

**Trabalho Final de Graduação**  
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo  
Universidade de São Paulo  
2022

**FERRAMENTA PARAMÉTRICA DE ANÁLISE DE CICLO DE VIDA  
PARA PROJETOS DE ARQUITETURA EM ESTÁGIOS INICIAIS DE  
DESENVOLVIMENTO**

**Daniel Ferrara Bilesky 9810862**  
Orientadora: Professora Cláudia de Andrade Oliveira  
Co-orientador: Professor Arthur Hunold Lara



## Sumário

Resumo	4
Introdução	5
Revisão bibliográfica	6
Desenvolvimento	10
Primeiros passos - Diagramas, simplificações de cálculo e planejamento	10
Desenvolvimento da primeira versão	14
Feedback e novo objetivo	17
Segundo semestre e desenvolvimento final	18
Estudo de caso	21
Considerações finais	25
Bibliografia	26

## 1. Resumo

O aquecimento global é uma realidade e a sustentabilidade é a grande questão das próximas gerações. Não havendo redução significativa no uso de recursos não renováveis e uma mudança dos padrões de consumo em direção a fontes renováveis, a catástrofe ambiental é iminente. Contribuindo em grande medida para isso, o ambiente construído, objeto de estudo da arquitetura, é responsável por um terço das emissões de gases de efeito estufa no mundo. Portanto, é imperativo para o futuro da disciplina procurar reduzir o consumo de recursos nessa atividade. Já existem processos utilizados para mensurar o impacto ambiental de um edifício antes de ele ser construído. Porém, esse tipo de análise é raramente conduzido nas práticas de arquitetura/paisagismo, porque as ferramentas atualmente disponíveis para esse tipo de estudo ou não oferecem resultados com uma confiança suficiente ou são muito complexas para serem utilizadas nas etapas iniciais do design, justamente aquelas nas quais as possíveis alterações teriam mais impacto no desempenho ambiental do projeto. Com isso em mente, este trabalho tem como objetivo produzir um software de análise computacional que preencha essa lacuna, de modo a possibilitar que os arquitetos avaliem seus projetos em termos do seu desempenho ambiental ainda nos estágios iniciais, incorporando esse aspecto aos vários outros que constituem o processo iterativo de design.

## 2. Introdução

O último relatório do IPCC (IPCC, 2019) sobre mudanças climáticas mostrou, através de dados coletados nos últimos anos, que o aquecimento global é uma realidade e que, não havendo uma mudança significativa imediata nos nossos padrões de consumo, a catástrofe ambiental é iminente. Além disso, os cientistas também observaram que, atualmente, o ambiente construído é responsável por grande parte das emissões de gases de efeito estufa no mundo, sendo a fonte direta de 39% delas (IPCC, 2019). Por consequência, é uma diretiva crucial para a arquitetura do futuro procurar reduzir o consumo de recursos na sua atividade.

Dentro desse contexto, é nossa responsabilidade, como agentes dessa profissão, procurar meios de reduzir o impacto ambiental da nossa produção. Para tanto, é necessário buscar formas de avaliar nossos projetos em termos de seu impacto ambiental antes de sua construção, e procurar otimizá-los o máximo possível nesses termos. Isso é feito, atualmente, utilizando o procedimento conhecido como análise do ciclo de vida dos edifícios (BASIC et al., 2019). Entretanto, esse tipo de análise é raramente conduzido nas práticas de arquitetura/paisagismo hoje em dia, e, nas poucas ocasiões onde ele é conduzido, ele faz parte de um processo posterior ao design, que, portanto, não tem muita influência sobre a qualidade final do edifício (BASIC et al., 2019). Isso se dá porque as ferramentas atualmente disponíveis para esse tipo de estudo ou não oferecem resultados com uma confiabilidade suficiente ou são muito complexas para serem utilizadas nas etapas iniciais do design (BASIC et al., 2019), justamente aquelas nas quais as possíveis alterações teriam mais impacto no desempenho do projeto.

Inserido nesse contexto de crise climática mundial, visando possibilitar a produção de uma arquitetura mais sustentável, o objetivo deste trabalho é desenvolver um programa de computador que preencha essa lacuna e possibilite que os arquitetos avaliem seus projetos em termos do seu desempenho ambiental ainda nos estágios iniciais, incorporando esse aspecto aos vários outros que constituem o processo iterativo de design. Para tanto, este relatório foi dividido em quatro outros capítulos posteriores a este, no primeiro dos quais teremos uma revisão dos pontos mais importantes levantados pela bibliografia já produzida acerca da produção de softwares similares. No item seguinte, será descrito o desenvolvimento do software, com as ideias iniciais, as simplificações e adições feitas ao longo do processo, bem como todos os outros fatores que influenciaram o resultado final. Em seguida, no penúltimo capítulo, temos um estudo de caso, em que o software será utilizado para avaliar diversas opções de design para um projeto em um contexto dado. Os resultados desse estudo serão discutidos no último capítulo para avaliar o desempenho do software em geral, isto é, se ele cumpre o papel a que ele se propõe e quais são as oportunidades de desenvolvimento futuro.

### 3. Revisão bibliográfica

Nesta parte do trabalho, busca-se explorar os principais pontos levantados pela bibliografia existente sobre softwares de análise de ciclo de vida, em particular sobre aqueles produzidos especificamente para os estágios iniciais de projeto, nos quais se apoia todo este trabalho. Isso será feito a fim de que, no próximo item, no qual será discutido o desenvolvimento do software, seja possível compreender melhor as razões por trás das decisões tomadas nesse processo.

A primeira informação importante a ser citada foi discutida por HOLLBERG et al. (2019). Segundo os autores, é imperativo para a eficácia de uma análise de ciclo de vida que o software utilizado forneça valores de benchmark como resposta para o usuário, além dos resultados da análise específica, a fim de que o responsável pelo projeto possa entender os valores obtidos comparativamente, e avaliar se a proposta está adequada ou não. Para tanto, os autores discutem dois possíveis métodos para a determinação rápida desses valores de referência. O primeiro deles, chamado de “de cima para baixo”, sugere utilizar o número de usuários de um edifício e o limite aceitável de emissões de CO<sub>2</sub>-eq per capita para o ambiente construído, determinada pela norma Suíça SIA 2040, considerando as reduções necessárias de produção de gases do efeito estufa para se permanecer dentro da faixa de aumento da temperatura mundial apontada como aceitável pela comunidade internacional, a fim de determinar um valor global limite para cada projeto analisado. O segundo, chamado de “de baixo para cima”, provém de um estudo estatístico realizado pelos autores sobre o desempenho de diversos edifícios e materiais disponíveis no mercado suíço, que resultou em valores específicos de budget de emissões de CO<sub>2</sub> equivalente para cada elemento construtivo de um edifício, identificados de acordo com a norma suíça e-BKP-H SN 506 511. No contexto de um software voltado para as fases iniciais de design, utilizar o primeiro faz mais sentido do que o segundo, por motivos que serão apresentados no próximo item.

Em seguida, a bibliografia também discute exaustivamente a necessidade de apresentar os resultados de uma análise de ciclo de vida de forma gráfica, e não apenas como output numérica sem formatação. Diversos dos textos relacionados no item 6 deste trabalho discutem esse aspecto, mas, em KISS, SZALAY (2019) ele é abordado como tema central. Segundo os autores, a facilidade de visualização garantida pelos gráficos permite ao responsável pelo projeto identificar, mais facilmente, possíveis aspectos nos quais o projeto pode melhorar em termos de seu impacto ambiental. Para tanto, sugere-se um estilo de gráfico conhecido como sunburst, que se adapta facilmente aos diversos níveis de detalhamento dos resultados obtidos em análises de ciclo de vida, permitindo uma apreensão rápida e efetiva, ilustrado a seguir.

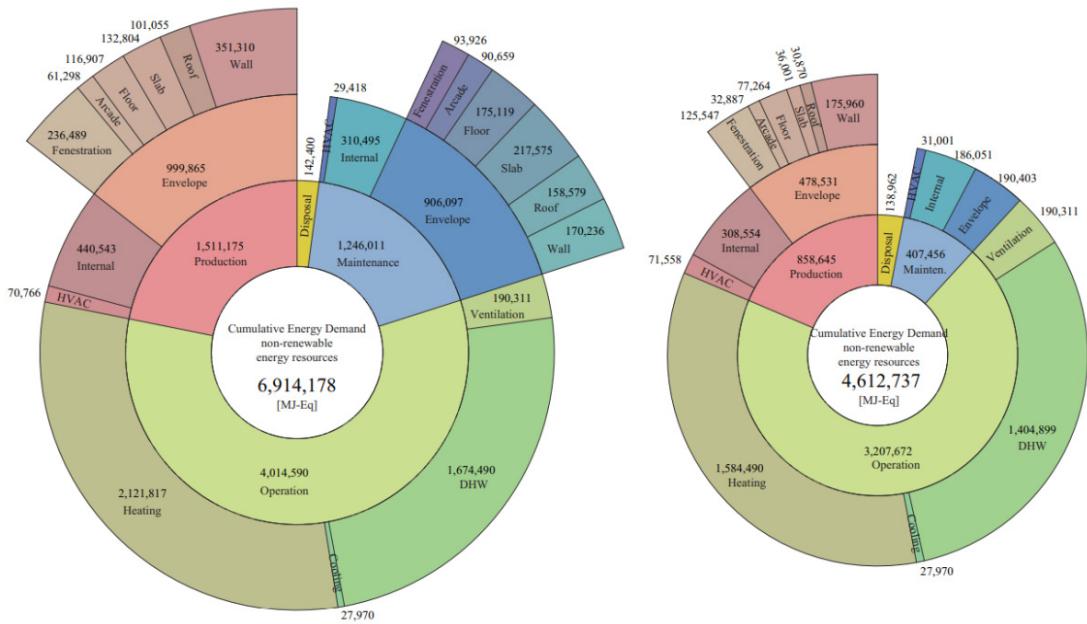


Figura 1: gráfico sunburst aplicado para os resultados de uma análise de ciclo de vida. Fonte: KISS, SZALAY (2019).

