renda. Dessa forma, é importante estudar mais a fundo o setor com relação ao desempenho termoenergético do que está sendo construído, contudo, numa perspectiva em longo prazo, que esteja em acordo com a longa vida útil e o ciclo de vida das edificações.

O ciclo de vida nas edificações compreende as etapas de manufatura dos materiais, construção, uso, manutenção e final da vida útil. Isso implica análise do desempenho das variáveis e decisões adotadas em função do tempo da vida útil (BAYER; GAMBLE; GENTRY, 2010). Igualmente esse conceito encontra-se ligado intrinsecamente ao de sustentabilidade (CIB; UNEP, 2002). De outro lado, Williams et al. (2012) destacam as variações no clima causadas pelas mudanças climáticas como um fator que pode ter grande influência no desempenho termoenergético da edificação ao longo do tempo.

Assim, considera-se necessárias análises mais holísticas para caracterizar o impacto das habitações que estão sendo construídas e criar base para tomada de decisão nos projetos, com habitações propostas, que considerem o desempenho termoenergético com menor impacto em longo prazo para o país. Abordagens integradas com variáveis de sustentabilidade incluindo o conceito do ciclo de vida nas edificações e foco no uso da energia vêm despertando interesse em pesquisas atuais no contexto internacional. Kloepffer (2008) propôs que a avaliação do ciclo de vida para projeto de um produto deveria ser avaliada considerando a avaliação de sustentabilidade do ciclo de vida, o que inclui avaliações do ponto de vista ambiental, econômico e social. Para as avaliações ambiental e econômica propôs o uso das metodologias já existentes: avaliação do ciclo de vida ambiental (ACV) e custos no ciclo de vida (CCV). No aspecto social, a avaliação não mostra um consenso no âmbito internacional. De forma similar, normas voluntárias como a do Comitê Europeu CEN/TC 350 na abordagem do projeto “Sustentabilidade de trabalhos na construção” buscam o desenvolvimento de métodos que promovam uma avaliação do desempenho ambiental integrado de edifícios. Na mesma linha, Georgiadou, Hacking e Guthrie (2012) propõem que métodos estabelecidos de avaliação energética dos edifícios deveriam incorporar abordagens mais holísticas que mostrem adaptação de edifícios no futuro, o que inclui entre outros aspectos, simulação com clima futuro.

No cenário nacional autores como Kowaltowski e Granja (2011) enfatizaram que uma análise do custo-benefício de produtos de habitações sociais mais eficientes se apresenta como um desafio relevante na atualidade para o país. No entanto, considerando-se o desempenho termoenergético nas edificações e o ciclo de vida na avaliação, observam-se no Brasil pesquisas com foco quase que exclusivamente na questão ambiental e energética não sendo constatadas pesquisas que englobem a edificação integralmente incluindo quesitos que levem em conta o tripé da sustentabilidade e mudanças climáticas. Embora autores como Gomes e Silva (2015) reconheçam que há uma tendência mundial para migrar da avaliação ambiental para uma “avaliação integrada de sustentabilidade” que envolva questões econômicas e sociais.

Nesse sentido foi proposta por Triana Montes (2016) uma abordagem integrada no ciclo de vida com adaptação às mudanças climáticas que considera-se aspectos da sustentabilidade e foco no desempenho termoenergético do edifício, como forma de dar base de como reduzir o uso da energia na edificação, considerando impactos e benefícios em longo prazo; tendo como foco projetos do programa nacional de habitação de interesse social. O estudo buscou a avaliação da incorporação de medidas de eficiência energética em projetos de habitação de interesse social por meio da abordagem integrada. A melhoria do desempenho termoenergético da edificação promove benefícios ambientais e energéticos, com relação ao uso da energia e emissões de CO<sub>2</sub>, considerando-se o comportamento atual e em cenários de clima futuro, como forma de redução do uso previsto do condicionamento ambiental na fase de uso. Contudo é importante conhecer a implicação em termos de energia e emissões de CO<sub>2</sub> incorporadas. O benefício social foi visto considerando o bem-estar do usuário, relacionado ao desempenho na habitação com ventilação natural; e o benefício econômico, em função da redução do consumo energético na operação na edificação, considerando o custo ao longo do ciclo de vida. Este artigo busca trazer a discussão sobre o tema, colocando as

potencialidades e desafios encontrados no estudo focando-se nos indicadores de desempenho proposto na abordagem integrada e a sua aplicação num projeto considerado representativo de HIS. O projeto foi avaliado em duas cidades que mostram uma alta porcentagem de déficit habitacional e apresentam climas diferentes no cenário nacional.

## 2. OBJETIVO

O objetivo geral deste artigo é discutir o uso de abordagens integradas no ciclo de vida tendo como foco o desempenho termoenergético da edificação e o impacto das mudanças climáticas, frente às potencialidades e desafios para sua implementação no cenário nacional.

