

# ANÁLISE DE INCERTEZA DE PARÂMETROS COM BASE EM PROCESSOS CRÍTICOS EM AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EDIFICAÇÕES

*CRITICAL PROCESSES-BASED PARAMETER UNCERTAINTY ANALYSIS IN WHOLE BUILDING LIFE CYCLE ASSESSMENTS*

 Arthur Gusson Baiochi<sup>1</sup>

 Vanessa Gomes da Silva <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, a192223@dac.unicamp.br

<sup>2</sup> Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, vangomes@unicamp.br

## Resumo

Apesar de inerentes à avaliação do ciclo de vida (ACV), incertezas são raramente declaradas explicitamente, prevalecendo a comunicação determinística de resultados. Quando utilizados métodos probabilísticos para análises de incerteza, predomina a simulação de Monte Carlo. Como tal simulação demanda muitas informações de entrada, priorizar a análise de processos críticos torna-se particularmente relevante para avaliações envolvendo um número elevado de processos, como as de edificações completas (ACVed). Como prova de conceito, desenvolvemos um protocolo e ilustramos sua aplicação a um caso de edificação inserida em um contexto de escassez de dados de inventário, tanto de primeiro quanto de segundo plano. O protocolo compõe-se de quatro etapas: análise de contribuição; análise semiquantitativa por meio da matriz *Pedigree*; análise quantitativa através da simulação de Monte Carlo; e visualização dos resultados em um sistema de categorização de parâmetros. Em geral, a incerteza de parâmetro atrelada aos processos estudados foi elevada, já que diretamente influenciada pela extensão da informação de incerteza fornecida pelas bases de dados, e adaptações ou estimativas necessárias. O protocolo permitiu identificar e analisar os processos mais críticos (alta contribuição e alta incerteza, simultaneamente) da ACVed, e mensurar as respectivas incertezas de parâmetro. O emprego da matriz *Pedigree* para caracterizar a qualidade dos dados inviabiliza-se diante do nível de esforço depreendido para uma alteração apenas sutil do perfil de incertezas. Sugere-se revisar os coeficientes e automatizar o processo de contextualização. O sistema de categorização de parâmetros facilita o diálogo entre analista e projetista, fundamental para tomada de decisão pautada por desempenho ambiental.

Palavras-chave: avaliação do ciclo de vida; edificações; inventário; análise de incertezas; incerteza de parâmetro.

## Abstract

*Uncertainties are inherently present in any life cycle assessment (LCA) but seldom explicitly declared, so deterministic result communication prevails, despite their potential to mislead interpretation. Monte Carlo simulation is the probabilistic method most frequently used for uncertainty analysis. As it involves extensive data amounts, prioritizing critical processes suits particularly the case of evaluations composed of numerous processes, such as those of whole buildings (wbLCA). As a proof of concept, we developed a protocol and illustrated its application to a wbLCA study developed in a - foreground and background - data scarcity context. The four-step protocol comprises contribution analysis to select the higher impact (critical) processes; semi-quantitative analysis through the Pedigree matrix; quantitative analysis with the Monte Carlo simulation; and results visualization using a parameter categorization system. The database processes had high parameter uncertainty, strongly influenced by the extent that such uncertainty is informed within the databases used. The protocol allowed identifying the most critical (high contribution and high uncertainty, simultaneously) processes in the case studied and respective parameter uncertainty estimates. The established factors in the Pedigree matrix are little sensitive to contextual contrasts. Hence, using the matrix for characterizing data quality demands unreasonable intensive work for subtle changes in the uncertainty profile. Thus, we suggest a revision of current coefficients to ensure appropriate data quality loss representation and to automate contextualization routines. The parameter categorization system promotes a dialogue between analysts and designers, fundamental for environmentally sound decision making.*

Keywords: life cycle assessment; buildings; inventory; uncertainty analysis; parameter uncertainty.

### Contribuição dos autores:

AGB: conceituação, curadoria de dados, análise formal, investigação, metodologia, validação, visualização, escrita - rascunho original, escrita - revisão e edição. VGS: conceituação, metodologia, administração de projetos, supervisão, visualização, escrita - rascunho original, escrita - revisão e edição.

Fomento: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico  
Declaração de conflito: nada foi declarado.

### Editor Responsável:

Letícia de Oliveira Neves 

How to cite this article:

BAIOCHI, A. G.; SILVA, V. G. da. Análise de incerteza de parâmetros com base em processos críticos em avaliação do ciclo de vida de edificações. **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 12, p. e021027, 2021. ISSN 1980-6809 DOI: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v12i00.8661478>

Submitted 03.10.2020 – Approved 07.07.2021 – Published 29.09.2021

e021027-1 | **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 12, p. e021027, 2021, ISSN 1980-6809



## Introdução

Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é um método robusto, com alta abrangência e normatizado internacionalmente, utilizado na quantificação de emissões, consumo de matéria prima, depleção de recursos, impactos ambientais e de saúde relacionados a sistemas de produtos ou serviços (EC JRC-IES, 2010). Ao longo da última década, aumentou não só o uso dessa técnica no campo da construção civil – particularmente para edificações (CHAU et al., 2015; RASHID; YUSOFF, 2015), como também o interesse pelo estudo das incertezas envolvidas (HUIJBREGTS et al., 2001; NOSHADRAVAN et al., 2013).

Já é consolidado que apresentar resultados determinísticos para uma ACV superestima sua exatidão e pode enviesar o processo de tomada de decisão (POHL et al., 1996; BJÖRKLUND, 2002; BAEK et al., 2018). Ignorar incertezas fragiliza a interpretação dos resultados da avaliação (SONNEMANN et al., 2003). Numa ACV, as incertezas são, de modo geral, inerentes aos dados (incerteza de parâmetro), aos cenários considerados ou aos modelos utilizados na representação da realidade, sendo que as incertezas de parâmetro parecem ser as mais influentes nos resultados da avaliação (HUIJBREGTS et al., 2003). No entanto, tais análises ainda não se configuram como prática típica.

Quando realizadas, as análises de incertezas de parâmetro tendem a empregar métodos estocásticos, principalmente a simulação de Monte Carlo (LLOYD; RIES, 2007). Tipicamente, assume-se uma distribuição log-normal para todos os parâmetros (WEIDEMA et al., 2013; QIN; SUH, 2017), e utiliza-se as saídas de uma matriz *Pedigree* como dados de entrada para a simulação de Monte Carlo. A matriz *Pedigree* permite converter informações qualitativas de qualidade de dados em valores quantitativos de variância, a partir de 5 indicadores: confiabilidade; completude; e correlação temporal, geográfica e tecnológica (WEIDEMA; WESNAES, 1996).

No entanto, a migração massiva para a análise probabilística de incerteza de todo o inventário torna-se inviável na prática atual de ACV. Obter dados para os inúmeros parâmetros seria muito difícil e demorado – logo, potencialmente caro - e desafiador para a capacidade computacional disponível, como já apontado por Huijbregts et al. (2001), Sonnemann et al. (2003), Citroth, Fleischer e Steinbach (2004), e Noshadran et al. (2013). Perpetua-se, assim, a prática imprópria de se declarar resultados determinísticos.

