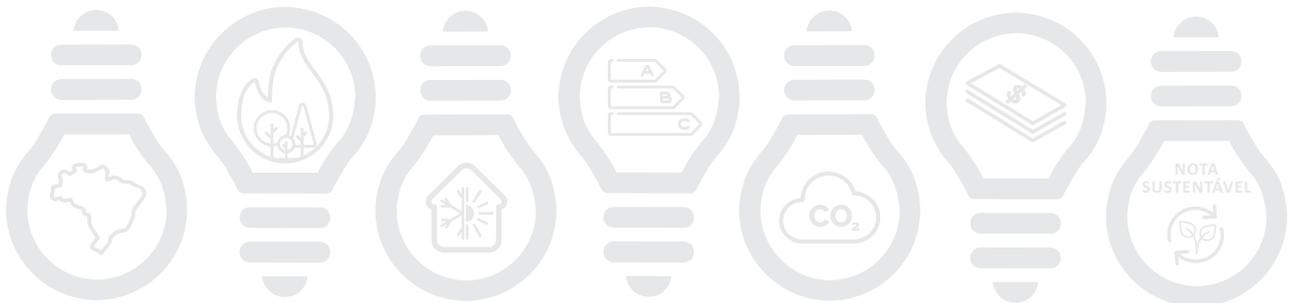


UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO

**ANÁLISE INTEGRADA DE DESEMPENHO
ENERGÉTICO, IMPACTO AMBIENTAL E CUSTO:**
ESTUDO DE SOLUÇÕES DE FACHADA PARA EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS NO BRASIL



ROSILENE REGOLÃO BRUGNERA

SÃO CARLOS
2018

ROSILENE REGOLÃO BRUGNERA

Análise integrada de desempenho energético, impacto ambiental e custo:
estudo de soluções de fachada para edifícios de escritórios no Brasil

Versão Corrigida

Tese apresentada à Comissão Examinadora, como requisito para obtenção do título de Doutora em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, IAU-USP.

Área de concentração: Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia

Orientadora: Profa. Dra. Karin Maria Soares Chvatal

Coorientador: Prof. Dr. João Adriano Rossignolo

São Carlos

2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Instituto de Arquitetura e Urbanismo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

BB891a Brugnera, Rosilene Regolão
Análise integrada de desempenho energético, impacto ambiental e custo: estudo de soluções de fachada para edifícios de escritórios no Brasil / Rosilene Regolão Brugnera; orientadora Karin Maria Soares Chvatal; co-orientador João Adriano Rossignolo. -- São Carlos, 2018.
282 p.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2018.

1. Eficiência Energética. 2. Impactos Ambientais. 3. Avaliação do Ciclo de Vida. 4. MARS-SC. 5. Análise de Custo Ótimo. I. Chvatal, Karin Maria Soares, orient. II. Rossignolo, João Adriano, co-orient. III. Título.

Bibliotecária responsável pela estrutura de catalogação da publicação de acordo com a AACR2:
Brianda de Oliveira Ordonho Sígolo - CRB - 8/8229

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Rosilene Regolão Brugnera**

Título da tese: **“Análise integrada de desempenho energético, impacto ambiental e custo: estudo de soluções de fachada para edifícios de escritórios no Brasil”.**

Data da defesa: **18/06/2018**

Orientador: Profa. Dra. Karin Maria Soares Chvatal

Comissão Julgadora:

Resultado:



Profa. Dra. Karin Maria Soares Chvatal
(IAU/USP)

Não votante



Profa. Dra. Kelen Almeida Dornelles
(IAU/USP)

APROVADA



Profa. Dra. Akemi Ino
(IAU/USP)

APROVADA -



Profa. Dra. Cristiane Bueno
(DECiv/ UFSCar)

APROVADA



Prof. Dr. Ricardo Mateus
(Universidade do Minho)

APROVADA



Profa. Dra. Sandra Maria G. M. da Silva
(Universidade do Minho)

APROVADA

Coordenadora e Presidente da Comissão de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo: **Prof. Dr. Tomás Antonio Moreira.**

Aos meus pais, Rosilene e Edgard, por tudo o que fizeram (e fazem) por mim até hoje.

Ao Andrey, por todo o amor e companheirismo, para que eu pudesse alcançar meus sonhos, que na verdade, são nossos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo dom da vida e pela força que me concedeu ao longo dessa trajetória, me guiando e me provendo paz, sabedoria e paciência, para passar por todas as etapas que me trouxeram até aqui.

Agradeço aos meus pais, Rosilene e Edgard, por todo o apoio e incentivo em toda a minha vida. Deixo aqui registrado uma homenagem ao meu pai que, em todas as vezes que me levava para escola, sempre se despedia de mim dizendo “Estude bastante, para um dia ser doutora!”. De alguma forma essas palavras transcenderam o tempo e para cá me encaminharam.

Agradeço ao Andrey, pelo amor, carinho, apoio e incentivo em todos esses nossos anos de caminhada, o qual tão pacientemente sempre me ajuda a enxergar o lado bom de tudo (nos erros e acertos), por sempre ter junto a frase “calma, tudo vai dar certo”, para que eu conseguisse alcançar meus sonhos, que na verdade, são nossos.

Agradeço à minha família, irmão e irmã, cunhados e cunhadas, sobrinhas, primos e primas, tios e tias, sogro e sogra, avôs e avós (*in memoriam*), que sempre me apoiaram, me ensinaram (e ainda me ensinam) o que há de melhor, aceitando muitas vezes a minha ausência, para que eu pudesse chegar até aqui.

Agradeço à tantos amigos que Deus colocou no meu caminho ao longo dessa trajetória de vida. Aos queridos(as) Adriana Almeida, Ana Favretto, Ana Cordeiro, Ana Mucci, Camila Anchieta, Caroline Santesso, Carlos Pereira, Cristiane Bueno, Debora Verniz, Hector Marin, Jacqueline Souza, Kamila Lima, Marieli Lukiantchuki, Maryá Aldrigue, Michele Rossi, Pedro Mattia, Priscila Tavares, Raquel Arata, Rodrigo Japur e Tássia Marques, muito obrigada pela amizade e pelo aprendizado diário!!

Agradeço à Profa. Karin M. S. Chvatal, por todo o apoio e incentivo me concedido ao longo desses 9 anos de trabalho em conjunto. Muito obrigada por acreditar no meu trabalho, quando eu ainda nem sabia o que era pesquisa (desde a iniciação científica), por pacientemente me orientar e me guiar para o melhor caminho, sempre.

Agradeço ao Prof. João Adriano Rossignolo, que aceitou inicialmente me orientar nesta pesquisa de doutorado, tornando-se coorientador posteriormente, e me incentivou desde o início a aceitar o desafio de pesquisar algo que eu não tinha conhecimento, mas que via em mim a certeza de que essa pesquisa daria certo. Agradeço também ao Prof. Aldo R. Ometto, por todo o ensinamento passado ao longo da disciplina de Engenharia do Ciclo de Vida.

Agradeço ao Prof. Ricardo Mateus, da Universidade do Minho (Portugal) que tão prontamente aceitou entrar nessa pesquisa conosco, sempre auxiliando, incentivando e “iluminando” os meus caminhos tanto no Brasil, quanto em Portugal. Muito obrigada por tudo que fizeste por mim! Deixo aqui registrado

um agradecimento a todo o grupo de pesquisa do CTAC- UMinho, por terem me recebido tão bem e me auxiliado no que foi necessário, especialmente a Profa. Sandra M. Silva, que muito me ensinou, no pouco tempo que convivemos.

Agradeço também aos amigos que Portugal me concedeu para a vida: Fernanda Follmann, Filipa Ribeiro (e tantos outros que conheci por intermédio dela), Géremi Dranka, Giovane Gurgel, Katieli e Fábio Micene, Luciana Assumpção, Maria do Carmo e Carlos Alberto, Renato Silva, Tâmara Martins e Pedro Pedrosa. Muito obrigada por me acolherem tão bem, me ajudarem no que precisei e caminharem comigo enquanto estive em Portugal, e agora, aqui no Brasil!

Agradeço a todos os funcionários do Instituto de Arquitetura e Urbanismo, os quais sempre prontamente me ajudaram no que foi necessário! Deixo um agradecimento especial às queridas Andreia, Mara e Flávia, por todo o apoio me concedido ao longo do doutorado, sobretudo no processo de doutorado-sanduíche!

Agradeço às empresas e fornecedores (são muitos) que me auxiliaram tirando dúvidas, enviando materiais explicativos, para que meu doutorado pudesse ser realizado. Deixo meu agradecimento especial ao Márcio Marques, da *Visual Urban*, que aceitou me auxiliar no levantamento e detalhamento dos materiais referentes às esquadrias e à Fachada Cortina. Nesse contexto, agradeço aos Professores Fernando Westphal, Letícia Neves e Vanessa Bessa, por sempre responderem prontamente às minhas dúvidas, auxílios que foram imprescindíveis para o bom desenvolvimento dessa pesquisa.

Por fim, agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela bolsa me concedida ao longo de todo o Doutorado e à bolsa referente ao processo de Doutorado-sanduíche no exterior.

“[...] A viagem não acaba nunca. Só os viajantes acabam. E mesmo estes podem prolonga-se em memória, em lembrança, em narrativa. Quando o viajante se sentou na areia da praia e disse: “Não há mais que ver”, sabia que não era assim. O fim duma viagem é apenas o começou doutra. É preciso ver o que não foi visto, ver outra vez o que se viu já, ver na primavera o que se vira no verão, ver de dia o que se viu de noite, com sol onde primeiramente a chuva caía, ver a seara verde, o fruto maduro, a pedra que mudou de lugar, a sombra que aqui não estava. É preciso voltar aos passos que foram dados, para os repetir, e para traçar caminhos novos ao lado deles. É preciso recomeçar a viagem. Sempre. [...]” (José Saramago, *Viagem a Portugal*, p. 492-493)

RESUMO

BRUGNERA, Rosilene Regolão. **Análise integrada de desempenho energético, impacto ambiental e custo: estudo de soluções de fachada para edifícios de escritórios no Brasil.** 2018. 282 p. Tese de Doutorado. Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Mundialmente, o setor da construção civil é um dos principais responsáveis pelo consumo de energia primária e emissão de CO₂. No Brasil, cerca de 48,5% do consumo de energia elétrica advém do setor de edificações, sendo os edifícios comerciais responsáveis por 14,4% deste valor. Nesse contexto, as características da fachada – considerada o maior elemento construtivo nos edifícios comerciais –, influenciam diretamente o consumo energético e os impactos ambientais desse tipo de edificação. Por conta disso, o investimento em políticas que promovam a eficiência energética pode ser considerado a chave para o desenvolvimento sustentável e mitigação das alterações climáticas. Diversos acordos mundiais, como o Protocolo de Kyoto, a Diretiva Europeia 2010/31/EU (com os renomados objetivos “20-20-20”) e o Anexo 57, da Agência Internacional de Energia (IEA), estabeleceram limites para as emissões de CO₂, redução do consumo de energia, investimento na produção de energias renováveis e métodos para avaliar a energia incorporada e as emissões de CO₂ dos edifícios. Dentre os sistemas utilizados para avaliar e produzir edificações mais sustentáveis, destaca-se a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Essa técnica é capaz de fazer uma avaliação holística de todo o ciclo de vida um produto, identificando elementos que impactam o meio ambiente. Através dela, evidencia-se o do consumo energético advindo da fase de uso da edificação como um fator importante no ciclo de vida de um edifício, que pode gerar impactos ambientais significativos. Assim, uma série de ferramentas estão disponíveis no sentido de integrar a avaliação do desempenho energético ao ambiental, dentre elas, destacam-se para a presente pesquisa as metodologias MARS-SC e a Análise de Custo Ótimo. A primeira é uma análise multicritério, que realiza a normalização dos impactos ambientais (calculados na ACV) por categorias de indicadores, enquanto a segunda prevê um estudo de otimização entre um cenário-base e vários cenários de reabilitação energética, considerando custo, emissões de CO₂ e consumo de recursos energéticos. Com isso, o objetivo dessa pesquisa consiste na avaliação integrada do consumo de energia, impactos ambientais e custo, ao longo do ciclo de vida de distintas soluções (288 cenários) de fachada de edifícios de escritórios no Brasil por meio de metodologias de análises multicritério (MARS-SC) e Custo Ótimo. Para os cenários de análise, foram calculados o consumo energético e a quantidade de materiais- que geraram os impactos ambientais e os custos. Os resultados indicaram a importância da fase de uso no ciclo de vida do edifício, a qual foi responsável por cerca 70% em média das emissões de CO₂ ao longo de 60 anos de utilização do edifício. Tal impacto se refletiu no custo do ciclo de vida das soluções construtivas, pois os cenários com maior consumo energético na fase de uso causaram um grande impacto no custo operacional. Dentre os parâmetros avaliados em cada cenário, o tipo de fachada e a porcentagem de abertura na fachada foram os que mais influenciaram os resultados, em todos os aspectos (energético, ambiental e custo). Os cenários com Fachada Tradicional foram os que obtiveram os melhores desempenhos, enquanto que o de Fachada Cortina, PAF de 80%, vidro incolor e sem dispositivo de sombreamento foi o de maior consumo energético, mais impactante ambientalmente e mais caro. Em contrapartida, o uso de dispositivos de sombreamento, apesar de aumentar as emissões de CO₂ na fase de pré-uso, reduziu o consumo energético na fase de uso da edificação. Este fato promoveu, no balanço final, reduções dos impactos ambientais totais e do custo das soluções construtivas, ou seja, a redução do custo operacional se sobrepôs ao custo de construção. Dessa forma, ter como premissa a eficiência energética atrelada ao projeto arquitetônico, pode garantir edifícios melhores não apenas energeticamente, mas também ambiental e economicamente. Tal fato pode impactar não apenas um edifício isolado, mas todo um conjunto edificado de um bairro, uma cidade ou mesmo um país.

Palavras-chave: Eficiência energética, Impactos ambientais, Avaliação de ciclo de vida, MARS-SC, Análise de Custo Ótimo.

ABSTRACT

BRUGNERA, Rosilene Regolão. **Integrated analysis of energy performance, environmental impact and cost: study of façade's solutions for office buildings in Brazil.** 2018. 282 p. PhD Thesis. Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Globally, the construction industry is one of the main sectors responsible for primary energy consumption and CO₂ emissions. In Brazil, about 48.5% of electricity consumption comes from the building sector, with commercial buildings representing 14.4% of this value. In this context, the characteristics of the façade- considered the greatest constructive element in commercial buildings- directly influence energy consumption and the environmental impacts of this type of building. As a result, investment in policies that promote energy efficiency can be considered the key to sustainable development and climate change mitigation. Several global agreements, such as the Kyoto Protocol, the European Directive 2010/31 / EU (with the well-known "20-20-20" objectives) and Annex 57, from the International Energy Agency (IEA), have established limits to CO₂ emissions, energy consumption reduction, investments in production of renewable energy and methods for assessing a building's incorporated energy and CO₂ emissions. Among the systems used to evaluate and create more sustainable buildings, the Life Cycle Assessment (LCA) stands out. This technique can make a holistic assessment of a product's entire life cycle and identify issues that impact the environment. This method makes it evident that the energy consumption yielding from the building's use phase is an important factor in the building's life cycle, bringing significant environmental impacts. Among all the tools available to integrate the evaluation of energy with environmental performance, MARS-SC Methodology and Cost Optimum Analysis stand out on this research. The first is a multicriteria analysis, which performs the normalization of environmental impacts by indicator's categories, while the second one provides an optimization study between a baseline scenario and several energy rehabilitation ones, considering cost, CO₂ emissions and energy resources consumption. The objective of this research is to assess the integrated energy consumption, environmental impact and cost of different life cycle façade solutions (288 scenarios) from office buildings in Brazil through methodologies of multi-criteria analysis (MARS-SC) and Cost Optimum Analysis. For the analysis scenarios, the energy consumption and material quantities- which generated the environmental impacts and costs- were calculated. The results showed the importance of a building's life cycle's use phase, which represented an average of 70% in CO₂ emissions. This impact was reflected in the life cycle cost of construction solutions, as the scenarios with higher energy consumption in the use phase caused the major operating costs impact. Among the parameters evaluated, for each scenario, the type of façade and the window-to-wall ratio were the ones that most influenced the results in all aspects (energy, environmental and cost). The Traditional Façade scenarios obtained the best performance, while the Curtain Façade, WWR 80%, colorless glass without shading devices had the highest energy consumption, more expensive and more environmentally impacting. In contrast, the use of shading devices, despite of increasing CO₂ in the pre-use phase, reduced energy consumption in the building's use phase. This fact showed, on ending accounts, reductions in the total environmental impact and cost of construction solutions, i.e. the reduction of operating costs surpassed the cost of construction. Thus, the premise of having energy efficiency linked to the architectural project can guarantee better buildings, not only energetically, but also environmentally and economically. This may impact not only one building, but a whole group of buildings within a neighborhood, a city or even a country.

Keywords: Energy Efficiency, Environmental Impacts, Life Cycle Assessment, MARS-SC, Cost Optimum Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etapas de desenvolvimento da tese.....	41
Figura 2: Oferta de energia no Brasil por fonte em 2016.	45
Figura 3: Oferta interna de energia elétrica no Brasil em 2016.	46
Figura 4: Oferta interna de energia elétrica por fonte: matriz elétrica brasileira.	47
Figura 5: Consumos energéticos em edificações por uso final.....	49
Figura 6: Estágios do ciclo de vida.....	66
Figura 7: Procedimentos de realização da ACV.	66
Figura 8: Indicadores de categorias de impacto.	68
Figura 9: Ciclo de vida energético de uma edificação.	70
Figura 10: Avaliação integrada ao ciclo de vida do edifício.	88
Figura 11: Etapas da simulação no <i>EnergyPlus</i>	106
Figura 12: Planta do pavimento tipo.	111
Figura 13: Consumo de energia total anual por uso final.....	122
Figura 14: Aumento do consumo de energia do ar condicionado em função da alteração do tipo de fachada (de FT para FC) para (a) Curitiba, (b) São Paulo e (c) Manaus.	124
Figura 15: Resultado das variações dos parâmetros da fachada no consumo do ar condicionado (AC).	138
Figura 16: (a) Contribuição das etapas de pré-uso e uso e (b) evolução das emissões de CO ₂ , em todos os cenários de análise para o clima de Curitiba (CTBA).....	158
Figura 17: (a) Contribuição das etapas de pré-uso e uso e (b) evolução das emissões de CO ₂ , em todos os cenários de análise para o clima de São Paulo (SP).	159
Figura 18: (a) Contribuição das etapas de pré-uso e uso e (b) evolução das emissões de CO ₂ , em todos os cenários de análise para o clima de Manaus (MN).	160
Figura 19: Contribuição dos materiais para as emissões de CO ₂ , sendo (a) cenário com menores emissões; e (b) cenário com maiores emissões.....	161
Figura 20: Aumento (em porcentagem) das emissões de CO ₂ em função da variação do tipo de fachada (de FT para FC) para (a) Curitiba, (b) São Paulo e (c) Manaus.	163
Figura 21: Resultado das variações dos parâmetros da fachada nas emissões de CO ₂	171
Figura 22: Estrutura da metodologia MARS-SC.	176
Figura 23: Perfil sustentável (a solução em estudo é mais sustentável do que a solução de referência).	180
Figura 24: Perfil sustentável (a solução em estudo é menos sustentável do que a solução de referência)	180
Figura 25: Relação entre os Cenários estabelecidos e a Análise de Custo Ótimo.	184
Figura 26: Diferença entre as Fachadas Tradicional e Cortina, no desempenho global da MARS-SC....	187
Figura 27: Análise de Custo Ótimo, relacionando custo <i>versus</i> GWP para todos os cenários de fachadas.	

.....	192
Figura 28: Análise de Custo Ótimo, relacionando custo <i>versus</i> E_{total} para todos os cenários de fachadas.	193
Figura 29: Custo do ciclo de vida para todos os cenários de análise, considerando os 60 anos de utilização do edifício.	196
Figura 30: Resultado das variações dos parâmetros na nota sustentável e no custo.....	203
Figura 31: Resultado das variações dos parâmetros no consumo do ar condicionado, emissões de CO ₂ , nota sustentável e custos.....	215

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Diferenças arquitetônicas entre os modelos de edifícios.	51
Tabela 2: Características arquitetônicas de edifícios de escritórios em São Paulo.	53
Tabela 3: Panorama dos trabalhos sobre avaliação de desempenho energético apresentados na literatura.	61
Tabela 4: Fontes de dados para avaliação do ciclo de vida energético.	71
Tabela 5: Panorama dos trabalhos sobre ACV na construção civil apresentados na literatura.	80
Tabela 6: Panorama dos trabalhos sobre análise integrada apresentados na literatura.	96
Tabela 7: Descrição dos dados climáticos: (a) localização; (b) (c) e (d) temperatura e umidade relativa para Curitiba, São Paulo e Manaus, respectivamente.	108
Tabela 8: Características obtidas na etapa de coleta de dados.	110
Tabela 9: Características da divisão entre zonas e a configuração do modelo, dividido em zonas térmicas.	112
Tabela 10: PAF e dimensões das aberturas para todas as fachadas.	112
Tabela 11: Propriedades termofísicas dos vidros utilizados no modelo.	113
Tabela 12: Configuração do objeto “ <i>Movable insulation</i> ”.	114
Tabela 13: Características do dispositivo de sombreamento.	115
Tabela 14: Tipos de fachadas e detalhamento de seu sistema construtivo.	116
Tabela 15: Caracterização do carpete de nylon.	117
Tabela 16: Características das cargas internas.	117
Tabela 17: Capacidade do sistema de ar condicionado calculado pelo <i>EnergyPlus</i>	118
Tabela 18: Características do Sistema de ar condicionado.	119
Tabela 19: Parâmetros gerais da simulação.	120
Tabela 20: Classificação dos resultados em faixas de consumo energético.	121
Tabela 21: Classificação dos resultados em faixas de consumo energético.	123
Tabela 22: Diferença entre os consumos de energia do ar condicionado para cada clima.	126
Tabela 23: Consumo de energia do ar condicionado em função da PAF.	127
Tabela 24: Consumo do ar condicionado em função do tipo de vidro (referência: vidro incolor 6mm)	128
Tabela 25: Consumo do ar condicionado nos cenários com dispositivo de sombreamento (CDS) (referência: cenários sem dispositivo de sombreamento (SDS))	129
Tabela 26: Consumo do ar condicionado pela variação da temperatura de controle (<i>setpoint</i>) de 24°C para 25°C.	130
Tabela 27: Características arquitetônicas das faixas de consumo de energético.	132
Tabela 28: Características arquitetônicas das faixas de consumo de energético.	135
Tabela 29: Significado das siglas e sequência de cenários.	148

Tabela 30: Quantitativo dos materiais para as combinações de Fachada Tradicional.	149
Tabela 31: Quantitativo dos materiais para as combinações de Fachada Cortina.	150
Tabela 32: Materiais utilizados nos cenários de estudos e os processos correspondentes à base do <i>Ecoinvent</i>	151
Tabela 33: Unidades de avaliação e métodos AICV utilizados na quantificação das categorias de impactos ambientais considerados.	154
Tabela 34: Definição das abreviações previstas nas análises.	157
Tabela 35: Contribuição para as emissões de CO ₂ para os três climas, durante 60 anos de utilização.	164
Tabela 36: Contribuição para as emissões de CO ₂ ao longo de 60 anos em função da variação da PAF.	165
Tabela 37: Contribuição para as emissões de CO ₂ totais ao longo de 60 anos em função do tipo de vidro (ref.: vidro incolor 6mm).	166
Tabela 38: Contribuição para as emissões de CO ₂ ao longo de 60 anos para os cenários com dispositivo de sombreamento (ref.: cenários sem dispositivo de sombreamento (SDS)).	167
Tabela 39: Indicadores que podem ser considerados em cada dimensão da MARS-SC.	177
Tabela 40: Quantificação dos impactos ambientais relativos a cada cenário de análise.	178
Tabela 41: Peso de cada indicador de sustentabilidade.	179
Tabela 42: Peso de cada dimensão na quantificação da nota sustentável de cada cenário de análise.	180
Tabela 43: Valores normalizados para as dimensões ambiental e econômica, e a nota sustentável.	186
Tabela 44: Influência dos parâmetros da fachada no desempenho global da MARS-SC.	188
Tabela 45: Valores de CCV em função da alteração do tipo de fachada.	198
Tabela 46: Valores de CCV em função da alteração da PAF.	198
Tabela 47: Valores de CCV em função da alteração no tipo de vidro.	199
Tabela 48: Valores de CCV quando se adiciona um dispositivo de sombreamento (CDS).	199

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	179
Equação 2	179
Equação 3	180
Equação 4	182
Equação 5	183
Equação 6	233

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Ar Condicionado
ACM	<i>Aluminium Composite Material</i>
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ACVE	Análise do Ciclo de Vida Energético
ADP_FF	Potencial de Depleção de Recursos Fósseis abióticos- Combustíveis Fósseis
AICV	Análise de Impacto do Ciclo de Vida
AM	Amazonas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AP	Potencial de Acidificação
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
BREEAM	<i>BRE Environmental Assessment Method</i>
CBA	<i>Cost Benefits Analysis</i>
CBCS	Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
CC	Custo de Construção
CCV	Custo do Ciclo de Vida
CDS	Com Dispositivo de Sombreamento
CE	Cenário energético
CED	<i>Cumulative Energy Demand</i>
CEN	Comitê Europeu de Normalização
CHP	<i>Combined Heat and Power</i>
CO	Custo de Operação
Cond	Condutividade térmica
COP	Coeficiente de Performance
CPOS	Companhia Paulista de Obras e Serviços
CTBA	Curitiba
CTE	Centro de Tecnologia de Edificações
DGP	<i>Daylight Glare Probability</i>
Dp	Vidro Duplo
DPI	Densidade de Potência Instalada
E.P.D.M.	Borracha de Monômero de Etileno-propileno-dieno
EBC	<i>Energy in Buildings and Communities Programme</i>
EERE	<i>Office of Energy Efficiency and Renewable Energy</i>
EP	<i>EnergyPlus</i>
EP	Potencial de Eutrofização
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EPBT	<i>Economic Payback Time</i>
EPD	<i>Environmental Product Declaration</i>
EPDB	<i>Energy Performance of Buildings Directive</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPNR	Energia Primária Não Renovável
EPS	Espuma de Poliestireno Expandido
EPW	<i>EnergyPlus Weather File</i>
EQ	Equipamentos
Esp	Espessura
ETICS	<i>External Thermal Insulation Composite Systems</i>
FC	Fachada Cortina
FS	Fator solar
FT	Fachada Tradicional
GEE	Gases de Efeito Estufa

GPBT	<i>Carbon Emissions Payback Time</i>
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
h	Hora
HVAC	<i>Heating, Ventilation, and Air Conditioning</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICB	Aglomerado de Cortiça Expandida
ICF	<i>Insulated Concrete Form</i>
ICV	Análise de Inventário do Ciclo de Vida
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IGPM	Índice Geral de Preços do Mercado
IL	Iluminação artificial
ILCD	<i>International Reference Life Cycle Data System Handbook</i>
In	Vidro Incolor
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPCA	Índice de Preços ao Consumidor Amplo
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change International</i>
IPP	<i>International Product Policy</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
kg	Quilograma
km	Quilômetro
kW	Kilowatts
kWh	Kilowatts-hora
LABEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
LSM	Divisória de membrana sanduíche leve
Lw	Vidro <i>Low-e</i>
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
MARS-SC	Metodologia de Análise Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas
Máx	Máximo
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
Mín	Mínimo
MJ	Megajoule
mm	Milímetros
MN	Manaus
MWh	Megawatt-hora
NBR	Norma Brasileira
nZEB	Nearly Zero Energy Building
ODP	Potencial de Destruição da Camada de Ozônio Estratosférico
OECD	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
PAF	Porcentagem de Abertura na Fachada
PCM	<i>Phase Change Material</i>
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
POCP	Potencial de formação de ozônio expresso em Concentração de Oxidantes Fotoquímicos
PPD	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>
PR	Paraná
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PV	Placas Fotovoltaicas
PVB	Polivinil Butiral

PVC	Policloreto de Vinila
Rf	Vidro Refletivo
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas
SDS	Sem Dispositivo de Sombreamento
SETAC	<i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i>
SHGC	<i>Solar Heat Gain Coefficient</i>
SP	São Paulo
Tvis	Transmitância à radiação solar no espectro visível (incidência normal)
TWh	Terawatt-hora
UE	União Europeia
USA	<i>United States of America</i>
VRF	<i>Variable Refrigerant Flow</i>
W	Watts
WWR	<i>Window-to-wall ratio</i>
XPS	Espuma de Poliestireno Extrudado
ZEB	<i>Zero Energy Building</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Absortância
Sb	Antimônio
A_e	Área externa
C. T.	Capacidade Térmica
C	Cenário
CFC	Clorofluorcarbono
λ	Condutividade térmica do material
E_{ac}	Consumo anual do ar condicionado
E_{total}	Consumo de Recursos Energéticos
CO_1	Consumo operacional referente ao ano 1
C_{ee}	Custo da energia elétrica
D	Dimensão (ambiental, social e econômica)
CO_2	Dióxido de Carbono
SO_2	Dióxido de Enxofre
E_c	Energia consumida
e	Espessura do Material
C_2H_4	Etileno ou Eteno
PO_4	Fosfato
$^{\circ}C$	Graus Celsius
P^*_i	Melhor resultado do parâmetro de sustentabilidade i.
NS	Nota sustentável
w_i	Peso dos indicadores i
P	Peso referente à cada dimensão
P^*_i	Pior resultado do parâmetro de sustentabilidade i.
%	Porcentagem
R\$	Reais
R	Resistência da Camada
NDj	Resultado da média da ponderação de cada indicador normalizado P_i dentro da dimensão de sustentabilidade j
P_i	Resultado da quantificação do parâmetro i.
R_a	Taxa de reajuste anual
τ	Tempo de vida útil da edificação
U	Transmitância térmica
V	Volume

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA, OBJETIVOS E ESTRUTURA DA TESE.....	33
1.1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	35
1.2 OBJETIVOS.....	39
1.3 ESTRUTURA DA TESE.....	40
1.4 SÍNTESE DO MÉTODO	41
CAPÍTULO 2.CONTEXTUALIZAÇÃO	43
2.1 OS IMPACTOS DA ENERGIA NO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....	45
2.2 O CONSUMO DE ENERGIA NOS EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS	51
2.2.1 Influência das fachadas no consumo de energia dos edifícios de escritórios	54
2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)	65
2.3.1 ACV na Construção Civil	69
2.4 ANÁLISE INTEGRADA	87
2.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	101
CAPÍTULO 3.ANÁLISE DE DESEMPENHO ENERGÉTICO	103
3.1 ENQUADRAMENTO	105
3.2 METODOLOGIA	105
3.2.1 Ferramenta de simulação energética.....	105
3.2.2 Caracterização dos climas	107
3.2.3 Desenvolvimento do modelo de estudo.....	109
3.2.3.1 Coleta de Dados	109
3.2.3.2 Definição do Modelo de edifício	110
3.2.3.3 Definição das características de uso da edificação	117
3.2.3.4 Características do sistema de ar condicionado	117
3.2.3.5 Parâmetros gerais da simulação.....	119
3.3 FORMA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	121
3.4 RESULTADOS.....	122
3.4.1 Consumo de energia por uso final	122
3.4.2 Classificação em faixas de consumo energético	122
3.4.2.1 Influência do envelope construtivo.....	124
3.4.2.2 Influência do clima	126
3.4.2.3 Influência dos parâmetros relacionados à janela	126
3.4.2.4 Influência da temperatura de controle (<i>setpoint</i>) do ar condicionado.....	129
3.4.3 Características arquitetônicas das faixas de consumo energético.....	130
3.5 DISCUSSÃO	136
CAPÍTULO 4.ANÁLISE DE DESEMPENHO AMBIENTAL.....	139

4.1	ENQUADRAMENTO	141
4.2	METODOLOGIA APLICADA	141
4.2.1	Definição de Objetivo e Escopo	141
4.2.1.1	Objetivo: Aplicações pretendidas	141
4.2.1.2	Limitações do método, suposições e impactos	142
4.2.1.3	Motivos para realização do estudo e contexto de decisão	142
4.2.1.4	Público-alvo	142
4.2.1.5	Encarregados do estudo	143
4.2.1.6	Escopo: Tipos de entregas e aplicações pretendidas	143
4.2.1.7	Função e Unidade declarada	144
4.2.1.8	Estrutura de modelagem do Inventário do ciclo de vida (ICV)	145
4.2.1.9	Fronteiras do sistema e critérios de corte	145
4.2.1.10	Preparação do embasamento para a avaliação de impacto	146
4.2.1.11	Escopo tecnológico, geográfico e temporal	146
4.2.1.12	Pressupostos e comparabilidade entre sistemas	147
4.2.1.13	Identificação da necessidade de revisão crítica	147
4.2.1.14	Planejamento da Comunicação do estudo	147
4.2.2	Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV)	148
4.2.3	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)	152
4.2.4	Interpretação do ciclo de vida	156
4.2.4.1	Identificação das questões significativas	156
4.2.4.2	Avaliação do estudo	167
4.2.4.3	Conclusões, Limitações e Recomendações	168
4.3	DISCUSSÃO	169
CAPÍTULO 5. ANÁLISE INTEGRADA		173
5.1	ENQUADRAMENTO	175
5.2	METODOLOGIA	175
5.2.1	MARS-SC	175
5.2.2	Análise de Custo Ótimo	181
5.3	RESULTADOS	185
5.3.1	MARS-SC	185
5.3.2	Análise de Custo Ótimo	190
5.4	DISCUSSÃO	200
CAPÍTULO 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS		205
6.1	CONCLUSÕES	207
6.2	LIMITAÇÕES	211

6.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	213
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	217
APÊNDICES	229
ANEXOS.....	255

CAPÍTULO 1.

**INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA, OBJETIVOS E
ESTRUTURA DA TESE**

1.1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O setor da construção civil consome mais de um terço do total de energia primária¹ no mundo e emite similares quantidades de CO₂ (BORGSTEIN; LAMBERTS; HENSEN, 2016; MURAKAMI et al., 2009; YOSHINO; HONG; NORD, 2017). O investimento em políticas que promovam a eficiência energética pode ser considerado a chave para o desenvolvimento sustentável e mitigação das alterações climáticas (PÉREZ-LOMBARD; ORTIZ; VELÁZQUEZ, 2013). A fachada, considerada o maior componente construtivo de edifícios de escritórios, exerce significativa influência no seu consumo de energia (AZARI, 2014). Deste modo, é fundamental se pensar em soluções de projeto e estratégias aplicadas a este elemento, sobretudo nos edifícios altos, a fim de melhorar o desempenho ambiental e energético da edificação (MARCONDES; ALUCCI; GONÇALVES, 2012).

No Brasil, cerca de 48,5% do consumo de energia elétrica advém do setor de edificações (CBCS, 2014). De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2017 (ano base 2016), os edifícios comerciais representam 14,4% do consumo total de energia elétrica (EPE, 2017). Esse tipo de edificação reflete o crescimento econômico do país, e segue padrões arquitetônicos vinculados ao Estilo Internacional, com fachadas totalmente envidraçadas, escritórios do tipo planta livre, layouts flexíveis e sistemas de iluminação artificial e ar condicionado para manter as condições ambientais internas constantes (DALZIEL, 2003). Conseqüentemente, cerca de 50% do consumo energético nesses edifícios advém do sistema de ar condicionado (CBCS, 2014).

Tal realidade se reflete também na forma como os edifícios impactam negativamente o meio ambiente, pois, quanto maior o consumo energético, maior terá que ser a produção de energia para atender a sua demanda e, possivelmente, maiores serão as emissões de CO₂. Tendo em vista que a matriz energética brasileira é uma das mais limpas do mundo e que, nos últimos anos, passou por uma grave crise hídrica – que resultou na substituição da geração hidráulica pelas usinas termelétricas-, deve-se ter em mente que a matriz energética é um elemento muito vulnerável, sujeito principalmente às mudanças climáticas. Nesse sentido, melhorar a eficiência energética nas novas construções é uma das opções mais fáceis e de menor custo para diminuir o consumo de energia, custos operacionais e emissões de carbono (BUENO, 2010; KNEIFEL, 2010). É preciso investir na “energia não consumida” e ter em mente que a conservação de energia é uma agenda para sempre (LEITÃO, 2015).

E essa busca por edifícios energeticamente mais eficientes e com menos impactos ambientais negativos é uma questão importante mundialmente, presente, por exemplo, no Protocolo de Kyoto, que tem como objetivo reduzir a emissão de gases que causam o efeito estufa e na Diretiva Europeia

¹ Energia primária é aquela disponível na natureza em sua forma bruta, que não passou por processo de conversão ou transformação, podendo ser proveniente de fontes renováveis ou não renováveis.

2010/31/EU (UNIÃO EUROPEIA, 2010), com os renomados objetivos “20-20-20”, visa assegurar que até 2020 haja uma redução de 20% nas emissões de gases de efeito estufa, que a produção de energias renováveis aumente em 20%, e haja redução do consumo energético em 20% (em relação aos índices avaliados em 1990). Essa Diretiva também estabelece que, a partir de 2020, todos os edifícios novos deverão ser concebidos para terem um balanço energético nulo, isto é, deverão produzir o equivalente a toda a energia que consomem. A Agência Internacional de Energia (IEA) afirma que será necessário reduzir em cerca de 77% as emissões de CO₂ provenientes do setor da construção até 2050 para manter o aquecimento global abaixo de 2°C (IEA, 2014).

Com o foco na contabilização de energia e CO₂ incorporado às edificações de forma padronizada, foi criado pelo Programa de Conservação de Energia em Sistemas de Edificações e Comunidades (EBC) da Agência Internacional de Energia (IEA), o Anexo 57 (OKA; SAWACHI, 2013). O projeto investiga métodos para avaliar a energia incorporada e as emissões de CO₂ dos edifícios, no sentido de desenvolver orientações que contribuam para uma maior compreensão dos profissionais, e para encontrar melhores soluções de projeto e de construção dos edifícios com menos energia incorporada e emissões de CO₂.

Para a avaliação do nível de desempenho ambiental de uma edificação, uma técnica que pode ser utilizada é a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), que se destaca por permitir a análise e a escolha de alternativas, sob uma perspectiva puramente ambiental. Normatizada pela *International Organization for Standardization* (ISO), através da ISO 14040 (ABNT, 2009a), foi publicada no Brasil pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT. De acordo com esta norma, um estudo de ACV é dividido em quatro etapas principais sendo: 1) Definição de objetivo e Escopo; 2) Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV); 3) Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV); 4) Interpretação do Ciclo de Vida.

A ACV possui uma abordagem completa, do “berço ao túmulo” ou do “berço ao berço” (quando se trata de uma avaliação que adote sistemas de reciclagem) para a avaliação de sistemas de produção (EPA, 2006), a qual permite a estimativa dos impactos ambientais cumulativos resultantes de todas as fases do ciclo de vida do produto, muitas vezes incluindo impactos não considerados em análises mais tradicionais (GIANNETTI et al., 2008). Também pode ser considerada uma abordagem do “berço ao portão”, quando se considera a produção até o portão da fábrica.

Dentro da perspectiva internacional, a avaliação de desempenho da edificação sob a técnica de ACV é proposta por diversas normas, dentre elas destaca-se as desenvolvidas pelo Comitê Técnico 350 do Comitê Europeu de Normalização (CEN/TC 350) para construção sustentável, tais como a EN 15643-2:2011 (Avaliação do desempenho ambiental) (CEN, 2011a) e EN 15987:2011 (Avaliação do desempenho ambiental de edificações – Método de Cálculo) (CEN, 2011b), nas quais são apresentadas

uma série de indicadores de impactos ambientais que devem ser considerados nas avaliações de ciclo de vida de edificações.

De acordo com Willers, Rodrigues e Silva (2013), entre os benefícios de um estudo de ACV, destaca-se a visão holística do potencial de impacto de um determinado produto, sendo possível que pontos críticos do ciclo de vida sejam identificados e melhorias sejam propostas. De acordo com essa visão, desde que os produtos exerçam a mesma função, é possível compará-los e então selecionar a melhor opção. Dentro da perspectiva da construção civil, destacam-se análises nos âmbitos dos materiais, sistemas construtivos e/ou do próprio edifício, desde que provenham a mesma função.

No entanto, de acordo com Soares, Souza e Pereira (2006), ainda há diversas limitações para a aplicação da ACV na construção civil, como por exemplo a dificuldade em se obter dados confiáveis e completos acerca dos produtos de construção, sobretudo no Brasil. Por conta disso, diversas pesquisas brasileiras (BUENO, 2014; SAADE, SILVA e GOMES, 2013; SANSÃO, 2011) optaram por utilizar dados advindos de bases internacionais, como o *Ecoinvent* (FRISCHKNECHT et al., 2005), adequando, quando possível, o processo de produção de energia de cada produto ao mix energético brasileiro. Ao mesmo tempo, Buyle, Braet e Audenaert (2013) apontam outras limitações, as quais impedem a fácil comparação entre os estudos, dentre as quais está o nível de detalhamento da ACV, as fases consideradas do ciclo de vida da edificação, os métodos utilizados na caracterização dos impactos, além das distintas tipologias de edifícios – os autores afirmam que há muitos estudos que consideram apenas edificações residenciais, sendo que os edifícios de escritórios também merecem destaque nesse tipo de análise, aspecto também apontado por Pajchrowski et al. (2014).

De acordo com Fay (1999), nos resultados de ACV os potenciais impactos relativos ao consumo de energia geralmente se destacam e muitos estudos afirmam que a fase de uso do edifício é a que mais emite CO₂ ao longo do ciclo de vida das edificações (SCHEUER, KEOLEIAN E REPPE, 2003; KOFOWOROLA E GHEEWALA, 2008; ZABALZA BRIBIÁN, ARANDA USÓN E SCARPELLINI, 2009; AZARI, 2014; KOMERSKA, KWIATKOWSKI E RUCIŃSKA, 2015). E boa parte desse consumo é influenciado diretamente pelas características da fachada (BOYANO; HERNANDEZ; WOLF, 2013; FRIESS; RAKHSHAN; DAVIS, 2017; HARMATI et al., 2016; IHARA; GUSTAVSEN; JELLE, 2015; KRSTIĆ-FURUNDŽIĆ; KOSIĆ, 2016; MELO et al., 2015; MELO; LAMBERTS, 2008; NEVES; MARQUES, 2017; RAJI; TENPIERIK; VAN DEN DOBBELSTEEN, 2015; TSICALOUDAKI et al., 2012; VENÂNCIO; PEDRINI, 2009; WESTPHAL; ANDREIS, 2016).

Ao mesmo tempo, no ciclo de vida das edificações, os potenciais impactos ambientais são altamente interdependentes pois, na tentativa de se reduzir os impactos advindos da fase de uso (através da inserção de isolamento térmico no envelope construtivo, por exemplo), pode-se aumentar a energia incorporada (advinda dos materiais). Mas essa situação pode ser revertida, se forem utilizados

materiais menos processados e/ou que necessitem de menos energia para serem produzidos (KOFOWOROLA; GHEEWALA, 2009; RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010; ZABALZA BRIBIÁN; VALERO CAPILLA; ARANDA USÓN, 2011). Nesse sentido, a utilização da ACV pode auxiliar na melhoria do desempenho ambiental das edificações, sendo importante no âmbito da tomada de decisão a respeito dos produtos menos impactantes para o meio ambiente.

No sentido de aliar os aspectos energético, ambiental e de custo, várias ferramentas estão disponíveis e dentre elas destacam-se para a presente pesquisa a Metodologia MARS-SC (MATEUS, 2004a) e a Análise de Custo Ótimo (UNIÃO EUROPEIA, 2012). Buyle, Braet e Audenaert (2013) e Azari (2014) enfatizam a importância de se considerar esses três aspectos nas análises, e que poucos estudos consideram de maneira integrada tais aspectos. A MARS-SC prevê uma análise por meio da normalização dos resultados e categorias de indicadores, gerando como resultados gráficos do tipo radar, sempre considerando um caso de referência (um sistema construtivo existente ou selecionado para a pesquisa) com cenários alternativos, afim de verificar quais soluções são melhores ou piores que o caso de referência. Já a Análise de Custo Ótimo estabelece um estudo de otimização entre um cenário base e vários cenários de reabilitação. Com base em estudos de Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV), e contabilização de energia primária não renovável para cada cenário de estudo, assim como o valor líquido dos custos totais (considerando investimento, manutenção e energia), gráficos de análise são criados para comparar os resultados, considerando custo, emissões de CO₂ e consumo de recursos energéticos ao longo do ciclo de vida da edificação. Dessa forma, mudanças no sistema construtivo, ou nos materiais da fachada e na porcentagem de área envidraçada, assim como a presença ou não de dispositivo de sombreamento, podem reduzir ou ampliar o consumo de energia das edificações, os impactos ambientais e os custos gerados.

Diante do que foi exposto, destacam-se alguns pontos que merecem atenção, tais como 1) a importância do envelope construtivo no desempenho energético e ambiental das edificações; 2) os poucos estudos de ACV em edifícios de escritórios (grande presença desse tipo de análise em edificações residenciais); 3) a inserção dos custos das soluções construtivas nas análises de desempenho energético e ambiental; e 4) a utilização de um método de avaliação que integre em sua estrutura os aspectos energéticos, ambientais e de custo.

Com isso, esta pesquisa tem como objetivo fazer uma avaliação integrada do consumo energético (obtido a partir de simulação computacional) e dos potenciais impactos ambientais gerados ao longo do ciclo de vida (através da técnica ACV) de um modelo de edifício de escritórios em diferentes climas brasileiros, a partir de distintas soluções de fachadas (considerando variados cenários). A partir de tais análises, serão considerados os diversos cenários de fachadas para um clima, e nesses cenários serão aplicadas as metodologias integradas de análises multicritério (MARS-SC) e Custo ótimo, a fim de

se obter uma solução ótima, aliando baixo consumo energético, impactos ambientais e custo, promovendo assim, uma visão global de desempenho do ambiente construído.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é fazer uma avaliação integrada do consumo de energia, impactos ambientais e custos ao longo do ciclo de vida de variados cenários de fachadas para um modelo de edifício de escritórios no Brasil.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Verificar e classificar o desempenho energético de variados cenários de fachadas de edifícios de escritórios de planta livre (criados a partir da combinação de diferentes tipos de fachada, porcentagem de abertura na fachada, tipo de vidro, presença ou não de dispositivo de sombreamento) situados em diferentes bioclimáticas brasileiras, a fim de compreender a influência da alteração dos parâmetros da fachada no consumo energético da edificação;
- Aplicar a Avaliação de Ciclo de vida (ACV) para as fases de pré-uso (fases de extração das matérias-primas, produção dos materiais e componentes, transporte até a obra e a execução do edifício) e uso (o consumo energético para o funcionamento dos sistemas de condicionamento de ar, iluminação artificial e uso de equipamentos) dos variados cenários de fachada, a fim de quantificar e compreender os potenciais impactos ambientais advindos da energia e incorporados nos materiais construtivos;
- Avaliar se a melhoria no desempenho energético do envelope construtivo resulta na melhoria do desempenho ambiental global da edificação, por meio de Análises Integradas que envolvem o consumo energético, impactos ambientais e custo (metodologias MARS-SC e Análise de Custo Ótimo), a fim de compreender e identificar o ponto ótimo de menores custos, impactos ambientais e consumos de recursos energéticos e, ao mesmo tempo, possíveis pontos críticos e necessidades de escolhas de alternativas;
- Definir para os climas de estudo, como os parâmetros do envelope construtivo podem influenciar a relação entre impacto ambiental e eficiência energética; e, para um desses climas, compreender como esses parâmetros otimizam as questões do consumo energético, impacto ambiental e custo.

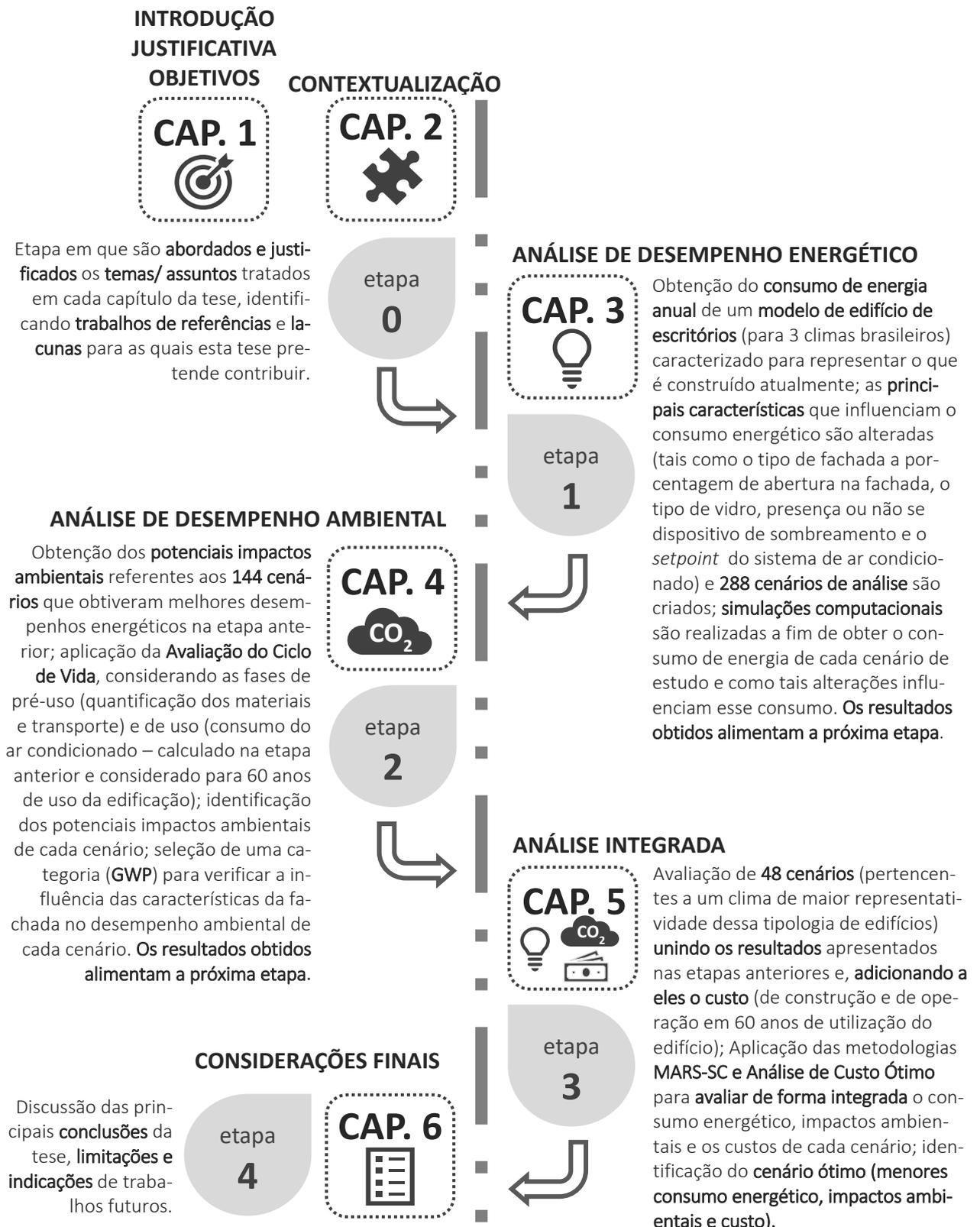
1.3. ESTRUTURA DA TESE

A partir do Capítulo 1 (Introdução e Justificativa), é apresentada nesse item a estrutura da tese, composta por:

- Capítulo 2 (Contextualização): são abordados os temas referentes à revisão bibliográfica, sendo a) Os impactos da energia no desenvolvimento sustentável (produção de energia no Brasil os impactos relacionadas à matriz energética); b) O Consumo de energia de edifícios de escritórios (influência na construção da tipologia arquitetônica atual e o desempenho das fachadas neste tipo de edificação); c) Avaliação do Ciclo de Vida (o que é, como se estrutura e como é aplicada na construção civil) e; por fim, d) Análise Integrada (métodos para avaliar conjuntamente dados de consumo de energia, impactos ambientais e custo).
- Capítulo 3 (Análise de Desempenho Energético): é apresentada a metodologia de análise (descrição do modelo de edifício, parâmetros considerados na avaliação e criação de cenários) e os resultados de consumo de energia do edifício de escritórios selecionado para o estudo, obtidos por meio de simulações computacionais paramétricas, classificados de acordo com faixas de consumo energético a fim de se compreender como os parâmetros relacionados à fachada influenciam no consumo de energia desse tipo de edificação, além de fazer uma caracterização arquitetônica, a partir da classificação energética.
- Capítulo 4 (Análise de Desempenho Ambiental): é apresentada a metodologia e aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida dos cenários criados no Capítulo 3, a partir dos quais foi possível avaliá-los do ponto de vista dos potenciais impactos ambientais gerados, bem como pode-se compreender como os parâmetros da fachada influenciam nesses impactos.
- Capítulo 5 (Análise Integrada): são apresentadas duas metodologias- MARS-SC e Análise de Custo Ótimo-, com as quais foi possível unir os resultados presentes nos Capítulos 3 e 4, para o clima correspondente à uma zona bioclimática, somando-se a isso uma análise de custos, a fim de compreender como os parâmetros da fachada influenciam no desempenho global da edificação.
- Capítulo 6 (Considerações Finais): é feita uma discussão a respeito dos resultados obtidos nos Capítulos 3, 4 e 5, além das recomendações para trabalhos futuros.

1.4. SÍNTESE DO MÉTODO

Figura 1: Etapas de desenvolvimento da tese.



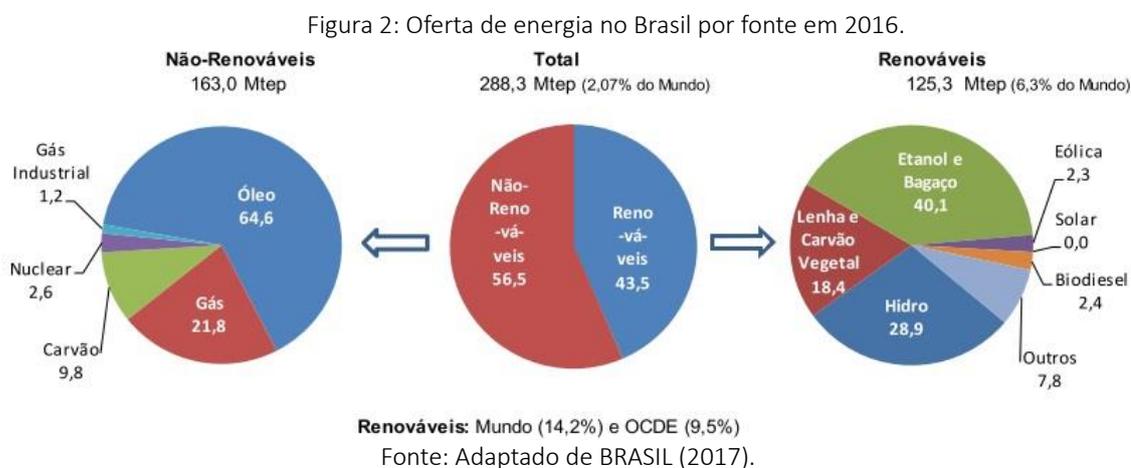
Fonte: A autora (2018)

CAPÍTULO 2.

CONTEXTUALIZAÇÃO

2.1 OS IMPACTOS DA ENERGIA NO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

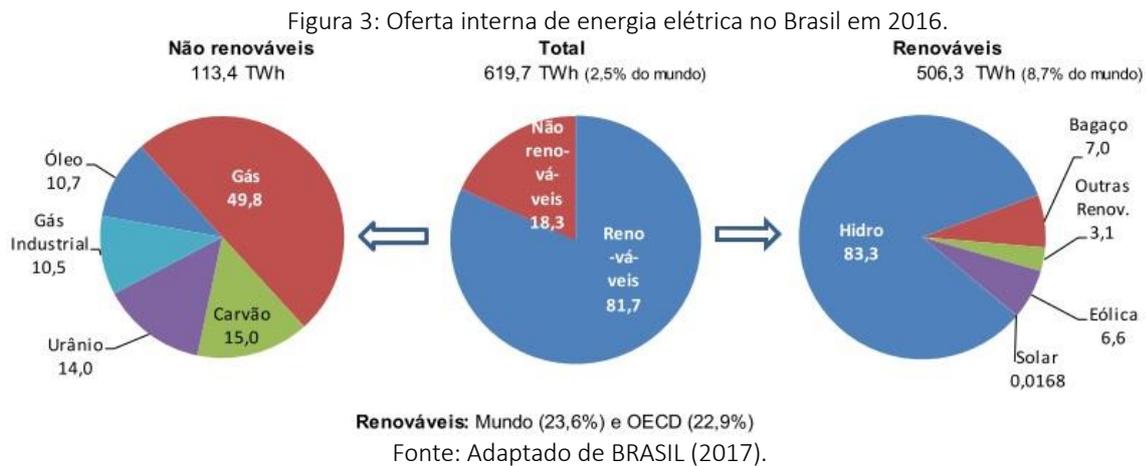
Ao longo dos últimos anos, as matrizes energéticas mundiais têm passado por diversas alterações estruturais. No Brasil, tem havido um considerável aumento de participação da energia hidráulica, bioenergia e do gás natural (BRASIL, 2017). A matriz energética brasileira se destaca por ser uma das mais limpas do mundo, contando em 2016 com 43,5% da produção de energia advinda de fontes renováveis, tais como hidrelétricas, solar, eólica e outras, diferentemente dos 14,2% da média mundial, conforme apresentado na Figura 2.



Em termos de geração de energia elétrica, mundialmente, os países apresentaram a mesma tendência nos últimos anos – redução da participação de petróleo e hidráulica e aumento da participação de outras fontes na matriz energética. No entanto, ainda que a produção de energia por fontes renováveis seja importante, é preciso se ter em mente que não existe energia completamente limpa, pois,

[...]. Todas precisam de energia para serem produzidas. Um painel solar, ao ser fabricado, consome plástico, metal, tinta, componentes eletrônicos. No entanto, as energias que emitem menos são as que pertencem à lógica do século XXI, irremediavelmente marcado pela ameaça das mudanças climáticas. Acordos internacionais climáticos com valor legal sobre os países e metas assumidas vão reduzir o espaço para as energias fósseis (LEITÃO, 2015, p. 331).

Segundo dados da Resenha Energética Brasileira (BRASIL, 2017), o Brasil contou em 2016 com cerca de 82% de produção de energia elétrica advinda de fontes renováveis, sendo que somente a energia hidráulica, segundo dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2017), contribuiu com 68,1%, diferenciando-se nesse aspecto em relação aos 23,6% da média mundial, conforme apresentado na Figura 3.



Do ponto de vista das emissões de CO₂, ainda que 18% da matriz elétrica brasileira seja composta por fontes não renováveis, a taxa de emissão no setor elétrico é 101,3 kg CO₂ para produzir 1 MWh que, segundo dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2017), é um índice ainda muito baixo, se comparado com outros países como os Estados Unidos e a China, os quais emitem 3 e 4,8 vezes mais, respectivamente. Dentro dessa perspectiva, ainda que favorável para o Brasil, é preciso se ter em mente a importância de se investir em alternativas para a geração de energia, pois,

Para que o país alcance sua autonomia energética é preciso considerar o extraordinário quadro de desafios em que se insere o debate sobre esse assunto nos dias de hoje. Ao lado das questões que já integravam o cenário tradicional de análise, como a guerra constante pelo controle dos estoques de petróleo e gás, o problema do aquecimento global e das mudanças climáticas lançou a maldição definitiva sobre o uso dos combustíveis fósseis na matriz energética. Esses precisam ser reduzidos progressivamente e depois abandonados, devido ao alto índice de emissões de gases de efeito estufa provenientes da sua utilização (LEITÃO, 2013, p. 207).

No entanto, entre 2013 e 2015, o Brasil passou por uma crise energética, invertendo a tendência de redução da utilização de fontes não renováveis (principalmente as hidrelétricas), por conta do baixo regime de chuvas e consequentes aumentos da capacidade instalada a carvão (BRASIL, 2017). A participação das hidrelétricas na matriz elétrica brasileira passou de 76,9% (2012) para 70,6% (2013) (EPE, 2014), depois para 65,1% (2014) (EPE, 2015), e alcançou os 64,0% (2015) (EPE, 2017). Segundo Leitão (2015, p.301), neste período de tempo,

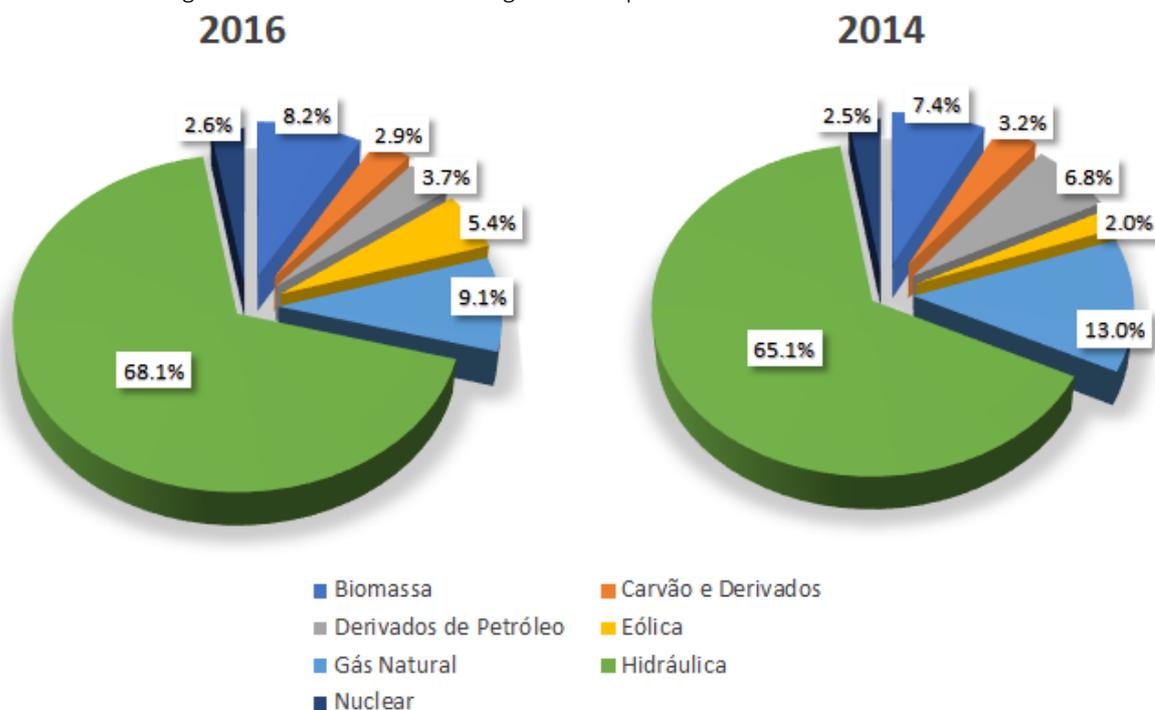
O futuro veio nos visitar para mostrar como pode ser perigoso. [...] A água dos reservatórios das hidrelétricas diminuiu drasticamente. A energia em algumas das usinas esteve por um fio, em outras, simplesmente secou. Andava-se de carro em hidrovias. Choveu tão pouco na estação chuvosa que, quando as águas de março caíram no Sudeste, a terra ressecada chupou tudo e nada entregou aos rios e às represas. O fornecimento de energia dependeu de todas as termelétricas, que foram ligadas para oferecer o que as hidrelétricas não conseguiram. O maior sistema de abastecimento de água de São Paulo, a maior cidade do país, foi ao fundo do poço. O

governo estadual teve então duas ideias: usar o volume morto da represa e pegar parte da água que vai para o Rio de Janeiro.

Assim, a crise energética que resultou no apagão ocorrido no início dos anos 2000², retornou sob o enfoque da seca hídrica. Seis das principais bacias hidrográficas brasileiras tiveram suas reservas reduzidas a menos de 20% de sua capacidade total, além dos incêndios, que destruíram várias áreas de preservação (LEITÃO, 2015). Dentro dessa perspectiva, como forma de complementar a geração de energia elétrica no país, utilizou-se as fontes térmicas, pela vantagem de se ter um menor prazo para amortização dos investimentos, menores riscos para investidores, entre outros, de maneira que as usinas termelétricas pudessem suprir possíveis *déficits* advindos das usinas hidrelétricas (EPE, 2014).

Entretanto, comparando-se a matriz elétrica brasileira presente no Balanço Energético Nacional de 2016 e 2014 (EPE, 2015, 2017), após a crise energética ocorrida nesse período de tempo, nota-se que há um ligeiro aumento na produção de energia por fontes renováveis e redução do uso do carvão e derivados. Isso se justifica pelo retorno das chuvas e a recuperação da capacidade dos reservatórios, além do aumento da produção de energia por fontes renováveis como a biomassa e a eólica, conforme pode-se observar na Figura 4.

Figura 4: Oferta interna de energia elétrica por fonte: matriz elétrica brasileira.



Fonte: Adaptado de EPE (2015, 2017)

De acordo com a Figura 4, é possível verificar o aumento na produção de energia elétrica pelas

² Em 2001, sob o iminente risco do corte de energia elétrica em todo o país – que ficou conhecido como “apagão”, os brasileiros foram obrigados a mudarem seus hábitos e adotarem medidas de racionamento de energia.

hidrelétricas, uma vez que a participação hidráulica na matriz energética brasileira passou de 65,1% em 2014 (EPE, 2015) para 68,1% em 2016 (EPE, 2017). A geração hidráulica em 2014 foi de 407,2 TWh, enquanto que em 2016 foi de 421,7 TWh. Já a geração total de energia em 2014 foi de 624,3TWh, passando para 619,7 TWh em 2016.

Segundo o relatório “Aspectos da Construção Sustentável no Brasil e Promoção de Políticas Públicas: Subsídios para a Promoção da Construção Civil Sustentável” (CBCS, 2014), o setor de energia elétrica no Brasil enfrenta desafios, entre eles as reduções nas médias anuais de chuva, o que, conforme supracitado, faz com que haja a redução da produção de energia pelas hidrelétricas e aumente a participação das termelétricas na matriz energética brasileira. Tal situação torna a geração de energia elétrica mais cara e mais suja, ou seja, com maiores impactos ambientais potenciais, pois isso aumenta as emissões de dióxido de carbono (CO₂) advindas dessa fonte de energia que não é renovável.

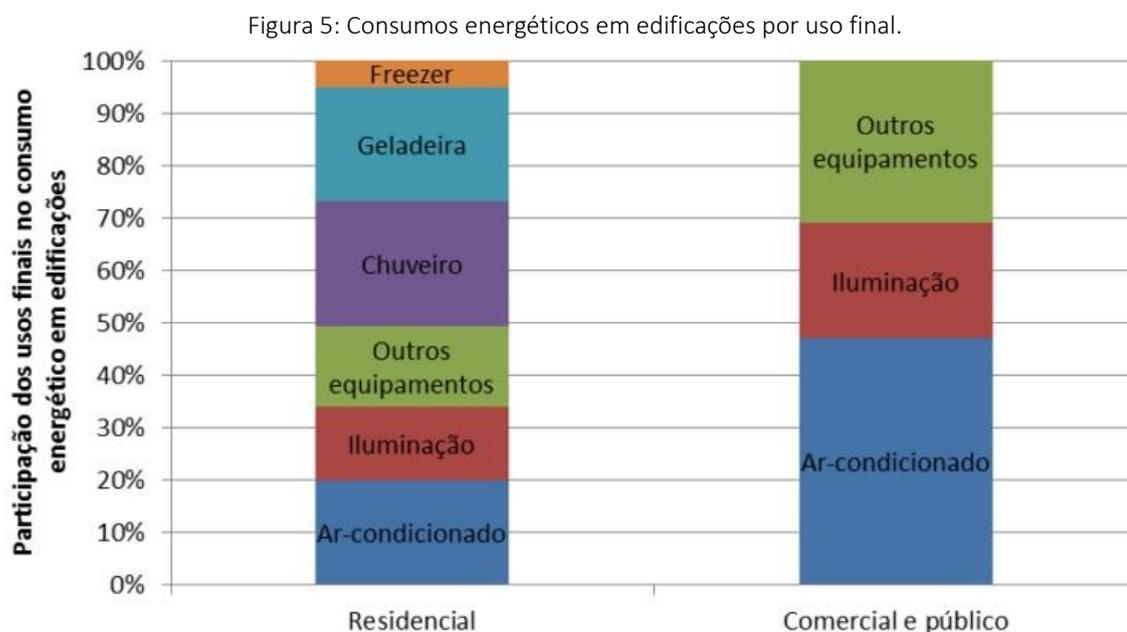
No entanto, em termos de danos ambientais, as usinas hidrelétricas também possuem suas contribuições, uma vez que podem: alterar o regime dos rios; comprometer a qualidade das águas, causando eutrofização e emissões de gases de efeito estufa (GEE); assorear os reservatórios; aumentar o volume de água no reservatório; causar problemas de saúde pública como a febre amarela, entre outras; além de poder dificultar o uso múltiplo das águas (para transporte, irrigação, etc) (GODOI; OLIVEIRA JÚNIOR, 2009). É preciso, portanto, investir em alternativas para geração de energia que não sejam exclusivamente ligadas à hidrelétricas.

Nesse sentido, é preciso promover a redução do consumo de energia elétrica, de maneira que se possa diminuir os danos ambientais causados pela construção de novas usinas, além de investir em outras fontes de energia renováveis. O racionamento ocorrido no início dos anos 2000 estimulou o desenvolvimento de uma série de tecnologias para reduzir o consumo energético, com a substituição das lâmpadas incandescentes, selos de eficiência energética para as geladeiras e aparelhos de ar condicionado, além do Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações – Procel Edifica, destinado a promover o uso racional da energia elétrica nas edificações.

Em termos de consumo de energia elétrica, o maior consumidor no mundo localiza-se no setor de edificações. No Brasil, 48,5% do consumo de energia elétrica encontra-se neste setor, por meio de tais fatores: extração, fabricação produção e transporte de materiais de construção; construção e energia usada no canteiro de obras; fase de operação das edificações; demolição e fim de vida da edificação (CBCS, 2014).

Com relação à fase de operação do edifício, entre as partes que compõem o setor de edificações, tem-se que nas residências o consumo de energia elétrica aumenta com base no crescimento da população e no aumento do consumo de cada domicílio, o qual pode estar relacionado

ao poder aquisitivo dos moradores. Já no setor de serviços (edifícios comerciais e públicos), mesmo com o processo de melhoria dos aparelhos de ar condicionado, tornando-os mais eficientes (pelo Selo Procel), o mesmo ainda é responsável por grande parte do consumo de energia elétrica nas edificações deste setor. A Figura 5 apresenta os consumos energéticos em edificações por uso final.



Fonte: Adaptado de CBCS (2014).

Dessa forma, investir na edificação energética das edificações é de extrema importância, de maneira que, de acordo com o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD, 2014), promover uma economia de energia elétrica em 20 anos através da eficiência energética dos edifícios pode gerar uma economia que poderia abastecer o estado do Mato Grosso do Sul por cerca de um ano. De acordo com Dincer (1999), a redução do consumo de energia pode beneficiar não apenas os consumidores, mas a sociedade como um todo, principalmente pela redução das emissões de gases de efeito estufa e outros poluentes para o meio ambiente.

Conforme fora supracitado, em comparação com outros países, o Brasil possui uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, tendo baixas emissões de CO₂. No entanto, este cenário está sujeito a riscos, devido ao aumento do consumo de energia elétrica e às mudanças climáticas, que fazem com que a geração de energia pelas hidrelétricas diminua, podendo ser complementada por outras fontes que, muitas vezes, não são renováveis.

O investimento em energias mais limpas, renováveis, é uma realidade que deve ser valorizada e investida, juntamente com a redução do consumo de energia e o aumento na eficiência energética das edificações, as quais causam grande impacto no setor elétrico. É preciso investir na “energia não consumida”, como principal fonte para um desenvolvimento sustentável e ter em mente que a

conservação de energia é uma agenda para sempre (LEITÃO, 2015). Portanto, segundo Dincer (1999), a eficiência energética é benéfica ao meio ambiente, pois uma unidade de energia não consumida pode equivaler a uma unidade de recursos poupados e uma unidade de poluição não gerada

2.2 O CONSUMO DE ENERGIA NOS EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS

Segundo Romero (1997) *apud* Figueiredo (2007), os ambientes de trabalho são os locais aonde se passa boa parte do tempo em que se está acordado e, por isso, devem ser ambientes que proporcionem conforto e bem-estar para os usuários, além de consumir energia de forma eficiente.