De modo semelhante, outro ponto crucial levantado pela bibliografia está relacionado à experiência do usuário, dessa vez não mais objetivando possibilitar melhor interpretação dos resultados, mas sim garantir a difusão eficiente dessas ferramentas, e reduzindo o tempo necessário para a realização das análises e para a instrução de um novo usuário sobre o funcionamento do software. Segundo MEEEX et al. (2018) é imperativo que essas duas quantidades temporais sejam da ordem mais reduzida possível, uma vez que, como também demonstrado por HOLLBERG et al. (2016) se o tempo necessário para a realização dessas atividades for muito grande, a relação entre propostas de design analisadas e produzidas cai entre os usuários, o que significa que possíveis aprimoramentos em termos do impacto ambiental de um projeto podem ser perdidos. Pela importância ressaltada pela bibliografia a esse fato, a ferramenta a ser desenvolvida por esta pesquisa tem o objetivo de providenciar uma interface intuitiva o suficiente para possibilitar um tempo próximo a zero minutos de instrução necessária para utilização completa.

Outro ponto importante discutido pela bibliografia, como um todo, é a necessidade de assegurar-se de que a base de dados utilizada para efetuar os cálculos de impacto ambiental tenha sido elaborada especificamente para o contexto regional do projeto, tendo em vista que diferentes padrões produtivos são encontrados em diferentes porções do território global. Isso faz com que as emissões de gases do efeito estufa ocasionadas pela produção de cada material de construção sejam diferentes em cada contexto, podendo gerar divergências significativas nos resultados obtidos para um mesmo material em locais diferentes. Isso é discutido em grande detalhe em SILVESTRE et al. (2014) texto no qual os autores também discorrem sobre métodos que possi-

bilitam a adaptação de uma base de dados de um contexto para o outro. Esse procedimento será crucial para este trabalho, tendo em vista que as bases de dados brasileiras são incompletas ou adaptadas para contextos locais muito específicos.

Quanto aos procedimentos de cálculo em si, é interessante mencionar a distinção discutida amplamente pela bibliografia, detalhadamente compilada por HOLLBERG (2016) entre os dois métodos mais utilizados para a determinação dos valores de impacto ambiental operacional do edifício, definido como aquele gerado pelas atividades diárias que ocorrem em suas premissas, decorrente da utilização de sistemas de condicionamento, por exemplo. São elas os métodos de simulação dinâmica do desempenho do edifício (DBPS, em inglês) e os métodos de regime semi estacionário (QSSM, em inglês). Os primeiros realizam uma simulação com um grande nível de detalhe, analisando o projeto para todas as horas ou até para todos os minutos de um ano, e redefinindo, para cada um desses períodos, todas as variáveis de cálculo. Isso proporciona resultados com alta acurácia, mas eleva o tempo despendido em cada análise para até 5 minutos. Os métodos QSSM, por outro lado, realizam diversas simplificações, como a utilização de valores globais para certas variáveis, e a condução dos cálculos para períodos de meses inteiros. Como consequência, apesar de que a acurácia dos resultados possa sofrer reduções, o tempo necessário para a realização dos cálculos reduz significativamente, variando de 0,1 até 5 segundos, nas diversas situações. Com isso em mente, pensando que a difusão do software precisa ser maximizada e que, para tanto, como citado anteriormente, é crucial a redução do tempo das simulações, os métodos QSSM se mostram uma boa opção para o presente trabalho.

Em seguida, é interessante discutir as diversas simplificações mencionadas pela bibliografia que podem ser feitas nesse tipo de análise, por conta de baixa influência nos resultados. A primeira, citada por LÜTZKENDORF et al. (2014) é que o impacto ambiental ocasionado por usuários praticando o programa do edifício em si pode ser desconsiderado, tendo em vista que o design do edifício não influencia nessa parcela, que será constantemente a mesma. Em seguida, segundo BIGALKE et al. (2012) para projetos realizados em países de clima frio, a parcela do impacto ambiental operacional gerada pelo consumo de energia para resfriamento pode ser desconsiderada, uma vez que são responsáveis por uma quantidade relativamente pequena das emissões. Analogamente, em países de climas mais quentes, o consumo de energia para aquecimento também pode ser desconsiderado. Pelo mesmo motivo, EL KHOULI et al. (2014) defendem que, dentro do cálculo do impacto ambiental gerado pela construção em si, chamado de incorporado, elementos construtivos que não fazem parte da estrutura primária do edifício também podem ser desconsiderados. Nem todas essas simplificações serão utilizadas no software desenvolvido por este trabalho, mas é importante citá-las para se ilustrar que há um precedente, nesse tipo de análise, para interpretar uma situação com seus objetivos particulares e desprender, disso, quais fatores podem ser retirados do cálculo. Essa lógica será amplamente explorada no próximo item.

Por fim, KISS et al. (2021) discutem como transmitir ao usuário a informação obtida com a análise. Os autores fazem um levantamento extremamente completo sobre os softwares de análise de ciclo de vida já existentes no mercado e os tipos de visualização que cada um deles oferece. Em seguida, colocando sempre em primeiro lugar os objetivos de fazer com que o resultado instrua mudanças positivas no design e permita uma tomada de decisão rápida e eficiente, os autores julgam quais formas de apresentação dos resultados são mais relevantes, dependendo do tipo de usuário e da fase do projeto em que a análise é feita. Os resultados a que eles chegam são múltiplos, mas o mais relevante para este trabalho é o de que, para estudos de ciclo de vida realizados em estágios iniciais do projeto com o objetivo de instruir os próprios arquitetos, a pesquisa indica o uso de três formas de representação dos resultados: o gráfico sunburst, já mencionado, o uso de cores no modelo tridimensional para indicar quais partes do projeto incorporaram mais carbono do que as outras, e a apresentação de um gráfico de linhas empilhadas, para possibilitar uma comparação eficiente da performance das diversas opções. O primeiro e o último estão representados ilustrativamente a seguir.

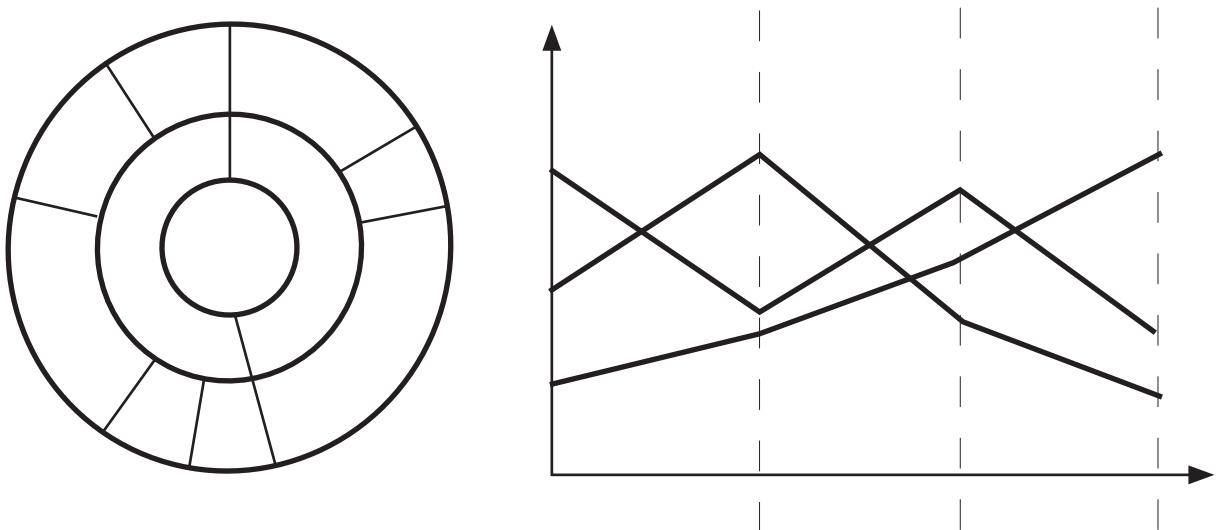


Figura 2: Ilustração dos tipos de representação indicados pelos autores de KISS et al. (2021). Fonte: Acervo do autor.