Diante disso, este trabalho parte da hipótese de que – particularmente para avaliações de escopo complexo e com inúmeros processos a considerar, como as de edificações (ACVed) – é suficiente focar a análise de incerteza nos parâmetros dos processos mais críticos – ou seja, aqueles que combinam alta incerteza e alta contribuição para os impactos – viabilizando uma análise essencial de incerteza de parâmetros do inventário, que equilibra satisfatoriamente volume de trabalho e melhoria na expressão de resultados. Como prova de conceito, desenvolvemos um protocolo e ilustramos sua aplicação a um caso de edificação inserida em um contexto de escassez de dados de primeiro e segundo planos. Nesta situação, a incerteza, que já é elevada, aumenta ainda mais quando a completude da construção do inventário força a combinação de diferentes bases de dados, que nem sempre comunicam as incertezas envolvidas.

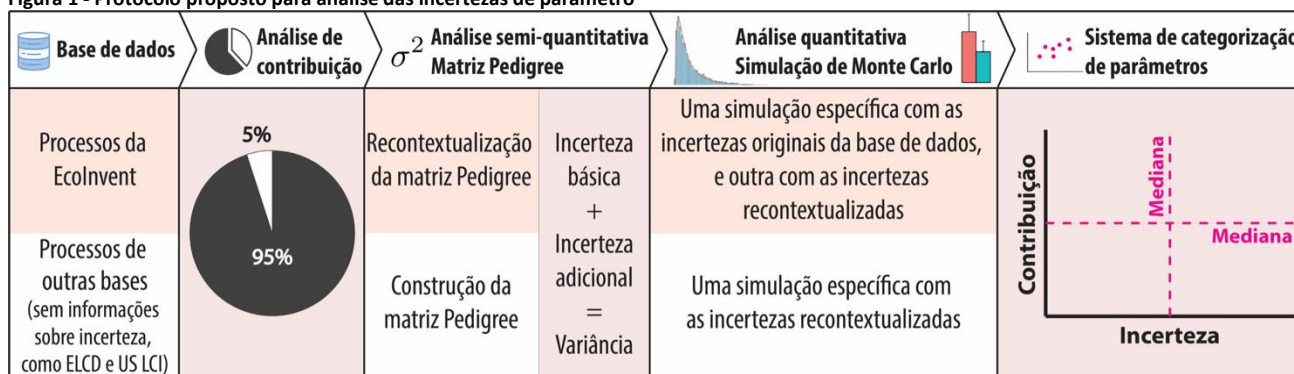
O protocolo combina pontos fortes de ferramentas quantitativas e semiquantitativas, buscando minimizar seus pontos fracos. A matriz *Pedigree*, embora se apresente como uma opção simples para estipular a variância de um dado determinístico, é muito trabalhosa e inviabiliza seu emprego para inventários muito longos. Da mesma forma, a simulação de Monte Carlo é uma ferramenta poderosa para análises probabilísticas, mas demanda capacidade computacional proporcional à complexidade do problema a

resolver. A aplicação da análise de contribuição filtra quais processos serão estudados, otimizando substancialmente o trabalho do analista e o processamento de dados na simulação. As duas etapas anteriores à simulação garantem que ela será conduzida de forma otimizada. Por fim, o sistema de categorização de parâmetros condensa todo o estudo em um gráfico intuitivo, facilitando a interpretação dos resultados pelo tomador de decisão.

### Método

O encaminhamento metodológico testa a proposição de um protocolo de quatro etapas para identificar processos críticos na ACVed e estimar suas incertezas de parâmetro (Figura 1). Por ser onipresente em trabalhos de ACV e apresentar explicitamente informações sobre incertezas, a base de dados Ecoinvent serviu de referência conceitual para o desenho do procedimento para avaliação semiquantitativa proposto: emprego de matriz *Pedigree* para derivação de valores de variância; e obtenção de média e desvio padrão necessários para finalmente rodar a simulação de Monte Carlo e estimar as incertezas de cada processo. Este procedimento está detalhado em Baiochi (2019).

Figura 1 - Protocolo proposto para análise das incertezas de parâmetro



Fonte: os autores.

A prova de conceito feita neste artigo utilizou a plataforma de ACV SimaPro v.8.5.0, e o software Crystal Ball versão 11.1.2.3.000 *Fusion Edition*, para a simulação de Monte Carlo para um caso ilustrativo que utilizou diferentes bases de dados na construção do inventário da ACVed. A demonstração ateu-se à categoria de impacto em mudanças climáticas (em massa de emissões de GEE), apontada como aquela mais presente na literatura na revisão sistemática realizada por Baiochi, Guimarães e Gomes (2018). O encaminhamento metodológico proposto é, porém, válido e igualmente aplicável a outras categorias de impacto e outras edificações.

#### Parte I: Proposição do protocolo para estimar incertezas de parâmetro em ACVed

##### Etapas 1: Análise de contribuição para o impacto considerado

Antes de iniciar a condução do protocolo, é importante ter em mente que todo o seu encaminhamento está atrelado à escolha das bases de dados a serem utilizadas, e qual o grau de informação fornecida acerca da incerteza de parâmetro dos fluxos dos processos. Sendo assim, uma etapa preliminar à condução do protocolo é escolher com cautela as bases de dados a serem utilizadas. Se houver informações preliminares de incerteza na base de dados, o caminho é o de contextualização. Se não houver, o caminho é o da construção das informações de incerteza.

Seguindo as diretrizes da norma Europeia BS EN 15978 (CEN, 2011) e da parte B do EeBGuide (GANTNER et al., 2015), estipulou-se uma regra de corte determinando que

apenas prosseguirão para as etapas seguintes de análise os materiais/processos que, quando somados, configurarem contribuição  $\geq 95\%$  na categoria de impacto considerada.

Este trabalho não abrange as incertezas de cenário ou de modelo. Como as incertezas de parâmetro concentram-se nos dados do inventário (HUIJBREGTS, 1998), mantém-se o foco nos processos do berço ao portão dos produtos de construção – o estágio de produto (A1-A3) do ciclo de vida da edificação, ou seja, da extração de matéria prima até o ponto em que o produto está pronto para sair da indústria em direção à obra.

### *Etapa 2: Avaliação semiquantitativa utilizando matriz Pedigree*

Os dados de incerteza básica e da matriz *Pedigree* de cada parâmetro podem ser coletados das bases de dados que os declarem. Este processo é muito facilitado se tais bases estiverem incluídas em plataformas de ACV, como o SimaPro. No protocolo, para todos os parâmetros (de todos os processos que passaram pela regra de corte da etapa 1, ou seja: aqueles com maior contribuição para o impacto), a matriz *Pedigree* é corrigida para um contexto diferente do seu original, principalmente pela adequação dos fatores de correlação geográfica e temporal. No caso de processos extraídos de bases de dados que não tragam informações relativas às incertezas, a matriz *Pedigree* pode ser construída a partir do procedimento simplificado sugerido pela EcoInvent (WEIDEMA et al., 2013), que apresenta valores de incerteza pré-estabelecidos, conforme o contexto do estudo.