Ao longo dos anos, este tipo de edificação se desenvolveu de duas formas diferentes nos Estados Unidos e na Europa. A primeira possui como característica plantas mais profundas, privilegiando o uso eficiente do espaço interno. São tipologias comerciais de torres de vidro seladas com elevadores localizados no núcleo e climatização totalmente artificial. Já a segunda é constituída por edificações de plantas mais estreitas, permitindo assim a incorporação da ventilação natural nos ambientes, além de serem edifícios mais baixos, que possuem uma relação com a cidade e uma ligação com os pedestres (MARCONDES, 2010).

Dessa forma, são apresentados na Tabela 1 as principais diferenças referentes às tipologias arquitetônicas desse tipo de edifício presentes nos Estados Unidos e na Europa.

Tabela 1: Diferenças arquitetônicas entre os modelos de edifícios.

MODELO NORTE-AMERICANO	MODELO EUROPEU
PLANTA LARGA	PLANTA ESTREITA
Planta ampla/ multi-zona	Planta celular/duas zonas
Áreas internas	Vista externa
Condições ambientais internas constantes	Controle interno individual
Ventilação mecânica	Ventilação natural
Iluminação artificial	Iluminação natural
Alto consumo de energia	Menor consumo de energia
Alta emissão de CO ₂	Baixa emissão de CO ₂
Alto custo de funcionamento	Baixo custo de funcionamento
Baixo custo inicial de capital	Alto custo inicial de capital

Fonte: Adaptado de Dalziel (2003).

Segundo Liu (2010), a vertente norte-americana foi regida pelo mercado imobiliário, que tinha como raciocínio multiplicar o valor do terreno pelos andares dos edifícios, de maneira a tornar o negócio rentável. Os edifícios primeiramente são vistos como uma mercadoria e não como um objeto de uso (ANDRADE, 2007). Isso gerou edifícios genéricos com ambientes internos altamente flexíveis. Já a corrente de concepção europeia não teve uma presença tão marcante do investidor imobiliário, fazendo com que as empresas construíssem o seu próprio edifício de forma customizada. Assim, tendo como princípio o bem-estar dos usuários, isso resultou na construção de edifícios mais estreitos, a fim de garantir a provisão de luz e ventilação naturais a todos os ocupantes (LIU, 2010). Essa postura privilegia o conforto e a qualidade ambiental para os usuários, em contraposição à postura norte-americana, que visa otimizar o custo/rendimento em detrimento da eficiência da ocupação (ANDRADE, 2007).

No Brasil, o projeto desse tipo de edificação inicialmente (décadas de 1930 a 1960) incluía janelas operáveis nas fachadas, assim como elementos vazados (cobogós) e de controle solar (brises), evidenciando assim a preocupação com a adequação climática e o conforto térmico dos usuários – características típicas do início da arquitetura moderna brasileira (MARCONDES, 2010).

Entretanto, segundo Benedetto (2007), nos últimos 50 anos em São Paulo, as características que antigamente garantiam as condições de conforto térmico foram alteradas e o cenário mudou completamente: os pavimentos, antes divididos em saletas comerciais, passaram a ter plantas livres, as fachadas passaram a ser totalmente envidraçadas, os equipamentos – lâmpadas, computadores, impressoras, entre outros- passaram a ter um uso mais intenso. O conjunto de todas essas alterações tornou indispensável a utilização do ar condicionado. Ao mesmo tempo, o crescimento dos grandes centros urbanos trouxe com ele o aumento da poluição do ar e dos ruídos, fazendo com que a utilização de ambientes hermeticamente fechados e a dependência do condicionamento artificial de ar se tornasse uma realidade para os edifícios de escritórios, gerando consequências diretas no consumo energético.

Marcondes (2010,p. 11) afirma que,

Essa composição resultou na tipologia arquitetônica informalmente chamada de “caixa de vidro selada”, a qual se convencionou adotar para edifícios de escritórios em escala global, independentemente dos contextos climáticos e arquitetônicos locais.

Segundo Gonçalves (2003), a cidade de São Paulo iniciou na década de 1980 a adoção de modelos de edifícios norte-americanos de planta livre, iniciando uma tendência em reproduzir modelos estrangeiros no Brasil. Entretanto, uma série de vantagens e desvantagens a respeito da seleção desse tipo de edifício são apontadas por Pile (1984) *apud* Andrade (2007), tais como: a) vantagens: melhor comunicação entre as áreas, mudanças são mais fáceis de serem realizadas, a infraestrutura para elétrica e telecomunicações pode ser instalada de modo a facilitar as mudanças, menor custo de construção em razão da ausência de paredes, etc. e b) desvantagens: perda de privacidade, excesso de ruído e conversa entre mesas como principais fontes de distração, uma estação de trabalho aberta aparenta ser inferior a uma fechada, além de parecerem “bairros”, etc.

No Brasil, a maior quantidade de edifícios de escritórios concentra-se nas cidades que representam os centros econômicos do país: São Paulo e Rio de Janeiro. Em termos de representatividade, São Paulo destaca-se com a maior concentração de exemplos desse tipo de edificação (GONÇALVES, 2003; MARCONDES, 2010) e uma série de características são apresentadas por Figueiredo (2007) na Tabela 2.

Tabela 2: Características arquitetônicas de edifícios de escritórios em São Paulo.

CARACTERÍSTICAS	VARIÁVEIS	REFERÊNCIA
Altura do edifício	5 -15 pavimentos ou maiores que 15 andares	ANDRADE (2005)
Área do Pavimento tipo	Entre 500m ² e 1000m ² em média	ANDRADE (2005)
Forma do Pavimento tipo	Quadrado ou retangular	ANDRADE (2005)
Pé-direito	2,50m	-
Fachadas	Vidros refletivos; áreas opacas revestidas por pedras, chapas ou painéis de alumínio, cerâmica, entre outros	-
Esquadrias	Feitas em alumínio anodizado ou pintado, sendo a maior parte composta por quadros fixos	-
Posicionamento e dimensão do núcleo	Parte central, em uma das fachadas ou descentralizado; pode ocupar de 14 a 24% da área construída	ANDRADE (2005)
Conceito de ocupação	Aberto/fechado (47%) estações de trabalhos abertas e salas de executivos fechadas; totalmente abertos (30%) e parcialmente abertos (23%)	ANDRADE (2005)

Fonte: Adaptado de Figueiredo (2007).

Em cidades como São Paulo e Rio de Janeiro, tem havido uma crescente demanda por edifícios de “alto padrão”. Os chamamos “triple A”, ou classe “AAA”, que remetem à classificação norte-americana, são especificados a partir do padrão construtivo e sistemas prediais da edificação (VERONEZI; JR.; ALENCAR, 2005). Esses edifícios seguem padrões arquitetônicos vinculados ao Estilo Internacional, com fachadas totalmente envidraçadas, escritórios de planta livre, com espaços mais largos, layouts flexíveis e sistemas de iluminação artificial e ar condicionado para manter as condições ambientais internas constantes (DALZIEL, 2003). Tais características podem trazer consequências desastrosas no consumo de energia da edificação, devido à alta geração de carga interna (Figueiredo, 2007). Em decorrência disso, atualmente cerca de 50% do consumo energético desses edifícios advém do sistema de ar condicionado (CBCS, 2014).

Como características atuais presentes nessa produção arquitetônica, a adoção de fachadas do tipo Cortina, tais como a pele de vidro (*curtain walls*) e o envidraçamento estrutural (*structural glazing*), com altas taxas de porcentagem de abertura na fachada (PAF) tornou-se representativo desse tipo de edificação, ainda que as condições climáticas não sejam favoráveis (LIU, 2010). E um item de destaque nesse tipo de fachada é o vidro, que muitas vezes aparece como elemento único, dando uniformidade à superfície do envelope construtivo. Segundo Marcondes (2010), a maneira de especificar a eficiência do tipo de vidro mudou muito ao longo dos anos. O mercado tornou-se mais exigente em relação ao detalhamento das características desse material, tais como a resistência à poluição, às suas propriedades óticas (coeficientes de absorção do calor e transmissão luminosa).

Assim, a parte opaca da fachada, que cobre a estrutura interna do edifício (vigas, lajes)

também é composta por vidro, que recebe um tratamento com PVB³ branco, por exemplo, para parecer opaco e, com isso, esconder a estrutura que está por trás. Entretanto, Marcondes (2010) discute essa questão polêmica, pois, de acordo com as normas vigentes⁴, deve haver uma separação na fachada entre as aberturas de pavimentos consecutivos a uma distância de 1,20 m, para obedecer as recomendações do Corpo de Bombeiros contra incêndio. Há ainda casos em que não há essa distinção (entre tipos de vidros) e a fachada é composta 100% por vidro de alta transparência e mesmo índice de transmissão solar. Por conta disso, deve haver um critério maior na escolha do tipo de vidro na fachada dos edifícios de escritórios.

Entretanto, em países europeus, entre as décadas de 1990 e 2000, surgiu uma nova geração de edifícios, considerados como energeticamente eficientes, em que aspectos relacionados às certificações ambientais passaram a ser uma tendência crescente. Além disso, a demanda para adequação às novas metas de redução de emissões de CO₂ – previstas pelo Protocolo de Kyoto – e às normas e regulamentações de desempenho energético e térmico europeias, fez com que surgisse a necessidade de se avaliar o impacto ambiental das soluções construtivas, com vistas ao ciclo de vida das edificações (produção, operação e deposição final) (MARCONDES, 2010; SILVA, 2003).

Tais edificações passaram também a ter como premissas a utilização de fontes de energia renováveis, uso de materiais recicláveis, projetos mais flexíveis para que o uso pudesse ser alterado sem maiores consequências, aproveitamento do condicionamento passivo – através da ventilação e iluminação naturais, entre outras estratégias. E para cumprir tais ideias de eficiência energética, uma atenção especial é voltada à fachada desse tipo de edificação (MARCONDES, 2010).

2.2.1 Influência das fachadas no consumo de energia dos edifícios de escritórios

A fachada, considerada o maior elemento construtivo, é uma das partes mais importantes da edificação, sobretudo nos edifícios altos, que exerce significativa influência no consumo de energia, já que intermedia as relações entre as condições internas (projeto, forma, sistema construtivo) e externas (climáticas) da edificação (LIU, 2010; AZARI, 2014; HUANG; NIU, 2015). As decisões iniciais de projeto estão diretamente relacionadas ao consumo energético da edificação, sendo que 22% deste consumo

³ Película PVB (Polivinil Butiral): É uma película plástica e elástica utilizada na produção dos vidros laminados. Esta película é aplicada entre as chapas de vidro para que, em caso de quebra, os fragmentos fiquem aderidos ao PVB, o que reduz o risco de acidentes (ABRAVIDRO, 2016).

⁴ De acordo com o Decreto Estadual SP 46.076/04 e a Instrução Técnica nº 9, 2004, o Corpo de Bombeiros de São Paulo exige uma separação na fachada entre aberturas de pavimentos consecutivos, que podem se constituir de vigas e/ou parapeito ou prolongamento dos entrespisos, além do alinhamento da fachada e devem apresentar altura mínima de 1,20 m separando aberturas de pavimentos consecutivos.

está atrelado à qualidade do envelope e 6% à geometria (VENÂNCIO; PEDRINI, 2009). Deste modo, é fundamental se pensar em soluções de projeto e estratégias aplicadas a este elemento a fim de melhorar o desempenho energético das edificações (MARCONDES; ALUCCI; GONÇALVES, 2012).

Dentro da perspectiva da atual produção de edifícios de escritórios no Brasil apresentada anteriormente e, com a finalidade de refletir o padrão mercadológico vigente atualmente (resultado da influência norte-americana), a fachada apresenta-se como elemento-chave nessa produção arquitetônica. Huang e Niu (2015), em um panorama sobre a otimização do envelope construtivo baseado em simulações, apontam que cerca de 80% dos estudos estão relacionados à redução do consumo energético da edificação. E os principais parâmetros de análise são: 1) Transmitância térmica (valor de U); 2) Absortância; 3) *Window-to-wall ratio* (WWR), aqui denominado PAF; 4) Tipo de vidro; 5) Espessura do material de isolamento; 6) Formato do envelope construtivo e 7) Presença/dimensão de dispositivos de proteção solar.

Assim, tendo sido identificados esses pontos, são explorados aqui alguns estudos – realizados a partir de simulação computacional - que trabalharam com a questão de como os elementos que compõem a fachada podem influenciar o desempenho da edificação, no caso dos edifícios de escritórios.

Tsikaloudaki et al. (2012) avaliaram a influência de parâmetros da janela no desempenho energético de um ambiente de escritórios (sala de 3,60 x 5,50 x 2,80m) para cinco climas mediterrâneos. Foi variado o PAF (10%, 25%, 50%, 75%, 90% e 99%), a fração da esquadria da janela (10%, 20% e 30%), a transmitância térmica (U) das janelas (uma faixa que abrange de 0,72 W/(m².K) até 3,20 W/(m².K)), a orientação solar (norte, sul, leste e oeste) e quatro diferentes níveis de sombreamento (0%, 25%, 50% e 75%) a partir da utilização de dispositivos de sombreamento móveis externos. Os autores destacaram que a seleção das janelas é importante, tendo em vista a transmissão térmica e solar, para minimizar o consumo de energia nos edifícios de escritórios. No caso analisado, quando o vidro claro foi utilizado em PAFs elevados, a janela teve melhor desempenho quando o seu valor de transmitância térmica (U) era moderado, isto é, ficava entre 2,00W/ (m². K) e 3,20W/ (m². K). O uso de janelas com baixos valores de U resultou em pior desempenho para os climas quentes, pois dificultou a dissipação do calor para o ambiente externo, aumentando a carga térmica para o resfriamento e, conseqüentemente, elevando o consumo de energia. Em relação ao sombreamento, quando se comparou o caso não sombreado com os demais, obteve-se uma redução de cargas para resfriamento de 7% em média.

Sob o mesmo enfoque, Ihara, Gustavsen e Jelle (2015), avaliaram três tamanhos de edificações comerciais (duas saletas com um corredor central, um edifício de planta estreita e alongada, com corredor central e um edifício do tipo *open plan*, com núcleo localizado em uma das extremidades), para o clima de Tóquio (Japão). Foram consideradas a refletância solar e a transmitância térmica (U) das

paredes externas, o valor U e o SHGC⁵ das janelas, o formato do edifício, volume, número de andares e o PAF. Como resultado da pesquisa, os autores destacaram que a redução no valor da SHGC foi a maneira mais eficiente de reduzir a demanda anual de energia, seguido pela redução do U da janela e por último o aumento da refletância solar. Segundo os autores, estes três parâmetros podem ser considerados na tentativa de se reduzir a demanda de energia anual, independentemente de outros aspectos. Por outro lado, destacou-se que a redução do valor U das partes opacas da fachada (tornando-as mais isoladas) aumentou a demanda anual de energia nos edifícios altos, enquanto que reduziu a mesma demanda nos edifícios baixos. Dessa forma, os autores afirmaram a importância de se aplicar o valor U adequado ao modelo de edificação.

A respeito do uso de isolamento nas fachadas, Boyano, Hernandez e Wolf (2013) caracterizaram o consumo de energia por uso final de um edifício de escritórios (retangular, com salas individuais e três pavimentos) para três climas europeus: Tallinn (frio), Londres (intermediário) e Madri (quente). Em todos os casos, os maiores consumos foram do sistema HVAC e de iluminação. A partir disso, uma série de medidas (controle da iluminação, vidros triplos, aumento do isolamento das paredes externas e orientação solar) foram testadas para reduzir o consumo energético total. Nas melhores combinações de parâmetros, foram obtidas economias na ordem de até 36% (com o controle total de iluminação), 16% (substituição do vidro duplo pelo triplo), 8% (pelo aumento do isolamento das paredes externas) e até 14% (pela mudança na orientação de leste/oeste para norte/sul).

Sob o mesmo enfoque, Friess, Rakhshan e Davis (2017) avaliaram níveis de isolamento (parede externa e cobertura) para um modelo de edifício de escritórios (geometria quadrada de 10 pavimentos). Foram criados cenários com PAF (de 20% a 80%), diferentes espessuras de isolamento (EPS de 30mm a 150mm) e *setpoints* (21°C, 25°C e 27°C). Persianas automáticas eram acionadas para irradiância solar acima de 200W/m². Tais cenários foram avaliados para Dubai (Emirados Árabes Unidos), Málaga (Espanha) e El Dorado —Arkansas (USA). Foi observado que para Dubai, quando se reduz o *setpoint* para 21°C, o consumo de energia diminui com o aumento do isolamento. Quando o *setpoint* é mais alto (27°C), era necessário que a edificação tivesse menos isolamento, para permitir mais facilmente as trocas de calor com o ambiente exterior. Dessa forma, quanto maior o PAF, mais esse efeito ocorreu, já que o isolamento neste caso cobre menos áreas. Em Málaga, onde há a predominância de resfriamento, para todos os *setpoints* e PAF, adicionar isolamento térmico ao edifício não foi tão eficaz quanto em Dubai, pois fez o consumo de energia aumentar. Quando não há isolamento e o *setpoint* usado era alto (27°C), houve ainda uma redução no consumo de energia total superior à 20%. Apesar de possuir a

⁵ SHGC - *Solar Heat Gain Coefficient*, também conhecido como Fator Solar, é definido como a relação entre a taxa de radiação solar diretamente transmitida pelo vidro, sob determinado ângulo de incidência, somada a parcela absorvida e retransmitida para o interior da edificação, pela radiação total incidente na superfície externa do vidro (ABNT, 2005c).

necessidade de resfriamento semelhante à Málaga, El Dorado tem um clima mais extremo e apresenta flutuações sazonais mais fortes. Dessa forma, os autores destacaram que, conforme se aumentou o isolamento das paredes e se reduziu o PAF, maior foi a redução no consumo de energia, para todos os *setpoints*.

Para avaliar um edifício de escritórios existente (de planta estreita e alongada, com saletas comerciais e um corredor central) na Holanda, Raji, Tenpierik e Van Den Dobbelen (2015), criaram diversos cenários de análise a partir da variação de alguns parâmetros, tais como tipo de vidro (incolor, colorido – simples, duplo, triplo ou fachada dupla), PAF (30%, 50%, 80% e 100%), presença ou não de dispositivos de proteção solar (persiana interna ou externa, vidro eletrocromico, brises) e tipo de cobertura (cobertura verde, cobertura isolada, cobertura verde + cobertura isolada). Os autores identificaram recomendações de projeto para o edifício e clima analisados, sendo 1) Para um cenário com fachada dupla, o uso de vidro duplo (incolor) resultou na maior economia de energia; 2) Num cenário com envelope construtivo de baixos valores de U (tanto para a parte opaca quanto para os vidros), a economia de energia foi maior quando o PAF era cerca de 50%; 3) Para climas frios, a utilização de dispositivos de sombreamento ajustáveis (persianas operáveis e vidros eletrocromicos), tiveram melhor desempenho do que os dispositivos fixos; 4) A utilização de 10cm de cobertura verde sobre uma cobertura não isolada gerou uma economia de energia total de 0,7%. Assim, nestes cenários avaliados, a integração das melhores soluções de projeto pode gerar um envelope construtivo que ofereceu uma economia de energia total, aquecimento e iluminação na ordem de 42%, 64% e 34%, respectivamente.

Ainda sob o enfoque em um edifício existente (geometria quadrada, com saletas comerciais e um pátio central) na Sérvia, Harmati et al. (2016), realizaram uma avaliação variando as propriedades do envelope construtivo, tais como: PAF (20%, 30% e 50%), tipo de vidro (dois tipos de vidro duplo e um triplo- usando vidro *low-e* de controle solar) e tipo de parede externa (parede de tijolo simples e parede dupla de tijolo com isolamento). Na primeira etapa da pesquisa, os PAFs foram analisados sob o enfoque do aproveitamento da iluminação natural e chegou-se a uma taxa ótima de 30%. O edifício existente possuía um PAF de 50% por fachada, correspondendo à um valor total 37,50% para todas as fachadas, então estabeleceu-se uma taxa por fachada de 30%, que no total do edifício correspondia à 15,43%. Assim, ao variar os tipos de vidro e o PAF (num total de 37,50% para 15,43%), os autores encontraram um decréscimo na demanda de energia para aquecimento em cerca de 91,3% por m², sendo que somente a alteração do tipo de vidro reduziu essa demanda em 25%.

Também na Sérvia, Krstić-Furundžić e Kosić (2016), avaliaram um edifício de escritórios (de planta estreita, com duas saletas e corredor central), a partir de diferentes cenários de envelopes construtivos, estimando-se o consumo energético e as emissões de CO₂ de cada um. O modelo-base possuía uma fachada tradicional (painéis de isolamento térmico, vidro e acabamento em pedra) e não

possuía dispositivo de sombreamento, enquanto que os dois cenários com variações na fachada eram: 1) Fachada com vidro duplo e persiana interna móvel, e 2) Fachada de vidro triplo do tipo *low-e* com gás de criptônio e grelhas externas móveis com inclinação de 45°. Como resultados da pesquisa, os autores destacaram que uma fachada envidraçada fornece mais que o dobro dos ganhos solares, se comparadas à uma fachada tradicional. Além disso, entre os três casos analisados, a fachada tradicional teve um consumo de energia menor para resfriamento, seguido pela fachada com vidro triplo e proteção solar e a fachada com vidro duplo e persianas, enquanto que não houveram diferenças significativas na demanda para aquecimento. No entanto, devido à matriz de produção de energia do país, a demanda por resfriamento fez com que as emissões de CO₂ aumentassem significativamente no caso das fachadas envidraçadas sem proteções solares, que exigiam mais energia para resfriamento. Portanto, dentre as opções analisadas, as que tiveram o melhor desempenho energético foram as fachadas tradicionais e as com vidro triplo do tipo *low-e*, com destaque para as que possuíam dispositivos de sombreamento externo, o que contribuiu para a redução do superaquecimento e alta demanda de energia para resfriamento, diminuindo assim as emissões de CO₂.

Estes trabalhos mostram como a combinação de parâmetros relacionados à fachada pode promover a redução do consumo energético nas edificações. Do ponto de vista dos elementos aqui apresentados, a partir de trabalhos brasileiros que fizeram o mesmo tipo de avaliação para edifícios de escritórios, é possível estabelecer algumas considerações:

- A densidade de carga interna (pessoas, equipamentos e iluminação) geralmente são dados fixos da simulação (CARVALHO; LA ROVERE; GONÇALVES, 2010; PASQUALI et al., 2011; VENÂNCIO; PEDRINI, 2009; WESTPHAL; ANDREIS, 2016), embora que, quanto maior a densidade, maior será o consumo de energia;
- Dados da envolvente opaca (valor de U e absorvância) possuem maior impacto nas fachadas com Porcentagem de abertura na fachada (PAF) menores (MELO; LAMBERTS, 2008; NEVES; MARQUES, 2017), e fachadas com maior isolamento nem sempre auxiliam na redução do consumo com ar condicionado (MELO ET AL., 2015; NEVES; MARQUES, 2017; WESTPHAL; ANDREIS, 2016);
- A orientação solar e o formato da edificação, especialmente em termos de exposição das áreas envidraçadas, tem grande influência no consumo de energia das edificações. O formato está diretamente relacionado aos parâmetros do envelope construtivo, que podem aumentar os ganhos de calor por radiação solar (MELO; LAMBERTS, 2008; VENÂNCIO; PEDRINI, 2009).
- A PAF é um dos parâmetros que mais impactam os ganhos de calor nas edificações e, portanto, influencia o consumo de energia – quanto maior a PAF, maior é o consumo energético (MELO;

LAMBERTS, 2008; NEVES; MARQUES, 2017; VENÂNCIO; PEDRINI, 2009; WESTPHAL; ANDREIS, 2016);

- Utilizar um dispositivo de proteção solar, dependo das características da janela (dimensão, orientação, etc.) pode causar uma redução de 5,8% no consumo de energia total para um edifício institucional na cidade de Natal (VENÂNCIO; PEDRINI, 2009); redução de 6,35% no consumo do ar condicionado para uma edificação comercial localizada no Rio de Janeiro (CARVALHO; LA ROVERE; GONÇALVES, 2010) e redução de 12.5% para um dispositivo de 0,5m e 9% para um dispositivo de 1m para uma edificação comercial em São Paulo (NEVES; MARQUES, 2017);
- Alterar os parâmetros construtivos da fachada (PAF, tipo de vidro) em edifícios localizados em climas quentes, como o de São Luís (MELO; LAMBERTS, 2008), Rio de Janeiro e Salvador (CARVALHO; LA ROVERE; GONÇALVES, 2010; WESTPHAL; ANDREIS, 2016), não significa aumentar muito o consumo com ar condicionado, pois ele já é elevado.

No entanto, tais estudos não apresentam uma análise de desempenho energético específica para edifícios de escritórios de planta livre no Brasil, característica atual desse tipo de edificação. Usar um envelope construtivo inadequado pode causar um aumento no consumo de energia, principalmente devido ao ganhos de calor advindos da radiação solar (MIRRAHIMI ET AL., 2016). Assim, conforme apresentado pelos trabalhos da literatura, é possível notar que a análise do desempenho desse elemento é muito pertinente, visto a sua alta influência no desempenho energético e ambiental das edificações. De acordo com Huang e Niu (2015), os índices que descrevem o desempenho da envolvente da edificação são os principais objetivos nos estudos de otimização do *design* do envelope construtivo, que incluem:

- 1) Índice de desempenho energético (demandas de cargas para aquecimento e resfriamento), consumo de energia do sistema de ar condicionado e consumo de energia total do edifício;
- 2) Índice de custo do ciclo de vida (emissões de CO₂, consumo de energia primária e investimentos ao longo do ciclo de vida da edificação);
- 3) Índice de conforto térmico (métodos de PMV, PPD, horas em conforto, temperatura do ar e operativa);
- 4) Índice de conforto visual (nível de iluminação, uniformidade, fator de luz do dia, autonomia de luz do dia e iluminação útil do dia, além do DGP).

De acordo com os estudos aqui apresentados, sobre a influência de parâmetros do envelope construtivo no desempenho energético de edifícios de escritórios, o vidro e suas propriedades (tipo, cor, SHGC e valor U), bem como a PAF são os aspectos que mais se destacam, uma vez que a correta utilização desses aspectos é capaz de otimizar os ganhos de calor da edificação e, confirmando a importância da fachada neste quesito. Além disso, juntamente ao vidro, a utilização de dispositivos de proteção solar é

destacada como aspecto que, se utilizado da maneira correta, também pode auxiliar na redução dos ganhos de calor solar pela fachada, porém esse aspecto não é utilizado atualmente na produção arquitetônica de edifícios de escritórios no Brasil.

A opção por utilizar isolante térmico é um caso que deve ser muito bem analisado, pois pode acabar prejudicando o desempenho energético da edificação. Em climas mais amenos, como o de São Paulo, por exemplo, em momentos que as temperaturas internas se elevam e o edifício precisa perder calor pela envoltória, o isolamento funciona como uma barreira, o que faz com que haja um aumento de consumo de energia com o condicionamento artificial do ar (MARCONDES, 2010).

Assim, segundo Liu (2010), o desempenho energético das edificações evidencia a importância da escolha do tipo de fachada (aspecto inerente ao conforto térmico, operação e sustentabilidade), a qual tem influência direta no sistema de condicionamento artificial do ar e da iluminação artificial. Por conta disso, a escolha do material da envoltória influencia a absorção e transmissão do calor advindo do exterior, tendo relação direta com o consumo de energia da edificação. E, como forma de proporcionar um panorama dos estudos aqui tratados, uma Tabela resumo (Tabela 3) é apresentada a seguir.

Tabela 3: Panorama dos trabalhos sobre avaliação de desempenho energético apresentados na literatura (continua).

REFERÊNCIA	PARÂMETROS ANALISADOS	ÍNDICES DE DESEMPENHO	PRINCIPAIS CONCLUSÕES / RECOMENDAÇÕES
Carvalho, La Rovere e Gonçalves (2010)	<ul style="list-style-type: none"> • Vidros: simples e duplo • Inserção de brises • Alteração material da fachada (substituição da pele de vidro por alvenaria) • Clima: Rio de Janeiro (RJ) 	<ul style="list-style-type: none"> • Desempenho energético • Consumo AC 	<ul style="list-style-type: none"> • Protetores solares (em todas as fachadas): redução de 6% do AC (4% do total de energia); • Uso do vidro incolor: aumento de até 19% do AC (12% do total de energia); • Melhores soluções: vidros eficientes, paredes externas com cores claras, materiais com baixa transmitância térmica, orientação solar adequada.
Tsikaloudaki et al. (2012)	<ul style="list-style-type: none"> • PAF • Fração da esquadria da janela • Valor U das janelas • Orientação solar • Dispositivos de sombreamento móveis. • Climas mediterrâneos: Atenas (Grécia), Lárnaca (Chipre), Lisboa (Portugal), Málaga (Espanha) e Roma (Itália) 	<ul style="list-style-type: none"> • Desempenho energético 	<ul style="list-style-type: none"> • Desempenho das janelas em climas quentes depende das propriedades termofísicas das mesmas; • Janela com vidro claro, melhor utilizar valor de U moderado (entre 2,00 e 3,20W/(m². K)); • Presença de sombreamento – redução da carga para resfriamento de 7% em média.
Besen e Westphal (2012)	<ul style="list-style-type: none"> • PAF • Tipo de vidro • Climas: São Paulo (SP), Rio de Janeiro (RJ), Fortaleza (CE) e Curitiba (PR) 	<ul style="list-style-type: none"> • Desempenho energético • Conforto térmico 	<ul style="list-style-type: none"> • Desconforto por frio – maiores diferenças (entre os tipos de vidro) em climas amenos (São Paulo e Curitiba); • Em climas quentes (Rio de Janeiro e Fortaleza), o vidro duplo aumentou o conforto em relação ao incolor, mas não teve resultado muito diferente do vidro laminado; • Desempenho energético: quanto maior o PAF e o fator solar do vidro, maior o consumo de energia final; • Vidro incolor – grande consumo de energia; • Em climas amenos não há grande diferença entre o vidro laminado e o duplo; • Em climas quentes, o vidro duplo uma economia de energia maior.
Boyano, Hernandez e Wolf (2013)	<ul style="list-style-type: none"> • PAF • Tipo de vidro • Controle iluminação artificial • Valor de U (paredes externas e janelas) • Climas: Tallinn (frio), Londres (intermediário) e Madri (quente). 	<ul style="list-style-type: none"> • Desempenho energético (redução da demanda de energia final para aquecimento, resfriamento e iluminação) 	<ul style="list-style-type: none"> • Nas melhores combinações de parâmetros (controle da iluminação, vidros triplos, aumento do isolamento das paredes externas e orientação solar), foram obtidas economias na ordem de até 36% (com o controle total de iluminação), 16% (substituição do vidro duplo pelo triplo), 8% (pelo aumento do isolamento das paredes externas) e até 14% (pela mudança na orientação de leste/oeste para norte/sul).

Tabela 3: Panorama dos trabalhos sobre avaliação de desempenho energético apresentados na literatura (continuação)

REFERÊNCIA	PARÂMETROS ANALISADOS	ÍNDICES DE DESEMPENHO	PRINCIPAIS CONCLUSÕES / RECOMENDAÇÕES
Ihara, Gustavsen e Jelle (2015)	<ul style="list-style-type: none"> • Formato da edificação • Volume da edificação • Nº de andares • PAF • Índice SHGC das janelas • Clima: Tóquio (Japão) 	<ul style="list-style-type: none"> • Desempenho energético (redução da demanda de energia para aquecimento e resfriamento) 	<ul style="list-style-type: none"> • Formas de reduzir a demanda de energia: 1º) redução do valor de SHGC; 2º) redução do valor de U da janela; 3º) aumento da refletância solar; • Observou-se que a redução do valor U das partes opacas da fachada aumentou a demanda de energia nos edifícios altos, enquanto que nos edifícios baixos ocorreu o contrário – destaque para a utilização adequada do valor U para o modelo de edificação.
Raji, Tenpierik e Van Den Dobbelsteen (2015)	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de vidro • PAF • Dispositivos de sombreamento • Tipo de cobertura • Clima: Delft (Holanda) 	<ul style="list-style-type: none"> • Desempenho energético (redução da demanda de energia final para aquecimento, resfriamento e iluminação) 	<ul style="list-style-type: none"> • Formas de reduzir a demanda de energia: 1) Fachadas duplas com uso do vidro duplo incolor; 2) envelope construtivo de alto desempenho (baixo valor de U) a economia é maior quando se tem PAF=50%; 3) Climas frios – sombreamentos ajustáveis; 4) Fachadas duplas – persianas localizadas para fora do vidro duplo; 5) Telhado verde de 10cm sobre cobertura não isolada; 6) Neste estudo, a integração das melhores soluções de projeto geraram uma economia de energia total, para aquecimento e iluminação de 42%, 64% e 34%, respectivamente.
Westphal e Andreis (2016)	<ul style="list-style-type: none"> • Tipos de fachada • PAF • Tipo de vidro • Climas: Curitiba, São Paulo (SP), Porto Alegre (RS), Brasília (DF), Rio de Janeiro (RJ), Salvador (BA) e Recife (PE) 	<ul style="list-style-type: none"> • Desempenho energético 	<ul style="list-style-type: none"> • Fachada de pele de vidro consome mais energia que a fachada de alvenaria tradicional; • Vidros de controle solar são os que promovem melhor desempenho energético em climas mais amenos; • Vidros duplos promovem melhor desempenho em climas mais quentes; • A adoção de vidros de controle solar permite um desempenho melhor em PAF maiores; • Climas mais quentes: utilização de parede com mais isolamento térmico; • Melhores orientações para menores consumos de energia: maiores fachadas voltadas à Norte – Sul.
Harmati et al. (2016)	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de vidro • PAF • Tipos de parede externa • Clima: Novi Sad (Sérvia) 	<ul style="list-style-type: none"> • Desempenho energético (demanda de energia para resfriamento e aquecimento em função das propriedades do envelope construtivo) 	<ul style="list-style-type: none"> • PAF ótimo: 30% por fachada; • Combinando a variação dos tipos de vidro e o PAF: redução da demanda de energia para aquecimento em 91% / m²; • Somente a alteração do vidro reduziu a demanda para aquecimento em 25%; • Destaques: importância do PAF e do SHGC na demanda de energia do edifício.

Tabela 3: Panorama dos trabalhos sobre avaliação de desempenho energético apresentados na literatura (conclusão)

REFERÊNCIA	PARÂMETROS ANALISADOS	ÍNDICES DE DESEMPENHO	PRINCIPAIS CONCLUSÕES / RECOMENDAÇÕES
Krstić-Furundžić e Kosić (2016)	<ul style="list-style-type: none"> • Tipos de vidro • Tipos de fachada • Dispositivos de sombreamento • Clima: Belgrado (Sérvia) 	<ul style="list-style-type: none"> • Desempenho energético (influência de parâmetros do envelope construtivo) • Emissões de CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> • Fachada envidraçada fornece mais que o dobro dos ganhos solares, em relação à fachada tradicional; • Menor demanda de energia para resfriamento: 1º) Fachada tradicional; 2º) Fachada com vidro triplo e proteção solar e 3) Fachada com vidro duplo e persianas; • Menor demanda de energia para aquecimento: 1º) Fachada com vidro triplo, 2º) Fachada tradicional e 3º) Fachada com vidro duplo; • Emissões de CO₂: cenários em que as demandas de energia primária para resfriamento são maiores: destaque para as fachadas tradicional e com vidro triplo do tipo <i>low-e</i> com sombreamento externo.
Neves e Marques (2017)	<ul style="list-style-type: none"> • Transmitância térmica (U) das paredes externas • Dispositivos de sombreamento • PAF • SHGC das janelas • Clima: São Paulo (SP) 	<ul style="list-style-type: none"> • Desempenho energético (influência de parâmetros do envelope construtivo) • Conforto térmico 	<ul style="list-style-type: none"> • Os dispositivos de sombreamento tiveram efeito positivo na redução da demanda por resfriamento; • As fachadas com pouco isolamento funcionaram melhor para o clima de São Paulo; • Valores desejáveis de PAF e SHGC, sob a perspectiva de minimizar a demanda de energia para refrigeração, indica-se até 40% e até 32, respectivamente.
Friess, Rakhshan e Davis (2017)	<ul style="list-style-type: none"> • PAF • Espessura de isolamento • <i>Setpoint</i> • Climas: Dubai (Emirados Árabes Unidos), Málaga (Espanha) e El Dorado —Arkansas (USA) 	<ul style="list-style-type: none"> • Desempenho energético (demanda de energia para resfriamento e aquecimento em função das propriedades do envelope construtivo) 	<ul style="list-style-type: none"> • A combinação do <i>setpoint</i> em 21°C, com a maior espessura de isolamento, faz o consumo de energia diminuir; • Ao usar um <i>setpoint</i> mais alto (27°C), é necessário que a edificação tenha menos isolamento, para que permita mais facilmente as trocas de calor com o ambiente exterior; • Quando o clima é predominantemente quente, para todos os <i>setpoints</i> e PAF, adicionar isolamento térmico da fachada não é tão eficaz, pois faz o consumo de energia aumentar; • Para todos os <i>setpoints</i>, conforme se aumenta o isolamento das paredes e se reduz o PAF, maior é a redução no consumo de energia.

Fonte: A autora (2018).

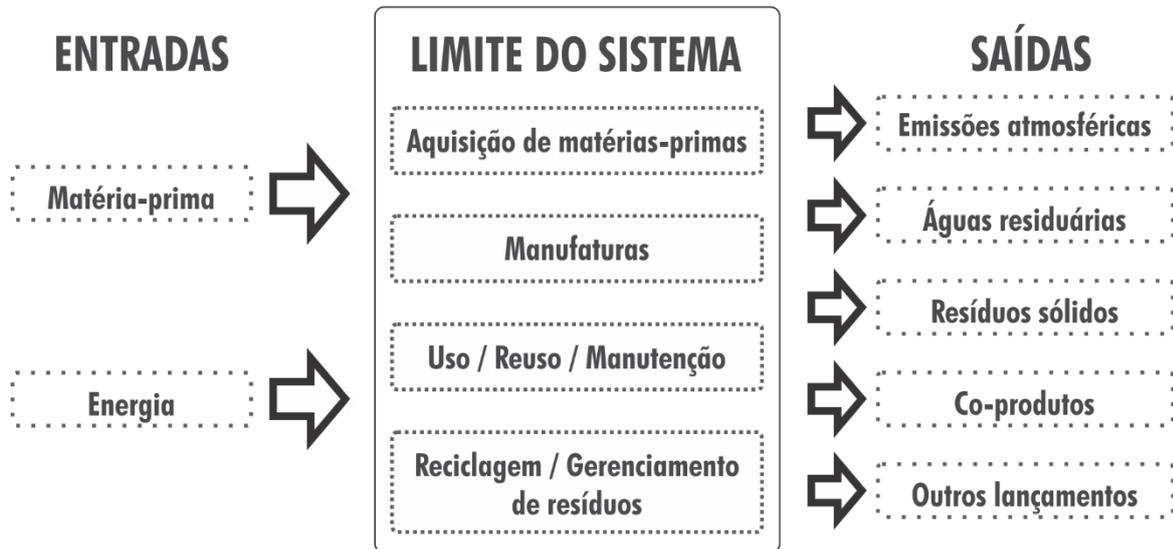
2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

De acordo com Buyle, Braet e Audenaert (2013), os primeiros estudos sobre impactos ambientais advém dos anos de 1960 e 1970, com a avaliação e comparação de bens de consumo. No início dos anos de 1980, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) começa a ser aplicada no setor da construção civil, em estudos que tinham como foco o uso de recursos renováveis, como o de Bekker (1982). No entanto, não havia um método específico e, por conta disso, os resultados das pesquisas divergiam muito. A partir da década de 1990, com a divulgação de seminários e publicações, a Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry - SETAC*) começou a organização de um material, padronizando-se a metodologia de ACV, que resultou no “Código de Práticas” do SETAC. Após essa primeira regulamentação, a Organização Internacional de Normatização (ISO) lançou (em 1997) uma série de normas que facilitaram a criação de um quadro metodológico padrão. O desenvolvimento destas normas foi importante pois, a partir disso, seria possível comparar o resultado de diferentes ACVs.

A partir do século 21 houve um crescente interesse pela ACV, que passou a fazer parte das Políticas Europeias, tais como a Política Integrada ao Produto (IPP), que originou também o Manual do ILCD (*International Reference Life Cycle Data System Handbook*) (JRC; IES, 2010)- um guia prático de aplicação da ACV. Outra parte importante nesse interesse crescente pela ACV é o desenvolvimento das Declarações Ambientais de Produto (*Environmental Product Declaration - EPDs*), que constituem uma série de informações ambientais (muitas com base em estudos de ACV) específicas para cada produto avaliado. Assim, a ACV tem sido destaque em uma série de normas, estudos e tal padronização foi adotada também pelo Comitê Técnico de Normalização CEN (TC) 350, que desenvolveu modelos de avaliação para edificações (tanto novas quando existentes), a partir dos três aspectos da sustentabilidade (econômico, social e ambiental), integrando a isso as EPDs dos produtos usados no setor da construção civil (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013).

Assim, para a avaliação do nível de desempenho ambiental de uma edificação, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é a técnica mais adequada atualmente, que considera todo o ciclo de vida de um produto – desde a extração das matérias-primas, produção de energia e materiais, manufatura, uso, fim de vida, até a disposição final, conforme apresentado na Figura 6. A partir dessa visão sistemática, é possível identificar e evitar a transferência de possíveis cargas ambientais entre as fases do ciclo de vida ou entre processos individuais (ABNT, 2009a).

Figura 6: Estágios do ciclo de vida.

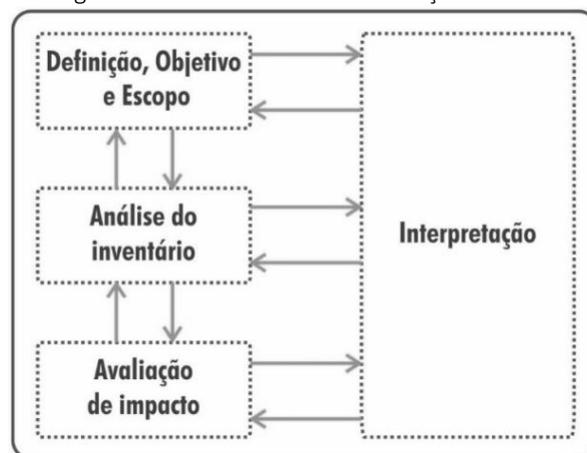


Fonte: Adaptado de EPA (2006).

Esta técnica se destaca por permitir a análise e escolha de alternativas, sob uma perspectiva puramente ambiental, possibilitando a estimativa dos impactos ambientais cumulativos resultantes de todas as fases do ciclo de vida do produto, muitas vezes incluindo impactos não considerados em análises mais tradicionais (GIANNETTI et al., 2008). A ACV possui uma série de abordagens, que dentre as quais se destacam: 1) do “berço ao túmulo” (*cradle-to-grave*) para a avaliação de sistemas de produção (EPA, 2006), que considera todo o ciclo de vida – da extração das matérias-primas até a disposição final; 2) do “berço ao portão” (*cradle-to-gate*), que avalia desde a extração das matérias-primas até o “portão da fábrica”, quando o produto está pronto para uso; 3) do “do berço ao berço” (*cradle-to-cradle*), quando se trata de uma avaliação que adote sistemas de reciclagem, entre outros.

Normalizada pela *International Organization for Standardization* (ISO), a ISO 14040 (ABNT, 2009a) foi publicada no Brasil pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). De acordo com esta norma, um estudo de ACV é dividido em 4 etapas principais (Figura 7), que são descritas a seguir:

Figura 7: Procedimentos de realização da ACV.



Fonte: Adaptado de EPA (2006)

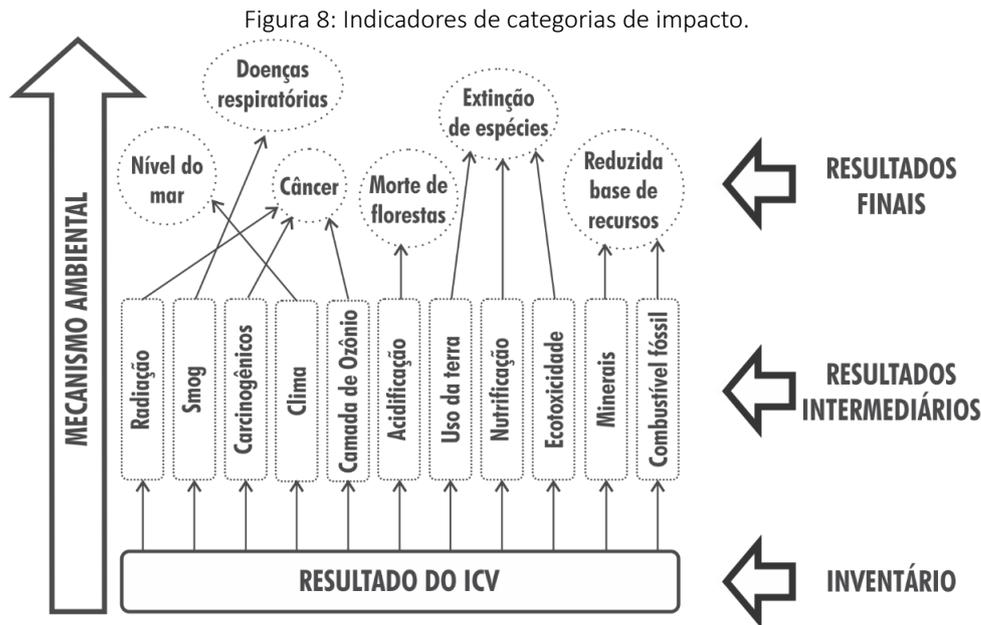
1) Definição de Objetivo e Escopo: fase em que se deve declarar detalhadamente a aplicação pretendida, as razões para conduzir o estudo e o público-alvo, além de considerar os seguintes itens: a) função e unidade funcional; b) fronteiras do sistema; c) requisitos da qualidade dos dados; d) requisitos para comparações entre sistemas; e) considerações sobre análise crítica;

2) Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV): envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculos (balanço de energia e massa) para quantificar os elementos de entradas e saídas de um sistema de produto⁶. Os dados coletados podem ter caráter primário- quando obtidos diretamente do fabricante do produto-, ou secundário- a partir de bases de dados internacionalmente aceitas, como, por exemplo o *Ecoinvent* (FRISCHKNECHT et al., 2005). Os dados coletados para a análise do inventário, assim como todo o ciclo de vida do produto analisado podem ser modelados em programas computacionais, tais como o SimaPro[®] (PRÉ-CONSULTANTS, 2017) e o GaBi (IKP- PE, 2017);

3) Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV): fase destinada à compreensão e avaliação da relevância dos impactos ambientais potenciais, a partir dos resultados do ICV. Em geral, esse processo envolve a seleção das categorias de impacto, dos indicadores das categorias e dos modelos de caracterização. Existem diversos métodos disponíveis para a caracterização dos impactos ambientais, tais como o EDIP 2003, Impact 2002(+), LIME, CML, ReCiPe, entre outros. Os dados do inventário são associados aos impactos ambientais específicos, quantificados por meio dos indicadores pertencentes à categoria de impacto selecionada para o estudo (Figura 8). As categorias de impacto podem ter dois tipos de abordagens: a) ponto médio (*midpoint*), que são orientadas ao problema, ou seja, são indicadores de impacto potencial das emissões, relacionados à saúde humana, qualidade do ecossistema, alterações climáticas e recursos. Eles geram uma imagem mais completa dos impactos ecológicos, estando diretamente ligados às características físicas e utilizando valores no início ou no meio do mecanismo ambiental (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013); e b) ponto final (*endpoint*), que são orientadas aos danos, isto é, expressam as consequências ambientais, presentes no final do mecanismo ambiental, relacionadas aos danos às áreas de proteção, tais como esgotamento de recursos e consequências ambientais potenciais advindas da disposição de resíduos sólidos (BUENO, 2014; BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013). Essa abordagem de ponto final, apesar da facilidade de ser entendida, tende a ser menos transparente, o que faz com que possam haver mais incertezas, afetando o nível de confiança dos resultados. A AICV também possui outras etapas opcionais, que são a normalização, o agrupamento, a ponderação e a análise da qualidade dos dados (ABNT, 2009b). A Normalização representa um cálculo com base em informações de referência (por exemplo, o impacto ambiental médio de um cidadão de determinado país em um ano); o Agrupamento serve para associar as categorias a uma base específica (caráter global, regional

⁶ Segundo a norma NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b, p. 3), um sistema de produto se configura como um “conjunto de unidades de processos, conectadas material e energeticamente, que realiza uma ou mais funções definidas”.

ou local), ou classificá-las de acordo com uma hierarquia (prioridade alta, média ou baixa); a Ponderação consiste em converter os resultados dos indicadores de diferentes categorias de impacto em uma única pontuação, com base em valores numéricos específicos (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013); e a Análise da qualidade dos dados é realizada por meio de cálculos para avaliar a contribuição, incerteza e sensibilidade dos resultados (ABNT, 2009b).



Fonte: Goedkoop et al. (2010)

4) Interpretação do Ciclo de Vida: com base nas etapas anteriores, essa etapa identifica questões significativas, em que as constatações da avaliação de impacto são combinadas e verificadas, de acordo com o objetivo e o escopo definidos previamente, visando alcançar conclusões e recomendações.

De acordo com Willers, Rodrigues e Silva (2013), entre os benefícios de um estudo de ACV, destaca-se a visão holística do potencial de impacto de um determinado produto, que a ACV proporciona, e também a determinação das etapas críticas de seu ciclo de vida que proporcionam altas descargas ambientais ou que consomem grandes quantidades de recursos naturais. Com isso pode-se comparar dois ou mais produtos ou processos, desde que exerçam a mesma função, e, então, avaliar a melhor opção.

De uma forma geral, a ACV pode ser aplicada para: avaliar a adequação ambiental de uma determinada tecnologia (uso de recursos e emissões); identificar possíveis melhorias no processo ou produto; comparar alternativas tecnológicas, desde que se destinem a uma mesma função, entre outros aspectos (SILVA, 2003).

No entanto, a aplicação da ACV para a avaliação de impactos ambientais associados à construção

civil apresenta algumas limitações, principalmente em relação à dificuldade em obtenção de informações e bases de dados confiáveis e completas para os materiais utilizados no setor da construção civil (SOARES; SOUZA; PEREIRA, 2006). Além disso, destaca-se também o despreparo dos profissionais de construção para a interpretação dos indicadores de potenciais impactos ambientais.

Apesar disso, a ACV é uma metodologia que ajuda na tomada de decisões, sendo uma boa ferramenta para melhorar o desempenho da sustentabilidade ambiental na construção civil, também em países em desenvolvimento. Há uma necessidade crucial para proporcionar a satisfação de necessidades básicas e os requisitos de conforto da população com o consumo de energia razoável e sustentável (ORTIZ-RODRÍGUEZ; CASTELLS; SONNEMANN, 2012).

2.3.1 ACV na Construção Civil

Segundo Bekker (1982), a Avaliação do Ciclo de Vida realizada no setor da construção civil pode ser uma abordagem eficaz quando se pretende analisar energia e o uso de recursos naturais, bem como o seu impacto no meio ambiente. Assim, esta técnica tem sido utilizada no âmbito da construção civil para auxiliar na análise e seleção de materiais/produtos ambientalmente melhores (com menos impactos ambientais negativos), assim como na avaliação de desempenho de edifícios, práticas de projeto e otimização de processos de construção (CABEZA et al., 2014). A avaliação do desempenho ambiental está atrelada à uma série de categorias de potenciais impactos ambientais, tais como: consumo de água, consumo de energia não-renovável, potencial de aquecimento global, destruição da camada de ozônio, acidificação da água e do solo, eutrofização dos lençóis freáticos, esgotamento dos combustíveis fósseis e de recursos energéticos, entre outros (BRAGANÇA e MATEUS, 2007).

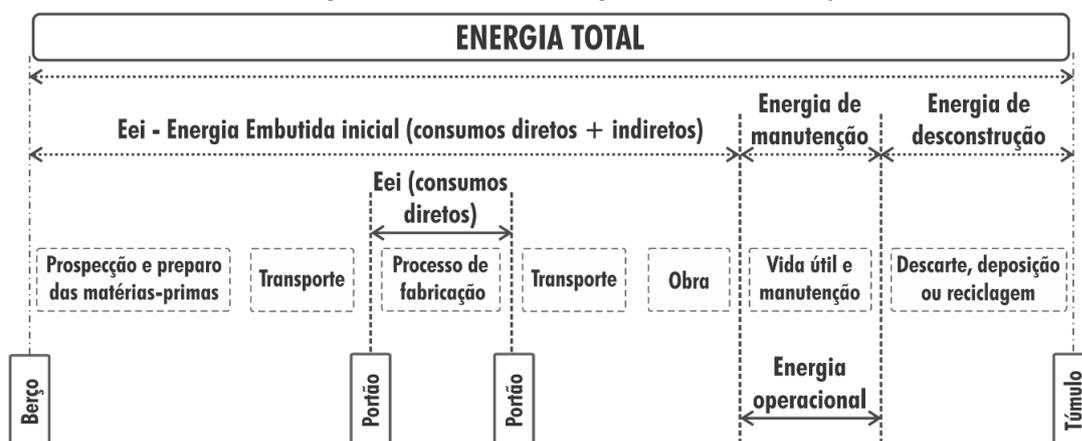
Segundo Pajchrowski et al. (2014), a ACV na construção civil possui alguns tipos de abordagens, como: a) materiais, que incluem análises comparativas ou não, do ponto de vista, por exemplo, de tipos de isolamento (lã mineral x poliestireno), cobertura (telha cerâmica x telha de concreto), além do tipo de energia utilizado na sua produção (gás x carvão); b) combinação de componentes, que incluem análises de módulos específicos da edificação (cobertura, fachada, piso, sistema de janelas, etc.); e c) todo o edifício e seu processo construtivo. Os autores apontam também a definição de dois tipos de análises, sendo: 1) *bottom-up* (de baixo para cima), quando o foco é a seleção de materiais em si, ou seja, a construção em si não é considerada, apenas são avaliados componentes e um exemplo desse tipo de abordagem é o das Declarações ambientais do produto (EPD's); e 2) *top-down* (de cima para baixo), que considera o edifício e todo o seu ciclo de vida, podendo considerar as seguintes escalas: 1) micro (material construtivo, edifício); *meso* (conjunto habitacional, cidade); e macro (todo o setor da construção, o país todo).

A ACV – utilizada anteriormente no âmbito dos processos industriais-, passou a ser utilizada na avaliação de edifícios, seja no âmbito dos materiais, sistemas construtivos e do próprio edifício com um todo. Entretanto, diferentemente dos processos industriais, que são altamente controlados, os edifícios envolvem uma série de parâmetros que os torna complexos, tais como: o longo tempo de vida (50 – 100 anos); um baixo tempo de vida de alguns elementos e componentes que tem de ser substituídos com certa frequência; o uso de vários materiais e processos; as características únicas de cada edifício; a variação das distâncias de cada produto até a fábrica; a evolução das funções ao longo do tempo, manutenção e necessidades de *retrofit*; e a dependência do comportamento do usuário exigem muitas suposições/premissas, gerando incertezas e conseqüentemente influenciando a credibilidade dos resultados (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013).

O desempenho ambiental varia de acordo com a metodologia de avaliação de impacto utilizada e de acordo com o produto analisado. Por exemplo, para avaliação de estruturas como pontes, os impactos mais relevantes são aqueles advindos da produção dos materiais, da construção da paisagem e da biodiversidade local e, para este fim, a seleção de materiais ecoeficientes pode ser uma alternativa na melhoria do desempenho ambiental. Por outro lado, para edifícios, os impactos mais relevantes advêm da fase de uso e, neste caso, estão relacionados ao consumo energético (associado à demanda de energia para aquecimento e resfriamento). Assim, para as edificações, incorporar sistemas mais eficientes, que reduzam o consumo energético, pode ser um ponto importante na diminuição dos impactos e na melhoria do desempenho ambiental (BRAGANÇA e MATEUS, 2007).

Como supracitado, na análise dos resultados de ACVs de edifícios é recorrente que os impactos relativos ao consumo de energia sejam significativos. Assim, visando a redução de tempo e recursos, foram criados métodos de Análise do Ciclo de Vida Energético – ACVE (FAY, 1999). Essa possibilidade de abordagem considera todas as entradas de energia de um edifício (ver Figura 9), avaliando desde a sua produção (energia incorporada), uso (energia de funcionamento / operacional) e demolição.

Figura 9: Ciclo de vida energético de uma edificação.



Fonte: Adaptado de Tavares (2006).

A primeira fase (energia incorporada/embutida) refere-se à energia utilizada durante a fase de fabricação do edifício, ou seja, é o conteúdo energético de todos os materiais utilizados no edifício. A fase de operação/funcionamento abrange todas as atividades relacionadas ao uso dos edifícios durante a sua vida útil. Já a energia de demolição, é aquela para demolir o edifício e transportar o material de resíduos para aterros e / ou instalações de reciclagem (RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010). E as principais fontes de dados para este tipo de avaliação são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Fontes de dados para avaliação do ciclo de vida energético.

FASE DO CICLO DE VIDA	ATIVIDADE	POSSÍVEIS FONTES DE DADOS
(a) Fase de produção	Produção dos materiais da edificação	<ul style="list-style-type: none"> • Dados da literatura a respeito da energia proveniente da fabricação dos materiais, os elementos econômicos e tabelas de saída, análise de processos, análises híbridas; • Quantidades estimadas desde o projeto da edificação, lista de materiais e de entrevistas com projetistas, contratante; • Base de dados (Ex. <i>Ecoinvent</i>)
	Transporte	<ul style="list-style-type: none"> • Distâncias médias para transporte de material; • Dados de energia para operações de transporte;
	Construção de edifícios, incluindo reforma	<ul style="list-style-type: none"> • A utilização de energia a partir de uma visita ao local;
(b) Fase de uso	Uso de eletricidade e combustíveis para aquecimento, água sanitária e iluminação	<ul style="list-style-type: none"> • Programas de simulação - ENERGY-PLUS, VISUAL DOE, E-QUEST, DESIGN BUILDER, ENORM, TRNSYS, ECOTECT, SUN-CODE, etc., avaliação das contas anuais de eletricidade, levantamento domiciliar sobre o uso da energia; • Dados de inventário para a produção de combustível; • Dados do mix de energia do país;
(c) Fase de demolição	Demolição do edifício	<ul style="list-style-type: none"> • Operações de demolição e quantidades de dados específicos medidos; • Uso de equipamentos e explosivos a partir da base de dados;
	Transporte	<ul style="list-style-type: none"> • Distâncias médias para transporte de material; • Dados de energia para operações de transporte;
	Reciclagem	<ul style="list-style-type: none"> • Dados de medição específicos;
(d) Ciclo de vida energético	Consumo total de energia do edifício em seu ciclo de vida	<ul style="list-style-type: none"> • Fases (a) + (b) + (c)
(e) Avaliação do ciclo de vida	Estimativa do material e fluxo de energia no ciclo de vida	<ul style="list-style-type: none"> • Fases (a) + (b) + (c)
	Avaliação do impacto da construção no meio ambiente	<ul style="list-style-type: none"> • Efeito estufa ou o aquecimento global, a destruição da camada de ozônio, acidificação, eutrofização, poluição atmosférica fotoquímica, etc. impactos estimados utilizando softwares - SIMAPRO, ECOBAT, LEGEP, BEES, ATHENA, etc.

Fonte: Adaptado de Ramesh, Prakash e Shukla (2010)

Do ponto de vista dos estudos presentes na literatura, Buyle, Braet e Audenaert (2013) apontam algumas limitações que impedem que tais estudos sejam facilmente comparáveis, sendo: 1) nem todos os estudos abordam todos os aspectos inerentes ao ciclo de vida da edificação (alguns excluem elementos como transporte, manutenção, uso da água, etc.); 2) nível de detalhamento da ACV; 3) a

grande variedade de métodos; 4) avaliação de distintas tipologias de edifícios (nesse âmbito os autores apontam que muitos dos estudos consideram apenas edificações residenciais, sendo que escolas e edifícios de escritórios também merecem destaque, fato também observado por Pajchrowski et al. (2014) e); e 5) nem todos os estudos abordam todas as fases do ciclo de vida da edificação.

Nesse sentido, Dimoudi e Tompa (2008), investigaram o papel de diferentes materiais construtivos, quantificando-os em termos de energia incorporada e emissões equivalentes de CO₂ e SO₂ em edifícios de escritórios na Grécia, considerando 50 anos de vida útil. Foram testados 2 tipos de edifícios, sendo 1) Edifício de 5 andares, 1891m² de área útil total, estrutura em concreto armado, parede externa dupla com 5cm de poliestireno expandido e revestimento em argamassa; e 2) Edifício de 3 andares, 400m² de área útil total, estrutura em concreto armado, paredes externas duplas de tijolo com 5cm de lã mineral e revestido com painéis de alumínio (compostos por 2 folhas de 0,5mm com núcleo em polietileno de 3mm). Os dados referentes aos parâmetros ambientais dos materiais foram coletados na literatura e os valores de energia incorporada, emissões de CO₂ e SO₂ foram calculados com base nos valores totais e por m² de área útil. Como resultados da pesquisa destacou-se o grande impacto dos materiais da estrutura (concreto e aço) na energia incorporada (66,73% para o edifício 1 e 59,57% para o edifício 2) e nas emissões (73,30% no edifício 1 e 75,30% no edifício 2). O envelope construtivo contribuiu em cerca de 12- 13% de toda a energia incorporada. Os autores apontaram que isso ocorre devido ao fato de os edifícios terem muitas paredes internas, fazendo com que a estrutura apresente um impacto maior que o envelope. No caso dos edifícios de planta livre, em que não há paredes internas, o envelope construtivo teria um peso maior nos impactos ambientais.

Zabalza Bribián, Valero Capilla e Aranda Usón (2011), fizeram um estudo sobre os materiais mais utilizados na construção civil da Espanha, comparando-os através de três categorias de impacto (energia primária, potencial de aquecimento global e uso de água). Como os materiais tinham comportamentos e propriedades diferentes, adotou-se como unidade funcional a densidade (em kg/m³) de cada material, para facilitar a comparação dos impactos, estando assim de acordo com Buyle, Braet e Audenaert (2013). Os materiais analisados foram 1) tijolos e telhas/pisos; 2) materiais isolantes; 3) cimento e concreto; 4) produtos de madeira; e 5) produtos comuns (aço, alumínio, PVC, vidro plano e cobre). Do ponto de vista do primeiro grupo, o piso cerâmico e as telhas de fibrocimento foram os que mais consumiram energia primária, água e emitiram CO₂ para serem produzidos, enquanto que os tijolos de barro claro e de sílico-calcário foram os que obtiveram melhores resultados neste quesito; em relação aos materiais isolantes, a espuma de EPS (Espuma de Poliestireno Expandido) e as placas rígidas de poliuretano foram as que mais impactaram nas três categorias, enquanto que a utilização de materiais naturais tais como a cortiça, fibra de madeira e celulose foram as que menos impactaram nos três quesitos; para o grupo do cimento, este foi o material mais impactante (principalmente pela manufatura do clínquer), juntamente com a

argamassa de cimento, enquanto que o concreto foi o que obteve os menores impactos (por conta da mistura com outros materiais de menor impacto, como pedregulho, areia e água); no que tange os materiais de madeira, os que requeriam menos processos industriais- como a madeira serrada-, foram os que impactavam menos, enquanto os painéis OSB (principalmente por conta do uso de resinas compostas por formaldeído) foram os que mais impactaram nos três quesitos; por fim, em relação aos materiais mais comuns, o alumínio e o PVC foram os que mais impactaram, principalmente devido ao alto consumo energético e consumo de água para sua produção, enquanto que o vidro plano e o aço foram os que menos impactaram dentro desse grupo. Os autores concluíram que é preciso implementar melhores técnicas de produção, para reduzir os impactos da produção destes produtos e, ao mesmo tempo, padronizar os dados de inventários, de acordo com as características e peculiaridades de cada país.

Para demonstrar como a seleção de materiais construtivos afeta o balanço de energia primária (renovável e não renovável) no ciclo de vida de uma edificação hipotética (120m²) no contexto da Finlândia, Takano et al. (2015) consideraram três categorias de componentes (estrutura, superfície e elementos internos) tendo em vista as fases de produção, uso e fim-de-vida (demolição). Foi considerado como unidade funcional 96m², que é a área útil de piso aquecido do edifício. Os componentes avaliados, do ponto de vista da estrutura foram madeira (leve e/ou laminada cruzada), concreto (armado e/ou celular autoclavado), alvenaria e aço; em relação ao revestimento das superfícies, consideraram para o ambiente interior gesso, compensado, fibrocimento e MDF, para o piso placa de madeira, PVC, pedra, cerâmica; e cobertura, PVC, aço galvanizado, folha de betume, fibrocimento e concreto; e, por fim, para os elementos internos considerou-se o material de isolamento (lã de rocha, lã de vidro, fibra de celulose e EPS). Como principais resultados da pesquisa, os autores apontaram que a influência na seleção dos materiais aparece em cada fase do ciclo de vida da edificação, dependendo do componente, e isso se refletiu principalmente nas fases de produção e fim-de-vida (reciclagem). Tais efeitos apareceram menos na fase operacional, medidos com base na influência da variação da temperatura interna. Em relação aos componentes, o material da estrutura foi o que mais influenciou o consumo de energia primária, sendo que as estruturas pesadas (concreto armado) requereram mais energia nos estágios de produção e fim-de-vida do que as estruturas mais leves, como madeira e aço. Dessa forma, os autores concluíram que se deve prever o ciclo de vida dos componentes construtivos, para que se possa otimizar o balanço de energia da edificação, sob a perspectiva do material.

Buyle, Braet e Audenaert (2013) também apontaram que, avaliar materiais construtivos pode ser difícil pois, ainda que exerçam a mesma função (por exemplo: tijolo e madeira), não possuem características estruturais semelhantes. Logo, uma alternativa para resolver esse tipo de limitação pode

ser avaliar um componente construtivo ao invés do material.

Nesse sentido, Neiva, Mateus e Bragança (2012), com o objetivo de criar uma base de dados que apresentasse os principais impactos ambientais das soluções construtivas (envolvente opaca) no âmbito de Portugal, os autores utilizaram-se da ACV. Através do levantamento de dados de inventário do *Ecoinvent*, modulando cada fase do ciclo de vida no programa *SimaPro*[®], foram considerados todos os processos envolvidos do berço ao túmulo. Para a avaliação dos impactos ambientais, foram utilizados métodos do tipo ponto médio (*midpoint*): CML 2 baseline 2000 e o *Cumulative Energy Demand* (CED). Como resultado do estudo foi criado um quadro com informações de cada solução construtiva e os impactos ambientais potenciais (ambientais e energéticos) totais e parciais.

Bessa (2010), considerando todas as fases do ciclo de vida de um edifício, fez uma avaliação em quatro tipos de fachadas de um modelo de edifício de escritórios para a cidade de São Paulo a fim de contabilizar as emissões de CO₂ para 60 anos de vida útil. Para se obter o consumo de energia advindo da fase de uso, foram feitas simulações no programa EnergyPlus. Após essa etapa, foram realizadas análises de inventário dos materiais, considerando apenas os consumos de energia para a produção e para o uso da edificação. Como conclusões do estudo, tem-se que as fachadas que mais emitiram CO₂ são, nesta ordem de maior para menor impacto: a) *structural glazing* com vidro incolor, b) alvenaria de tijolo cerâmico revestida de placas de ACM (alumínio), c) *structural glazing* com vidro refletivo e d) alvenaria revestida com argamassa. De acordo com a autora, as etapas de produção dos materiais, transporte e uso da edificação contribuíram com 99% das emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida.

Bueno (2014) realizou análises de sensibilidade a fim de verificar a influência dos resultados obtidos em estudos de ACV a partir de dados secundários (provenientes de bases de dados europeias) e primários (coletados para o contexto brasileiro). Para isso, foram feitas ACVs de quatro sistemas construtivos não-estruturais, aplicados na cidade de São Paulo, com tempo de vida de 40 anos (excluindo-se deste processo, a fase de uso da edificação), a saber: a) Alvenaria de blocos cerâmicos; b) Alvenaria de blocos de concreto; c) Parede de concreto leve; d) Sistema *steel framing* com fechamento interno e externo de placas cimentícias preenchidas em madeira; e) Sistema *steel framing* com fechamento interno de placas de gesso acartonado e externo de placas cimentícias preenchidas em madeira. Como principais resultados do estudo, utilizando categorias de impacto do tipo *midpoint*, obteve-se que o sistema *steel framing* com placas cimentícias externa e interna se apresentou como a alternativa mais impactante, enquanto que os menores impactos foram apresentados pela alvenaria de blocos de concreto. Na comparação dos dados primários e secundários, na categoria *endpoint*, a autora encontrou discrepâncias, sendo a alternativa mais impactante no primeiro caso o *steel framing* com placas cimentícias externa e interna e, no segundo caso, a alvenaria de blocos cerâmicos. Como principais conclusões do estudo, a autora afirmou que a fonte de dados do inventário, o escopo

geográfico e o método de avaliação de impacto foram os pontos-chaves de maior sensibilidade nos resultados das análises e que estes devem ser devidamente detalhados, para evitar falsas conclusões.

Buyle, Braet e Audenaert (2013) afirmaram que a conclusão de quase todas as pesquisas se refere à predominância da fase de uso no ciclo de vida da edificação, para a qual contribuem especialmente o consumo energético para aquecimento e resfriamento dos ambientes. Os autores apontaram que em residências essa fase representou de 60-90% de todo o impacto ambiental, principalmente no que diz respeito às emissões de CO₂. Logo, uma das principais conclusões a respeito desse fato é a necessidade de reduzir o consumo energético, principalmente através da melhoria do envelope construtivo. Além disso, os autores destacaram a importância do projeto arquitetônico – ganhos solares, orientação e forma-, que podem gerar mais efeitos positivos do que apenas investir em melhorias tecnológicas.

Kofoworola e Gheewala (2009), com o objetivo de determinar coeficientes de energia incorporada advindos dos materiais construtivos comumente utilizados na Tailândia, avaliaram um típico edifício de escritórios (estrutura de concreto, paredes internas em alvenaria e paredes externas de alvenaria e pele de vidro, com 38 andares, e 60000m² de área total). Foi considerado como unidade funcional a área total da edificação, com um tempo de vida útil de 50 anos. As fases do ciclo de vida consideradas foram a produção dos materiais, construção, operação, manutenção e demolição da edificação, incluindo em todas essas etapas o transporte e excluindo o consumo de água. Os dados do inventário foram obtidos em bases governamentais e através de fornecedores. Como resultados da pesquisa, os autores apontaram que a fase operacional dominou o ciclo de vida da edificação, respondendo por 81% do consumo de energia no ciclo de vida (na fase de produção dos materiais, o consumo de energia correspondeu a 17%). Os materiais que mais impactaram a energia incorporada foram o concreto (35,4%) e o aço (42,4%), presentes principalmente na estrutura do edifício. Do ponto de vista da energia operacional, esta foi dominada pelo uso do ar condicionado (56%), seguida pelos equipamentos (17%) e iluminação (16%). A partir disso, medidas de eficiência energética foram tomadas no sentido de se reduzir a energia (operacional e incorporada). Assim, do ponto de vista da energia operacional, as economias alcançadas fazendo alterações no sistema de ar condicionado (*chiller*), foram de 17%, enquanto ajustar o *setpoint* (aumentando em 2°C) correspondeu a 7%, reduzir o PAF (de 50% para 35%), gerou 6,2% de economia, e a inserção de vidro duplo de alta performance (em troca do refletivo azul simples) reduziu o consumo de energia operacional em 3,7%. Em relação à energia incorporada, a inserção de materiais recicláveis (alumínio), geraram economias na ordem de 8,9%.