## 3. MÉTODO

A análise agregou os conceitos de mudanças climáticas, ciclo de vida do edifício e aspectos do tripé da sustentabilidade; tendo como foco o desempenho termoenergético da edificação e a junção de simulação computacional na etapa de operação da edificação. Para mudanças climáticas o enfoque dado incluiu, os parâmetros presentes na integração com a simulação termoenergética. No ciclo de vida das edificações, foram consideradas três fases (pré–uso, uso e pós–uso), tendo o foco maior nas duas primeiras. A fase de uso incluiu questões relacionadas à operação e manutenção da edificação. As etapas associadas a cada fase foram as que mostraram maior relevância para o foco pretendido. Também se manteve um único inventário do ciclo de vida. A abordagem integrada proposta incluiu indicadores relacionados aos aspectos do tripé da sustentabilidade e ao desempenho termoenergético da edificação, e foram escolhidos por serem relevantes para as mudanças climáticas. Dessa forma, a metodologia de avaliação do ciclo de vida energético foi adotada para o aspecto ambiental/energético considerando como indicadores de desempenho somente o consumo energético e as emissões de CO<sub>2</sub> no ciclo de vida. Foi limitado aos dois mencionados por ser realizada uma avaliação do ciclo de vida energético e não uma ACV completa. O indicador de desempenho no aspecto econômico foi o custo no ciclo de vida. De outro lado, foi proposto um indicador que mede o desempenho da edificação com ventilação natural, não implicando impacto nos recursos, meio ambiente ou custo econômico. Para tanto considerou-se os graus-hora de resfriamento e aquecimento como indicador. A escolha dos indicadores de desempenho justifica-se por serem globalmente usados em comparações de edificações. Os indicadores foram calculados levando-se em conta três cenários climáticos: cenário considerado atual (com uso do arquivo TRY disponível no LABEEE (2015)) e dois cenários futuros (2020 e 2050). Os cenários futuros foram obtidos com o uso da ferramenta *CCWorldWeatherGen* considerando o cenário A2 do terceiro relatório do IPCC (JENTSCH et al., 2013). A seguir são mostrados no método o objeto de estudo e as condicionantes colocadas para os indicadores selecionados na abordagem integrada.

### 3.1. Objeto de estudo

A Figura 1 mostra o projeto analisado com volumetria, estrutura considerada, planta e corte. Por outro lado, a Tabela 1 mostra um resumo das características dos componentes do caso analisado em ambas as cidades.

O projeto analisado é considerado representativo de habitação de interesse social e foi definido com base em projetos de companhias de habitação nacionais, cuja metodologia para definição encontra-se descrita em Triana, Lamberts e Sassi (2015). Foram escolhidos para análise somente os materiais pertinentes ao desempenho termoenergético da edificação relacionados à envoltória limitando-se à estrutura, paredes externas e internas, cobertura, piso e esquadrias. Para avaliações relacionadas ao ciclo de vida da edificação, é importante informações com relação aos componentes e materiais usados no projeto, tais como: composição dos componentes da envoltória, quantidade dos materiais usados por componente, desperdício estimado dos materiais; dados de vida útil e dados com relação ao transporte dos materiais.

Para dados de desperdício de materiais, foram considerados os dados da mediana dos indicadores globais de perdas por material com base em Agopyan (1998) e Agopyan et al. (2003). Para os materiais não encontrados nessa referência, foram adotados valores com base em fornecedores e/ou na TCPO (Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos).

Dados com relação à quantidade e composição de materiais foram obtidos do projeto representativo, do SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil) e TCPO nº 14. Para o transporte, foram consideradas as distâncias do fabricante do material até as duas cidades escolhidas, sem considerar o transporte dentro da cadeia. As distâncias foram tomadas com base no diretório E–Construmarket (2016), estimando a mediana de três fabricantes.

Figura 1 - Projeto do caso analisado.