### *Etapa 3: Simulação de Monte Carlo (MC)*

A simulação de Monte Carlo produz curvas de distribuição probabilística que agregam as incertezas de cada parâmetro dos materiais/processos críticos, e representam a incerteza de parâmetro total envolvida. Nos moldes sugeridos pela EcoInvent, assume-se que as incertezas de cada parâmetro seguem uma distribuição log-normal – aquela na qual o logaritmo dos valores assume uma distribuição normal (WEIDEMA et al., 2013). Para alinhamento com as recomendações e boas práticas da literatura, adotamos 10.000 iterações e intervalo de confiança de 95% para as simulações.

A saída da matriz é parte do processo de cálculo da entrada da simulação MC. Programas para simulação MC usualmente solicitam a média aritmética da distribuição log-normal e o seu desvio padrão para definir o comportamento probabilístico de cada parâmetro. Assim, para realizar simulações MC fora do ambiente do SimaPro, a saída da matriz *Pedigree* (variância do processo) precisa ser trabalhada para determinar o desvio padrão e, indiretamente, a média, necessários como dados de entrada para o *software* externo a utilizar.

Como este procedimento estatístico não é trivial, o sítio internet da base de dados *EcoInvent* disponibiliza um passo-a-passo para converter fluxos determinísticos em distribuições probabilísticas<sup>1</sup> e obter os dados de entrada para a simulação de Monte Carlo: uma planilha Excel que demonstra o procedimento, mas calcula apenas um fluxo por vez. Diante da quantidade de fluxos tipicamente envolvidos nos processos sob estudo em ACVed, utilizar a tabela-modelo diretamente mostra-se inviável. No entanto, as equações da planilha-modelo podem ser extrapoladas.

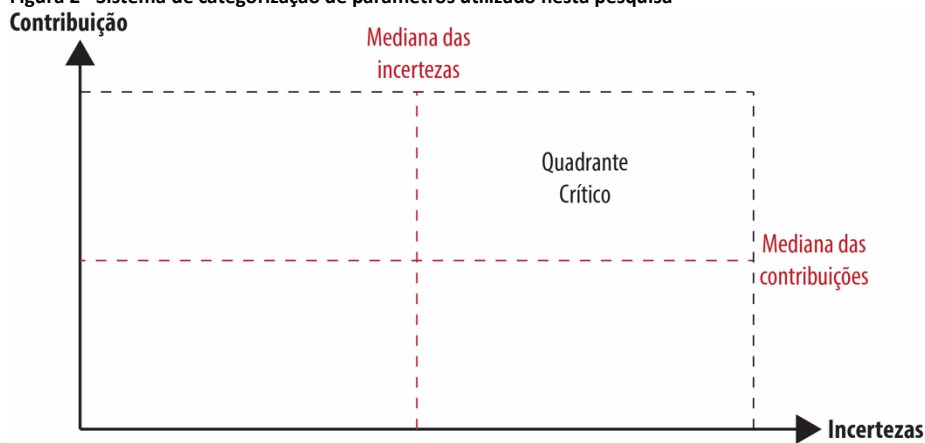
Assim, criou-se uma planilha de cálculo, dividida em tabelas individualizadas por processo, para obtenção dos dados de entrada para o *software Crystal Ball*, que, então, roda simultaneamente todas as simulações programadas na planilha. Além de otimizar o desempenho computacional, o relatório final gerado pelo *software* agrupa todas as simulações programadas dentro do documento do Excel em um histograma único.

#### Etapa 4: Categorização de parâmetros

Com os resultados das simulações de Monte Carlo em mãos, passa-se à categorização de parâmetros (Figura 2), a partir do sistema originalmente proposto por Heijungs (1996), que relaciona a contribuição de cada parâmetro para o resultado final (obtido da análise de contribuição) ao seu coeficiente de variação (resultante da simulação de Monte Carlo). O modelo original dividia o gráfico em apenas dois quadrantes (mais incerto e menos incerto) utilizando a mediana. Esta medida de tendência representa o valor central do conjunto de dados, evitando distorções trazidas por valores extremos.

Em vez do coeficiente de variação, que é uma medida da dispersão, optou-se por utilizar a incerteza total de cada processo – valor absoluto da soma das variações superiores e inferiores, evidenciando o intervalo total de possíveis resultados da ACV. O quadrante crítico reúne os parâmetros que aliam alta contribuição para o impacto analisado com alta incerteza no valor estimado na ACV. Esta informação, clara e direta, realça os processos sobre os quais primordialmente focar e agir, sendo de grande valia para apoiar a tomada de decisão.

Figura 2 - Sistema de categorização de parâmetros utilizado nesta pesquisa



Fonte: os autores.

#### Parte II: Aplicação a caso ilustrativo: minLCee

Para a prova de conceito, o protocolo proposto foi aplicado a um estudo de caso ilustrativo, o ‘*minimum lifecycle embodied energy and emissions*’ (minLCee) Living Lab (Figura 3). O Living Lab foi idealizado a partir de um processo de projeto integrado para a Universidade de Campinas, incorporando estratégias economizadoras de energia elétrica, otimização do consumo de recursos, tecnologias de reuso de água e de energia, sistema de ar condicionado energeticamente eficiente, monitoramento online do consumo de recursos e do uso interno do edifício, telhado e fachadas verdes, dentre outras práticas ambientalmente corretas.

O edifício foi projetado em estrutura metálica, possuindo uma área total de 1005,21m<sup>2</sup>. Tanto a ACV completa da edificação quanto a montagem do inventário foi originalmente conduzida por Gomes et al. (2018), utilizando o software SimaPro 7.3. Com exceção dos dados primários dos traços de concreto (SILVA, 2006) e da cobertura verde (dados do fabricante), os dados do inventário eram secundários, adaptados de bases de dados. A maior parte deles foi proveniente da base EcoInvent v.2.2, com uma parcela pequena retirada das bases ELCD v.2.0, Industry Data v.2.0 e US LCI v.1.6. Cada processo incluído no inventário foi conferido detalhadamente, de modo a assegurar similaridade ao contexto brasileiro. Além disso, a matriz energética utilizada nos conjuntos de dados foi adaptada para os padrões nacionais (GOMES et al., 2018).

**Figura 3 - Renderizações do modelo de informação da construção do *Living Lab*, edificação do estudo de caso**

Fonte: Gomes e Barros (2018).

Para a prova de conceito neste artigo, os processos selecionados por meio da análise de contribuição para o resultado da categoria de mudanças climáticas (Etapa 1) tiveram sua incerteza básica levantada e matriz *Pedigree* original adaptada para o contexto brasileiro (Etapa 2).

Os fluxos contribuintes para impactos na categoria foram obtidos através da plataforma SimaPro 8.5.0. Esta versão do SimaPro utiliza processos (e, conseqüentemente, fluxos) referentes às bases de dados EcoInvent v3.4, ELCD v3.2 e US LCI v1.6. Sendo assim, apenas a versão da US LCI coincide com aquela utilizada no estudo de caso original do *Living Lab* (GOMES et al., 2018). Originalmente, os processos da estrutura metálica, das chapas de aço enroladas a quente e dos vergalhões de aço CA50 foram coletados na base de dados ELCD v.2.2; os processos das chapas de aço galvanizado vieram da base US LCI v.1.6; e os processos referentes aos vidros e ao alumínio foram obtidos da base EcoInvent v.2.2. Visando averiguar a importância dessa limitação, a avaliação de impacto destes seis processos foi repetida com os dados das versões mais recentes das bases, disponíveis na versão do SimaPro utilizada, e seus resultados foram comparados aos originais do estudo de caso.