## 4. Desenvolvimento

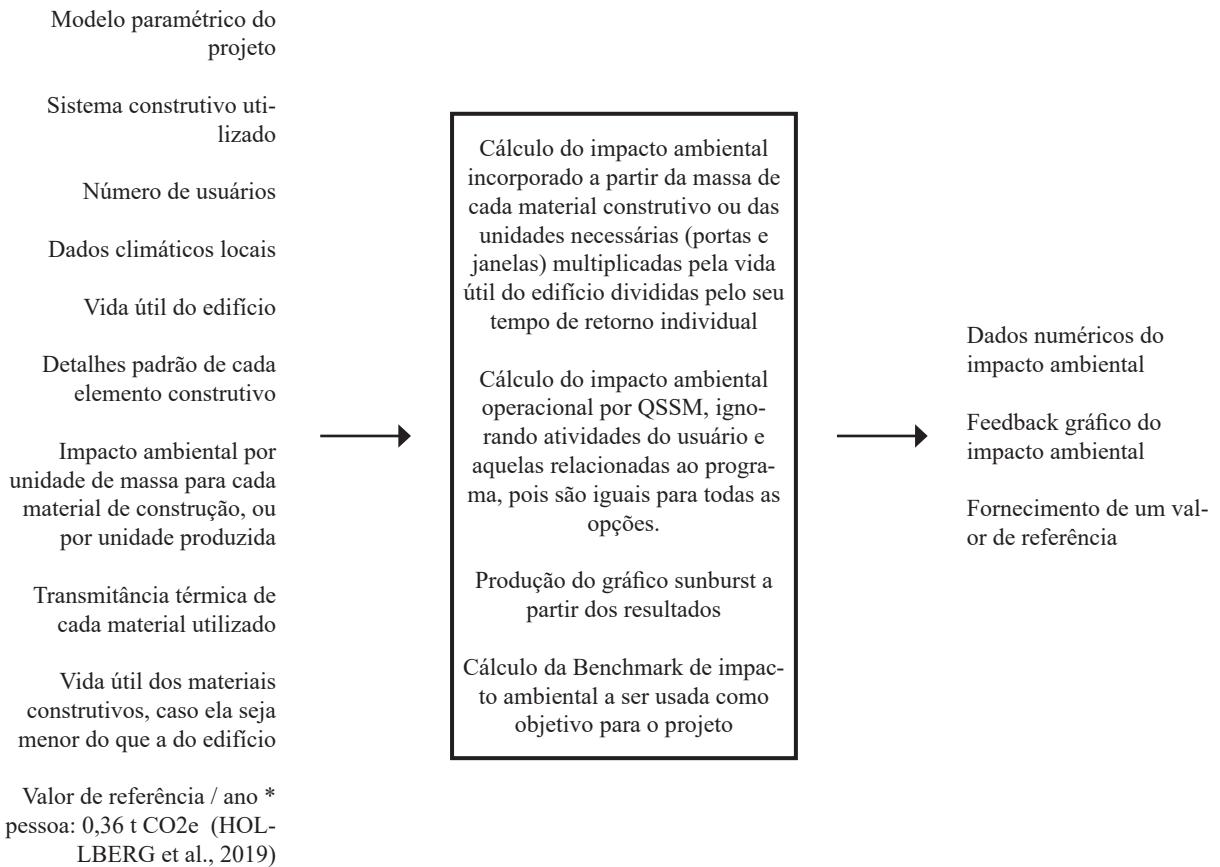
Nesta parte do trabalho, busca-se registrar o percurso de desenvolvimento do software que é objeto deste relatório. Será feita uma narrativa cronológica explicando como a ideia do que seria desenvolvido mudou ao longo do tempo, bem como os eventos que provocaram essas mudanças.

### 4.1 Primeiros passos - Diagramas, simplificações de cálculo e planejamento

O processo de desenvolvimento iniciou-se em Setembro de 2021. Após utilizar os primeiros meses da pesquisa para revisar grande parte da bibliografia encontrada sobre o tema, o processo se iniciou com uma tentativa de resumir os principais pontos levantados em esquemas sintéticos das operações a serem realizadas pelo software. Isso foi feito com a intenção de criar um guia geral para a subsequente elaboração do código, esperando que isso permitiria que essa etapa pudesse ser realizada de forma mais eficiente, uma vez que teria seus objetivos mais claramente definidos. Dessa forma, iniciou-se a produção desses esquemas da maneira mais simples e direta possível, com a indicação básica da função geral do programa com o menor número de palavras e elementos visuais possíveis, como ilustrado abaixo: trata-se de um software que deveria transformar um projeto em uma quantificação de seu impacto ambiental.



Em seguida, procurou-se expandir essa diagramação básica das inputs, outputs e processos a serem realizados por itens que transmitissem uma ideia mais completa de todos esses elementos, sem perder, mesmo assim, a natureza sintética dessa atividade. Dessa forma, o diagrama a seguir é um bom instrumento para apresentar a ideia de como se imaginava o funcionamento do software nesse ponto de sua produção.



A fim de garantir que o software atendesse ao objetivo inicial de auxiliar o processo de design de um dado projeto fornecendo dados sobre diversas opções de design, a confecção desse esquema se iniciou pela enumeração das outputs. Procurou-se entender, com o auxílio da bibliografia, qual tipo de informação seria ideal oferecer ao usuário para ajudá-lo no desenvolvimento de seu edifício. Com isso em mente, elencou-se três grandes grupos de informações a serem fornecidas pelo software na coluna da direita do esquema acima. O primeiro é um conjunto de dados numéricos sobre o impacto ambiental do edifício, a serem apresentados em pelo menos duas unidades de medida diferentes, a fim de que possíveis vieses de cada método de mensuração possam ser evitados (HOLLBERG, 2016). Além disso, seria fornecido também um feedback gráfico desse valor numérico, na forma de um gráfico sunburst, como mencionado pela bibliografia (KISS, SZALAY, 2019) e um valor de referência de impacto ambiental nas mesmas unidades do resultado. Esses dois elementos auxiliam a interpretação do valor matemático bruto e permitem ao usuário aproveitar melhor a informação fornecida, aumentando a possibilidade de um impacto positivo no produto final.

Determinadas as outputs do software, elencou-se, na coluna do meio do diagrama, os processos gerais a serem executados pelo programa para obter esses resultados. Sendo o impacto ambiental de um edifício (IA) a soma de seu impacto ambiental incorporado (IE), derivado do impacto gerado na etapa de produção do edifício como objeto, e de seu impacto ambiental operacional

(IO), derivado do impacto gerado pelo consumo energético dos usuários ao longo da vida útil (eq.1) (BASIC et al., 2019), escolheram-se, com o auxílio da bibliografia, os métodos mais adequados para a determinação dessas quantidades. Para o cálculo do impacto ambiental incorporado, utilizaria-se o método de, primeiramente, determinar a massa de cada material construtivo utilizada no edifício ( $m_i$ ) e, em seguida, multiplicar esse valor por um valor tabelado de impacto ambiental por unidade de massa ( $Q_i$ ) e pelo número natural correspondente a divisão da vida útil do edifício ( $VU_e$ ) pela vida útil de cada material ( $VU_m$ ), sempre arredondado para cima, (eq.2), como descrito em (BASIC et al., 2019). Em seguida, para o cálculo do impacto ambiental incorporado, utilizaria um método de QSSM (quasi-steady state method) descrito pela norma alemã DIN V 18599:2011, como visto na revisão bibliográfica.

eq.1

$$I_A = I_E + I_O$$

eq.2

$$I_E = \sum m_i * Q_i * (VU_e / VU_m)$$

Além disso, o software também deveria determinar o valor de referência de impacto ambiental para o projeto através do número de usuários e da budget de carbono per capita para edifícios determinada por HOLLBERG et al. (2019). Por fim, o software produziria uma representação gráfica dos resultados numéricos, na forma de um gráfico sunburst, lembrando que essa forma de apresentação foi escolhida tendo em vista seu potencial explicado pela bibliografia (KISS, SZALAY, 2019).

Dada essa enumeração sintética porém completa dos processos de cálculo a serem realizados pelo software, o passo seguinte foi enumerar todas as inputs necessárias para a execução desses processos. Elas se encontram na coluna esquerda do diagrama apresentado, e se tratam de um valor de referência de budget de impacto ambiental por usuário por ano determinada por HOLLBERG et al., 2019 e o número de usuários do edifício para a determinação do valor de referência de impacto ambiental do projeto; e um modelo paramétrico do projeto, o sistema construtivo utilizado, os dados climáticos locais, a vida útil do edifício, detalhes padrão de cada elemento construtivo, o impacto ambiental por unidade de massa para cada material de construção, e a vida útil e a transmitância térmica de cada material utilizado para a determinação dos valores de impacto ambiental incorporado e operacional.