Para avaliar o impacto ambiental (consumo de recursos e emissões de CO₂) da fase de construção e uso (incluindo manutenção) de uma residência (140m²) em Pamplona, Colômbia, Ortiz-Rodríguez, Castell e Sonnemann (2012), consideraram como unidade funcional a área útil (m²) do

edifício. Os inventários dos materiais utilizados foram coletados na base de dados *Ecoinvent*. Como resultados da pesquisa, os autores afirmaram que o maior impacto advém da fase de uso da edificação, que foi responsável por cerca de 70% de todas as emissões (64% de operação e 8% de manutenção) enquanto a fase de construção correspondeu a 28% e o transporte não passou de 10%. Em relação aos materiais utilizados, tem-se que estes corresponderam a 90% da energia não renovável presente no ciclo de vida da edificação, da qual fazem parte o concreto (27%), aço (27%) e telha cerâmica (24%). A respeito do consumo de recursos, apenas o concreto foi responsável por 71%, enquanto que do ponto de vista das emissões de CO₂, os principais responsáveis foram o concreto (46%), aço (22%) e tijolo (14%). A partir de tais constatações, medidas de eficiência energética foram adotadas, como a substituição de equipamentos e lâmpadas, afim de obter um consumo energético menor. Assim, as mudanças geraram economias na ordem de 41% (pela troca de equipamentos) e 23% pela substituição das lâmpadas.

Sob o mesmo enfoque, Nakao (2010) comparou dois cenários de estudo para uma residência padrão na Suécia (173 m²), denominando os cenários como Convencional (CC) e Energético (CE), verificando o impacto de cada um no aquecimento global (emissões de gases de efeito estufa – GEE). A unidade funcional considerada foi a área total da residência, com temperatura interior de 22°C em 50 anos de vida útil. Foram consideradas apenas as fases de fabricação e operação. Em ambos os cenários foi utilizado um sistema de paredes denominado ICF (*Insulated concrete form*) que é muito utilizado na Suécia e se configura por blocos pré-moldados de poliestireno expandido preenchidos com concreto. No CC, as paredes e a cobertura tinham uma transmitância maior e não contavam com produção de energia local, e esses aspectos o diferenciava do CE, que possuía paredes e coberturas mais espessas, com valor de U mais baixo, além de contar com produção local de energia (inserção de painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas, entre outros). Como resultados do estudo, a autora apontou que o cenário CE teve menores emissões que o cenário CC. No CE, 67% das emissões concentraram-se na fase de fabricação do edifício, enquanto no CC isso correspondeu a 27,5%. Em relação aos materiais utilizados, observou-se que o concreto foi o principal responsável pelas emissões de GEE. Na tentativa de reduzir as emissões, optou-se por substituir o sistema construtivo por madeira, e isso causou uma redução de até 16%. A autora concluiu que o CE tem um potencial de reduzir as emissões de GEE em até 53%, se comparado ao outro cenário. Ao mesmo tempo, constatou-se que as fases do ciclo de vida são interdependentes, o que significa que, reduzir as emissões na fase operacional acabou por aumentar as emissões na fase de fabricação dos materiais.

Pajchrowski et al. (2014), em um estudo para a Polônia, avaliaram quatro modelos de residências com área útil de 98,04m². Os edifícios se diferenciavam pelo material construtivo e sistema de condicionamento, sendo: 1) edificação em alvenaria tradicional, 2) edificação em alvenaria, passiva; 3) edificação em madeira tradicional e 4) edificação em madeira, passiva. A unidade funcional utilizada foi

a área toda do edifício (98,04m²), para ser utilizado por 100 anos. O método de impacto utilizado foi o *Impact 2002*, sendo que os valores de impacto foram caracterizados como eco indicadores e expressos em pontos ambientais. Os resultados apontaram que o principal fluxo de massa em todo o ciclo de vida do edifício estava na fase de uso e isso ocorreu principalmente por conta do longo tempo de uso (100 anos). Ainda que os edifícios tivessem características diferentes, os principais sistemas com maior peso nos impactos ambientais estavam localizados nos mesmos pontos: fundação/piso (por conta do concreto/cerâmica), cobertura/laje (concreto/isolamento/madeira); instalações (por causa do cobre) e paredes externas (alvenaria, argamassa; madeira). Assim, foi feita uma classificação de pontos de acordo com todo o ciclo de vida dos edifícios, e os passivos se apresentaram menos impactantes ambientalmente do que os tradicionais. Foi observado que o impacto advindo da fase de uso da edificação se constituía basicamente pelo consumo energético, que representa 90% dos impactos advindos desta fase. Ainda que os edifícios passivos consumissem 3,6 vezes menos energia que os tradicionais, toda a energia utilizada era elétrica. E esse tipo de energia, na Polônia, é produzido 90% a base de carvão, o que se constituiu como um fator determinante nos resultados das casas passivas. Ou seja, se a energia utilizada por essas residências fosse a gás ou advinda de fontes renováveis, os cenários passivos teriam um desempenho muito superior ao tradicional. Dessa forma, uma das principais conclusões do estudo é que, tão importante quanto a quantidade de energia utilizada é o seu tipo, que pode influenciar de sobremaneira o desempenho ambiental da edificação.

Com o objetivo de prover informações a respeito do consumo energético e das emissões de CO₂, Assiego de Larriva et al. (2014), avaliaram cinco diferentes cenários de reabilitação energética, a partir da perspectiva do ciclo de vida e dos níveis de conforto térmico de um edifício residencial multipavimentos (10934,68m²) na Espanha. Foi utilizado como unidade funcional 1m² de área de parede com vida útil de 50 anos. O cenário 1 (base) não apresentava material de isolamento (exceto na cobertura), a estrutura da janela era de alumínio com vidro simples e a temperatura interna de conforto era mantida entre 21-25°C. Os cenários 2 e 3 diferenciaram-se do caso base apenas acrescentando, no caso do cenário 2, 1cm de isolamento na fachada, 2cm no piso e esquadria com vidro duplo; enquanto que no cenário 3 aplicou-se 3 cm de isolamento para fachada, cobertura e piso. Os cenários 4 e 5 privilegiaram a inserção de ventilação natural, com a aberturas de novas janelas para permitir a ventilação cruzada, do térreo ao quarto andar no cenário 4 e a abertura do terraço, no cenário 5. Como principais resultados da pesquisa, os autores apontaram que as fases de manufatura e transporte tiveram pouco impacto, se comparadas à fase de uso. Os cenários C4 e C5 são os que atingiram os menores impactos em relação aos demais. Eles (C4 e C5) conseguiram, respectivamente, alcançar economias na ordem de 4,4% e 9% no consumo de energia total e reduzir 2,6% e 7% as emissões de CO₂. Os autores concluíram que, em climas temperados, os impactos podem ser reduzidos mais pela

inserção de sistemas de ventilação do que pela inclusão de isolamento.

Ma et al. (2017), com base em dados operacionais e de projeto, avaliaram um edifício público na China, utilizando-se da combinação da ACV e de uma análise ecológica *input-output*, a fim de avaliar o consumo energético e as emissões de CO₂ para 50 anos de utilização do edifício. Foram criados quatro cenários de análise, combinando sistemas de condicionamento térmico e o mix energético do país, assumindo que este se alteraria linearmente ao longo de um período (2013 – 2020 – 2040), no sentido de se ampliar a participação das energias renováveis. Ao mesmo tempo, foram feitas alterações no sentido de se otimizar o uso da energia, através da inserção de um sistema de condicionamento térmico eficiente, inserção de vidro *low-e* (o PAF se manteve fixo em 58%) e a utilização de equipamentos energeticamente eficientes. Como resultados da pesquisa, os autores apontaram que a produção de materiais como cimento, tijolo e vidro emitiram muito CO₂, fazendo com que as emissões na fase de construção do edifício fossem maiores que o consumo energético. A energia operacional foi responsável por mais de 70% do consumo energético no ciclo de vida de todos os cenários de análise, mesmo com a adoção das medidas para melhorar o desempenho energético da edificação. Isso ocorreu porque o ar condicionado era responsável por 60% da energia consumida durante a fase de operação do edifício (alta demanda de energia para aquecimento no inverno). Com isso, foi possível notar que a adoção dessas medidas de eficiência energética influenciou mais a redução das emissões do que a economia de energia. Segundo os autores, numa perspectiva a longo prazo, as emissões de CO₂ serão muito mais afetadas pelo mix energético do país.

Azzouz et al. (2017) fez uma avaliação do ciclo de vida (do berço ao túmulo) a partir de medidas de conservação de energia para um edifício de escritórios (15590 m² de área total) para o centro de Londres, numa perspectiva de 60 anos de vida útil. Para a avaliação de impacto considerou-se a energia primária (MJ) e o potencial de aquecimento global (kg CO₂ eq). Foram criados cenários a partir de um cenário base com as seguintes alterações: 1) estrutura (para torná-la mais leve), mudando de concreto armado para concreto leve (inserção de resíduos, para redução da quantidade de cimento), madeira laminada colada, *steel frame* e construção de paredes em terra batida (que requeriam menos energia para processamento); 2) utilização de materiais sustentáveis (com baixa emissão de carbono e energia incorporada), tais como concreto com resíduos industriais, tijolos reaproveitados, isolamento com placa de cortiça (para substituir as placas de Espuma de Poliestireno Extrudado- XPS); 3) aplicação de sistemas de produção de energia local, como a adoção de placas fotovoltaicas (PV), adoção de um sistema combinado de calor e eletricidade (denominado CHP⁷), a partir do qual o aquecimento é feito a gás e o ar condicionado para resfriamento é elétrico; 4) medidas para economia de energia operacional, tais

⁷ CHP= *Combined Heat and Power*

como a ampliação do *setpoint* do sistema de condicionamento térmico para $\pm 2^{\circ}\text{C}$, utilização de ventilação natural e de dispositivos de sombreamento ajustáveis que operavam no verão (para proteger as áreas envidraçadas) e se retraíam no inverno; e 5) cenário final com a melhor combinação (máxima economia) no ciclo de vida, considerando as etapas de 1 a 4. Como resultados da pesquisa, os autores apontaram que, no projeto base, o carbono e a energia operacionais corresponderam a 6,8 e 10,5 vezes mais altos do que o carbono e energia incorporados, nos 60 anos de utilização. Além disso, excluindo-se as cargas operacionais, os elementos estruturais contribuíram com a maior taxa de carbono incorporado do edifício (75%) (estando em conformidade com os estudos de Dimoudi e Tompa (2008) e Pajchrowski et al. (2014)). No entanto, as medidas que mais reduziram carbono/energia foram aquelas que melhoraram a operação do edifício, no sentido de fazê-lo economizar energia (todas as alterações previstas na etapa 4), combinado com o redesenho da estrutura para torna-la mais leve (inserção de resíduos no concreto), isolamento em cortiça e acabamentos internos em madeira. Essa combinação gerou economias máximas no ciclo de vida na ordem de 16,3% em carbono e 13,4% em energia, sendo que se obteve 32,3% de economia no carbono incorporado e 8,7% na energia incorporada. As economias operacionais (carbono/energia) ficaram na ordem de 14% para ambos os indicadores.

Conforme supracitado, os impactos são altamente interdependentes, o que significa que, adotar medidas de redução no consumo de energia dos edifícios durante a fase de uso (através da inserção de isolamento – dependendo do contexto - nas paredes externas e telhado, revestimentos com baixa emissividade, ventilação natural, painéis fotovoltaicos, etc), se reflete num aumento da energia incorporada (advinda da fase de pré-uso). Logo, ainda que a energia incorporada represente apenas 10-20% do total do ciclo de vida da edificação, sua redução não deve ser ignorada, e isso pode ser feito através da utilização de materiais de construção que requeiram menos energia durante a fabricação (RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010).

Dessa forma, de acordo com Tettey, Dodoo, Gustavsson (2014), os edifícios são feitos de combinações de materiais em quantidades diferentes, com diferentes implicações energéticas e emissões de gases de efeito estufa (GEE). Diferentes materiais podem ser usados para fornecer funções semelhantes nos edifícios, mas a utilização da energia e as emissões relacionadas a cada um pode variar amplamente, devido à produção e manutenção de cada material. E como os padrões de eficiência energética estão se tornando cada vez mais rigorosos, é importante que se desenvolva uma série de estudos para que se tenha uma melhor compreensão das implicações energéticas e climáticas de diferentes materiais de construção, a fim de se permitir escolhas conscientes para a redução do consumo de energia e emissões de GEE no setor da construção. A Tabela 5 apresenta um panorama dos trabalhos aqui citados, que descrevem as várias abordagens da ACV na construção civil.

Tabela 5: Panorama dos trabalhos sobre ACV na construção civil apresentados na literatura (continua).

REFERÊNCIA	PARÂMETROS ANALISADOS	ÍNDICES DE DESEMPENHO	PRINCIPAIS CONCLUSÕES / RECOMENDAÇÕES
Dimoudi e Tompa (2008)	<ul style="list-style-type: none"> Local: Grécia; 2 Edifícios de escritórios com estrutura em concreto armado e paredes externas duplas com isolamento; Cenário 1: 5 andares, 1891m² área útil, 5cm de poliestireno expandido e revestimento em argamassa; Cenário 2: 3 andares, 400m² área útil, 5cm de lã mineral e revestimento em folhas de alumínio. Fases consideradas: produção dos materiais, construção e operação; Unidade Funcional: 1m² de área de total de piso; Tempo de vida útil: 50 anos. 	<ul style="list-style-type: none"> Energia incorporada; Emissões equivalentes de CO₂ e SO₂; 	<ul style="list-style-type: none"> Grande impacto dos materiais da estrutura (concreto e aço) na energia incorporada (66,73% para o edifício 1 e 59,57% para o edifício 2) e nas emissões (73,30% no edifício 1 e 75,30% no edifício 2); O envelope construtivo neste caso contribuiu em certa de 12 - 13% de toda a energia incorporada; Em edifícios com menos paredes internas (do tipo <i>open plan</i>), o envelope tem peso maior nos impactos.
Kofoworola e Gheewala (2009)	<ul style="list-style-type: none"> Local: Tailândia; Edifício de escritórios (38 andares, 60000m² área útil); Fases consideradas: produção dos materiais, construção, operação (incluindo manutenção) e demolição; Unidade Funcional: a área útil total (60000m²); Tempo de vida útil: 50 anos. 	<ul style="list-style-type: none"> Coefficientes de energia incorporada; 	<ul style="list-style-type: none"> Fase operacional correspondeu a 81% do consumo de energia no ciclo de vida; A energia operacional foi dominada pelo uso do ar condicionado (56%), seguida pelos equipamentos (17%) e iluminação (16%); Os materiais que mais impactaram a energia incorporada foram o concreto (35,4%) e o aço (42,4%), presentes principalmente na estrutura do edifício.
Bessa (2010)	<ul style="list-style-type: none"> Local: São Paulo, Brasil; Edifício de escritórios; Variação nos tipos de fachadas: <i>structural glazing</i> (vidro incolor ou refletivo); alvenaria de tijolo cerâmico revestida de placas de ACM (alumínio) ou revestida com argamassa; Fases consideradas: produção dos materiais, construção, operação (incluindo manutenção) e demolição; Unidade Funcional: 1m² de área de fachada; Tempo de vida útil: 60 anos. 	<ul style="list-style-type: none"> Emissões de CO₂; Consumo de energia para produção de materiais e uso; 	<ul style="list-style-type: none"> As fachadas que mais emitiram CO₂ foram, nesta ordem de maior para menor impacto: a) <i>structural glazing</i> com vidro incolor, b) alvenaria de tijolo cerâmico revestida de placas de ACM (alumínio), c) <i>structural glazing</i> com vidro refletivo e d) alvenaria revestida com argamassa. A fase de uso foi a mais impactante no ciclo de vida da edificação; As etapas de produção dos materiais, transporte e uso da edificação contribuíram com 99% das emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida.

Tabela 5: Panorama dos trabalhos sobre ACV na construção civil apresentados na literatura (continuação)

REFERÊNCIA	PARÂMETROS ANALISADOS	ÍNDICES DE DESEMPENHO	PRINCIPAIS CONCLUSÕES / RECOMENDAÇÕES
Nakao (2010)	<ul style="list-style-type: none"> Local: Suécia; Residência padrão (173m² área útil); Cenários: 1) Convencional (CC); 2) Energético (CE); Fases consideradas: produção dos materiais, construção e operação; Unidade Funcional: a área útil total (173m³); Tempo de vida útil: 50 anos. 	<ul style="list-style-type: none"> Emissões de gases de efeito estufa – GEE; 	<ul style="list-style-type: none"> O CE teve menores emissões que o CC; A fase de fabricação (produção dos materiais e construção do edifício) correspondeu a 67% das emissões de GEE no CE e a 27,5% no CC; O concreto foi o principal responsável pelas emissões de GEE; Alterar o sistema construtivo de concreto para madeira reduziu as emissões em até 16%; O CE teve um potencial de reduzir as emissões de GEE em até 53%, se comparado ao outro cenário; As fases do ciclo de vida são interdependentes, o que significa que, reduzir as emissões na fase operacional acaba por aumentar as emissões na fase de fabricação dos materiais.
Zabalza Bribián, Valero Capilla e Aranda Usón (2011)	<ul style="list-style-type: none"> Local: Espanha; Avaliação de materiais construtivos: 1) tijolos e telhas/pisos; 2) materiais isolantes; 3) cimento e concreto; 4) produtos de madeira; e 5) produtos comuns (aço, alumínio, PVC, vidro plano e cobre); Unidade Funcional: a densidade (kg/m³) de cada material. 	<ul style="list-style-type: none"> Energia primária; Potencial de aquecimento global; Uso de água; 	<ul style="list-style-type: none"> O piso cerâmico e as telhas de fibrocimento foram as que mais consumiram energia primária, água e emitiram CO₂ para serem produzidas e os tijolos de barro claro e de sílico-calcário foram os que obtiveram melhores resultados neste quesito; A espuma de EPS e as placas rígidas de poliuretano foram as que mais impactaram nas três categorias, enquanto a utilização de materiais naturais tais como a cortiça, fibra de madeira e celulose foram as que menos impactaram nos três quesitos; O cimento foi o material mais impactante (principalmente pela manufatura do clínquer), juntamente com a argamassa de cimento; Os materiais de madeira que requeriam menos processos industriais - como a madeira serrada-, foram os que impactaram menos, enquanto os painéis OSB (principalmente por conta do uso de resinas compostas por formaldeído) foram os que mais impactam nos três quesitos; O alumínio e o PVC foram os que mais impactaram, principalmente devido ao alto consumo energético e consumo de água para sua produção, enquanto que o vidro plano e o aço foram os que menos impactaram dentro desse grupo; Os autores afirmam que é preciso implementar melhores técnicas de produção, para reduzir os impactos da produção destes produtos e, ao mesmo tempo, padronizar os dados de inventários, de acordo com as características e peculiaridades de cada país.

Tabela 5: Panorama dos trabalhos sobre ACV na construção civil apresentados na literatura (continuação)

REFERÊNCIA	PARÂMETROS ANALISADOS	ÍNDICES DE DESEMPENHO	PRINCIPAIS CONCLUSÕES / RECOMENDAÇÕES
Ortiz-Rodríguez, Castell e Sonnemann (2012)	<ul style="list-style-type: none"> Local: Pamplona, Colômbia; Residência (140m² área útil); Fases consideradas: produção dos materiais, construção e operação; Unidade Funcional: a área útil total (140m³); Tempo de vida útil: 50 anos. 	<ul style="list-style-type: none"> Consumo de recursos; Emissões de CO₂; 	<ul style="list-style-type: none"> O maior impacto estava da fase de uso da edificação, que foi responsável por cerca de 70% de todas as emissões (64% de operação e 8% de manutenção) enquanto a fase de construção correspondeu 28% e o transporte não passou de 10%; Os materiais utilizados corresponderam a 90% da energia não renovável presente no ciclo de vida da edificação, da qual faziam parte o concreto (27%), aço (27%) e telha cerâmica (24%); Apenas o concreto foi responsável por 71% do consumo de recursos; Em relação às emissões de CO₂, os principais responsáveis foram o concreto (46%), aço (22%) e tijolo (14%); Medidas de eficiência energética geraram economias na ordem de 41% (pela troca de equipamentos) e 23% pela substituição das lâmpadas.
Neiva, Mateus e Bragança (2012)	<ul style="list-style-type: none"> Local: Portugal; Avaliação de sistemas construtivos; Fases consideradas: produção dos materiais, construção, operação (incluindo manutenção) e demolição; Unidade Funcional: 1m² de solução construtiva. 	<ul style="list-style-type: none"> Impactos ambientais (método CML); Consumo de recursos energéticos (método CED); 	<ul style="list-style-type: none"> Como resultado do estudo foi criado um quadro com informações de cada solução construtiva e os impactos ambientais potenciais (ambientais e energéticos) totais e parciais.
Bueno (2014)	<ul style="list-style-type: none"> Local: São Paulo, Brasil; Avaliação de sistemas construtivos: alvenaria de blocos cerâmicos e de blocos de concreto, parede de concreto leve, sistema <i>steel framing</i> com fechamento interno e externo de placas cimentícias preenchidas em madeira e com fechamento interno de placas de gesso acartonado e externo de placas cimentícias preenchidas em madeira; Fases consideradas: produção dos materiais, construção e demolição; Unidade Funcional: 1m² de solução construtiva; Tempo de vida útil: 40 anos. 	<ul style="list-style-type: none"> Avaliou a sensibilidade de utilização de dados primários e secundários; Utilizou categorias de impacto do tipo <i>midpoint</i> e <i>endpoint</i>; 	<ul style="list-style-type: none"> Em categorias de impacto do tipo <i>midpoint</i>, o sistema <i>steel framing</i> com placas cimentícias externa e interna se apresentou como a alternativa mais impactante, e os menores impactos foram apresentados pela alvenaria de blocos de concreto. Na comparação dos dados primários e secundários, na categoria <i>endpoint</i>, a alternativa mais impactante no primeiro caso foi o <i>steel framing</i> com placas cimentícias externa e interna e, no segundo caso, a alvenaria de blocos cerâmicos. A fonte de dados do inventário, o escopo geográfico e o método de avaliação de impacto foram os pontos-chaves de maior sensibilidade nos resultados das análises. Utilizar diferentes métodos de caracterização dos impactos ambientais gera resultados diferentes. Tais aspectos devem ser devidamente detalhados, para evitar falsas conclusões.

Tabela 5: Panorama dos trabalhos sobre ACV na construção civil apresentados na literatura (continuação)

REFERÊNCIA	PARÂMETROS ANALISADOS	ÍNDICES DE DESEMPENHO	PRINCIPAIS CONCLUSÕES / RECOMENDAÇÕES
Pajchrowski et al. (2014)	<ul style="list-style-type: none"> Local: Polônia; Modelo de residência (98,04m²); Alteração nos sistemas construtivos e no condicionamento térmico: 1) edificação em alvenaria tradicional, 2) edificação em alvenaria, passiva; 3) edificação em madeira tradicional e 4) edificação em madeira, passiva; Fases consideradas: produção dos materiais, construção, operação (incluindo manutenção) e demolição; Unidade funcional: toda a área da edificação (98,04m²); Tempo de vida útil: 100 anos. 	<ul style="list-style-type: none"> Método <i>Impact 2002</i>; Os valores de impacto foram caracterizados como eco indicadores e expressos em pontos ambientais (Pt); 	<ul style="list-style-type: none"> O principal fluxo de massa em todo o ciclo de vida do edifício esteve na fase de uso, por conta do longo tempo (100 anos); Os principais sistemas com maior peso nos impactos ambientais estavam localizados nos mesmos pontos: fundação/piso (por conta do concreto/cerâmica), cobertura/laje (concreto/isolamento/madeira); instalações (por causa do cobre) e paredes externas (alvenaria, argamassa; madeira); O impacto advindo da fase de uso representou 90% dos impactos advindos dessa fase da edificação; Os cenários de edificação com estratégias passivas foram mais impactantes que os tradicionais, pois a energia utilizada era elétrica (que é 90% produzida à base de carvão); Tão importante quanto a quantidade de energia utilizada é o seu tipo, que pode influenciar de sobremaneira o desempenho ambiental da edificação.
Assiego de Larriva et al. (2014)	<ul style="list-style-type: none"> Local: Málaga, Espanha; Edifício residencial multipavimentos (10934,68m²); 5 cenários de reabilitação energética: C1 (base não apresenta material de isolamento (exceto na cobertura), a estrutura da janela era de alumínio com vidro simples; C2 e C3 apresentaram isolamento nas paredes, cobertura e piso; C4 e C5 apresentaram mais janelas para promover a ventilação natural cruzada; Fases consideradas: produção dos materiais, construção, operação e demolição; Unidade Funcional: 1m² de área de parede; Tempo de vida útil: 50 anos. 	<ul style="list-style-type: none"> Consumo de energia total; Emissões de CO₂; 	<ul style="list-style-type: none"> As fases de manufatura e transporte tiveram pouco impacto, se comparadas à fase de uso; Os cenários C4 e C5 foram os que atingiram os menores impactos e conseguiram, respectivamente, alcançar economias na ordem de 4,4% e 9% no consumo de energia total e reduzir 2,6% e 7% as emissões de CO₂. Em climas temperados, os impactos foram reduzidos mais pela inserção de sistemas de ventilação do que pela inclusão de isolamento.

Tabela 5: Panorama dos trabalhos sobre ACV na construção civil apresentados na literatura (continuação)

REFERÊNCIA	PARÂMETROS ANALISADOS	ÍNDICES DE DESEMPENHO	PRINCIPAIS CONCLUSÕES / RECOMENDAÇÕES
Takano et al. (2015)	<ul style="list-style-type: none"> Local: Finlândia; Edificação hipotética (120m²); Foram avaliados componentes construtivos (estrutura, superfície e elementos internos); Fases consideradas: produção dos materiais, construção e operação e demolição (fim-de-vida); Unidade Funcional: 96m² (área útil de piso aquecido do edifício); Tempo de vida útil: 	<ul style="list-style-type: none"> Balço de energia primária (renovável e não renovável); 	<ul style="list-style-type: none"> A influência na seleção dos materiais apareceu em cada fase do ciclo de vida da edificação, dependendo do componente, e isso se refletiu principalmente nas fases de produção e fim-de-vida (reciclagem); Tais efeitos apareceram menos na fase operacional, medidos com base na influência da variação da temperatura interna; O material da estrutura foi o que mais influenciou o consumo de energia primária, sendo que as estruturas pesadas (concreto armado) requeriam mais energia nos estágios de produção e fim-de-vida do que as estruturas mais leves, como madeira e aço; É preciso prever o ciclo de vida dos componentes construtivos, para que se possa otimizar o balanço de energia da edificação, sob a perspectiva do material;
Ma et al. (2017)	<ul style="list-style-type: none"> Local: China; Edifício público (57000m²) 4 cenários de análise, combinando sistemas de condicionamento térmico e o mix energético do país, assumindo que este se alteraria linearmente ao longo de um período (2013 – 2020 – 2040) no sentido de utilizar recursos renováveis; e inserção de vidro <i>low-e</i> e a utilização de equipamentos energeticamente eficientes; Fases consideradas: produção dos materiais, construção, operação, manutenção e demolição; Unidade Funcional: 1m² de área de piso; Tempo de vida útil: 50 anos. 	<ul style="list-style-type: none"> Consumo energético; Emissões de CO₂; 	<ul style="list-style-type: none"> A produção de materiais como cimento, tijolo e vidro emitiram muito CO₂, fazendo com que as emissões na fase de construção do edifício fossem maiores que o consumo energético; A energia operacional foi responsável por mais de 70% do consumo energético no ciclo de vida de todos os cenários de análise; O ar condicionado foi responsável por 60% da energia consumida durante a fase de operação do edifício (alta demanda de energia para aquecimento no inverno); A adoção de medidas de eficiência energética influenciou mais a redução das emissões do que a economia de energia; Numa perspectiva a longo prazo, as emissões e CO₂ serão muito mais afetadas pelo <i>mix</i> energético do país.
Azzouz et al. (2017)	<ul style="list-style-type: none"> Local: Londres, Inglaterra; Edifício de escritórios (15590 m² de área total); Foram criados cenários a partir de mudanças na 1) estrutura (para torna-la mais leve); 2) utilização de materiais sustentáveis; 3) aplicação de sistemas de produção de energia local; 4) medidas para economia de energia operacional; 	<ul style="list-style-type: none"> Consumo de energia primária; Emissões de CO₂; 	<ul style="list-style-type: none"> No projeto base, o carbono e a energia operacionais corresponderam a 6,8 e 10,5 vezes mais altos do que o carbono e energia incorporados, nos 60 anos de utilização. Excluindo-se as cargas operacionais, os elementos estruturais contribuíram com a maior taxa de carbono incorporado do edifício (75%);

Tabela 5: Panorama dos trabalhos sobre ACV na construção civil apresentados na literatura (conclusão)

REFERÊNCIA	PARÂMETROS ANALISADOS	ÍNDICES DE DESEMPENHO	PRINCIPAIS CONCLUSÕES / RECOMENDAÇÕES
Azzouz et al. (2017)	<ul style="list-style-type: none"> • Fases consideradas: produção dos materiais, construção, operação e demolição; • Tempo de vida útil: 60 anos. 		<ul style="list-style-type: none"> • As medidas que mais reduziram carbono/energia foram aquelas que melhoraram a operação do edifício, no sentido de fazê-lo economizar energia (todas as alterações previstas na etapa 4), combinado com o • redesenho da estrutura para torna-la mais leve (inserção de resíduos no concreto), isolamento em cortiça e acabamentos internos em madeira; • Essa combinação gerou economias de 16,3% em carbono e 13,4% em energia, sendo que se obteve 32,3% de economia no carbono incorporado e 8,7% na energia incorporada • As economias operacionais (carbono/energia) ficaram na ordem de 14% para ambos os indicadores.

Fonte: A autora (2018).

2.4 ANÁLISE INTEGRADA

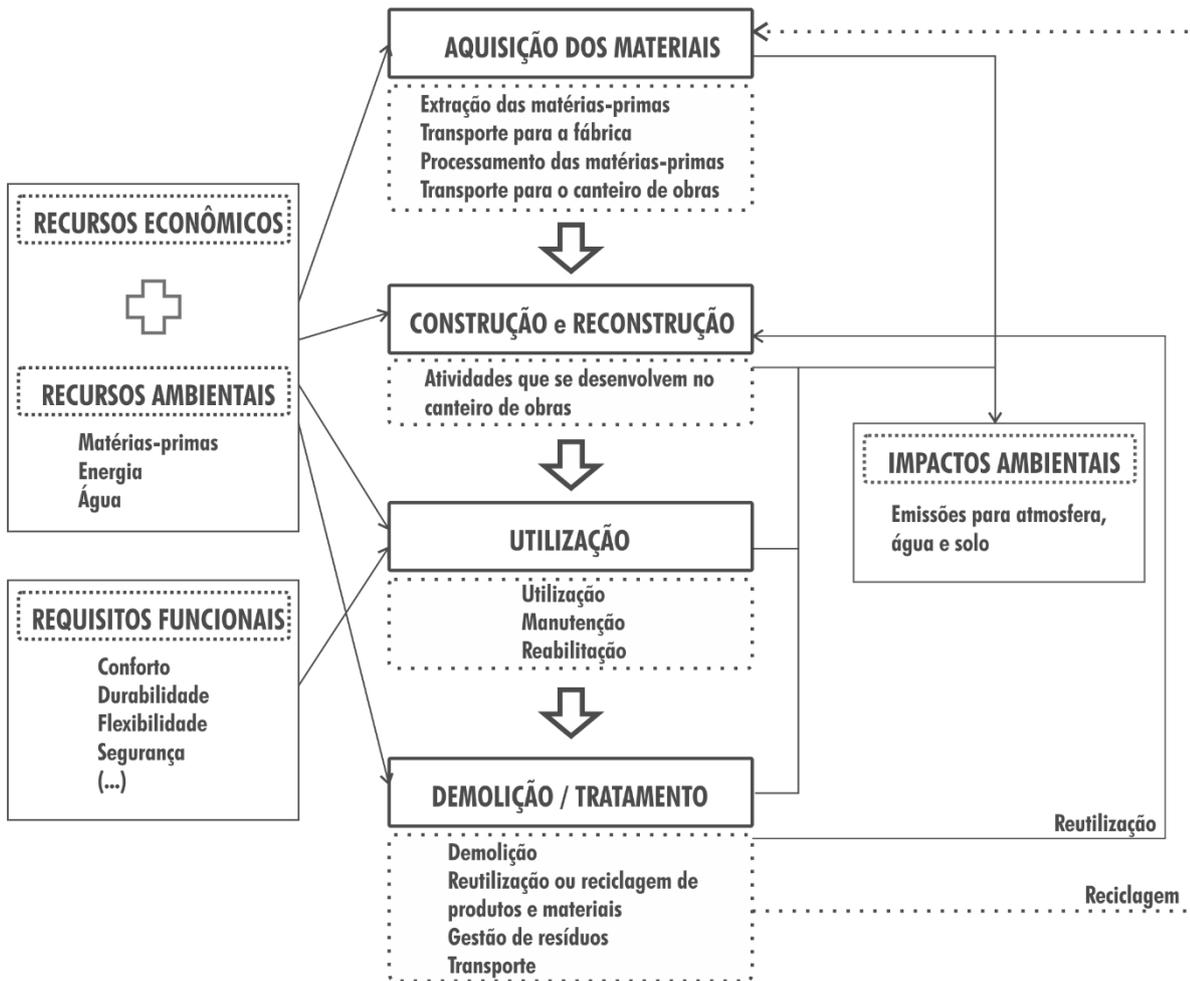
Segundo Bragança e Mateus (2006), os parâmetros que servem de apoio à avaliação da sustentabilidade têm como objetivos a redução de utilização de energia e materiais não renováveis, consumo de água, produção de emissões, resíduos, custos, aumento do conforto ambiental, entre outros aspectos. As metodologias de avaliação geralmente apresentam: otimização do potencial local, preservação da identidade regional e cultural, redução do consumo energético, proteção e conservação dos recursos naturais, utilização de produtos de baixo impacto ambiental, entre outros aspectos. Assim, a utilização de indicadores, nestes casos, se apresenta como uma solução passível de expressar o desempenho ambiental em termos absolutos pois, segundo Silva e Silva (2015), isso pode facilitar a compreensão dos impactos ambientais frente à escolha de materiais, componentes e sistemas construtivos.

Existem diversas ferramentas e métodos que auxiliam a concepção de edifícios sustentáveis, tais como: BREEAM – *BRE Environmental Assessment Method* (Reino Unido) e o LEED – *Leadership in Energy and Environmental Design* (EUA), além de sistemas baseados em Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), analisando os impactos ambientais advindos de todo o ciclo de vida dos materiais e produtos avaliados, sendo os sistemas: *Eco-Quantum* (Holanda), *Eco-Effect* (Suécia), ENVEST (Reino Unido), BEES (EUA), ATHENA (Canadá), *LCA House* (Finlândia) e *Green Globes* (Canadá) (BRAGANÇA; MATEUS, 2006).

Bueno (2014) afirma que, apesar de existirem diversas ferramentas que avaliam o desempenho das edificações para certificação ambiental, poucas avaliavam os sistemas construtivos do ponto de vista da ACV. A falta de visão holística de todo o ciclo de vida acabava sendo substituída por uma visão por atributos, o que as fazia perder a noção do impacto a nível global (BUENO, 2014; SILVA; SILVA, 2015). No entanto, ainda que de modo facultativo, tais sistemas têm inserido a ACV em suas análises. De acordo com Silva e Silva (2015), a integração da ACV com sistemas de certificação pode ser possibilitada por meio da seleção e produtos e sistemas pré-avaliados (com alta classificação ambiental), decisões amparadas por plataformas de ACVs (como os programas *SimaPro* e *GaBi*), ou por meio de indicadores específicos de impacto no ciclo de vida, ou pela utilização de Declarações Ambientais de Produtos (EPDs) como base para análise, assim como pelos sistemas acima citados.

Logo, ainda que sejam diferentes, tais sistemas e ferramentas apresentam as categorias (indicadores) de projeto e desempenho semelhantes: local, água, energia e qualidade do ambiente interior, conforme apresentado da Figura 10.

Figura 10: Avaliação integrada ao ciclo de vida do edifício.



Fonte: Adaptado de Bragança e Mateus (2006).

Segundo Gonçalves (2015), para a compreensão do desempenho da edificação, em termos locais e globais, os principais indicadores utilizados atualmente são, respectivamente, o consumo energético medido por metro quadrado da edificação e as emissões de CO₂. Conforme supracitado pelos estudos da literatura, há muitos trabalhos que consideram o consumo de energia e os impactos ambientais das edificações, no entanto, Azari (2014) aponta que poucos estudos avaliam o desempenho ambiental e a energia no ciclo de vida por meio de uma estrutura integrada.

Assim, Azari (2014) realizou uma análise integrada com o objetivo de avaliar soluções de fachadas do tipo cortina de vidro para um edifício de escritórios hipotético (335m² de área total) em Seattle, com vida útil de 60 anos. A unidade funcional considerada foi a área total do edifício. A partir da variação do PAF (40%, 60%, 80%), do tipo de material de isolamento (fibra de vidro ou lã mineral), tipo de vidro (*low-e* duplo com gás argônio ou ar) e da estrutura do material do caixilho (alumínio, fibra de vidro ou PVC), foram criados 6 cenários de análise. As fases avaliadas foram a de pré-uso, uso e fim-de-vida (considerando o transporte em todas as etapas). Foi considerado o consumo de energia

operacional, obtido por meio de simulação computacional no programa eQuest 3.65. Os impactos ambientais considerados foram o consumo de combustível fóssil e os potenciais de: aquecimento global, acidificação, eutrofização, destruição da camada de ozônio e formação de *smog*. Para os resultados das análises, foi criado um *ranking*, com notas de 1 a 6 (de menor a maior) para os consumos energéticos operacionais e as demais categorias de impacto ambientais. A partir dessa classificação, foi possível observar que, o cenário 2 (PAF de 40%, isolamento com lã mineral, vidro *low-e* duplo com argônio e caixilho de fibra de vidro) – o qual obteve o menor consumo energético operacional (nota 1)-, recebeu a mesma nota para maioria das demais categorias de impacto, o que também aconteceu com o pior cenário (com maior consumo energético), no caso o 6 (PAF de 80%, isolamento com lã mineral, vidro *low-e* duplo com argônio e caixilho de alumínio). Assim, o autor apontou que a fase de uso (correspondente à operação e manutenção do edifício), foi a que mais contribuiu para os impactos ambientais no ciclo de vida (representando mais de 90% em quase todas as categorias), exceto pela categoria de destruição da camada de ozônio (medida em kg CFC11 eq), em que esta fase representou 35%, influenciada pela presença de gás ar argônio e ar presentes no vidro duplo. Além disso, a fase de utilização contribuiu com até 67% da formação de *smog*. O autor afirmou que estes resultados refletiram a importância de se reduzir os impactos advindos da fase operacional, através da implementação de estratégias de eficiência energética e, ao mesmo tempo, utilizar materiais com durabilidade maior, para reduzir as necessidades de substituição e manutenção.

Do ponto de vista da sustentabilidade, a escolha de materiais e soluções construtivas deve considerar, além dos impactos ambientais advindos da ACV, os custos no ciclo de vida (CCV). Buyle, Braet e Audenaert (2013) e Azari (2014) apontam que poucos estudos consideram aspectos tecnológicos e financeiros nas análises, destacando a importância de se estabelecer uma integração entre avaliações ambientais e de custo.

Dentro dessa perspectiva, serão aqui apresentados estudos baseados em dois métodos de avaliação do desempenho ambiental e econômico do edifício, sendo eles a Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas (MARS-SC), desenvolvida por Mateus (2004) e a Análise de Custo Ótimo, desenvolvida pelas atuais políticas europeias (UNIÃO EUROPEIA, 2010). O primeiro método avalia o nível de sustentabilidade (a partir dos âmbitos ambiental, social e econômico) de produtos, materiais e sistemas construtivos, comparando-os sempre a um caso de referência (mais utilizado no país ou numa determinada região), por meio da normalização dos valores referentes a cada indicador e posterior atribuição de pesos referentes a cada âmbito. O segundo método compara todos os cenários de estudo, estabelecendo relações a partir de dados de emissões de CO₂ *versus* custo, consumo de recursos energéticos *versus* custo, afim de encontrar um ponto ótimo, que corresponde ao cenário com menores custos e emissões, consumo de recursos. Tais métodos apresentam formas de

integrar resultados de desempenho energético e impactos ambientais de soluções construtivas, através da utilização de indicadores e de análises de custos, de acordo com os cenários avaliados.

Nesse sentido, a respeito da MARS-SC, Bragança e Mateus (2006) realizaram um estudo comparativo de 8 soluções construtivas (quatro tipos de paredes e 4 tipos de pisos) através dessa metodologia. Foram selecionados casos com maior recorrência de utilização (parede dupla em alvenaria de tijolo vazado e o piso de aligeirado de vigotas pré-esforçadas e abobadilhas cerâmicas) e estes foram tidos como referência, acrescentando-se mais 3 variações para cada solução construtiva (paredes e pisos). Foram analisados a partir de dois indicadores ambientais (energia primária incorporada e potencial de aquecimento global), três funcionais (Isolamento a sons de condução aérea, espessura da parede e isolamento térmico) e um econômico (custo de construção). Neste estudo obteve-se como resultado que a solução de parede mais sustentável foi a Par2 (parede simples com reboco armado sobre isolante externo contínuo) – por possuir o melhor equilíbrio entre os indicadores, enquanto que a menos sustentável foi a Par4 (parede ventilada com elemento de suporte em alvenaria de blocos de concreto leve e revestimento exterior em material cerâmico fixado em estrutura metálica) – devido à elevada energia incorporada e contribuição para o potencial de aquecimento global. Já no caso dos pisos, o mais sustentável foi a Pav1 (pavimento de vigotas de blocos cerâmicos) – por possuir o melhor comportamento funcional e econômico, enquanto que o menos sustentável é o foi o Pav2 (pavimento em concreto armado) – devido ao aspecto ambiental, pois contava com uma alta concentração de aço, que continha uma elevada energia incorporada e contribuía significativamente com o potencial de aquecimento global.

Em outro estudo, Mateus et al. (2013) avaliaram paredes divisórias leves através da análise de sustentabilidade da MARS-SC. Assim, neste estudo foi avaliada uma nova tecnologia de divisórias (LSM – parede divisória de membrana sanduíche leve, com espessura total de 79 mm, composta por um núcleo fibroso modular de 70 mm; uma grade de plástico ou painéis de papelão composto por 600 x 600 mm; uma estrutura de fixação; um revestimento estrutural de 3 mm e um revestimento de acabamento de 1,5 mm), sempre comparadas com duas tecnologias de referência: a) HCM- parede de tijolo furado (divisória pesada convencional) e b) PLR- parede de gesso acartonado (divisórias leves – painéis de gesso). Foram criados 10 cenários de variações nas divisórias (alterando o material interno), que foram analisadas de acordo com os indicadores ambientais (potenciais de aquecimento global, acidificação, eutrofização, destruição da camada de ozônio e consumo de recursos energéticos), funcionais (Isolamento a sons de condução aérea, espessura da parede e isolamento térmico e econômicos (custo de construção). Como resultados da pesquisa, o melhor resultado obtido para a maioria dos indicadores foi o caso LSM9 (divisória de membrana sanduíche leve composta por núcleo de fibra de sisal + MDF + membrana de poliéster com revestimento em PVC). As soluções de referência

HCM e PRL só foram melhores quando o foco era, respectivamente, a dimensão econômica ou quando o peso das dimensões funcionais tendia a 100%. Uma questão importante considerada neste estudo é que ele foi feito para Portugal e, apesar da MARS-SC poder ser aplicada em outros locais, é recomendável que se faça uma adaptação prévia no sistema de ponderação, considerando os contextos ambientais, sociais e econômicos do local de estudo.

No âmbito da reabilitação energética de edificações, Macedo, Mateus e Silva (2014) avaliaram sistemas de coberturas para uma edificação residencial (64m² de área útil), situada em Portugal. A partir de um modelo base (cobertura com quatro águas, telha cerâmica apoiadas sobre estrutura de madeira e laje pré-moldada em bloco cerâmico e elementos em betão pré-esforçado (vigotas) rebocada na parte inferior), os quatro cenários de reabilitação energética consideraram alterações na cobertura do ponto de vista da localização, tipo e espessura do isolamento térmico, a fim de otimizar também o consumo energético da edificação. Para análise ambiental, foram considerados, para a montagem dos inventários o programa SimaPro (PRÉ-CONSULTANTS, 2008), o método CML Baseline (HISCHIER et al., 2010) para a avaliação dos impactos ambientais e o *Cumulative Energy Demand* (CED) (FRISCHKNECHT et al., 2007) para avaliação da energia incorporada. Do ponto de vista funcional, considerou-se o consumo energético, obtido a partir de simulação computacional no programa *Design Builder* e o desempenho acústico, a partir do nível de isolamento sonoro. O custo dos cenários foi obtido por meio de um gerador de preços da construção. Buscou-se, na comparação dos custos de cada cenário, encontrar o tempo de retorno da reabilitação energética, considerando 8 anos de uso. Como resultados do estudo obteve-se que, independente da espessura do material de isolamento, este sempre favoreceu a redução do consumo energético da edificação. O cenário mais sustentável de reabilitação - e o que otimizou o isolamento térmico - correspondeu àquele com isolamento térmico sobre a laje de concreto, enquanto que o oposto desta foi o cenário que obteve reforço do isolamento na parte da inclinada da cobertura. Além disso, considerando um período de 8 anos para o retorno de investimento, concluiu-se que os custos acumulados do cenário base se igualavam aos custos dos cenários de reabilitação em menos de 8 anos. Assim, os autores afirmaram a importância de se observar o tempo de retorno do investimento na reabilitação – não se limitando apenas aos custos iniciais – para que se possa aumentar os níveis de conforto dos usuários, reduzindo o custo de utilização em um curto período (até 8 – 10 anos).

Com o objetivo de avaliar a sustentabilidade de quatro materiais de isolamento no contexto de Portugal, Oliveira Augusto, Bragança e Almeida (2015), utilizaram a MARS-SC para avaliar os denominados Sistemas Compósitos de Isolamento Térmico pelo Exterior (*External Thermal Insulation Composite Systems - ETICS*). Os materiais selecionados foram o EPS (que foi considerado como material de referência), o XPS, a lã de rocha e o painel rígido de ICB (aglomerado de cortiça expandida), todos com 60 mm de espessura. Foram considerados para os parâmetros ambientais o Potencial de

Aquecimento Global (GWP) e a Energia primária não renovável (EPNR), para âmbito social os desempenhos térmico (medido pela transmitância térmica- U) e acústico (indicado pela densidade), e para o econômico considerou-se o preço de aquisição do mercado. Considerando todos os parâmetros, obteve-se como material com maior nota sustentável a lã de rocha, cujo desempenho foi superior ao caso de referência (EPS). Isso ocorreu por que este material foi o que menos contribuiu para o GWP, teve bom desempenho térmico e acústico, ainda que o custo fosse mais alto. A pior solução foi a do XPS por conta da alta contribuição ao GWP, EPNR e pelo baixo desempenho acústico, ainda que tivesse preço e desempenho térmico melhores. O painel rígido de ICB, ainda que fosse ambiental e acusticamente melhor que os demais, tinha um alto custo e baixo desempenho térmico. A solução de referência (o EPS) foi o de melhor custo, com bom desempenho térmico, mas apresentou um baixo desempenho acústico.

A partir de tais estudos, pode-se notar a abrangência alcançada pelas análises da MARS-SC que, a partir de indicadores ambientais, sociais e econômicos, pode promover uma visão global de desempenho do material, sistema construtivo e/ou da própria edificação. Tal visão é importante no sentido de se disseminar o conceito da sustentabilidade no ambiente construído, o qual não deve restringir-se apenas a um aspecto (por exemplo, apenas o ambiental), mas sim, considerar o máximo de âmbitos possível, a fim de se fazer uma avaliação total dos cenários de estudo.

Assim, do ponto de vista da Análise de Custo Ótimo, Ferreira et al. (2014), realizaram uma análise para um série de cenários de *retrofit* de um edifício de apartamentos localizado em Portugal. O edifício existente (caso-base) tinha estrutura de concreto armado, paredes externas de alvenaria dupla separadas por um espaço de ar, janelas de vidro simples com esquadria de alumínio, piso constituído por um sistema leve de laje (laje aligeirada com vigotas pré-esforçadas e abobadilhas cerâmicas) e telhado de telhas metálicas onduladas sobre a laje leve. Os apartamentos possuíam aquecedores elétricos e água quente. Não havia isolamento no envelope do edifício e nem centrais de aquecimentos e/ou arrefecimento. Neste caso, diversos cenários foram criados, acrescentando isolamento térmico de diferentes espessuras (em cada cenário) nas paredes externas, telhado e piso, além de trocar os caixilhos das janelas de alumínio para PVC. Diversos tipos de sistemas de aquecimento e resfriamento foram analisados. Foram criados também cenários com balanço de energia zero (ZEB) e com variação nas taxas dos impostos. Os autores analisaram os cenários de *retrofit* de acordo com as seguintes relações: custos globais *versus* energia primária não-renovável e custos globais *versus* uso total de energia primária. Como principais resultados da pesquisa, obteve-se que: melhorias do desempenho energético da envolvente do edifício conduziram à reduções significativas no consumo de energia primária, mas tiveram menos impacto sobre as alterações nos custos globais; o uso de sistemas com energias renováveis teve grande impacto na relação de custo ótimo dos pacotes de *retrofit*; no entanto, houve uma tendência de redução das diferenças dos custos globais entre os pacotes de medidas de custo ótimo

e aqueles com melhor desempenho energético (ZEB), enquanto que os pacotes de custo ótimo e aqueles com pior desempenho energético tiveram maiores diferenças no custo.

Com base nos estudos de custo ótimo, Araújo et al. (2016) desenvolveram um método alternativo, em que a melhor solução do ponto de vista de custo e do desempenho energético das soluções, seja também eficiente na forma de otimizar o uso dos recursos energéticos. O método criado – Análise de Custo-Benefício (CBA) – permitiu a comparação de soluções de diferentes edifícios do ponto de vista dos custos e do desempenho energético. Assim, uma solução era tida como referência (existente ou inicialmente selecionada) e outras soluções foram consideradas como alternativas. O método CBA era baseado na diferença do desempenho de custo e de energia entre cada alternativa e a solução de referência. Assim, um estudo de caso foi realizado em quatro cômodos de uma casa localizada em Portugal. Foram selecionados parâmetros para analisar as soluções energeticamente eficientes, tais como: a) coeficiente de transferência de calor (U); b) número de renovações de ar por hora; c) fator solar das janelas; d) fator de sombreamento de janelas verticais e horizontais; e) fator de absorção das paredes externas; f) eficiência do sistema de água quente; g) contribuição do sistemas de painéis solares para aquecimento da água; h) eficácia do sistema de aquecimento e j) eficiência do sistema de arrefecimento. Uma série de cenários foram criados a partir de alterações nas paredes externas e no piso (com variações na espessura do isolamento e, conseqüentemente no valor do U). Os resultados apresentados neste estudo variaram de acordo com as análises realizadas: houveram casos em que se obteve um melhor desempenho energético, porém alto custo inicial, enquanto que houveram casos com custos mais baixos, mas com pior desempenho energético. No entanto, houveram casos em que o alto custo inicial compensava pela redução do consumo de energia ao longo do ciclo de vida da edificação. Em relação à variação dos custos tarifários e o desconto aplicado à energia (numa análise de sensibilidade), o estudo mostrou que os resultados não variaram tanto conforme essas taxas. Assim, a Análise de Custo-Benefício surgiu como forma de integrar os resultados das soluções e proporcionar um questionamento- em que medida compensa pagar por uma certa melhoria no desempenho energético de um edifício?

No estudo de Silva et al. (2016), foram feitas análises comparativas de três cenários de renovação de energia: a) Básico; b) Edifício de Energia quase Zero (NZEB) e c) Edifício de Energia Zero (ZEB) em um edifício residencial localizado em Portugal. Os três cenários foram comparados ao edifício existente, antes da renovação. Assim, o cenário Básico correspondia à adoção de princípios que atendessem aos requisitos mínimos de energia do regulamento português. O cenário NZEB representava um cenário de renovação de custo ótimo, de acordo com a metodologia da EPDB (UNIÃO EUROPEIA, 2010). O cenário ZEB correspondia àquele em que a utilização de energia não renovável era quase nula para climatização e o aquecimento de água era realizado através de fontes renováveis. Dessa forma, as

análises foram realizadas para verificar a contribuição do uso de energia solar no aumento dos custos e dos impactos ambientais durante a renovação e a redução durante a fase de uso da edificação. Análises complementares foram realizadas com base nos impactos advindos: a) da avaliação do ciclo de vida de cada cenário; b) do Tempo de Retorno de Investimento Econômico (*Economic Payback Time*- EPBT); e c) do Tempo de Retorno de Investimento na Redução das Emissões de Carbono (*Carbon Emissions Payback Time*- GPBT). Como resultados da pesquisa, obteve-se que: a) em relação ao consumo de energia anual, o caso Básico permitiu uma redução de 32%, enquanto que o cenário NZEB permitiu uma redução de 73%; b) em relação ao custo, o cenário ZEB apresentou os menores custos (29% menor que o cenário existente e 26% menor em relação ao cenário Básico); c) o potencial de melhoria no desempenho ambiental dos três cenários em relação ao existente foi de 32%, 80% e 92%, respectivamente, o que demonstrou uma forte relação entre redução do consumo de energia e redução dos impactos ambientais globais; e por fim, d) o EPBT dos três cenários foi de 13,5 anos para o cenário Básico e 15 anos para os cenários NZEB e ZEB, enquanto que o GPBT para cada cenário foi de 5 anos (Básico), 1,5 anos (NZEB) e 2 anos (ZEB). Quando foram utilizadas energia renováveis (com painéis solares), o EPBT foi de 1,0 ano, 1,3 anos e 5,5 anos, enquanto que o GPBT foi de 1,2 anos, 1,6 anos e 4,5 anos para cada cenário (Básico, NZEB e ZEB), respectivamente.

Dalla Mora et al. (2017) analisaram dois edifícios escolares na Itália (um retangular, compacto e outro com geometria mais fragmentada), a partir da relação energia primária *versus* custos globais para um ciclo de vida de 30 anos. Foram consideradas medidas de *retrofit* (alteração no isolamento da fachada, substituição de lâmpadas comuns por LEDs e instalação de painéis fotovoltaicos), a fim de reduzir o consumo energético e os custos operacionais, na tentativa de torná-lo NZEB. Foram feitas avaliações do ponto de vista dos seguintes casos: 1) todas as medidas propostas; 2) todas as realizadas para o edifício ser um NZEB; 3) Todas as medidas propostas com cálculos de incentivos; e 4) Todas as medidas realizadas para tornar o edifício um NZEB com cálculos de incentivos. Sob o enfoque do NZEB, o edifício mais compacto necessitou de poucas alterações – não tão custosas-, para atingir esse objetivo, enquanto o outro, devido a geometria maior e mais fragmentada, necessitaria de um grande investimento para se tornar NZEB. Em relação à intervenção que gerou o ponto ótimo (menores custos e consumo energético), em ambos os edifícios se configurou a mesma alternativa, diferenciando-se apenas do ponto de vista da presença do painel fotovoltaico, presente na solução do edifício mais compacto e não no edifício mais fragmentado, que influenciaria no custo da solução.

Loukaidou, Michopoulos e Zachariadis (2017) avaliaram edifícios de referências (representados por células testes) para três cidades do Chipre, a partir dos níveis ótimos de desempenho energético de acordo com a abordagem de custo ótimo alinhado à EBPD *recast* e aos requisitos do NZEB. Foram definidas variáveis relacionadas ao envelope do edifício (o valor U das paredes, cobertura e piso;

características térmicas das aberturas externas; variação na espessura do isolamento e otimização do tipo de vidro). Como resultados do estudo, os autores encontraram uma relação entre a ótima espessura de isolamento e o ótimo valor de U; além disso, encontraram uma relação linear entre o valor de U e a taxa A_e/V (área externa/volume total do edifício) – um aumento nessa taxa levaria a um aumento no valor U; o ótimo valor de U para as janelas externas foi de $1,67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, considerado baixo pelo decreto que indicava o mínimo nível de desempenho para edifícios NZBEs; enquanto o ótimo valor de U para os elementos verticais (paredes externas) foi alto, em comparação ao mesmo decreto.

Com tais estudos pode-se notar a importância e a abrangência da utilização de análises integradas que, por meio da utilização de indicadores, pode auxiliar na compreensão do desempenho global dos cenários avaliados. E não se restringe apenas à comparação de materiais construtivos, mas possibilita a de sistemas construtivos e/ou edifícios. Ter a noção do desempenho energético, ambiental e o custo reforça a ideia de que se tem que ter em mente os pilares da sustentabilidade (ambiental, social e econômico), como forma de se obter o desempenho global da edificação. Assim, a Tabela 6 apresenta um resumo das pesquisas acima apresentadas.

Tabela 6: Panorama dos trabalhos sobre análise integrada apresentados na literatura (continua).

REFERÊNCIA	PARÂMETROS ANALISADOS	ÍNDICES DE DESEMPENHO	PRINCIPAIS CONCLUSÕES / RECOMENDAÇÕES
Azari (2014)	<ul style="list-style-type: none"> Local: Seattle; Edifício de escritórios hipotético (335m²) Foram criados 6 cenários a partir da variação do PAF (40%, 60%, 80%), do tipo de material de isolamento (fibra de vidro ou lã mineral), tipo de vidro (<i>low-e</i> duplo com gás argônio ou ar) e da estrutura do material do caixilho (alumínio, fibra de vidro ou PVC); Fases consideradas: produção dos materiais, construção e operação (incluindo manutenção) e demolição; Unidade Funcional: a área de total do edifício; Tempo de vida útil: 60 anos. 	<ul style="list-style-type: none"> Consumo energético na fase operacional; Consumo de combustível fóssil e os potenciais de: aquecimento global, acidificação, eutrofização, destruição da camada de ozônio e formação de <i>smog</i>; 	<ul style="list-style-type: none"> Classificação dos cenários por meio de notas (1-6, do menos impactante para o mais impactante): o cenário 2 (PAF de 40%, isolamento com lã mineral, vidro <i>low-e</i> duplo com argônio e caixilho de fibra de vidro) que obteve o menor consumo energético operacional (nota 1) recebeu a mesma nota para maioria das demais categorias de impacto, o que também aconteceu com o pior cenário (maior consumo energético), no caso o 6 (PAF de 80%, isolamento com lã mineral, vidro <i>low-e</i> duplo com argônio e caixilho de alumínio); A fase de uso (correspondente à operação e manutenção do edifício), foi a que mais contribuiu para os impactos ambientais no ciclo de vida (representando mais de 90% em quase todas as categorias), exceto pela categoria de destruição da camada de ozônio (medida em kg CFC11 eq), em que esta fase representou 35%, influenciada pela presença de gás ar argônio e ar presentes no vidro duplo. Na formação de <i>smog</i> contribuiu com até 67%.
Bragança e Mateus (2006)	<ul style="list-style-type: none"> Local: Portugal; Avaliação de sistemas construtivos de paredes e pisos (4 de cada), tendo como referências a parede dupla em alvenaria de tijolo vazado e o piso de aligeirado de vigotas pré-esforçadas e abobadilhas cerâmicas; Unidade funcional: 1m² do sistema construtivo. 	<ul style="list-style-type: none"> Ambientais (energia primária incorporada e potencial de aquecimento global); Funcionais (Isolamento a sons de condução aérea, espessura da parede e isolamento térmico); Econômicos (custo de construção); Nível de sustentabilidade (MARS-SC); 	<ul style="list-style-type: none"> A solução de parede mais sustentável foi a Par2 (parede simples com reboco armado sobre isolante externo contínuo) - possuía o melhor equilíbrio entre todos os indicadores; A solução menos sustentável foi a Par4 (parede ventilada com elemento de suporte em alvenaria de blocos de concreto leve e revestimento exterior em material cerâmico fixado em estrutura metálica) – devido à elevada energia incorporada e potencial de aquecimento global; O piso mais sustentável foi a Pav1(pavimento de vigotas de blocos cerâmicos) – possuía melhor comportamento funcional e econômico; O piso menos sustentável foi o Pav2 (pavimento em concreto armado) – devido ao aspecto ambiental, pois contava com uma alta concentração de aço, que continha uma elevada energia incorporada e contribuía significativamente com o potencial de aquecimento global.

Tabela 6: Panorama dos trabalhos sobre análise integrada apresentados na literatura (continuação).

REFERÊNCIA	PARÂMETROS ANALISADOS	ÍNDICES DE DESEMPENHO	PRINCIPAIS CONCLUSÕES / RECOMENDAÇÕES
Mateus et al. (2013)	<ul style="list-style-type: none"> Local: Portugal; Avaliação de sistemas de paredes divisórias a partir do desenvolvimento da parede divisória de membrana sanduíche leve (LSM), com espessura total de 79 mm, composta por um núcleo fibroso modular de 70 mm; uma grade de plástico ou painéis de papelão composto por 600 x 600 mm; uma estrutura de fixação; um revestimento estrutural de 3 mm e um revestimento de acabamento de 1,5 mm); Comparação dessa tecnologia com outras duas de referência: a) HCM - parede de tijolo furado (divisória pesada convencional) e b) PLR - parede de gesso acartonado (divisórias leves – painéis de gesso); Foram criados 10 cenários de variações nas divisórias (alterando o material interno); Fases consideradas na ACV: produção dos materiais; Unidade funcional: 1m² do sistema construtivo. 	<ul style="list-style-type: none"> Ambientais (potenciais de aquecimento global, acidificação, eutrofização, destruição da camada de ozônio e consumo de recursos energéticos); Funcionais (Isolamento a sons de condução aérea, espessura da parede e isolamento térmico); Econômicos (custo de construção); Nível de sustentabilidade (MARS-SC); 	<ul style="list-style-type: none"> O melhor resultado obtido para a maioria dos indicadores foi o caso LSM9 (divisória de membrana sanduíche leve composta por núcleo de fibra de sisal + MDF + membrana de poliéster com revestimento em PVC); As soluções de referência HCM e PRL só foram melhores quando o foco era, respectivamente, a dimensão econômica ou quando o peso das dimensões funcionais tendia a 100%; Uma questão importante considerada neste estudo é que ele foi feito para Portugal e, apesar da MARS-SC poder ser aplicada em outros contextos regionais, é recomendável que se faça uma adaptação prévia no sistema de ponderação, considerando os contextos ambientais, sociais e econômicos do local de estudo.
Oliveira Augusto, Bragança e Almeida (2015)	<ul style="list-style-type: none"> Local: Portugal; Avaliação de materiais de isolamento, sendo: 1) EPS (que foi considerado como material de referência); 2) XPS; 3) Lã de rocha; e 4) Pannel rígido de ICB (aglomerado de cortiça expandida), todos com 60mm de espessura; Fases consideradas na ACV: produção dos materiais; Unidade funcional: 1m² do material; 	<ul style="list-style-type: none"> Ambientais (Potencial de Aquecimento Global – GWP-, e a Energia primária não-renovável -EPNR); Sociais - os desempenhos térmico (medido pelo valor de U) e acústico (indicado pela densidade – peso/área); Econômicos (preço de aquisição do mercado); Nível de sustentabilidade (MARS-SC); 	<ul style="list-style-type: none"> A lã de rocha teve a melhor nota sustentável, pois este material foi o que menos contribuiu para o GWP, teve bom desempenho térmico e acústico, ainda que o custo fosse mais alto; A pior solução foi a do XPS por conta da alta contribuição ao GWP, EPNR e pelo baixo desempenho acústico, ainda que tivesse preço e desempenho térmico melhores; O pannel rígido de ICB, ainda que fosse ambiental e acusticamente melhor que os demais, tinha um alto custo e baixo desempenho térmico; A solução de referência (o EPS) foi o de melhor custo, com bom desempenho térmico, mas apresentou um baixo desempenho acústico.

Tabela 6: Panorama dos trabalhos sobre análise integrada apresentados na literatura (continuação).

REFERÊNCIA	PARÂMETROS ANALISADOS	ÍNDICES DE DESEMPENHO	PRINCIPAIS CONCLUSÕES / RECOMENDAÇÕES
Macedo, Mateus e Silva (2014)	<ul style="list-style-type: none"> Local: Portugal; Edificação residencial (64m²); Avaliação de sistemas de cobertura para otimizar o desempenho térmico e energético; Considerou diferentes tipos, espessuras e localização dos materiais de isolamento na cobertura; Fases consideradas na ACV: produção dos materiais, uso da edificação; 	<ul style="list-style-type: none"> Ambientais (métodos <i>CML Baseline 2000</i> e <i>Cumulative Energy Demand</i>, para a avaliação da energia primária incorporada); Funcionais (consumo energético para aquecimento e arrefecimento e a qualidade acústica (índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea) das soluções construtivas); Econômicos (custo de construção); Nível de sustentabilidade (MARS-SC); 	<ul style="list-style-type: none"> O material de isolamento sempre favoreceu a redução do consumo energético da edificação, independente da espessura; O cenário mais sustentável de reabilitação - e o que otimizou o isolamento térmico - correspondeu àquele com isolamento térmico sobre a laje de concreto; O pior cenário foi aquele que obteve reforço do isolamento na parte da inclinada da cobertura; Do ponto de vista do tempo de retorno do investimento, concluiu-se que os custos acumulados do cenário base se igualavam aos custos das soluções de reabilitação em menos de 8 anos; Os autores afirmam a importância de se observar o tempo de retorno do investimento na reabilitação – não se limitando apenas aos custos iniciais – para que se possa aumentar os níveis de conforto dos usuários, reduzindo o custo de utilização em um curto período (até 8 – 10 anos).
Ferreira et al. (2014)	<ul style="list-style-type: none"> Local: Portugal; Edifício de apartamentos existente: estrutura de concreto armado, paredes externas de alvenaria dupla separadas por um espaço de ar, janelas de vidro simples com esquadria de alumínio, piso de laje leve e telhado de telhas metálicas onduladas sobre a laje leve. Os apartamentos possuíam aquecedores e água quente. Não havia isolamento no envelope do edifício e nem centrais de aquecimentos e/ou arrefecimento; Criação de vários cenários de <i>retrofit</i>, acrescentando isolamento térmico de diferentes espessuras (em cada cenário) nas paredes externas, telhado e piso, além de trocar os caixilhos das janelas de alumínio para PVC; Foram avaliados sistemas de aquecimento/resfriamento e cenários ZEB foram criados com variação nas taxas dos impostos. 	<ul style="list-style-type: none"> Custos globais <i>versus</i> energia primária não-renovável; Custos globais <i>versus</i> uso total de energia primária; 	<ul style="list-style-type: none"> Melhorias do desempenho energético da envolvente do edifício conduziram a reduções significativas no consumo de energia primária, mas tiveram menos impacto sobre as alterações nos custos globais; O uso de sistemas com energias renováveis teve grande impacto na relação de custo ótimo dos pacotes de <i>retrofit</i>; Houve uma tendência de redução das diferenças dos custos globais entre os pacotes de medidas de custo ótimo e aqueles com melhor desempenho energético (ZEB); Os pacotes de custo ótimo e aqueles com pior desempenho energético tiveram maiores diferenças no custo.

Tabela 6: Panorama dos trabalhos sobre análise integrada apresentados na literatura (continuação).

REFERÊNCIA	PARÂMETROS ANALISADOS	ÍNDICES DE DESEMPENHO	PRINCIPAIS CONCLUSÕES / RECOMENDAÇÕES
Araújo et al. (2016)	<ul style="list-style-type: none"> Local: Portugal; Avaliação de um estudo de caso: quatro cômodos de uma residência. Seleção de parâmetros para analisar as soluções energeticamente eficientes, tais como: a) coeficiente de transferência de calor (U); b) número de renovações de ar por hora; c) fator solar das janelas; d) fator de sombreamento de janelas verticais e horizontais; e) fator de absorção das paredes externas; f) eficiência do sistema de água quente; g) contribuição do sistemas de painéis solares para aquecimento da água; h) eficácia do sistema de aquecimento e j) eficiência do sistema de arrefecimento; Cenários foram criados a partir de alterações nas paredes externas e no piso (com variações na espessura do isolamento e, conseqüentemente no valor do U). 	<ul style="list-style-type: none"> A partir da Análise de Custo Ótimo, foi desenvolvida a Análise de Custo Benefício (CBA) - em que a melhor solução do ponto de vista de custo e do desempenho energético das soluções, seja também eficiente na forma de otimizar o uso dos recursos energéticos; 	<ul style="list-style-type: none"> Os resultados variaram de acordo com as análises realizadas: houveram casos em que se teve um melhor desempenho energético, porém alto custo inicial, enquanto que houveram casos com custos mais baixos, mas com pior desempenho energético. No entanto, houveram casos em que o alto custo inicial compensava pela redução do consumo de energia ao longo do ciclo de vida da edificação. Em relação à variação dos custos tarifários e o desconto aplicado à energia (numa análise de sensibilidade), o estudo mostrou que os resultados não variaram tanto conforme essas taxas. A Análise de Custo-Benefício surgiu como forma de integrar os resultados das soluções e proporcionar um questionamento - em que medida compensa pagar por uma certa melhoria no desempenho energético de um edifício?
Silva et al. (2016)	<ul style="list-style-type: none"> Local: Portugal; Edifício residencial; Análises comparativas de cenários de renovação energético: a) Básico (adoção de princípios que atendam ao mínimo dos requisitos de energia do regulamento português; b) Edifício de Energia quase Zero (NZEB) - cenário de renovação de custo ótimo, de acordo com a metodologia da EPDB e c) Edifício de Energia Zero (ZEB)- corresponde àquele em que a utilização de energia não-renovável era quase nula para climatização e o aquecimento de água era realizado através de fontes renováveis; 	<ul style="list-style-type: none"> Contribuição do uso de energia solar no aumento dos custos e dos impactos ambientais durante a renovação e a redução durante a fase de uso da edificação; Verificação dos impactos advindos da(o): a) ACV de cada cenário; b) Tempo de Retorno de Investimento Econômico; e c) Tempo de Retorno de Investimento na Redução das Emissões de Carbono. 	<ul style="list-style-type: none"> Em relação ao consumo de energia anual, o caso Básico permitiu uma redução de 32%, enquanto que o cenário NZEB permitiu uma redução de 73%; Em relação ao custo, o cenário ZEB apresentou os menores custos (29% menor que o cenário existente e 26% menor em relação ao cenário Básico); O potencial de melhoria no desempenho ambiental dos três cenários em relação ao existente foi de 32%, 80% e 92%, respectivamente, o que demonstrou uma forte relação entre redução do consumo de energia e redução dos impactos ambientais globais; O EPBT dos três cenários foi de 13,5 anos para o cenário Básico e 15 anos para os cenários NZEB e ZEB, enquanto que o GPBT para cada cenário foi de 5 anos (Básico), 1,5 anos (NZEB) e 2 anos (ZEB);

Tabela 6: Panorama dos trabalhos sobre análise integrada apresentados na literatura (conclusão).

REFERÊNCIA	PARÂMETROS ANALISADOS	ÍNDICES DE DESEMPENHO	PRINCIPAIS CONCLUSÕES / RECOMENDAÇÕES
Silva et al. (2016)			<ul style="list-style-type: none"> Quando foram utilizadas energias renováveis (com painéis solares), o EPBT foi de 1,0 ano, 1,3 anos e 5,5 anos, enquanto que o GPBT foi de 1,2 anos, 1,6 anos e 4,5 anos para cada cenário (Básico, NZEB e ZEB), respectivamente.
Dalla Mora et al. (2017)	<ul style="list-style-type: none"> Local: Itália 2 edifícios escolares (um retangular, compacto e outro com geometria mais fragmentada); Foram adotadas medidas de <i>retrofit</i> (alteração no isolamento da fachada, substituição de lâmpadas comuns por LEDs e instalação de painéis fotovoltaicos), a fim de reduzir o consumo energético e os custos operacionais, na tentativa de torná-lo NZEB; Realizaram avaliações com: 1) todas as medidas propostas; 2) todas as realizadas para o edifício ser um NZEB; 3) Todas as medidas propostas com cálculos de incentivos; e 4) Todas as medidas realizadas para tornar o edifício um NZEB com cálculos de incentivos; Tempo de vida útil: 30 anos 	<ul style="list-style-type: none"> Energia primária <i>versus</i> custos globais; 	<ul style="list-style-type: none"> Sob o enfoque do NZEB, o edifício mais compacto necessitou de poucas alterações – não tão custosas -, para atingir esse objetivo; O edifício maior, devido a geometria ser mais fragmentada, necessitaria de um grande investimento para se tornar NZEB; Em relação à intervenção que gerou o ponto ótimo (menores custos e consumo energético), em ambos os edifícios se configurou a mesma alternativa, diferenciando-se apenas do ponto de vista da presença do painel fotovoltaico, presente na solução do edifício mais compacto e não no edifício mais fragmentado, que influenciaria no custo da solução.
Loukaidou, Michopoulos e Zachariadis (2017)	<ul style="list-style-type: none"> Local: Chipre Edifícios de referência (representados por células testes); Foram definidas variáveis relacionadas ao envelope do edifício (o valor U das paredes, cobertura e piso, características térmicas das aberturas externas, variação na espessura do isolamento e otimização do tipo de vidro). 	<ul style="list-style-type: none"> Níveis ótimos de desempenho energético - estando de acordo com a abordagem de Análise de Custo Ótimo e aos requisitos NZEB; 	<ul style="list-style-type: none"> Os autores encontraram uma relação entre a ótima espessura de isolamento e o ótimo valor de U; Além disso, encontraram uma relação linear entre o valor de U e a taxa Ae/V (área externa/volume total do edifício) – um aumento nessa taxa levaria a um aumento no valor U; O ótimo valor de U para as janelas externas foi de 1,67 W/(m².K), considerado baixo pelo decreto que indicava o mínimo nível de desempenho para edifícios NZEBs; O ótimo valor de U para os elementos verticais (paredes externas) era alto, em comparação ao mesmo decreto.