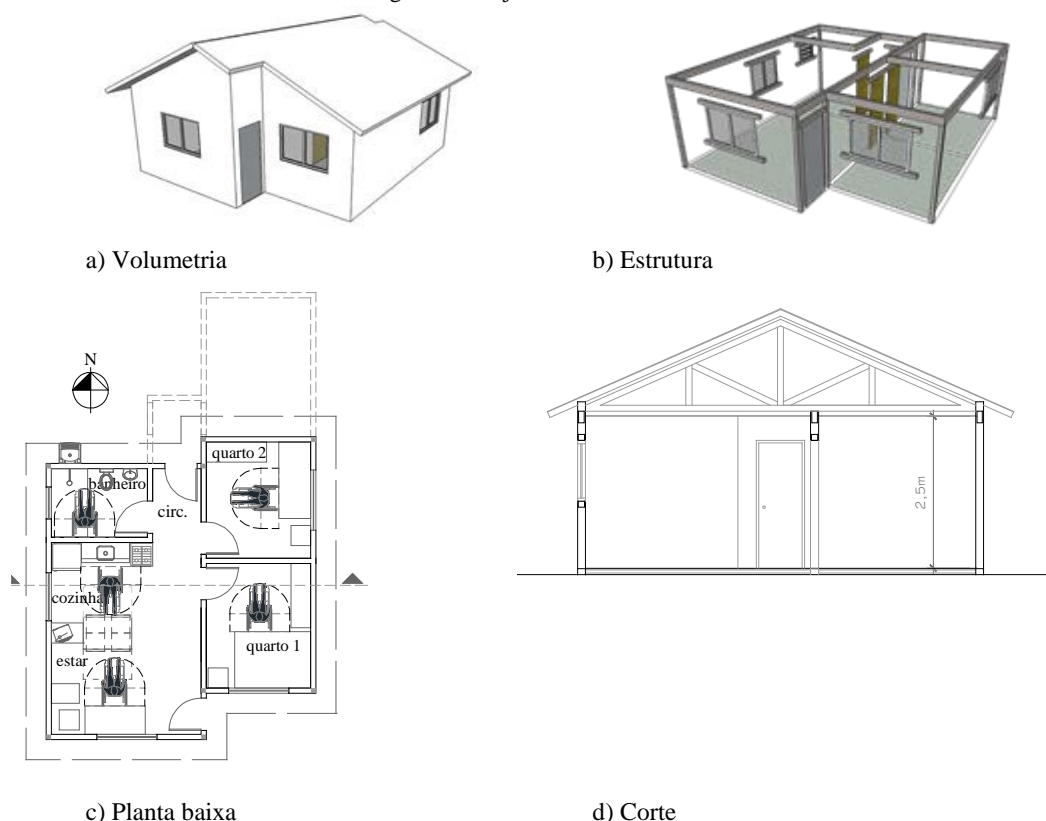


Tabela 1 - Principais dados no projeto analisado para ambas as cidades.

Caso base		
<b>Vida útil</b>	50 anos	
<b>Áreas úteis (m<sup>2</sup>)</b>	Área útil total	39,74 m <sup>2</sup>
	Área total com paredes	44,99 m <sup>2</sup>
	Sala de estar   Cozinha	17,83 m <sup>2</sup>
	Quarto 1	8,07 m <sup>2</sup>
	Quarto 2	7,54 m <sup>2</sup>
	Banheiro	4,09 m <sup>2</sup>
	Espaço de circulação entre quartos	2,21 m <sup>2</sup>
<b>Fases do ciclo de vida</b>	Pré-uso, uso e pós-uso	
<b>Fase de uso</b>	Dados da simulação termoenergética. Inclui consumo para condicionamento ambiental previsto, considerando o clima atual e mudanças climáticas (cenários de 2020 e 2050). Eletrodomésticos e iluminação artificial (fixo em todos os cenários)	
<b>Estrutura</b>	Vergas sobre janelas e portas; contravergas embaixo das janelas - 9x10cm (larg.x alt.) com sobrepasso na média de 20 cm nas laterais	
	Cinta de amarração em concreto sobre as paredes de 9x19cm (larg.x alt.)	
	Pilaretes nos cantos das paredes de 9x9 cm	
	Estrutura em concreto	
<b>Paredes</b>	Bloco cerâmico de 6 furos de 9x14x19cm	
	Reboco 2cm: 0,5cm de chapisco traço 1:3 de cimento:areia + 1,5cm de reboco com traço 1:2:9 cimento:cal:areia	
	Argamassa de assentamento 1,3cm de espessura na horizontal, de 1cm na vertical, traço 1:2:8 cimento:cal:areia	
	Paredes internas e externas iguais. U=2,43 W/m <sup>2</sup> K e C <sub>T</sub> =132 kJ/m <sup>2</sup> K; α par. externas =0,6	
<b>Cobertura</b>	2 águas, telha cerâmica + ático, forro em PVC. Inclinação de 23,6°. Estrutura do telhado em madeira, U =1,75 W/m <sup>2</sup> K, C <sub>T</sub> =21,4 kJ/m <sup>2</sup> K; α =0,6	

Para a vida útil da edificação e manutenção/reposição dos seus componentes, foi considerada a vida

útil de projeto (VUP) com base na NBR 15575 (ABNT, 2013). Para o edifício, foi adotada a vida útil de 50 anos, recomendada para HIS pela NBR 15575. Para os seus principais componentes a vida útil foi estimada também com base na NBR 15575.

### 3.1. Avaliação do ciclo de vida energético (ACVE)

O método de ACVE adotado tomou como base questões relevantes de pesquisas estudadas assim como as normativas ISO 14040 (ABNT, 2009a) e 14044 (ABNT, 2009b). A unidade funcional foi definida como a construção e a ocupação de uma casa de 39,74 m<sup>2</sup> de área útil durante a sua vida (considerando o período de 50 anos) para atendimento a uma família de quatro pessoas. O fluxo de referência foi dado pelos insumos (materiais, energia e transporte) necessários para garantir a função estimada durante o tempo previsto. Foram incluídos três cenários climáticos para avaliação na fase de uso, sendo atual e de mudanças climáticas, considerando os cenários de 2020 e 2050. O cenário de 2020 representa o período de 2011 a 2040 e o cenário de 2050 representa o período de 2041 a 2070. Para o consumo energético do transporte, foi empregado o valor médio de Guimarães et al. (2013) de 0,002044 MJ/kg.km.

A quantidade do material foi determinada em kg. Para isso foi muito importante a densidade de massa aparente adotada do material. Os dados foram baseados na sua grande maioria, na NBR 15220-2. Para os materiais foram buscados dados com relação à energia incorporada e emissões de CO<sub>2</sub>. Foram adotados de preferência, valores de pesquisas brasileiras disponíveis, dando prioridade a: dados mais atuais, que fossem levantamento de dados primários e ficassem perto da média dos valores elencados nas pesquisas nacionais. A Tabela 2 mostra as etapas previstas para a avaliação do ciclo de vida energético.

Tabela 2 – Etapas previstas para a avaliação do ciclo de vida energético.