No caso dos processos extraídos da base de dados EcoInvent (vidro e alumínio, melhor descritos nos resultados), a quantidade de cada composto emitido (ou seja, de cada fluxo elementar) no processo de primeiro plano (sob análise) é a combinação de suas próprias emissões com as emissões de toda a cadeia de processos a montante, cada qual com sua própria matriz *Pedigree* e incerteza básica. O número de fluxos elementares (emissões) de interesse naqueles processos pode chegar à casa dos milhares, tornando sua contextualização inviável. Na prática, porém, observou-se que na maioria das situações do estudo de caso, um único processo a montante era responsável por quase toda a emissão de um fluxo no processo em primeiro plano. Sendo assim, estabeleceu-se colher a matriz *Pedigree* e a incerteza básica advinda do processo a montante cuja emissão mais contribui para a o valor final do fluxo em primeiro plano.

Já para os processos oriundos das bases ELCD v3.2 e US LCI v1.6, os fluxos estão todos no primeiro plano, e apresentam-se no SimaPro como valores absolutos em vez da somatória de inúmeras emissões de processos a montante com o processo de primeiro plano, como faz a EcoInvent. Entretanto, a ausência de informações referentes à incerteza exigiu a estimativa das matrizes *Pedigree* e incertezas básicas de cada fluxo. Para tanto, adotou-se o procedimento descrito na Etapa 2 do protocolo.

## Resultados e discussão

### Etapa 1: Análise de contribuição

Do panorama geral dos impactos totais e acumulados para cada material/processo do inventário – referente à categoria de mudanças climáticas – foram considerados relevantes apenas os processos que, somados, contribuam com mais de 95% das emissões totais de GEE, o critério de corte utilizado nesta pesquisa. Esta análise apontou seis materiais/processos com alto impacto ambiental do ponto de vista das mudanças climáticas: estrutura metálica<sup>2</sup>, chapas de aço galvanizadas<sup>3</sup>, chapas de aço enroladas a quente<sup>4</sup>, vidros<sup>5</sup>, alumínio<sup>6</sup>, e vergalhão de aço CA50<sup>7</sup> (Tabela 1).

Tabela 1 - Contribuição dos materiais/processos do inventário na categoria de impacto mudanças climáticas, expresso em massa de emissão de GEE, em tCO<sub>2e</sub>

Materiais	Emissões totais (tCO <sub>2e</sub> )	Emissões acumuladas (tCO <sub>2e</sub> )	Percentual (%)	Percentual Acumulado (%)
Estrutura metálica	799,0	799,0	53,4%	53,4%
Chapas de aço galvanizadas	510,4	1309,4	34,1%	87,4%
Chapas de aço enroladas a quente	47,5	1356,9	3,2%	90,6%
Vidros	36,0	1392,9	2,4%	93,0%
Alumínio	25,8	1418,7	1,7%	94,7%
Vergalhão de aço CA50	16,3	1435,0	1,1%	95,8%
Somatória dos outros 27 materiais do inventário	62,5	1497,5	4,2%	100,0%

Fonte: os autores.

### Avaliação semiquantitativa: matriz Pedigree

As incertezas básicas e adicionais obtidas das matrizes *Pedigree* montadas para os processos críticos extraídos das bases de dados ELCD v3.2 e US LCI v1.6 (Tabela 2), ou contextualizadas para os processos da base de dados EcoInvent v3.4 (Tabela 3) fomentaram o cálculo das variâncias de cada fluxo. Devido à grande quantidade de fluxos elementares, apenas os dois primeiros fluxos de cada processo são apresentados no corpo do artigo. As tabelas completas estão disponíveis como material suplementar.

Tabela 2 - Matriz *Pedigree* estimada, incerteza básica, adicional, e variância para cada fluxo nos processos de produtos à base de aço, extraídos das bases de dados US LCI v1.6 e ELCD v3.2

Composto emitido (fluxo elementar)	Incerteza básica	Matriz <i>Pedigree</i> estimada	Incerteza adicional	Variância
Estrutura metálica (ELCD v.3.2)				
Dióxido de carbono	0,0006	1 3 5 5 4	0,0826	0,0832
Metano	0,1200	1 3 5 5 4	0,0826	0,2026
Chapas de aço galvanizadas (US LCI v.1.6)				
Dióxido de carbono, biogênico	0,0006	5 5 5 5 4	0,1300	0,1306
Dióxido de carbono, fóssil	0,0006	5 5 5 5 4	0,1300	0,1306
Chapas de aço enroladas a quente (ELCD v.3.2)				
Dióxido de carbono, fóssil	0,0006	1 3 5 5 4	0,0826	0,0832
Metano	0,1200	1 3 5 5 4	0,0826	0,2026
Vergalhão de aço CA50 (ELCD v.3.2)				
Dióxido de carbono	0,0006	1 3 5 5 4	0,0826	0,0832
Metano	0,1200	1 3 5 5 4	0,0826	0,2026

Fonte: os autores.

Tabela 3 - Matriz *Pedigree* original e contextualizada, incerteza básica e adicional, e variância para cada fluxo nos processos extraídos da base de dados EcoInvent v3.4

Composto emitido	Incerteza básica	Matriz <i>Pedigree</i>		Incerteza adicional		Variância	
		Original	Context.	Original	Context.	Original	Context.
Vidros (EcoInvent v3.4)							
Dióxido de carbono, fóssil	0,0006	4 5 5 1 5	4 5 5 5 5	0,1760	0,1780	0,1766	0,1786
Metano, fóssil	0,1200	1 1 5 1 1	1 1 5 5 4	0,0400	0,0820	0,1600	0,2020
Alumínio (EcoInvent v3.4)							
Dióxido de carbono, fóssil	0,6500	1 1 5 1 1	1 1 5 5 4	0,0400	0,0820	0,6900	0,7320
Dióxido de carbono, mudança de uso do solo	0,0100	5 3 5 4 3	5 3 5 5 4	0,0892	0,1226	0,0992	0,1326

Fonte: os autores.

### Simulação de Monte Carlo

A Tabela 4 sumariza os dados de saída da simulação de Monte Carlo (valores, acompanhados da variação em torno deles), que caracterizam probabilisticamente a emissão total (tCO<sub>2e</sub>) de cada material/processo da edificação estudada.