Fonte: A autora (2018).

2.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Nesse capítulo foram abordados temas relativos à produção de energia no Brasil, seus impactos recorrentes no desenvolvimento sustentável e às crises ocorridas neste setor nos últimos anos. De acordo com o exposto pelos autores, ainda que a produção de energia no Brasil seja majoritariamente advinda de fontes renováveis e as emissões de CO₂ no setor ainda sejam baixas em relação à média mundial, deve-se ter em mente que produzir energia – mesmo nessas condições – também gera impactos ao meio ambiente. Seja na construção de novas usinas, seja na produção de sistemas (como placas fotovoltaicas), o fato é que quanto mais o consumo energético aumenta, mais energia tem que ser produzida e, conseqüentemente, mais impactos negativos são gerados.

É preciso reduzir o consumo energético de modo geral, investido na “energia não consumida”. Nesse sentido, um fator chave de contribuição para o desenvolvimento sustentável é a eficiência energética. Uma “energia não consumida” poupa recursos naturais e não gera poluentes.

Dentro dessa perspectiva, inserem-se os edifícios, os quais têm grande impacto sobre o consumo energético mundial. Além disso, destacam-se neste trabalho os edifícios de escritórios, os quais por seu formato, dimensão, tipo de envelope e elevada carga térmica interna, são grandes consumidores de energia elétrica. Nesse tipo de edificação, uma atenção especial deve ser dada à fachada, a qual está diretamente relacionada ao desempenho energético, e da qual se destacam o PAF, o tipo de vidro e a presença de dispositivos de sombreamento.

Além do investimento na eficiência energética, é preciso considerar o desempenho ambiental, aqui caracterizado pela Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), técnica que permite uma visão holística do processo avaliado, - no caso, do edifício-, identificando possíveis impactos ambientais associados ao processo de extração das matérias-primas, produção dos materiais, construção, uso e demolição da edificação. Além disso, permite a verificação das etapas do ciclo de vida que mais impactam o meio ambiente e consomem recursos naturais, podendo se comparar sistemas e/ou produtos, desde que exerçam a mesma função.

Dentro desta técnica, avaliações no âmbito da construção civil se destacam, permitindo análises de materiais, sistemas construtivos e/ou do próprio edifício. E este último configura-se como um produto complexo de ser avaliado, principalmente devido ao seu longo tempo de uso, manutenção, alteração das funções ao longo do tempo, além da dependência do comportamento do usuário, o qual gera incertezas nas análises. Vários autores apontam também a necessidade de se estudar mais edifícios comerciais e institucionais, em detrimento dos residenciais – que são os mais comumente avaliados.

Os estudos também apontaram a grande contribuição – dependendo do contexto do estudo-,

de alguns materiais para os impactos das edificações, tais como o concreto (geralmente por conta da presença do clínquer) e o aço/alumínio (devido à grande quantidade de energia consumida na produção). Além disso, a fase de operação do edifício é que mais impacta o ciclo de vida da edificação, principalmente devido ao alto consumo energético associado a sistemas de climatização e/ou aquecimento, além do longo tempo de vida útil do edifício (geralmente entre 50 e 100 anos). Dentro dessa perspectiva, observou-se que reduzir o consumo energético pode influenciar no aumento da energia incorporada da edificação (muitas vezes por conta da inserção de materiais produzidos sob altas cargas energéticas). Grande parte das análises envolve consumo de energia primária, energia operacional e emissões de carbono.

Assim, como forma de se obter uma avaliação global de desempenho das edificações, surgem as Análises Integradas, as quais unem conceitos de eficiência energética, impactos ambientais e custo. Os autores apontam que poucos estudos conseguem avaliar dentro de uma estrutura integrada esses três aspectos. Por meio da utilização de indicadores (ambientais, sociais e econômicos) e um sistema de otimização de custos, é possível facilitar a compreensão por parte dos projetistas e fomentar escolhas mais conscientes do ponto de vista da sustentabilidade.

Portanto, diante dos temas abordados neste capítulo, identifica-se alguns pontos que merecem destaque, tais como: 1) a importância do envelope construtivo no desempenho energético e ambiental das edificações; 2) a pequena quantidade de estudos de ACV em edifícios de escritórios, em detrimento de a maior parte desse tipo de análise ser em edificações residenciais; 3) a inserção dos custos das soluções construtivas nas análises de desempenho energético e ambiental; e 4) a utilização de um método de avaliação que integre em sua estrutura os aspectos energéticos, ambientais e de custo. Com isso, este trabalho desenvolve-se no sentido de realizar uma análise integrada, somando desempenho energético, impactos ambientais e custo de soluções de fachadas para o contexto dos climas brasileiros, no sentido de contribuir com respostas para tais lacunas e promover uma visão global de desempenho do ambiente construído.

CAPÍTULO 3.

ANÁLISE DE DESEMPENHO ENERGÉTICO

3.1 ENQUADRAMENTO

Esta primeira etapa da pesquisa tem como objetivo fazer uma análise do desempenho energético de um modelo de edifício de escritórios de planta livre em três climas brasileiros. Conforme citado no Capítulo 2 (Contextualização), esse tipo de edifício de planta livre é o que mais se constrói atualmente no Brasil, dentre os destinados para escritórios. O modelo estudado foi definido de acordo com uma coleta de dados, realizada com o objetivo de identificar as atuais características mais recorrentes desse tipo de edificação. Esse modelo contemplou variadas soluções de fachada. Por meio de simulação do desempenho energético no programa *EnergyPlus*, os 288 cenários foram classificados em faixas de consumo energético, identificando-se como os parâmetros relacionados à fachada influenciam neste consumo. Além disso, são apresentadas as principais características arquitetônicas presentes em cada classificação energética.

3.2 METODOLOGIA

Para se obter o desempenho energético do modelo de edifício de escritórios de planta livre e suas variações, efetuou-se simulações computacionais paramétricas no *EnergyPlus* (EP) (EERE, 2013a) e a modelagem da geometria foi realizada no programa *SkechtUp* (GOOGLE, 2008), por meio do *plugin Legacy OpenStudio* (EERE, 2013b). Neste item são apresentados: a ferramenta de simulação energética, os climas selecionados e o desenvolvimento do modelo de estudo (incluindo suas características construtivas e de uso).

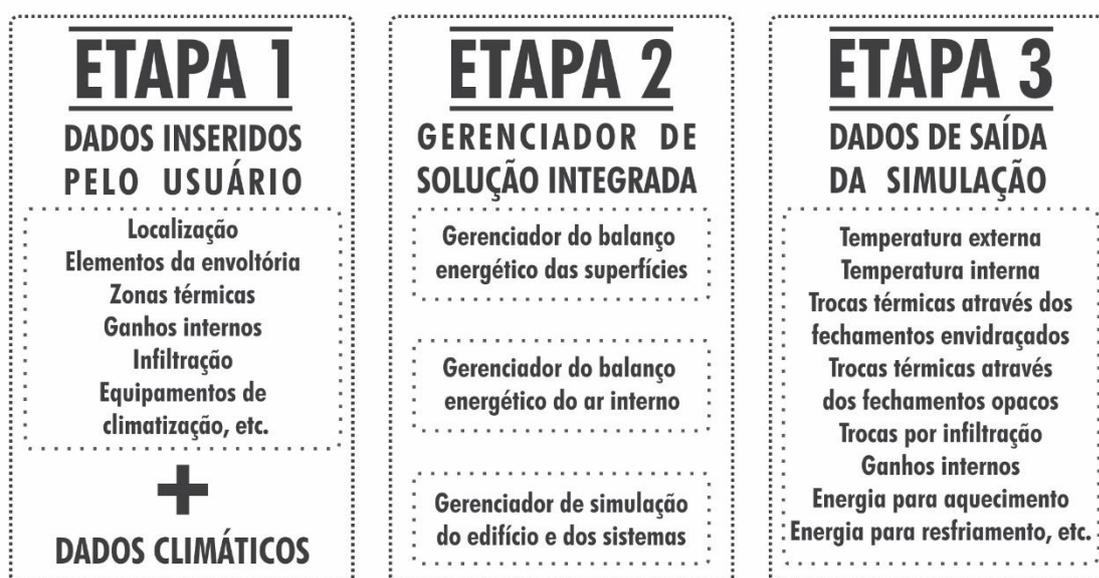
3.2.1 Ferramenta de simulação energética

O uso de ferramentas de simulação computacional em edificações está atrelado ao cálculo dos ganhos de calor do envelope construtivo e as cargas térmicas dos ambientes internos, podendo assim prever o desempenho termo-energético da edificação, e fornecer diagnósticos que indiquem pontos de melhoria no funcionamento do edifício, configurando-se assim como a chave para melhorar a eficiência energética da edificação (HONG; CHOU; BONG, 2000).

Atualmente no Brasil, o programa de simulação do desempenho energético de edificações mais utilizado é o *EnergyPlus* (EP) (EERE, 2013a). Desenvolvido pelo Departamento de Energia dos EUA e validado pela norma ASHRAE 140 (ASHRAE, 2014), é um programa modular, e de livre acesso, estruturado com base nos programas BLAST e DOE-2. Além disso, o EP é um programa confiável e que permite simular o desempenho das edificações em relação à demanda por aquecimento, refrigeração, iluminação, ventilação, entre outros.

Essa ferramenta possui um mecanismo de simulação cujos dados de entrada e saída são arquivos de texto simples (CRAWLEY et al., 2001). A estrutura do programa, apresentada na Figura 11, é composta pelos módulos de operação (etapa 1), de balanço de calor e de simulação dos sistemas da edificação (etapa 2) e os dados de saída (etapa 3). Na etapa 1, os dados de entrada da simulação abrangem os que caracterizam a edificação e o arquivo climático (que contém informações relacionadas à temperatura, umidade, radiação solar entre outros dados do clima selecionado). A etapa 2 é composta pelo gerenciamento da solução integrada – a simulação propriamente dita-, em que há a iteração dos dados de entrada e a etapa 3 apresenta dos dados de saída.

Figura 11: Etapas da simulação no *EnergyPlus*.



Fonte: Adaptado de Gouveia (2008).

Entre os dados utilizados na simulação, têm-se a geometria da edificação, as propriedades termofísicas dos materiais, os padrões de uso e de ocupação de equipamentos e do sistema de iluminação artificial, além das características do sistema de condicionamento artificial de ar.

Com tais informações, o programa estima as trocas de calor do edifício com o ambiente externo (relacionando as temperaturas interna e externa e o calor transmitido por condução através da envoltória da edificação) e calcula o fluxo de ar entre zonas através de frestas e janelas, podendo gerar como resultado os dados de ganhos de calor interno, a temperatura interna de cada zona térmica, a taxa de infiltração de ar, consumo de energia de cada sistema do edifício, entre outros resultados, podendo simular dias de projeto ou um ano todo (ANDREIS, 2014; NASCIMENTO, 2009).

Para a modelagem da geometria da edificação, o *EnergyPlus* conta com o *plugin* integrado ao programa *SkechtUp* (GOOGLE, 2008). Através dele- o *Legacy OpenStutio* (EERE, 2013b)-, é possível

modelar toda a parte construtiva (geometria – paredes, teto, piso) e referenciar os materiais presentes no *EnergyPlus*.

De acordo com Crawley et al. (2001), o programa *EnergyPlus* representa um avanço em termos de técnicas computacionais e estrutura de programa. A integração dos módulos e a caracterização independente de cada um contribui para o desenvolvimento de novas interfaces para usuários pouco habituados ao programa, mantendo o comprometimento e a confiabilidade do código de simulação.

3.2.2 Caracterização dos climas

Três cidades foram selecionadas para abrangerem as características climáticas presentes em todo o território brasileiro. Cada uma delas corresponde a uma zona bioclimática, classificada de acordo com a norma NBR 15220 (ABNT, 2005a). A Tabela 7 apresenta a localização dessas cidades no Brasil, sendo:

- Zona bioclimática mais fria (Curitiba/PR- zona 1) – Região Sul;
- Zona bioclimática intermediária (São Paulo/SP- zona 3) – Região Sudeste;
- Zona bioclimática mais quente (Manaus/AM – zona 8) – Região Norte.

Na classificação de Köppen-Geiger (KÖPPEN, 1936), o clima de Curitiba é considerado Cfb (Clima temperado, com verão ameno), enquanto São Paulo é Cwa (Clima subtropical/ tropical de altitude, com verão quente e inverno seco) e Manaus é Af (Clima tropical chuvoso de floresta) (ALVARES ET AL., 2013; AYOADE, 1996; ROLIM ET AL., 2007).

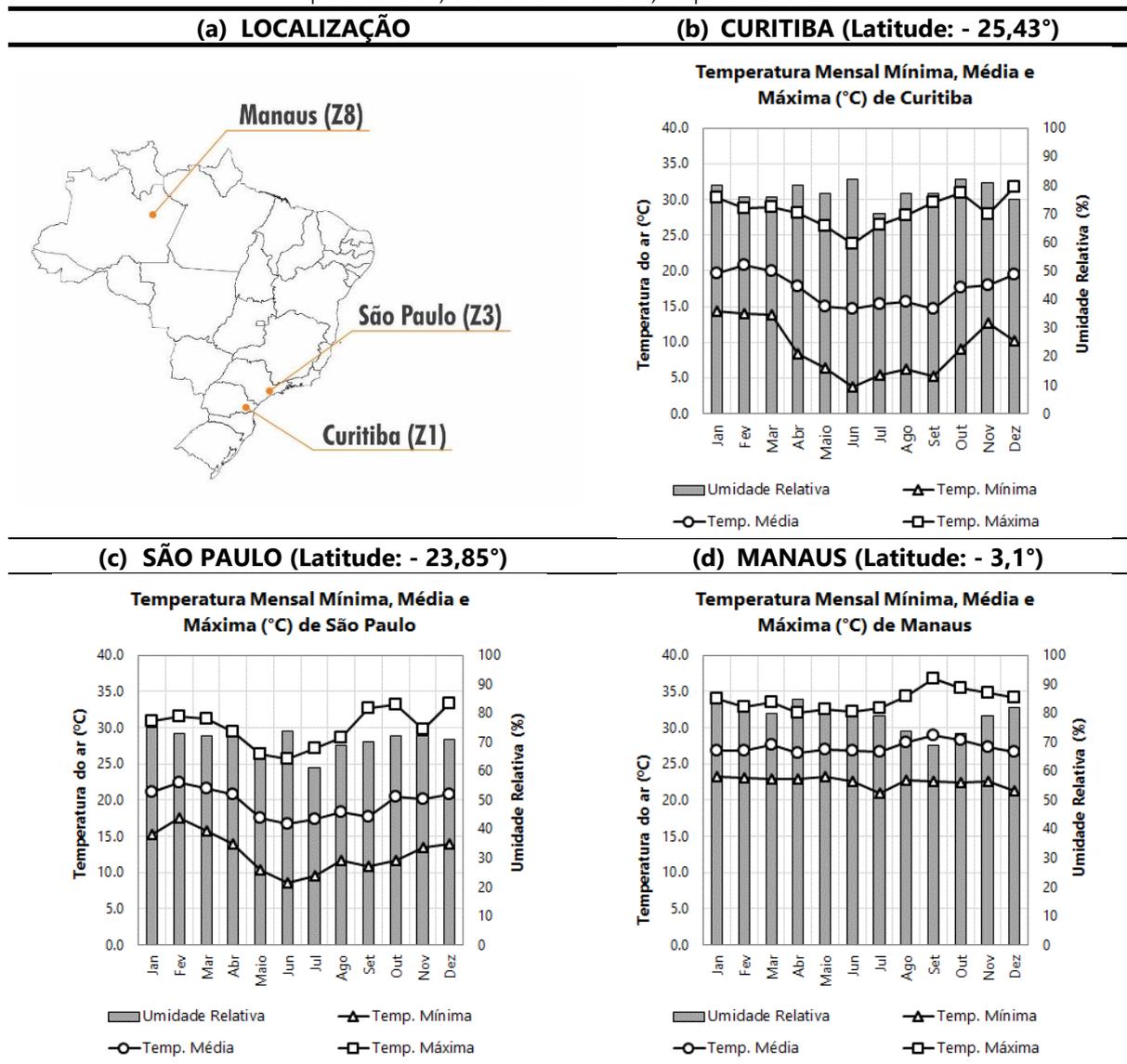
Para as simulações foram utilizados arquivos climáticos (no formato *epw*⁸ - que é o exigido pelo EP) desenvolvidos por Roriz (2012; LABEEE, 2015). Os arquivos climáticos contêm dados obtidos em estações meteorológicas e corresponderem a um ano de referência que, obtido após processamento estatístico, são disponibilizados para utilização.

Vários programas de simulação computacional de desempenho energético utilizam esses arquivos climáticos, pois o desempenho da edificação é dado pelas trocas de calor entre a edificação e o clima externo. Dessa forma, quanto mais completo e detalhado for o programa, mais detalhes são exigidos para as simulações – daí a utilização dos arquivos climáticos. Dentre as variáveis contidas nestes arquivos tem-se dados medidos para as 8760 horas do ano: temperatura de bulbo seco; temperatura de ponto de orvalho; temperatura de solo; velocidade do vento; direção do vento; pressão atmosférica; quantidade de nuvens; tipo de nuvens; altura das nuvens; e radiação solar (CARLO, 2005).

⁸ EPW: *EnergyPlus Weather File*.

Na Tabela 7 tem-se a temperatura do ar e a umidade relativa mensais para Curitiba (b), São Paulo (c) e Manaus (d), obtidas nos arquivos climáticos acima citados (epw).

Tabela 7: Descrição dos dados climáticos: (a) localização; (b) (c) e (d) temperatura e umidade relativa para Curitiba, São Paulo e Manaus, respectivamente.



Fonte: A autora (2018).

Através dos gráficos da Tabela 7 é possível notar as diferenças entre os climas. O clima de Manaus possui uma amplitude térmica menor, comparado à Curitiba e São Paulo. As temperaturas mensais mínimas e máximas variam de 3,8 a 31,7°C em Curitiba, de 8,6 a 33,4°C em São Paulo e de 20,9 a 36,7°C em Manaus. A umidade relativa do ar média anual é igual a 78% em Curitiba, 70% em São Paulo e 80% em Manaus.

3.2.3 Desenvolvimento do modelo de estudo

Neste item é apresentado todo o processo de desenvolvimento do modelo de estudo, desde a coleta de dados até a definição das características geométricas, construtivas e de uso da edificação.

3.2.3.1 Coleta de Dados

A etapa de coleta de dados teve como foco principal a busca por edificações comerciais de planta livre, característica recorrente na atualidade dessa tipologia arquitetônica no mercado da construção civil brasileiro, conforme evidenciado no Capítulo 2 (Contextualização). Assim, a definição do modelo de edifício de escritórios teve como base uma coleta de dados de três fontes, a saber: 1) revisão da literatura, 2) entrevistas e 3) pesquisa no site da empresa *Buildings* (BUILDINGS, 2016)⁹. Procurou-se levantar nessas fontes, informações referentes às seguintes características: formato do pavimento tipo, área condicionada por andar, pé-direito, número de andares, porcentagem de abertura na fachada (PAF)¹⁰, características construtivas da fachada, do forro e do piso, cargas internas, tipo de ar condicionado, e o número de zonas térmicas simuladas. O resultado desse levantamento de dados é apresentado na Tabela 8.

A revisão da literatura verificou quais eram essas características em edifícios de escritórios estudados em pesquisas que trataram do seu desempenho energético no Brasil (SANTANA, 2006; WESTPHAL, 2007; BENEDETTO, 2007; FIGUEIREDO, 2007; CARLO, 2008; BESSA, 2010; MARCONDES, 2010; RUPP, 2011; ANDREIS, 2014; DUARTE, 2014; UMAKOSHI, 2014).

Algumas entrevistas foram realizadas com profissionais¹¹ da área de consultoria de eficiência energética de edifícios de escritórios de alto padrão (corporativos) em São Paulo. Desta forma, tais entrevistas foram importantes no sentido de se obter as principais características desse tipo de edificação para essa cidade – local onde há grande concentração dessa tipologia arquitetônica.

A pesquisa realizada no banco de dados da empresa *Buildings* teve como foco algumas áreas da cidade de São Paulo em que há uma maior concentração desse tipo de edificação, que são as Avenidas Berrini, Paulista e na região do bairro de Pinheiros. Foi assim possível analisar 142 edificações, conforme características apresentadas acima.

⁹ A empresa *Buildings* é especializada em pesquisa imobiliária corporativa no Brasil e conta com um extenso banco de dados de tipologias de edifícios de escritórios.

¹⁰ De acordo com o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C), a PAF é calculada pela razão entre a área de abertura envidraçada e a área total da fachada da edificação (INMETRO, 2013).

¹¹ Entrevistas realizadas com a Profa. Dra. Letícia de Oliveira Neves (UNICAMP) e com a Arquiteta M.^ª Tássia Helena Teixeira Marques (Centro de Tecnologia de Edificações – CTE).

Tabela 8: Características obtidas na etapa de coleta de dados

CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO	REFERÊNCIAS (valores médios)		
	LITERATURA	ENTREVISTAS	BANCO DE DADOS BUILDINGS
Formato do pavimento tipo	Quadrado (30m x 30m; 35m x 35m); Retangular (26m x 15m; 40m x 60m). Ambos com núcleo (<i>core</i>) ¹	Variável	Variável
Área do pavimento tipo (m ²)	950 m ² (variou de 900 m ² a 2500 m ²)	Área condicionada entre 3.000m ² e 50.000m ² (edifício como um todo)	924 m ²
Pé-direito (m)	2,90m	2,50 m a 3m (útil); 3,70m a 4,20m (total – galerias técnicas entre 0,80m e 1,00m)	2,80m
Nº de andares	10	Dado não informado	17
PAF (%)	30 - 100	50 - 80	Dado não informado
Tipo de fachada	Combinação alvenaria (ou <i>Drywall</i>) + vidro; Pele de vidro	Pele de vidro	Variável
Tipo de Vidro	Incolor, Refletivo, Duplo	Vidro com baixo fator solar	Dado não informado
Cargas internas	Iluminação: 12W/m ² Pessoas: 8m ² /pessoa; 117W Equipamentos: 16,2 W/m ²	Dado não informado	Dado não informado
Ar condicionado	Tipo: <i>Split</i> ; Central; Temperatura de controle: 25°C (resfr.); 18°C (aquec.)	Tipo: VRF (sistema unitário); Temperatura de controle de 20 °C a 24°C	Tipo: Central
Tipo de piso	Piso elevado com carpete	Dado não informado	Piso elevado com estrutura metálica
Tipo de forro	Forro de gesso	Dado não informado	Forro modular
Nº de Zonas térmicas	5 (4 + <i>core</i>)	Não se aplica	Não se aplica

¹ Core – zona localizada no centro da edificação, um núcleo, geralmente utilizado em edifício de escritórios, onde se localizam as caixas de escada, elevadores, banheiros e copa.
Fonte: A autora (2018).

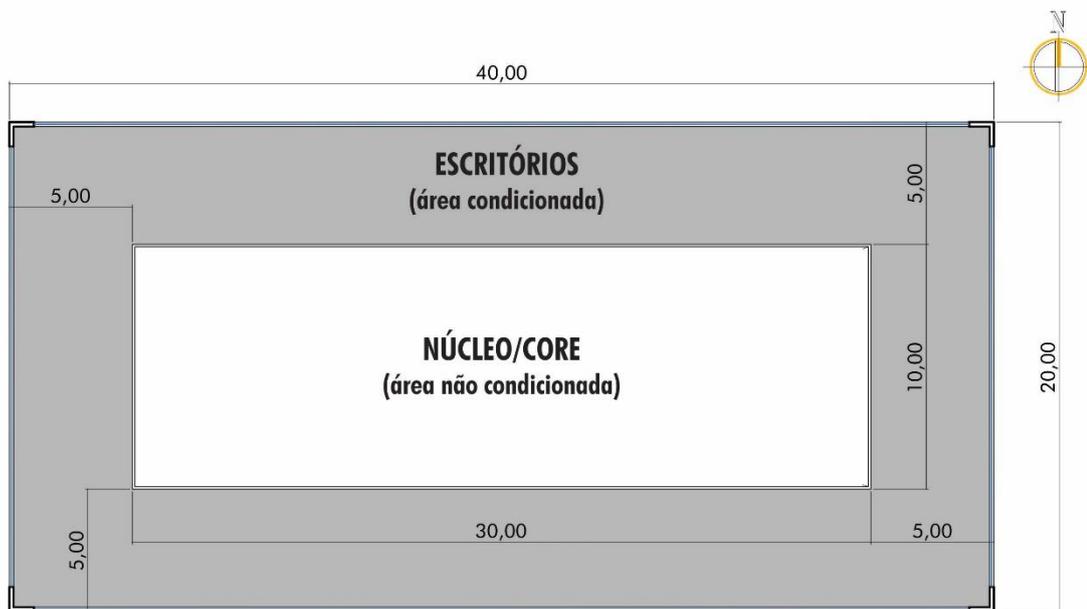
Através da coleta de dados foi possível identificar algumas características recorrentes, tais como: a) área condicionada em torno de 1000m², b) pé-direito livre em torno de 2,70m, c) PAF entre 50% e 80%, d) fachada pele de vidro; e) ar condicionado do tipo *Variable Refrigerant Flow* (VRF), f) piso elevado, e g) forro de gesso. A partir dessas características foi possível criar um modelo hipotético mais próximo da realidade.

3.2.3.2 Definição do Modelo de edifício

Foi considerado um edifício virtual, criado com base nas características geométricas médias, especificadas na Tabela 8. O pavimento tipo desse edifício é apresentado na Figura 12. Ele possui geometria retangular, área total de 800m² (20m x 40m), núcleo (*core*) de 300m² (10m x 30m) e pé-

direito de 2,70m (3,75m no total – somando-se a área do forro e do piso elevado). O núcleo é uma área destinada a elevadores, banheiros e escada. A distância entre a fachada e o core é de 5m- região de influência da radiação sobre o ambiente interno para definição de uma zona térmica (ASHRAE, 2013, p. 260)¹². Apenas a área pertencente aos escritórios é condicionada termicamente e todo o perímetro da fachada é revestida – ao menos parcialmente-, por envidraçados. Além disso, o edifício possui as maiores fachadas orientadas a norte e sul.

Figura 12: Planta do pavimento tipo.

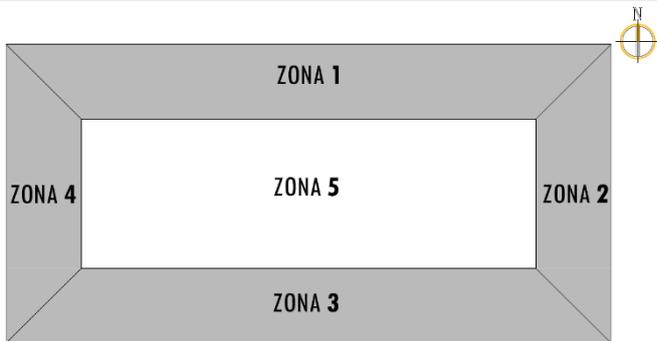


Fonte: A autora (2018).

Para a avaliação do consumo energético da edificação, foi simulado apenas um pavimento, situado em um andar intermediário. Este andar simulado (com piso e teto adiabáticos) funciona como um módulo do edifício, que representa o comportamento térmico dos demais pavimentos intermediários. Este modelo (Figura 12) foi dividido em cinco zonas térmicas (quatro para os escritórios e uma para o core), conforme procedimento indicado pela norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2013, p. 260), apresentado na Tabela 9. A divisão entre as áreas dos escritórios foi realizada por paredes virtuais (superfícies fictícias de espaços de ar), configuradas utilizando-se apenas a resistência do ar (módulo do EP *SurfaceConstructionElements:Material:NoMass*), cujas características são apresentadas na Tabela 9.

¹² A ASHRAE 90.1/2013 (*Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*) recomenda que em zonas condicionadas, deve-se estabelecer zonas térmicas perimetrais com uma distância de até 5m entre a parede interna e a externa. Tal faixa deve ser definida com base em densidades semelhantes de cargas térmicas internas, horários de ocupação, iluminação e temperatura.

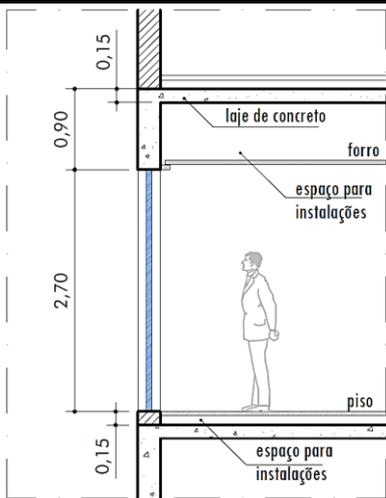
Tabela 9: Características da divisão entre zonas e a configuração do modelo, dividido em zonas térmicas.

DIVISÃO DO MODELO EM ZONAS TÉRMICAS		PROPRIEDADES DA DIVISÃO ENTRE ZONAS (ESPAÇOS DE AR)	
	Rugosidade	Liso	
	Resistência (m ² .K/W)	Térmica	0,18
	Absortância	Térmica	0,75
		Solar	0,75
	Visível	0,52	

Fonte: Modelo (A autora, 2018); Propriedade da divisão entre zonas (Bessa, 2010).

A PAF representa a porcentagem de área envidraçada na fachada. Ela considera a área útil da fachada, disponível para a colocação de janelas (sendo o pé-direito interno do ambiente de 2,70m). Assim, considerando a mesma PAF para fachadas diferentes, foram definidos para este estudo, três valores (30, 55 e 80%), que representam janelas pequenas (30%), menos comuns, médias e grandes (55% e 80%), mais comuns, conforme apresentado na Tabela 10. As janelas, neste caso, podem ter até 2,70m de altura, de acordo com o pé-direito interno, excluindo-se os 0,90m localizados acima, em que há o forro e os 0,15m abaixo do piso elevado.

Tabela 10: PAF e dimensões das aberturas para todas as fachadas.

CORTE ESQUEMÁTICO	DIMENSÕES DAS ABERTURAS		
	PAF (%)	(Altura x Comprimento x Peitoril) (m)	
		Fachada maior	Fachada Menor
	30	0,81 x 38,00 x 1,20	0,81 x 18,00 x 1,20
	55	1,49 x 38,00 x 1,22	1,49 x 18,00 x 1,22
	80	2,16 x 38,00 x 0,54	2,16 x 18,00 x 0,54

Fonte: A autora (2018).

Foram selecionados dois tipos de fachada, denominados Fachada Tradicional (FT) e Fachada Cortina (FC). A Fachada Tradicional (FT) tem a parte opaca composta por parede de alvenaria e a área

envidraçada por esquadrias entre vãos. A outra opção, Fachada Cortina (FC)¹³, é revestida inteiramente por vidro. No atual mercado da construção de edifícios de escritórios, as Fachadas Cortinas, têm substituído o uso das Tradicionais.

Para a área transparente da fachada, foram selecionados quatro tipos de vidro, com características diferentes, sendo eles: 1) Incolor (tido como base de comparação), 2) *Low-e*, 3) Refletivo claro e 4) Duplo com baixo fator solar. Tais vidros foram selecionados através das informações obtidas pela coleta de dados das características desse tipo de edificação (tabela 8) e foram comparados com o incolor por este ser o vidro mais comum (ainda que não seja comumente utilizado nos grandes edifícios de escritórios). Na Fachada Cortina, a parte opaca da estrutura interna (peitoril em alvenaria e viga de concreto) é revestida por um vidro com película PVB (*polivinil butiral*) branca, que o deixa com aspecto translúcido. As principais propriedades térmicas de todos esses vidros são apresentadas na Tabela 11. A Tabela completa, como foi configurado no *EnergyPlus*, é apresentada no Apêndice A.

Tabela 11: Propriedades termofísicas dos vidros utilizados no modelo.

	VIDRO 1	VIDRO 2	VIDRO 3	VIDRO 4	VIDRO 5
Esp (mm)	6	6	8	24	8
Tvis (%)	0,88	0,32	0,72	0,39	0,65
U (W/m²)	5,70	5,79	5,67	2,79	5,50
FS (%)	82	54	44	28	62

VIDRO 1 = Laminado Incolor (Ref. CEBRACE)

VIDRO 2 = Laminado Refletivo (Ref. REFLECTASOL – CEBRACE)

VIDRO 3 = Vidro de controle solar Baixo-Emissivo (*Low-e*) (Ref. *Neutral 70 clear* – GUARDIAN)

VIDRO 4 = Laminado Duplo com Baixo Fator Solar (Ref. *Neutral Gray* – GUARDIAN) = vidro externo 6mm + ar 12mm + vidro interno 6mm

VIDRO 5 = Revest. Externo translúcido (Laminado + PVB Branco) (Ref. GLASSEC-VIRACON)

Esp = Espessura

Tvis = Transmitância à radiação solar no espectro visível (incidência normal)

Cond = Condutividade térmica

U = Transmitância térmica

FS = Fator solar

Fonte: Tais dados foram retirados dos catálogos da CEBRACE (2016)¹⁴, CB3E & ABIVIDRO (2015), GUARDIAN (2010) e GLASSEC-VIRACON (2016)¹⁵.

¹³ A Fachada Cortina pode ser de dois tipos: com Pele de vidro ou com *Structural glazing*. A diferença entre eles está no modo como o vidro é fixado na estrutura da fachada. No caso da fachada pele de vidro, o vidro é fixado na estrutura metálica por meio de parafusos e fixadores e a caixilharia fica aparente. Já no caso da fachada com o sistema *Structural glazing*, o vidro é colado na estrutura metálica por meio da utilização de silicone ou fita adesiva estrutural e, neste caso, a estrutura fica “escondida”, dando origem a panos de vidro uniformes. No caso desta pesquisa, é utilizado o sistema *Structural glazing*.

¹⁴ Miyagi, M. H. CEBRACE. Mensagem enviada por maicol.miyagi@cebrace.com.br em 27/04/2016.

¹⁵ SCAPOLAN, H. GLASSEC-VIRACON. Mensagem enviada por hugo.scapolan@glassecviracon.com.br em 25/04/2016.

Para a simulação da Fachada Cortina (caracterização da “pele de vidro”), foi utilizado um objeto do *EnergyPlus* localizado em *Advanced Construction, Surface, Zone Concepts*, denominado *SurfaceControl:MovableInsulation*, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 12. Ele se configura como um elemento móvel (operado por um padrão de funcionamento – *schedule*) que pode ser colocado à frente de superfícies (internas ou externas), caracterizando um elemento de isolamento, que pode ser transparente à radiação solar. Se configurado como elemento transparente, ele pode representar o efeito estufa criado entre as superfícies de vidro e a opaca que está por trás (parede, pilar ou viga). Dessa forma, esse objeto foi configurado com as mesmas propriedades óticas do vidro translúcido presente na “pele” da Fachada Cortina, porém com a condutividade térmica alterada para poder representar a resistência térmica presente na câmara de ar e o fenômeno das trocas de calor que ocorrem nessa câmara de ar. O cálculo da condutividade térmica é apresentado no Apêndice B.

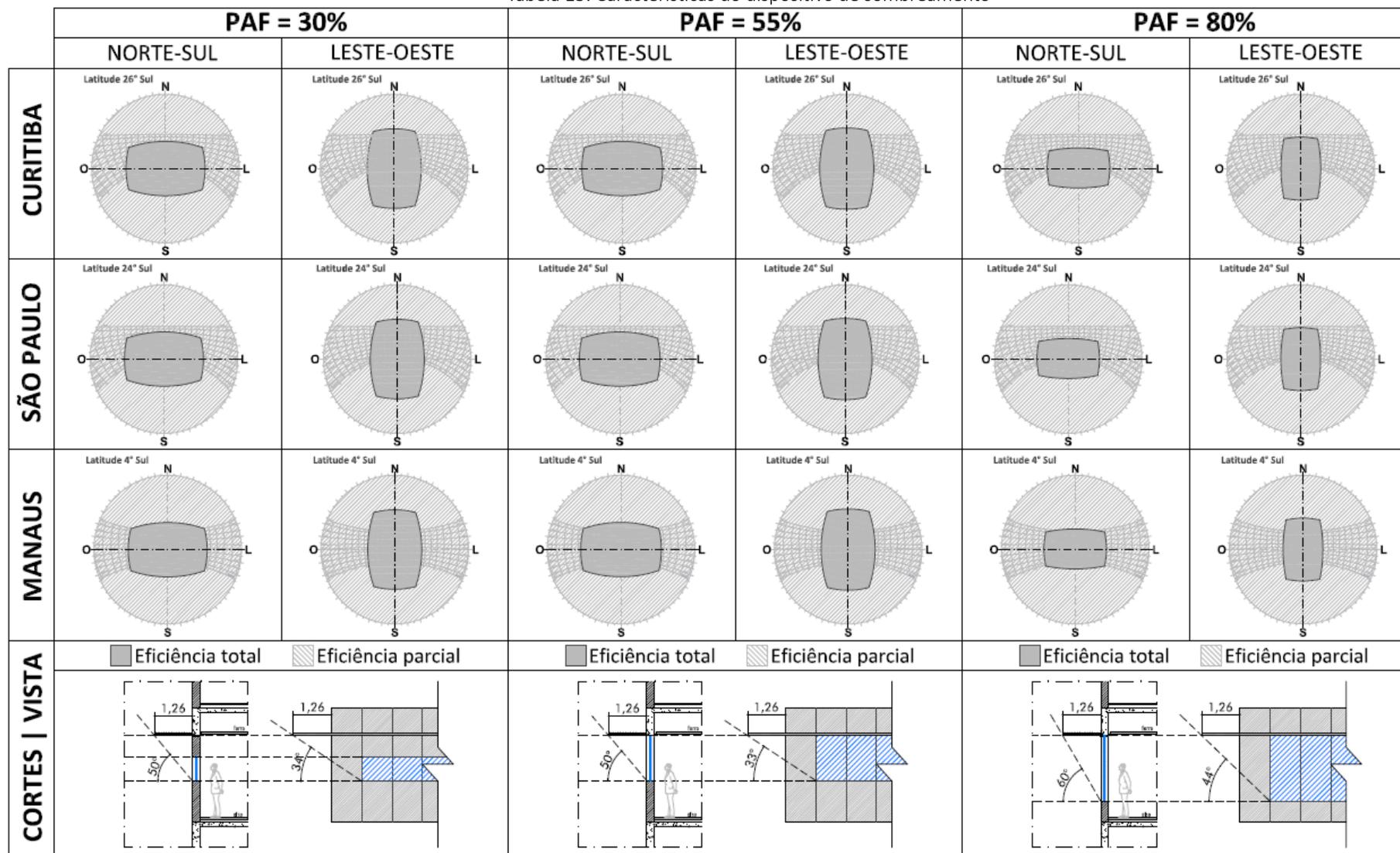
Tabela 12: Configuração do objeto “*Movable insulation*”.

Parâmetros	Variáveis
Tipo de isolamento	Externo
Nome da superfície	Nome da parede
Nome do material	Vidro Translúcido
Nome do <i>schedule</i>	Padrão de funcionamento (tempo todo)

Fonte: *EnergyPlus* (EERE, 2013a).

Finalmente, foi utilizado um dispositivo de sombreamento horizontal (1,26m de largura) que abrangeu igualmente toda a extensão das fachadas, para mantê-las padronizadas esteticamente. Este dispositivo foi modelado no *EnergyPlus* (Módulo *ThermalZones and Surfaces: Shading:Building:Detailed*) e essa dimensão foi selecionada por corresponder à máscara de sombra da maior PAF (80%) (Tabela 13). Esse dispositivo garante que para as demais PAFs também haja o sombreamento efetivo (total) no período indicado.

Tabela 13: Características do dispositivo de sombreamento

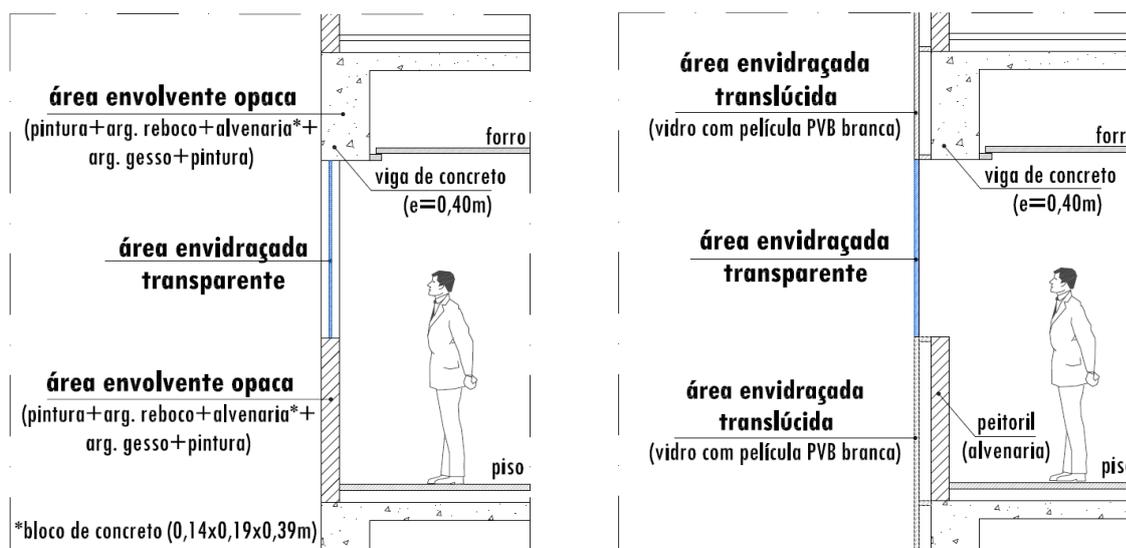


Fonte: A autora (2018).

O piso é elevado com carpete, o forro é de gesso, com um espaço de ar entre a laje e o forro (espaço para instalações), as paredes internas pertencentes ao núcleo central são de *drywall* e as paredes externas são de alvenaria de bloco de concreto (para a Fachada Tradicional, e para a Fachada Cortina essa parte se constitui como o peitoril). A Tabela 14 apresenta os detalhes construtivos referentes às fachadas e aos materiais. As propriedades termofísicas dos materiais opacos são apresentadas no Apêndice A.

Tabela 14: Tipos de fachadas e detalhamento de seu sistema construtivo

CORTE ESQUEMÁTICO DAS FACHADAS TRADICIONAL E CORTINA



COMPONENTES CONSTRUTIVOS	MATERIAIS	ESPESSURA (m)	U (W/m ² .K) ¹	C. T. (KJ/m ² .K) ¹	α ²	
PISO	Laje de concreto	0,15	1,19	330	-	
	Espaço de ar	0,10				
	Carpete	0,05				
TETO	Laje de concreto	0,15	1,05	341	-	
	Espaço de ar	0,75				
	Forro de gesso	0,015				
PAREDES INTERNAS	Placa de gesso acartonado	0,015	1,60	22	-	
	Espaço de ar	0,05				
	Placa de gesso acartonado	0,015				
PAREDES EXTERNAS	Argamassa reboco	0,025	2,88	221	0,30	
	(FT) Bloco de concreto	0,14				
	Argamassa gesso	0,005	1,90	237	0,16	
	Vidro Translúcido	0,008				
	(FC)	Argamassa reboco	0,025	2,88	221	0,30
		Bloco de concreto	0,14			
Argamassa gesso		0,005				

¹ A transmitância térmica (U) e a capacidade térmica (C.T.) foram calculadas com base na norma NBR 15220-2: Desempenho Térmico de Edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações (ABNT, 2005b).

² α = Absortância solar.

A caracterização tanto do carpete de nylon quanto dos espaços de ar foi feita apenas com a resistência térmica, não sendo considerada a espessura do material, configurado no *EnergyPlus* a partir do módulo *SurfaceConstructionElements:Material:NoMass*. Esse detalhamento está de acordo com os estudos de Figueiredo (2007) e Bessa (2010) e cujas características (idênticas) são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15: Caracterização do carpete de nylon.

PROPRIEDADES	CARPETE DE NYLON + ESPAÇO DE AR	
Rugosidade	Rugoso	
Resistência térmica (m ² .K/W)	0,367	
Absortância	Térmica	0,90
	Solar	0,75
	Visível	0,75

Fonte: Figueiredo (2007) e Bessa (2010)

3.2.3.3 Definição das características de uso da edificação

A densidade de carga térmica abrange os ganhos de calor advindos das pessoas, equipamentos e iluminação artificial. O modelo de edificação possui uma área climatizada, referente aos escritórios e uma área não climatizada, pertencente às áreas de serviços, escadas, elevadores, etc. Tais cargas são consideradas apenas para a área dos escritórios, sendo dados fixos da simulação, pois sofrem influência direta do uso da edificação. O padrão horário de ocupação é de segunda à sexta-feira, das 8h às 19h, conforme apresentado na Tabela 16.

Tabela 16: Características das cargas internas.

TIPO	CARACTERÍSTICAS	REFERÊNCIAS
PESSOAS	8m ² /pessoa; 117 W/pessoa	NBR 16401 (ABNT, 2008); ASHRAE Fundamentals (ASHRAE, 2009)
EQUIPAMENTOS*	16,2 W/m ² (média/alta)	NBR 16401-1(ABNT, 2008)
ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL	Tipo: <i>on-off</i> **; 9,7 W/m ²	RTQ-C (INMETRO, 2013)

* A densidade de carga dos equipamentos refere-se à um computador e monitor, além de impressora e fax, para cada posto de trabalho (1 posto de trabalho/pessoa).

** Sistema de iluminação *on-off*, acionado durante o período ocupado sem considerar o aproveitamento da iluminação natural (não é dimerizável, eficiente)

3.2.3.4 Características do sistema de ar condicionado

O sistema de ar condicionado selecionado para o estudo é do tipo VRF (*Variable Refrigerant Flow*), que é um sistema central de expansão direta com múltiplas unidades evaporadoras. Esse sistema foi citado nas entrevistas como um dos mais utilizados em grandes edifícios de escritórios atualmente. Nesse sistema há pelo menos um compressor com capacidade variável, o qual pode distribuir gás refrigerante através de uma rede de tubulações, além de possuir dispositivos capazes de controlar a temperatura individual de cada zona térmica.

O Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas- RTQ-C (INMETRO, 2013), apresenta uma Tabela com níveis de COP (Coeficiente de *Performance*) para condicionadores de ar do tipo VRF, classificando os valores para obtenção do nível A (maior eficiência) de acordo com a capacidade exigida pelo sistema.

A capacidade do ar condicionado (em Watts), é obtida pelo *EnergyPlus* através de uma primeira simulação, na condição de “*autosize*”, calculada por meio das temperaturas de pico e cargas térmicas referentes à cada clima estudado. Nesta primeira simulação, o modo “compacto” do VRF é configurado, através dos seguintes objetos:

- *HVACTemplate:Thermostat*: neste item são inseridas as temperaturas de controle para aquecimento e resfriamento – *setpoint*;
- *HVACTemplate:Zone:VRF*: neste item são criadas evaporadoras para cada zona térmica, tendo como referência:
 - Objeto *HVACTemplate:Thermostat*
 - Padrões (*schedules*) de acionamento do Ar Condicionado e dos Ventiladores;
 - Taxa de ar externo calibrada- 27m³/h por pessoa (0,0075 m³/s por pessoa) (ANVISA, 2003, p.3);
 - Coeficiente de segurança de 15% para resfriamento e 25% para aquecimento (ASHRAE, 2013, p. 267);
 - Demais valores são mantidos no modo padrão do programa.
- *HVACTemplate:System:VRF*: neste item são inseridos dados da condensadora, que são:
 - Padrões (*schedules*) de acionamento do Ar Condicionado;
 - Capacidade do ar condicionado (no caso, simulado no modo “*autosize*”);
 - COP do ar condicionado.
 - Demais valores são mantidos no modo padrão do programa.

Inicialmente, para a simulação do sistema VRF, foi considerado um COP de 3,75 para uma eficiência padrão de mercado. Após a simulação com o modo “*autosize*”, o *EnergyPlus* cria um arquivo expandido (*.expidf*), no qual é dimensionado todo o sistema de ar condicionado. Dentre os arquivos de saída da segunda simulação, há um denominado *Table.csv*, no qual é possível identificar a capacidade do ar condicionado, conforme apresentado na Tabela 17.

Tabela 17: Capacidade do sistema de ar condicionado calculado pelo *EnergyPlus*.

AirConditioner:VariableRefrigerantFlow	AC_VRF VRF HEAT PUMP
Design Size Rated Total Cooling Capacity (gross) (W)	58059,57
CAPACIDADE (kW)	58,06

Fonte: *EnergyPlus* (EERE, 2013a).

Com a capacidade calculada pelo programa, o valor deve ser convertido, para comparação com os contidos no RTQ-C. Dessa forma, de acordo com o que foi calculado, a capacidade do sistema de ar condicionado é de 58 kW. Com este dado foi possível encontrar a eficiência mínima (COP) para um condicionado de ar classificado no nível A (alta eficiência), conforme apresentado na Tabela 18. Assim, o sistema de ar condicionado foi simulado para aquecimento e resfriamento, com temperaturas de controle de 18°C e 24°C, respectivamente, de acordo com os dados coletados na literatura (tabela 8). Para resfriamento, foi testado também um *setpoint* de 25°C, a fim de se verificar e quantificar o efeito de se alterar em apenas 1°C a temperatura de *setpoint* no consumo de energia da edificação.

Tabela 18: Características do Sistema de ar condicionado

CARACTERÍSTICAS	
TIPO DE EQUIPAMENTO	VRF com condensação a ar
CAPACIDADE	≥40 kW e < 70 kW
CLASSIFICAÇÃO	<i>Multi-split</i> VRF
COP (nível A): Curitiba e São Paulo	3,11
COP (nível A): Manaus	2,78
Temperatura de controle (resfriamento)	24°C / 25°C
Temperatura de controle (aquecimento)	18°C

Fonte: RTQ-C (INMETRO, 2013) e ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2013)

3.2.3.5 Parâmetros gerais da simulação

A Tabela 19 apresenta em resumo os parâmetros gerais utilizados na simulação do modelo de edifício selecionado para este estudo. A combinação dos parâmetros acima apresentados gerou 288 cenários (e, conseqüentemente 288 simulações), considerando como parâmetros fixos: geometria, materiais do piso, teto, parede interna, tipo de sistema de ar condicionado, densidade de equipamentos, iluminação e pessoas, além do horário de ocupação. Como parâmetros variáveis têm-se a PAF (30%, 55% e 80%), tipos de fachada (Fachada Tradicional e Fachada Cortina), tipos de vidro (incolor, refletivo, *low-e* e duplo), presença (ou não) de dispositivo de sombreamento e temperatura de controle (*setpoint*) de resfriamento do ar condicionado (24°C e 25°C).

Tabela 19: Parâmetros gerais da simulação.

PARÂMETROS GERAIS DA SIMULAÇÃO		
DIMENSÕES	Pavimento - tipo (m ²)	20 m x 40 m (core de 10 x 30) = 800 m ²
	Pé-direito (m)	2,70m (útil); 3,75 m (total)
	Área condicionada (m ²)	500m ²
	PAF (%)	30%, 55%, 80%
	Pavimento analisado	1 pavimento tipo
MATERIAIS	Piso	PISO ELEVADO COM CARPETE (laje de concreto 15 cm + vão de 10 cm + 5 cm de carpete)
	Teto	LAJE + AR + FORRO (laje de concreto 15 cm + espaço de ar 75 cm + 1,5 cm forro de gesso)
	Parede interna	DRYWALL (gesso 1,5 cm + ar 5 cm + gesso 1,5 cm)
	Parede Externa 1	ALVENARIA (reboco 2,5cm + bloco concreto 20cm + gesso 2,5 cm)
	Parede Externa 2	CORTINA
	Vidro 1	Incolor (6mm)
	Vidro 2	Refletivo (6mm)
	Vidro 3	Laminado Baixo Emissivo - <i>Low-e</i> (8mm)
	Vidro 4	Duplo de Baixo Fator Solar (24mm)
	Vidro 5	Laminado com PVB branco – Translúcido (8mm)
DISPOSITIVO DE SOMBREAMENTO	Proteção solar horizontal	1,26m de largura, abrangendo uniformemente toda a extensão de todas as fachadas
AR CONDICIONADO	Tipo	Condicionador de ar <i>VRF</i> com condensação a ar (sistema central)
	COP	3,11 (Curitiba e São Paulo), 2,49 (Manaus) RTQ-C (INMETRO, 2013); ASHRAE 90.1 (2013)
	<i>Setpoint</i>	24°C / 25°C(resfriamento); 18°C (aquecimento)
	Padrão de uso	Segunda à sexta, das 8h às 19h
ILUM. ARTIFICIAL	Tipo (<i>on-off</i>)	DPI = 9,7 W/m ² - RTQ-C (INMETRO, 2013)
Nº PESSOAS / m²	8m ² /pessoa; (117 W)	
EQUIPAMENTOS	16,2 W/m ² , NBR 16401-1(2008)	
PADRÃO DE OCUPAÇÃO (h)	Segunda à sexta, das 8h às 19h	

Fonte: A autora (2018).

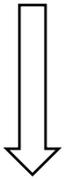
3.3 FORMA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item são apresentados os resultados da análise de desempenho energético dos cenários de estudo, a partir da seguinte estrutura:

- Apresentação dos consumos de energia total (equipamentos, iluminação e ar condicionado) em kWh/m².ano, separados por uso final;
- Classificação dos consumos de energia dos 288 cenários avaliados, em níveis de desempenho energético, por meio da divisão em cinco níveis iguais, de um a cinco estrelas (do pior para o melhor), a partir dos valores máximos e mínimos de consumo, conforme apresentado na Tabela 20. E, a partir de tal classificação, tem-se:
 - Apresentação da influência do tipo de fachada e de cada parâmetro variado (clima, PAF, tipo de vidro, presença ou não do dispositivo de sombreamento e a temperatura de controle do ar condicionado) no consumo de energia;
- Apresentação, por meio de uma Tabela resumo, das características arquitetônicas presentes em cada faixa de desempenho energético.

A Tabela 20 apresenta a classificação de todos os resultados em faixas de consumo energético, definidas de acordo com cada clima avaliado. Foi definida uma escala em função dos valores obtidos, sendo divididos em cinco intervalos iguais, de acordo com os valores máximos e mínimos de cada clima. Essa classificação permite a comparação do desempenho dos cenários entre si, em função da variação dos parâmetros arquitetônicos.

Tabela 20: Classificação dos resultados em faixas de consumo energético.

FAIXAS DE CONSUMO ENERGÉTICO	
>	Valor máximo de consumo energético assumido para cada clima
	☆ $E_c \geq Min+4*(Max-Min)/5$
	☆☆ $Min+3*(Max-Min)/5 \leq E_c < Min+4*(Max-Min)/5$
	☆☆☆ $Min+2*(Max-Min)/5 \leq E_c < Min+3*(Max-Min)/5$
	☆☆☆☆ $Min+1*(Max-Min)/5 \leq E_c < Min+2*(Max-Min)/5$
	☆☆☆☆☆ $E_c < Min+1*(Max-Min)/5$
<	Valor mínimo de consumo energético assumido para cada clima

E_c = Energia consumida

Mín = Valor mínimo de consumo energético obtido

Máx = Valor máximo de consumo energético obtido

Valores de consumo em kWh/m².ano

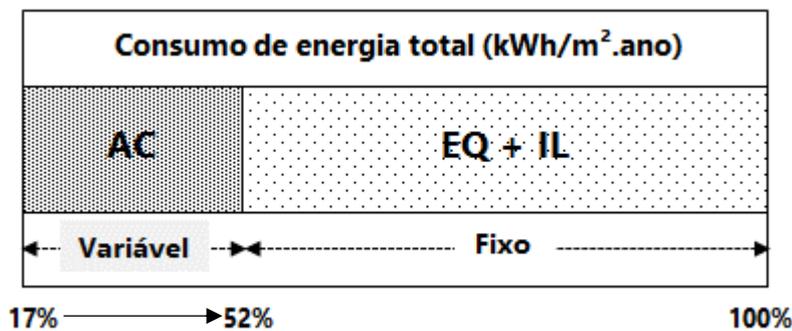
Fonte: A autora (2018).

3.4 RESULTADOS

3.4.1 Consumo de energia por uso final

O consumo de energia total anual é composto pela soma dos consumos de iluminação, equipamentos e ar condicionado. Os parâmetros de projeto (por exemplo, o tipo de fachada, orientação solar, tipo de vidro, entre outros) somado, por exemplo, à uma alta densidade de carga de equipamentos e iluminação, pode elevar a temperatura interior do ambiente e impactar diretamente o consumo do ar condicionado. A Figura 13 apresenta a participação do ar condicionado (AC) e iluminação (IL) e equipamentos (EQ) no consumo de energia total, considerando todos os 288 cenários simulados. Os IL e EQ são considerados dados fixos neste estudo, já que são parâmetros influenciados diretamente pelo uso da edificação, conforme descrito em método.

Figura 13: Consumo de energia total anual por uso final.



Fonte: A autora (2018).

Devido ao clima das localizações estudadas e a ocupação do edifício ser somente durante o dia (de segunda à sexta-feira, das 8h às 19h), não houve consumo significativo para aquecimento em nenhum dos cenários avaliados. Logo, o ar condicionado foi acionado apenas no modo de refrigeração.

A Figura 13 mostra que o único parâmetro que causa variação no consumo de energia total é o ar condicionado (AC), pois a densidade de carga de equipamentos e iluminação são dados fixos da simulação. Dentre essas cargas fixas, a maior participação vem dos equipamentos, que possui quase o dobro do valor ($16,2\text{W}/\text{m}^2$) da densidade de iluminação artificial ($9,7\text{W}/\text{m}^2$). Portanto, tendo em consideração que toda a variação apresentada no consumo total se deve à variação do uso do ar condicionado, será apenas apresentado este consumo nos resultados.

3.4.2 Classificação em faixas de consumo energético

A Tabela 21 apresenta o consumo de energia anual do ar condicionado para todas as combinações de parâmetros simulados, agrupados por faixas de consumo energético. A partir dessa

classificação, são apresentadas as influências dos parâmetros no consumo de energia do ar condicionado.

Tabela 21: Classificação dos resultados em faixas de consumo energético.

Tipo de Vidro (Dispositivo de sombreamento)		CONSUMO DE ENERGIA DO AR CONDICIONADO (kWh/m ² .ano)									
		CURITIBA			SÃO PAULO			MANAUS			
		30%	55%	80%	30%	55%	80%	30%	55%	80%	
FACHADA TRADICIONAL	Setpoint AC= 24°C	In (SDS)	16.5	22.5	32.5	19.7	26.7	38.3	56.9	63.0	76.1
		In (CDS)	14.3	15.6	22.6	16.2	18.6	27.7	54.0	60.3	71.8
		Lw (SDS)	15.1	19.1	27.0	18.5	22.8	32.2	52.6	60.8	71.8
		Lw (CDS)	13.4	14.6	19.9	16.2	17.2	24.0	50.0	55.8	69.8
		Rf (SDS)	14.4	17.7	24.5	18.0	21.1	29.3	50.2	59.7	70.2
		Rf (CDS)	12.9	14.0	18.7	16.4	16.9	22.2	47.6	53.4	68.8
		Dp (SDS)	15.8	19.9	28.2	18.5	23.0	33.1	47.7	58.1	68.8
	Dp (CDS)	14.3	15.7	20.1	16.3	17.1	24.1	44.8	51.2	65.8	
	Setpoint AC= 25°C	In (SDS)	13.8	19.2	28.3	17.3	22.9	33.4	51.0	58.6	71.1
		In (CDS)	11.6	13.0	19.4	14.9	15.7	23.4	47.7	55.4	66.8
		Lw (SDS)	12.3	16.2	23.2	16.1	19.7	27.7	46.3	56.2	66.9
		Lw (CDS)	10.6	11.8	16.9	14.8	15.3	19.9	43.5	51.3	64.6
		Rf (SDS)	11.6	15.0	20.9	15.9	18.5	25.0	43.8	54.8	65.2
		Rf (CDS)	10.1	11.2	15.7	14.9	15.2	18.4	41.3	48.4	63.3
Dp (SDS)		13.2	17.4	25.1	16.5	19.9	29.1	41.9	53.0	64.7	
Dp (CDS)	11.4	13.3	18.2	15.2	15.4	20.7	39.2	45.3	61.3		
FACHADA CORTINA	Setpoint AC= 24°C	In (SDS)	22.4	26.9	36.5	27.2	32.3	42.6	67.3	70.7	81.8
		In (CDS)	17.8	18.8	25.3	21.6	23.2	31.4	61.5	66.5	76.7
		Lw (SDS)	20.8	23.6	30.4	25.3	28.6	36.4	63.3	68.5	77.6
		Lw (CDS)	17.2	17.8	22.2	20.5	21.6	27.7	57.4	61.9	74.7
		Rf (SDS)	20.1	22.2	27.9	24.5	26.8	33.5	61.1	67.3	75.9
		Rf (CDS)	17.0	17.5	21.1	20.1	20.9	26.0	55.3	59.4	73.6
		Dp (SDS)	21.5	24.6	33.0	25.9	29.5	38.3	60.0	66.6	75.8
	Dp (CDS)	17.5	18.0	23.4	20.6	22.0	28.6	54.1	57.7	71.6	
	Setpoint AC= 25°C	In (SDS)	19.5	23.7	31.8	23.5	28.4	37.6	62.2	66.4	76.9
		In (CDS)	15.6	16.3	21.8	18.2	19.5	27.0	56.7	61.4	71.8
		Lw (SDS)	18.1	20.6	26.6	21.8	24.8	31.8	58.6	63.9	72.7
		Lw (CDS)	15.1	15.5	19.3	17.3	18.0	23.5	53.2	57.3	69.6
		Rf (SDS)	17.4	19.2	24.3	21.0	23.1	29.1	56.7	62.4	71.0
		Rf (CDS)	14.8	15.1	18.2	17.0	17.5	21.9	51.1	55.1	68.2
Dp (SDS)		19.1	21.9	29.2	22.7	26.1	34.2	55.5	62.4	71.7	
Dp (CDS)	16.0	16.6	19.9	17.8	18.9	24.8	49.3	53.9	67.1		

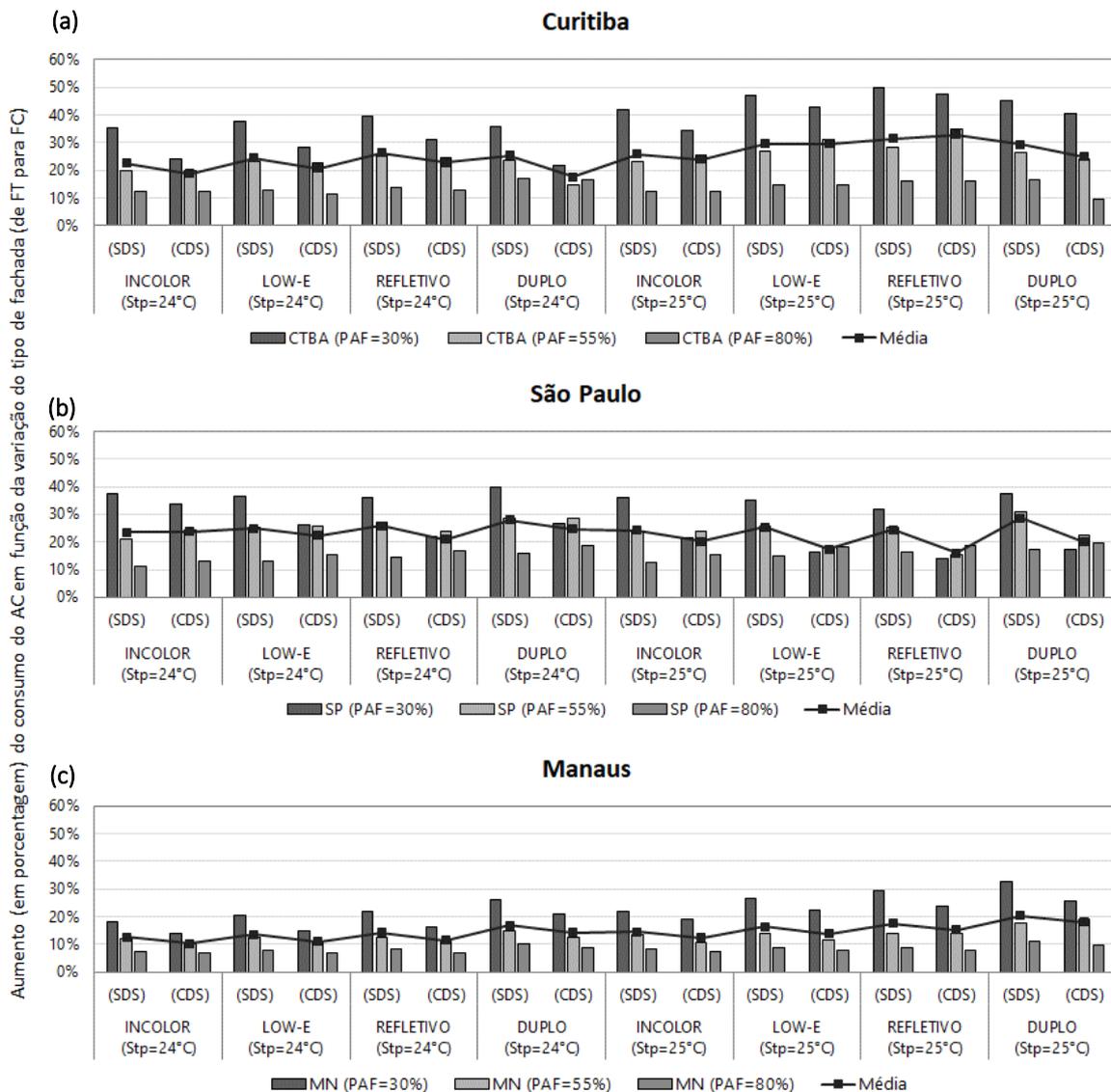
Fonte: A autora (2018).

3.4.2.1 Influência do envelope construtivo

Para verificar a influência do envelope construtivo no consumo de energia do modelo de edifício analisado, foram feitas simulações para os dois tipos de fachada (Fachada Tradicional e Cortina). Assim, na Tabela 21 é possível notar a diferença entre os tipos de fachadas pelas faixas de cores. A Fachada Tradicional (FT) possui boa parte dos cenários na faixa verde escuro ou verde claro (cinco e quatro estrelas), o que demonstra o seu menor consumo energético em relação à Fachada Cortina (FC), que possui cenários em todas as classificações de cores.

O aumento (em porcentagem) entre os consumos do ar condicionado quando se altera de uma Fachada Tradicional para uma Fachada Cortina, é apresentado na Figura 14. Esse aumento é, em média, 25% para as cidades de Curitiba e São Paulo e 15% para Manaus.

Figura 14: Aumento do consumo de energia do ar condicionado em função da alteração do tipo de fachada (de FT para FC) para (a) Curitiba, (b) São Paulo e (c) Manaus.



Fonte: A autora (2018)

Destaca-se, nesse aumento, a diferença entre as PAFs. Alterar de uma Fachada Tradicional para uma Fachada Cortina aumenta o consumo do ar condicionado, sobretudo nas menores aberturas (PAF de 30%), alcançado aumentos na ordem de 50% em Curitiba, 40% em São Paulo e 30% em Manaus. Nesses cenários, a parte opaca da fachada é maior e isso influencia diretamente as trocas de calor da edificação com o ambiente exterior. O mesmo não ocorre nas maiores aberturas, pois estas têm grande parte da fachada revestida por vidro, que possui uma resistência menor à transmissão do calor, facilitando assim, as trocas de calor com o ambiente exterior.

Alterar a parte opaca¹⁶ de uma Fachada Tradicional para uma Fachada Cortina causa um aumento no isolamento (Transmitância térmica), devido as camadas de ar e vidro, que aumentam a resistência da fachada à transmissão do calor por condução. A Fachada Tradicional apresenta um valor de transmitância térmica ($U=2,88 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) muito maior que a Fachada Cortina ($U=1,90 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$). Nesse sentido, na Fachada Cortina, além da dificuldade de se perder o calor armazenado no interior, ainda ocorre o chamado efeito estufa, em que parte da radiação solar incidente no vidro transforma-se em calor e esse calor não consegue se dissipar e sair da edificação.

Assim, é possível verificar nestes cenários, como o isolamento térmico pode influenciar nos ganhos de calor da edificação e, conseqüentemente, no seu consumo energético. Dependendo das condições climáticas e do tipo de edificação, aumentar o isolamento da fachada não significa reduzir o consumo com climatização. O efeito causado pelo aumento do isolamento da fachada em climas brasileiros foi observado por diversos estudos (MELO et al., 2015; NEVES; MARQUES, 2017; WESTPHAL; ANDREIS, 2016). Esse mesmo efeito foi observado por Chvatal e Corvacho (2009), que estudaram edificações em Portugal e afirmam que, em edifícios de escritórios com uma alta densidade de carga interna, não é recomendado que se utilize muito isolamento, o que restringe a perda do calor no interior da edificação. Assim, aumentar o isolamento pode restringir a perda do calor armazenado no interior, causando uma conseqüente elevação do consumo do sistema de ar condicionado para arrefecimento.

Além disso, Chvatal e Corvacho (2009) afirmam a importância de se utilizar um dispositivo de sombreamento, para controlar os ganhos de calor por radiação solar. Assim, quando se tem um dispositivo de sombreamento, ele evita que a radiação solar incida diretamente no vidro, fazendo com que a edificação ganhe menos calor. E isso pode ser verificado ainda na Figura 13, pois os cenários com dispositivo de sombreamento (CDS) possuem um consumo reduzido em relação aos demais cenários (SDS).

¹⁶ Parte opaca da fachada refere-se àquela composta por alvenaria e revestimento (que no caso da FT, é a argamassa reboco e, no caso da FC é argamassa reboco + espaço de ar + vidro opaco), diferenciando-se, portanto da parte envidraçada, que é composta apenas pelas esquadrias de vidro pertencentes ao vão-luz.

3.4.2.2 Influência do clima

De acordo com o apresentado em método, foram selecionados três climas brasileiros que abrangessem características presentes em todo o território brasileiro. Os consumos (máximos e mínimos) do ar condicionado, para cada clima, são apresentados na Tabela 22. Foi possível notar na Tabela 21 (classificação energética) que os climas de Curitiba e São Paulo apresentaram resultados semelhantes quanto à classificação por faixas de cores, diferenciando-se neste aspecto o clima de Manaus, para ambos os tipos de fachadas.

Tabela 22: Diferença entre os consumos de energia do ar condicionado para cada clima.

Clima	CONSUMO DO AR CONDICIONADO (kWh/m ² . ano)		Varição (%)
		Fachada Tradicional	Fachada Cortina
CURITIBA	Mínimo	10,1	14,8
	Máximo	32,5	36,5
SÃO PAULO	Mínimo	14,8	17,0
	Máximo	38,3	42,6
MANAUS	Mínimo	39,2	49,3
	Máximo	76,1	81,8

Fonte: A autora (2018)

A Tabela 22 evidencia o que pode ser visto na tabela 21: quanto mais quente o clima, maiores são os consumos de energia e menores são as diferenças entre os valores máximos e mínimos. Curitiba e São Paulo apresentam valores de consumo (máximos e mínimos), para ambos os tipos de fachada, próximos, assim como a classificação por cores. Estes dois climas apresentaram uma diferença entre o maior e menor valor de consumo de energia em Curitiba entre 69,0% (FT) e 59,3% (FC), em São Paulo entre 61,2% (FT) e 60,2% (FC), diferenciando-se neste aspecto o clima de Manaus, que apresentou uma diferença entre 48,5% (FT) e 39,7% (FC).