FASE	ETAPA	
Pré-uso	Energia incorporada (EI) na fabricação dos materiais	Energia incorporada inicial em MJ
	EI no transporte dos materiais até o local	
	EI no desperdício dos materiais	
	EI no transporte do desperdício	
Uso	Consumo estimado para condicionamento ambiental	Energia operacional em MJ
	Consumo outros (eletrodomésticos/iluminação)	
	EI nos materiais para manutenção/reposição	Energia incorporada recorrente em MJ
	EI no transporte dos materiais de manutenção/ reposição	
	EI desperdício dos materiais para manutenção/ reposição	
EI transporte do desperdício dos materiais de manutenção/ reposição		
Pós-uso	Energia para desconstrução do edifício	Energia para desconstrução em MJ

A energia operacional considerou os consumos referentes ao uso de equipamentos, iluminação e condicionamento ambiental previsto para refrigeração e aquecimento, por meio de simulação termoenergética, com avaliação em relação aos cenários climáticos. A simulação considerou a habitação com duas formas de operação: uso de ventilação natural e uso de condicionamento ambiental previsto junto à ventilação natural. Os dados com relação aos equipamentos e iluminação mantiveram-se fixos em todos os cenários. Os dados foram expressos em energia primária. Para as emissões de CO<sub>2</sub> considerada como indicador de impacto ambiental, foi determinada a mesma fronteira de análise e o fator de emissão de 0,156 kgCO<sub>2</sub>/kWh com base no PNE 2030 (BRASIL; MME; EPE 2007). Para as emissões com relação ao transporte rodoviário foi adotada a estimativa do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) de 2013 adotada por Leal Junior et al. (2015) de 0,00011917 kgCO<sub>2</sub>/kg.km.

### 3.1. Avaliação de custos no ciclo de vida

A Tabela 3 apresenta as etapas de avaliação dos custos no ciclo de vida. Para a análise do aspecto econômico foram usados custos de materiais disponibilizados pelo SINAPI. Os custos do transporte foram levantados com base na Associação Nacional do Transporte de Cargas e Logística. Para a etapa de manutenção, foram levados em conta os custos com base no valor presente líquido (VPL). Para o cálculo do VPL, os valores de custo inicial dos materiais foram transformados inicialmente em valor futuro, colocando a inflação e depois descontados a valor presente, empregando a taxa de desconto com base na metodologia abordada por Islam et al. (2015). A inflação foi com base no Índice Nacional de Custos da Construção e a taxa de desconto com base na taxa SELIC. Para a composição do valor final do custo da energia operacional, foram observados valores das concessionárias e o preço médio do kWh por cidade para a tarifa residencial.

Tabela 3 – Fases e etapas da avaliação econômica.

FASE	ETAPA	
Pré-uso	Custo inicial dos materiais da obra	Custo do investimento inicial
	Custo do transporte dos materiais até o local	
	Custo dos materiais de desperdício	
	Custo do transporte do desperdício	
Uso	Custo do consumo previsto para condicionamento ambiental	Custo da energia operacional
	Custo do consumo de energia outros (eletrodomésticos/ iluminação)	
	Custo dos materiais para manutenção/reposição	Custo da manutenção
	Custo do transporte dos materiais de manutenção/reposição	
	Custo do desperdício dos materiais para manutenção/reposição	
	Custo no transporte do desperdício dos materiais de manutenção/ reposição	
Pós-uso	Custo da desconstrução do edifício (demolição + transporte dos materiais de demolição)	Custo da desconstrução

Se faz a ressalva de que os valores considerados para o indicador de custos no ciclo de vida não foram valores absolutos da obra total, senão somente dos componentes da envoltória que estão sendo analisados na metodologia. Igualmente cabe ressaltar, que na energia operacional não entrou o custo com aquecimento de água e cocção.

### 3.1. Indicador de graus-hora para resfriamento e aquecimento

Foi adotado como indicador os graus-hora para resfriamento e aquecimento; este último somente na cidade de São Paulo. Para tanto, foram levados em conta os resultados da simulação computacional, sendo considerado o valor final da habitação para graus-hora de resfriamento e graus-hora de aquecimento, resultado dos valores ponderados por área dos ambientes de permanência prolongada. Para os casos na cidade de São Paulo, os graus-hora de aquecimento foram considerados em valor absoluto e somados aos valores de graus-hora de resfriamento, por conta de se ter um único indicador relacionado à operação da habitação com ventilação natural.

## 4. RESULTADOS

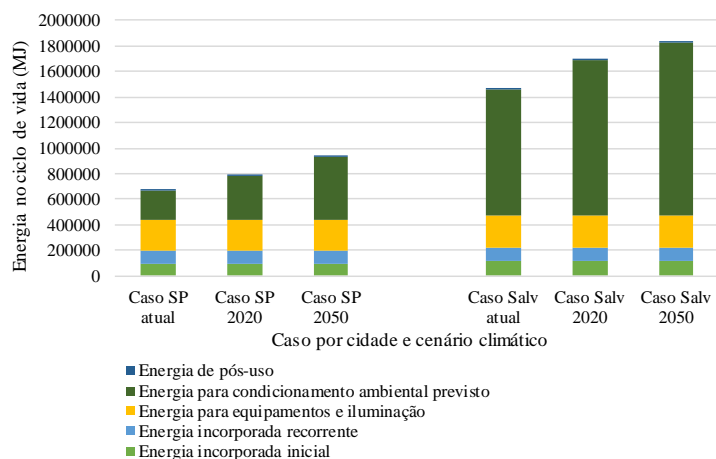
Os resultados são colocados para cada um dos indicadores de desempenho de forma separada considerando o projeto representativo nas duas cidades, sendo discutidos os desafios e benefícios de implementação dos mesmos. A Figura 2 apresenta os resultados para o indicador de consumo energético no ciclo de vida para o caso representativo de habitação de interesse social avaliado em São Paulo e Salvador nos três cenários climáticos.