**Tabela 4 - Resultado das simulações de Monte Carlo, composto da emissão total (tCO<sub>2e</sub>) de cada material/processo da edificação estudada acompanhado de variações percentuais superiores e inferiores**

Subsistema construtivo	Resultado da simulação de Monte Carlo		Variação inferior (%)		Variação superior (%)		Variação absoluta (%)	
	Original	Context.	Original	Context.	Original	Context.	Original	Context.
Resultados por kg de material								
Estrutura metálica	-	1,13E+00	-	-36,16	-	60,12	-	96,29
Chapas de aço galvanizadas	-	2,74E+00	-	-44,34	-	79,36	-	123,70
Chapas de aço enroladas a quente	-	2,06E+00	-	-34,87	-	55,98	-	90,86
Vidros	9,93E-01	9,93E-01	-47,23	-48,04	96,37	95,07	143,61	143,10
Alumínio	9,10E-01	9,18E-01	-64,04	-64,67	246,30	254,86	310,34	319,52
Vergalhão de aço CA50	-	1,03E+00	-	-36,47	-	58,68	-	95,15
Resultados para o inventário completo								
Estrutura metálica	-	6,40E+01	-	-35,84	-	57,97	-	93,81
Chapas de aço galvanizadas	-	4,80E+01	-	-44,04	-	80,82	-	124,86
Chapas de aço enroladas a quente	-	6,32E+01	-	-35,73	-	55,60	-	91,34
Vidros	3,78E+01	3,79E+01	-48,20	-47,91	97,41	98,18	145,61	146,09
Alumínio	5,13E+01	5,18E+01	-64,03	-64,52	246,19	267,31	310,22	331,83
Vergalhão de aço CA50	-	9,83E+00	-	-36,19	-	60,61	-	96,80

Fonte: os autores.

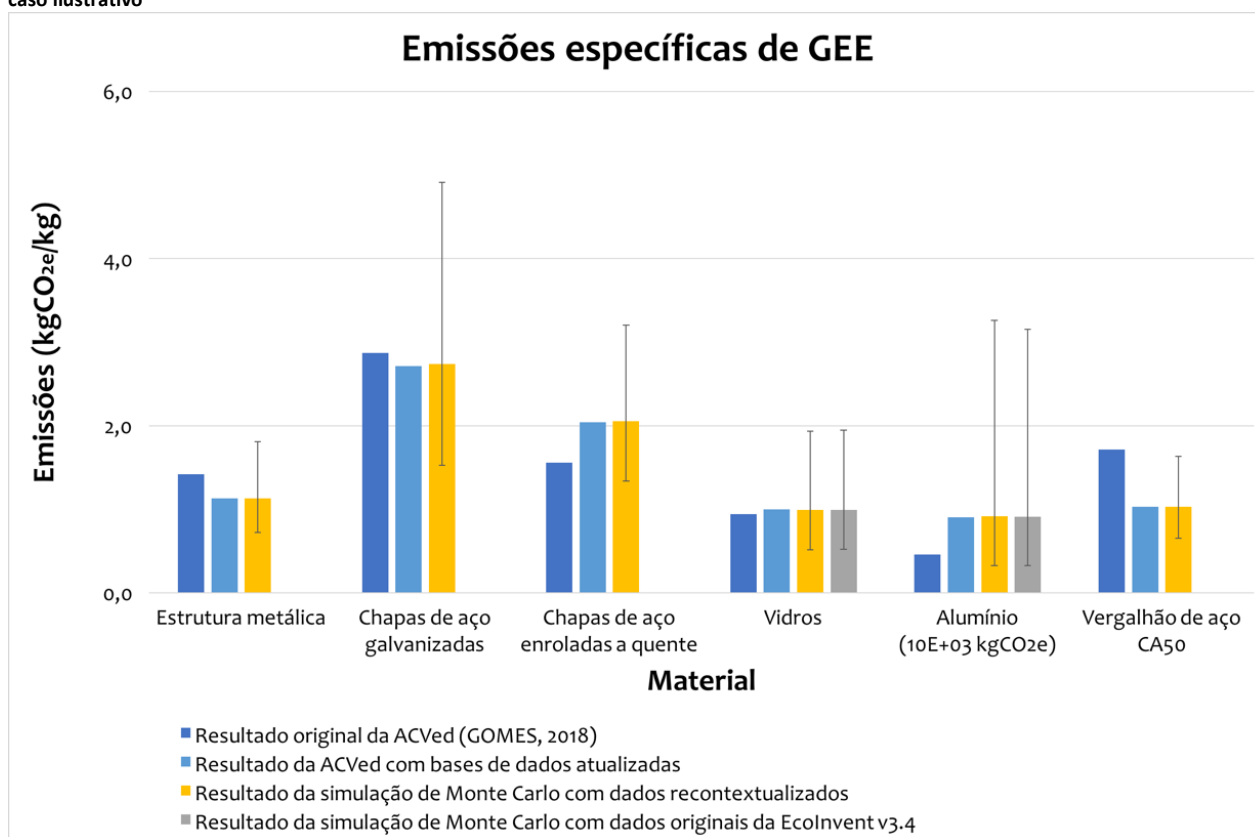
Os resultados de ACV na categoria de impacto de mudanças climáticas e respectivas incertezas são apresentados na Figura 4, para o coeficiente de emissão específico - i.e. a produção (A1-A3) de 1kg de material, e, na Figura 5, para a massa total dos materiais utilizada no caso ilustrativo. A barra cinza na Figura 5 mostra resultados da simulação MC apenas para os processos de vidros e alumínio, os únicos oriundos da base de dados Ecolnvent v3.4 e que, portanto, continham informações prévias acerca de incertezas. A ausência de informações de incertezas, nas respectivas bases de dados, impede a realização deste cálculo para os demais processos.

Ao analisar os resultados da simulação de Monte Carlo, nota-se que, ainda que – quando analisados individualmente, alguns processos (como chapas de aço galvanizado e, principalmente, alumínio) sejam muito mais incertos do que outros (Figura 4), as incertezas obtidas para o caso ilustrativo são, de modo geral, elevadas (Figura 5), evidenciando a necessidade de se melhorar a qualidade dos dados dos processos nas respectivas bases de dados.

De um lado, as figuras também mostram que – para os mesmos processos envolvidos – a própria atualização das versões das bases de dados já pode provocar oscilações no resultado determinístico, o que reforça a recomendação de cautela na sua interpretação. Por outro lado, ao apresentar o resultado do impacto como um valor médio, acompanhado de um intervalo de possíveis resultados, a abordagem probabilística fornece mais elementos para a tomada de decisão, por acrescentar uma camada extra de informação na comparação dentre alternativas, por exemplo. Mas, intervalos muito amplos para os valores possíveis para o impacto, como no caso aqui apresentado, mais ressaltam a baixa qualidade dos dados utilizados do que auxiliam concretamente no processo decisório.