De posse dessa visão global, o último passo foi estender essa mais recente iteração do diagrama uma versão final, em que os processos que se encontram na coluna do meio seriam expandidos em cada uma das etapas de cálculo necessárias para sua execução. No próximo subitem deste capítulo, serão descritos os detalhes de cada uma delas juntamente com o processo de produção do código. De qualquer maneira, a produção desse diagrama completou o objetivo inicial de elaborar um mapa para a produção do código do software. A seguir, temos essa versão final.

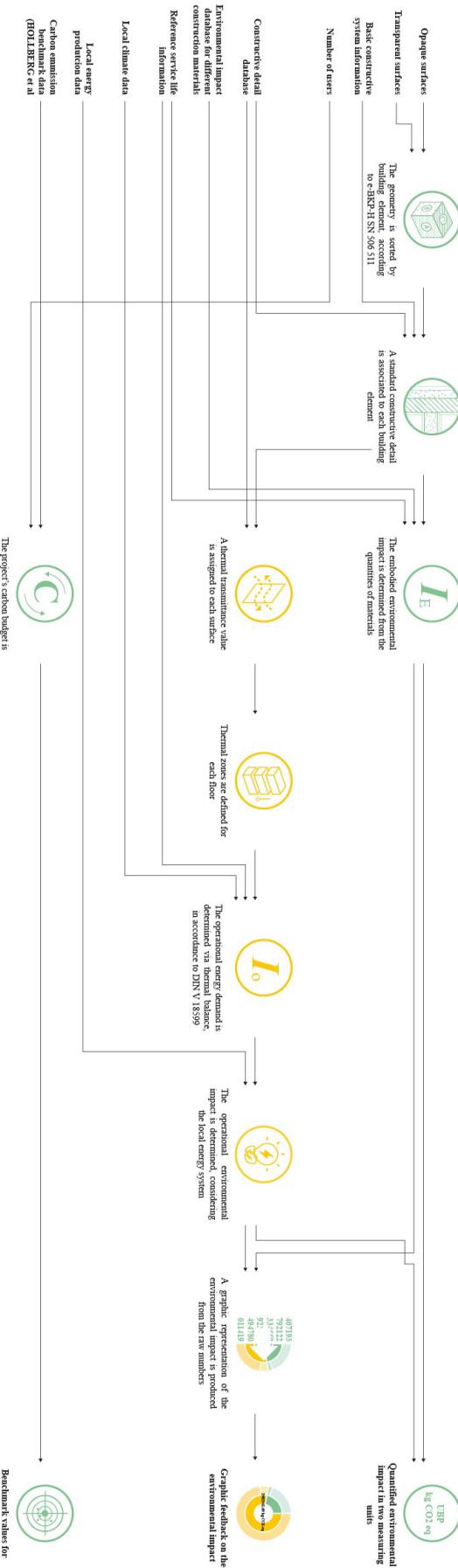


Figura 3: Última iteração do diagrama explicativo sobre o funcionamento do software. Fonte: Acervo do autor.  
Desenvolvimento 13

A última parte deste item será dedicada a discutir três outras questões que também nortearam o processo de concepção do software, mas que não se reconhecem nos diagramas mostrados anteriormente. A primeira delas parte da ideia de que um dos desdobramentos desejados para a produção deste programa era o de que ele pudesse ser utilizado pelo maior número de pessoas possível, a fim de que seu impacto se multiplicasse. Para tanto, de acordo com a bibliografia (BASIC et al., 2019) era necessário com que o software tivesse uma interface simples, um tempo de capacitação baixo, uma integração direta com o processo de design, e um tempo de processamento reduzido. Como, ao ver do autor os softwares atualmente disponíveis no mercado falham em um ou mais destes itens, avançar na direção desses pontos através da criação de um software mais fácil de ser utilizado se tornou um dos grandes objetivos deste trabalho.

A segunda questão parte da observação de que uma análise de ciclo de vida com boa acurácia tão cedo no projeto é quase impossível, uma vez que os dados sobre materiais construtivos, detalhamento de projeto e processos de produção são, quase sempre, desconhecidos nessa fase. Entretanto, como se trata de um software que será utilizado para comparar diversas opções para o mesmo projeto, e não para avaliar individualmente projetos diferentes, é de se esperar que todos esses fatores desconhecidos tenham os mesmos para todas as iterações de design, de modo que podemos desconsiderá-las. Assim, o objetivo deste software deixa de ser providenciar um resultado com a maior acurácia possível, o que seria impossível, e passa a ser conseguir dizer qual das iterações de design tem mais ou menos impacto ambiental.

Por fim, o último ponto a ser levantado é o de que, novamente, como se trata de um software a ser utilizado para comparar diversas opções ao invés de avaliar projetos individuais, algumas simplificações podem ser feitas. Possíveis otimizações de sistemas construtivos, atividades dos usuários decorrentes do programa que acarretem em mudanças no consumo de energia, elementos não estruturais e outros aspectos podem ser desconsiderados, à medida que não só seu impacto seria desconhecido ou muito difícil de determinar, mas também seria o mesmo para todas as iterações do design. Assim, o objetivo passa a ser otimização da forma arquitetônica, que é aquilo que está de fato nas mãos do usuário para o qual o software é pensado.

Depois dessas questões, encerrou-se essa primeira fase voltada ao planejamento, e iniciou-se a etapa de execução de uma primeira versão do software, a ser descrita no item a seguir.

## 4.2 Desenvolvimento da primeira versão

Terminada a etapa de planejamento, deu-se início à programação. Como plataforma e linguagem, escolheu-se escrever o software dentro do ambiente do grasshopper, no software rhinoceros, a fim de facilitar o acesso do grupo alvo à ferramenta, tendo em vista a já grande utilização desse

programa nos escritórios de arquitetura atualmente.

O primeiro passo foi reunir as diversas bases de dados necessárias para realizar os cálculos. Para os valores de carbono incorporado por unidade de massa, havia uma ambição inicial de utilizar dados brasileiros ou de procurar, na bibliografia, um método para adaptar bases estrangeiras para o contexto nacional. Porém, a ausência dos primeiros e a grande dificuldade de se realizar o segundo procedimento fez com que se terminasse por utilizar a base Suíça EcoInvent, disponível abertamente no site da empresa de mesmo nome. Houve uma necessidade de se adaptar o método de cálculo por conta dessa mudança, dado que essa fonte não disponibiliza valores por massa de material e sim por área, porém como não havia se iniciado a escrever o código ainda, isso não causou grandes problemas. Além disso, como o foco do trabalho era desenvolver o programa em si, imagina-se que, no futuro, cada usuário poderá substituir a base de dados utilizada por aquela que melhor lhe convir, de modo que essa mudança também não causará problemas para o usuário final.

De posse dessa base de dados como fonte, selecionou-se os elementos construtivos básicos que são modelados nas etapas iniciais de um projeto de arquitetura, dentre aqueles presentes na norma suíça SIA SN 506 511, que é também aquela sobre a qual está organizada a base de dados escolhida. Os elementos selecionados foram: laje, parede externa, parede interna, janela e telhado. Além disso, selecionou-se quatro sistemas construtivos genéricos o suficiente para que um arquiteto numa etapa inicial de projeto já saiba qual está utilizando, mas com alguma especificidade para fornecer um dado básico para a análise. Os sistemas selecionados foram: estrutura de madeira, estrutura de aço, estrutura de concreto e alvenaria estrutural.

A partir dessas duas listas, escolheu-se um detalhamento arquitetônico genérico para cada elemento construtivo selecionado para cada sistema construtivo selecionado, e se utilizou-se a base de dados da EcoInvent para determinar o impacto ambiental incorporado por metro quadrado de cada um deles, em duas unidades de medida diferentes, CO2 incorporado equivalente [CO2 -eq] e pontos UBP, um sistema de pontuação de impacto ambiental desenvolvido por FRISCHKNECHT et al. (2013). Foram determinados, também, os valores de transmitância térmica de cada um deles, e a soma dessas duas informações foi estruturada em uma tabela e salva em um arquivo de texto a ser utilizado pelo software.