Os resultados de consumo energético em São Paulo mostraram a energia total no ciclo de vida passando de 677,57 GJ no cenário climático atual para 941,05 GJ no cenário climático de 2050, sem considerar o consumo de aquecimento de água ou cocção. Por  $m^2$ , isso significa valores no cenário climático atual de 2,37 GJ/ $m^2$  na fase de pré-uso (energia incorporada inicial), 2,54 GJ/ $m^2$  para a energia incorporada recorrente ou também chamada de manutenção e 11,89 GJ/ $m^2$  para a energia de operação (que considera AVAC, equipamentos e iluminação). Ou seja, na fase de uso obteve-se um consumo total de 14,44 GJ/ $m^2$  (considerando a energia de manutenção e de operação), enquanto na fase de pós-uso foi de 0,23 GJ/ $m^2$ . Para 2050, a fase de uso ficou em 21,07 GJ/ $m^2$ . A energia incorporada inicial e a de manutenção mostraram parcelas similares, onde a maioria da energia incorporada referiu-se à fabricação e à manutenção dos materiais. Mostrando a importância dos materiais especificados no início e da durabilidade associada a eles.

As análises indicaram a importância do desempenho térmico da edificação no ciclo de vida para ambas as cidades, sendo aumentada sua importância ao considerar-se as mudanças climáticas. Somente no cenário climático atual para a cidade de São Paulo, a energia para equipamentos e iluminação apresentam uma parcela maior do que o consumo energético previsto para condicionamento ambiental.

Para São Paulo e considerando o indicador de consumo energético, a parcela de condicionamento ambiental previsto, passou de representar 34% no ciclo de vida no cenário climático atual a representar 52% no cenário de 2050. Isso mostrou o potencial e a ênfase que deve dar-se aos materiais iniciais especificados no projeto para obter um desempenho térmico adequado no ciclo de vida da edificação.

Figura 2 – Resultados para o indicador de consumo energético no ciclo de vida para o caso em São Paulo e Salvador



Para São Paulo, com relação à energia incorporada por serviço e material, destacaram-se o serviço de alvenaria considerando o tijolo das paredes, tinta e os componentes da argamassa; assim como a cobertura junto à telha cerâmica e o forro, sendo ambas fundamentais para o desempenho térmico da edificação na etapa de operação. Nessa cidade a energia incorporada total (inicial e recorrente) passou de representar 29% do ciclo de vida no cenário climático atual para 21% no cenário de 2050.

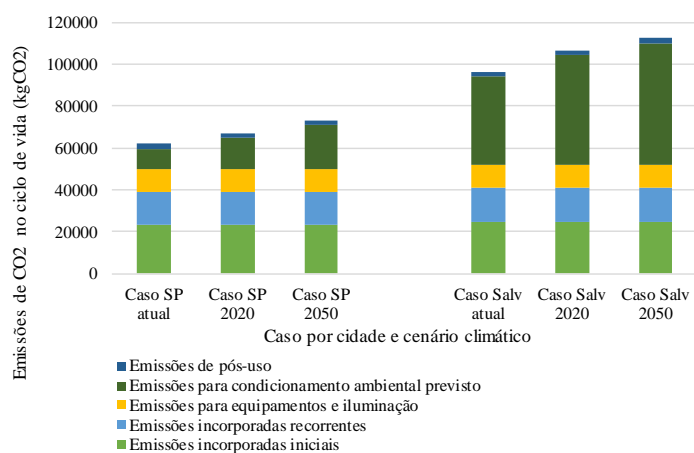
Observaram-se diferenças significativas no ciclo de vida energético para o caso na cidade de São Paulo e Salvador. Em Salvador o transporte total dos materiais na fase de pré-uso obteve 22% do consumo energético, diferente de São Paulo onde foi de 5%. De outro lado a energia operacional representou no cenário climático atual, para Salvador 83,7% do total do ciclo de vida, enquanto para São Paulo foi 69,7% mostrando o impacto de fazer projetos similares em todo o país, prática recorrente entre o setor de habitações de interesse social, em especial de menor renda.