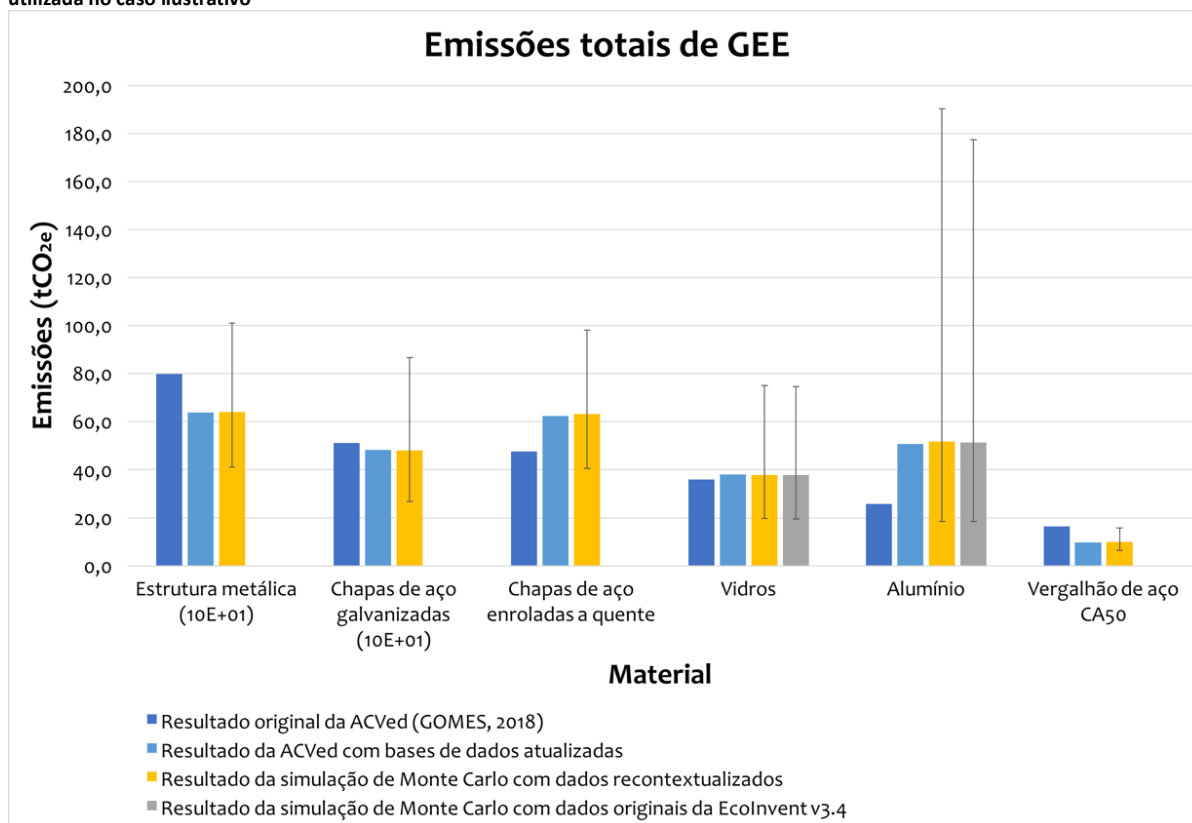


Figura 4 - Resultado das simulações de Monte Carlo para emissões específicas de GEE, em kgCO<sub>2e</sub>/kg de cada material/processo considerado no caso ilustrativo



Fonte: os autores.

Figura 5 - Resultado das simulações de Monte Carlo para emissões totais de GEE, em tCO<sub>2e</sub> relativas à massa total de cada material/processo utilizada no caso ilustrativo



Fonte: os autores.

### *Categorização de parâmetros*

As contribuições e os resultados da simulação de Monte Carlo de todos os processos foram então expressos segundo o sistema de categorização definido (Figura 6). O gráfico evidencia tanto o panorama geral dos resultados, quanto a diferença entre os processos originais da base de dados EcoInvent v3.4 e depois de contextualizados para um cenário de prática de ACV pouco consolidada.

Apesar de nenhum processo ter se enquadrado no quadrante crítico para o caso estudado, todos os que se aproximam dos eixos de corte caracterizam pontos de atenção. Por sua contribuição, o processo mais crítico é notavelmente o da estrutura metálica contextualizado. Este processo corresponde a mais da metade dos impactos em mudança climática do *Living Lab*, enquanto agrega incertezas de parâmetro próximas a 100%. Mesmo que a contribuição das chapas de aço galvanizado não seja a maior, ela é considerável, e este processo apresenta incertezas ainda mais altas (~ 120%). Do ponto de vista da tomada de decisão, esforços de melhoria dos dados para estes dois processos são fundamentais.

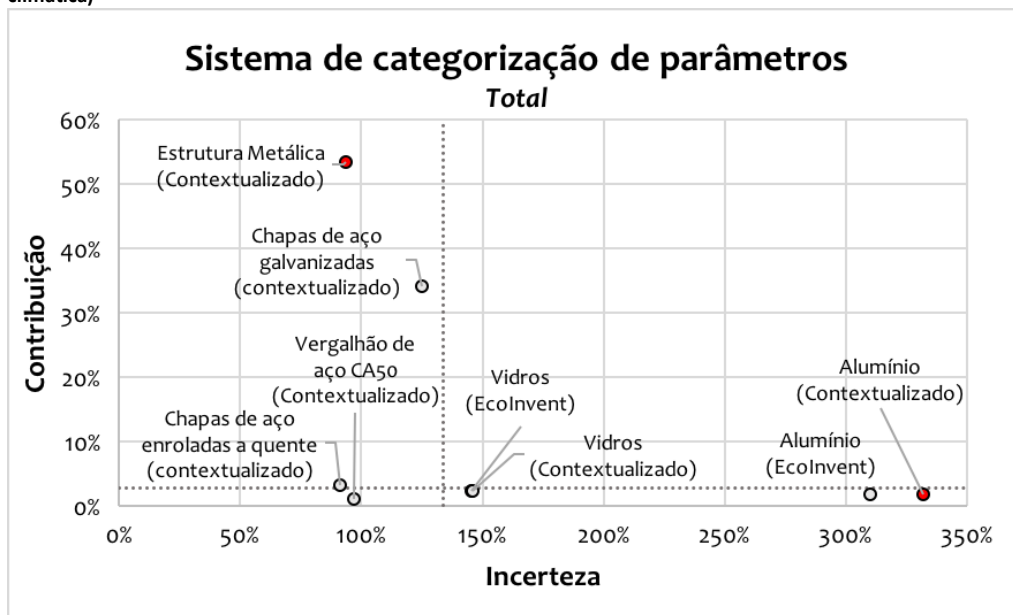
Já os processos do alumínio e, em menor proporção, vidros, têm contribuição pequena, e, por isto, não são críticos *para este estudo de caso*. Mas, por apresentarem incertezas muito elevadas, respectivamente de cerca de 300% e 150% (Tabela 4), tais processos tornam-se – em geral – críticos, por serem frequentemente empregados na construção civil e poderem ter contribuição substancial em outras edificações.

O procedimento recomendado pela base EcoInvent (WEIDEMA et al., 2013) abre margem para incertezas básicas muito díspares entre si, indo de 0,0006 até 0,65. Assim, fluxos com incertezas básicas elevadas terão variâncias também elevadas, características de comportamento muito incerto e que inflam a incerteza total. Tais fluxos podem gerar distorções e levar a incertezas muito altas, tanto nos resultados originais, quanto nos contextualizados. Isto ajuda a explicar a envergadura das incertezas encontradas para os processos sob análise.

Na Figura 6, os resultados da contextualização dos processos extraídos da EcoInvent v3.4 (vidros e alumínio) chamam a atenção. Adaptar a matriz *Pedigree* dos fluxos elementares de um processo para uma situação diversa das condições originais de coleta envolve aumentar sua variância intrínseca, o que se reflete em incertezas superiores às originais. Na melhor das hipóteses, as alterações feitas durante a contextualização da matriz *Pedigree* mantêm a presunção de qualidade dos parâmetros originais. Assim, seria esperado que a incerteza - dada pela variância dos fluxos e, conseqüentemente, pela variância total - de todos os processos contextualizados superasse à de seus correspondentes originais na base de dados. Esta expectativa, porém, não se confirmou pelos resultados do estudo de caso. A contextualização dos processos extraídos da base de dados EcoInvent v3.4 teve efeito pequeno (alumínio) ou mínimo (vidros) relativamente à incerteza original.