Em outro arquivo, armazenaram-se os dados climáticos e de impacto ambiental da rede elétrica a ser utilizada pelos usuários do edifício, dizendo respeito ao contexto de Zurique, na Suíça, para manter a continuidade local com os dados de impacto ambiental incorporado utilizados. Junto a esses valores, se armazenou também o valor de impacto ambiental de referência per capita determinado por HOLLBERG et al. (2019), e um valor estimado de 100 anos para a vida útil do edifício. Como foi mencionado anteriormente, havia uma ambição de considerar a vida

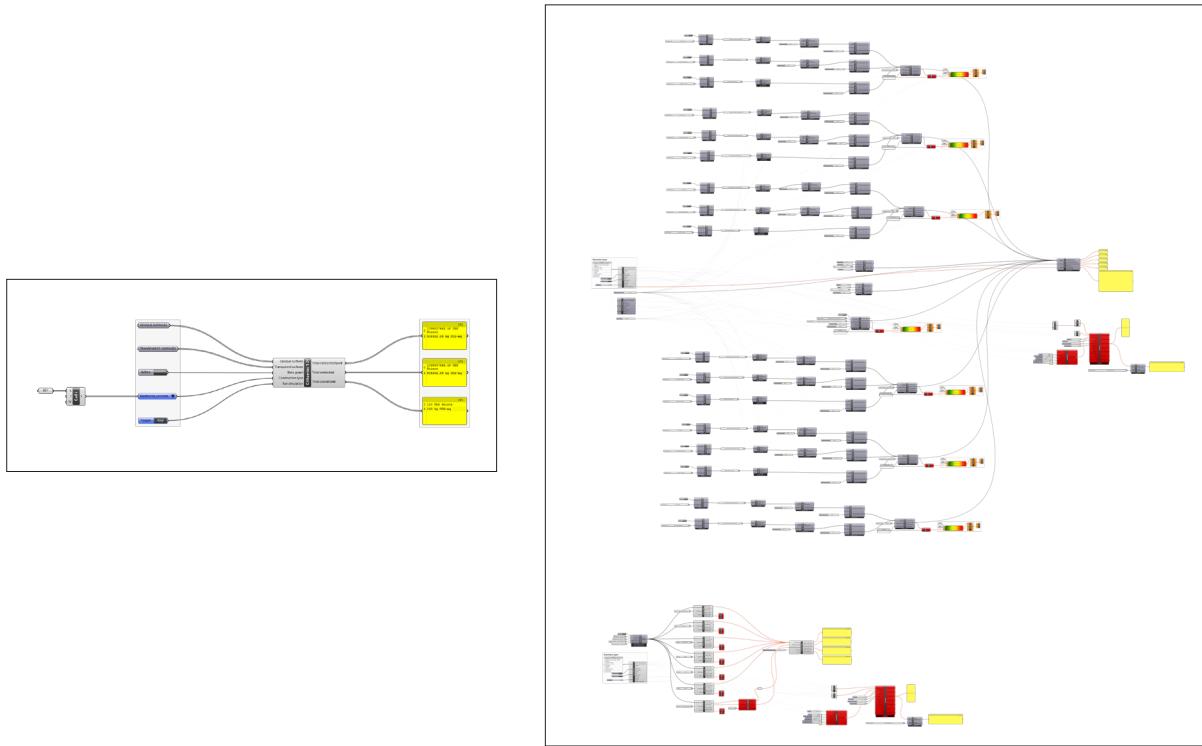
útil de cada material em comparação com a vida útil do edifício, para estimar o impacto ambiental derivado de substituições ao longo do tempo, mas, nessa etapa do projeto, determinou-se que isso seria supérfluo, dado que a informação sobre os materiais utilizados não é preciso a esse ponto, de modo que esse fator foi, então, desconsiderado.

De posse desses dois arquivos, estava completa a compilação da base de dados e tivemos o início da programação em si, feita com base no esquema final apresentado no item anterior. Não é importante entrar nos detalhes de cada operação realizada pelo software, já que eles podem ser observados no esquema, mas existem cinco comentários interessantes a serem feitos sobre essa etapa. O primeiro é o de que, para a primeira versão do software, como se pretendia gastar menos tempo a fim de apresentar um produto em andamento para a entrega parcial do trabalho final, em dezembro de 2021, terminou-se por não utilizar o método QSSM para o cálculo do impacto ambiental operacional, e sim o plugin Ladybug do grasshopper, que necessita de muito mais tempo para realizar os cálculos, mas que também era muito mais fácil de implementar, por conta de sua integração mais forte com o Rhinoceros, pelo menos para a entrega parcial. Além disso, também para permitir o desenvolvimento mais rápido da versão preliminar do programa, decidiu-se não implementar a função de cálculo do valor de impacto ambiental de referência por hora.

Em seguida, é importante ressaltar a primeira operação realizada pelo software, a identificação automática de elementos construtivos. Na maioria dos programas de análise de ciclo de vida encontrados no mercado hoje, o usuário precisa separar manualmente as geometrias de input entre os diferentes elementos construtivos, ou seja, laje, parede externa, janela, etc.. Isso toma um grande tempo, o que, de acordo com (HOLLBERG, 2016) pode levar a um menor grau de utilização do software. Como se deseja evitar isso, desenvolveu-se um script que identifica automaticamente, através de lógica geométrica, os diferentes elementos construtivos dentre as geometrias fornecidas pelo usuário, ou seja, o programa separa automaticamente as superfícies que representam paredes, aquelas que representam lajes, etc. Isso reduz em grande medida o trabalho do usuário, favorecendo uma utilização mais ampla.

Em quarto lugar, nota-se a implementação, no final do código, de um script gerador de uma representação gráfica dos resultados, na forma de um gráfico sunburst, como recomendado pela bibliografia (KISS, SZALAY, 2019)

Por fim, nota-se a interface reduzida com que se desenvolveu o software. Novamente, desejou-se simplificá-la ao máximo, por recomendação da bibliografia, a fim de tornar o programa mais fácil de ser utilizado. Abaixo, temos uma ilustração da interface do software, comparada com a de outro programa de função similar disponível no mercado, e destaca-se o grande salto em simplificação.



Figuras 4 e 5: À esquerda, interface do software desenvolvido neste trabalho na etapa intermediária de desenvolvimento. À direita, a interface de um software similar disponível no mercado. Nota-se o avanço em termos da simplicidade da interface. Fonte: Acervo do autor.

Desse modo, salvo o que foi descrito acima, o código foi escrito ao longo do primeiro semestre de trabalho de acordo com o esquema apresentado anteriormente e completou-se a essa versão preliminar para a entrega parcial do Trabalho Final 1. Para o semestre seguinte, havia a ambição de implementar o cálculo do valor de referência, reestruturar o processo de determinação do impacto ambiental operacional a fim de reduzir o tempo de determinação dos resultados.

#### 4.3 Feedback e novo objetivo

Nesse ponto do desenvolvimento, além de entregar o relatório intermediário e receber feedback de seu discente orientador, o autor teve a oportunidade de apresentar seu trabalho para um conjunto de especialistas na área de análise de ciclo de vida de edifícios em um workshop organizado sobre o tema no escritório onde realizava seu estágio. O feedback recebido nesse workshop foi positivo, mas foram levantados diversos pontos onde poderiam haver melhorias, especialmente na interface e na apresentação dos resultados, a fim de melhorar a integração do software com o processo de projeto de um escritório de arquitetura. Isso levou o autor a adicionar à lista de ambições para o último semestre de desenvolvimento do trabalho a revisão de mais bibliografia para encontrar possíveis mudanças a serem feitas no programa com a intenção de melhorá-lo nesses pontos.

#### **4.4 Segundo semestre e desenvolvimento final**

Motivado pelo feedback obtido durante o recesso de final de ano, o segundo semestre de desenvolvimento deste trabalho se iniciou com uma revisão bibliográfica em busca de ideias para aperfeiçoar a interface do programa em direção a um maior conforto para o usuário. Após a leitura de artigos sobre esse tema, especialmente KISS et al. (2021) citado na revisão bibliográfica, uma lista de possíveis desenvolvimentos com esse objetivo foi elaborada, sendo duas as mais interessantes. A primeira direção que se imaginou foi mudar a plataforma de uso do software de um script no Grasshopper para uma aba do programa Rhinoceros, em busca de trazê-lo mais perto dos usuários finais. Essa proposta pareceu muito promissora, mas o tempo reduzido que se possuía para terminar o trabalho, e concluir as outras disciplinas do semestre, aliado ao grande tempo que se despenderia para reestruturar todo o código nessa nova plataforma tornaram-a pouco praticável, de modo que ela foi descartada. A segunda, mais prática, e que terminou por ser adotada como estratégia de ação foi providenciar uma maior diversidade de formatos de apresentação dos resultados, com um feedback ao vivo no modelo digital em escala de cores indicando para o usuário quais elementos construtivos são responsáveis pelas maiores e menores quantidades de impacto ambiental incorporado; e com a produção de um gráfico de linhas sobrepostas comparativo das diversas opções testadas em uma sessão, permitindo rápida avaliação de quais variações no design trouxeram benefícios para o impacto ambiental do projeto. Entendeu-se que essa aproximação seria menos interessante do que a primeira, mas era a única viável entre as duas apresentadas tendo em vista o cronograma deste trabalho final.

Sendo assim, recapitulando os últimos dois itens, havia portanto três ambições na última etapa de desenvolvimento do trabalho: implementar as melhorias de apresentação citadas no último parágrafo, reestruturar o processo de determinação do impacto ambiental operacional e implementar o cálculo do valor de referência. Agora, será descrito o que foi feito acerca de cada uma delas.

Em primeiro lugar, decidiu-se por cortar a implementação do cálculo do valor de referência. Entendeu-se que, por se tratar, como já mencionado antes, de uma análise de ciclo de vida com baixa acurácia e com o foco em fornecer resultados mais voltados a comparações do que a estudos de valores absolutos, o valor de referência não teria grande utilidade. Assim, essa ambição foi descartada.