Entre os desafios desta avaliação encontram-se que valores da densidade de massa aparente dos materiais podem alterar os resultados na fase de pré-uso e manutenção, contudo, na maioria das pesquisas publicadas sobre análise de ciclo de vida energético raramente são divulgados nos estudos ou pelos fornecedores. Neste estudo foram adotados valores de densidade de massa aparente com base na NBR 15220-2, sendo quando possível, valores médios entre os limites informados pela norma. Igualmente a falta de base de dados nacionais com relação à impactos de energia incorporada e emissões de CO<sub>2</sub> é um desafio. Optou-se pelo uso de dados nacionais no lugar do uso de bases internacionais por considerar-se mais aproximado da realidade nacional, contudo é necessária uma sistematização e maior levantamento de informações. Na metodologia proposta foi adotado o uso de valores únicos para os impactos associados aos materiais por conta do objetivo proposto, contudo, reconhece-se a importância do uso de intervalos de valores para dados de impacto dos materiais, na medida em que pode ter-se alteração nos resultados. Outra questão relevante que mostrou o estudo é o uso de fatores para conversão quando se trata de cenários climáticos futuros e as incertezas que os mesmos incorporam. Nesta pesquisa foram adotados valores estimados pelo PNE, pois contém em si mesmos uma previsão de comportamento futuro, no entanto, é importante discutir sobre o uso desses fatores e a implicação que tem em análises deste tipo.

A Figura 3 apresenta os resultados para o indicador de emissões de CO<sub>2</sub> no ciclo de vida para o caso em São Paulo e Salvador nos três cenários climáticos avaliados.

As emissões incorporadas na fase de pré-uso para o caso na cidade de São Paulo foram estimadas em 23,27 tCO<sub>2</sub>, das quais 87,72% corresponderam à fabricação dos materiais. Nessa cidade as emissões totais no ciclo de vida mostraram 18% de aumento quando comparado o cenário climático atual com 2050. Para essa cidade, as emissões incorporadas iniciais mantiveram-se em todos os cenários climáticos analisados como a maior parcela no ciclo de vida. Esse resultado demonstra a importância de especificar materiais com menores emissões incorporadas; porém que proporcionem um desempenho térmico adequado e de durabilidade na sua vida útil. Para São Paulo e considerando os diferentes cenários climáticos, as emissões previstas para condicionamento ambiental no ciclo de vida passaram de representar 16% no cenário climático atual para 29% em 2050, colocando-se nesse cenário em um patamar similar à das emissões incorporadas iniciais.

Figura 3 – Resultados para o indicador de emissões de CO<sub>2</sub> no ciclo de vida para o caso em São Paulo e Salvador

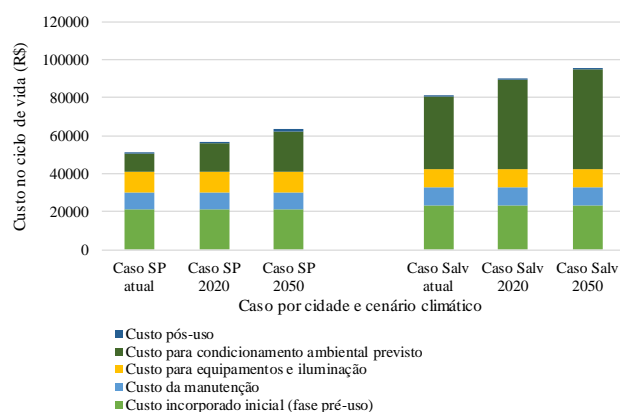


Para o caso na cidade de Salvador, a parcela correspondente ao condicionamento ambiental previsto na vida útil, mostrou-se como a mais significativa em todos os cenários climáticos. Foi observado aumento para o cenário de 2050; passando de representar 44% no cenário climático atual para 52% em 2050. Os resultados com relação a este indicador mostraram também a maior atenção que deve ser dispensada aos componentes da cobertura e alvenaria, por apresentarem a maior emissão incorporada no ciclo de vida em ambos os casos. As emissões de CO<sub>2</sub> estão relacionadas à categoria de impacto de mudanças climáticas em avaliações de ACV/ACVE. No entanto, o impacto no aquecimento global é expresso em kgCO<sub>2</sub>eq, e considera além das emissões de CO<sub>2</sub>, outros gases de efeito estufa. Esse indicador é um dos mais usados nas referências internacionais. Contudo dados nacionais de impacto de materiais geralmente disponibilizam somente impacto com relação às emissões de CO<sub>2</sub>.

De forma geral, na avaliação do ciclo de vida energético a fase de pós-uso é a que apresenta maiores incertezas. A metodologia adotada neste estudo optou por dar maior ênfase às fases de pré-uso e uso da edificação. Contudo, os resultados mostraram que enquanto não seja considerado cenário de reciclagem são essas duas fases as que mostraram maior relevância. Entretanto, considera-se necessário avançar com pesquisas na fase de pós-uso para serem incorporadas de forma mais efetiva em avaliações no ciclo de vida.

A Figura 4 apresenta resultados do indicador de custos no ciclo de vida nos três cenários climáticos.

Figura 4 – Resultados para o indicador de custos no ciclo de vida para o caso em São Paulo e Salvador