3.4.2.3 Influência dos parâmetros relacionados à janela

Foram considerados parâmetros relacionados à janela: PAF (30, 55 e 80%), Tipo de vidro (Incolor, *Low-e*, Refletivo e Duplo) e a presença (CDS) ou não (SDS) de dispositivo de sombreamento. Dentre eles, o PAF é o que apresentou o maior impacto, ocasionando um aumento no consumo de energia em todos os cenários, de acordo com o aumento do PAF (Tabela 21). Esse aumento, inclusive, causa uma mudança na classificação de desempenho energético da edificação. E essa variação pode ser bastante significativa, como pode ser visto na Tabela 23, quando se altera o PAF de 30% para 80%. Esses resultados referem-se aos cenários sem dispositivo de sombreamento e com *setpoint* de 24°C. Os demais cenários (CDS, *setpoint* de 25°C) apresentaram resultados semelhantes.

Tabela 23: Variação do Consumo de energia do ar condicionado em função da PAF.

	Clima	Tipo de Vidro (Disp. Sombreamento)	VARIÇÃO DO CONSUMO DO AC EM FUNÇÃO DA PAF		
			30% - 55%	55% - 80%	30% - 80%
FACHADA TRADICIONAL	CURITIBA	In (SDS)	35,8%	44,6%	96,3%
		Lw (SDS)	26,4%	41,0%	78,1%
		Rf (SDS)	22,3%	38,9%	69,8%
		Dp (SDS)	26,0%	41,8%	78,6%
	SÃO PAULO	In (SDS)	35,1%	43,4%	93,8%
		Lw (SDS)	23,3%	40,8%	73,5%
		Rf (SDS)	16,9%	38,9%	62,4%
		Dp (SDS)	23,8%	44,1%	78,4%
	MANAUS	In (SDS)	10,8%	20,7%	33,7%
		Lw (SDS)	15,6%	18,1%	36,5%
		Rf (SDS)	18,9%	17,6%	39,8%
		Dp (SDS)	21,8%	18,6%	44,4%
FACHADA CORTINA	CURITIBA	In (SDS)	20,2%	35,6%	63,0%
		Lw (SDS)	13,3%	28,9%	46,0%
		Rf (SDS)	10,1%	26,1%	38,8%
		Dp (SDS)	14,5%	34,3%	53,8%
	SÃO PAULO	In (SDS)	19,0%	31,8%	56,8%
		Lw (SDS)	12,8%	27,5%	43,9%
		Rf (SDS)	9,6%	24,9%	36,8%
		Dp (SDS)	13,9%	29,5%	47,6%
	MANAUS	In (SDS)	21,6%	15,7%	21,6%
		Lw (SDS)	22,5%	13,3%	22,5%
		Rf (SDS)	24,1%	12,8%	24,1%
		Dp (SDS)	26,2%	13,7%	26,2%

*Em negrito encontram-se os maiores valores.

Fonte: A autora (2018).

Na Fachada Tradicional, ao se alterar a PAF de 30% para 55%, o consumo do ar condicionado varia em média 23%, enquanto que se alterar a PAF de 55% para 80%, esse valor médio aumenta para 34%. As maiores variações de consumo ocorrem quando se altera uma janela de pequena para grande (PAF de 30% para 80%), numa média de 65%. Na Fachada Cortina, essas variações médias são de 12% (PAF de 30% para 55%), 24% (PAF de 55% para 80%) e 40% (PAF de 30% para 80%). Isto significa que o aumento do consumo com ar condicionado não segue o aumento proporcional da PAF, fato também observado nos estudos de Westphal e Andreis (2016).

Outro parâmetro que causa impacto no consumo energético é o tipo de vidro. Isso pode ser visto na Tabela 24, que apresenta a variação do consumo de energia do ar condicionado em relação à alteração do tipo de vidro. Foi considerado como referência o vidro incolor, pois é o que apresenta o maior consumo para todos os cenários. São apresentados os cenários da Fachada Cortina, com *setpoint*

de 24°C e sem dispositivo de sombreamento (SDS). Os demais cenários (FT, CDS, *setpoint* de 25°C) apresentaram resultados semelhantes.

Tabela 24: Variação do consumo do ar condicionado em função do tipo de vidro (referência: vidro incolor 6mm)

VARIAÇÃO DO CONSUMO DO AC EM FUNÇÃO DO TIPO DE VIDRO									
Tipo de vidro (Dispositivo de Sombreamento)	CURITIBA			SÃO PAULO			MANAUS		
	30%	55%	80%	30%	55%	80%	30%	55%	80%
Lw (SDS) ^a	-7,0%	-12,3%	-16,7%	-6,9%	-11,7%	-14,6%	-5,9%	-3,2%	-5,2%
Rf (SDS) ^b	-10,1%	-17,6%	-23,4%	-9,9%	-17,0%	-21,4%	-9,1%	-4,9%	-7,2%
Dp (SDS) ^c	-4,1%	-8,6%	-9,4%	-4,6%	-8,6%	-10,2%	-10,8%	-5,8%	-7,3%

^a Lw: Vidro *Low-e* (8mm)

^b Rf: Vidro Refletivo (6mm)

^c Dp: Vidro Duplo (12 mm)

*Em negrito encontram-se os maiores valores.

Fonte: A autora (2018).

Os climas de Curitiba e São Paulo possuem resultados semelhantes quanto à variação do tipo de vidro, sendo que as maiores reduções no consumo de energia aparecem nas PAF maiores (80%). Isso significa que, para Curitiba e São Paulo, quando se tem aberturas grandes, alterar o tipo de vidro de incolor para refletivo pode gerar uma economia de até 23,4% (Curitiba) ou 21,4% (São Paulo). Já em Manaus, alterar o tipo de vidro de incolor para duplo tem um impacto maior nas janelas menores (30%), com uma economia máxima de 10,8%. Isto deve-se ao fato de que em Manaus, como a temperatura é muito elevada, quanto maior a PAF, maiores serão os ganhos de calor pelas aberturas, por isso a alteração no tipo de vidro tem seu impacto reduzido no consumo de energia em janelas maiores.

Um outro parâmetro relacionado à janela é o uso de dispositivos de sombreamento. Estudos apontam que o uso desse elemento pode gerar economia de energia em edifícios de planta livre no Brasil (CARVALHO; LA ROVERE; GONÇALVES, 2010; NEVES; MARQUES, 2017; PASQUALI et al., 2011). Assim, a Tabela 25 apresenta a comparação dos cenários sem (SDS) e com dispositivo de sombreamento (CDS) para os cenários FC em todos os climas, PAFs e *setpoint* de 24°C. Os demais cenários (FT, *setpoint* de 25°C) apresentaram resultados semelhantes.

Tabela 25: Variação do consumo do ar condicionado nos cenários com dispositivo de sombreamento (CDS) (referência: cenários sem dispositivo de sombreamento (SDS))

Clima	Tipo de vidro (Dispositivo de Sombreamento)	VARIACÃO DO CONSUMO DO AC EM FUNÇÃO DO DISPOSITIVO DE SOMBREAMENTO (CDS)		
		PAF=30%	PAF=55%	PAF=80%
CURITIBA	In (CDS)	-20,4%	-30,3%	-30,6%
	Lw (CDS)	-17,4%	-24,4%	-27,0%
	Rf (CDS)	-15,6%	-21,2%	-24,5%
	Dp (CDS)	-18,6%	-26,9%	-29,1%
FACHADA CORTINA SÃO PAULO	In (CDS)	-20,4%	-28,3%	-26,3%
	Lw (CDS)	-19,1%	-24,4%	-24,0%
	Rf (CDS)	-18,0%	-22,0%	-22,5%
	Dp (CDS)	-20,5%	-25,4%	-25,3%
MANAUS	In (CDS)	-8,7%	-5,9%	-6,2%
	Lw (CDS)	-9,3%	-9,6%	-3,7%
	Rf (CDS)	-9,5%	-11,7%	-3,0%
	Dp (CDS)	-9,8%	-13,5%	-5,5%

* Em negrito encontram-se os maiores valores.

Fonte: A autora (2018).

A Tabela 25 mostra que utilizar um dispositivo de sombreamento sempre gera economia de energia, independente do clima, PAF e tipo de vidro. Em Curitiba e São Paulo, a combinação de vidro incolor, aberturas grandes (80%) e utilização do dispositivo de sombreamento gera economias de 30,6% e 26,3%, respectivamente. O clima de Manaus apresenta resultados diferentes, tendo uma economia máxima de 13,5% para janelas médias com vidro duplo. Em climas com altas temperaturas ao longo do ano, o efeito da presença do dispositivo de sombreamento é menor. Isso também foi verificado no estudo de Carvalho, La Rovere e Gonçalves (2010), que alcançaram 6,35% no consumo de energia do ar condicionado utilizando-se dispositivo de sombreamento em todas as fachadas de uma edificação com Fachada Cortina no Rio de Janeiro.

3.4.2.4 Influência da temperatura de controle (*setpoint*) do ar condicionado

A temperatura de controle (*setpoint*) do ar condicionado pode ser considerada um elemento possível de ser alterado em uma edificação em uso e, assim, auxiliar na economia de energia. Isso pode ser visto na Tabela 21, principalmente nos cenários com Fachada Cortina, em que o aumento da temperatura de *setpoint* em 1°C mudou a configuração de cores da classificação de desempenho energético. Para Curitiba, São Paulo e Manaus, os consumos de energia passam a ocupar as classificações mais altas. Isto significa que, alterar o *setpoint* de 24°C para 25°C fez os cenários melhorarem seu desempenho, reduzindo o consumo de energia do ar condicionado. E esta redução também pode ser vista na Tabela 26, que apresenta o consumo do ar condicionado para todos os

cenários a Fachada Cortina, com *setpoint* de 25°C relação aos cenários com *setpoint* de 24°C. Os demais cenários (FT) apresentaram resultados semelhantes.

Tabela 26: Variação do consumo do ar condicionado em função da alteração na temperatura de controle (*setpoint*) de 24°C para 25°C.

VARIACÃO DO CONSUMO DO AR CONDICIONADO PELA ALTERAÇÃO NO SETPOINT										
		CURITIBA			SÃO PAULO			MANAUS		
Tipo de vidro (Dispositivo de Sombreamento)		PAF								
		30%	55%	80%	30%	55%	80%	30%	55%	80%
FACHADA CORTINA	In (SDS)	-12,7%	-12,0%	-12,8%	-13,6%	-12,3%	-11,7%	-7,5%	-6,0%	-6,0%
	In (CDS)	-12,2%	-12,9%	-14,0%	-16,1%	-15,9%	-14,1%	-7,7%	-7,7%	-6,5%
	Lw (SDS)	-13,1%	-12,8%	-12,4%	-13,9%	-13,2%	-12,6%	-7,5%	-6,6%	-6,2%
	Lw (CDS)	-12,2%	-13,2%	-12,7%	-15,7%	-16,4%	-15,1%	-7,3%	-7,4%	-6,9%
	Rf (SDS)	-13,6%	-13,3%	-13,0%	-14,1%	-13,8%	-13,1%	-7,3%	-7,2%	-6,4%
	Rf (CDS)	-12,7%	-13,6%	-13,6%	-15,6%	-16,3%	-15,8%	-7,6%	-7,3%	-7,4%
	Dp (SDS)	-11,0%	-10,8%	-11,7%	-12,5%	-11,8%	-10,6%	-7,5%	-6,4%	-5,3%
	Dp (CDS)	-8,3%	-7,8%	-14,9%	-13,4%	-14,1%	-13,1%	-9,0%	-6,6%	-6,3%

* Em negrito encontram-se os maiores valores.

Fonte: A autora (2018).

Nota-se na Tabela 26 que alterar o *setpoint* em 1°C pode reduzir até cerca de 16% do consumo do ar condicionado. Essa alteração causa maiores economias em Curitiba (8-15%) e São Paulo (12-16%) do que em Manaus (5-9%). Friess, Rakhshan e Davis (2017) afirmam que a utilização de um *setpoint* mais alto (27°C) em locais de climas quentes só é possível quando se tem uma edificação com menos isolamento, que permite as trocas de calor com o ambiente exterior.

3.4.3 Características arquitetônicas das faixas de consumo energético

Nas Tabelas 27 e 28 são apresentadas as características arquitetônicas referentes à cada faixa de desempenho energético, correspondentes à Tabela 21, para os três climas estudados. A partir dessa classificação, é possível notar, por exemplo, quais combinações de parâmetros resultam em uma edificação na faixa de cinco estrelas, que representa o menor consumo energético e quais resultam na faixa de uma estrela, que corresponde aos maiores consumos.

A maior parte dos cenários da Fachada Tradicional possui classificação alta (cinco e quatro estrelas). Nessa classificação destacam-se, em Curitiba e São Paulo, os cenários com janelas pequenas e médias (PAFs de 30% e 55%), com qualquer tipo de vidro (exceto o incolor, no PAF de 55%), com e sem dispositivo de sombreamento, em qualquer *setpoint*. Em Manaus, aparecem nessas faixas todos os cenários que tenham janelas pequenas (exceto o que possui vidro incolor, no *setpoint* de 24°C), os de janelas médias com qualquer tipo de vidro (exceto o incolor), desde que tenha dispositivo de sombreamento (no *setpoint* de 24°C), e todos os cenários com *setpoint* de 25°C (exceto o com vidro

incolor). Nos cenários com três e duas estrelas, para Curitiba e São Paulo, destacam-se aqueles com janela média (PAF de 55%) e vidro incolor e janela grande (PAF de 80%) com qualquer tipo de vidro (exceto o incolor) e sem dispositivo de sombreamento. Para Manaus, nessa classificação, aparecem os cenários com *setpoint* de 24°C, janela pequena (PAF de 30%) com vidro incolor e janela média (PAF de 55%) com qualquer tipo de vidro. Se alterar para o *setpoint* de 25°C, é possível apenas utilizar o vidro incolor sem dispositivo de sombreamento. Outros cenários nessa classificação são os que possuem janelas grandes, com qualquer tipo de vidro (exceto o incolor, no *setpoint* de 24°C). Por fim, em qualquer clima, um edifício que tenha janela grande (PAF de 80%) com vidro incolor, não possua dispositivo de sombreamento e tenha *setpoint* de 24°C, tem classificação de uma estrela.

Assim, são apresentados na Tabela 27 a classificação dos cenários com Fachada Tradicional.

A Fachada Cortina apresenta uma maior distribuição dos cenários em todas as faixas de consumo energético, que são apresentados na Tabela 28. Assim, em alguns deles, dependendo do tipo de vidro, para se ter um edifício de classificação alta (cinco estrelas) em Curitiba e São Paulo, é necessário se ter aberturas pequenas (PAF de 30%) ou médias (PAF de 55%), com dispositivo de sombreamento. Em Curitiba, usar uma abertura pequena implica em utilizar os vidros *low-e* ou refletivo, desde que o *setpoint* seja de 25°C e, se usar uma abertura média, utilizar apenas o vidro refletivo. Em São Paulo, mantendo o *setpoint* em 25°C, é possível utilizar, tanto para aberturas pequenas quanto médias, todos os tipos de vidros (se alterar o *setpoint* para 24°C, apenas pode-se utilizar o vidro refletivo).

Um edifício de quatro estrelas possui janelas pequenas e médias em todos os climas, exceto para Curitiba e São Paulo, em que é possível se ter janelas grandes (PAF de 80%), desde que se tenha um dispositivo de sombreamento e se mantenha o *setpoint* em 25°C, para todos os tipos de vidros, (exceto o incolor). Em Curitiba, é possível se utilizar todos os vidros quando se tem janelas pequenas e dispositivo de sombreamento com o *setpoint* em 24°C, ou quando não se tem o dispositivo de sombreamento e o *setpoint* é de 25°C. Para as janelas de tamanho médio, todos os vidros podem ser utilizados desde que se tenha dispositivo de sombreamento e *setpoint* de 24°C (se alterar para 25°C, somente não será possível se utilizar o vidro refletivo). Em São Paulo, o uso combinado de janelas pequenas e dispositivo de sombreamento permite utilizar todos os tipos de vidro (exceto o refletivo-que pode ser utilizado nessas condições se o *setpoint* for 25°C). As janelas médias com dispositivo de sombreamento possibilitam a utilização de todos os tipos de vidros, no *setpoint* de 24°C e, não ter um dispositivo de sombreamento, permite a utilização dos vidros *low-e* e refletivo, no *setpoint* de 25°C. Em Manaus, utilizar janelas pequenas com dispositivo de sombreamento permite a utilização dos vidros refletivo e duplo, se o *setpoint* for 24°C e, se alterar o *setpoint* para 25°C, é possível utilizar qualquer tipo de vidro (exceto o incolor). Manter o mesmo *setpoint* permite se optar por janelas médias, desde que se utilizem os vidros refletivo ou duplo e se tenha um dispositivo de sombreamento.

Para se ter uma classificação média (três estrelas) em Curitiba e São Paulo, pode-se ter janelas de todos os tamanhos. Em Curitiba, utilizar janelas pequenas e sem dispositivo de sombreamento implica poder usar qualquer tipo de vidro (exceto o refletivo), se o *setpoint* for de 24°C. Em São Paulo, as mesmas condições permitem apenas utilizar vidro incolor. Nas mesmas cidades, a utilização de janelas médias, sem um dispositivo de sombreamento permite a utilização de qualquer tipo de vidro (exceto o incolor), se o *setpoint* for de 24°C. A utilização de janelas grandes implica no uso combinado com dispositivo de sombreamento, e possibilita a utilização de qualquer tipo de vidro (exceto o vidro refletivo em São Paulo), se o *setpoint* for de 24°C e, se alterar o *setpoint* para 25°C, pode-se usar apenas o vidro incolor (ou vidro refletivo sem dispositivo de sombreamento). Em Manaus, é possível se ter apenas janelas pequenas e médias. Se não tiver um dispositivo de sombreamento, é possível se utilizar janela

pequena com qualquer vidro (exceto o incolor) se o *setpoint* for 24°C e todos os vidros (exceto o duplo), se o *setpoint* for de 25°C. Ainda nessas condições, é possível se utilizar janela média para todos os tipos de vidros (exceto o incolor), se o *setpoint* for 25°C. Se tiver um dispositivo de sombreamento, é possível se utilizar janela pequena, com vidro incolor ou *low-e*, se o *setpoint* for 24°C, ou somente o incolor, se o *setpoint* for 25°C. É possível também se utilizar janela média, com dispositivo de sombreamento para qualquer vidro (exceto o incolor), se o *setpoint* for de 24°C e para os vidros incolor ou *low-e*, se o *setpoint* for 25°C. Se mantiver este *setpoint* e retirar o dispositivo de sombreamento, possibilita a utilização de todos os vidros, exceto o incolor.

Um edifício que tenha preferencialmente aberturas grandes e nenhum dispositivo de sombreamento, pode apresentar uma baixa classificação, de duas ou até uma estrela. Nesse contexto, para Curitiba e São Paulo, um edifício de duas estrelas pode ter os vidros *low-e* ou refletivo, desde que o *setpoint* seja de 24°C e, *low-e* e duplo, se o *setpoint* for 25°C. Nesses climas, utilizar o vidro incolor ou duplo, com *setpoint* de 24°C, corresponde a um edifício com a classificação mais baixa, de uma estrela e, se alterar o *setpoint* para 25°C, apenas o vidro incolor pode ser utilizado. Para Manaus, um edifício de duas estrelas que não tenha dispositivo de sombreamento, pode ter janelas pequenas, com vidro incolor e *setpoint* de 24°C ou, para o mesmo *setpoint*, janelas médias para todos os tipos de vidros. Alterar o *setpoint* para 25°C implica em poder usar apenas vidro incolor. Se tiver um dispositivo de sombreamento nas janelas médias, pode se utilizar apenas do vidro incolor, no *setpoint* de 24°C. O uso combinado de dispositivo de sombreamento e janelas grandes implica em poder utilizar os vidros duplo, se o *setpoint* for 24°C, e todos os vidros, se o *setpoint* for 25°C. Não ter um dispositivo de sombreamento implica em poder usar todos os vidros (exceto o incolor), se o *setpoint* for 25°C. Por fim, um edifício de uma estrela em Manaus, se não tiver um dispositivo de sombreamento, pode se utilizar de todos os tipos de vidros, desde que o *setpoint* seja 24°C e, se alterar o *setpoint* para 25°C, é possível apenas usar o vidro incolor. Caso acrescente um dispositivo de sombreamento e mantenha o *setpoint* em 24°C, pode ser utilizado todos os tipos de vidro, exceto o duplo.

Tabela 28: Características arquitetônicas das faixas de consumo de energético.

FACHADA CORTINA	PAF			Dispositivo de Sombreamento		Tipo de Vidro				Setpoint AC		
	30%	55%	80%	SDS	CDS	Incolor	Low-e	Refletivo	Duplo	24°C	25°C	
☆☆☆☆☆	CURITIBA	•				•		•			•	
			•			•		•			•	
	SÃO PAULO	•				•		•			•	
		•				•	•	•	•	•		•
☆☆☆☆	CURITIBA	•				•	•	•	•	•		
		•			•		•	•	•	•		
		•			•		•	•	•	•	•	
		•				•	•	•	•	•	•	
			•			•	•	•	•	•	•	•
			•			•	•	•	•	•	•	•
	SÃO PAULO	•				•	•	•	•	•	•	
		•			•		•	•	•	•	•	
			•			•	•	•	•	•	•	
			•			•	•	•	•	•	•	
	MANAUS			•		•		•	•	•	•	
		•				•		•	•	•	•	
		•				•		•	•	•	•	
		•				•		•	•	•	•	
				•		•		•	•	•	•	
				•		•		•	•	•	•	
☆☆☆☆	CURITIBA	•			•		•	•	•	•		
			•		•		•	•	•	•		
			•		•		•	•	•	•		
			•		•		•	•	•	•		
	SÃO PAULO	•			•		•	•	•	•	•	
			•		•		•	•	•	•	•	
			•		•		•	•	•	•	•	
			•		•		•	•	•	•	•	
	MANAUS	•			•		•	•	•	•	•	
		•			•		•	•	•	•	•	
		•			•		•	•	•	•	•	
			•		•		•	•	•	•	•	
☆☆	CURITIBA		•		•		•	•	•	•		
			•		•		•	•	•	•		
	SÃO PAULO		•		•		•	•	•	•		
			•		•		•	•	•	•		
	MANAUS	•			•		•	•	•	•		
			•		•		•	•	•	•		
			•		•		•	•	•	•		
			•		•		•	•	•	•		
☆☆	CURITIBA			•	•		•	•	•	•		
				•	•		•	•	•	•		
	SÃO PAULO			•	•		•	•	•	•		
				•	•		•	•	•	•		
	MANAUS	•			•		•	•	•	•		
			•		•		•	•	•	•		
☆	CURITIBA			•	•		•	•	•	•		
				•	•		•	•	•	•		
	SÃO PAULO			•	•		•	•	•	•		
				•	•		•	•	•	•		
	MANAUS	•			•		•	•	•	•		
			•		•		•	•	•	•		

Fonte: A autora (2018).

3.5 DISCUSSÃO

Com o objetivo de classificar e caracterizar o desempenho energético de edifícios de planta livre no Brasil, a influência dos parâmetros relacionados à fachada foi analisada, a partir de simulações computacionais no programa *EnergyPlus*.

Para esse tipo de edificação, foi verificada a influência dos seguintes parâmetros: a) tipo de fachada, b) clima, c) parâmetros relacionados às aberturas (PAF, tipo de vidro e dispositivo de sombreamento) e d) temperatura de *setpoint* do ar condicionado. A classificação dos resultados em faixas de consumo energético (Tabela 21) mostrou que a combinação de diferentes parâmetros implica em desempenhos variados. A partir disso, pode-se afirmar que:

- Alterar da Fachada Tradicional para a Fachada Cortina gerou um aumento no consumo do ar condicionado, em média, 25% para Curitiba e São Paulo e 15% para Manaus. Como a utilização desse edifício é apenas durante o dia, fazer essa alteração significa aumentar o nível de isolamento térmico (comprovado pela diferença entre os valores de transmitância térmica), fato que pode dificultar a dissipação dos ganhos de calor internos, além de promover o efeito estufa (causado pela presença da “pele de vidro”), que causam o aumento do consumo do ar condicionado;
- Como a Fachada Tradicional possui os menores consumos com ar condicionado (em relação ao outro tipo de fachada), nestes cenários, foram obtidas as melhores classificações energéticas, para todos os climas;
- Os climas de Curitiba e São Paulo apresentam resultados semelhantes quanto à faixa de desempenho energético, diferenciando-se neste aspecto o clima de Manaus, devido às altas temperaturas mantidas ao longo do ano todo;
- Em relação aos parâmetros relacionados às aberturas, o PAF foi o que mais impactou o consumo energético. O tipo de vidro e a presença de dispositivo de sombreamento tiveram maior impacto nas maiores aberturas (PAFs de 55% e 80%);
- A alteração em 1°C (de 24°C para 25°C) na temperatura de *setpoint* do ar condicionado melhorou o desempenho em todos os cenários, reduzindo o consumo de energia em até 16,4%, em média;

A partir da caracterização arquitetônica das faixas de consumo energético, foi possível identificar que, para a obtenção dos melhores desempenhos (cinco e quatro estrelas), é necessário:

- Utilizar, em todos os climas, a Fachada Tradicional. Em Curitiba e São Paulo é possível se utilizar todos os tamanhos de janelas (PAFs de 30%, 55% e 80%), exceto para os cenários com janela média e vidro incolor, sem dispositivo de sombreamento e com *setpoint* de 24°C, e os cenários

com janelas grandes e sem dispositivo de sombreamento (exceto no caso do vidro incolor). Em Manaus é possível se ter janelas pequenas (exceto com vidro incolor, no *setpoint* de 24°C), e janelas médias com qualquer tipo de vidro (exceto o incolor), desde que tenha dispositivo de sombreamento (no *setpoint* de 24°C), e todos os cenários com *setpoint* de 25°C (exceto o com vidro incolor);

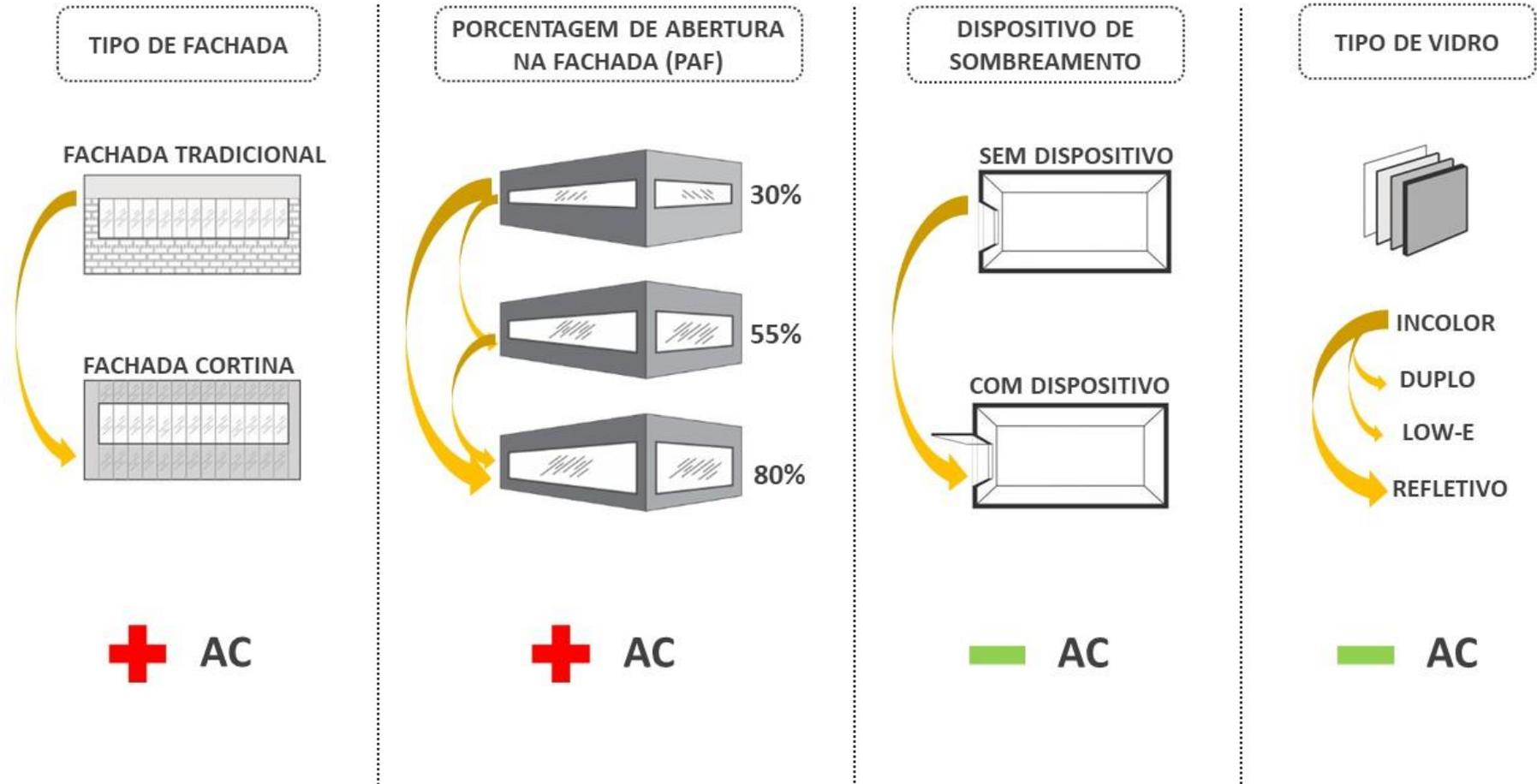
- Se optar pela Fachada Cortina, em Curitiba e São Paulo, deve-se priorizar janelas pequenas (PAF de 30%) e médias (PAF de 55%) com dispositivo de sombreamento para poder utilizar todos os tipos de vidros (nos dois *setpoints*). É possível se utilizar janelas grandes (PAF de 80%) em Curitiba, desde que se mantenha o *setpoint* em 25°C para todos os tipos de vidros (exceto o incolor) e, em São Paulo, é possível utilizar o vidro refletivo no *setpoint* de 24°C e os vidros *low-e*, refletivo ou duplo no *setpoint* de 25°C. Em climas muito quentes, como Manaus, o uso de janelas pequenas (PAF de 30%) é mais adequado e, com a possibilidade de se utilizar um dispositivo de sombreamento, pode-se utilizar os vidros refletivo ou duplo e, no *setpoint* de 25°C, todos os tipos de vidro podem ser usados (exceto o incolor). É possível se utilizar janelas médias (PAF de 55%), desde que se tenha dispositivo de sombreamento para os vidros refletivo ou duplo, no *setpoint* de 25°C;

Com isso, esta etapa da pesquisa proporcionou uma gama de combinações de parâmetros e demonstrou a sua influência no consumo de energia de edifícios de escritórios de planta livre no Brasil. O uso adequado dos parâmetros aqui apresentados pode gerar economia de energia neste tipo de edificação. Tais resultados podem servir de suporte à tomada de decisões por parte dos projetistas, no sentido de criar edifícios energeticamente mais eficientes.

Assim, estes resultados e análises servirão de suporte às próximas etapas do desenvolvimento desta pesquisa, que são apresentadas nos capítulos subsequentes (Análise de desempenho ambiental e Análise integrada).

A seguir, a figura 15 apresenta um diagrama que esquematiza os resultados desse capítulo.

Figura 15: Resultado das variações dos parâmetros da fachada no consumo do ar condicionado (AC).



Fonte: A autora (2018)

CAPÍTULO 4.

ANÁLISE DE DESEMPENHO AMBIENTAL

4.1. ENQUADRAMENTO

Nesta segunda etapa da pesquisa, foi realizada a análise de desempenho ambiental, por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), dos cenários de estudos apresentados anteriormente. Será apresentada toda a metodologia aplicada seguindo as etapas contidas na ACV e os resultados serão apresentados de acordo com os potenciais impactos ambientais gerados para cada cenário de estudo, para os três climas brasileiros contemplados neste estudo.

4.2. METODOLOGIA APLICADA

Neste item será apresentada a metodologia aplicada e os resultados da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). De acordo com o apresentado no Capítulo 2 (Contextualização), a ACV é dividida em quatro etapas, sendo: 1) Definição de Objetivo e Escopo, 2) Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV), 3) Avaliação de impacto do Ciclo de Vida (AICV) e 4) Interpretação do Ciclo de Vida, as quais serão expostas a seguir.

4.2.1. Definição de Objetivo e Escopo

4.2.1.1. Objetivo: Aplicações pretendidas

O presente estudo busca avaliar os impactos ambientais potenciais de diversos cenários pertencentes à duas soluções construtivas de fachadas de edifícios de escritórios- sistemas de vedação vertical não estruturais- para três cidades brasileiras, a saber: Curitiba (PR), São Paulo (SP) e Manaus (AM). Conforme apresentado no Capítulo 3, estes cenários são compostos por combinações de parâmetros referentes à Porcentagem de Abertura na Fachada, Tipo de Vidro e presença ou não de dispositivo de sombreamento.

Os dois sistemas de vedação analisados são denominados como Fachada Tradicional e Fachada Cortina. O primeiro é composto por vedações constituídas por blocos de concreto e janelas de vidro, enquanto que o segundo se refere à uma fachada composta por caixilhos estruturados com função de vedação em que o vidro aparece como elemento de revestimento, formando um sistema contínuo que envolve todo o edifício.

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo auxiliar na tomada de decisão por parte dos projetistas ao longo do processo de projeto, a respeito da escolha do tipo de fachada (cenário com a melhor combinação dos parâmetros avaliados) que traga menos impactos ambientais negativos ao longo da vida útil do edifício.

4.2.1.2. Limitações do método, suposições e impactos

A primeira limitação do presente estudo é apresentada por todo o levantamento do inventário vir de bases secundárias, mais precisamente da base de dados genéricos *Ecoinvent* 3.01 (FRISCHKNECHT et al., 2005). A utilização desse tipo de base de dados se justifica pela atual dificuldade em se conseguir dados diretos da indústria, e por não haver ainda uma base de dados específica, voltada totalmente à realidade brasileira.

A segunda limitação do estudo é que as soluções construtivas não possuem o mesmo desempenho térmico, uma vez que as próprias características construtivas de cada cenário avaliado inviabilizam a definição de soluções tecnologicamente diferentes com desempenho semelhante. Ao se considerar os impactos advindos da fase de uso da edificação, tais diferenças também se refletem nos impactos advindos desta fase. Dessa forma, foram realizadas ACVs separadas para cada cenário de fachada, a fim de se obter os potenciais impactos ambientais referentes à cada um.

A terceira limitação do estudo é que, ao se considerar a fase de uso da edificação, foram apenas tomados como referência os consumos de energia advindos de simulações computacionais, excluindo-se dessa fase, por exemplo, o consumo de energia advindo dos equipamentos e da iluminação artificial do edifício.

4.2.1.3. Motivos para realização do estudo e contexto de decisão

Uma das motivações para a realização do presente estudo é o fato de poder proporcionar informações aos profissionais de projeto a respeito do comportamento ambiental de cada solução construtiva ao longo de toda a sua vida útil. E, principalmente, no caso das fachadas – elementos de vedação – tais informações são de extrema importância, visto que tais elementos se constituem como os de maior extensão na edificação – principalmente nos edifícios comerciais, que se constituem por vários pavimentos, com fachadas totalmente expostas às condições climáticas externas.

Além disso, a escolha por estudar tais soluções de fachadas para três climas brasileiros distintos – clima frio (Curitiba), intermediário (São Paulo) e quente (Manaus)-, faz com que haja um alcance maior das análises, na tentativa de abranger a variabilidade climática do país.

4.2.1.4. Público-alvo

A presente avaliação é um estudo científico e, por isso, será publicado para conhecimento da academia, especificamente para a área da construção civil. Assim, o público-alvo deste trabalho consiste em audiência externa e técnica.

Como a análise de cada solução construtiva foi feita separadamente, os resultados advindos do impacto ambiental referente a cada cenário de análise foram posteriormente avaliados em comparação com outros aspectos, tais como: consumo de energia para a fase de utilização e os custos (de construção e utilização). Portanto, os resultados deste estudo serão divulgados ao público.

4.2.1.5. Encarregados do estudo

Os responsáveis por este estudo são: Me. Rosilene Regolão Brugnera, Profa. Dra. Karin Maria Soares Chvatal, Prof. Dr. João Adriano Rossignolo, sendo os três da Universidade de São Paulo (as duas primeiras do IAU-USP e o terceiro da FZEA-USP), e Prof. Dr. Ricardo Mateus, da Universidade do Minho (Portugal).

4.2.1.6. Escopo: Tipos de entregas e aplicações pretendidas

O presente trabalho é um estudo completo de ACV, abrangendo todas as fases citadas anteriormente (definição de objetivo e escopo, análise de inventário do ciclo de vida, avaliação de impacto do ciclo de vida e interpretação do ciclo de vida).

Este estudo considerou apenas as etapas de pré-uso e uso da edificação. A primeira compreende as fases de extração das matérias-primas, produção dos materiais e componentes, transporte até a obra e a execução do edifício. A segunda refere-se à fase de operação do edifício, que abrange o consumo energético para o funcionamento dos sistemas de condicionamento de ar, iluminação artificial e uso de equipamentos.

Em relação às aplicações pretendidas, os resultados poderão proporcionar um auxílio à tomada de decisão por parte dos profissionais de projetos da construção civil, no que tange a escolha de soluções construtivas de fachadas – vedações verticais.

Através dos resultados obtidos a partir da realização da ACV, foi possível avaliar e comparar os impactos ambientais potenciais gerados em cada cenário de fachada, em relação ao tipo de material (fase de pré-uso) e seu respectivo consumo energético (fase de uso) ao longo da vida útil da edificação. Tal análise é importante no sentido de identificar qual fase tem maior impacto ao longo do ciclo de vida da edificação, destacando possíveis pontos críticos e potenciais melhorias no desempenho ambiental. Em uma análise posterior, com a normalização e agregação dos impactos ambientais, será possível comparar de maneira integrada o desempenho ambiental, energético e o custo de cada cenário.

4.2.1.7. Função e Unidade declarada

A função a ser avaliada pelo estudo é a de vedação externa não-estrutural de um edifício de escritórios, o qual possui – para todos os cenários estudados, conforme descrito no Capítulo 3-, as mesmas densidades de carga de equipamentos e iluminação, tipo, Coeficiente de Performance (COP) e *setpoint* do sistema de ar condicionado para manter a temperatura de 25°C¹⁷ ao longo do ano, nos dias e horários de ocupação do edifício (de segunda à sexta, das 8h às 19h).

Segundo a norma NBR 15575-4 (ABNT, 2013), a vida útil de projeto (VUP) dos sistemas construtivos de vedação externa para edifícios residenciais é de, no mínimo 40 anos e máxima de 60 anos. Para este estudo foi considerado o tempo máximo de 60 anos por se tratar de um edifício de escritórios e por estar de acordo com outros estudos presentes na literatura (AZARI-N; KIM, 2012; TABORIANSKI; PRADO, 2012; AZARI, 2014; LÜTZKENDORF et al., 2014).

A unidade a ser utilizada como base de comparação para os resultados neste estudo é uma Unidade Declarada. Segundo a norma EN 15804 (CEN, 2015), a unidade declarada pode ser utilizada quando não é considerado todo o ciclo de vida do produto (como no caso desta pesquisa, em que foram apenas consideradas as fases de pré-uso e uso da edificação), ou quando não é indicado e/ou conhecida a função específica do cenário em relação ao edifício.

Dessa forma, foi considerado neste estudo a seguinte unidade declarada: 1m² da área útil condicionada do edifício de escritórios¹⁸, que satisfaz a condição apresentada anteriormente para os 60 anos de vida útil do edifício. Segundo Silva e Silva (2015), apresentar os impactos normalizados por unidade de área construída é importante no sentido de generalizar o resultado, para que não seja necessário analisar projetos arquitetônicos específicos de cada região, o que pode auxiliar na comunicação do desempenho ao público geral, além de embasar metas de projeto e políticas públicas.

Assim, os sistemas construtivos avaliados no estudo, apresentados no Capítulo 3, são descritos a seguir.

- a) Fachada Tradicional (FT): Constitui-se por um sistema de vedação não-estrutural composta por alvenaria de blocos de concreto (dimensões 14,00 x 19,00 x 39,00 cm), rebocados externamente com argamassa de cimento (2,50cm de espessura) e internamente com pasta de gesso (0,50cm de espessura).

¹⁷ No Capítulo 3 foram avaliados dois tipos de temperatura de *setpoint* (24°C e 25°C) e chegou-se à conclusão que os cenários com o *setpoint* mais alto (25°C) obtiveram melhores desempenhos energéticos (menores consumos de energia do ar condicionado).

¹⁸ Os quantitativos dos materiais de cada cenário de fachada foram calculados em kg (em sua totalidade) e posteriormente divididos pela área (em m²) condicionada da edificação (parte pertencente aos escritórios). Dessa forma, todos os impactos ambientais saíram em kg/m², estando em conformidade com os resultado de consumo do ar condicionado, que saíram em kWh/m².ano, para cada cenário avaliado.

- b) Fachada Cortina (FC): Constitui-se por um sistema de vedação não-estrutural composto por uma estrutura de caixilhos metálicos que formam um sistema de vedação contínuo. Esse sistema recebe um fechamento em placas de vidro, que são colados aos montantes metálicos com silicone estrutural (SOUZA, 2008). A parte opaca da estrutura interna (peitoril em alvenaria e viga de concreto) é revestida por um vidro com película PVB (*polivinil butiral*) branca, cuja aparência é translúcida.

Como descrito no Capítulo 3, foram avaliados diversos cenários de fachadas (com combinações diversas de Porcentagem de Abertura na Fachada (PAF), tipos de vidro, presença ou não de dispositivo de sombreamento), de forma que os quantitativos de materiais variam de acordo com o cenário de análise e serão especificados no item Análise de Inventário. A quantificação dos materiais foi realizada em kg.

As distâncias do transporte das empresas produtoras dos materiais até a localidade do edifício foram contabilizadas e estão detalhadas no Apêndice C. Esse aspecto demonstra-se importante devido ao fato de que o tipo de transporte e combustível utilizados, bem como a distância, podem influenciar nas emissões de gases que causam os impactos ambientais. Para os casos em que a empresa produzia na mesma cidade da obra, considerou-se uma distância padrão de 10km, cujos dados de inventário foram contabilizados em kg*km.

4.2.1.8. Estrutura de modelagem do Inventário do ciclo de vida (ICV)

O modelo de ciclo de vida selecionado para este estudo é o atribucional. Este modelo representa a cadeia de fornecimento real ou prevista, incorporando-a a uma tecnosfera estática. Ou seja, a modelagem atribucional (também denominada “contábil”, “descritiva”), representa os impactos ambientais potenciais associados à um produto como ele realmente é, já que esta modelagem se utiliza de dados históricos, mensuráveis, com incerteza conhecida e abrange todos os processos relevantes para o sistema analisado (JRC; IES, 2010; OLIVEIRA, 2014).

4.2.1.9. Fronteiras do sistema e critérios de corte

Os sistemas de produtos avaliados neste estudo de ACV são multifuncionais, o que significa que cada sistema gera mais do que um produto final. No entanto, não foi preciso se utilizar estratégias de alocação ou expansão dos sistemas, porque estas são realizadas nos dados de inventário- os quais vieram de base de dados internacionalmente reconhecidas (ex. *Ecoinvent*).

Para a modelagem do inventário do ciclo de vida, todos os materiais (em maior e menor

quantidades) referentes à cada cenário de fachada foram considerados relevantes para o estudo.

4.2.1.10. Preparação do embasamento para a avaliação de impacto

Até o presente momento, não há um método de caracterização de impactos ambientais específico para a realidade brasileira, logo, foi preciso selecionar um método que possuísse um escopo global, ou seja, que as categorias de impacto contidas no método não fossem específicas de uma determinada localidade ou contexto territorial.

Dessa forma, para este estudo, a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) foi realizada com base nos métodos *CML Baseline* (GUINÉE et al., 2001) e *Cumulative Energy Demand* (CED) (HISCHIER et al., 2010), para a caracterização dos impactos ambientais. O método CML possui uma abordagem intermediária de potenciais impactos ambientais, o que significa que utiliza indicadores relacionados à processos químicos, físicos e biológicos e sua abrangência tem carácter global. Já o método CED contabiliza os recursos energéticos para cada sistema de produto (neste caso, cada material da solução construtiva) e os classifica em renováveis e não renováveis.

Posteriormente à AICV, será realizado um estudo de análise integrada (a partir de metodologias de análise multicritério e de custo ótimo) envolvendo a normalização e a ponderação dos resultados, com base nas mesmas categorias de impacto presentes na AICV, para a comparação dos cenários de análise, a ser divulgado ao público.

4.2.1.11. Escopo tecnológico, geográfico e temporal

Os dados de inventário devem representar de forma adequada os impactos ambientais associados e, para isso, a coleta de dados deve abranger os escopos tecnológicos, geográficos e temporais.

Em relação ao escopo tecnológico, as soluções construtivas aqui analisadas estão diretamente relacionadas ao conjunto de sistemas de produtos apresentados anteriormente. Os dados coletados na fase de inventário correspondem às entradas (materiais em kg/m² e eletricidade em kWh/m². ano) e saídas (emissões) desses processos. O escopo deste estudo é atual e estático, pois são consideradas tecnologias atualmente utilizadas para o tipo de edificação analisado, sem a indicação do desenvolvimento de novas tecnologias.

Para representar a identidade regional dos dados de inventário em relação à localização da produção dos materiais e transporte até a obra, o presente estudo considera como escopo geográfico três cidades: Curitiba (PR), São Paulo (SP) e Manaus (AM). Como não há a disponibilidade de dados

primários no Brasil para a coleta de dados de inventário no contexto brasileiro, fez-se necessária uma coleta de dados secundários, obtidos através da base de dados europeia *Ecoinvent* 3.01 (FRISCHKNECHT et al., 2005). Para a adaptação dos processos à realidade brasileira, foi substituído o processo da energia de cada produto pelo mix energético brasileiro (*Electricity, low voltage {BR}*) market for | Alloc Def, S), contido nessa base de dados. Para considerar o transporte do local de produção do material até a obra, foram considerados dados obtidos por sites/ou e-mails dos fabricantes (contidos no Apêndice C). A escolha pelos fabricantes ocorreu a partir de referências utilizadas por outros trabalhos da literatura e pela disponibilidade de dados mais detalhados referentes à cada material. Tal detalhamento foi importante porque possibilitou se encontrar o processo mais adequado que poderia corresponder à cada material na base de dados *Ecoinvent*, os quais serão melhor explicitados posteriormente.

Em relação ao escopo temporal, os resultados deste presente trabalho consideram um tempo de vida útil de projeto de 60 anos, considerado valor máximo pela norma NBR 15575-4 (ABNT, 2013), para sistemas construtivos de vedação externa. Conforme supracitado, foi considerado esse tempo de vida útil para a edificação por se tratar de um edifício de escritórios.

4.2.1.12. Pressupostos e comparabilidade entre sistemas

Neste estudo não haverá esse procedimento, pois não é um estudo de ACV comparativo. Foram realizadas ACVs separadamente para cada cenário de análise, especificados no Capítulo 3.

4.2.1.13. Identificação da necessidade de revisão crítica

Para este estudo, é necessário que haja a revisão crítica, uma vez que os resultados serão divulgados publicamente. Assim, considera-se que a revisão inicial seja realizada pela banca examinadora da presente tese de doutorado, a fim de verificarem a coerência do estudo e a possibilidade de publicação do mesmo.

4.2.1.14. Planejamento da Comunicação do estudo

Este presente estudo de ACV será divulgado em dois formatos, a saber: a) texto integral, no formato de tese de doutorado, contendo todas as informações a respeito do processo de realização da ACV (cálculo e montagem do inventário do ciclo de vida, as categorias de impacto ambiental, entre outros); b) texto resumido, no formato de artigo científico, a ser divulgado à comunidade acadêmica e à uma revista de abrangência técnica para ser divulgado aos projetistas, sendo que ambos serão

publicados posteriormente.

4.2.2. Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

Para o Inventário do Ciclo de Vida (ICV), inicialmente foi necessária a realização da quantificação dos materiais provenientes de cada cenário de fachada, contabilizados em kg e posteriormente convertidos em kg/m² da área do pavimento analisado (como explicitado anteriormente na unidade declarada). A quantificação da parte envidraçada da Fachada Tradicional e toda a Fachada Cortina foi realizada com base em um projeto executivo (cujos desenhos estão presentes nos Anexos), realizado pela empresa *Visual Urban*, que especificou os tipos e quantitativos de materiais para esta solução construtiva. Os materiais referentes à estrutura interna (peitoril em alvenaria e viga de concreto) foram calculados com base na norma brasileira NBR 15220-3 (ABNT, 2005a), com dados de fabricantes (nos casos do bloco de concreto e da tinta) e com dados do documento ITE-50 do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (SANTOS; MATIAS, 2006).

A quantidade dos materiais varia de acordo com o cenário de análise (tipo de solução construtiva de fachada, vidro, PAF e presença ou não de dispositivo de sombreamento). Assim, na Tabela 29 é apresentada a sequência de cenários avaliados, bem como o significado das siglas correspondentes a cada cenário, considerando-se as mesmas características para cada PAF.

Tabela 29: Significado das siglas e sequência de cenários

PARÂMETROS	SIGLA		SIGNIFICADO												
Tipo de Fachada	FT FC		Fachada Tradicional Fachada Cortina												
Tipo de Vidro	In Dp Lw Rf		Incolor Duplo Low-e Refletivo												
Dispositivo de Sombreamento	SDS CDS		Sem Com Dispositivo de Sombreamento												
CENÁRIOS															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
FT	FT	FT	FT	FT	FT	FT	FT	FC							
VIn	VDp	VLw	VRf	VIn	VDp	VLw	VRf	VIn	VDp	VLw	VRf	VIn	VDp	VLw	VRf
SDS	SDS	SDS	SDS	CDS	CDS	CDS	CDS	SDS	SDS	SDS	SDS	CDS	CDS	CDS	CDS

Fonte: A autora (2018).

Na Tabela 30 são apresentadas as quantidades de acordo com as variações dos 72 (24 cenários para cada clima) diferentes cenários de análise para a Fachada Tradicional. São apresentados os quantitativos totais, assinalando-se os cenários correspondentes (de acordo com a tabela 29), já que há combinações com diferentes tipos de vidro, presença ou não dispositivo de sombreamento e, entre outras características.

Tabela 30: Quantitativo dos materiais para as combinações de Fachada Tradicional.

FACHADA TRADICIONAL					
			PAF=30%	PAF=55%	PAF=80%
	Cenários	Tipo de material	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)
ESQUADRIA	(1) – (8)	Aço galvanizado	0,012	0,022	0,032
		Aço inox	0,004	0,008	0,011
		Alumínio	2,625	3,187	3,760
		E.P.D.M.	0,124	0,167	0,208
		Nylon	0,002	0,003	0,003
		Polietileno expandido	0,003	0,004	0,005
		Silicone	0,003	0,005	0,008
	(1); (5)	Vidro vão-luz (Incolor)	2,540	4,777	7,046
	(2); (6)	Vidro vão-luz (Duplo)	5,080	9,553	14,093
	(3); (7)	Vidro vão-luz (<i>Low-e</i>)	3,387	6,369	9,395
(4); (8)	Vidro vão-luz (Refletivo)	2,608	4,904	7,234	
DISPOSITIVO PROTEÇÃO SOLAR	(5); (6); (7); (8)	Aço inox		0,015	
		Alumínio		17,129	
		E.P.D.M.		0,409	
ALVENARIA	(1) – (8)	Arg. revest. externo (esp=0,025m)	96,269	67,520	38,342
		Arg. revest. interno - gesso (esp=0,005m)	2,831	1,986	1,128
		Bloco de concreto (0,14x0,19x0,39m)	60,497	42,431	24,095
		Pintura	0,635	0,445	0,253
VIGA DE CONCRETO	(1) – (8)	Arg. revest. externo (esp=0,025m)	9,887	9,887	9,887
		Arg. revest. interno - gesso (esp=0,005m)	1,217	1,217	1,217
		Viga de concreto (esp=0,40m)	192,247	192,247	192,247
		Pintura	0,273	0,273	0,273

Fonte: A autora (2018).

A Tabela 31 apresenta o quantitativo de materiais referentes à solução de Fachada Cortina. Neste caso também há combinações em que há a presença ou não do dispositivo de proteção solar e em cada cenário é utilizado apenas um tipo de vidro para o vão-luz, isto é, para um cenário é utilizado o vidro incolor, em outro o vidro duplo, etc. Dentre os tipos de vidro, apenas o translúcido está presente em todos os cenários, pois preenche a área da fachada em que há a parte opaca (peitoril em alvenaria e viga de concreto). Os cenários (com as combinações dos parâmetros) são assinalados de acordo com a tabela 29.

Tabela 31: Quantitativo dos materiais para as combinações de Fachada Cortina.

FACHADA CORTINA					
			PAF=30%	PAF=55%	PAF=80%
	Cenários	Tipo de material	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)
ESQUADRIA	Todos FC (9) – (16)	Aço inox	0,150	0,150	0,150
		Alumínio	11,817	11,817	11,817
		E.P.D.M.	0,669	0,669	0,669
		Nylon	0,002	0,002	0,002
		Polietileno expandido	0,018	0,018	0,018
		Silicone	0,025	0,025	0,025
	(9); (13)	Vidro vão-luz (Incolor)	2,675	4,863	7,101
	(10); (14)	Vidro vão-luz (Duplo)	5,349	9,727	14,202
	(11); (15)	Vidro vão-luz (<i>Low-e</i>)	3,566	6,484	9,468
	(12); (16)	Vidro vão-luz (Refletivo)	2,746	4,993	7,290
DISPOSITIVO PROTEÇÃO SOLAR	(13); (14); (15); (16)	Aço inox		0,015	
		Alumínio		17,129	
		E.P.D.M.		0,409	
ALVENARIA	Todos FC (9) – (16)	Arg. revest. externo (esp=0,025m)	96,269	67,520	38,342
		Arg. revest. interno - gesso (esp=0,005m)	2,831	1,986	1,128
		Bloco de concreto (0,14x0,19x0,39m)	60,497	42,431	24,095
		Pintura	0,635	0,445	0,253
VIGA DE CONCRETO	Todos FC (9) – (16)	Arg. revest. externo (esp=0,025m)	9,887	9,887	9,887
		Arg. revest. interno - gesso (esp=0,005m)	1,217	1,217	1,217
		Viga de concreto (esp=0,40m)	192,247	192,247	192,247
		Pintura	0,273	0,273	0,273

Fonte: A autora (2018).

Após a quantificação dos materiais das fachadas, o inventário do ciclo de vida foi realizado com o auxílio do programa *SimaPro*[®] (PRÉ-CONSULTANTS, v. 8.4, 2017). Desenvolvido desde 1994 pela empresa *PréConsultants*, o programa *SimaPro*[®] (*System for Integrated Environmental Assessment of Products*), é uma ferramenta de ACV que permite ao usuário modelar e analisar todo o ciclo de vida de produtos e serviços de forma sistemática (RODRIGUES et al., 2008). Este programa foi projetado para avaliar produtos e compará-los por meio de indicadores ecológicos. Está disponível em duas versões – uma mais complexa para profissionais do meio ambiente, e uma versão mais simplificada, para projetistas (VASCONCELOS, 2014).

Para a modelagem do ciclo de vida de um produto, são necessárias algumas informações, tais como: componentes do produto, a forma de produção, o uso e a possível devolução para a natureza. Além disso, o *SimaPro* utiliza um banco de dados abrangente, e a base de dados pode ser expandida pelo usuário. Como critérios de avaliação do programa, tem-se: consumo de combustíveis fósseis e de recursos minerais, uso do terreno, chuva ácida, ecotoxicidade, alterações climáticas, destruição da

camada de ozônio, substâncias perigosas, entre outros – categorias diretamente relacionadas ao método de caracterização de impactos ambientais selecionado para o estudo (VASCONCELOS, 2014).

Como no Brasil, até o presente momento, não há bases de dados consolidadas para modelagem do ICV, este estudo adotou, assim como em vários trabalhos (BUENO, 2014; SAADE, SILVA e GOMES, 2013; SANSÃO, 2011) bases de dados internacionais, tais como o *Ecoinvent* (FRISCHKNECHT et al., 2005). Quando possível, os inventários de cada um dos processos foram editados, substituindo-se o processo da energia elétrica consumida pelo correspondente ao mix energético brasileiro, contido nessa mesma base de dados. A Tabela 32 apresenta os materiais utilizados nos cenários de estudo e o processo correspondente associado à base *Ecoinvent*.

Tabela 32: Materiais utilizados nos cenários de estudos e os processos correspondentes à base do *Ecoinvent*.

MATERIAL	UNIDADE	PROCESSO (<i>Ecoinvent</i>)
Aço galvanizado	Kg	<i>Steel, unalloyed {RoW} steel production, converter, unalloyed Alloc Def, U</i>
Aço inox	Kg	<i>Steel, chromium steel 18/8 {RoW} steel production, converter, chromium steel 18/8 Alloc Def, U</i>
Alumínio	Kg	<i>Window frame, aluminium, U=1.6 W/m2K {RoW} production Alloc Def, U</i>
E.P.D.M.	Kg	<i>Synthetic rubber {RoW} production Alloc Def, U</i>
Nylon	Kg	<i>Nylon 6-6 {RoW} production Alloc Def, U</i>
Polietileno expandido	Kg	<i>Tube insulation, elastomere {RoW} production Alloc Def, U</i>
Silicone	Kg	<i>Silicone product {RoW} production Alloc Def, U</i>
Vidro vão-luz (Incolor)	Kg	<i>Flat glass, uncoated {RoW} production Alloc Def, U</i>
Vidro vão-luz (Duplo)	Kg	<i>Glazing, double, U<1.1 W/m2K {RoW} production Alloc Def, U</i>
Vidro vão-luz (Low-e)	Kg	<i>Solar glass, low-iron {RoW} production Alloc Def, U</i>
Vidro vão-luz (Refletivo)	Kg	<i>Solar glass, low-iron {RoW} production Alloc Def, U</i>
Vidro (Translúcido)	Kg	<i>Flat glass, coated {RoW} production Alloc Def, U</i>
Arg. cimento (revest. externo)	Kg	<i>Cement mortar {RoW} production Alloc Def, U</i>
Arg. gesso (revest. interno)	Kg	<i>Stucco {RoW} production Alloc Def, U</i>
Bloco de concreto	Kg	<i>Concrete block {RoW} production Alloc Def, U</i>
Pintura (Tinta acrílica)	Kg	<i>Acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state {RoW} acrylic varnish production, product in 87.5% solution state Alloc Def, U</i>
Viga (concreto)	Kg	<i>Concrete, normal {RoW} unreinforced concrete production, with cement CEM II/A Alloc Def, U</i>
Viga (armadura)	Kg	<i>Reinforcing steel {RoW} production Alloc Def, U</i>
Eletricidade (mix energético Brasil)	KWh	<i>Electricity, low voltage {BR} market for Alloc Def, S</i>
Transporte (rodoviário)	Km	<i>Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market for Alloc Def, S</i>
Transporte (marítimo)	Km	<i>Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO} market for Alloc Def, S</i>
Transporte (fluvial)	Km	<i>Transport, freight, inland waterways, barge {GLO} market for Alloc Def, S</i>

Fonte: A autora (2018).

As distâncias do transporte das empresas produtoras dos materiais até a localidade do edifício foram contabilizadas e apresentadas no Apêndice C. Esse aspecto demonstra-se importante devido ao fato de que o tipo de transporte, combustível e distância podem influenciar nas emissões de gases que causam os impactos ambientais. Por outro lado, a distância de transporte de cada um dos materiais não é a mesma nas diferentes localizações estudadas.

4.2.3. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

Para a fase de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) foi selecionado o método CML Baseline (GUINÉE et al., 2001) para a caracterização dos impactos ambientais. Desenvolvido pelo *Centre for Environmental Science of Leiden University*, o CML utiliza indicadores referenciais e, a partir de fatores de caracterização, converte os resultados em potenciais impactos ambientais intermediários. Após essa conversão, os resultados podem ser normalizados de modo a permitir o cálculo de um valor global que permita a caracterização do desempenho ambiental de cada cenário e a sua hierarquização em termos de impacto ambiental.

Atualmente, as normas europeias exigem que se utilize os fatores de caracterização do método CML para as análises ambientais, tal como a norma EN 15987 (CEN, 2011b). Por outro lado, de acordo com Mendes, Bueno e Ometto (2016), como ainda não existe um método específico para o Brasil, é recomendado que se utilize métodos que tenham uma abrangência global para as suas categorias de impacto, e o CML é um deles.

Outras importantes categorias de impacto ambiental consideradas para esse estudo são a quantificação do Consumo Energético Cumulativo Total (CE_{TOT}) e Não Renovável (CE_{NRE}). Estes dois parâmetros são quantificados através do método de AICV *Cumulative Energy Demand* (CED) (HISCHIER et al., 2010).

Assim, para se quantificar os impactos ambientais potenciais de cada cenário de fachada, é necessário se multiplicar a quantidade de materiais e energia (de acordo com o que foi exposto no Inventário do Ciclo de Vida) presente em cada cenário pelos valores de conversão referentes aos métodos de caracterização selecionados para a análise (CML e CED), cujos valores são apresentados no Apêndice D. A Tabela 33 apresenta a definição das categorias de impacto selecionadas para a avaliação deste estudo.

As categorias de impacto ambientais apresentadas na Tabela 33 são previstas pelas normas europeias EN 15987:2011 (Avaliação do desempenho ambiental de edificações – Método de Cálculo) (CEN, 2011b) e EN 15643-2:2011 (Sustentabilidade das obras de construção. Avaliação da

sustentabilidade dos edifícios. Parte 2: Enquadramento para a avaliação do desempenho ambiental) (CEN, 2011a) .

Assim, para o desenvolvimento da AICV, são apresentados, para todos os cenários estudados, os resultados referentes à categoria de Potencial de Aquecimento Global (GWP). Os resultados referentes às demais categorias de impacto ambiental são apresentados no Apêndice E. Esse tipo de enfoque foi necessário devido à grande quantidade de cenários de estudo (são 144 cenários no total). Ao mesmo tempo, as demais categorias de impacto serão analisadas em conjunto no Capítulo 5 (Análise integrada), em que os resultados serão normalizados, facilitando assim uma análise de forma global para os cenários de análise.

Tabela 33: Unidades de avaliação e métodos AICV utilizados na quantificação das categorias de impactos ambientais considerados (continua).

Categorias de impactos ambientais	Unidades	Definição	Métodos
Potencial de aquecimento global (GWP)	(Kg CO ₂ equiv.)	O GWP é uma medida que fornece uma indicação aproximada dos potenciais efeitos climáticos causados pelas emissões de três principais gases que causam o chamado “efeito estufa”, sendo estes: o dióxido de carbono (CO ₂), o óxido nitroso (N ₂ O) e o metano (CH ₄), e como isso se distribui ao longo do tempo (GUINÉE et al., 2001). O modelo de caracterização desenvolvido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) é utilizado como fator de caracterização, expresso como Potencial de aquecimento global (GWP) para um horizonte temporal de 100 anos (GWP100). O escopo geográfico deste indicador é determinado em escala global (CONSULTANTS, 2016).	IPCC 2013 100a
Potencial de Destruição da Camada de Ozônio Estratosférico (ODP)	(KgCFC-11 equiv.)	A destruição da camada de ozônio estratosférico, resultado das ações humanas, permite que uma maior fração da radiação solar UV-B atinja a superfície terrestre (GUINÉE et al., 2001). Esse efeito pode ser nocivo para a saúde humana, saúde animal, ecossistemas terrestres e aquáticos, ciclos bioquímicos e materiais. O modelo de caracterização é desenvolvido pela Organização Meteorológica Mundial (WMO), considerando um escopo geográfico global dentro de um período de tempo infinito (CONSULTANTS, 2016).	CML-IA <i>baseline</i> (v3.02)
Potencial de Acidificação (AP)	(Kg SO ₂ equiv.)	As principais substâncias responsáveis pela acidificação são os óxidos de azoto (NO _x), enxofre (SO _x) e o amoníaco (NH ₃). Tais substâncias causam uma ampla gama de impactos no solo, nas águas subterrâneas, nas águas superficiais, nos organismos, nos ecossistemas e nos materiais (edifícios). O potencial de acidificação (AP) para emissões para o ar é calculado com o modelo RAINS 10 adaptado, o intervalo de tempo é a eternidade e a escala geográfica varia entre escala local e escala continental (CONSULTANTS, 2016).	CML-IA <i>baseline</i> (v3.02)
Potencial de Eutrofização (EP)	(Kg PO ₄ equiv.)	O potencial de eutrofização (também chamado de nitrificação) abrange os impactos advindos de elevados níveis de macro nutrientes no meio ambiente, sendo os mais importantes o fósforo (P) e o nitrogênio (N). O enriquecimento de nutrientes pode causar uma mudança indesejável na composição das espécies e elevar a produção de biomassa em ecossistemas aquáticos e terrestres. Ao mesmo tempo, essa elevada taxa de nutrientes na água pode torná-la imprópria para consumo (GUINÉE et al., 2001). O potencial de Nitrificação (NP) é baseado no procedimento estequiométrico de Heijungs (1992), o tempo é a eternidade e a escala geográfica varia entre escala local e continental (CONSULTANTS, 2016).	CML-IA <i>baseline</i> (v3.02)
Potencial de formação de ozônio expresso em Concentração de Oxidantes Fotoquímicos (POCP)	(Kg C2H4 equiv.)	A formação de compostos químicos reativos como o ozônio (sob a influência da luz ultravioleta), geram os denominados foto-oxidantes. Estes são formados através da oxidação fotoquímica de compostos orgânicos voláteis (COVs) e monóxido de carbono (CO) na presença de óxidos de nitrogênio (NO _x) (GUINÉE et al., 2001). O potencial de criação de ozônio fotoquímico (POCP) para a emissão de substâncias para o ar é calculado com o modelo de trajetória UNECE, sendo o período de tempo considerado de 5 dias e a escala geográfica varia entre escala local e continental (CONSULTANTS, 2016).	CML-IA <i>baseline</i> (v3.02)

Tabela 33: Unidades de avaliação e métodos AICV utilizados na quantificação das categorias de impactos ambientais considerados (conclusão).

Categorias de impactos ambientais	Unidades	Definição	Métodos
Potencial de depleção de recursos fósseis abióticos- combustíveis fósseis (ADP_FF)	(MJ equiv.)	Os chamados “recursos abióticos”, são recursos naturais considerados “não-vivos”, tais como minério de ferro, petróleo bruto e energia eólica (GUINÉE et al., 2001). Assim, essa categoria está relacionada à extração de minerais e combustíveis fósseis. O escopo geográfico é determinado em escala global (CONSULTANTS, 2016).	CML-IA <i>baseline</i> (v3.02)
Consumo Cumulativo de Energia – total (CED _{TOTAL})	(MJ equiv.)	O método utilizado para calcular o Consumo Cumulativo de Energia (CED) é baseada no método publicado pela <i>Eco-invent</i> (HISCHIER et al., 2010) e expandido pelo programa <i>SimaPro</i> (CONSULTANTS, 2016), para recursos energéticos disponíveis nos bancos de dados do programa. Os fatores de caracterização dividem os recursos energéticos em não-renováveis (fóssil, nuclear) e renováveis (biomassa, eólica, solar, geotérmica e hidráulica). O CED pode ser utilizado para efetuar comparações de resultados em estudos de ACV em que a demanda de energia primária é relatada. Além disso, o CED pode ser um “ponto de partida” para esse tipo de avaliação, pois não substitui uma avaliação com a ajuda de outros métodos de avaliação de impactos mais abrangentes (HISCHIER et al., 2010).	<i>Cumulative Energy Demand</i> (v1.09)

Fonte: A autora (2018).

4.2.4. Interpretação do ciclo de vida

Neste item são apresentados os resultados referentes à Avaliação de Impacto Ambiental, no que tange os âmbitos da identificação de questões significativas, avaliação do estudo e contribuições. Conforme supracitado, para a realização destas análises foram selecionados os cenários (Capítulo 3) com a temperatura de controle do sistema de ar condicionado em 25°C, que apresentaram desempenho energético superior (melhor classificação), em relação aos cenários com a temperatura em 24°C.

4.2.4.1. Identificação das questões significativas

Como resultado da avaliação de impacto ambiental, ao classificar os cenários de acordo com o mais e menos impactante para cada categoria (ao longo de 60 anos de vida útil do edifício), foi possível notar que há um resultado constante para quase todas as categorias de impacto. Isto significa que os mesmos cenários (para os três climas) se apresentaram como os mais e menos impactantes para todas as categorias de impacto previamente mencionadas, exceto pelo Potencial de Destruição da Camada de Ozônio Estratosférico (ODP), expresso em kg de KgCFC-11 equivalentes.

O cenário mais impactante, para todos os climas e categorias de impacto (exceto o ODP), é o que possui Fachada Cortina, com vidro incolor, sem dispositivo de sombreamento e PAF de 80%. Nas análises de desempenho energético (Capítulo 3), esse cenário era o que possuía o maior consumo de energia, em todos os casos e, esse fato se refletiu nos resultados deste capítulo, pois a fase de uso exerceu a maior influência sobre este resultado em todas as categorias. E isso pode ser verificado nas Figuras 14, 15 e 16, expostas a seguir, para a categoria GWP e, para as demais categorias, no Apêndice E. No caso do ODP, para todos os climas, o cenário mais impactante é muito semelhante ao citado anteriormente - Fachada Cortina, sem dispositivo de sombreamento e com PAF de 80% -, diferenciando-se neste aspecto pela presença do vidro duplo. Neste ponto pode-se afirmar que, como esta categoria é medida em KgCFC-11 equivalentes, o gás presente no vidro duplo (argônio) pode ter influenciado a variação desse resultado. Tal resultado está em concordância com os estudos de Azari (2014).

Do ponto de vista dos cenários menos impactantes, estes são praticamente idênticos para todas as categorias de impacto ambientais, porém possuem algumas variações de acordo com cada clima. Assim, o cenário menos impactante em todos os climas e categorias (sem exceção) são os que possuem Fachada Tradicional e PAF de 30%, sendo que em Curitiba ele possui vidro refletivo e dispositivo de sombreamento (exceto para o Potencial de Acidificação – AP-, em que possui vidro refletivo e não tem dispositivo de sombreamento); em São Paulo é constituído por vidro refletivo e não possui dispositivo de sombreamento (exceto para o Consumo Cumulativo de Energia – E_{total} -, em que possui vidro *low-e* e dispositivo de sombreamento; e para o ODP, em que possui vidro refletivo e dispositivo de

sombreamento); e em Manaus possui vidro duplo e dispositivo de sombreamento (sem exceções).

Dessa forma, devido à constância dos resultados em relação aos casos mais e menos impactantes, para a realização da AICV de todos os cenários apresentados no Capítulo 3, para os três climas avaliados- Curitiba (CTBA), São Paulo (SP) e Manaus (MN)-, foi considerada apenas a categoria de impacto de Potencial de Aquecimento Global (GWP). Conforme supracitado, os resultados referentes às demais categorias são apresentados no Apêndice E. Tal escolha partiu do princípio de que o GWP, métrica apresentada no relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) relativa à emissão de gases de efeito estufa, é muito utilizado por vários estudos que tem como base as emissões de CO₂ por possuir uma abrangência global, calculada para o período de 100 anos. Além disso, tal indicador está diretamente relacionado à matriz energética do país, associando assim a variação do consumo energético da edificação às emissões de CO₂.

Nas Figuras 16, 17 e 18, são apresentadas as contribuições para as emissões de CO₂ ao longo de 60 anos de utilização, que compreende duas etapas do ciclo de vida da edificação: a fase de pré-uso (ano zero), correspondente à extração das matérias-primas, produção dos materiais e componentes, transporte até a obra e a execução do edifício; e a fase de utilização (ano 1 ao 60), que corresponde ao tempo de operação do edifício, em que foram considerados apenas os consumos de energia para o sistema de ar condicionado, que supre a demanda de calor advinda das cargas internas (iluminação, equipamentos e pessoas) e dos ganhos de calor por radiação, advindos da fachada (Capítulo 3).