Em seguida, notou-se que, em função do tempo despendido na nova revisão bibliográfica, não seria possível, por conta das restrições de cronograma de entrega do TFG, desenvolver os dois outros objetivos de maneira adequada. Sendo assim, foi necessário fazer uma escolha, e, por conta do esforço já colocado na pesquisa de novas possibilidades da apresentação, o autor es- colheu deixar de lado também a reestruturação do cálculo do impacto ambiental operacional.

Após essas reduções, porém, a implementação das melhorias planejadas para a apresentação dos dados ocorreu tranquilamente dando bons resultados, de modo que o usuário poderia, agora, visualizar de maneira muito mais simples o impacto relativo de cada elemento construtivo no impacto ambiental incorporado, através das cores colocadas nas suas superfícies, além de comparar os resultados de múltiplas opções de maneira instantânea com o gráfico de linhas sobrepostas. Imagens de todos esses aspectos serão providenciadas no item seguinte. Além disso, o autor foi capaz de otimizar, também, alguns outros processos realizados pelo programa, o que reduziu o tempo necessário para as simulações pela metade, atingindo por volta de 30 segundos por simulação, um valor baixo comparado com a performance de outros softwares com o mesmo objetivo disponíveis no mercado. Assim, o processo de confecção do código foi terminado. A seguir, temos duas imagens, apresentando respectivamente, a interface final e o código como um todo.

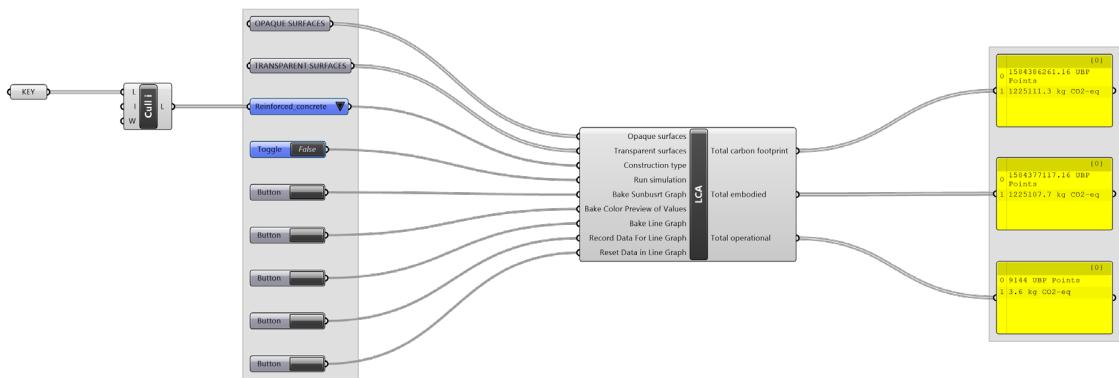


Figura 6: Interface final do software desenvolvido neste trabalho. Fonte: Acervo do autor.

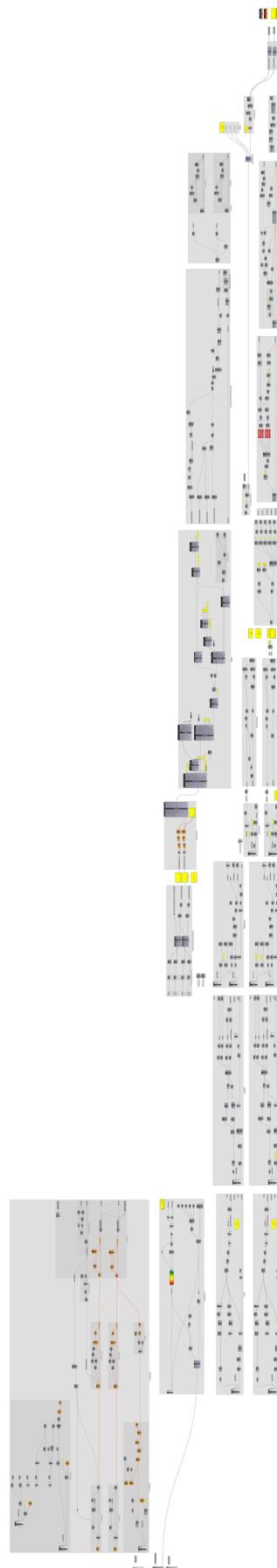


Figura 7: Código do software desenvolvido neste trabalho. Fonte: Acervo do autor.

## 5. Estudo de Caso

Neste item, será discutido um estudo de caso em que o software objeto deste trabalho foi utilizado para estudar o impacto ambiental de diversas opções de design elaboradas para um projeto em um lote hipotético. Os resultados serão analisados, e, em seguida, no próximo item, eles serão utilizados para discutir se o programa atende, de fato, aos objetivos a que ele se propunha.

O terreno utilizado para esse estudo se encontra em Zurique, na Suíça. Há ocupação dos quarteirões no entorno, mas ela não é densa o suficiente para gerar um sombreamento considerável. O uso tanto do edifício estudado quanto daqueles ao seu redor não é relevante, posto que o esse dado não é considerado na análise de ciclo de vida. Pelo mesmo motivo, não há necessidade de mais condições de contorno. A seguir, temos uma planta do lote e de seu entorno.

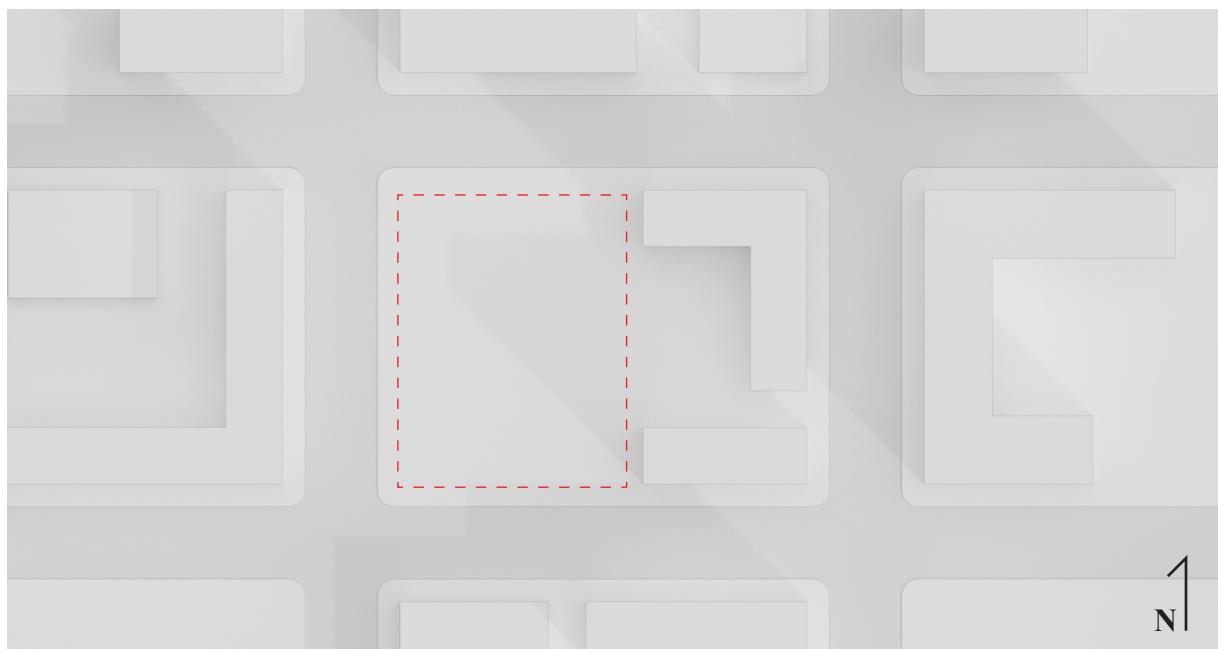


Figura 8: Planta do entorno a ser utilizado neste estudo de caso. Temos uma indicação do terreno, em vermelho, e uma indicação da direção norte no canto inferior direito. Fonte: Acervo do autor.

Posto esse contexto, preparam-se 20 opções de design para serem testadas pelo software no total, ilustradas a seguir. Elas variam em tamanho e em complexidade da geometria, a fim de testar quão robusto é o software, especialmente o separador automático de elementos construtivos, mencionado no item 4.1, perante a organizações diferentes. A seguir, temos perspectivas axonométricas dessas opções. Para este cálculo, considerou-se o concreto armado como sistema construtivo de todas as variações.