A diferença discreta entre os processos originais e contextualizados pode ser atribuída à combinação de dois fatores: variâncias muito baixas atribuídas aos fatores que compõem a estrutura da matriz *Pedigree*, aliadas à natureza aleatória da simulação de Monte Carlo. O primeiro fator parece ser preponderante, pois as variâncias obtidas da matriz *Pedigree* são muito inferiores aos valores informados pelos fornecedores dos conjuntos de dados. Assim, a contextualização dos processos – alterando valores já muito pequenos – afetaria pouco a variância de seus fluxos. Variâncias tão baixas não são suficientes para diferenciar substancialmente processos contextualizados dos originais, fazendo com que as simulações de Monte Carlo correspondentes sejam praticamente idênticas.

Figura 6 - Sistema de categorização de parâmetros resumando o resultado de todos os materiais/processos. As linhas pontilhadas indicam as medianas das incertezas e das contribuições para a categoria de impacto considerada (mudança climática)



Fonte: os autores.

## Conclusão

O estudo realizado comprovou a hipótese inicial de que o enfoque em processos críticos viabiliza uma análise essencial de incerteza de parâmetros do inventário, capaz de melhorar a expressão de resultados da ACV, mediante um volume de trabalho gerenciável. Esta confirmação é particularmente bem-vinda para avaliações complexas e abrangentes, com inúmeros processos a considerar, como as de edificações.

Os resultados da análise de contribuição corroboram com a tendência apontada na literatura, de que alguns poucos materiais/processos tendem a ser responsáveis por parte substancial dos impactos na ACVed. Esta particularidade, por sinal, é um dos principais motivos pelo qual diversos autores buscam desenvolver métodos de avaliação simplificados, com enfoque nos materiais/processos críticos.

Também em consonância com a literatura, demonstrou-se que a matriz *Pedigree* parece não descrever apropriadamente a diferença entre usar um conjunto de dados europeu na Europa e usar este mesmo conjunto de dados no Brasil, por exemplo. Embora o conceito de atribuição de fatores quantitativos a partir de informações qualitativas seja razoável, os valores atribuídos parecem ser insuficientes para representar devidamente o aumento de incertezas envolvido.

Os resultados da simulação de Monte Carlo revelam incertezas muito altas tanto nos processos originais quanto nos processos contextualizados, ultrapassando os 300% no caso mais crítico. Isto indica que, mesmo ao utilizar dados de segundo plano colhidos no contexto do estudo – utilizando dados europeus em uma ACV europeia, por exemplo – existe a chance de se obter resultados altamente incertos. Dessa forma, este estudo reforça não só a importância de priorizar bons dados primários na condução de uma ACV, mas o quão é importante atuar para continuamente aperfeiçoar também os dados de segundo plano, para, finalmente, melhorar a qualidade final da avaliação.

As incertezas dos processos originais da base de dados EcoInvent v3.4 se mostraram próximas ou praticamente iguais às dos processos contextualizados. Isto sugere que a correção foi tão pequena que o caráter iterativo aleatório da simulação pode ter

superado a magnitude da contextualização. Diante disso, sugerimos que estudos futuros que revisem – e provavelmente, elevem – os fatores compondo a matriz *Pedigree*. Alterar manualmente a matriz *Pedigree* de todos os fluxos para cada processo é extremamente trabalhoso. Ainda que isto viesse a ser automatizado, parece pouco efetivo se preocupar em contextualizar incerteza de dados, enquanto a incerteza original nas bases for tão alta.

É senso comum que processos industriais não são iguais em diferentes partes do mundo. Uma série de fatores – econômicos, sociais, geográficos, tecnológicos etc., fora do escopo deste artigo – influencia isto. Todo o processo, desde a extração de matéria prima até a entrega do produto ao consumidor, tem suas peculiaridades ao redor do globo. Espera-se que dados colhidos em cadeias de produção europeias, por exemplo, não necessariamente correspondam às situações avaliadas no Brasil, e que, quando utilizados fora de seu contexto original, tais dados sejam mais incertos do que quando usados para uma ACV em sua fonte. Sendo assim, a questão a ser feita não é exatamente se é válido investir tempo e recursos para avaliar as incertezas decorrentes desta contextualização dos dados, mas sim como avançar o estado da arte visando representar de maneira mais fidedigna a realidade.

No estado atual de ACV, a condução de análises de incerteza ainda não é prática típica. Tampouco é comum a coleta de novos dados para melhorar a qualidade de processos do inventário identificados como críticos para o estudo em tela, e reconduzir a ACV. Mas em qualquer cenário é possível identificar os processos mais críticos e que devem ser alvos primários para condução de refinamentos dos dados e utilizados com maior cautela para comunicar resultados ou tomar decisões. Tal refinamento de dados demanda investimento e esforço incompatíveis com o horizonte de tempo para tomada de decisões na prática de projeto. Ainda assim, a comunicação das incertezas é relevante e estudos desta natureza apontam claramente tanto a oportunidade, quanto a estratégia de melhoria de qualidade de dados para reforçar a contribuição da ACV como elemento decisório.

Nestas circunstâncias, o sistema de categorização de parâmetros proposto estabelece um diálogo virtuoso entre o analista responsável pela ACV e o projetista que especifica os materiais e define as características gerais da edificação, que pode nortear, na fase de projeto, melhores escolhas do ponto de vista dos impactos ambientais da edificação, amparadas por informações de ciclo de vida. A partir das indicações do analista, o projetista pode atuar para reduzir o uso de determinados materiais apontados como críticos, substituí-los por alternativas e combinações de menor impacto, ou – sendo os impactos semelhantes – optar por aquelas com menor incerteza.

Finalmente, a discussão feita neste artigo se refere a bases de dados, fundamentais para prover as informações de segundo plano que viabilizam a realização de ACV. No entanto, vale lembrar que a construção de inventários de primeiro plano razoáveis é essencial para a validade e significado dos achados de uma ACV.

Naturalmente, o estudo aqui apresentado estimula reflexões importantes, como, por exemplo, se a prática de ACV utilizando dados com incertezas tão elevadas de fato auxilia na tomada de decisão ou se evidencia a fragilidade da técnica em si, comprometendo a interpretação e decisões nela apoiadas. No entanto, é sempre mais viável refinar uma prática do que iniciá-la, basta analisar os avanços importantes alcançados em ACV nas últimas duas décadas. Estes avanços também revelaram o risco de se apoiar em resultados determinísticos, principalmente quando a incerteza a eles associados torna-se elevada, como mostramos. Reconhecido o problema, cabe estabelecer uma conduta e agenda de pesquisa que trace esforços para superá-lo e

produza novos avanços, em vez de seguirmos ignorando o elefante (determinístico) na sala.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento à pesquisa, através dos processos #165777/2017-6, código de financiamento 001, para AGB, e #306048/2018-3, para VGS.