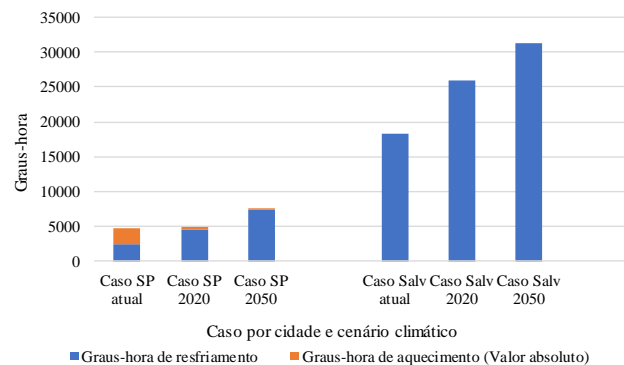
Para o caso na cidade de São Paulo, ao considerar as fases de pré-uso e etapa de manutenção, a cobertura mostrou o maior custo (38%), por conta do custo inicial, enquanto a alvenaria e as esquadrias ficaram com porcentagens similares em 25,9% e 22,3% respectivamente. Para essa cidade foi observado aumento de 22,6% quando comparado o cenário climático atual com o de 2050, por causa do aumento na energia operacional. Em São Paulo a parcela com condicionamento ambiental previsto representou 20% do custo total no ciclo de vida no cenário climático atual, enquanto em 2050 foi 34%, ficando nesse cenário com uma porcentagem igual ao custo na fase de pré-uso. Diferente do observado em São Paulo, o caso em Salvador teve a maior parcela na avaliação de custos no ciclo de vida na etapa de condicionamento ambiental previsto em todos os cenários climáticos avaliados. E o custo incorporado inicial foi maior em Salvador do



que em São Paulo, muito em parte por conta do transporte dos materiais. Para o caso em Salvador, a fase de uso, considerando as etapas de operação e custos recorrentes correspondeu a maior parcela no ciclo de vida. A relevância da fase de uso no setor, reforça a necessidade de mudança de paradigma nos programas nacionais de habitação de interesse social, onde é dada maior importância aos custos iniciais. Dando prioridade à especificação de materiais e componentes que garantam bom desempenho na fase de uso da edificação. Os materiais levantados do SINAPI não deixam explícito a porcentagem do desperdício incorporada neles, o que é um desafio para este tipo de análise onde é necessária essa informação. Igualmente o SINAPI não apresenta todos os materiais ou custos para serviços incluindo alguns serviços de desmontagem. Ainda mais, os valores do SINAPI não são dados em função de algum indicador que mude de forma mensal, o que facilitaria a integração neste tipo de avaliação. De outro lado, a avaliação econômica não considerou o valor residual por não estar sendo considerado o cenário de reciclagem.

A Figura 5 mostra os resultados da simulação termoenergética para a habitação com ventilação natural com o indicador de graus-hora, para as duas cidades e os três cenários climáticos.

Figura 5 – Resultados para o indicador de graus-hora de resfriamento e aquecimento para o caso em São Paulo e Salvador



Para o caso na cidade em São Paulo os resultados mostraram um aumento significativo nos graus-hora de resfriamento nos cenários climáticos futuros, enquanto uma redução drástica dos graus-hora para aquecimento. Para a cidade de Salvador igualmente mostrou-se aumento dos graus-hora para resfriamento nos cenários climáticos de 2020 e 2050.

## 5. CONCLUSÕES

O artigo discutiu o uso de abordagens integradas no ciclo de vida tendo como foco o desempenho termoenergético da edificação e as mudanças climáticas, desde a perspectiva das potencialidades e benefícios frente aos indicadores propostos. Os resultados mostrados deixaram em evidência a importância da seleção inicial de materiais nos projetos, considerando seus impactos associados e o desempenho termoenergético ocasionado na edificação ao longo da sua vida.

Entre os principais desafios observou-se: necessidade de declarações de impactos ambientais e energéticos dos materiais; considerar a incorporação de análise de sensibilidade frente ao uso de valores únicos, incertezas associadas aos fatores de conversão frente às mudanças climáticas, necessidade de pesquisas na fase de pós-uso incorporando reciclagem, carência de referências mais precisas sobre estimativa de vida útil dos materiais e componentes e, maiores informações em referências nacionais que permitam integração entre diversas avaliações. Igualmente, necessidade de dados regionais para análises de clima futuro com previsão de outros cenários do IPCC. Ainda, alguns desafios além dos colocados podem ser colocados para este tipo de abordagens, como: considerar outras variáveis que podem alterar resultados no ciclo de vida das edificações como o comportamento do usuário e integração com projetos em BIM.

Entre as principais potencialidades da abordagem integrada proposta considerou-se deixar em evidência a relevância dos componentes e materiais no ciclo de vida da edificação; as diferenças significativas entre cidades, em especial com relação a valores absolutos no ciclo de vida; assim como ressaltar a importância do peso das etapas no ciclo de vida. Os resultados deixaram em evidência a importância das etapas de fabricação dos materiais e, a etapa de operação frente às mudanças climáticas. Em ambas cidades a etapa de operação teve aumento significativo quando considerado os cenários de clima futuro, por conta da parcela de condicionamento ambiental previsto. Igualmente, considerando o objeto de estudo, análises integradas podem ajudar na mudança de paradigmas frente aos critérios estabelecidos nos

programas habitacionais, onde de forma geral é dada maior importância aos custos iniciais. Assim, observa-se que abordagens integradas podem dar subsídios muito valiosos para tomadas de decisão nos projetos e coloca-se como uma tendência que deveria ser perseguida.