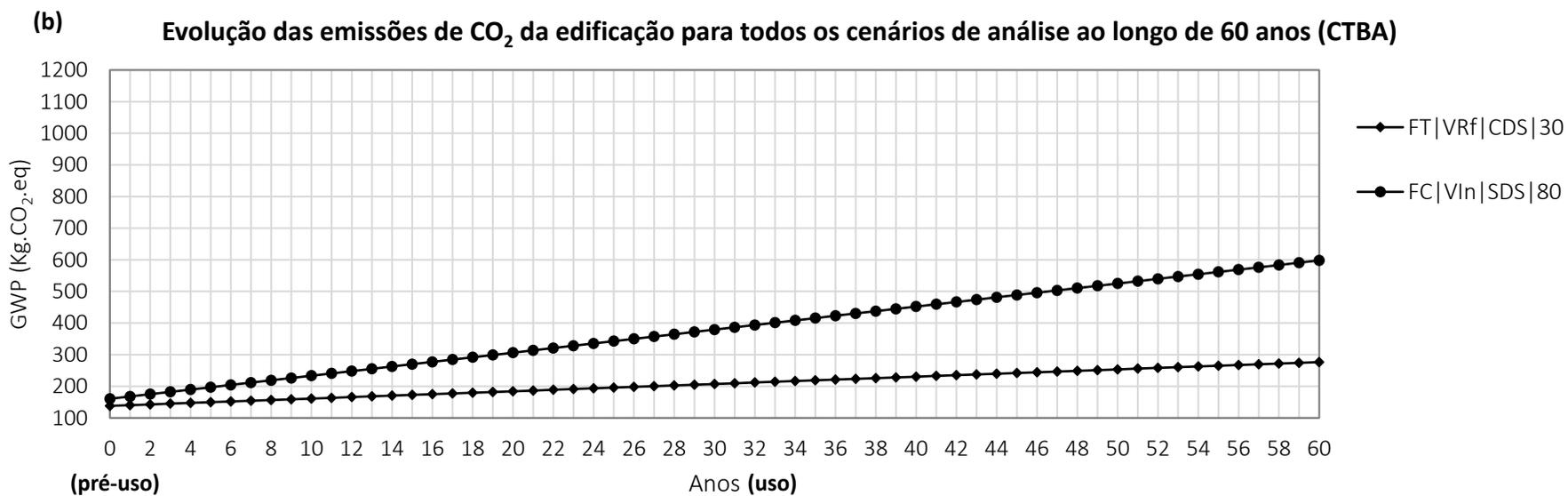
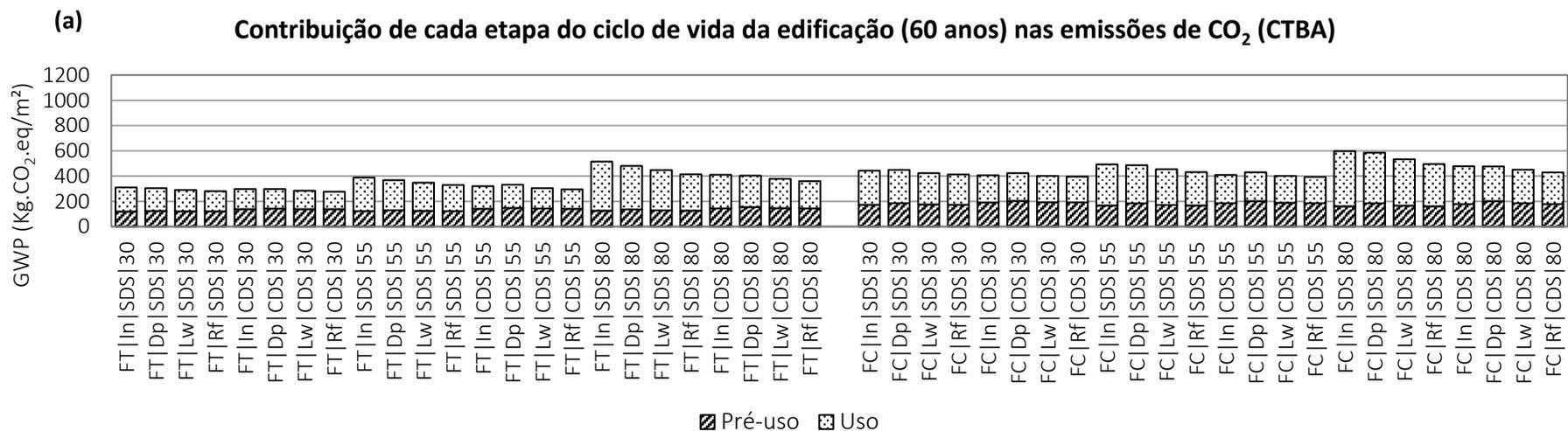
A legenda apresentada nos gráficos representa os cenários de análise, de acordo com a variação dos parâmetros analisados, assim, a Tabela 34 apresenta a definição das siglas.

Tabela 34: Definição das abreviações previstas nas análises.

PARÂMETROS VARIÁVEIS	SIGLA	SIGNIFICADO
Tipo de fachada	FT	Fachada Tradicional
	FC	Fachada Cortina
Tipo de vidro	In	Incolor
	Dp	Duplo
	Lw	Low-e
	Rf	Refletivo
Dispositivo de sombreamento	SDS	Sem Dispositivo de Sombreamento
	CDS	Com Dispositivo de Sombreamento
PAF	30	30%
	55	55%
	80	80%

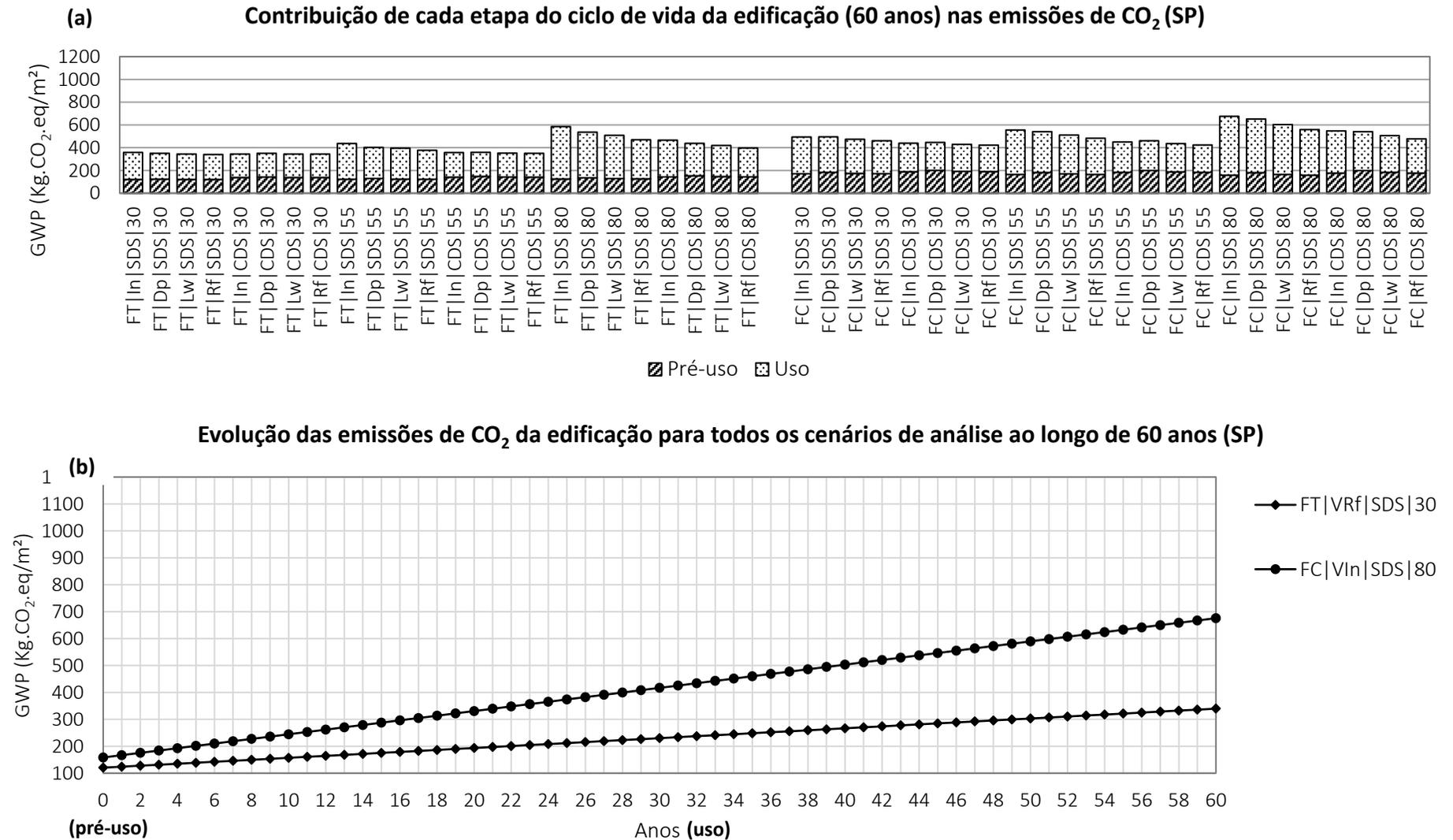
Fonte: A autora (2018).

Figura 16: (a) Contribuição das etapas de pré-uso e uso e (b) evolução das emissões de CO₂, em todos os cenários de análise para o clima de Curitiba (CTBA).



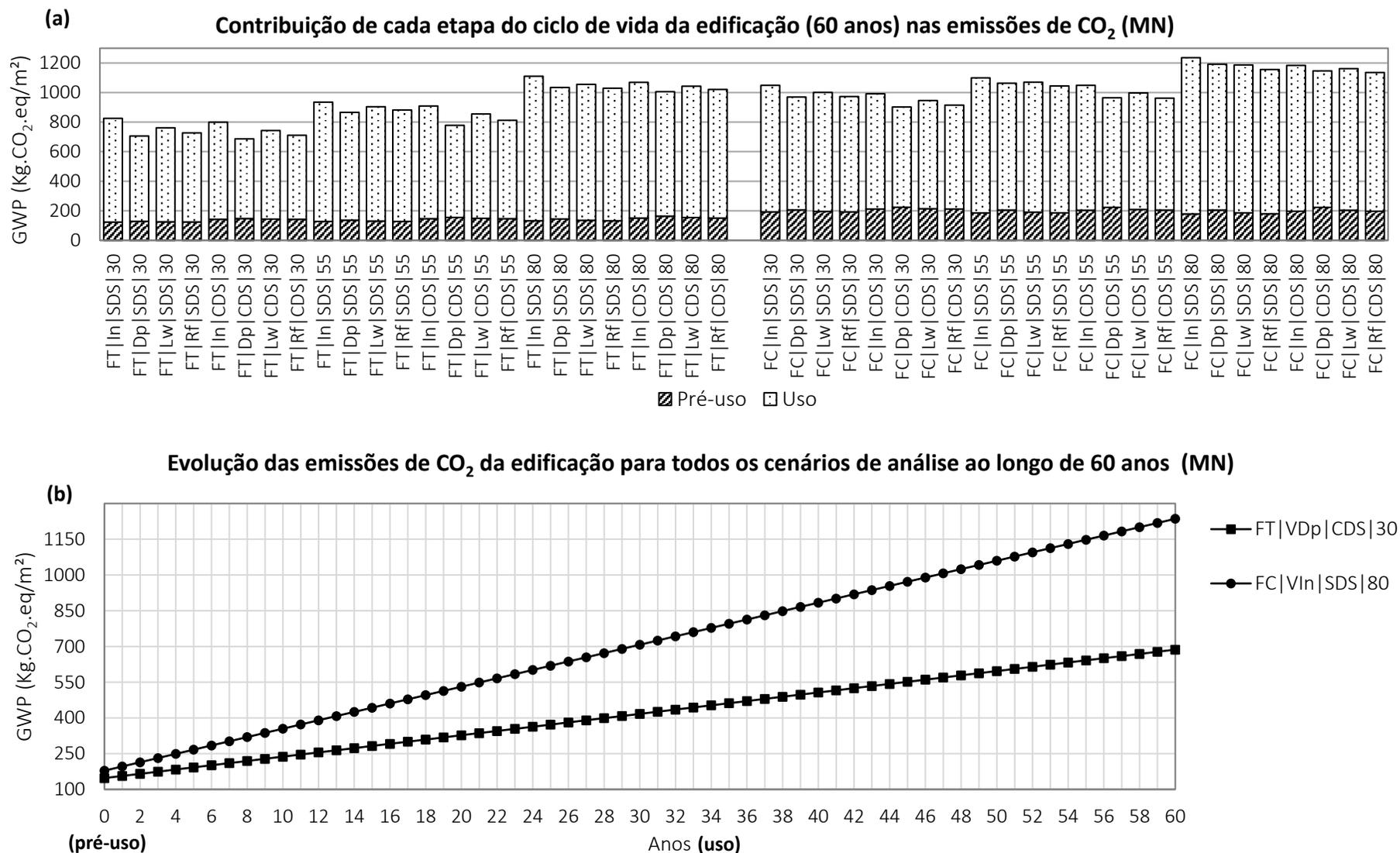
Fonte: A autora (2018).

Figura 17: (a) Contribuição das etapas de pré-uso e uso e (b) evolução das emissões de CO₂, em todos os cenários de análise para o clima de São Paulo (SP).



Fonte: A autora (2018).

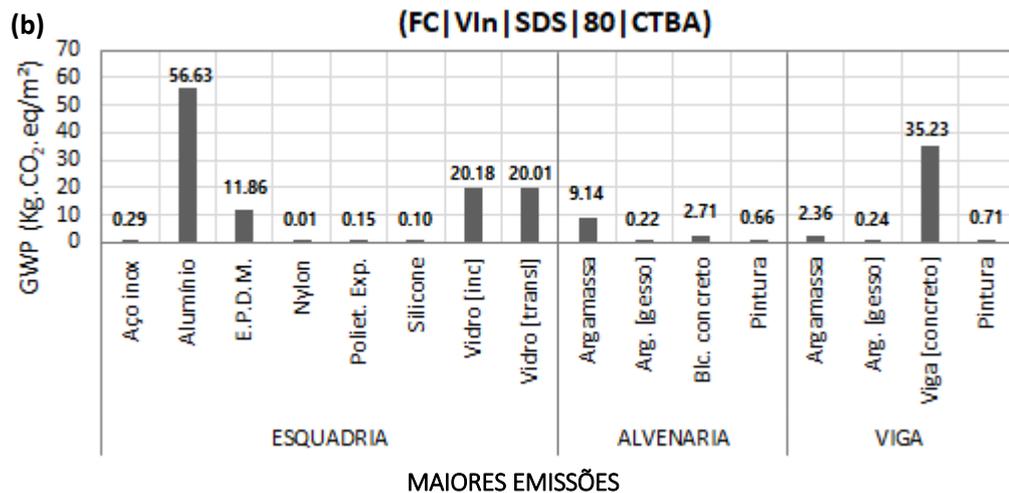
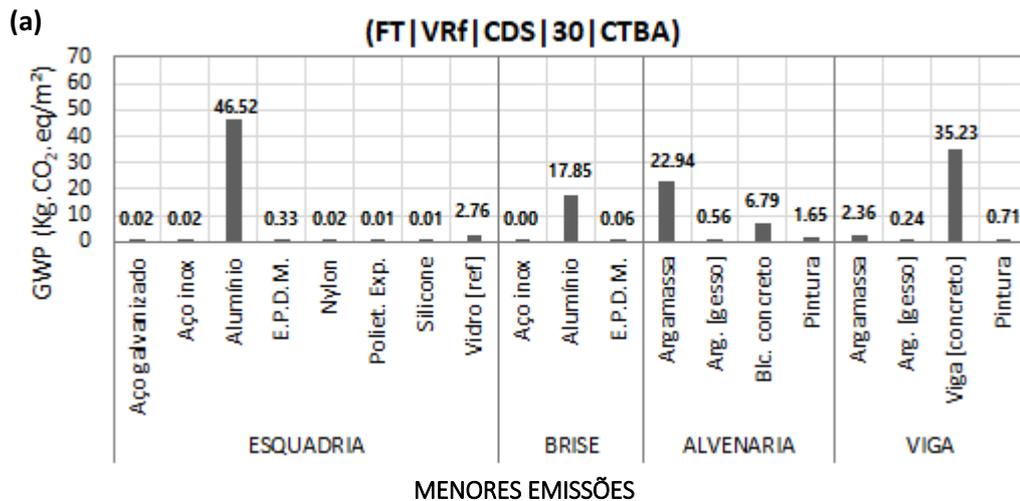
Figura 18: (a) Contribuição das etapas de pré-uso e uso e (b) evolução das emissões de CO₂, em todos os cenários de análise para o clima de Manaus (MN).



Fonte: A autora (2018).

Nota-se, a partir das Figuras 16, 17 e 18 que, para todos os climas, a fase de uso da edificação se configura como a mais impactante, em termos de emissões de CO₂. A contribuição para as emissões de CO₂ nas fases de pré-uso e uso são, respectivamente, 40% e 60% para Curitiba, 35% e 65% para São Paulo e 18% e 82% para Manaus, em média. Muitos trabalhos afirmam que a fase de uso da edificação é a que mais emite CO₂ ao longo do ciclo de vida das edificações (SCHEUER, KEOLEIAN E REPPE, 2003; KOFOWOROLA E GHEEWALA, 2008; ZABALZA BRIBIÁN, ARANDA USÓN E SCARPELLINI, 2009; AZARI, 2014; KOMERSKA, KWIATKOWSKI E RUCIŃSKA, 2015). No entanto, ainda que menos impactante, a fase de pré-uso também participa de tal impacto e merece ser esclarecida. Assim, os cenários que menos emitem CO₂ (considerando as fases de pré-uso e uso) ao longo de 60 anos, são os que possuem Fachada Tradicional, com janela pequena (PAF de 30%). Os cenários mais impactantes nesse quesito (total de emissões de CO₂) situam-se naqueles que possuem Fachada Cortina e com grandes aberturas (PAF de 80%). A título de exemplo, são apresentados nas Figuras 19(a) e 19(b), a configuração dos materiais que contribuem para tais emissões (cenários com mais e menos impacto para o clima de Curitiba).

Figura 19: Contribuição dos materiais para as emissões de CO₂, sendo (a) cenário com menores emissões; e (b) cenário com maiores emissões.



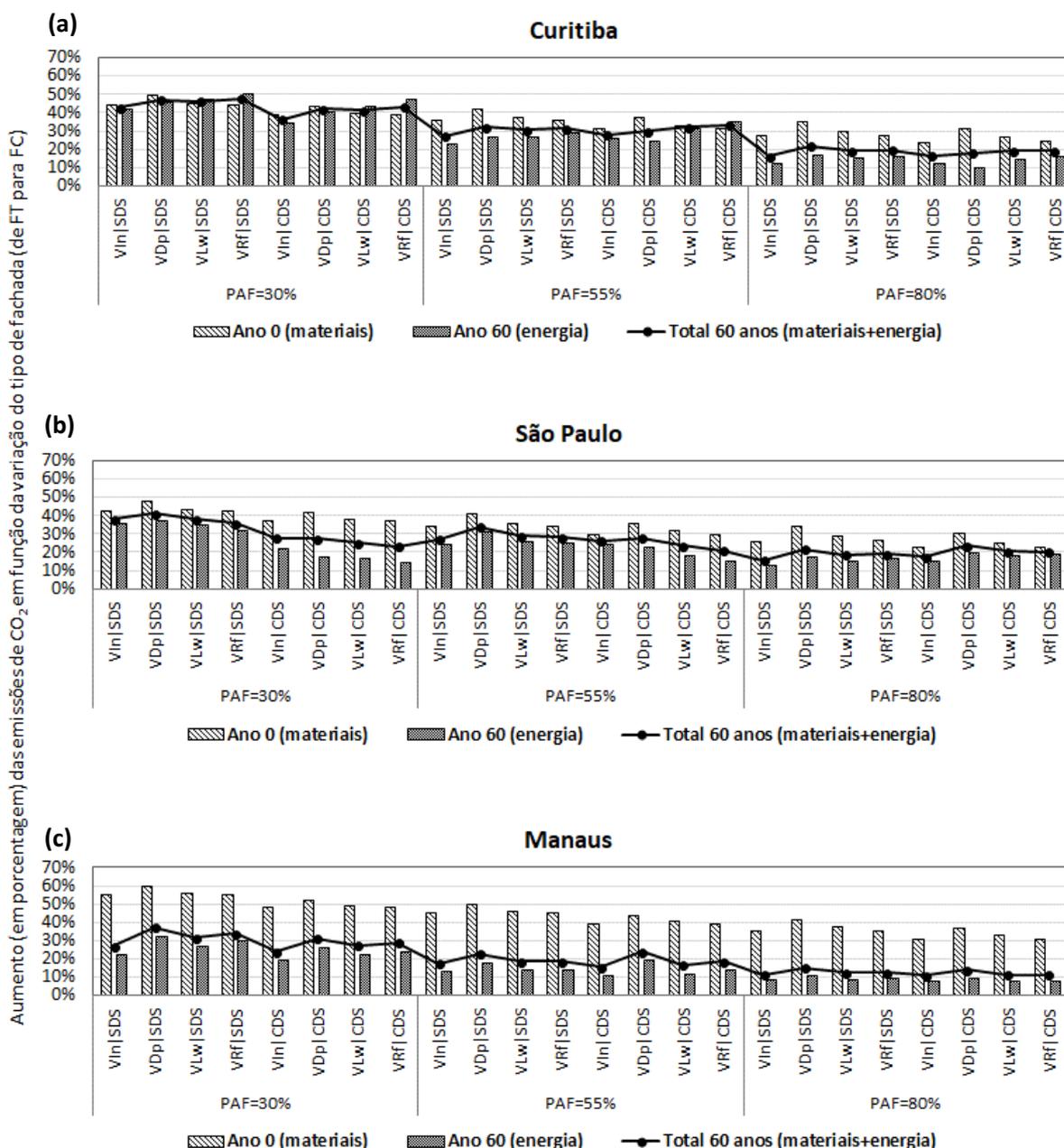
Fonte: A autora (2018).

A Figura 19 mostra que os materiais que mais contribuem para as emissões de CO₂ no caso da Fachada Tradicional são o alumínio, presente tanto na estrutura da esquadria quanto no dispositivo de sombreamento, o concreto (viga), e a argamassa (reboco e assentamento dos blocos). Na Fachada Cortina destacam-se ainda o alumínio, presentes na estrutura da pele de vidro (esquadria), o concreto (viga) e os vidros. Os processos industriais no Brasil consomem muita energia, causando grande impacto nas emissões de CO₂, e cujo grande responsável neste caso é o alumínio, fato também observado nos estudos de Taborianski e Prado (2012).

Como verificado no Capítulo 3, o desempenho energético durante o uso sofre influência direta da variação dos parâmetros referentes à fachada da edificação. A combinação de variados parâmetros pode gerar cenários com comportamentos energéticos bem diferentes. Da mesma forma, o impacto ambiental no pré-uso também sofre influência da variação de tais parâmetros, de acordo com o apresentado nas Figuras 16, 17 e 18. Com isso, pode-se afirmar com relação aos parâmetros:

- Tipo de Fachada: a Figura 20 apresenta a contribuição para as emissões de CO₂ quando se altera de uma Fachada Tradicional para uma Fachada Cortina. Pode-se notar que, para os três climas, fazer esse tipo de alteração causa um aumento nas emissões totais de CO₂, tanto na fase de pré-uso (ano zero, em que as emissões pertencem apenas à produção dos materiais), quanto na fase de uso (ano 60- pertencente ao consumo energético). E esse efeito ocorre, em maior parte, para todos os climas, nas menores aberturas (PAF de 30%), e decresce ligeiramente para as aberturas maiores. Isso acontece porque nas menores aberturas há um consumo energético menor (na fase de uso) e uma maior quantidade de parte opaca na fachada (mais kg de materiais), o que faz com que os impactos da fase de pré-uso sejam maiores nestes casos. Como também pôde ser visto nas Figuras 16 e 17, para os climas de Curitiba e São Paulo, a contribuição das emissões de CO₂ para as fases de pré-uso e uso são menos diferentes entre si do que no clima de Manaus. Como visto na Figura 18, é importante destacar que, como os consumos de energia (na fase de uso) são muito altos em Manaus, se comparado aos demais climas, o maior impacto – em qualquer cenário de fachada – advém majoritariamente da fase de uso. Dessa forma, o que se pode notar na Figura 20 é que, devido à condição explicitada anteriormente (maior contribuição da fase de uso nas emissões totais de CO₂), o grande impacto da mudança de tipo de fachada nas emissões de CO₂ se reflete, nestes casos, mais na fase de pré-uso (ano zero), do que ao longo dos 60 anos de utilização.

Figura 20: Aumento (em porcentagem) das emissões de CO₂ em função da variação do tipo de fachada (de FT para FC) para (a) Curitiba, (b) São Paulo e (c) Manaus.



Fonte: A autora (2018).

- Clima: neste parâmetro, a diferença entre os climas foi modelada, para a fase de pré-uso, a partir do transporte dos materiais até a localização da edificação e, para a fase de uso, pelo consumo energético em 60 anos de utilização. No entanto, os impactos advindos do transporte, nestes cenários, contribuíram com uma parte muito pequena das emissões. Nesse sentido, a maior diferença entre os climas, que contribuíram para as emissões de CO₂, advém majoritariamente da diferença de consumo energético advindo da fase de utilização, confirmando assim o que foi visto nas Figuras 16, 17 e 18. A Tabela 35 apresenta a contribuição do clima para as emissões de

CO₂ ao longo de 60 anos de vida útil da edificação. Assim, as maiores variações percentuais na quantidade de emissões ocorrem na Fachada Tradicional que, para o clima de Curitiba varia em torno de 86% do menor para o maior valor, correspondendo a 72% para São Paulo e 61% para Manaus. Como para a Fachada Cortina a contribuição dos materiais e do uso são maiores (e mais próximos entre si na fase de pré-uso, por conta do vidro) para as emissões de CO₂, sobretudo no clima de Manaus (que é o que mais contribui para as emissões), a porcentagem de variação do menor para ao maior valor não é tão expressiva como no caso da Fachada Tradicional. Neste caso, as variações se encontram na faixa de 52%, 60% e 37%, respectivamente para cada clima. Pode-se notar também que, de acordo com a variabilidade climática adotada para o estudo, quanto mais quente o clima, maiores foram os consumos energéticos (Capítulo 3) e, conseqüentemente, as emissões de CO₂.

Tabela 35: Contribuição para as emissões de CO₂ para os três climas, durante 60 anos de utilização.

Clima	POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL (60 anos) (kg CO ₂ eq/m ²)	POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL (60 anos) (kg CO ₂ eq/m ²)		Variação (%)
		Fachada Tradicional	Fachada Cortina	
CURITIBA	Mínimo	276,5	392,7	86,4/ 52,3
	Máximo	515,4	598,0	
SÃO PAULO	Mínimo	339,7	422,6	72,1/ 59,9
	Máximo	584,7	675,7	
MANAUS	Mínimo	686,6	901,8	61,7/ 37,1
	Máximo	1110,3	1236,0	

Fonte: A autora (2018).

- PAF: influencia diretamente as emissões de CO₂, de acordo com os dados apresentados na Tabela 36. Do ponto de vista dos materiais, o aumento da área envidraçada fez com que as emissões aumentassem, sobretudo na Fachada Tradicional, devido ao aumento da quantidade de vidro e, principalmente, do alumínio da estrutura da pele de vidro, conforme visto nas Figuras 19(a) e 19(b). Do ponto de vista do consumo energético, o aumento da área envidraçada faz com que haja maior exposição do edifício à radiação solar, responsável por aquecer mais o ambiente interior e elevar a temperatura interior, fazendo com que o consumo do ar condicionado aumente (Capítulo 3). Assim, é possível afirmar que as emissões de CO₂, ao longo de 60 anos, têm seu impacto ampliado de acordo com o aumento do PAF, fato também verificado por Komerska, Kwiatkowski e Rucińska (2015).

Tabela 36: Contribuição para as emissões de CO₂ ao longo de 60 anos em função da variação da PAF.

Climas	Tipo de Vidro (Disp.de Sombreamento)	CONTRIBUIÇÃO PARA AS EMISSÕES DE CO ₂ EM FUNÇÃO DA PAF			
		30% - 55%	55% - 80%	30% - 80%	
FACHADA TRADICIONAL	CURITIBA	In (SDS)	25,2%	32,9%	66,4%
		Dp (SDS)	21,0%	30,4%	57,8%
		Lw (SDS)	19,9%	28,6%	54,1%
		Rf (SDS)	17,6%	25,9%	48,0%
	SÃO PAULO	In (SDS)	22,1%	33,7%	63,3%
		Dp (SDS)	14,9%	33,0%	52,8%
		Lw (SDS)	15,4%	28,5%	48,3%
		Rf (SDS)	11,1%	24,4%	38,2%
	MANAUS	In (SDS)	13,3%	18,8%	34,5%
		Dp (SDS)	22,7%	19,5%	46,7%
		Lw (SDS)	18,6%	16,9%	38,6%
		Rf (SDS)	21,4%	16,7%	41,7%
FACHADA CORTINA	CURITIBA	In (SDS)	11,4%	21,4%	35,3%
		Dp (SDS)	8,5%	20,4%	30,6%
		Lw (SDS)	7,1%	17,4%	25,7%
		Rf (SDS)	4,6%	14,8%	20,0%
	SÃO PAULO	In (SDS)	12,2%	21,8%	36,7%
		Dp (SDS)	9,2%	20,6%	31,8%
		Lw (SDS)	7,7%	18,1%	27,2%
		Rf (SDS)	4,8%	15,7%	21,3%
	MANAUS	In (SDS)	4,9%	12,4%	17,9%
		Dp (SDS)	9,7%	12,1%	22,9%
		Lw (SDS)	6,9%	10,9%	18,5%
		Rf (SDS)	7,4%	10,6%	18,9%

*Os casos em negrito apresentam os maiores valores em porcentagem.

Fonte: A autora (2018).

- Tipo de vidro: a escolha do tipo de vidro pode influenciar as emissões de CO₂, tanto do ponto de vista da fase de pré-uso, quanto na fase de uso. Para a primeira fase, o modo de fabricação, a quantidade de massa (espessura e camadas) e elementos (películas e gases) presentes no tipo de vidro podem influenciar as emissões. E isso pôde ser visto no caso do vidro duplo, que contribuiu mais para a categoria ODP (por conta do gás argônio presente na cavidade do vidro), do que para o GWP. Do ponto de vista da fase de uso do edifício, a escolha do tipo de vidro influencia os ganhos de calor pela radiação solar, cujo reflexo disso pode ser observado no consumo de energia do ar condicionado, apresentado no Capítulo 3. Dessa forma, de acordo com o exposto na Tabela 37, e tendo como referência o vidro incolor, alterar o tipo de vidro pode causar uma redução nas emissões totais de CO₂, para os 60 anos de vida útil do edifício. Assim, os vidros que mais impactam as emissões de CO₂ totais, se

apresentam na seguinte ordem (do mais para o menos impactante): 1) Incolor; 2) Duplo, 3) *Low-e*; 4) Refletivo.

Tabela 37: Contribuição para as emissões de CO₂ totais ao longo de 60 anos em função da variação do tipo de vidro (ref.: vidro incolor 6mm)

EMISSÕES DE CO ₂ EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO TIPO DE VIDRO										
	CURITIBA			SÃO PAULO			MANAUS			
Tipo de Vidro (Dispositivo de Sombreamento)	30%	55%	80%	30%	55%	80%	30%	55%	80%	
FC	Dp (SDS)	-1,7%	-5,0%	-6,8%	-2,1%	-7,9%	-8,4%	-14,5%	-7,4%	-6,8%
	Lw (SDS)	-6,3%	-10,3%	-13,3%	-4,2%	-9,5%	-13,0%	-7,7%	-3,4%	-4,9%
	Rf (SDS)	-9,7%	-15,2%	-19,7%	-5,1%	-13,7%	-19,7%	-12,0%	-5,7%	-7,3%
EC	Dp (SDS)	1,3%	-1,3%	-2,2%	0,1%	-2,6%	-3,5%	-7,5%	-3,3%	-3,6%
	Lw (SDS)	-4,1%	-7,8%	-10,9%	-4,2%	-8,0%	-10,8%	-4,5%	-2,7%	-4,0%
	Rf (SDS)	-6,6%	-12,4%	-17,2%	-6,8%	-12,9%	-17,3%	-7,2%	-5,0%	-6,5%

*Os casos em negrito apresentam os maiores valores em porcentagem.

Fonte: A autora (2018).

- Dispositivo de sombreamento: a presença de um dispositivo de sombreamento, nos casos apresentados acima, aponta que, quando há esse tipo de estratégia projetual, a quantidade de materiais se eleva (no caso, o alumínio), então o impacto advindo da fase de pré-uso é ligeiramente maior. No entanto, ao se utilizar desse tipo de elemento, o consumo de energia é reduzido, uma vez que ele reduz a quantidade de ganhos de calor pela área envidraçada. Assim, ao longo da fase de uso, como o consumo de energia é menor, faz com que o impacto total seja reduzido, como pode ser verificado na Tabela 38. Assim, a presença do dispositivo de sombreamento reduz as emissões totais de CO₂ (em relação ao caso sem sombreamento) em até 20% para Curitiba, 19% para São Paulo e 9% para Manaus. Nos climas de Curitiba e São Paulo, a utilização do dispositivo de sombreamento foi mais efetiva nas maiores aberturas, com vidro incolor (confirmando os resultados apresentados no Capítulo 3) e em aberturas médias com vidro duplo, para o clima de Manaus.

Tabela 38: Contribuição para as emissões de CO₂ ao longo de 60 anos para os cenários com dispositivo de sombreamento (ref.: cenários sem dispositivo de sombreamento (SDS)).

Climas	Tipo de Vidro (Dispositivo de Sombreamento)	EMISSIONES DE CO ₂ NOS CENÁRIOS EM FUNÇÃO DO DISPOSITIVO DE SOMBREAMENTO (CDS)			
		30%	55%	80%	
FACHADA TRADICIONAL	CURITIBA	In (CDS)	-3,8%	-17,4%	-20,3%
		Dp (CDS)	-2,1%	-10,1%	-16,0%
		Lw (CDS)	-2,1%	-12,4%	-15,3%
		Rf (CDS)	-1,1%	-10,4%	-13,0%
	SÃO PAULO	In (CDS)	-4,1%	-18,3%	-20,4%
		Dp (CDS)	0,0%	-10,8%	-18,2%
		Lw (CDS)	0,0%	-11,0%	-17,6%
		Rf (CDS)	1,0%	-7,3%	-15,4%
	MANAUS	In (CDS)	-3,2%	-2,8%	-3,7%
		Dp (CDS)	-2,7%	-10,1%	-2,8%
		Lw (CDS)	-2,5%	-5,4%	-1,2%
		Rf (CDS)	-2,2%	-7,9%	-0,8%
FACHADA CORTINA	CURITIBA	In (CDS)	-8,1%	-16,9%	-20,1%
		Dp (CDS)	-5,5%	-11,5%	-18,7%
		Lw (CDS)	-5,4%	-11,5%	-15,4%
		Rf (CDS)	-4,2%	-9,0%	-13,3%
	SÃO PAULO	In (CDS)	-11,2%	-18,7%	-19,0%
		Dp (CDS)	-9,8%	-14,9%	-17,0%
		Lw (CDS)	-9,4%	-14,7%	-16,1%
		Rf (CDS)	-8,3%	-12,3%	-14,6%
	MANAUS	In (CDS)	-5,4%	-4,6%	-4,2%
		Dp (CDS)	-7,0%	-9,3%	-3,8%
		Lw (CDS)	-5,5%	-6,8%	-2,1%
		Rf (CDS)	-5,9%	-7,9%	-1,8%

*Os casos em negrito apresentam os maiores valores em porcentagem.

Fonte: A autora (2018).

4.2.4.2. Avaliação do estudo

Este estudo está de acordo com a norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a), sob os âmbitos da completudeza, sensibilidade e consistência.

A respeito da completudeza, destaca-se que não foram utilizados critérios de corte, para que o inventário pudesse ser o mais completo possível- considerando todos os materiais envolvidos em cada cenário de análise. O uso de bases secundárias – mais especificamente do *Ecoinvent*, garante que os dados aqui utilizados sejam internacionalmente reconhecidos e validados, obedecendo as premissas expostas na descrição do objetivo e escopo deste estudo.

Com relação à sensibilidade, conforme supracitado, os dados utilizados para o inventário do ciclo de vida advêm de base de dados secundárias confiáveis. No entanto, como são calculados para a realidade europeia, podem influenciar o resultado final da ACV, causando uma resposta diferente – se comparado às análises realizadas com processos calculados para a realidade brasileira. Para tanto, quando possível, os inventários de cada um dos processos foram editados, substituindo-se o processo

da energia elétrica consumida pelo correspondente ao mix energético brasileiro, contido nessa mesma base de dados.

No âmbito da consistência, foi afirmado que este estudo não atende a pressupostos de comparabilidade dos sistemas, uma vez que foi desenvolvido um estudo de ACV separadamente para cada cenário aqui apresentado. Os dados de consumo energético advêm de simulação computacional, a partir de um programa confiável (*EnergyPlus*), no Capítulo 3.

Por último, não foram necessárias alocações, uma vez que os dados de inventários, além de virem de bases de dados internacionalmente reconhecidas, são inventariados a partir de processos monofuncionais.

4.2.4.3. Conclusões, Limitações e Recomendações

A partir da avaliação realizada neste estudo, foi possível identificar quais foram os cenários que mais e menos impactaram em todas as categorias avaliadas. Destaca-se, neste aspecto, que o cenário mais impactante em todos os climas foi sempre o que possuía Fachada Cortina, com vidro incolor, sem dispositivo de sombreamento e aberturas grandes (PAF de 80%), e que a maior parte do impacto advindo deste cenário se deve à influência da fase de uso da edificação, pois como pôde ser visto no Capítulo 3, este cenário era o que possuía o maior consumo energético.

Do ponto de vista de todas as categorias de impacto ambiental, os cenários mais impactantes são idênticos, exceto pela categoria ODP, em que o cenário mais impactante é o que possui as mesmas características acima mencionadas, diferenciando-se neste aspecto pela presença do vidro duplo. A presença do gás argônio na cavidade desse de vidro pôde ter causado essa mudança nos resultados, já que esta categoria é medida em kg de KgCFC-11 equivalentes.

Dentre os parâmetros avaliados neste estudo (tipo de clima, PAF, tipo de vidro e dispositivo de sombreamento) que podem causar influência nas emissões de CO₂, destaca-se a influência do PAF, que foi o aspecto que apresentou maior impacto. Esse fato se justifica principalmente quando se altera de uma janela pequena (PAF de 30%), para uma janela grande (PAF de 80%), o que pode aumentar as emissões de CO₂ em até 66%, no caso da Fachada Tradicional, e 37%, no caso da Fachada Cortina.

Outro parâmetro que merece destaque é a presença do dispositivo de sombreamento. Apesar de causar um aumento na quantidade de alumínio, este dispositivo reduziu o consumo energético da edificação ao longo da vida útil. No balanço final, a utilização do dispositivo de sombreamento acabou por reduzir as emissões de CO₂ ao longo da vida útil da edificação.

Em relação às limitações do estudo, conforme supracitado na metodologia, todo o levantamento de dados advêm de bases de dados secundárias (*Ecoinvent*), devido à atual dificuldade

em se encontrar dados diretos da indústria brasileira. Outro aspecto é a não-adequação das soluções construtivas para que tenham um mesmo desempenho térmico, já que foram realizadas ACVs separadas para cada cenário. Para a fase de uso da edificação foram considerados apenas os consumos de energia advindos de simulações computacionais, excluindo-se os consumos advindos dos equipamentos e da iluminação artificial. Por último, devido à falta de um método voltado à realidade brasileira, a metodologia utilizada na AICV foi o CML que, embora tenha sido desenvolvido inicialmente para a realidade europeia, as categorias de impacto aqui utilizadas possuem uma abordagem global.

Entretanto, é preciso enfatizar que este estudo tem caráter relativo, isto é, os resultados indicam a relação dos materiais inventariados com os impactos ambientais potenciais. Não significa, portanto, que sejam impactos reais, pois não se pode afirmar com absoluta certeza de que irão ocorrer. Nesse sentido, é importante enfatizar que o impacto ambiental depende muito da fase de utilização da edificação e que os resultados previstos para essa fase (por simulação computacional), podem ser muito diferentes do comportamento real do edifício, pois o consumo de energia vai depender dos padrões de ocupação e principalmente do comportamento do usuário presente neste edifício. Mesmo assim, tais impactos, ainda que potenciais, podem ser o ponto de partida para uma mudança na visão de que escolhas inconscientes podem gerar consequências ruins ao futuro do planeta.

Portanto, é recomendado que, quando possível, se utilizem dados obtidos a partir de fontes primárias, fornecendo análises mais aprofundadas para que hajam menos desvios nos resultados e se aproximem ainda mais da realidade brasileira. Considerando que seja possível a utilização destes dados primários, seria interessante utilizar um método de caracterização dos impactos ambientais voltados à realidade brasileira, o qual até o momento ainda não foi desenvolvido.

4.3. DISCUSSÃO

Como contribuições desse estudo, foi possível notar que, para os cenários aqui apresentados, a fase de uso da edificação influenciou de sobremaneira os resultados em todas as categorias de impacto ambientais, para todos os climas. Dessa forma, investir em eficiência energética pode auxiliar na redução desses impactos ambientais negativos.

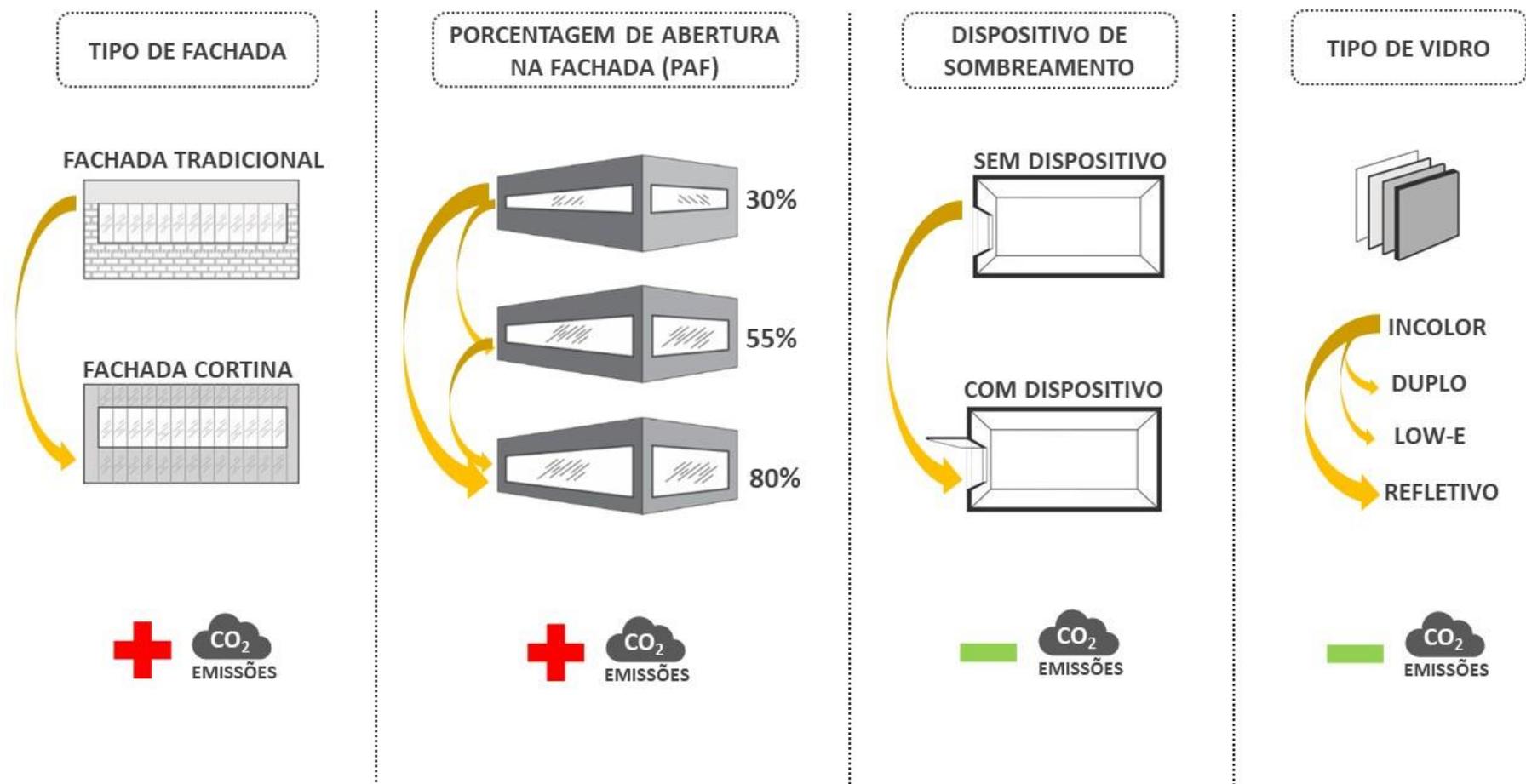
Do ponto de vista do Potencial de aquecimento global (GWP), em relação aos tipos de fachada aqui avaliados – Tradicional e Cortina -, pode-se afirmar que a utilização de fachadas totalmente envidraçadas causa um aumento significativo no consumo de energia do ar condicionado (conforme visto no Capítulo 3), e conseqüentemente um aumento das emissões de CO₂. Em relação aos climas, de acordo com o explicitado anteriormente, como a fase de uso (consumo energético) se sobrepõe à fase de pré-uso (materiais), quanto mais quente o clima, maior o uso do ar condicionado, e maiores as

emissões de CO₂. Em relação aos demais parâmetros da fachada aqui avaliados (PAF, tipo de vidro e dispositivo de sombreamento), o que teve maior impacto negativo, causando no aumento das emissões de CO₂ foi o PAF- quanto maior a área envidraçada na fachada, maiores as emissões-, e o que impactou positivamente foi o dispositivo de sombreamento, pois a sua utilização auxiliou tanto na redução do consumo energético quanto nas emissões de CO₂.

Portanto, conforme apresentado neste capítulo, os impactos ambientais estão diretamente relacionados ao nível de desempenho energético apresentado nas análises do capítulo anterior. Assim, o próximo Capítulo (5) irá abordar uma análise integrada dos resultados apresentados nos capítulos 3 e 4, aliando a essas análises o custo de cada cenário construtivo, de modo que se possa, com isso, gerar informações que possam ser divulgadas aos projetistas, auxiliando-os na tomada de decisão para se conscientizarem da importância das políticas de mitigação de impactos, desenvolvendo melhores projetos do ponto de vista energético, ambiental de custo.

A seguir, a figura 21 apresenta um diagrama que esquematiza os resultados desse capítulo.

Figura 21: Resultado das variações dos parâmetros da fachada nas emissões de CO₂



Fonte: A autora (2018).

   **CAPÍTULO 5.**

ANÁLISE INTEGRADA

5.1. ENQUADRAMENTO

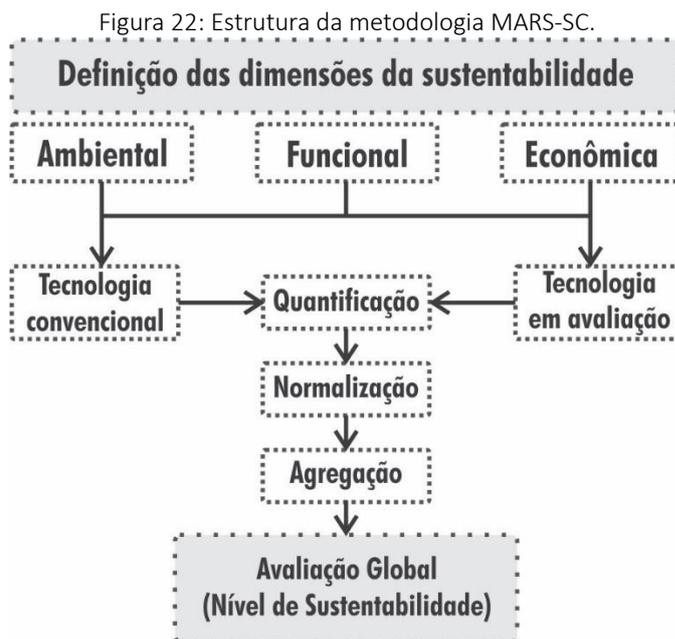
Nesta terceira etapa da pesquisa, foram aplicadas análises integradas, através das metodologias MARS-SC e Análise de Custo Ótimo, a fim de unir os resultados obtidos nas análises anteriores (Capítulos 3 e 4). Como não houve grandes diferenças em relação aos impactos ambientais dos cenários frente aos diferentes climas, optou-se por trabalhar nesta etapa da pesquisa apenas com os cenários presentes no clima de São Paulo. Esta cidade, capital econômica do país, é a que possui a maior representatividade desse tipo de edificação, o que justifica também os custos serem calculados apenas para estes cenários. Assim, as metodologias serão detalhadas e os resultados referentes à cada método, explicitados nos itens a seguir.

5.2. METODOLOGIA

Neste item são apresentadas as metodologias de análise integrada utilizadas neste estudo, sendo elas, a Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas (MARS-SC), desenvolvida por Mateus (2004); e a Análise de Custo Ótimo, desenvolvida pela Comunidade Europeia no âmbito da Diretiva 2010/31/EU (UNIÃO EUROPEIA, 2010).

5.2.1. MARS-SC

De acordo com Bragança e Mateus (2006), como a sustentabilidade é uma questão relativa, o desempenho de uma determinada solução em avaliação deve ser comparado à uma solução de referência específica de determinado local, pois assim, a solução avaliada sempre será melhor ou pior em relação à solução de referência. Nesse sentido, a Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas (MARS-SC), cuja estrutura é apresentada na Figura 22, foi desenvolvida para avaliar o nível de sustentabilidade das soluções construtivas, em comparação com o de uma solução de referência, que é a mais utilizada no local da análise. Esta metodologia pode considerar três dimensões: ambiental, funcional e econômica.



Fonte: Adaptado de Mateus et al. (2013).

A metodologia MARS-SC é um tipo de análise multicritério, que tem por objetivo resumir em um único valor o desempenho ambiental, social e econômico de cada cenário de construção, podendo ainda ser utilizada para caracterizar o nível de sustentabilidade de cada solução construtiva e hierarquizar os diferentes cenários. Esta metodologia é composta por cinco principais etapas, sendo estas:

1) Definição dos parâmetros: nesta fase são definidos o número e os tipos de indicadores que serão analisados para cada dimensão, conforme apresentado na Tabela 39. A definição de cada indicador depende dos objetivos da avaliação, das características das soluções construtivas avaliadas, do local, dos dados disponíveis e das exigências funcionais que devem ser supridas. Assim, para a presente pesquisa, foram selecionadas duas dimensões: ambiental e econômica. Os indicadores ambientais estão de acordo com as categorias de impacto apresentadas no Capítulo 4 (Tabela 33), aqui apresentadas na Tabela 41. Tais categorias são: 1) Potencial de Aquecimento Global; 2) Depleção do Ozônio na Camada Estratosférica (ODP); 3) Potencial de Acidificação (AP); 4) Potencial de Formação de Ozônio Troposférico (POCP); 5) Potencial de Eutrofização (EP), pertencentes ao método CML e 6) Potencial de Depleção Abiótica dos Recursos Fósseis (aqui representada pela quantificação da Parcela de Energia Não Renovável, advinda do método *Cumulative Energy Demand* - CED). O indicador econômico é representado pelo Custo do Ciclo de Vida (CCV) (formado pelo custo da construção somado ao custo de operação do edifício), cujo cálculo será detalhado na metodologia de Análise de Custo Ótimo.

Tabela 39: Indicadores que podem ser considerados em cada dimensão da MARS-SC.

DIMENSÕES		
AMBIENTAIS	FUNCIONAIS	ECONÔMICOS
Potencial de aquecimento global;	Isolamento sonoro a sons de condução aérea;	Custo de construção;
Energia primária incorporada;	Isolamento sonoro a sons de percussão;	Custo de manutenção;
Conteúdo reciclado;	Isolamento térmico;	Custo de reabilitação;
Potencial de reciclagem;	Durabilidade;	Custo de demolição;
Potencial de reutilização;	Comportamento ao fogo;	Valor residual;
Durabilidade;	Impermeabilidade;	Custo do tratamento para devolução ao ambiente natural.
Quantidade de matéria/recursos naturais utilizados;	Estabilidade;	
Toxicidade	Comportamento sísmico;	
Acidificação	Construtibilidade;	
Eutrofização das reservas de água;	Flexibilidade;	
Quantidade de água incorporada.	Inovação e desenho.	

Fonte: Adaptado de Bragança e Mateus (2006).

2) Quantificação dos indicadores: pode ser realizada de acordo com vários métodos, mas nesta pesquisa foi feita a partir do quantitativo de materiais presentes na Análise de Inventário do Ciclo de vida (ICV) dos cenários construtivos, dos quais foram obtidos os potenciais impactos ambientais por meio da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV). Assim, para a realização da MARS-SC foram utilizados os resultados da AICV para cada categoria de impacto - explicitados no Capítulo 4 -, e apresentados na Tabela 40, juntamente com o Custo do Ciclo de Vida (CCV), que será detalhado na Análise de Custo Ótimo. Tal quantificação é importante para que se possa fazer a comparação das soluções e uma avaliação precisa, podendo determinar se outras soluções são melhores ou piores que o caso de referência.

Tabela 40: Quantificação dos impactos ambientais relativos a cada cenário de análise.

CENÁRIOS		GWP	ODP	AP	POCP	EP	FFDP (ENR)	CCV
		(Kg CO ₂ eq./m ²)	(KgCFC-11 eq./m ²)	(Kg SO ₂ eq./m ²)	(Kg C2H4 eq./m ²)	(Kg PO ₄ eq./m ²)	(MJ/m ² /ano)	(R\$/m ²)
FT VIn SDS 30	C 1	357,99	0,000031	1,61	0,1377	0,5239	3811,81	1340,92
FT VDp SDS 30	C 2	350,54	0,000030	1,59	0,1342	0,5122	3720,85	1360,08
FT VLw SDS 30	C 3	343,09	0,000029	1,55	0,1313	0,5002	3642,47	1338,04
FT VRf SDS 30	C 4	339,66	0,000029	1,53	1,6587	0,4953	3600,24	1322,36
FT VIn CDS 30	C 5	343,32	0,000028	1,57	1,6978	0,4981	3622,58	1362,41
FT VDp CDS 30	C 6	350,48	0,000029	1,61	1,7403	0,5092	3700,33	1421,69
FT VLw CDS 30	C 7	343,25	0,000028	1,57	1,7018	0,4975	3624,53	1400,25
FT VRf CDS 30	C 8	342,97	0,000028	1,57	1,6964	0,4975	3618,49	1393,18
FT VIn SDS 55	C 9	437,26	0,000039	2,00	2,1777	0,6508	4760,45	1593,20
FT VDp SDS 55	C 10	402,85	0,000036	1,86	2,0214	0,5971	4353,95	1573,25
FT VLw SDS 55	C 11	395,85	0,000035	1,83	1,9814	0,5853	4287,50	1551,03
FT VRf SDS 55	C 12	377,34	0,000033	1,74	1,8827	0,5572	4068,62	1488,39
FT VIn CDS 55	C 13	357,04	0,000029	1,67	1,8033	0,5227	3814,35	1443,76
FT VDp CDS 55	C 14	359,39	0,000030	1,69	1,8284	0,5263	3832,32	1524,73
FT VLw CDS 55	C 15	352,38	0,000029	1,65	1,7883	0,5145	3765,67	1502,47
FT VRf CDS 55	C 16	349,79	0,000029	1,63	1,7682	0,5113	3730,70	1483,55
FT VIn SDS 80	C 17	584,68	0,000054	2,71	2,9436	0,8841	6496,30	2032,99
FT VDp SDS 80	C 18	535,68	0,000050	2,51	2,7217	0,8076	5916,87	2008,37
FT VLw SDS 80	C 19	508,65	0,000046	2,38	2,5803	0,7642	5626,04	1929,76
FT VRf SDS 80	C 20	469,35	0,000042	2,19	2,3755	0,7040	5164,73	1804,44
FT VIn CDS 80	C 21	465,67	0,000041	2,19	2,3777	0,6955	5102,32	1786,22
FT VDp CDS 80	C 22	437,93	0,000038	2,09	2,2608	0,6521	4768,43	1819,97
FT VLw CDS 80	C 23	419,37	0,000036	2,00	2,1611	0,6219	4575,35	1764,61
FT VRf CDS 80	C 24	397,11	0,000033	1,88	2,0404	0,5884	4310,78	1686,06
FC VIn SDS 30	C 25	494,38	0,000048	2,38	0,1927	0,7359	5415,45	2541,32
FC VDp SDS 30	C 26	494,66	0,000053	2,36	0,1916	0,7405	5431,41	2551,66
FC VLw SDS 30	C 27	473,78	0,000048	2,29	0,1838	0,7029	5209,48	2509,77
FC VRf SDS 30	C 28	460,93	0,000045	2,23	2,4079	0,6836	5048,72	2472,13
FC VIn CDS 30	C 29	438,83	0,000041	2,15	2,3200	0,6463	4754,12	2434,47
FC VDp CDS 30	C 30	445,99	0,000047	2,17	2,3360	0,6616	4849,67	2463,73
FC VLw CDS 30	C 31	429,09	0,000042	2,11	2,2746	0,6302	4673,64	2432,76
FC VRf CDS 30	C 32	422,57	0,000040	2,08	2,2400	0,6208	4585,87	2412,47
FC VIn SDS 55	C 33	554,77	0,000059	2,66	2,8772	0,8358	6186,40	2704,75
FC VDp SDS 55	C 34	540,21	0,000066	2,58	2,7960	0,8144	6065,82	2692,45
FC VLw SDS 55	C 35	510,38	0,000057	2,46	2,6631	0,7650	5714,07	2628,60
FC VRf SDS 55	C 36	483,24	0,000052	2,33	2,5247	0,7241	5378,70	2549,56
FC VIn CDS 55	C 37	450,89	0,000047	2,21	2,3860	0,6707	4967,12	2474,26
FC VDp CDS 55	C 38	459,98	0,000056	2,24	2,4215	0,6862	5119,61	2526,88
FC VLw CDS 55	C 39	435,47	0,000048	2,15	2,3149	0,6451	4829,39	2477,67
FC VRf CDS 55	C 40	423,71	0,000044	2,09	2,2523	0,6282	4671,52	2440,82
FC VIn SDS 80	C 41	675,69	0,000076	3,21	3,4804	1,0302	7657,63	3034,22
FC VDp SDS 80	C 42	651,72	0,000085	3,10	3,3629	0,9912	7463,82	3014,54
FC VLw SDS 80	C 43	602,88	0,000072	2,89	3,1284	0,9144	6865,69	2901,23
FC VRf SDS 80	C 44	559,02	0,000064	2,68	2,9054	0,8480	6327,33	2774,04
FC VIn CDS 80	C 45	547,26	0,000061	2,65	2,8681	0,8269	6154,92	2745,50
FC VDp CDS 80	C 46	540,62	0,000073	2,62	2,8361	0,8149	6161,30	2773,42
FC VLw CDS 80	C 47	505,92	0,000061	2,47	2,6714	0,7601	5726,30	2698,89
FC VRf CDS 80	C 48	477,15	0,000054	2,33	2,5228	0,7173	5362,23	2613,13

Fonte: A autora (2018).

3) Normalização dos indicadores: é um passo importante a ser realizado para evitar erros na escala de agregação dos parâmetros de cada indicador – utilizado para corrigir os valores. Para a normalização, é utilizada a equação 1 (DIAZ-BALTEIRO; ROMERO, 2004):

$$\bar{P}_i = \frac{P_i - P_{*i}}{P^*_i - P_{*i}} \quad \forall i$$

Em que:

Equação 1

- P_i = resultado da quantificação do parâmetro i .
- P^*_i e P_{*i} = respectivamente o melhor e pior resultado do parâmetro de sustentabilidade i .

Essa equação de normalização faz com que os valores relacionados aos indicadores sejam convertidos numa escala adimensional, na qual o valor 0 corresponde ao pior valor e o valor 1 corresponde ao melhor.

4) Agregação dos indicadores: nesta etapa, para a agregação de cada dimensão de sustentabilidade considerada, é utilizada a equação 2:

$$ND_j = \sum_{i=1}^n w_i \times \bar{P}_i$$

Equação 2

Em que:

- ND_j = resultado da média da ponderação de cada indicador normalizado P_i dentro da dimensão de sustentabilidade j
- w_i = peso dos indicadores i

Assim, a soma de todos os pesos deve ser igual a 1. A MARS-SC tem um padrão de pesos a ser considerado para cada indicador, que é apresentado na Tabela 41. Segundo Mateus et al. (2013), o peso relativo a cada indicador é baseado nos estudos realizados pela *United States Environmental Protection Agency* (EPA).

Tabela 41: Peso de cada indicador de sustentabilidade.

DIMENSÕES	INDICADORES	PESO (%)
Ambiental (100%)	Potencial de Aquecimento Global (GWP)	38,10
	Depleção do ozônio na camada estratosférica (ODP)	11,90
	Potencial de Acidificação (AP)	11,90
	Potencial de formação de ozônio troposférico (POCP)	14,30
	Potencial de Eutrofização (EP)	11,90
	Potencial de depleção abiótica dos recursos fósseis (FFDP) (representado pela quantificação da parcela de energia não-renovável)	11,90
Econômica (100%)	Custo do Ciclo de Vida (CCV)	100

Fonte: Adaptado de Mateus et al. (2013).

5) Determinação da Nota de Desempenho: a Nota de Desempenho representa o Perfil Sustentável de cada solução em relação ao caso de referência. Para a quantificação do desempenho global do edifício, é preciso associar um peso específico referente à cada dimensão (ambiental, social/funcional e econômico), de acordo com o apresentado na Tabela 42.

Tabela 42: Peso de cada dimensão na quantificação da nota sustentável de cada cenário de análise

DIMENSÕES	PESO (%)
Ambiental	40
Social	30
Econômica	30

Fonte: Adaptado de Mateus (2009)

Para esta pesquisa, em que apenas foram consideradas as dimensões ambiental e econômica, foi estabelecida uma nova relação de pesos, seguindo a seguinte proporção (mantendo a relação definida na tabela 42): 60% para o ambiental e 40% para o econômico.

Posteriormente, são agregados os pesos referentes a cada dimensão, conforme apresentado na equação 3, e a somatória desses valores será a nota sustentável.

$$NS = (D_{amb} \times P_{amb}) + (D_{soc} \times P_{soc}) + (D_{eco} \times P_{eco}) \quad \text{Equação 3}$$

Em que

- NS = Nota sustentável
- D = Dimensão (ambiental, social e econômica)
- P = Peso referente à cada dimensão

Esse perfil pode ser apresentado num gráfico do tipo radar, de maneira que a solução de referência é representada por uma linha traçada sobre o perfil de cada solução (Figuras 20 e 21). Assim, quanto mais próximo ao centro, pior será o nível de sustentabilidade da solução avaliada. Na Figura 23, o perfil sustentável da solução avaliada (área sombreada) é melhor que o caso de referência (linha traçada). Na Figura 24, a solução de referência é mais sustentável que o caso analisado.

Figura 23: Perfil sustentável (a solução em estudo é mais sustentável do que a solução de referência).

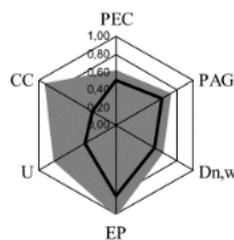
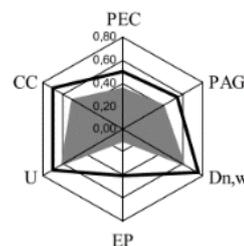


Figura 24: Perfil sustentável (a solução em estudo é menos sustentável do que a solução de referência).



Fonte: Adaptado de Bragança e Mateus (2006).

No caso da presente pesquisa, são apresentados todos os resultados para os 48 cenários avaliados para o clima de São Paulo, comparando-os entre si, destacando neste ponto o melhor e o pior, com relação à nota de sustentabilidade. Serão feitas comparações entre os resultados de acordo com a variação dos parâmetros já explorados nos Capítulos anteriores. Dessa forma, conforme apresentado, a MARS-SC pode ser considerada uma boa metodologia na análise de diversas soluções construtivas.

5.2.2. Análise de Custo Ótimo

No sentido de aliar a avaliação dos desempenhos energético e ambiental, um método introduzido pela Comunidade Europeia no Regulamento Delegado (UE) nº 244/2012 de 16 de janeiro de 2012 (UNIÃO EUROPEIA, 2012), complementando a Diretiva 2010/31/EU (UNIÃO EUROPEIA, 2010) do Parlamento Europeu e do Conselho de Desempenho Energético das Edificações, é a Análise de Custo Ótimo. O objetivo deste método é a identificação do nível de custo ótimo de desempenho energético da edificação, que pode ser alcançado por meio de um estudo comparativo de diferentes cenários de reabilitação energética. Ao mesmo tempo, apesar de ter se desenvolvido para este âmbito, este método também tem sido utilizado na comparação de diferentes cenários de envolvente dos edifícios ou de sistemas de climatização no projeto de novos edifícios. Com base no cálculo de energia primária não renovável, bem como o valor líquido dos custos totais (incluindo investimento, manutenção e energia) para cada cenário, podem ser criados gráficos para avaliar e comparar os resultados de cada alteração, identificando assim o ponto que representa o nível de custo ótimo de desempenho energético do edifício analisado (FERREIRA et al., 2014).

De acordo com Baglivo et al. (2015), custo ótimo significa a escolha de soluções eficientes de energia com custo mínimo do ciclo de vida. A introdução deste conceito é inovadora, uma vez que existem muitos estudos que se concentram na redução do consumo de energia dos edifícios para atingir uma meta de energia zero, porém poucos consideram o custo ótimo. E esta "otimização de custos" é um dos conceitos-chave no âmbito da atual política da União Europeia que relaciona desempenho energético dos edifícios, mitigação das alterações climáticas e consumo de recursos não-renováveis (FERREIRA et al., 2014).

O nível de custo ótimo é definido como "o nível de desempenho energético que leva ao custo mais baixo durante o ciclo de vida econômico estimado". De acordo com o artigo 5 da EPBD (*Energy Performance of Buildings Directive*) (UNIÃO EUROPEIA, 2010), os custos de investimento relacionados com a energia, manutenção, baixos custos operacionais e, quando necessário, custos para eliminação e substituições, devem ser considerados na análise. O regulamento nº 244/2012 (UNIÃO EUROPEIA, 2012) descreve a metodologia a ser seguida para estabelecer a relação de custo ótimo do ponto de vista

técnico e econômico. O método abrange tanto os edifícios novos quanto os já existentes (em casos de *retrofit*) (CONGEDO et al., 2015).

A metodologia para estabelecer o nível de custo ótimo é definida em etapas, que consistem em:

1) Definir um edifício de referência: que pode conter as características mais comuns aplicadas ao mercado atual da construção ou o mais característico da região. No caso desta pesquisa, tomou-se como referência o cenário com pior desempenho global na avaliação da MARS-SC (que será apresentado no próximo item, ou seja, o C41 (Fachada Cortina, com vidro incolor, sem dispositivo de sombreamento e PAF de 80%).

2) Definir medidas de eficiência energética: através do estabelecimento de cenários de análise com variações nas características desta edificação. Foram utilizados como medidas de eficiência energética a variação dos parâmetros da fachada, apresentados no Capítulo 3.

3) Avaliar a necessidade de energia final e primária do edifício de referência: nesta pesquisa, o uso de energia final é configurado pelo consumo de energia com o sistema de ar condicionado para os 60 anos de utilização do edifício, enquanto que a energia primária foi obtida através da análise do inventário de ciclo de vida, através do método CED, conforme discutido no Capítulo 4.

4) Calcular os custos das medidas de eficiência energética: podem ser calculados os custos durante o ciclo de vida econômico previsto (considerando os custos de investimento, manutenção e operacionais), fazendo uma avaliação integrada do desempenho energético e dos custos globais da edificação (BPIE, 2013). Os cálculos do custo global da edificação podem ser realizados sob várias perspectivas, sendo as mais importantes a macroeconômica e a microeconômica. A primeira inclui os custos de emissões de CO₂ e não incluem impostos e subsídios. Já a segunda está relacionada ao nível financeiro. Segundo o Regulamento Delegado (UE) nº 244/2012 (UNIÃO EUROPEIA, 2012), para o cálculo do custo ótimo a nível macroeconômico, a categoria de custos globais deve ser ampliada, definindo o custo das emissões de gases de efeito de estufa como o valor monetário dos danos ambientais causados pelas emissões de CO₂, relacionados com o consumo de energia de um edifício.

Para a presente pesquisa, sob a perspectiva microeconômica (financeira), foi considerada a somatória dos custos da construção (em R\$/m²) e os operacionais (custo da energia em R\$/kWh, multiplicada pelo consumo do sistema de ar condicionado – em kWh/m². ano) para os 60 anos de utilização do edifício. Dessa forma, os custos globais- aqui considerados como Custo do Ciclo de Vida (CCV), seguem a equação 4:

$$CCV = CC + \sum_{i=1}^{\tau} CO \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

- CCV = Custo do Ciclo de Vida
- τ = tempo de vida útil da edificação que, neste caso, corresponde a 60 anos
- CC = custo da construção, contabilizado em R\$/m² de área útil (conforme explicitado na unidade declarada da ACV- Capítulo 4)
- CO = custo de operação, isto é, o custo da energia (em R\$/kWh), multiplicado pelo consumo energético do sistema de ar condicionado (contabilizado em kWh/m². ano)

Em relação ao custo da construção, foi utilizado o custo de cada cenário relacionado aos materiais (em R\$/m²) e à operação do edifício, representado pelo custo da energia consumida pelo sistema de ar condicionado (R\$/kWh/m². ano). O cálculo do custo de construção, relacionado apenas aos materiais referentes à cada cenário de análise, foi obtido com base em um primeiro levantamento junto ao escritório que realizou o detalhamento da Fachada Cortina (*Visual Urban*). O custo dos tipos de vidros foi obtido junto aos fornecedores (*Guardian e Centervidros*) e o cálculo da parte opaca (alvenaria e concreto), foi realizado junto à Companhia Paulista de Obras e Serviços (CPOS), através do Boletim Referencial de Custos (Tabela de serviços sem desoneração), vigente a partir de 01/03/2017.

Para o cálculo do custo anual de energia elétrica, foi utilizado- com base na tarifa considerada pela empresa Eletropaulo para esse tipo de edificação-, o valor de R\$ 0,5984/kWh¹⁹. Como foi preciso considerar o custo da energia ao longo da vida útil da edificação, isto é, durante 60 anos, foi preciso encontrar um índice de reajuste anual para essa tarifa. Segundo vários autores (ANEEL, 2017; BRITO, 2017; CARÇÃO, 2011), a tarifa de energia elétrica é reajustada anualmente e acompanha a variação de índices como o Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) e o Índice Geral de Preços do Mercado (IGPM). Para a presente pesquisa, foi feito um levantamento nas bases de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) da variação do IPCA nos últimos 10 anos e chegou-se a uma média de variação anual na faixa de 5,89% ao ano. Esse valor foi utilizado para o reajuste anual da tarifa de energia elétrica utilizada neste trabalho. Considerando que, para o primeiro ano de operação do edifício não há a aplicação da taxa de reajuste, o custo operacional referente aos demais anos seguirá a equação 5:

$$CO(\tau) = (E_{ac} \times C_{ee})_{\tau-1} + (R_a \times CO_1) \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

- CO(τ)= custo de operação ao longo do período τ , neste caso do ano 2 ao 60
- E_{ac} = consumo anual do ar condicionado, em kWh/m². ano

¹⁹ Disponível em: <<https://www.aeseletropaulo.com.br/para-sua-casa/prazos-e-tarifas/conteudo/tarifa-de-energia-eletrica>>. Acesso em 6 de nov. de 2017.

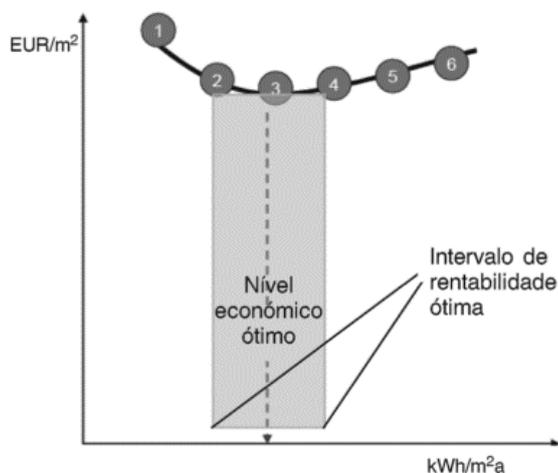
- C_{ee} = custo da energia elétrica, em R\$/kWh
- R_a = Taxa de reajuste anual, neste caso 5,89% ($1+0,0589$), referente ao IPCA
- CO_1 = Consumo operacional referente ao ano 1, ou seja, é o consumo do ar condicionado multiplicado pelo custo da energia elétrica

A Comissão Europeia define que o número mínimo de combinações não deve ser menor que 10 cenários, mais o caso de referência, para se obter uma solução otimizada dos custos (CONGEDO et al., 2015). Essa medida contribui para que os vários cenários estabeleçam uma linha que represente a curva de custo, podendo assim revelar o ponto ótimo (BPIE, 2013).