## Notas

- (1) Disponível em <https://www.EcoInvent.org/support/faqs/methodology-of-EcoInvent-3/how-to-interpret-the-uncertainty-fields-in-EcoInvent.html>
- (2) Steel frame, composto pelo processo {Steel hot rolled section, blast furnace, electric arc furnace route, production mix}.
- (3) Galvanized steel sheet, composto pelo processo {Galvanized steel sheet, at plant}.
- (4) Steel hot rolled coil, composto pelo processo {Steel hot rolled coil, blast furnace, production mix}.
- (5) Architectural glazing, composto pelo processo {Flat glass, uncoated, at plant}.
- (6) Aluminum, composto pelo processo {Window frame, aluminium, U=1.6W/m<sup>2</sup>K, at plant}.
- (7) Steel rebar CA50, composto pelo processo {Steel rebar, blast furnace, electric arc furnace route, production mix}.

## Referências

ABD RASHID, A. F.; YUSOFF, S. A review of life cycle assessment method for building industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 244-248, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.043>

BAEK, C-Y.; TAHARA, K.; PARK, K-H. Parameter Uncertainty Analysis of the Life Cycle Inventory Database: Application to Greenhouse Gas Emissions from Brown Rice Production in IDEA. **Sustainability**, v. 10, n. 4, p. 922, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10040922>

BAIOCHI, A. G. **Análise de incertezas de parâmetro de processos críticos em avaliação do ciclo de vida de edificações completas**. 2019. 1 recurso online (163 p.). Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/335694>. Acesso em: 12 dez. 2019.

BAIOCHI, A. G.; GUIMARÃES, G. D.; GOMES, V. A critical review on parameter uncertainty modeling in whole building Life Cycle Assessment. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE GESTÃO DO CICLO DE VIDA, 6., 2018, Brasília. **Anais [...]**. Brasília: Ibict, 2018.

BJÖRKLUND, A. E. Survey of approaches to improve reliability in LCA. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 7, n. 2, p. 64-72, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02978849>

CEN – EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 15978 – Sustainability of construction works — Assessment of environmental performance of buildings — Calculation method**. Luxemburg: Publications Office of the European Union, 2011.

CHAU, C. K.; LEUNG, T. M.; NG, W. Y. A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. **Applied Energy**, v. 143, p. 395-413, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.023>

CIROTH, A.; FLEISCHER, G.; STEINBACH, J. Uncertainty calculation in life cycle assessments. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 9, n. 4, p. 216-226, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02978597>

GANTNER, J.; WITTSTOCK, B.; LENZ, K.; FISCHER, M.; SEDLBAUER, K. **EeBGuide Guidance Document Part B: Buildings. Operational guidance for life cycle assessment studies of the Energy Efficient Building Initiative.** Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2015.

EC JRC-IES –EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTRE'S INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook** - general guide for life cycle assessment - detailed guidance. 1a ed. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010.

GOMES, V.; SAADE, M.; LIMA, B.; SILVA, M. Exploring lifecycle energy and greenhouse gas emissions of a case study with ambitious energy compensation goals in a cooling-dominated climate. **Energy and Buildings**, v. 173, p. 302–314, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.063>

GOMES, V.; BARROS, N. Contribuição da modelagem BIM para facilitar o processo de ACV de edificações completas. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 13, n. 2, p. 19–34, 26 maio 2018. DOI: <https://doi.org/10.11606/gtp.v13i2.142139>

HEIJUNGS, R. Identification of Key Issues for Further Investigation in Improving the Reliability of Life Cycle Assessments. **Journal of Cleaner Production**, v. 4, n. 3–4, p. 159–166, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(96\)00042-X](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(96)00042-X)

HUIJBREGTS, M. A. J. Application of uncertainty and variability in LCA. Part I: A General Framework for the Analysis of Uncertainty and Variability in Life Cycle Assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 3, n. 5, p. 273–280, set. 1998. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02979835>

HUIJBREGTS, M. A. J.; NORRIS, G.; BRETZ, R.; CIROTH, A.; MAURICE, B.; BAHR, B. V.; WEIDEMA, B.; BEAUFORT, A. S. H. de. Framework for modelling data uncertainty in life cycle inventories. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 6, n. 3, p. 127–132, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02978728>

HUIJBREGTS, M. A. J.; GILIJAMSE, W.; RAGAS, A. J.; REIJNDERS, L. Evaluating Uncertainty in Environmental Life-Cycle Assessment. A Case Study Comparing Two Insulation Options for a Dutch One-Family Dwelling. **Environmental Science & Technology**, v. 37, n. 11, p. 2600–2608, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1021/es020971+>

LLOYD, S. M.; RIES, R. Characterizing, propagating, and analyzing uncertainty in life-cycle assessment: A survey of quantitative approaches. **Journal of Industrial Ecology**, v. 11, n. 1, p. 161–179, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1162/jiec.2007.1136>

NOSHADRAVAN, A.; WILDNAUER, M.; GREGORY, J.; KIRCHAIN, R. Comparative Pavement Life-Cycle Assessment With Parameter Uncertainty. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 25, p. 131–138, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.10.002>

POHL, C.; ROS, M.; WALDECK, B.; DINKEL, F. **Imprecision and Uncertainty in LCA.** In: SCHALTEGGER, S. et al. (Eds.). *Life Cycle Assessment (LCA) — Quo vadis?* Basel: Birkhäuser Basel, 1996. p. 51–68.

QIN, Y.; SUH, S. What distribution function do life cycle inventories follow? **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 7, p. 1138–1145, julho. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1224-4>

SILVA, M. G. (coord.). **Concreto de Alto Desempenho com Elevados Teores de Escória de Alto Forno:** Estratégia para consolidar o Mercado da Escória de Alto Forno. Vitória: Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas (NEXES), Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, 2006 (Relatório Técnico).

SONNEMANN, G. W.; SCHUHMACHER, M.; CASTELLS, F. Uncertainty assessment by a Monte Carlo simulation in a life cycle inventory of electricity produced by a waste incinerator. **J. Clean. Prod.**, v. 11, n. 3, p. 279–292, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(02\)00028-8](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(02)00028-8)

WEIDEMA, B. P.; BAUER, C.; HISCHIER, R.; MUTEL, C.; NEMECEK, T.; REINHARD, J.; VADENBO, C. O.; WERNET, G. **Overview and methodology:** Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Ecoinvent Report, v. 3, n. 1, 2013.

WEIDEMA, B. P.; WESNAES, M. S. Data quality management for life cycle inventories-an example of using data quality indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 4, n. 3-4, p. 167- 174, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(96\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(96)00043-1)

---

<sup>1</sup> **Arthur Gusson Baiochi**

Engenheiro Civil. Mestre. Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas. Endereço postal: Av. Albert Einstein, 951, Cidade Universitária, Campinas, SP, CEP 13083-852

<sup>2</sup> **Vanessa Gomes da Silva**

Arquiteta e urbanista. Doutora pela Escola Politécnica da USP em engenharia de construção civil e urbana. Professora livre docente do Departamento de Arquitetura e Construção da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas. Endereço postal: Av. Albert Einstein, 951, Cidade Universitária, Campinas, SP, CEP 13083-852