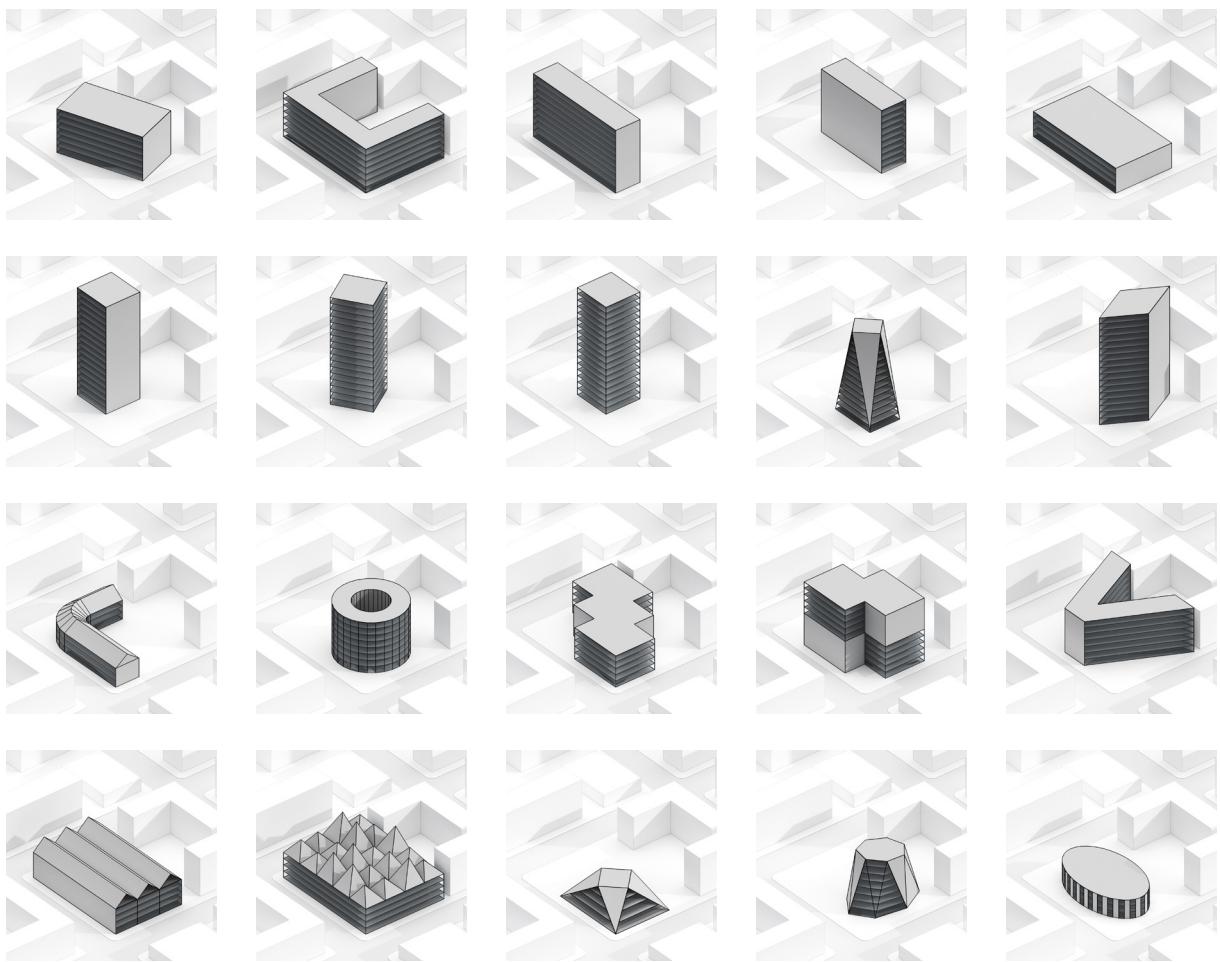


Figura 9: Ilustração das 20 opções testadas no estudo de caso. Fonte: Acervo do autor.

As simulações foram, então, realizadas para esses 20 modelos. Dentre eles, software foi capaz de interpretar corretamente 16, atingindo uma taxa de sucesso de 80%. O tempo médio das simulações, como já mencionado, foi de 30 segundos. A seguir, temos os resultados dessas simulações, nas três formas de apresentação que o programa oferece, o gráfico sunburst, o gráfico de linhas sobrepostas e a visualização do desempenho de cada elemento construtivo em cores nos modelos.

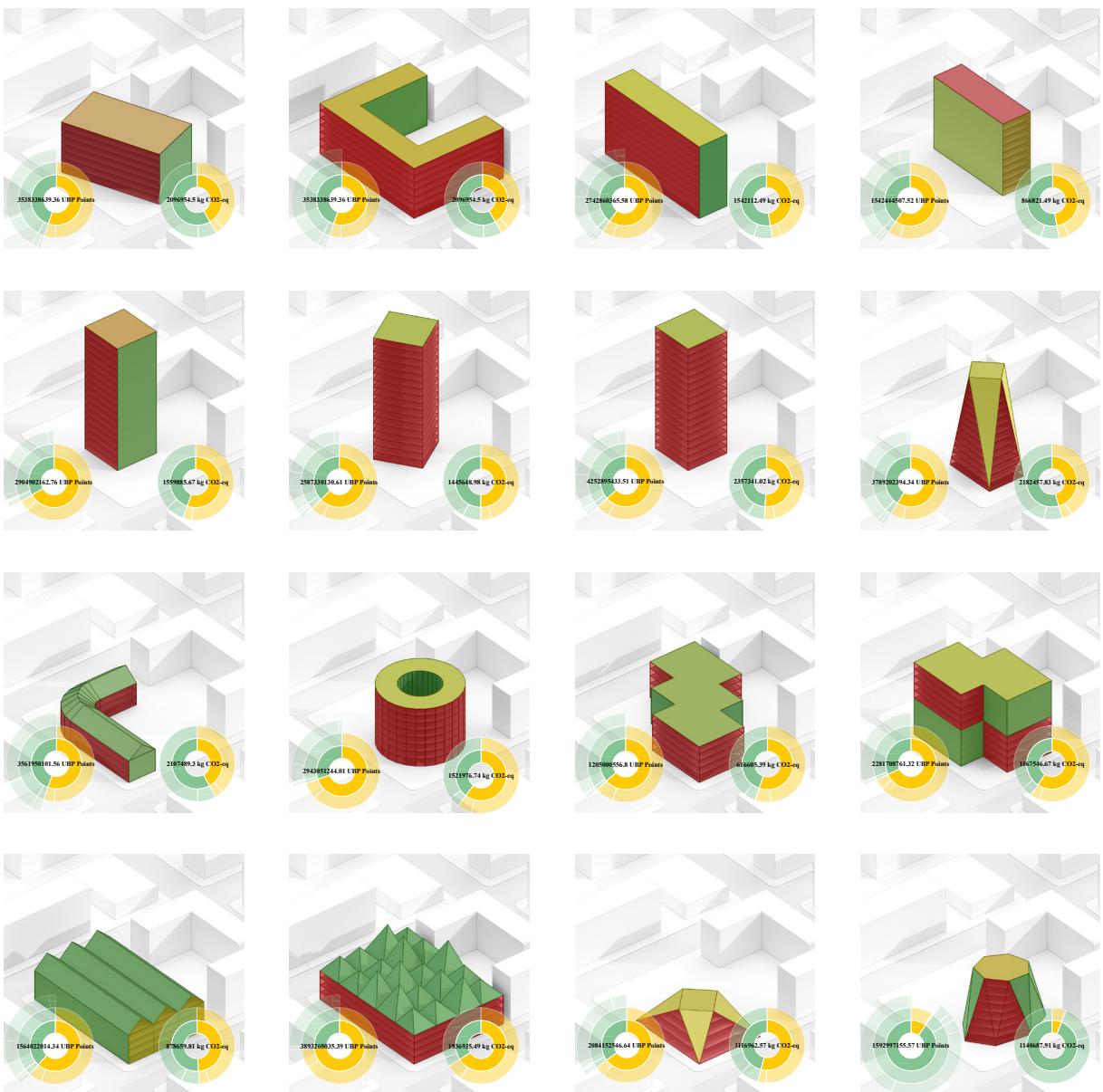


Gráfico Comparativo

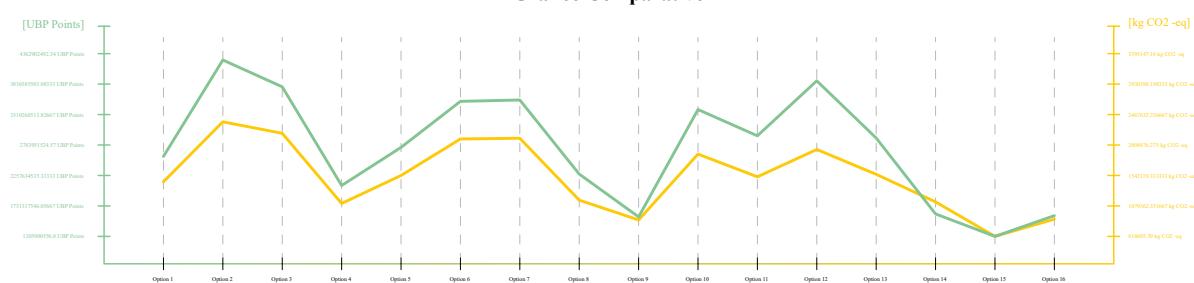


Figura 10: Resultados da simulação para as 16 opções analisadas com sucesso. Fonte: Acervo do autor.