Dessa forma, a partir dos cálculos da utilização de energia primária (etapa 3) e dos custos globais (etapa 4) associados aos diversos cenários (etapa 2) avaliados para o edifício de referência definido (etapa 1), podem ser elaborados gráficos para o edifício de referência que descrevam a utilização de energia primária e os custos globais das diversas soluções. A partir do número de cenários avaliados, é possível elaborar uma curva de custos, conforme apresentada na Figura 25 (UNIÃO EUROPEIA, 2012).

O ponto mais baixo da curva corresponde ao custo mais baixo, isto é, o custo ótimo frente aos custos e ao desempenho energético. De acordo com o anexo I do Regulamento nº 244/2012 (UNIÃO EUROPEIA, 2012), no caso de os pacotes terem custos idênticos ou semelhantes, o que tiver a menor utilização de energia primária definirá o nível do custo ótimo.

Figura 25: Relação entre os Cenários estabelecidos e a Análise de Custo Ótimo.



Fonte: Adaptado de União Europeia (2012).

De acordo com Congedo et al. (2015), uma série de parâmetros pode alterar a forma da curva, entre eles as características geométricas da edificação, os dados sobre preços da energia, taxas de descontos, e os custos. Por estes motivos, pode-se realizar uma análise de sensibilidade nos resultados para reduzir a variabilidade dentro do cálculo.

5.3. RESULTADOS

Neste item são apresentadas as análises referentes às duas metodologias mencionadas anteriormente, a MARS-SC e a Análise de Custo Ótimo.

5.3.1. MARS-SC

Para a realização da MARS-SC, de acordo com os passos apresentado na metodologia, a quantificação dos insumos foi obtida através do inventário realizado na ACV (Capítulo 4). Para os indicadores- ambiental e econômico-, foram selecionadas as categorias de impacto ambiental utilizadas na ACV (aqui apresentadas na Tabela 41) e os custos de construção e operacionais (que somados representam o Custo do Ciclo de vida – CCV²⁰), os quais foram calculados de acordo com a equação 5 e detalhados nos resultados da Análise de Custo Ótimo.

Para as etapas de agregação e normalização, teve-se como base o quantitativo de materiais apresentado na Tabela 23. Inicialmente, os valores foram agregados de acordo com os valores máximos e mínimos presentes em cada indicador. Após essa etapa, foi realizada a normalização, de acordo com os pesos referentes à cada indicador, apresentados na Tabela 41. Por último, foi realizada a determinação da nota sustentável, que correlaciona os dois indicadores (ambiental e econômico), de acordo com o peso de cada um. Para a presente pesquisa foi necessário se fazer um ajuste no peso relacionado a cada indicador, pois não se considerou as três dimensões (ambiental, social e econômica). Inicialmente, os indicadores ambientais, sociais/funcionais e econômicos recebem o seguinte peso: 30%, 50% e 20%, respectivamente (BARBOSA; BRAGANÇA; MATEUS, 2012). Como o âmbito social/funcional foi excluído neste estudo, a nova relação de pesos para a quantificação do desempenho global do edifício (nota sustentável), segue a seguinte proporção (mantendo a relação de pesos definida a partir da metodologia MARS-SC): 60% para o ambiental e 40% para o econômico.

A Tabela 43 apresenta os resultados normalizados para todas as dimensões, juntamente com a nota sustentável. Os valores normalizados para todos os indicadores são apresentados no Apêndice F. A definição das siglas referentes a cada cenário está na Tabela 34 (Capítulo 4). Foi aplicado um *heatmap*, em que as cores mais próximas do verde – valores próximos a um-, são os que apresentam o melhor desempenho, enquanto as cores mais próximas ao vermelho – valores próximos à zero, representam o pior desempenho.

²⁰ O detalhamento e a representatividade das parcelas de cada custo (de construção e operacional) no CCV é apresentado na Figura 26, nos resultados da Análise de Custo Ótimo.

Tabela 43: Valores normalizados para as dimensões ambiental e econômica, e a nota sustentável

CENÁRIOS		DIMENSÕES		
		Ambiental	Econômica (CCV)	Nota Sustentável (NS)
FT VIn SDS 30	C 1	0,955	0,989	0,969
FT VDp SDS 30	C 2	0,972	0,978	0,974
FT VLw SDS 30	C 3	0,990	0,991	0,990
FT VRf SDS 30	C 4	0,933	1,000	0,960
FT VIn CDS 30	C 5	0,925	0,977	0,946
FT VDp CDS 30	C 6	0,906	0,942	0,920
FT VLw CDS 30	C 7	0,925	0,954	0,937
FT VRf CDS 30	C 8	0,926	0,959	0,939
FT VIn SDS 55	C 9	0,677	0,842	0,743
FT VDp SDS 55	C 10	0,764	0,853	0,800
FT VLw SDS 55	C 11	0,782	0,866	0,816
FT VRf SDS 55	C 12	0,831	0,903	0,860
FT VIn CDS 55	C 13	0,884	0,929	0,902
FT VDp CDS 55	C 14	0,876	0,882	0,879
FT VLw CDS 55	C 15	0,895	0,895	0,895
FT VRf CDS 55	C 16	0,903	0,906	0,904
FT VIn SDS 80	C 17	0,293	0,585	0,409
FT VDp SDS 80	C 18	0,416	0,599	0,489
FT VLw SDS 80	C 19	0,487	0,645	0,550
FT VRf SDS 80	C 20	0,589	0,718	0,641
FT VIn CDS 80	C 21	0,599	0,729	0,651
FT VDp CDS 80	C 22	0,668	0,709	0,685
FT VLw CDS 80	C 23	0,717	0,742	0,727
FT VRf CDS 80	C 24	0,776	0,788	0,780
FC VIn SDS 30	C 25	0,613	0,288	0,483
FC VDp SDS 30	C 26	0,602	0,282	0,474
FC VLw SDS 30	C 27	0,658	0,306	0,517
FC VRf SDS 30	C 28	0,596	0,328	0,489
FC VIn CDS 30	C 29	0,655	0,350	0,533
FC VDp CDS 30	C 30	0,627	0,333	0,510
FC VLw CDS 30	C 31	0,676	0,351	0,546
FC VRf CDS 30	C 32	0,696	0,363	0,563
FC VIn SDS 55	C 33	0,343	0,192	0,283
FC VDp SDS 55	C 34	0,362	0,200	0,297
FC VLw SDS 55	C 35	0,451	0,237	0,365
FC VRf SDS 55	C 36	0,526	0,283	0,429
FC VIn CDS 55	C 37	0,612	0,327	0,498
FC VDp CDS 55	C 38	0,570	0,296	0,460
FC VLw CDS 55	C 39	0,644	0,325	0,517
FC VRf CDS 55	C 40	0,680	0,347	0,547
FC VIn SDS 80	C 41	0,020	0,000	0,012
FC VDp SDS 80	C 42	0,054	0,011	0,037
FC VLw SDS 80	C 43	0,197	0,078	0,149
FC VRf SDS 80	C 44	0,319	0,152	0,252
FC VIn CDS 80	C 45	0,351	0,169	0,278
FC VDp CDS 80	C 46	0,341	0,152	0,265
FC VLw CDS 80	C 47	0,447	0,196	0,347
FC VRf CDS 80	C 48	0,530	0,246	0,416

Fonte: A autora (2018).

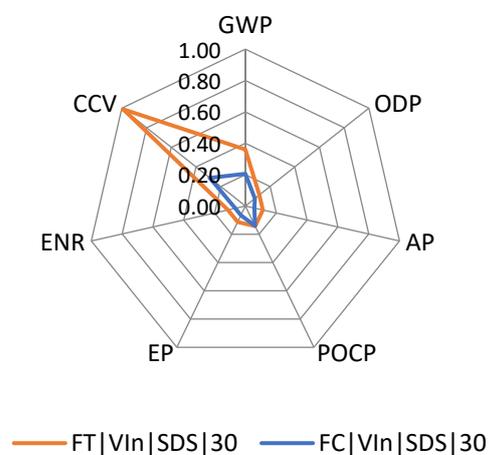
Dentre todos os cenários apresentados na Tabela 43, destacam-se o C3, como o que possui melhor nota sustentável, e o C41, com a pior nota. O primeiro (C3) é constituído por Fachada Tradicional, com vidro *low-e*, sem dispositivo de sombreamento e PAF de 30%. O segundo (C41) constitui-se por Fachada Cortina, com vidro incolor, sem dispositivo de sombreamento e PAF de 80%.

Entretanto, ao se observar os valores dos cenários em todas as dimensões, é possível notar que, em termos ambientais, o C3 destaca-se com a maior nota, porém em relação à dimensão econômica, o C4 aparece com a maior nota. Este é constituído pelas mesmas características do C3, diferenciando-se apenas pelo vidro (refletivo). Contudo, como o sistema de pesos para cada dimensão considera 60% da nota para o ambiental e 40% para a econômica, no resultado prevaleceu o que possuía maior nota em termos ambientais.

Em relação aos parâmetros da fachada, avaliados nos capítulos anteriores, nota-se que o tipo de fachada influencia claramente o desempenho (ambiental e econômico) dos cenários apresentados. É possível notar, pela diferenciação das cores, que a Fachada Tradicional apresenta um desempenho superior (cor verde, que representa valores próximos a um) em ambas as dimensões, se comparada à Fachada Cortina (cenários na cor vermelha, mais próximos a zero). Isto significa dizer que a Fachada Tradicional não é apenas mais barata que a Fachada Cortina, como também é melhor ambientalmente. Destaca-se, nesse aspecto, a dimensão econômica, que muda drasticamente de cor quando se altera o tipo de fachada. O PAF também é um dos parâmetros que diferencia o desempenho dos cenários em ambas as dimensões: quanto maior o PAF, pior a nota sustentável. Tais constatações vão de encontro às questões discutidas nos capítulos anteriores (3 e 4).

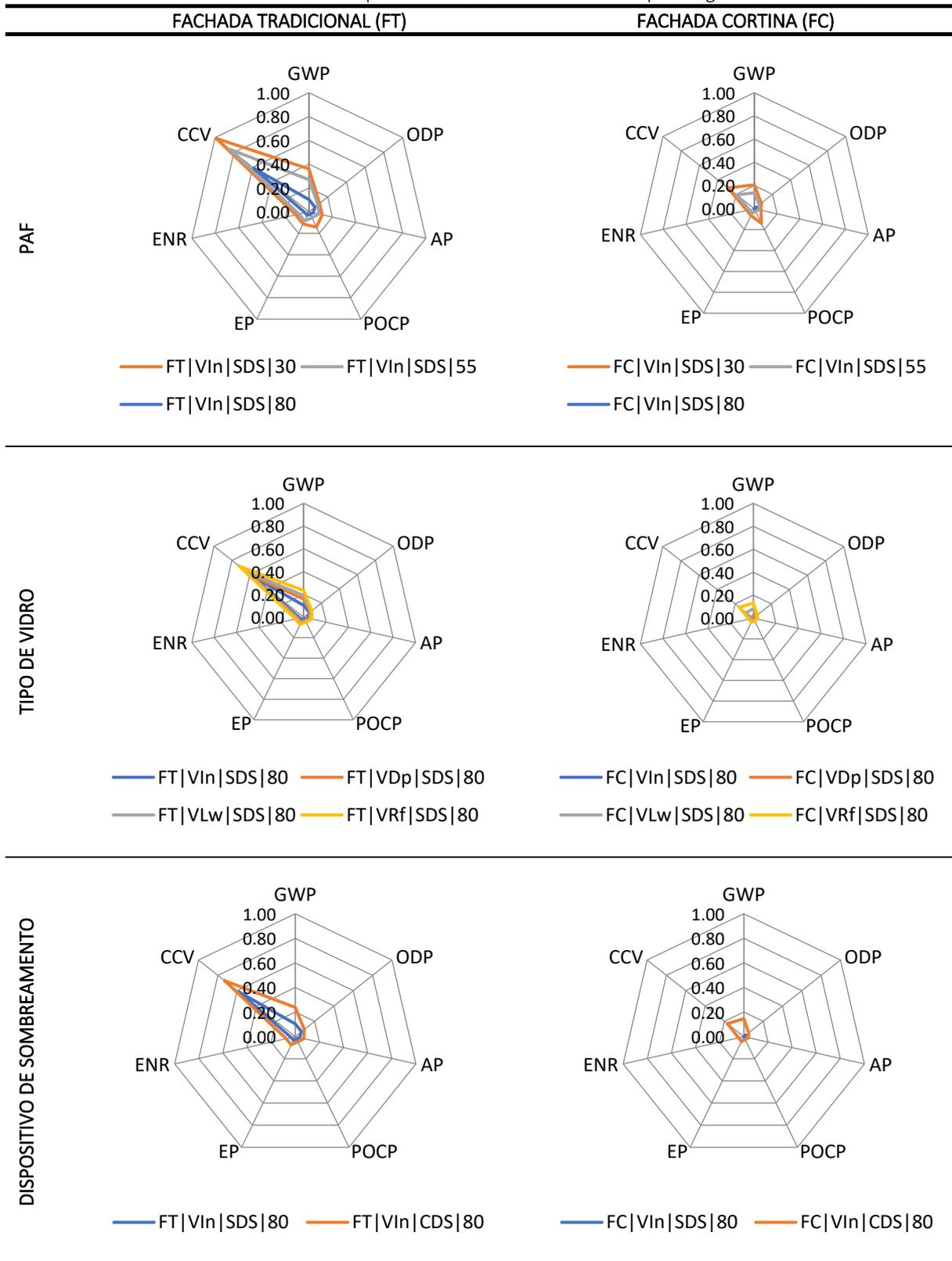
Assim, na Figura 26 pode-se notar a diferença do desempenho global com relação às Fachadas Tradicional e Cortina, no gráfico do tipo radar. Quanto mais próximo a linha estiver do centro do gráfico, pior será o seu desempenho global. Neste caso, a Fachada Cortina se mostra como pior em termos ambientais e econômicos. A influência dos demais parâmetros é apresentada na Tabela 44.

Figura 26: Diferença entre as Fachadas Tradicional e Cortina, no desempenho global da MARS-SC.



Fonte: A autora (2018).

Tabela 44: Influência dos parâmetros da fachada no desempenho global da MARS-SC.



Fonte: A autora (2018).

Na Tabela 44 nota-se a influência da PAF, do tipo de vidro e do dispositivo de sombreamento. No caso da PAF, quanto maior, pior o desempenho global do cenário avaliado, para ambos os tipos de fachadas. Nesse aspecto destaca-se os cenários com Fachada Cortina, em que é possível identificar

claramente as diferenças entre as três PAFs no desempenho global.

Em relação ao tipo de vidro, procurou-se observar os cenários que possuíam a maior PAF, em que a presença o vidro tem mais destaque. Assim, é possível notar que o vidro com melhor desempenho global é o Refletivo, para ambos os tipos de fachadas. No caso da Fachada Tradicional, as diferenças entre os tipos de vidros não se destacam tanto no gráfico quanto no caso da Fachada Cortina. Neste caso é possível ver claramente a ordem do melhor para o pior desempenho, sendo: 1º) Refletivo; 2º) *Low-e*; 3º) Duplo e 4º) Incolor. Ainda assim, é importante se destacar que o cenário com melhor nota sustentável foi o que possuía vidro *low-e*²¹, porém trata-se de um cenário com PAF pequena (30%), no qual a diferença entre os parâmetros (tipo de vidro e presença ou não de dispositivo de sombreamento) não fica tão evidente quanto nos cenários com aberturas maiores, conforme verificado nos capítulos anteriores (3 e 4).

Da mesma forma, a presença do dispositivo de sombreamento nas menores aberturas (30%) não diferencia tanto os cenários, a não ser pelo custo de construção (detalhado na Figura 26, da Análise de Custo Ótimo). Tanto, que o cenário com melhor nota sustentável não apresenta esse tipo de dispositivo. Diferencia-se, neste caso, o cenário com maiores aberturas (PAF de 80%) e vidro incolor, no qual a influência da presença do dispositivo de sombreamento é mais evidente. Este é o cenário em que há maior transmissão de radiação solar para o ambiente interno, no qual a presença do dispositivo de sombreamento é imprescindível. Assim, conforme discutido no Capítulo 4, em que a presença do dispositivo de sombreamento causou uma redução dos impactos ambientais potenciais – sobretudo nas maiores aberturas-, vê-se que esse fato se confirma na análise integrada pela MARS-SC. Ainda que a presença do dispositivo de sombreamento cause um aumento na quantidade de materiais e, conseqüentemente, no custo de construção (CC), o fato de ele contribuir para a redução do consumo energético na fase de uso (reduzindo assim, o custo de operação do edifício), faz com que o custo do ciclo de vida seja reduzido também. Assim, os cenários com dispositivo de sombreamento, em ambos os tipos de fachada, causam uma melhora no desempenho global da edificação. E esse fato tem principal destaque no caso da Fachada Cortina.

Assim, através da análise integrada pela MARS-SC, foi possível identificar os cenários com melhor e pior desempenho global, considerando as dimensões ambiental e econômica. Foi possível notar que, para se ter um bom desempenho nestes termos, é necessário que a fachada seja do tipo Tradicional,

²¹ Dentre as categorias de impactos ambientais consideradas para a MARS-SC, o vidro *low-e* contribuiu mais para a categoria POCP do que os demais vidros. Dentro da distribuição de pesos utilizada na MARS-SC (Tabela 41), essa categoria é a segunda de maior peso, seguida pela GWP, para obtenção da nota ambiental. Por conta disso, ainda que o vidro refletivo tenha notas maiores em todas as outras categorias (como pode ser visto no Apêndice F), ele perde para o *low-e* neste caso, por ter uma menor contribuição na categoria POCP, o que faz ele ter uma nota ambiental menor no final.

com janelas pequenas (PAF de 30%). Em relação ao cenário de pior desempenho ambiental, é o que possui Fachada Cortina com a maior janela (PAF de 80%).

Considerando o que foi avaliado nos capítulos anteriores, em termos de classificação energética, esses dois tipos de cenário são os que consomem, respectivamente, menor e maior quantidade de energia elétrica com o uso do ar condicionado. E, em termos de custos, a questão econômica não alterou esse quadro, pois, em linhas gerais, os piores materiais, em termos ambientais, também são os mais caros. Assim, quando se tem como premissa de projeto obter o menor consumo energético, isso poderá influenciar positivamente no desempenho global da edificação. Consumir menos significa ter que produzir menos energia e emitir menos CO₂ ao meio ambiente, podendo reduzir os potenciais impactos ambientais de maneira geral.

5.3.2. Análise de Custo Ótimo

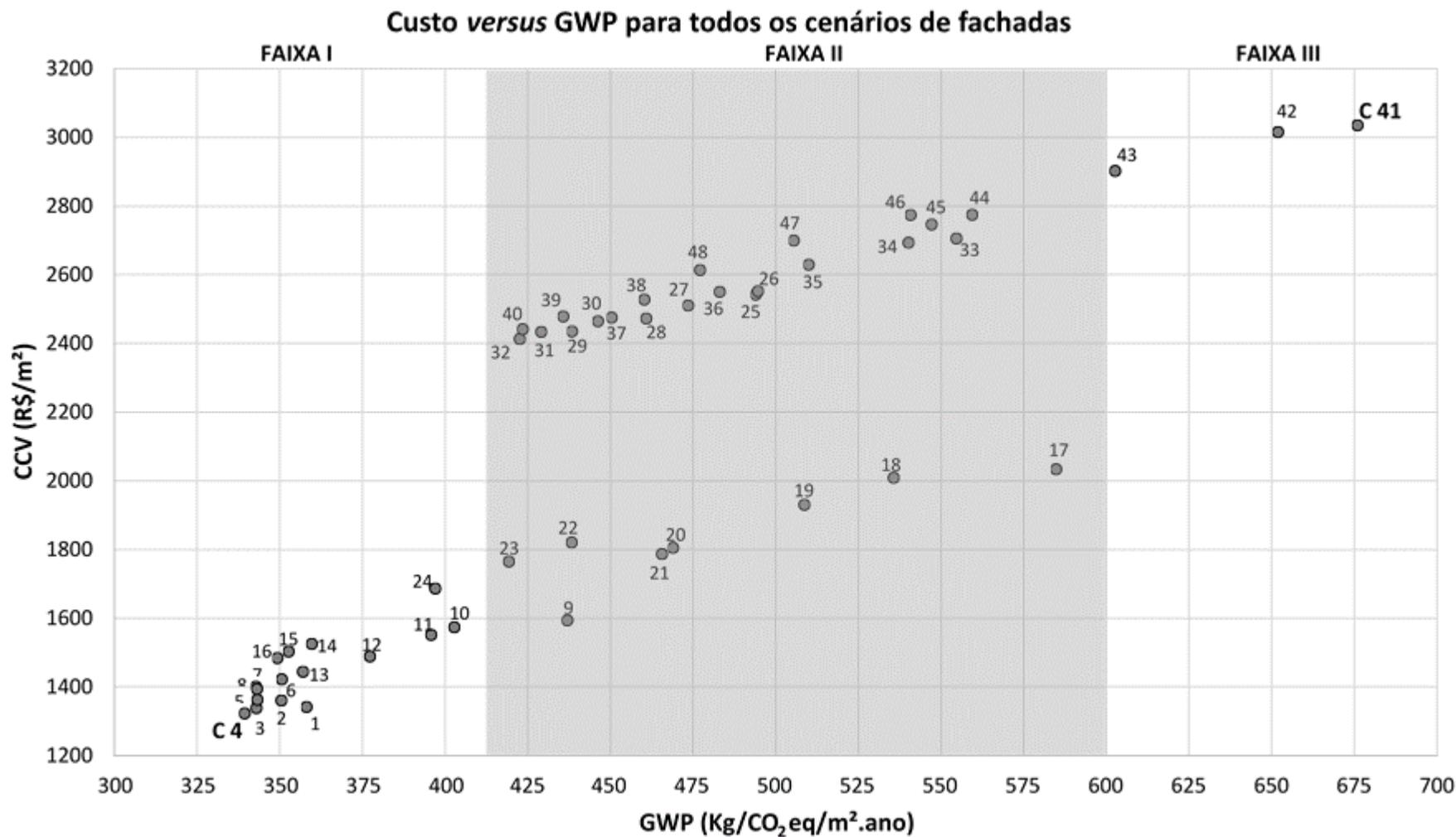
Conforme descrito em método, para a realização da Análise de Custo Ótimo, é necessário a definição de um modelo de edifício de referência, que pode ser o que é comumente construído, considerando o mercado atual da construção civil. A partir disso, medidas de eficiência energética, isto é, pacotes de alterações são definidos para essa edificação, para se alcançar o menor consumo energético. Ao mesmo tempo, são calculados os custos para construção (CC) e o custo de operação (CO) de cada cenário, que juntos compõem o Custo do Ciclo de Vida (CCV).

Para esta etapa da pesquisa definiu-se como referência o cenário que obteve o pior desempenho global nas análises da MARS-SC. O cenário C 41, composto por Fachada Cortina, com vidro incolor, sem dispositivo de sombreamento e com PAF de 80% é o que obteve o maior consumo energético em relação aos demais cenários, conforme descrito no Capítulo 3.

Como medidas de eficiência energética, definiu-se aqui as alterações já previstas para a fachada – alterações no tipo de fachada, tipo de vidro, presença ou não de dispositivo de sombreamento e variações na porcentagem de abertura na fachada. Para estas variações, foram contabilizados o consumo de energia primária total (E_{total}) (composto pelo consumo de energia renovável e não renovável), para as fases de construção e uso do edifício, e a contribuição para o Potencial de Aquecimento Global (GWP) para ambas as fases, através da avaliação de impacto ambiental descrita no Capítulo 4. Ao mesmo tempo, os custos correspondentes à estas alterações foram calculados – conforme descrito em método -, sendo aqui representados pelo custo da construção e de operação (referente ao consumo do ar condicionado em 60 anos de utilização do edifício). Os valores referentes ao GWP, consumo de recursos energéticos (E_{total}) e custo (CC e CO) são apresentados no Apêndice G.

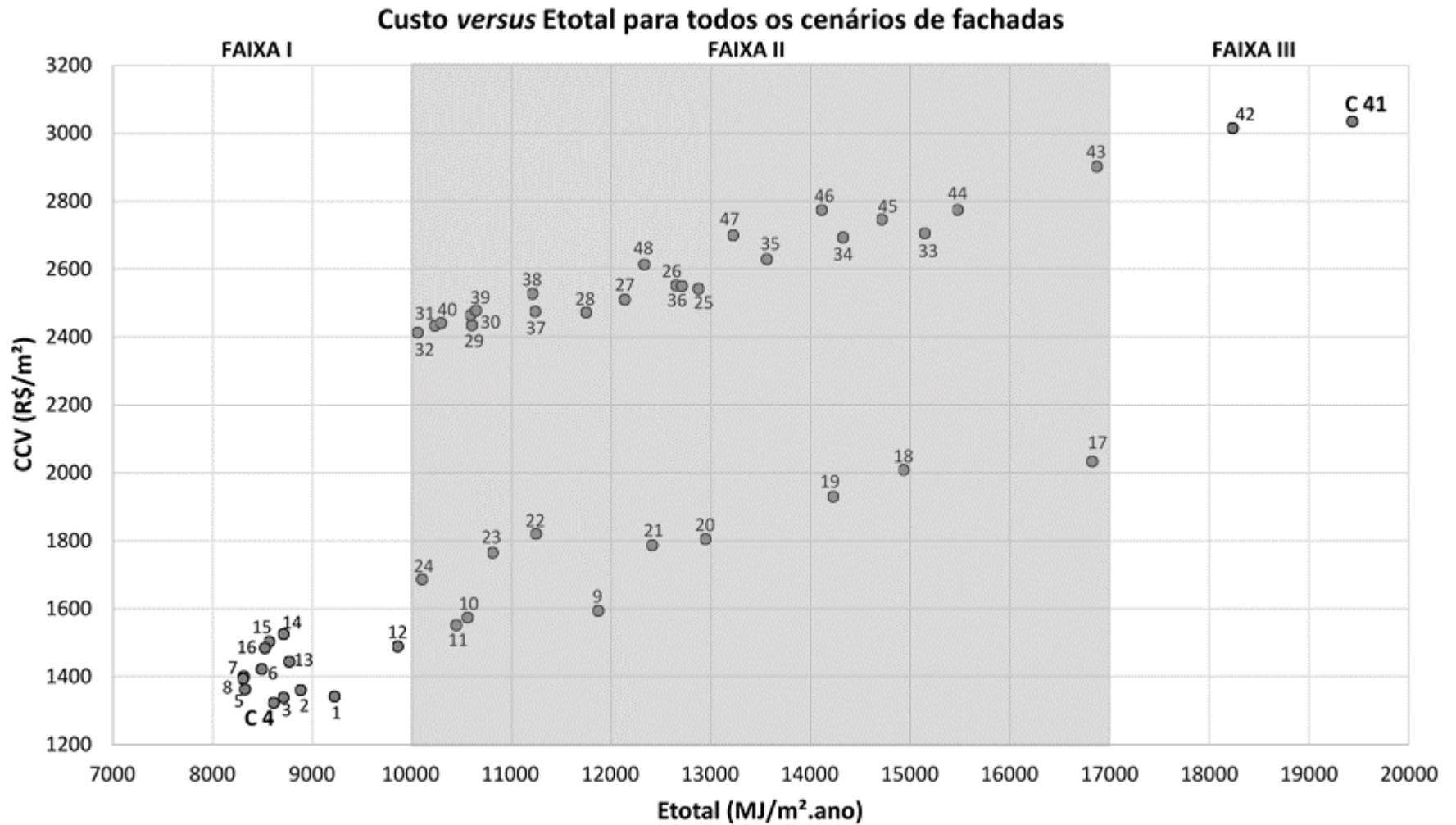
Dessa forma, com o intuito de obter o ponto ótimo – que represente o menor custo e menor impacto ambiental e energético-, as Figuras 27 e 28 representam a relação entre Custo *versus* GWP e Custo *versus* E_{total} para todos os cenários de análise (representados pelos pontos com números referentes ao cenário correspondente). Foram determinadas 3 faixas de separação dos cenários em função do GWP e do E_{total} .

Figura 27: Análise de Custo Ótimo, relacionando custo versus GWP para todos os cenários de fachadas.



Fonte: A autora (2018).

Figura 28: Análise de Custo Ótimo, relacionando custo *versus* E_{total} para todos os cenários de fachadas.



Fonte: A autora (2018).

É possível notar, nas Figuras 27 e 28, que o ponto ótimo, ou seja, o cenário que possui menor custo em relação ao GWP e ao E_{total} , é o C4. Este cenário é composto por Fachada Tradicional, com vidro refletivo, sem dispositivo de sombreamento e PAF de 30%.

Em ambas as figuras pode-se destacar basicamente três faixas de desempenho, em função do GWP e do E_{total} . A primeira, Faixa I, corresponde aos cenários mais próximos do ponto ótimo, com menores custos, emissões e consumo de recursos energéticos. Fazem parte desta primeira faixa cenários que possuem estritamente Fachada Tradicional, com tipos de vidros variáveis e janelas majoritariamente pequenas (PAF de 30%), com algumas exceções (presença de PAF de 55%, desde que tenha dispositivo de sombreamento).

A Faixa III corresponde aos cenários com maiores custos, emissões e consumo de recursos energéticos. São os cenários que possuem como características determinantes Fachada Cortina, sem dispositivo de sombreamento e janelas grandes (PAF de 80%).

Na Faixa II aparecem os demais cenários, com ambos os tipos de fachadas (Tradicional e Cortina), sem e com dispositivo de sombreamento para janelas médias (PAF de 55%) e grandes (PAF de 80%). Nesta faixa destaca-se, principalmente, a diferença de custo entre os tipos de fachadas, que faz com que haja uma nítida separação no eixo vertical. A Fachada Cortina é claramente mais cara que a Tradicional. Ao mesmo tempo, dentro dessa faixa é possível notar que, em termos de emissões e consumo de recursos energéticos, podem haver cenários com características do envelope construtivo bem diferentes e, ao mesmo tempo, desempenhos semelhantes. O que os diferencia, neste caso, é o custo. Assim, destaca-se nas Figuras 27 e 28, na faixa II, os seguintes cenários com valores de impactos correspondentes:

- Do ponto de vista do GWP (Figura 27):
 - C9 (FT|VIn|SDS|55) – C22 (FT|VDp|CDS|80) – C29 (FC|VIn|CDS|30);
 - C28 (FC|VRf|SDS|30) – C38 (FC|VDp|CDS|55);
 - C19 (FT|VLw|SDS|80) – C35 (FC|VLw|SDS|55);
- Do ponto de vista do E_{total} (Figura 28):
 - C24 (FT|VRf|CDS|80) – C32 (FC|VRf|CDS|30);
 - C10 (FT|VDp|SDS|55) – C29 (FC|VIn|CDS|30) – C30 (FC|VDp|CDS|30) – C39 (FC|VLw|CDS|55);
 - C22 (FT|VDp|CDS|80) – C37 (FC|VIn|CDS|55) – C38 (FC|VDp|CDS|55);
 - C17 (FT|VIn|SDS|80) – C43 (FC|VLw|SDS|80).

Em termos de emissões de CO_2 , por exemplo, é possível afirmar nestes casos que é equivalente se ter um cenário com Fachada Tradicional, janelas grandes (PAF de 80%) com vidro incolor e dispositivo

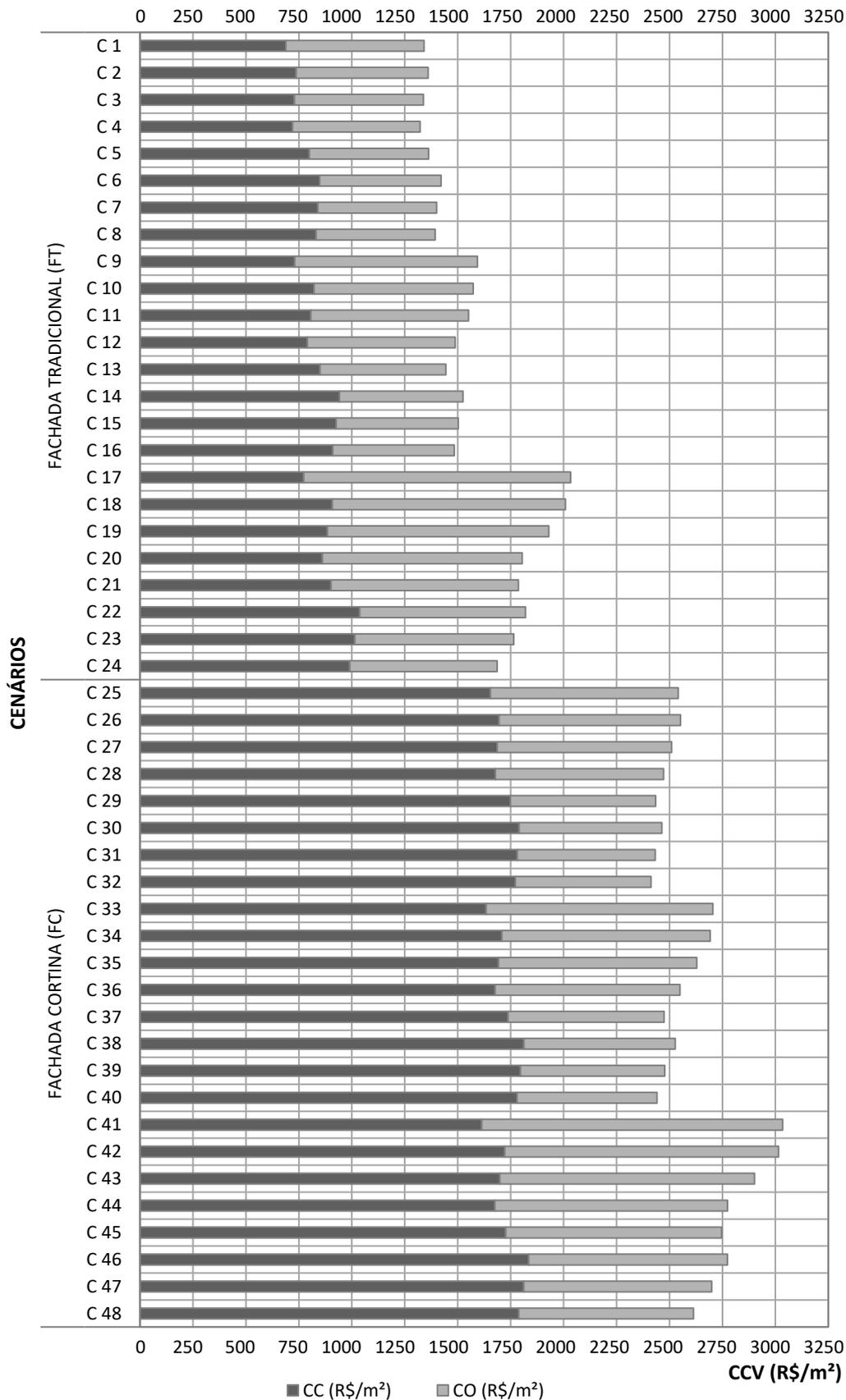
de sombreamento e um cenário com Fachada Cortina, com janelas pequenas (PAF de 30%) com o mesmo tipo de vidro e dispositivo de sombreamento; ao mesmo tempo em que se pode ter um cenário com Fachada Tradicional, janelas grandes (PAF de 80%) com vidro *low-e* e sem dispositivo de sombreamento correspondendo, em termos de emissões, a um cenário com Fachada Cortina, com janelas médias (PAF de 55%) com o mesmo tipo de vidro e sem dispositivo de sombreamento. Isso vai de encontro aos resultados do Capítulo 4, do ponto de vista do GWP.

Quanto à quantidade de consumo de recursos energéticos, esse tipo de equivalência aparece, por exemplo, quando se tem um cenário com Fachada Tradicional, janelas grandes (PAF de 80%) com vidro refletivo e dispositivo de sombreamento e um cenário com Fachada Cortina, janelas pequenas (PAF de 30%) com o mesmo tipo de vidro e dispositivo de sombreamento; também equivalem, neste aspecto, um cenário com Fachada Tradicional, janelas grandes (PAF de 80%) com vidro incolor e sem dispositivo de sombreamento e um cenário de Fachada Cortina, janelas grandes (PAF de 80%) com vidro *low-e* e sem dispositivo de sombreamento.

Dessa forma, pode-se afirmar que, dependendo da combinação de parâmetros do envelope construtivo, é possível se ter, por exemplo, uma Fachada Tradicional com o mesmo nível de emissões e consumo de recursos energéticos de uma Fachada Cortina. O que as diferencia, neste caso, é o custo das soluções construtivas.

Para se compreender melhor os custos apresentados nas Figuras 27 e 28, detalhou-se os mesmos, diferenciando-se os Custos de Construção (CC) e de Operação (CO) que somados, determinam o Custo do Ciclo de Vida (CCV). A partir disso, a Figura 29 apresenta o Custo do Ciclo de Vida (CCV) de todos os cenários, separados pelo Custo de Construção e de Operação em 60 anos de utilização do edifício.

Figura 29: Custo do ciclo de vida para todos os cenários de análise, considerando os 60 anos de utilização do edifício.



Fonte: A autora (2018).

Da mesma forma que observado na MARS-SC, a Fachada Cortina (FC) é mais cara que a Fachada Tradicional (FT). A forma do cálculo do econômico da MARS-SC é a mesma utilizada na Análise de Custo Ótimo. Por conta disso, as respostas são as mesmas²². No entanto, separando-se os custos presentes no CCV (em CC e CO), é possível observar com mais detalhadamente alguns aspectos.

Em relação à FT, os custos de construção (CC) e operação (CO), correspondem cada um, em média 50% do CCV. Diferencia-se, neste aspecto, os cenários que possuem dispositivo de sombreamento (C5 – C8; C13 – C16; C21 – C24). Nestes casos há uma redução no consumo energético (reduz o CO) e um aumento na quantidade de materiais, ou seja, aumento no CC. Outra exceção, no caso, com CO maior que o CC, é o cenário C17, que corresponde a uma fachada com janela grande (PAF de 80%) com vidro incolor e sem dispositivo de sombreamento. Dentre os cenários FT, este (C17) é o que possui o maior consumo de energia do ar condicionado (Capítulo 3), por isso, o custo de operação supera o de construção. Ao mesmo tempo, é possível notar um aumento no custo do ciclo de vida (CCV), de acordo com o aumento da PAF, principalmente quando se altera de uma janela pequena (PAF de 30%- cenários C1 – C8) para uma janela grande (PAF de 80%- cenários C17 – C24). Isso porque o CO e o CC aumentam.

Em relação aos cenários com Fachada Cortina, é possível notar que o custo de construção representa o maior peso no CCV, exceto pelo cenário C41 (PAF de 80% com vidro incolor e sem dispositivo de sombreamento). Este cenário se apresentou como o que possui o maior consumo energético entre todos os analisados (Capítulo 3), é o que possui as maiores contribuições para as categorias de impacto (Capítulo 4), a pior nota global a nível de sustentabilidade pela MARS-SC e o que possui o maior custo, em relação à operação do edifício.

Comparando-se a Figura 26 com a Tabela 43 (classificação da MARS-SC), é possível relacionar os cenários com menores custos (no caso, os da FT) aos que possuem as maiores notas globais em termos de sustentabilidade. O mesmo vale para as soluções mais caras, que possuem as piores notas. Assim, considerar o custo destas soluções pode influenciar positivamente nas escolhas de projeto. Isso porque, conforme supracitado, nesses casos aqui apresentados, os cenários com menores consumos de recursos energéticos e emissões e CO₂ são os que aparecem com os menores custos.

Em relação às variações dos parâmetros do envelope, já investigados na MARS-SC e nos capítulos anteriores sob os âmbitos energéticos (Capítulo 3) e ambientais (Capítulo 4), aqui são apresentados como tais alterações refletem no Custo do Ciclo de Vida (CCV), calculado da mesma forma para ambas

²² Em termos ambientais, as duas metodologias se diferenciam, pois na MARS-SC é feita uma normalização dos impactos referentes à todas as categorias de impacto ambientais para que se obtivesse uma nota representativa da dimensão ambiental, enquanto que na Análise de Custo Ótimo são utilizados os impactos diretos das categorias GWP e E_{total}, calculados no Capítulo 4.

as metodologias. Assim, são apresentados sob a escala de cores do *heatmap*²³ (quanto mais próximo ao vermelho – pior situação-, mais próximo ao verde – melhor situação), em relação ao:

- Tipo de Fachada: alterar de uma Fachada Tradicional para uma Fachada Cortina tem influência direta na alteração do CCV, podendo aumentá-lo em até 89%. Como pode-se verificar na Tabela 45, essa alteração tem maior impacto nas PAFs menores (30%) e a diferença entre os tipos de fachada diminui conforme aumenta a PAF. E, como ser visto na Figura 29, esse aumento no CCV ocorre principalmente devido ao Custo de Construção (CC).

Tabela 45: Valores de CCV em função da alteração do tipo de fachada.

	ALTERAR O TIPO DE FACHADA (de FT para FC)		
	PAF=30%	PAF=55%	PAF=80%
VIn SDS	89,5%	69,8%	49,2%
VDp SDS	87,6%	69,0%	48,3%
VLw SDS	87,6%	65,0%	42,7%
VRf SDS	86,9%	60,0%	36,5%
VIn CDS	78,7%	55,3%	35,0%
VDp CDS	73,3%	58,6%	36,4%
VLw CDS	73,7%	55,5%	32,8%
VRf CDS	73,2%	53,2%	28,5%

Fonte: A autora (2018).

- PAF: alterar a porcentagem de abertura na fachada sempre causa um aumento no CCV, conforme apresentado na Tabela 46. Esse custo aparece de forma mais pronunciada no caso da Fachada Tradicional. Alterar a PAF de 30% para 80% pode causar um aumento no CCV na ordem de 52% para a FT e 19% para a FC. Esse aumento decorre não apenas do aumento no Custo da Construção (CC), mas principalmente do Custo de Operação (CO), aspecto discutido no Capítulo 3 e que também pode ser observado na Figura 29.

Tabela 46: Valores de CCV em função da alteração da PAF

		ALTERAR A PAF		
		30 para 55%	55 para 80%	30 para 80%
FT	VIn SDS	18,8%	27,6%	51,6%
	VDp SDS	15,7%	27,7%	47,7%
	VLw SDS	15,9%	24,4%	44,2%
	VRf SDS	12,6%	21,2%	36,5%
FC	VIn CDS	6,4%	12,2%	19,4%
	VDp CDS	5,5%	12,0%	18,1%
	VLw CDS	4,7%	10,4%	15,6%
	VRf CDS	3,1%	8,8%	12,2%

Fonte: A autora (2018).

²³ As cores consideram todos os valores presentes em cada tabela. Quanto menor for o valor, mais próximo estará da cor verde e, quanto maior o valor, mais próximo estará da cor vermelha.

- Tipo de vidro: tendo como referência o vidro incolor, alterar esse parâmetro causa uma alteração no CCV em ambos os tipos de fachada. Como nota-se na Tabela 47, as maiores economias ocorrem nas maiores janelas (PAF de 80%), podendo atingir até 11% e 9% de redução, no caso do vidro refletivo para a FT e FC, respectivamente. Essas economias decorrem, principalmente, do Custo de Operação do edifício, já que são os vidros que auxiliam na redução do consumo energético, conforme discutido no Capítulo 3. Isto é, por mais que, em termos de custo de material, todos os vidros aqui avaliados possam ser mais caros que o incolor, no balanço do CCV, eles causam uma redução no custo final. A exceção aparece nos cenários com PAF de 30% e vidro duplo, para os dois tipos de fachadas (FT e FC). Nestes casos, embora o consumo energético seja menor, o custo de construção (CC) aumenta mais que do que o custo operacional (CO) e, por isso, essas soluções acabam sendo mais caras.

Tabela 47: Valores de CCV em função da alteração no tipo de vidro.

		ALTERAR TIPO DE VIDRO (Ref. Incolor)		
		30%	55%	80%
FT	VDp	1,4%	-1,3%	-1,2%
	VLw	-0,2%	-2,6%	-5,1%
	VRf	-1,4%	-6,6%	-11,2%
FC	VDp	0,4%	-0,5%	-0,6%
	VLw	-1,2%	-2,8%	-4,4%
	VRf	-2,7%	-5,7%	-8,6%

Fonte: A autora (2018).

- Dispositivo de Sombreamento: acrescentar um dispositivo de sombreamento gera, na maioria desses casos, uma redução no CCV (Tabela 48), podendo alcançar economias de até 12% no cenário FT e 9% no cenário FC, ambos com vidro incolor. As maiores reduções, atreladas à maior janela e ao vidro incolor, devem-se principalmente à redução no consumo energético (discutido no Capítulo 3) e, como pode ser visto na Figura 29 (C21- C24; C45-C48). Diferem-se, neste aspecto, os cenários FT com janela pequena (30%), em que há um acréscimo de custo que pode chegar a 5%. Esse acréscimo refere-se ao Custo de Construção (que também pode ser visto na Figura 29), devido ao aumento de material do dispositivo de sombreamento.

Tabela 48: Valores de CCV quando se adiciona um dispositivo de sombreamento (CDS)

		DISPOSITIVO DE SOMBREAMENTO (Ref. SDS)		
		30%	55%	80%
FT	VIn	1,6%	-9,4%	-12,1%
	VDp	4,5%	-3,1%	-9,4%
	VLw	4,6%	-3,1%	-8,6%
	VRf	5,4%	-0,3%	-6,6%
FC	VIn	-4,2%	-8,5%	-9,5%
	VDp	-3,4%	-6,1%	-8,0%
	VLw	-3,1%	-5,7%	-7,0%
	VRf	-2,4%	-4,3%	-5,8%

Fonte: A autora (2018).

Através da Análise de Custo Ótimo, foi possível justificar e relacionar os resultados apresentados nos capítulos anteriores. Ao mesmo tempo, foi possível aprofundar a resposta dada pela MARS-SC, no que tange os âmbitos ambiental e econômico. As melhores escolhas, próximas ao ponto ótimo de rentabilidade, são as que possuem, majoritariamente, Fachada Tradicional, com aberturas pequenas e médias (desde que possua dispositivo de sombreamento). Atrelado a esse resultado está o que foi discutido nos Capítulos 3 e 4, pois são os cenários que possuem os menores consumos energéticos e impactos ambientais.

5.4. DISCUSSÃO

Nessa etapa da pesquisa, denominada Análise Integrada, foi possível unir os resultados referentes às duas etapas anteriores: análise de desempenho energético (Capítulo 3) e ambiental (Capítulo 4). Como recorte da pesquisa, conforme supracitado, foram considerados nessa etapa apenas os cenários referentes ao clima de São Paulo, com *setpoint* de 25°C para refrigeração, que representaram os consumos mais baixos do ar condicionado (se comparados aos resultados com *setpoint* de 24°C).

No âmbito da MARS-SC, foram consideradas duas dimensões da sustentabilidade, sendo elas: ambiental e econômica. Na dimensão ambiental foram analisados os valores de impacto obtidos na fase da ACV (Capítulo 4), cujos indicadores foram normalizados e agregados de acordo com os pesos correspondentes, referentes a cada dimensão sustentável. Já na dimensão econômica, foram calculados os custos referentes a cada solução construtiva, no âmbito dos materiais e do consumo energético em 60 anos de utilização do edifício. O Custo do Ciclo de Vida (CCV), utilizado pela MARS-SC, também foi utilizado na metodologia da Análise de Custo Ótimo. Após as etapas de normalização e agregação, todos os valores referentes aos indicadores foram apresentados na forma de um *heatmap*, para que todos os cenários pudessem ser avaliados de forma conjunta.

Como principais resultados da MARS-SC têm-se que, em termos de desempenho global da solução construtiva, o melhor cenário (que possui a maior nota sustentável) é o C3 e o pior (menor nota) é o C41. O C3 corresponde ao cenário com Fachada Tradicional, janelas pequenas (PAF de 30%) com vidro *low-e* e sem dispositivo de sombreamento, enquanto que o cenário C41 é composto por Fachada Cortina, janelas grandes (PAF de 80%) com vidro incolor e sem dispositivo de sombreamento. A origem desses resultados está, principalmente, no desempenho energético de cada cenário de fachada. O consumo energético na fase de uso da edificação teve grande peso no desempenho global da edificação, influenciando de sobremaneira os resultados nos âmbitos ambiental e econômico, conforme discutido anteriormente.

Com relação à influência da variação dos parâmetros do envelope construtivo na nota sustentável, viu-se que tanto o tipo de fachada quanto a PAF, possuem o mesmo impacto vistos nos capítulos interiores (3 e 4), em que os cenários com menores consumos energéticos também foram os que apresentaram os menores impactos ambientais e, conseqüentemente, as melhores notas sustentáveis, da mesma forma que o tipo de vidro varia em função de outros parâmetros, classificando-se, nas maiores aberturas, do melhor para o pior, o refletivo, *low-e*, duplo e incolor; e 4) Dispositivo de sombreamento: ainda que haja um aumento na quantidade de material e, conseqüentemente no custo de construção, esse elemento causa redução no consumo do ar condicionado – reduz o custo de operação-, e esse efeito causa um aumento na nota sustentável em todos os cenários.

Em relação à Análise de Custo Ótimo, foi possível fazer uma análise de todos os cenários em conjunto, avaliando a relação custo *versus* Potencial de aquecimento global (GWP) e custo *versus* Consumo de recursos energéticos (E_{total}), para as fases de pré-uso e uso da edificação em 60 anos. Com isso foi possível encontrar o ponto ótimo, que representa o cenário com menor custo, emissões e consumo de recursos energéticos. O cenário ótimo aqui encontrado é o C4, que possui Fachada Tradicional, janelas pequenas (PAF de 30%) com vidro refletivo e sem dispositivo de sombreamento.

Dentre todos os cenários avaliados, foi possível identificar 3 faixas de desempenho, em função do GWP e do E_{total} , sendo 1) Cenários mais próximos do ponto ótimo, que possuem menos custo, emissões e consumo de recursos, aqui representados restritamente pelos que possuem Fachada Tradicional com janelas pequenas (PAF de 30%), exceto por alguns cenários com janelas médias (PAF de 55%), desde que se tenha dispositivo de sombreamento; 2) Apresenta ambos os tipos de fachadas, em que se destacam cenários que possuem características diferentes entre si e desempenhos semelhantes em termos de emissões e consumo de recursos energéticos, sendo que o custo é o que os diferencia; 3) Nessa faixa aparecem os cenários com maiores emissões, custos e consumo de recursos energético, aqui representados majoritariamente pelos cenários que possuem Fachada Cortina, com janelas grandes (PAF de 80%) e sem dispositivo de sombreamento.

Nessa metodologia, o CCV foi calculado da mesma forma que a dimensão econômica da MARS-SC²⁴. O Custo do Ciclo de Vida (CCV), composto pelo Custo de Construção (CC) e Custo de Operação (CO), sofre influência direta das alterações dos parâmetros da fachada, sendo que em relação ao 1) Tipo de fachada: alterar de uma FT para uma FC pode aumentar o CCV em até 89% e esse aumento está diretamente relacionado ao CC; 2) PAF: ampliar a PAF causa um aumento direto no CCV. Alterar a PAF de 30% para 80% pode aumentar o CCV em até 52% (FT) e 19% (FC). E esse aumento não é apenas

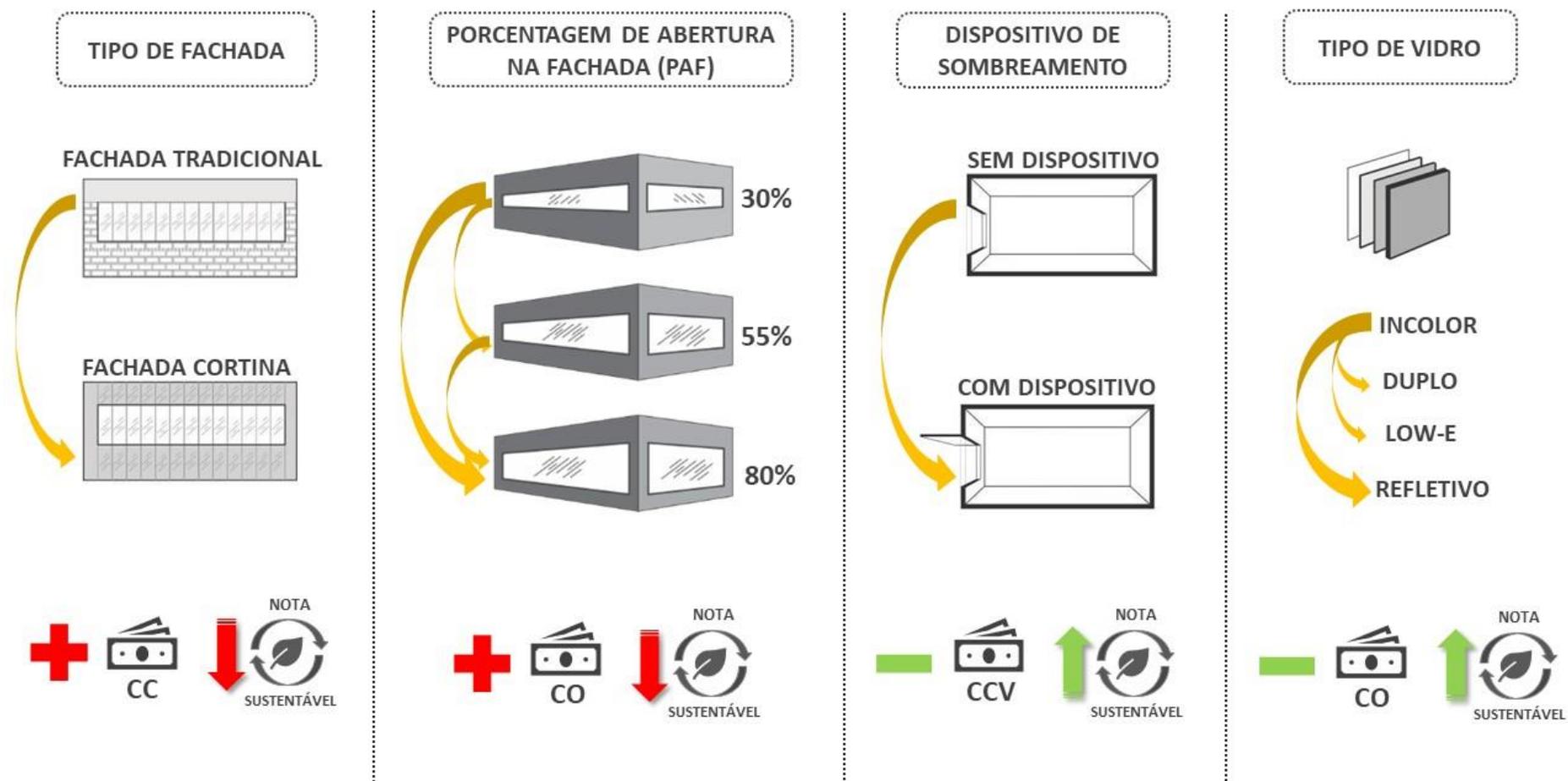
²⁴ De acordo com o que foi apresentado na metodologia de Análise de Custo Ótimo, o cálculo do CCV pode ser realizado sob várias perspectivas, das quais destacam-se a macro e a microeconômica. Para esta pesquisa, foi selecionada a segunda, cuja abordagem está ligada ao custo financeiro das soluções.

relacionado ao CC, mas principalmente pelo aumento do CO (confirmando o que foi apresentado no Capítulo 3); 3) Tipo de vidro: tendo como referência o vidro incolor, alterar o tipo de vidro pode causar uma redução no CCV em até 11% (FT) e 9%(FC). E essa economia está atrelada principalmente à redução no CO (Capítulo 3). Ainda que, em termos de custo do material todos os vidros sejam mais caros que o incolor, como reduzem o consumo do ar condicionado, reduzem o CO e consequentemente o CCV; e 4) Dispositivo de sombreamento: a presença desse elemento reduz o CCV em até 12%(FT) e 9%(FC), nos cenários com janela grande e vidro incolor. Esses são os cenários que tiveram maiores reduções no consumo energético (Capítulo 3). Conforme visto no Capítulo 4 (ACV), a presença desse elemento aumenta a quantidade de materiais (no caso desse dispositivo, alumínio), o que faz com que as emissões na fase de pré-uso e o CC aumentem também. No entanto, conforme supracitado, a presença desse elemento reduz o consumo energético, então no balanço final, as emissões, o consumo de recursos e o custo total diminuem.

Assim, de acordo com o que foi exposto nesse capítulo, a combinação dos parâmetros da fachada causa influência direta no consumo de energia do edifício, impactos potenciais ao meio ambiente e custo. Conforme apresentado no Capítulo 4, pela ACV, o impacto da fase de uso da edificação influencia de sobremaneira as emissões de CO₂, bem como os demais impactos ambientais potenciais. Essa condição acaba por se refletir diretamente nos resultados apresentados neste capítulo de Análise Integrada. Os cenários com menores emissões, consumo de recursos energéticos e custo estão diretamente relacionados aos que possuem menor consumo energético em 60 anos de utilização. Tanto que, ainda que se alterem os materiais da fachada, como o tipo de vidro e a presença do dispositivo de sombreamento e isso cause um aumento nas emissões e custo de construção, o fato de causarem uma redução no consumo do ar condicionado implicou na redução final das emissões, consumo de recursos e custo. Dessa forma, pode-se afirmar com os cenários aqui apresentados que, investir em eficiência energética deve ser uma premissa atrelada ao processo de projeto arquitetônico, que pode garantir edifícios com menores consumos energéticos, emissões e custo ao longo do ciclo de vida da edificação.

A seguir, a figura 30 apresenta um diagrama que esquematiza os resultados desse capítulo.

Figura 30: Resultado das variações dos parâmetros na nota sustentável e no custo



Fonte: A autora (2018).



CAPÍTULO 6.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando a importância dos temas abordados na Contextualização (Capítulo 2), para justificar o desenvolvimento da presente pesquisa podem ser identificados os seguintes pontos de interesse: 1) a importância do envelope construtivo no desempenho energético e ambiental de edifícios de escritórios; 2) a falta de estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) nesse tipo de edificação, em detrimento da grande presença desse tipo de análise em residências; 3) a necessidade de inserção dos custos das soluções construtivas nas análises de desempenho energético e ambiental; e 4) a utilização de um método de avaliação que integre em sua estrutura os aspectos energéticos, ambientais e de custo.

Com isso, o objetivo dessa pesquisa foi realizar uma análise integrada do desempenho energético, ambiental e de custos ao longo do ciclo de vida de variados cenários de fachadas para um modelo de edifício de escritórios no Brasil, utilizando para isso variados procedimentos metodológicos. Dentre eles, utilizou-se: 1) Simulação computacional, para obter o consumo energético de 288 cenários, para três climas no Brasil, a fim de compreender como os parâmetros da fachada (tipo de fachada, porcentagem de abertura na fachada – PAF-, tipo de vidro e presença ou não de dispositivo de sombreamento) influenciam esse consumo energético; 2) Avaliação do Ciclo de Vida, para obter os impactos ambientais potenciais, provenientes dos cenários anteriormente citados e, com isso, quantificar e compreender os impactos advindos da energia e incorporados nos materiais construtivos; 3) Análises integradas pelas metodologias MARS-SC e Análise de Custo Ótimo, aplicadas para o clima correspondente à uma zona bioclimática (48 cenários), a fim de compreender e identificar se a melhoria no desempenho energético do envelope construtivo se reflete na melhoria do desempenho ambiental e compreender como os parâmetros do envelope otimizam as questões do consumo energético, impacto ambiental e custo.

6.1 CONCLUSÕES

Como principais conclusões do estudo, foi possível observar algumas questões em relação ao **Desempenho energético**. Do ponto de vista dos parâmetros avaliados (tipo de fachada, clima, PAF, tipo de vidro, presença ou não de dispositivo de sombreamento e *setpoint* do ar condicionado), e pelo fato de o edifício ser utilizado apenas durante o dia, os cenários com Fachada Tradicional (FT) foram os que, majoritariamente, obtiveram os melhores desempenhos energéticos, em todos os climas. O clima, apesar de não ser um parâmetro construtivo, influenciou o consumo de energia do edifício – quanto mais quente o clima, maiores foram os consumos energéticos com ar condicionado-, sobretudo nos climas quentes, como Manaus, devido às altas temperaturas mantidas ao longo do ano. A alteração do tipo de fachada (Fachada Tradicional – FT- para Fachada Cortina – FC-) causou um aumento, em média,

de 25% no consumo do ar condicionado para Curitiba e São Paulo e de 15% para Manaus. Em relação aos parâmetros relacionados às aberturas, a PAF foi o que mais impactou o consumo energético, de modo que, a alteração de uma janela pequena (PAF de 30%) para uma janela grande (PAF de 80%), fez com que o consumo energético aumentasse em mais de 90% (FT) e 60% (FC). O tipo de vidro e a presença de dispositivo de sombreamento tiveram maior impacto nas maiores aberturas (PAFs de 55% e 80%), reduzindo o consumo energético em até 20% (no caso da alteração do tipo de vidro) e 30% (com dispositivo de sombreamento). Por fim, a alteração em 1°C (de 24°C para 25°C) do *setpoint* do ar condicionado melhorou o desempenho energético em todos os cenários, alcançando uma redução no consumo de energia na média de 16,4%.

A caracterização arquitetônica, realizada a partir da classificação dos cenários em faixas de consumo energético (categorizados de um a cinco estrelas, do menos ao mais eficiente energeticamente), gerou recomendações a respeito da utilização de tais parâmetros nesse tipo de edifício, para os climas de Curitiba, São Paulo e Manaus. Para a obtenção da melhor classificação (cinco estrelas), é preciso se priorizar o uso da Fachada Tradicional em todos os climas. Em Curitiba e São Paulo é possível se utilizar todos os tamanhos de janela, com algumas exceções (cenários com PAF de 55% e vidro incolor, sem dispositivo de sombreamento e *setpoint* de 24°C; e os cenários com PAF de 80%, sem dispositivo de sombreamento. Em Manaus é possível se ter janelas pequenas (exceto com vidro incolor, no *setpoint* de 24°C), e janelas médias com qualquer tipo de vidro (exceto o incolor), desde que tenha dispositivo de sombreamento (no *setpoint* de 24°C), e todos os cenários com *setpoint* de 25°C (exceto o com vidro incolor). Caso se opte por utilizar a Fachada Cortina, para atingir a maior classificação (cinco estrelas), é preciso considerar que o uso dessa solução construtiva se restringe aos climas de Curitiba e São Paulo, priorizando o uso de janelas pequenas com dispositivo de sombreamento. Em Curitiba, deve se considerar o uso do *setpoint* de 25°C, para poder usar os vidros *low-e* ou refletivo, na PAF de 30%, ou apenas o refletivo, na PAF de 55%. Em São Paulo, com o *setpoint* de 24°C, pode-se utilizar apenas o vidro refletivo nas menores aberturas (PAF de 30%) e, com o *setpoint* de 25°C, pode-se utilizar todos os outros vidros (condição também permitida para os cenários com PAF de 55%). Conclui-se, que o uso adequado dos parâmetros aqui apresentados, nesse tipo de edifício, pode gerar projetos que alcancem maiores economias de energia.

Do ponto de vista do **Desempenho ambiental**, caracterizado principalmente pelo Potencial de Aquecimento Global, que é mensurado em emissões de CO₂ (já que para as demais categorias de impacto, os resultados não se diferenciaram de forma significativa), foi possível identificar e compreender quais foram os cenários com maior e menor impacto. Em relação às fases consideradas na ACV (pré-uso e uso da edificação), foi possível notar que a fase de uso foi responsável por cerca 70% em média das emissões de CO₂ no ciclo de vida do edifício, sobretudo nos cenários com Fachada Cortina,

ou seja, teve maior impacto que a fase de pré-uso. Nesse sentido, o cenário mais impactante, em todos os climas, foi o que possuía Fachada Cortina, janelas grandes (PAF de 80%) com vidro incolor e sem dispositivo de sombreamento. E esse fato deve-se, principalmente, ao impacto advindo da fase de uso da edificação, pois este cenário era o que possuía o maior consumo energético.

Dentre os parâmetros avaliados neste estudo (o tipo de fachada e a PAF destacaram-se com as maiores contribuições para as emissões de CO₂). O impacto do clima apareceu justamente na fase de uso da edificação, pois, de acordo com a variabilidade climática adotada para o estudo, quanto mais quente o clima, maiores foram os consumos energéticos e, conseqüentemente, as emissões de CO₂. Alterar de uma Fachada Tradicional para uma Fachada Cortina elevou as emissões de CO₂ totais (considerando o pré-uso e o uso da edificação) em até 26%, em média. Em relação à alteração da PAF, mudar de janela pequena (PAF de 30%), para uma janela grande (PAF de 80%), aumentou as emissões de CO₂ em até 66% (FT), e 37% (FC). Alterar o tipo de vidro também influenciou as emissões de CO₂, principalmente devido ao seu impacto na fase de uso da edificação – alterar o vidro (tendo o incolor como referência) causou uma redução no consumo energético e isso se refletiu na redução das emissões totais. Por outro lado, a presença do dispositivo de sombreamento, apesar de causar um aumento na quantidade de alumínio (material mais impactante ambientalmente), este dispositivo reduziu o consumo energético da edificação ao longo da vida útil, fase de grande impacto no ciclo de vida da edificação. No balanço final, a utilização do dispositivo de sombreamento acabou por reduzir as emissões de CO₂ ao longo da vida útil da edificação.

A respeito das **Análises Integradas**, MARS-SC e Análise de Custo Ótimo (aplicadas apenas para os 48 cenários do clima de São Paulo), essas geraram resultados equivalentes no âmbito econômico, uma vez que foi considerado o mesmo cálculo de Custo do Ciclo de Vida (CCV) para ambas as metodologias. O que as diferenciou foi o aspecto ambiental, pois na MARS-SC foi feita uma normalização de todas as categorias de impacto utilizadas na ACV, enquanto que na Análise de Custo Ótimo foi considerado o impacto direto advindo do Potencial de Aquecimento Global (medido em emissões de CO₂) e do Consumo de Recursos Energéticos (medido em MJ/m². ano).

A MARS-SC gerou como resultado que o cenário com a maior nota sustentável foi o C3 (Fachada Tradicional, PAF de 30%, vidro *low-e* e sem dispositivo de sombreamento) e, o com menor nota, foi o C41 (Fachada Cortina, PAF de 80%, vidro incolor e sem dispositivo de sombreamento). A origem desses resultados está, principalmente, no desempenho energético de cada cenário de fachada. O consumo energético na fase de uso da edificação teve grande peso no desempenho global da edificação (nas dimensões ambientais e econômica), influenciando de sobremaneira os resultados, confirmando o que foi discutido anteriormente. E, com relação à influência da variação dos parâmetros

do envelope construtivo na nota sustentável, verificou-se que tanto o tipo de fachada quanto a PAF, possuem o mesmo impacto visto nas análises energética e ambiental - os cenários com menores consumos energéticos foram os que apresentaram os menores impactos ambientais e, conseqüentemente, as melhores notas sustentáveis. O tipo de vidro varia em função de outros parâmetros, classificando-se, nas maiores aberturas, do melhor para o pior, o refletivo, *low-e*, duplo e incolor. E a presença do dispositivo de sombreamento, ainda que haja um aumento na quantidade de material e, conseqüentemente no custo de construção, esse elemento causou uma redução no consumo do ar condicionado – reduzindo o custo de operação-, e esse efeito causou um aumento na nota sustentável em todos os cenários.

Do ponto de vista da Análise de Custo Ótimo, foi feita uma análise de todos os cenários em conjunto, avaliando a relação custo *versus* Potencial de aquecimento global (GWP) e custo *versus* Consumo de recursos energéticos (E_{total}), para as fases de pré-uso e uso da edificação em 60 anos. Através dessa análise foi possível encontrar o ponto ótimo, que representa o cenário com menor custo, emissões e consumo de recursos energéticos. O cenário ótimo encontrado foi o C4 (Fachada Tradicional, PAF de 30%, vidro refletivo e sem dispositivo de sombreamento).

O Custo do Ciclo de Vida- CCV (calculado de maneira igualitária para a MARS-SC)-, composto pelo Custo de Construção (CC) e pelo de Operação (CO), sofre influência direta das características da envolvente. Assim, alterar de uma FT para uma FC pode aumentar o CCV em até 89% e esse aumento está diretamente relacionado ao CC. Alterar a PAF de 30% para 80% pode aumentar o CCV em até 52% (FT) e 19% (FC), principalmente devido ao CO (maior consumo energético durante o uso). Tendo como referência o vidro incolor, alterar o tipo de vidro pode causar uma redução no CCV em até 11% (FT) e 9%(FC), principalmente devido à redução no CO. A presença desse elemento reduz o CCV em até 12%(FT) e 9%(FC), nos cenários com janela grande (PAF de 80%) e vidro incolor. Esses são os cenários que tiveram maiores reduções no consumo energético (Capítulo 3). Conforme supracitado, ainda que esse elemento aumente as emissões de CO₂ na fase de pré-uso da edificação (Capítulo 4), ele reduz o consumo energético na fase de uso (Capítulo 3), então no balanço final, as emissões, o consumo de recursos e o custo total diminuem.

Dessa forma, tais resultados apontam que a combinação dos parâmetros da fachada causa influência direta nos três âmbitos considerados neste estudo: energético, ambiental e econômico, confirmando que foi discutido na Contextualização (Capítulo 2). Os resultados obtidos na primeira etapa da pesquisa, referentes ao desempenho energético (Capítulo 3), influenciaram os demais desempenhos (ambiental e de custo) obtidos nas etapas seguintes (Capítulos 4 e 5), devido à importância dada a fase de uso da edificação. A respeito dos parâmetros de maior impacto em todos os âmbitos (energético, ambiental e de custo) - o tipo de fachada e a PAF-, os cenários com maiores consumos do ar

condicionado, emissões e custo, foram piores em todos os âmbitos, causando uma resposta equivalente para todas as análises. Conclui-se, portanto, que a Fachada Cortina é menos adequada em todos os sentidos, pois é a que gerou o maior consumo energético, os maiores impactos ambientais, além de ser a mais cara de todas. O mesmo vale para os cenários com as maiores aberturas (PAF de 80%), principalmente quando não há um dispositivo de sombreamento (já que este influenciou positivamente os resultados). Estes fatos devem ser questionados atualmente, uma vez que esse tipo de fachada representa a solução construtiva que vem sendo mais utilizada, sobretudo no que se refere aos edifícios comerciais no Brasil. Além disso, diversos edifícios com esse tipo de fachada recebem selos de certificação ambiental, fato também que deve ser analisado cuidadosamente, uma vez que a maioria das certificações não considera estudos de ACV para as análises, que poderiam dar respostas mais precisas, do que as atuais análises realizadas por meio de atributos.

Dessa forma, pode-se afirmar, com os cenários aqui apresentados que, investir em eficiência energética deve ser uma premissa atrelada ao processo de projeto arquitetônico, que pode garantir edifícios com menores consumos energéticos, emissões e custo ao longo do ciclo de vida da edificação. E tal premissa vai além da economia de energia, pois afeta como tais edifícios impactam o meio ambiente. É preciso, portanto, investir na “energia não consumida”, que não se restringe apenas à um edifício, mas sim, ao conjunto edificado de um bairro, uma cidade, um país.

6.2 LIMITAÇÕES

Dentre as limitações presentes nessa pesquisa, tem-se, do ponto de vista da etapa de Análise do **Desempenho energético**, que nesse estudo não se considerou o aproveitamento da iluminação natural, através da utilização de sistemas eficientes (dimerizáveis), que poderiam reduzir o consumo energético total do edifício. Nesse sentido, não foram consideradas análises da iluminação natural, que poderiam otimizar questões de aproveitamento da iluminação proveniente das aberturas, evitando, por exemplo o ofuscamento e/ou o superaquecimento próximo às aberturas. Foi utilizado um tamanho de dispositivo de sombreamento que fosse efetivo para o clima de Manaus e assim, seria suficiente para prover o sombreamento efetivo para os demais climas, ainda que esse sombreamento fosse maior que o necessário e, além disso, utilizou-se o mesmo tamanho de dispositivo para as quatro fachadas da edificação, a fim de manter a mesma estética, o que pode ter causado um sombreamento desnecessário para certas orientações. Foi mantida a mesma orientação solar para todos os cenários avaliados, com as maiores fachadas voltadas à norte-sul, que poderia ser adequada, se for considerada a utilização de um dispositivo de sombreamento horizontal voltado à norte. Além disso, limitou-se a manter a mesma geometria (retangular), com uma grande área central destinada ao *core*, como foi identificado na coleta

de dados a respeito desse tipo de edificação utilizada no Brasil. As densidades de pessoas, equipamentos e iluminação, foram dados fixos da simulação, pois estão diretamente relacionadas ao uso de tais espaços, não podendo, portanto, serem previstos com exatidão no desenvolvimento do projeto arquitetônico. Da mesma forma, o comportamento do usuário é algo que pode influenciar o consumo energético da edificação e é ainda difícil de se prever em tais simulações, logo, limitou-se a trabalhar com o máximo dessas variáveis fixas, para se identificar como os parâmetros de projeto influenciam no desempenho energético da edificação.