Nos indicadores analisados, o caso na cidade de Salvador teve impacto superior ao caso em São Paulo. Os resultados mostraram a influência das mudanças climáticas no ciclo de vida da edificação e a relevância de serem consideradas em estudos da área. Embora com os desafios presentes para este tipo de avaliações, o artigo deixou em evidência o potencial do uso de abordagens mais holísticas que tenham como foco o desempenho termoenergético da edificação e mudanças climáticas, assim como os desafios que se tem no cenário nacional para avançar nessa área. Dessa forma, abordagens integradas no ciclo de vida mostraram-se como uma ferramenta importante para tomada de decisão nos projetos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. NBR 15575-1. Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 1 : Requisitos gerais Prefácio. 2013.
- ABNT. NBR 15220-2. Norma de desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica , da capacidade térmica , do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. p. 1–21, 2005a.
- ABNT. NBR ISO 14040. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida: Princípios e estrutura. 2009a.
- ABNT. NBR ISO 14044. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida: Requisitos e orientações. 2009b.
- AGOPYAN, V.; SOUZA, U.E.L. DE; PALIARI, J. C.; ANDRADE, A. C. DE. Alternativas para Redução do Desperdício de Materiais nos Canteiros de Obra. In: CARLOS TORRES FORMOSO; INO, A.(Eds.). Coletânea Habitar.Inovação, Gestão da Qualidade e Produtividade e Disseminação do Conhecimento na Construção Habitacional. Porto Alegre: ANTAC, 2003.
- AGOPYAN, V. ET AL. Alternativas para a redução de desperdício de materiais nos canteiros de obras. Relatório Final. PCC-USP/FINEP/ITQC, 5 volumes. 1998.
- BAYER, C.; GAMBLE, M.; GENTRY, R. AIA Guide to Building Life Cycle Assessment in Practice. Disponível em: <<http://www.aia.org/aiaucmp/groups/aia/documents/pdf/aiab082942.pdf>>. Washington: 2010.
- BRASIL; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Plano Nacional de Energia 2030: Projeções. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/PNE/20080512\\_2.pdf](http://www.epe.gov.br/PNE/20080512_2.pdf)>. 2007
- BODACH, S.; HAMHABER, J. Energy efficiency in social housing: Opportunities and barriers from a case study in Brazil. Energy Policy, v. 38, n. 12, p. 7898–7910, dez. 2010.
- CEN. CEN/TC 350 Sustainability of construction works. 2016.
- CIB; UNEP-IETC. Agenda 21 for sustainable construction in developing countries.. Disponível em: <<http://cibworld.xs4all.nl/dl/publications/Agenda21Book.pdf>>. CSIR Building and Construction Technology, 2002.
- E-CONSTRUMARKET. E-Construmarket. Site institucional. <<http://www.e-construmarket.com.br>>. Acesso em: 7 jan. 2016.
- FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. Deficit habitacional no Brasil 2013: resultados preliminares nota técnica. Belo Horizonte, 2015.
- GEORGIADOU, M. C.; HACKING, T.; GUTHRIE, P. A conceptual framework for future-proofing the energy performance of buildings. Energy Policy, v. 47, p. 145–155, ago.2012.
- GOMES, V.; SILVA, M. G. DA. Seleção de materiais e edifícios de alto desempenho ambiental. In: GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. (Eds.). Edifício Ambiental. São Paulo: Oficina de textos, 2015.
- GUIMARÃES, V. DE A. et al. Análise da evolução da eficiência energética no setor de transporte brasileiro. XXVII ANPET - Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. Disponível em: <[http://www.anpet.org.br/ssat/interface/content/autor/trabalhos/publicacao/2013/431\\_AC.pdf](http://www.anpet.org.br/ssat/interface/content/autor/trabalhos/publicacao/2013/431_AC.pdf)>. Anais...Belém, PA: 2013.
- ISLAM, H. et al. Life cycle assessment and life cycle cost implications of wall assemblages designs. Energy and Buildings, v. 104, p. 250–263, 2015.
- JENTSCH, M. F. et al. Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates. Renewable Energy, v. 55, p. 514–524, jul. 2013.
- KLOEPFFER, W. Life cycle sustainability assessment of products, International Journal of Life Cycle Assessment, v.13, n.2, p.89–95, 2008.
- KOWALTOWSKI, D. C. C. K.; GRANJA, A. D. The concept of desired value as a stimulus for change in social housing in Brazil. Habitat International, v. 35, n. 3, p. 435–446, jul. 2011.
- LABEEE. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Universidade Federal de Santa Catarina. Site institucional. Acesso em: 20 nov.2015.
- LEAL JUNIOR, I. C. et al. Análise da matriz de transporte brasileira: Consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub>. Revista UNIABEU, v. 8, n. 18, p. 49–64, 2015.
- LINCK, G. I.; DE ALBERNARD, R. S.; GRIGOLETTI, G. DE C. Avaliação do conforto térmico de habitações de interesse social da cidade de Santa Maria, RS , a partir da opinião dos usuários. XII ENCAC/ VIII ELACAC. Anais...Brasília: 2013
- TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. Energy Policy, v. 87, n. December 2014, p. 524–541, 2015.
- TRIANA MONTES, M.A. Abordagem integrada no ciclo de vida de habitação de interesse social considerando mudanças climáticas. Tese doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2016. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/node/705>>.
- WILLIAMS, D.; ELGHALIA, L.; WHEELER, R.; FRANCE, C. Climate change influence on building lifecycle greenhouse gas emissions: Case study of a UK mixed-use development. Energy and Buildings, v. 48, p. 112–126, maio 2012.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico–Brasil e da Capes - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.