Os resultados mostram uma ampla gama de valores de impacto ambiental para as duas unidades de medida, o que era de se esperar para um conjunto de opções com áreas construídas tão distintas. O gráfico de linhas sobrepostas nos permite avaliar rapidamente que, dentre elas, o melhor desempenho foi alcançado pela opção de número 15, enquanto a de número 2 mostrou a pior performance. Através do modelo 3D em cores, por sua vez, pode-se observar que, nas opções com grandes áreas de fachada com janela, estes elementos construtivos são responsáveis por grande parte do carbono incorporado. Por fim, os valores numéricos mostram como as diferentes disposições das aberturas na fachada têm um grande impacto sobre o impacto ambiental operacional, com as opções de design com mais área de janela necessitando, em geral, de mais energia elétrica para manter o conforto térmico.

## 6. Considerações finais

Neste item, os resultados obtidos no estudo de caso serão discutidos de maneira mais ampla, para além do caso específico exposto, com o intuito de avaliar se o software desenvolvido neste trabalho cumpre os objetivos a que se propunha de início. Com esse objetivo, propõe-se uma análise guiada por dois aspectos principais. O primeiro deles é se o programa, de fato, é capaz de se inserir no processo de design sem a necessidade de um grande esforço. Nesse sentido, temos alguns pontos positivos e algumas oportunidades para melhorar. De fato, a interface simplificada do software permite uma utilização razoavelmente intuitiva, sem necessidade de treinamento muito intenso, mesmo para os arquitetos que não possuem muita experiência em análise computacional. Além disso, seus resultados são calculados rapidamente e com boa consistência, como foi observado no estudo de caso. Esses fatores facilitam sua utilização, permitindo que os responsáveis pelo projeto o incorporem em seus fluxos de trabalho. Entretanto, existe ainda um grande espaço para melhorias, tendo em vista que seu funcionamento atrelado ao plugin grasshopper do software Rhinoceros ainda restringe muito a sua utilização, embora se tratem de programas de CAD razoavelmente populares. Além disso, ainda que sua interface possa representar um grande avanço em relação aos outros softwares presentes no mercado, o argumento de que ela poderia ser mais gráfica e atrativa continua válido, havendo ainda muita possibilidade de desenvolvimento.

O segundo aspecto em que o software será avaliado é se os seus resultados oferecem, de fato, insumos úteis ao processo de design, possibilitando a otimização do impacto ambiental almejada. Nesse sentido, as diferentes formas de apresentações oferecem uma grande vantagem, proporcionando facilidade em tirar conclusões, como foi observado no estudo de caso, em que o gráfico de linhas sobrepostas mostrou rapidamente quais opções de design possuíam a melhor performance e quais poderiam ser descartadas. Além disso, o feedback em cores dá um feedback importante, e permite que o usuário entenda onde seu projeto pode melhorar no âmbito do carbono incorporado. Uma oportunidade para futuros desenvolvimentos seria encontrar uma maneira de fornecer, da mesma forma, uma direção para melhorar o impacto ambiental operacional do edifício, e outros indicadores que possam fornecer direções mais claras para reduzir o impacto ambiental incorporado. Por fim, o gráfico sunburst permite avaliar facilmente os aspectos em que cada opção deixa a desejar, se é necessário pensar em estratégias para melhorar a ventilação natural do edifício, ou para aumentar seu isolamento, por exemplo.

Tendo em vista esses dois aspectos, pode-se dizer que o desenvolvimento realizado por este trabalho em relação ao desempenho dos outros programas disponíveis no mercado, observados na bibliografia, foi positivo, mas ainda há oportunidades para grandes avanços. Espera-se que o desenvolvimento de ferramentas e de outras ações desse tipo possam contribuir, no futuro, para uma produção mais sustentável do ambiente construído.

## 7. Bibliografia

AZARI, R.; ABBASABADI, N. Embodied energy of buildings: A review of data, methods, challenges, and research trends. *Energy and Buildings*, v. 168, p. 225–235, jun. 2018.

BASBAGILL, J. et al. Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts. *Building and Environment*. Elsevier BV, fev. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.009>>

BASBAGILL, J. P.; FLAGER, F.; LEPECH, M. Measuring the impact of dynamic life cycle performance feedback on conceptual building design. *Journal of Cleaner Production*. Elsevier BV, out. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.231>>

BASIC, S. et al. A design integrated parametric tool for real-time Life Cycle Assessment – Bombyx project. ETH Zurich, 2019.

BIGALKE, U. et al. Der dena Gebäudereport 2012. Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2012

CAVALLIERE, C. et al. Continuous BIM-based assessment of embodied environmental impacts throughout the design process. *Journal of Cleaner Production*, v. 211, p. 941–952, fev. 2019.

CERDAS, F. et al. Improved Visualization in LCA Through the Application of Cluster Heat Maps. *Procedia CIRP*. Elsevier BV, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.160>>

DIN V 18599:2011 Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwasser und Beleuchtung. Deutsches Institut für Normung, 2011

FRISCHKNECHT R., BÜSSEL KNÖPFEL, S. (2013): Swiss Eco-Factors 2013 according to the Ecological Scarcity Method, Federal Office for the Environment FOEN, öbu - works for sustainability, Bern

HABERT, G., HOLLBERG, A., VOGEL, P. Environmental design - Lessons learned from teaching LCA. *eCAADe RIS 2018 Sustainable Computational Workflows*, 2018.

HESTER, J. et al. Actionable insights with less data: guiding early building design decisions with streamlined probabilistic life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle*

Assessment, v. 23, n. 10, p. 1903–1915, 8 jan. 2018.

HOLLBERG, A. A parametric method for building design optimization based on Life Cycle Assessment. Bauhaus-Universität, Weimar, 2016.

HOLLBERG, A. EBERT, M. & SCHÜTZ, S. & CICEK, B. & GUMPP, R. & RUTH, J. Application of a parametric LCA tool in students' design projects. Sustainable Built Environment Conference SBE16 Hamburg, 2016.

HOLLBERG, A.; RUTH, J. LCA in architectural design - a parametric approach. The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 21, n. 7, p. 943–960, 24 fev. 2016.

HOLLBERG, A. et al. A data-driven parametric tool for under-specified LCA in the design phase. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 588, p. 052018, 21 nov. 2020.

HOLLBERG, A.; LÜTZKENDORF, T.; HABERT, G. Top-down or bottom-up? – How environmental benchmarks can support the design process. Building and Environment, v. 153, p. 148–157, abr. 2019.

HOLLBERG, A. et al. LCA benchmarks for decision-makers adapted to the early design stages of new buildings. ETH Zurich, 2018.

HOLLBERG, A. et al. Review of visualising LCA results in the design process of buildings. Building and Environment. Elsevier BV, mar. 2021. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107530>>

IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.

KBOB, Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2016, 2016.

KISS, B.; SZALAY, Z. A Visual Method for Detailed Analysis of Building Life Cycle Assessment Results. Applied Mechanics and Materials, v. 887, p. 319–326, jan. 2019.

ÜTZKENDORF, T. et al. Net-zero buildings: incorporating embodied impactsBuilding Research & InformationInforma UK Limited, , 18 jul. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/09613218.2014.935575>>

MEEX, E. et al. Requirements for applying LCA-based environmental impact assessment tools in the early stages of building design. *Building and Environment*, v. 133, p. 228–236, abr. 2018.

MIYAMOTO, A.; ALLACKER, K.; DE TROYER, F. Visual tool to integrate LCA and LCC in the early design stage of housing. *OP Conference Series: Earth and Environmental Science*. OP Publishing, 1 ago. 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012161>>

OTTO, H. E.; MUELLER, K. G.; KIMURA, F. Efficient Information Visualization in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Springer Science and Business Media LLC, jul. 2003. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/BF02978468>>

RESCH, E. et al. An analytical method for evaluating and visualizing embodied carbon emissions of buildings. *Building and Environment*. Elsevier BV, jan. 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106476>>

RÖCK, M. et al. LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages. *Building and Environment*. Elsevier BV, ago. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.006>>

SIA, SIA 2040: SIA-Effizienzpfad Energie, 2017.

SIA, SN 506 511: Elementbasierter baukostenplan hochbau, 2012.

SILVESTRE, J. D. et al. NativeLCA - a systematic approach for the selection of environmental datasets as generic data: application to construction products in a national context. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 20, n. 6, p. 731–750, 28 abr. 2015.

TECCHIO, P. et al. Streamlining the Life Cycle Assessment of Buildings by Structured Under-Specification and Probabilistic Triage. *Journal of Industrial Ecology*, v. 23, n. 1, p. 268–279, 27 jan. 2018.

TECCHIO, P. et al. Structured Under-Specification of Life Cycle Impact Assessment Data for Building Assemblies. *Journal of Industrial Ecology*, v. 23, n. 2, p. 319–334, 13 mar. 2018.