Do ponto de vista da Análise de **Desempenho ambiental**, realizada a partir da ACV, tem-se que todo o levantamento dos processos utilizados no inventário (referentes à cada material construtivo pertencente aos cenários de fachadas), foi obtido em bases de dados secundárias, mais especificamente no *Ecoinvent*, devido à atual dificuldade em se obter dados diretos da indústria brasileira. Outra questão foi a não-adequação das soluções construtivas para que tivessem o mesmo desempenho térmico, fato justificado pelas diferenças construtivas que impediam essa aproximação. Para a fase de uso foram apenas considerados os consumos referentes ao uso do ar condicionado, pois era o único que variava de acordo com as alterações dos parâmetros da fachada. O consumo de energia advindo da iluminação artificial não foi considerado. Se fosse um sistema dimerizável, eficiente, poderia influenciar no consumo energético e conseqüentemente no impacto ambiental. Para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), foram considerados dois métodos, sendo eles o CML e o CED, devido à falta de um método voltado à realidade brasileira, os quais foram selecionados por terem uma abordagem de ponto médio com abrangência global. Além disso, as categorias de impacto presentes nesses métodos são indicadas para esse tipo de estudo por várias normas europeias.

Por fim, em relação às **Análises Integradas** pela MARS-SC, não foram consideradas todas as dimensões da sustentabilidade- a dimensão social não foi considerada-, limitou-se a realizar a avaliação com as dimensões ambiental e econômica. Além disso, não foi determinado um modelo de referência para ser comparado com os demais, pois todos os cenários foram comparados entre si. Com relação à análise econômica, quantificada de maneira igualitária para a MARS-SC e para a Análise de Custo Ótimo, foi considerada a perspectiva macroeconômica (financeira), sendo que se fosse utilizada uma outra abordagem, poderia ter se obtido resultados diferentes. Para ambas as metodologias foram apenas considerados os cenários referentes ao clima de São Paulo, com *setpoint* do ar condicionado em 25°C. Na tentativa de se otimizar e compreender como os parâmetros do envelope otimizam as questões do consumo energético, impacto ambiental e custo, foi preciso fazer esse recorte devido à grande quantidade de cenários presentes no total (288). Ao mesmo tempo, como os resultados referentes aos impactos ambientais não se diferenciaram tanto entre os climas e São Paulo (a capital econômica do país) possui a maior representatividade desse tipo de edificação de escritórios, tais motivos acabaram

justificando a escolha de se avaliar os cenários referentes a este clima.

É importante se considerar que a combinação de parâmetros selecionados para essa pesquisa, originou resultados que puderam ser claramente separados e suas influências nos âmbitos ambiental, energético e de custo, identificadas. Outras combinações de geometrias, tipos de fachadas, orientações solares, porcentagens de abertura na fachada e sistemas de condicionamento artificial de ar poderiam apresentar respostas diferentes.

6.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

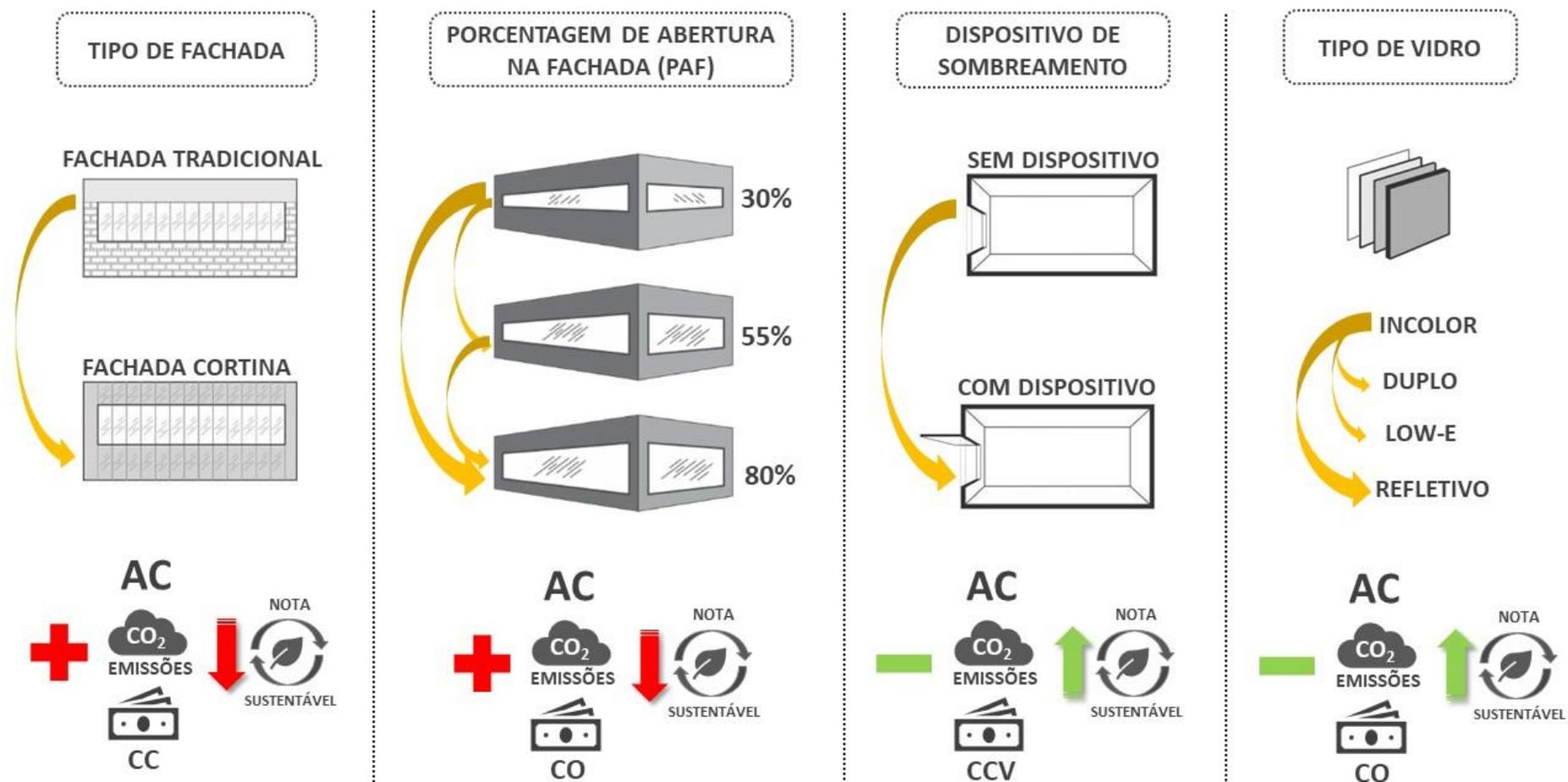
Como o desempenho energético é um aspecto que teve grande peso nos resultados, influenciando o desempenho dos demais (ambiental e econômico), recomenda-se para trabalhos futuros:

- a) Trabalhar com outras geometrias e tipos de edifícios, que não sejam apenas de escritórios de planta livre, a fim de identificar como melhorias no desempenho energético poderiam se refletir num melhor desempenho ambiental;
- b) Avaliar outros tipos de fachadas, como as duplas ventiladas, revestidas com vegetação e outros materiais (como a utilização de painéis fotovoltaicos e os materiais de mudança de fase- PCMs, por exemplo);
- c) Incluir nas análises o aproveitamento da iluminação natural (através da integração com a iluminação artificial, por meio de um sistema dimerizável), a fim de se compreender o quanto essa parcela influencia no consumo de energia total desse tipo de edificação. Além disso, pode-se avaliar a qualidade da iluminação interior, detectando casos com ofuscamento, por exemplo, para gerar espaços com melhor conforto visual aos usuários;
- d) Utilizar estratégias passivas, como a ventilação natural – que pode ser realizada por meio de sistemas híbridos de ventilação (combinação de ventilação natural e uso de sistemas de condicionamento térmico artificial), pode auxiliar tanto na redução do consumo energético quanto na melhoria do conforto térmico no interior desse tipo de edificação;
- e) Considerar o conforto térmico nas análises, a fim de verificar a relação conforto *versus* desempenho energético; conforto *versus* desempenho ambiental;
- f) Estudar o aspecto econômico para outras cidades – aqui foi apenas avaliado para São Paulo-, a fim de gerar recomendações a respeito do tipo de fachada e suas características, mais adequadas para cada região do país;

- g) Sempre que possível, utilizar dados primários – coletados diretamente com a indústria - no processo de inventário da ACV, a fim de gerar respostas mais precisas quanto à influência dos materiais no impacto ambiental das edificações;
- h) Incluir nas análises da ACV os impactos advindos da fase de manutenção das fachadas, em que são realizados serviços de limpeza, substituição e reparos – relacionados diretamente à durabilidade dos materiais.

A seguir, a figura 31 apresenta um diagrama que esquematiza os resultados desta tese.

Figura 31: Resultado das variações dos parâmetros no consumo do ar condicionado, emissões de CO₂, nota sustentável e custos



Fonte: A autora (2018).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005a.

_____. **NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005b.

_____. **NBR 15220-1: Desempenho térmico de edificações Parte 1: Definições, símbolos e unidades.** Rio de Janeiro, RJ, 2005c.

_____. **NBR 16401-1: Instalações de ar-condicionado — Sistemas centrais e unitários Parte 1: Projetos das instalações.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

_____. **NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil: 2009.

_____. **NBR ISO 14044: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil: 2009.

_____. **NBR 15575-4: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas — SVVIE.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.

ABRAVIDRO. **Sobre a película PVB.** Disponível em: <<http://abravidro.org.br/vidros/pvb-polivinilbutiral/>>. Acesso em maio de 2016.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ANDRADE, C. M. **Avaliação de desempenho em edifícios de escritórios: o ambiente de trabalho como meio para o bem-estar produtivo.** Tese de Doutorado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

_____. **A História do Ambiente de Trabalho em Edifícios de Escritórios: Um Século de Transformações.** São Paulo, SP, Brasil: C4, 2007.

ANDREIS, C. **Influência de fachadas envidraçadas no consumo de energia de um edifício de escritórios em diferentes cidades brasileiras.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

ANEEL- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Nota Técnica nº 187/2017-SGT/ANEEL.** Brasília, DF, Brasil: 2017.

ANVISA- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Resolução- RE nº 9, de 16 de janeiro de 2003.** Rio de Janeiro, RJ: 2003.

ARAÚJO, C.; ALMEIDA, M.; BRAGANÇA, L.; BARBOSA, J. A. Cost–benefit analysis method for building solutions. *Applied Energy*, v. 173, p. 124–133, 2016.

ASHRAE- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERANT AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Handbook of Fundamentals.** Atlanta, USA: 2009.

_____. **Standard 90.1-2013: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings.** Atlanta, USA: 2013.

_____. **Standard 140-2014: Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs.** Atlanta, USA: 2014.

ASSIEGO DE LARRIVA, R. CALLEJA RODRIGUES, G.; CEJUDO LÓPES, J.M. RAUGEI, M. FULLANA I PALMER,

P. A decision-making LCA for energy refurbishment of buildings: Conditions of comfort. **Energy and Buildings**, v. 70, p. 333–342, 2014.

AYOADE, J. O. **Introdução à Climatologia para os Trópicos**. 4ª Edição ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Bertrand Brasil, 1996.

AZARI-N, R.; KIM, Y. W. Comparative assessment of life cycle impacts of curtain wall mullions. **Building and Environment**, v. 48, n. 1, p. 135–145, 2012.

AZARI, R. Integrated energy and environmental life cycle assessment of office building envelopes. **Energy and Buildings**, v. 82, p. 156–162, 2014.

AZZOUZ, A.; BORCHERS, M.; MOREIRA, J.; MAVROGIANNI, A. Life Cycle Assessment of Energy Conservation Measures during Early Stage Office Building Design: A Case Study in London, UK. **Energy and Buildings**, v. 139, p. 547–568, 2017.

BAGLIVO, C.; CONGEDO, P. M.; D'AGOSTINO, D.; ZACÀ, I. Cost-optimal analysis and technical comparison between standard and high efficient mono-residential buildings in a warm climate. **Energy**, v. 83, p. 560–575, 2015.

BARBOSA, J. A.; BRAGANÇA, L.; MATEUS, R. Development of a Sustainability Assessment Tool for office buildings. In: **WORKSHOP CONSTRUÇÃO E REABILITAÇÃO SUSTENTÁVEIS: Soluções Eficientes para um Mercado em Crise**. Guimarães, Portugal: Universidade do Minho, 2012. p. 41–53.

BEKKER, P. C. F. A life-cycle approach in building. **Building and Environment**, v. 17, n. 1, p. 55–61, 1982.

BENEDETTO, G. S. Avaliação da aplicação do modo misto na redução da carga térmica em edifícios de escritórios nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro. **NUTAU**, n. 1, p. 203, 2008.

BESEN, P.; WESTPHAL, F. S. **Uso de vidro duplo e vidro laminado no Brasil: avaliação do desempenho energético e conforto térmico por meio de simulação computacional**. XIV ENTAC- Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Anais...Juiz de Fora, MG, Brasil: 2012

BESSA, V. M. T. **Contribuição à metodologia de avaliação das emissões de dióxido de carbono no ciclo de vida das fachadas de edifícios de escritórios**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

BORGSTEIN, E. H.; LAMBERTS, R.; HENSEN, J. L. M. Evaluating energy performance in non-domestic buildings: A review. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 734–755, 2016.

BOYANO, A.; HERNANDEZ, P.; WOLF, O. Energy demands and potential savings in European office buildings: Case studies based on EnergyPlus simulations. **Energy and Buildings**, v. 65, p. 19–28, 2013.

BPIE - BUILDINGS PERFORMANCE INSTITUTE EUROPE. **IMPLEMENTING THE COST-OPTIMAL METHODOLOGY IN EU COUNTRIES: LESSONS LEARNED FROM THREE CASE STUDIES**. Brussels, Belgium: 2013.

BRAGANÇA, L.; MATEUS, R. **Sustentabilidade de Soluções Construtivas**. CONGRESSO SOBRE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL 2. Anais...Porto, Portugal: 2006. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/6891>>

BRAGANÇA, L.; MATEUS, R. **Análise do Ciclo de Vida de Construções Metálicas**. I Congresso Luso-Africano de Construção Metálica Sustentável. Anais...Luanda, Angola: 2007

BRASIL. **Resenha Energética Brasileira 2016**. Brasília, DF, Brasil: 2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02+-+Resenha+Energética+Brasileira+2017+-+ano+ref.+2016+%28PDF%29/13d8d958-de50-4691-96e3-3ccf53f8e1e4?version=1.0>>.

BRITO, E. H. G. DE. **Tarifas de distribuição de energia elétrica no Brasil: aperfeiçoamento da metodologia**

tarifária a partir de parâmetros de continuidade do serviço, sustentabilidade econômico-financeira e simplicidade regulatória. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

BUENO, C. **Avaliação de desempenho ambiental de edificações habitacionais : Análise comparativa dos sistemas de certificação no contexto brasileiro**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

_____. **Avaliação de Ciclo de Vida na Construção Civil : Análise de Sensibilidade**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

BUILDINGS. **Buildings: Pesquisa Imobiliária Inteligente**. Disponível em: <<http://www.buildings.com.br/>>. Acesso em: 2 fev. 2016.

BUYLE, M.; BRAET, J.; AUDENAERT, A. Life cycle assessment in the construction sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 26, p. 379–388, 2013.

CABEZA, L. F. et al. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 394–416, 2014.

CARÇÃO, J. F. DE C. **Tarifas de energia elétrica no brasil**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CARLO, J. C. **Processamento de arquivos climáticos para simulação do desempenho energético de edificações** Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Santa Catarina, Brasil: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEEE), 2005. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/>>.

_____. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envolvimento de Edificações Não-residenciais**. Tese de Doutorado. Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CARVALHO, M. M. Q.; LA ROVERE, E. L.; GONÇALVES, A. C. M. Analysis of variables that influence electric energy consumption in commercial buildings in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, p. 3199–3205, 2010.

CB3E; ABIVIDRO. **Catálogo de propriedades térmicas e óticas de vidros comercializados no Brasil**. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro tecnológico. Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis, SC, 2015. Disponível em: <<http://www.pbeedifica.com.br/etiquetagem/residencial/planilhas-catalogos>>

CBCS- CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. **Aspectos da Construção Sustentável no Brasil e Promoção de Políticas Públicas: subsídios para a promoção da construção civil sustentável**. Ministério do Meio Ambiente. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA).

CEBRACE. **Características do Vidro Laminado Incolor**, Relatório interno, 2016.

CEN - COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. **EN15643-2: Integrated Assessment of Building Performance – part 2: Framework for the Assessment of Environmental Performance**. Bruxelas, Bélgica: 2011.

_____. **EN 15987: Assessment of environmental performance of buildings- Calculation method**. Bruxelas, Bélgica: 2011.

_____. **EN 15804: Sustentabilidade das obras de construção Declarações ambientais dos produtos Regras de base para as categorias de produtos de construção**. Bruxelas, Bélgica: [s.n.].

CHVATAL, K. M. S.; CORVACHO, H. The impact of increasing the building envelope insulation upon the risk of overheating in summer and an increased energy consumption. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 2, n. 4, p. 267–282, 2009.

CONGEDO, P. M.; BAGLIVO, C. D'AGOSTINO, D.; ZANCÀ, I. Cost-optimal design for nearly zero energy office buildings located in warm climates. **Energy**, v. 91, n. 244, p. 967–982, 2015.

CONSULTANTS, PR. **SimaPro Database Manual: Methods Library**. Netherlands: Pré Consultants, 2016.

CRAWLEY, D. B.; LAWRIE, L. K.; WINKELMANN, F. C.; BUHL, W. F.; HUANG, Y. J.; PEDERSEN, C. O.; STRAND, R. K. LIESEN, R. J.; FISHER, D. E.; WITTE, M. J.; GLAZER, J. EnergyPlus: a new-generation building energy simulation program. **Proceedings of Renewable and Advanced Energy Systems for the 21st Century**, v. 33, n. April, 2001.

DALLA MORA, T.; RIGHI, A.; PERON, F.; ROMAGNONI, P. Cost-Optimal measures for renovation of existing school buildings towards nZEB. **Energy Procedia**, v. 140, p. 288–302, 2017.

DALZIEL, R. Architecture. In: **The Commercial Offices Handbook**. London, England: RIBA Enterprises, 2003. p. 175–204.

DIAZ-BALTEIRO, L.; ROMERO, C. In search of a natural systems sustainability index. **Ecological Economics**, v. 49, n. 3, p. 401–405, 2004.

DIMOUDI, A.; TOMPA, C. Energy and environmental indicators related to construction of office buildings. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 53, n. 1–2, p. 86–95, dez. 2008.

DINCER, I. Environmental impacts of energy. **Energy Policy**, v. 27, n. 14, p. 845–854, 1999.

DUARTE, V. C. P. **Comparação do desempenho energético de sistemas de climatização para uma edificação comercial em Florianópolis/SC**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

EERE - DEPARTMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. **EnergyPlus**. Department of Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Building Technologies, 2013a. Disponível em: <www.energyplus.gov>

_____. **Legacy Open Studio**. Developed by the National Renewable Energy Laboratory For the United States Department of Energy, 2013b. Disponível em: <www.energyplus.gov>

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Life Cycle Assessment: Principles and Practice Scientific Applications International Corporation (SAIC)**. 2006. Disponível em: <<http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>>.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2014: Ano base 2013 (Relatório Síntese)**. Rio de Janeiro, RJ: 2014. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/S?ntese do Relat?rio Final_2014_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/S?ntese%20do%20Relat%20rio%20Final_2014_Web.pdf)>.

_____. Balço energético nacional 2015 - Ano base 2014, Relatório Síntese. **Balço energético nacional 2015- Ano base 2014**, p. 61, 2015.

_____. Balço Energético nacional 2017: Ano base 2016, Relatório Síntese. **Empresa de Pesquisa Energética- Rio de Janeiro: EPE, 2017**, p. 292, 2017.

FAY, M. R. **Comparative life cycle energy studies of typical Australian suburban dwellings**. Tese de Doutorado. University of Melbourne, 1999.

FERREIRA, M.; ALMEIDA, M.; RODRIGUES, A.; SILVA, S. M. Comparing cost-optimal and net-zero energy targets in building retrofit. **Building Research & Information**, n. July 2015, p. 1–14, 2014.

FIGUEIREDO, C. DE. **Ventilação natural em edifícios de escritórios na cidade de São Paulo: limites e possibilidades do ponto de vista do conforto térmico**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2007.

- FRIESS, W. A.; RAKHSHAN, K.; DAVIS, M. P. A global survey of adverse energetic effects of increased wall insulation in office buildings: degree day and climate zone indicators. **Energy Efficiency**, v. 10, n. 1, p. 97–116, 2017.
- FRISCHKNECHT, R.; JUNGBLUTH, N.; ALTHAUS, H.; DOKA, G.; DONES, R.; HECK, T.; HELLWEG, S. HISCHIER, R.; NEMECEK, T.; REBITZER, G.; SPIELMANN, M.; WERNET, G. The ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 10, n. 1, p. 112–122, 2005.
- FRISCHKNECHT, R.; JUNGBLUTH, N.; ALTHAUS, H.; DOKA, G.; DONES, R.; HECK, T.; HELLWEG, S. HISCHIER, R.; NEMECEK, T.; REBITZER, G.; SPIELMANN, M. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. **American Midland Naturalist**, v. 150, n. 3, p. 1–151, 2007.
- GIANNETTI, B. F.; ALMEIDA, C. M. V. B. D.; BONILLA, S. H.; RIBEIRO, C. M. Inventário de ciclo de vida da manufatura de seringas odontológicas. **Produção**, v. 18, n. 1, p. 155–169, 2008.
- GODOI, J. M. A.; OLIVEIRA JÚNIOR, S. **Gestão da Eficiência Energética**. International Workshop: Advances in Cleaner Production. **Anais...São Paulo, SP, Brasil: 2009**
- GOEDKOOP, M.; SCHRUYVER, A; OELE, M.; DURKSZ, S.; ROEST, D. **Introduction to LCA with SimaPro 7PRé Consultants, the Netherlands. Version**. Netherlands PRé Consultants, 2010. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Introduction+to+LCA+with+SimaPro+7#0>>
- GONÇALVES, J. C. S. **A sustentabilidade do edifício alto: Uma nova geração de edifícios altos e sua inserção urbana**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. **Edifício ambiental**. São Paulo, SP, Brasil: Oficina de Textos, 2015.
- GOOGLE. **Google SketchUp**, 2008.
- GOUVEIA, P. **Caracterização dos impactes da envolvente no desempenho térmico dos edifícios**. Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2008.
- GUARDIAN. **Manual técnico Guardian- SunGuard: Vidros de Controle Solar e Eficiência Energética**, 2010. Disponível em: <www.sunguardglass.com>
- GUINÉE, J. B.; GORRÉE, M.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G. KLEIJN, R.; WEGENER SLWWSWIJK, A.; UDO DE HAES, H.; DE BRUIJN, J. A.; VAN DUIN, R.; HUIJBREGTS, M. A. J. Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards. **III: Scientific background**, p. 692, 2001.
- HARMATI, N.; FOLIC, R.; MAGYAR, Z.; DRAZIC, J.; KURTOVIC-OLIC, N. Building envelope influence on the annual energy performance in office buildings. **Thermal Science**, v. 20, n. 00, p. 109–109, 2016.
- HISCHIER, R.; WEIDEMA, B.; ALTHAUS, H.; BAUER, C.; DOKA, G.; DONES, R.; FRISCHKNECHT, R.; HELLWEG, S.; HUMBERT, S.; JUNGBLUTH, N.; KÖLLNER, T.; LOERINCIK.; MARGNI, M.; NEMECK, T. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods Data v2.2 (2010). **ecoinvent Report No. 3**, n. 3, p. 176, 2010.
- HONG, T.; CHOU, S.; BONG, T. Building simulation: an overview of developments and information sources. **Building and Environment**, v. 35, n. 4, p. 347–361, 2000.
- HUANG, Y.; NIU, J. Optimal building envelope design based on simulated performance: History, current status and new potentials. **Energy and Buildings**, v. 117, p. 387–398, 2015.
- IEA- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The Multiple Benefits of Energy Efficiency: Measuring the Positive Impacts**. p. 1, 2014.
- IHARA, T.; GUSTAVSEN, A.; JELLE, B. P. Effect of facade components on energy efficiency in office buildings. **Applied Energy**, v. 158, p. 422–432, 2015.

IKP- PE. **GaBi, Software-System and Databases for Life Cycle Engineering** Stuttgart, Echterdingen, 2017. Disponível em: <<http://www.gabi-software.com/software.html>>

INMETRO- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C)**. Brasil, 2013.

JRC; IES. **ILCD Handbook- General guide on LCA- Detailed guidance**. Ispra (VA), Italy: 2010. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/index/10.1007/s11367-010-0183-4>>.

KNEIFEL, J. Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 3, p. 333–340, 2010.

KOFOWOROLA, O. F.; GHEEWALA, S. H. Environmental life cycle assessment of a commercial office building in Thailand. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 6, p. 498–511, 2008.

KOFOWOROLA, O. F.; GHEEWALA, S. H. Life cycle energy assessment of a typical office building in Thailand. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 10, p. 1076–1083, 2009.

KOMERSKA, A.; KWIATKOWSKI, J.; RUCIŃSKA, J. Integrated Evaluation of Co₂eq Emission and Thermal Dynamic Simulation for Different Façade Solutions for a Typical Office Building. **Energy Procedia**, v. 78, p. 3216–3221, nov. 2015.

KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. In: KÖPPEN, W. ; GEIGER, R. (Eds.). . **Handbuch der Klimatologie**. Berlin, Germany: Gebruder Borntrager, 1936. p. 1–44.

KRSTIĆ-FURUNDŽIĆ, A.; KOSIĆ, T. Assessment of energy and environmental performance of office building models: A case study. **Energy and Buildings**, v. 115, p. 11–22, 2016.

LABEEE- LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Arquivos climáticos INMET 2015**. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2015>>.

LEITÃO, M. As novas fontes da energia. Água e vento na terra do sol. In: **História do futuro: o horizonte do Brasil no século XXI**. 1ª edição ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Editora Intrínseca, 2015. p. 298–334.

LEITÃO, S. Energia, um debate vital para o país. **Revista Estudos Avançados**, v. 27, n. 77, p. 207–216, 2013.

LIU, A. W. **Diretrizes para projetos de edifícios de escritórios**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

LOUKAIDOU, K.; MICHPOULOS, A.; ZACHARIADIS, T. Nearly-zero Energy Buildings: Cost-optimal Analysis of Building Envelope Characteristics. **Procedia Environmental Sciences**, v. 38, p. 20–27, 2017.

LÜTZKENDORF, T.; FOLIENSTE, G.; BALOUKTSI, M.; HOULIHAN WIBERG, A. Net-zero buildings: incorporating embodied impacts. **Building Research and Information**, n. July 2015, 2014.

MA, J.-J.; DU, GANG; ZHANG, ZENG-KAI; WANG, PEI-XING; XIE, BAI-CHEN. Life cycle analysis of energy consumption and CO₂ emissions from a typical large office building in Tianjin, China. **Building and Environment**, v. 117, p. 36–48, 2017.

MACEDO, A.; MATEUS, R.; SILVA, S. **Avaliação da Sustentabilidade de Soluções de Reabilitação Energética para Coberturas de um Edifício de Habitação**. II Workshop on Sustainable Building and Rehabilitation. **Anais...**Guimarães, Portugal: 2014

MARCONDES, M.; ALUCCI, M.; GONÇALVES, J. Façades and office buildings in São Paulo (Brazil): aiming for thermal comfort and natural ventilation. **7ª Windsor Conference: The changing context of comfort in an unpredictable world**, n. April, p. 12–15, 2012.

MARCONDES, M. P. **Soluções Projetuais de Fachadas para Edifícios de Escritórios com Ventilação Natural**

em São Paulo. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MATEUS, R. **Novas tecnologias construtivas com vista à sustentabilidade da construção**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2004.

_____. **Avaliação da Sustentabilidade da Construção: Propostas para o Desenvolvimento de Edifícios mais Sustentáveis**. Tese de Doutorado. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2009.

MATEUS, R.; NEIVA, S.; BRAGANÇA, L.; MENDONÇA, P.; MACIEIRA, M. Sustainability assessment of an innovative lightweight building technology for partition walls - Comparison with conventional technologies. **Building and Environment**, v. 67, p. 147–159, 2013.

MELO, A. P.; LAMVERTS, R. VERSAGE, R. S.; ZHANG, Y. **Is thermal insulation always beneficial in hot climate?** 14th Conference of International Building Performance Simulation Association. **Anais...**Hyderabad, Índia: 2015

MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Opaque envelope parameters versus energy consumption in commercial buildings in Brazil. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 1, n. 4, p. 237–244, 2008.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, n. 1, p. 160–175, 2016.

MIRRAHIMI, S; MOHAMED, M. F.; HAW, L. C.; LUKMAN, N.; IBRAHIM, N.; FATIMAH, W.; YUSOFF, M.; AFLAKI, A. The effect of building envelope on the thermal comfort and energy saving for high-rise buildings in hot–humid climate. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1508–1519, 2016.

MURAKAMI, S.; LEVINE, M. D.; YOSHINO, H.; INOUE, T.; IKAGA, T.; SHIMODA, Y.; MIURA, S.; SERA, T.; NISHIO, M.; SAKAMOTO, Y.; FUJISAKI, W. Overview of energy consumption and GHG mitigation technologies in the building sector of Japan. **Energy Efficiency**, v. 2, n. 2, p. 179–194, 2009.

NAKAO, J. E. H. **Comparação do potencial de aquecimento global de um mesmo edifício em diferentes cenários**. 2º Congresso Brasileiro em Gestão de Ciclo de Vida em Produtos e Serviços. **Anais...**Florianópolis, Santa Catarina, Brasil: 2010

NASCIMENTO, L. B. P. DO. **Influência de variáveis construtivas e de uso de equipamentos e ocupação no consumo de energia em edifícios de escritório localizados em Londrina-PR**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR, 2009.

NEIVA, S.; MATEUS, R.; BRAGANÇA, L. **Utilização Do Método Lca No Projeto De Edifícios Sustentáveis**. 4º Congresso Construção. **Anais...**Coimbra, Portugal: 2012

NEVES, L. DE O.; MARQUES, T. H. T. Building envelope energy performance of high-rise office buildings in Sao Paulo city , Brazil. **Procedia Environmental Sciences**, v. 00, 2017.

OKA, T.; SAWACHI, T. Annex 57 – Evaluation of Embodied Energy and Carbon Dioxide Emissions for Building. **Central Europe towards Sustainable Building 2013: Keynote Lectures**, p. 2–5, 2013.

OLIVEIRA AUGUSTO, C.; BRAGANÇA, L.; ALMEIDA, M. Materiais de isolamento térmico de edifícios. Para além da energia operacional. **Revista Hábitat Sustentável**, v. 6, p. 30–39, 2015.

OLIVEIRA, C. L. **Manual do Sistema ILCD**. Brasília, DF: 2014.

ORTIZ-RODRÍGUEZ, O.; CASTELLS, F.; SONNEMANN, G. Environmental impact of the construction and use of a house: assessment of building materials and electricity end-uses in a residential area of the province of Norte de Santander, Colombia. **Ingeniería y universidad**, v. 16, n. 1, p. 147–161, 2012.

PAJCHROWSKI, G. NOSKOWIAK, A.; LEWANDOWSKA, A.; STRYKOWSKI, W. Materials composition or energy characteristic- What is more important in environmental life cycle of buildings? **Building and**

Environment, v. 72, p. 15–27, 2014.

PASQUALI, F. E. BEYER, P. O.; HENNES, A. M.; SARTORI, C. **Potential for energy savings in retrofitting of an office building in São Paulo**. 12th Conference of International Building Performance Simulation Association. *Anais...Sydney, Australia*: 2011

PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; VELÁZQUEZ, D. Revisiting energy efficiency fundamentals. *Energy Efficiency*, v. 6, n. 2, p. 239–254, 2013.

PILE, J. F. **Perspective for interior designers**. Whitney Li ed. New York: 1984.

PNUD- PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. **Economia de 20 anos com eficiência energética em edifícios pode abastecer todo o MS por um ano**. 2014.

PRÉ-CONSULTANTS. **SimaPro**. Amersfoort, NetherlandsPRé Consultants, 2008.

PRÉ-CONSULTANTS. **SimaPro**. Amersfoort, NetherlandsPRé Consultants, 2017. Disponível em: <<http://www.simapro.co.uk/aboutsimapro.html>>

RAJI, B.; TENPIERIK, M. J.; VAN DEN DOBBELSTEEN, A. An assessment of energy-saving solutions for the envelope design of high-rise buildings in temperate climates: A case study in the Netherlands. *Energy and Buildings*, v. 124, p. 210–221, 2015.

RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, K. K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, v. 42, n. 10, p. 1592–1600, out. 2010.

RODRIGUES, C. R. B.; ZOLDAN, M. A.; LEITE, M. L. G.; OLIVEIRA, I. L. Sistemas computacionais de apoio a ferramenta análise de ciclo de vida do produto (ACV). *Anais do XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, p. 1–15, 2008.

ROLIM, G. DE S. CAMARGO, M. B. P.; JENE, D. G. L.; MORAES, F. L. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas. *Bragantia*, v. 66, n. 4, p. 711–720, 2007.

ROMERO, M. A. **Arquitetura comportamento & energia**. Tese de Livre-docência. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

RORIZ, M. Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros. **ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. Relatório interno**. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>>, 2012.

SAADE, M. R. M.; SILVA, M. G.; GOMES, V. **Methodological discussion and piloting of LCA- based environmental indicators for Brazilian building materials**. CIB WORLD BUILDING CONGRESS. *Anais...Brisbane, Austrália*: 2013

SANSÃO, JÚLIA H. **Análise ambiental de alvenarias em blocos: uma discussão baseada na avaliação do ciclo de vida e no desempenho térmico de envoltórias**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

SANTANA, M. V. **Influência de parâmetros construtivos no consumo de energia de edifícios de escritório localizados em Florianópolis–SC**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SANTOS, C. A. P. DOS; MATIAS, L. **ITE50: Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios**. Lisboa, Portugal: Laboratório Nacional de Engenharia Civil- LNEC, 2006.

SCHEUER, C.; KEOLEIAN, G. A.; REPPE, P. Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications. *Energy and Buildings*, v. 35, n. 10, p. 1049–1064, nov. 2003.

- SILVA, V. G. DA. **Avaliação da Sustentabilidade de edifícios de escritórios brasileiros: diretrizes e base metodológica**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- SILVA, V. G. DA; SILVA, M. G. DA. Seleção de materiais e edifícios de alto desempenho ambiental. In: GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. (Eds.). **Edifício ambiental**. São Paulo, SP, Brasil: Oficina de Textos, 2015. p. 592.
- SILVA, S. M.; MATEUS, R.; MARQUES, L.; RAMOS, M.; ALMEIDA, M. Contribution of the solar systems to the nZEB and ZEB design concept in Portugal – Energy, economics and environmental life cycle analysis. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, p. 1–16, 2016.
- SOARES, S. R.; SOUZA, D. M. DE; PEREIRA, S. W. A avaliação do ciclo de vida no contexto da construção civil. **Coletânea Habitar- Construção e Meio Ambiente**, v. 7, n. 1985, 2006.
- SOUZA, J. **Alternativas tecnológicas para edificações**. Vol.1 ed. São Paulo, SP, Brasil: Editora Pini, 2008.
- TABORIANSKI, V. M.; PRADO, R. T. A. Methodology of CO 2 emission evaluation in the life cycle of office building façades. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 33, n. 1, p. 41–47, 2012.
- TAKANO, A. et al. The effect of material selection on life cycle energy balance: A case study on a hypothetical building model in Finland. **Building and Environment**, v. 89, p. 192–202, 2015.
- TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- TETTEY, U. Y. A.; DODOO, A.; GUSTAVSSON, L. Effects of different insulation materials on primary energy and CO2 emission of a multi-storey residential building. **Energy and Buildings**, v. 82, p. 369–377, 2014.
- TSIKALOUDAKI, K. THEODOSIOU, TH.; LASKOS, K.; BIKAS, D. Assessing cooling energy performance of windows for residential buildings in the Mediterranean zone. **Energy Conversion and Management**, v. 64, p. 335–343, 2012.
- UMAKOSHI, E. M. **Avaliação de Desempenho Ambiental e Arquitetura Paramétrica Generativa para o Projeto do Edifício Alto**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- UNIÃO EUROPEIA (UE). **Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council: on the energy performance of buildings (EPBD recast)** Official Journal of the European Union. Estrasburgo, França: 2010.
- _____. **Regulamento Delegado n.º 244/2012** Jornal Oficial da União Europeia. Bruxelas, Bélgica, 2012.
- VASCONCELOS, S. DE L. **Ferramentas de análise de grau de sustentabilidade no ambiente construído: Avaliação de materiais de construção no ato do projeto de arquitetura**. Tese de Doutorado. Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2014.
- VENÂNCIO, R.; PEDRINI, A. The Influence of Design Decisions on Energy Consumption and Thermal Performance: The Case of UFRN Campus, Brazil. **Eleventh International IBPSA Conference**, p. 137–143, 2009.
- VERONEZI, A. B. P.; JR., J. DA R. L.; ALENCAR, C. T. DE. **Sistema de classificação de edifícios de escritórios no Brasil**. V Seminário Internacional da LARES. **Anais...** São Paulo, SP, Brasil: 2005
- VIRACON, G. **Características do Vidro Opaco**. Relatório interno, 2016.
- WESTPHAL, F. S. **Análise de incertezas e de sensibilidade aplicadas à simulação de desempenho energético de edificações comerciais**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- WESTPHAL, F. S.; ANDREIS, C. Influence of Glazed Façades on Energy Consumption for Air Conditioning

of Office Buildings in Brazilian Climates. **Journal of Engineering Research and Application**, v. 6, n. 11, p. 54–60, 2016.

WILLERS, C. D.; RODRIGUES, L. B.; SILVA, C. A. DA. Avaliação do ciclo de vida no Brasil : uma investigação nas principais bases científicas nacionais. **Produção**, v. 23, n. abr/jun 2013, p. 436–447, 2013.

YOSHINO, H.; HONG, T.; NORD, N. IEA EBC annex 53: Total energy use in buildings—Analysis and evaluation methods. **Energy and Buildings**, v. 152, n. March 2013, p. 124–136, 2017.

ZABALZA BRIBIÁN, I.; ARANDA USÓN, A.; SCARPELLINI, S. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. **Building and Environment**, v. 44, n. 12, p. 2510–2520, dez. 2009.

ZABALZA BRIBIÁN, I.; VALERO CAPILLA, A.; ARANDA USÓN, A. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Building and Environment**, 2011.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Aqui são apresentadas as propriedades dos materiais opacos e propriedades termofísicas dos vidros utilizados no modelo de simulação. Todos os dados foram retirados da norma NBR 15220-3 (Anexo D)- Desempenho Térmico de Edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social (ABNT, 2005a).

PROPRIEDADES	MATERIAIS				
	ARGAMASSA REBOCO	REVEST. GESSO	LAJE DE CONCRETO	BLOCO DE CONCRETO	PLACA DE GESSO
Rugosidade	Média	Média	Rugoso	Rugoso	Média
Espessura (m)	0,025	0,005	0,15	0,14	0,015
Condutividade (W/m.K)	1,15	0,84	1,75	1,75	0,35
Densidade (kg/m ³)	2000	1200	2200	2400	875
Calor específico (J/kg.K)	840	1000	1000	1000	840
Absortância	Térmica	0,90	0,90	0,90	0,90
	Solar	0,30	0,50	0,70	0,50
	Visível	0,30	0,50	0,70	0,50

PROPRIEDADES	TIPOS DE VIDROS				
	V 1	V 2	V 3	V 4	V 5
Espessura (mm)	6	6	8	24	8
Transmitância à radiação solar (incidência normal) (%)	0,79	0,48	0,52	0,19	0,54
Refletância à radiação solar na face 1 (incidência normal) (%)	0,07	0,30	0,17	0,10	0,12
Refletância à radiação solar na face 2 (incidência normal) (%)	0,07	0,37	0,15	0,22	0,12
Transmitância à radiação solar no espectro visível (incid. normal) (%)	0,88	0,32	0,72	0,39	0,65
Refletância à radiação visível na face 1 (incidência normal) (%)	0,08	0,45	0,09	0,15	0,15
Refletância à radiação visível na face 2 (incidência normal) (%)	0,08	0,54	0,08	0,22	0,15
Transmitância em onda longa (incidência normal) (%)	0	0	0	0	0
Emissividade em ondas longas na face 1 (%)	0,89	0,84	0,84	0,84	0,84
Emissividade em ondas longas na face 2 (%)	0,89	0,84	0,84	0,84	0,84
Condutividade (W/m.K)	1	1	1	1	0,607²⁵
Transmitância térmica (W/m ²)	5,70	5,79	5,67	2,79	5,50
Fator solar	0,82	0,54	0,44	0,28	0,62

VIDRO 1 = Laminado Incolor (Ref. CEBRACE)

VIDRO 2 = Laminado Refletivo (Ref. REFLECTASOL – CEBRACE)

VIDRO 3 = Vidro de controle solar Baixo-Emissivo (Low-e) (Ref. Neutral 70 clear – GUARDIAN)

VIDRO 4 = Laminado Duplo com Baixo Fator Solar (Ref. Neutral Gray – GUARDIAN) = vidro externo 6mm + ar 12mm + vidro interno 6mm

VIDRO 5 = Revest. Externo translúcido (Laminado + PVB Branco) (Ref. GLASSEC-VIRACON)

* Tais dados foram retirados dos catálogos da CEBRACE (2016)²⁶, CB3E & ABIVIDRO (2015), GUARDIAN (2010) e GLASSEC-VIRACON (2016)²⁷.

²⁵ O cálculo da Condutividade térmica, considerando a resistência da camada de ar, consta no Apêndice B.

²⁶ Miyagi, M. H. CEBRACE. Mensagem enviada por maicol.miyagi@cebrace.com.br em 27/04/2016.

²⁷ SCAPOLAN, H. GLASSEC-VIRACON. Mensagem enviada por hugo.scapolan@glassecviracon.com.br em 25/04/2016.

APÊNDICE B

Cálculo para alterar a condutividade térmica da Fachada Cortina (vidro translúcido), a fim de considerar a resistência presente na camada de ar. Assim, para considerar a resistência térmica da camada de ar, a condutividade térmica do ar, somada à do vidro, deveria ser próxima à da camada de ar. De acordo com a equação 1, a condutividade é inversamente proporcional à resistência térmica, ou seja, foi preciso somar as resistências (da camada de ar e do vidro), para que a condutividade total fosse menor, fazendo com que a resistência fosse maior.

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

R = Resistencia térmica da camada(m².K/W)

e = espessura do material (m)

λ = Condutividade térmica do material (W/(m².k))

Considerando que $R_{ar}=0,17m^2.K/W$ (ABNT, 2005b) e $R_{vidro}=0,008/1$ (espessura/condutividade), a resistência total seria $R_{total}=0,178m^2.K/W$. Dessa forma, a condutividade total (somando a camada de ar e do vidro), será $\lambda_{total}=0,108/0,178 = 0,607 W/(m.K)$. Esse foi o valor considerado para as simulações no *EnergyPlus*, conforme apresentado na tabela acima. Ter duas camadas aumenta a resistência à passagem do fluxo de calor, fazendo com que a condutividade deva ser menor.

APÊNDICE C

Quantificação das distâncias de transportes, em km, para cada produto presente no Inventário do Ciclo de Vida utilizados em todos os cenários de análise do presente estudo, para os três climas: Curitiba (PR), São Paulo (SP) e Manaus (AM).

MATERIAL	LOCAL	PERCURSOS	TIPO DE TRANSPORTE	DISTÂNCIA (Km)	REFERÊNCIA
Aço galvanizado	Mogi das Cruzes (SP)	Mogi das Cruzes (SP) > São Paulo (SP)	Rodoviário	65,4	Site Fabricante
		Mogi das Cruzes (SP) > Curitiba (PR)	Rodoviário	472,0	
		Mogi das Cruzes (SP) > Manicoré (AM)	Rodoviário	3735,0	
		Manicoré (AM) (BR-319)	Fluvial	0,2	
		Manicoré > Careiro da Várzea (AM)	Rodoviário	246,0	
		Careiro da Várzea (AM) > Porto Manaus (AM) (BR-319)	Fluvial	11,9	
		Porto Manaus (AM) > Centro Manaus (AM)	Rodoviário	10,6	
Aço inox	Sumaré (SP)	Sumaré (SP) > São Paulo (SP)	Rodoviário	120,0	Site Fabricante
		Sumaré (SP) > Joinville (SC)	Rodoviário	618,0	
		Joinville (SC) > Curitiba (PR)	Rodoviário	133,0	
		Sumaré (SP) > Manicoré (AM)	Rodoviário	3584,0	
		Manicoré (AM) (BR-319)	Fluvial	0,2	
		Manicoré > Careiro da Várzea (AM)	Rodoviário	246,0	
		Careiro da Várzea (AM) > Porto Manaus (AM) (BR-319)	Fluvial	11,9	
Porto Manaus (AM) > Centro Manaus (AM)	Rodoviário	10,6			
Alumínio	Alumínio (SP)	Alumínio (SP) > São Paulo (SP)	Rodoviário	88,6	E-mail Fabricante
		Alumínio (SP) > Curitiba (PR)	Rodoviário	399,0	
		Alumínio (SP) > Manicoré (AM)	Rodoviário	3658,0	
		Manicoré (AM) (BR-319)	Fluvial	0,2	
		Manicoré > Careiro da Várzea (AM)	Rodoviário	246,0	
		Careiro da Várzea (AM) > Porto Manaus (AM) (BR-319)	Fluvial	11,9	
		Porto Manaus (AM) > Centro Manaus (AM)	Rodoviário	10,6	
E.P.D.M.	São Paulo (SP)	São Paulo (SP)	Rodoviário	10,0	E-mail Fabricante
		São Paulo (SP) > Curitiba (PR)	Rodoviário	409,0	

MATERIAL	LOCAL	PERCURSOS	TIPO DE TRANSPORTE	DISTÂNCIA (Km)	REFERÊNCIA
E.P.D.M.	São Paulo	São Paulo > Manicoré (AM)	Rodoviário	3653,9	E-mail Fabricante
		Manicoré (AM) (BR-319)	Fluvial	0,2	
		Manicoré > Careiro da Várzea (AM)	Rodoviário	246,0	
		Careiro da Várzea (AM) > Porto Manaus (AM) (BR-319)	Fluvial	11,9	
		Porto Manaus (AM) > Centro Manaus (AM)	Rodoviário	10,6	
Nylon	São Paulo (SP)	São Paulo (SP)	Rodoviário	10,0	Site Fabricante
		São Paulo (SP) > Curitiba (PR)	Rodoviário	409,0	
		São Paulo > Manicoré (AM)	Rodoviário	3653,9	
		Manicoré (AM) (BR-319)	Fluvial	0,2	
		Manicoré > Careiro da Várzea (AM)	Rodoviário	246,0	
		Careiro da Várzea (AM) > Porto Manaus (AM) (BR-319)	Fluvial	11,9	
		Porto Manaus (AM) > Centro Manaus (AM)	Rodoviário	10,6	
Poliétileno expandido	Santo André (SP)	Santo André (SP) > São Paulo (SP)	Rodoviário	30,3	E-mail Fabricante
		Santo André (SP) > Curitiba (PR)	Rodoviário	439,0	
		Santo André (SP) > Manicoré (AM)	Rodoviário	3700,0	
		Manicoré (AM) (BR-319)	Fluvial	0,2	
		Manicoré > Careiro da Várzea (AM)	Rodoviário	246,0	
		Careiro da Várzea (AM) > Porto Manaus (AM) (BR-319)	Fluvial	11,9	
		Porto Manaus (AM) > Centro Manaus (AM)	Rodoviário	10,6	
Silicone	Midland (EUA)	Midland (EUA) > Santos (SP)	Marítimo	8405,0	E-mail Fabricante
		Santos (SP) > Hortolândia (SP)	Rodoviário	191,0	
		Hortolândia (SP) > São Paulo (SP)	Rodoviário	116,0	
		Midland (EUA) > Santos (SP)	Marítimo	8405,0	
		Santos (SP) > Hortolândia (SP)	Rodoviário	191,0	
		Hortolândia (SP) > Curitiba (PR)	Rodoviário	497,0	
		Midland (EUA) > Santos (SP)	Marítimo	8405,0	
		Santos (SP) > Hortolândia (SP)	Rodoviário	191,0	
		Hortolândia (SP) > Manicoré (AM)	Rodoviário	3577,0	

MATERIAL	LOCAL	PERCURSOS	TIPO DE TRANSPORTE	DISTÂNCIA (Km)	REFERÊNCIA
Silicone	Midland (EUA)	Manicoré (AM) (BR-319)	Fluvial	0,2	E-mail Fabricante
		Manicoré > Careiro da Várzea (AM)	Rodoviário	246,0	
		Careiro da Várzea (AM) > Porto Manaus (AM) (BR-319)	Fluvial	11,9	
		Porto Manaus (AM) > Centro Manaus (AM)	Rodoviário	10,6	
Vidro vão-luz (Incolor)	Caçapava (SP)	Caçapava (SP) > São Paulo (SP)	Rodoviário	114,0	E-mail Fabricante
		Caçapava (SP) > Curitiba (PR)	Rodoviário	524,0	
		Caçapava (SP) > Manicoré (AM)	Rodoviário	3733,2	
		Manicoré (AM) (BR-319)	Fluvial	0,2	
		Manicoré > Careiro da Várzea (AM)	Rodoviário	246,0	
		Careiro da Várzea (AM) > Porto Manaus (AM) (BR-319)	Fluvial	11,9	
		Porto Manaus (AM) > Centro Manaus (AM)	Rodoviário	10,6	
Vidro vão-luz (Duplo)	Tatuí (SP)	Tatuí (SP) > São Paulo (SP)	Rodoviário	143,0	E-mail Fabricante
		Tatuí (SP) > Curitiba (SP)	Rodoviário	403,0	
		Tatuí (SP) > Manicoré (AM)	Rodoviário	3630,0	
		Manicoré (AM) (BR-319)	Fluvial	0,2	
		Manicoré > Careiro da Várzea (AM)	Rodoviário	246,0	
		Careiro da Várzea (AM) > Porto Manaus (AM) (BR-319)	Fluvial	11,9	
		Porto Manaus (AM) > Centro Manaus (AM)	Rodoviário	10,6	
Vidro vão-luz (Low-e)	Tatuí (SP)	Tatuí (SP) > São Paulo (SP)	Rodoviário	143,0	Site Fabricante
		Tatuí (SP) > Curitiba (SP)	Rodoviário	403,0	
		Tatuí (SP) > Manicoré (AM)	Rodoviário	3630,0	
		Manicoré (AM) (BR-319)	Fluvial	0,2	
		Manicoré > Careiro da Várzea (AM)	Rodoviário	246,0	
		Careiro da Várzea (AM) > Porto Manaus (AM) (BR-319)	Fluvial	11,9	
		Porto Manaus (AM) > Centro Manaus (AM)	Rodoviário	10,6	
Vidro vão-luz (Refletivo)	Barra Velha (SC)	Barra Velha (SC) > São Paulo (SP)	Rodoviário	577,0	E-mail Fabricante
		Barra Velha (SC) > Curitiba (PR)	Rodoviário	175,0	

MATERIAL	LOCAL	PERCURSOS	TIPO DE TRANSPORTE	DISTÂNCIA (Km)	REFERÊNCIA
Vidro vão-luz (Refletivo)	Barra Velha (SC)	Barra Velha (SC) > Manicoré (AM)	Rodoviário	4222,0	E-mail Fabricante
		Manicoré (AM) (BR-319)	Fluvial	0,2	
		Manicoré > Careiro da Várzea (AM)	Rodoviário	246,0	
		Careiro da Várzea (AM) > Porto Manaus (AM) (BR-319)	Fluvial	11,9	
		Porto Manaus (AM) > Centro Manaus (AM)	Rodoviário	10,6	
Vidro (Translúcido)	Nazaré Paulista (SP)	Nazaré Paulista (SP) > São Paulo (SP)	Rodoviário	70,2	E-mail Fabricante
		Nazaré Paulista (SP) > Curitiba (PR)	Rodoviário	497,0	
		Nazaré Paulista (SP) > Manicoré (AM)	Rodoviário	3646,4	
		Manicoré (AM) (BR-319)	Fluvial	0,2	
		Manicoré > Careiro da Várzea (AM)	Rodoviário	246,0	
		Careiro da Várzea (AM) > Porto Manaus (AM) (BR-319)	Fluvial	11,9	
		Porto Manaus (AM) > Centro Manaus (AM)	Rodoviário	10,6	
Arg. cimento (revest. externo)	São Paulo (SP)	São Paulo (SP)	Rodoviário	10,0	Site Fabricante
	Curitiba (PR)	Curitiba (PR)	Rodoviário	10,0	
	Manaus (AM)	Manaus (AM)	Rodoviário	10,0	
Arg. gesso (revest. interno)	São Roque (SP)	São Roque (SP) > São Paulo (SP)	Rodoviário	63,8	Site Fabricante
		São Roque (SP) > Maringá (PR)	Rodoviário	570,0	
		Maringá (PR) > Curitiba (PR)	Rodoviário	428,0	
		São Roque (SP) > Cuiabá (MT)	Rodoviário	1557,0	
		Cuiabá (MT) > Manicoré (AM)	Rodoviário	2105,0	
		Manicoré (AM) (BR-319)	Fluvial	0,2	
		Manicoré > Careiro da Várzea (AM)	Rodoviário	246,0	
		Careiro da Várzea (AM) > Porto Manaus (AM) (BR-319)	Fluvial	11,9	
Porto Manaus (AM) > Centro Manaus (AM)	Rodoviário	10,6			
Bloco de concreto	Mogi Guaçu (SP)	Mogi Guaçu (SP) > São Paulo (SP)	Rodoviário	167,0	Site Fabricante
	Rio Branco do Sul (PR)	Rio Branco do Sul (PR) > Curitiba (PR)	Rodoviário	45,1	
	Manaus (AM)	Manaus (AM)	Rodoviário	10,0	

MATERIAL	LOCAL	PERCURSOS	TIPO DE TRANSPORTE	DISTÂNCIA (Km)	REFERÊNCIA
Tinta acrílica para fachada branca	São Bernando do Campo (SP)	São Bernando do Campo (SP) > São Paulo (SP)	Rodoviário	26,4	E-mail Fabricante
		São Bernando do Campo (SP) > Pinhais (PR)	Rodoviário	435,0	
		Pinhais (PR) > Curitiba (PR)	Rodoviário	10,2	
		São Bernando do Campo (SP) > Manicoré (AM)	Rodoviário	3711,0	
		Manicoré (AM) (BR-319)	Fluvial	0,2	
		Manicoré > Careiro da Várzea (AM)	Rodoviário	246,0	
		Careiro da Várzea (AM) > Porto Manaus (AM) (BR-319)	Fluvial	11,9	
		Porto Manaus (AM) > Centro Manaus (AM)	Rodoviário	10,6	
Tinta para gesso branca	Jaboatão dos Guararapes (PE)	Jaboatão dos Guararapes (PE) > São Paulo (SP)	Rodoviário	2619,0	E-mail Fabricante
		Jaboatão dos Guararapes (PE) > Pinhais (PR)	Rodoviário	3105,0	
		Pinhais (PR) > Curitiba (PR)	Rodoviário	10,2	
		Jaboatão dos Guararapes (PE) > São Luís (MA)	Rodoviário	1551,0	
		São Luís (MA) > Manicoré (AM)	Rodoviário	4768,5	
		Manicoré (AM) (BR-319)	Fluvial	0,2	
		Manicoré > Careiro da Várzea (AM)	Rodoviário	246,0	
		Careiro da Várzea (AM) > Porto Manaus (AM) (BR-319)	Fluvial	11,9	
Viga (concreto usinado)	São Paulo (SP)	São Paulo (SP)	Rodoviário	10,0	Site Fabricante
	Curitiba (PR)	Curitiba (PR)	Rodoviário	10,0	
	Manaus (AM)	Manaus (AM)	Rodoviário	10,0	
Viga (aço-armadura)	Mogi das Cruzes (SP)	Mogi das Cruzes (SP) > São Paulo (SP)	Rodoviário	65,4	Site Fabricante
	Mogi das Cruzes (SP)	Mogi das Cruzes (SP) > Curitiba (PR)	Rodoviário	472,0	
	Marabá (PA)	Marabá (PA) > Anapú (PA)	Rodoviário	434,1	
		Anapú (PA) (Transamazônica)	Fluvial	450,0	
		Itaituba (PA) - Miritituba (PA)	Rodoviário	548,0	
		Miritituba (PA) (Transamazônica)	Fluvial	2,8	
Miritituba (PA) - Humaitá (AM)	Rodoviário	1046,0			

MATERIAL	LOCAL	PERCURSOS	TIPO DE TRANSPORTE	DISTÂNCIA (Km)	REFERÊNCIA
Viga (aço-armadura)	Marabá (PA)	Humaitá (AM) (Transamazônica)	Fluvial	1,4	Site Fabricante
		Humaitá (AM) > Manicoré (AM)	Rodoviário	430,0	
		Manicoré (AM) (BR-319)	Fluvial	0,2	
		Manicoré > Careiro da Várzea (AM)	Rodoviário	246,0	
		Careiro da Várzea (AM) > Porto Manaus (AM) (BR-319)	Fluvial	11,9	
		Porto Manaus (AM) > Centro Manaus (AM)	Rodoviário	10,6	

Fonte: A autora (2018).

APÊNDICE D

Valores de conversão dos impactos ambientais, de acordo com cada categoria de impacto do método CML, referente à 1kg de material (produção do material e transporte), para os três climas: Curitiba (PR), São Paulo (SP) e Manaus (AM).

VALORES DE CONVERSÃO PARA AS CATEGORIAS DE IMPACTO (CURITIBA)										
Material	Método CML							Método CED		
	Depleção Abiótica	Depleção Abiótica (C.fósseis)	Aquecimento Global (GWP100a)	Dest. Camada de Ozônio (ODP)	Oxidação Fotoquímica (POCP)	Acidificação (AP)	Eutrofização (EP)	Energia Total	Energia Não Renovável	Energia Renovável
(Kg)	(kg Sb eq)	(MJ)	(kg CO ₂ eq)	(kg CFC-11 eq)	(kg C ₂ H ₄ eq)	(kg SO ₂ eq)	(kg PO ₄ eq)	(MJ)	(MJ)	(MJ)
Aço_Galvanizado_Ctba	1.75E-06	1.72E+01	1.91E+00	9.41E-08	1.21E-03	7.65E-03	3.04E-03	1.84E+01	1.77E+01	7.49E-01
Aço_Inoxidavel_Ctba	1.23E-04	4.83E+01	4.79E+00	2.43E-07	1.79E-03	2.79E-02	8.12E-03	6.44E+01	5.16E+01	1.28E+01
Aluminio_Ctba	2.68E-05	1.73E+02	1.77E+01	6.94E-07	6.31E-03	1.02E-01	2.47E-02	2.06E+02	1.84E+02	2.20E+01
Argamassa_Gesso_Ctba	3.86E-07	2.96E+00	1.97E-01	3.00E-08	4.13E-05	9.41E-04	1.94E-04	3.20E+00	3.03E+00	1.77E-01
Argamassa_Ctba	1.54E-07	1.33E+00	2.38E-01	9.38E-09	3.17E-05	6.94E-04	1.98E-04	1.69E+00	1.38E+00	3.09E-01
Bloco_Concreto_Ctba	4.13E-07	8.86E-01	1.12E-01	8.29E-09	1.88E-05	3.89E-04	1.14E-04	1.03E+00	9.30E-01	9.69E-02
Concreto_Armado_Ctba	6.16E-07	1.43E+00	1.83E-01	9.39E-09	6.88E-05	6.57E-04	2.67E-04	1.63E+00	1.49E+00	1.41E-01
EPDM_Ctba	8.53E-05	8.05E+01	2.67E+00	6.28E-07	7.25E-04	1.27E-02	2.85E-03	8.96E+01	8.42E+01	5.39E+00
Fita_Poliet_Ctba	8.27E-05	1.01E+02	4.07E+00	6.82E-07	1.70E-03	3.32E-02	4.69E-03	1.17E+02	1.08E+02	9.65E+00
Nylon_Ctba	3.01E-06	1.23E+02	8.28E+00	1.25E-08	1.38E-03	2.96E-02	7.75E-03	1.38E+02	1.37E+02	1.34E+00
Silicone_Ctba	7.77E-06	4.42E+01	2.84E+00	1.94E-06	9.49E-04	1.61E-02	3.47E-03	5.53E+01	4.75E+01	7.78E+00
Tarucel_Poliet_Ctba	8.29E-05	1.01E+02	4.12E+00	6.92E-07	1.71E-03	3.35E-02	4.75E-03	1.18E+02	1.08E+02	9.66E+00
Tinta_Acrylica_Ctba	1.65E-05	3.82E+01	2.60E+00	2.44E-07	1.57E-03	1.68E-02	5.14E-03	4.43E+01	4.08E+01	3.55E+00
Vidro_Duplo_Ctba	4.73E-06	1.40E+01	1.22E+00	1.44E-07	3.95E-04	9.53E-03	1.59E-03	1.63E+01	1.47E+01	1.61E+00
Vidro_Incolor_Ctba	3.06E-06	1.24E+01	1.06E+00	1.01E-07	3.53E-04	9.89E-03	1.07E-03	1.35E+01	1.26E+01	9.07E-01
Vidro_Low-e_Ctba	3.02E-06	1.21E+01	1.04E+00	9.76E-08	3.50E-04	9.82E-03	1.06E-03	1.33E+01	1.24E+01	9.03E-01
Vidro_Opaco_Ctba	5.51E-06	1.39E+01	1.19E+00	1.15E-07	3.90E-04	1.08E-02	1.37E-03	1.54E+01	1.44E+01	9.30E-01
Vidro_Refletivo_Ctba	3.06E-06	1.24E+01	1.06E+00	1.01E-07	3.53E-04	9.89E-03	1.07E-03	1.35E+01	1.26E+01	9.07E-01
Eletricidade (1kW)	5.74E-07	2.11E+00	2.29E-01	2.42E-08	9.71E-05	1.03E-03	3.58E-04	7.74E+00	2.65E+00	5.09E+00

Fonte: A autora (2018).

VALORES DE CONVERSÃO PARA AS CATEGORIAS DE IMPACTO (SÃO PAULO)										
Material	Método CML							Método CED		
	Depleção Abiótica	Depleção Abiótica (C.fósseis)	Aquecimento Global (GWP100a)	Dest. Camada de Ozônio (ODP)	Oxidação Fotoquímica (POCP)	Acidificação (AP)	Eutrofização (EP)	Energia Total	Energia Não Renovável	Energia Renovável
(Kg)	(kg Sb eq)	(MJ)	(kg CO ₂ eq)	(kg CFC-11 eq)	(kg C ₂ H ₄ eq)	(kg SO ₂ eq)	(kg PO ₄ eq)	(MJ)	(MJ)	(MJ)
Aço_Galvanizado_SP	1.61E-06	1.63E+01	1.85E+00	8.40E-08	1.20E-03	7.41E-03	2.98E-03	1.75E+01	1.68E+01	7.37E-01
Aço_Inoxidavel_SP	1.23E-04	4.69E+01	4.71E+00	2.28E-07	1.77E-03	2.76E-02	8.04E-03	6.30E+01	5.02E+01	1.28E+01
Aluminio_SP	2.67E-05	1.72E+02	1.77E+01	6.86E-07	6.31E-03	1.02E-01	2.47E-02	2.05E+02	1.83E+02	2.20E+01
Argamassa_Gesso_SP	6.90E-08	9.78E-01	7.38E-02	6.96E-09	1.96E-05	3.99E-04	7.05E-05	1.15E+00	1.00E+00	1.51E-01
Argamassa_SP	1.54E-07	1.33E+00	2.38E-01	9.38E-09	3.17E-05	6.94E-04	1.98E-04	1.69E+00	1.38E+00	3.09E-01
Bloco_Concreto_SP	4.54E-07	1.15E+00	1.28E-01	1.13E-08	2.17E-05	4.60E-04	1.30E-04	1.29E+00	1.19E+00	1.00E-01
Concreto_Armado_SP	6.16E-07	1.43E+00	1.83E-01	9.39E-09	6.88E-05	6.57E-04	2.67E-04	1.63E+00	1.49E+00	1.41E-01
EPDM_SP	8.51E-05	7.97E+01	2.61E+00	6.18E-07	7.16E-04	1.25E-02	2.79E-03	8.87E+01	8.34E+01	5.38E+00
Fita_Poliet_SP	8.26E-05	9.97E+01	4.01E+00	6.72E-07	1.69E-03	3.30E-02	4.64E-03	1.16E+02	1.07E+02	9.64E+00
Nylon_SP	2.87E-06	1.22E+02	8.23E+00	2.69E-09	1.38E-03	2.93E-02	7.69E-03	1.37E+02	1.36E+02	1.33E+00
Silicone_SP	7.64E-06	4.34E+01	2.79E+00	1.93E-06	9.40E-04	1.59E-02	3.42E-03	5.45E+01	4.67E+01	7.77E+00
Tarucel_Poliet_SP	8.27E-05	1.01E+02	4.07E+00	6.82E-07	1.70E-03	3.32E-02	4.69E-03	1.17E+02	1.08E+02	9.65E+00
Tinta_Acrylica_SP	1.64E-05	3.73E+01	2.55E+00	2.33E-07	1.56E-03	1.65E-02	5.08E-03	4.34E+01	3.99E+01	3.54E+00
Vidro_Duplo_SP	4.59E-06	1.31E+01	1.16E+00	1.33E-07	3.86E-04	9.29E-03	1.54E-03	1.54E+01	1.38E+01	1.60E+00
Vidro_Incolor_SP	2.92E-06	1.15E+01	1.00E+00	9.05E-08	3.43E-04	9.65E-03	1.02E-03	1.26E+01	1.17E+01	8.95E-01
Vidro_Low-e_SP	2.93E-06	1.15E+01	1.01E+00	9.12E-08	3.44E-04	9.67E-03	1.02E-03	1.27E+01	1.18E+01	8.96E-01
Vidro_Opaco_SP	5.37E-06	1.30E+01	1.14E+00	1.05E-07	3.80E-04	1.06E-02	1.32E-03	1.45E+01	1.35E+01	9.18E-01
Vidro_Refletivo_SP	2.92E-06	1.15E+01	1.00E+00	9.05E-08	3.43E-04	9.65E-03	1.02E-03	1.26E+01	1.17E+01	8.95E-01
Eletricidade (1kW)	5.74E-07	2.11E+00	2.29E-01	2.42E-08	9.71E-05	1.03E-03	3.58E-04	7.74E+00	2.65E+00	5.09E+00

Fonte: A autora (2018).

VALORES DE CONVERSÃO PARA AS CATEGORIAS DE IMPACTO (MANAUS)										
Material	Método CML							Método CED		
	Depleção Abiótica	Depleção Abiótica (C.fósseis)	Aquecimento Global (GWP100a)	Dest. Camada de Ozônio (ODP)	Oxidação Fo-toquímica (POCP)	Acidificação (AP)	Eutrofização (EP)	Energia Total	Energia Não Renovável	Energia Renovável
	(Kg)	(kg Sb eq)	(MJ)	(kg CO ₂ eq)	(kg CFC-11 eq)	(kg C ₂ H ₄ eq)	(kg SO ₂ eq)	(kg PO ₄ eq)	(MJ)	(MJ)
Aço_Galvanizado_SP	2.94E-06	2.46E+01	2.37E+00	1.81E-07	1.29E-03	9.69E-03	3.50E-03	2.61E+01	2.53E+01	8.49E-01
Aço_Inoxidavel_SP	1.24E-04	5.48E+01	5.20E+00	3.20E-07	1.86E-03	2.97E-02	8.53E-03	7.12E+01	5.83E+01	1.29E+01
Aluminio_SP	2.80E-05	1.80E+02	1.82E+01	7.81E-07	6.39E-03	1.04E-01	2.52E-02	2.13E+02	1.91E+02	2.21E+01
Argamassa_Gesso_SP	1.38E-06	9.18E+00	5.83E-01	1.02E-07	1.09E-04	2.64E-03	5.82E-04	9.62E+00	9.36E+00	2.61E-01
Argamassa_SP	1.54E-07	1.33E+00	2.38E-01	9.38E-09	3.17E-05	6.94E-04	1.98E-04	1.69E+00	1.38E+00	3.09E-01
Bloco_Concreto_SP	4.01E-07	8.12E-01	1.08E-01	7.42E-09	1.80E-05	3.69E-04	1.09E-04	9.50E-01	8.54E-01	9.59E-02
Concreto_Armado_SP	6.16E-07	1.43E+00	1.83E-01	9.39E-09	6.88E-05	6.57E-04	2.67E-04	1.63E+00	1.49E+00	1.41E-01
EPDM_SP	8.64E-05	8.80E+01	3.13E+00	7.15E-07	8.07E-04	1.47E-02	3.31E-03	9.73E+01	9.18E+01	5.50E+00
Fita_Poliet_SP	8.39E-05	1.08E+02	4.53E+00	7.69E-07	1.78E-03	3.53E-02	5.16E-03	1.25E+02	1.15E+02	9.75E+00
Nylon_SP	4.20E-06	1.30E+02	8.75E+00	9.91E-08	1.47E-03	3.16E-02	8.21E-03	1.46E+02	1.44E+02	1.44E+00
Silicone_SP	8.90E-06	5.13E+01	3.28E+00	2.02E-06	1.03E-03	1.80E-02	3.91E-03	6.26E+01	5.48E+01	7.87E+00
Tarucel_Poliet_SP	8.40E-05	1.09E+02	4.58E+00	7.78E-07	1.79E-03	3.55E-02	5.21E-03	1.26E+02	1.16E+02	9.76E+00
Tinta_Acrylica_SP	1.77E-05	4.57E+01	3.07E+00	3.31E-07	1.65E-03	1.88E-02	5.61E-03	5.21E+01	4.84E+01	3.65E+00
Vidro_Duplo_SP	5.91E-06	2.14E+01	1.68E+00	2.29E-07	4.76E-04	1.15E-02	2.05E-03	2.39E+01	2.22E+01	1.71E+00
Vidro_Incolor_SP	4.24E-06	1.97E+01	1.52E+00	1.86E-07	4.33E-04	1.19E-02	1.53E-03	2.12E+01	2.01E+01	1.01E+00
Vidro_Low-e_SP	4.20E-06	1.95E+01	1.50E+00	1.84E-07	4.31E-04	1.18E-02	1.52E-03	2.09E+01	1.99E+01	1.00E+00
Vidro_Opaco_SP	6.69E-06	2.13E+01	1.65E+00	2.01E-07	4.70E-04	1.29E-02	1.83E-03	2.30E+01	2.19E+01	1.03E+00
Vidro_Refletivo_SP	4.24E-06	1.97E+01	1.52E+00	1.86E-07	4.33E-04	1.19E-02	1.53E-03	2.12E+01	2.01E+01	1.01E+00
Eletricidade (1kW)	5.74E-07	2.11E+00	2.29E-01	2.42E-08	9.71E-05	1.03E-03	3.58E-04	7.74E+00	2.65E+00	5.09E+00

Fonte: A autora (2018).

APÊNDICE E

Quantidade de impactos ambientais (materiais e consumo energético ao longo de 60 anos) em todas as categorias selecionadas para este estudo (métodos CML e CED), para todos os cenários de análise nos três climas: Curitiba (PR), São Paulo (SP) e Manaus (AM).

Quantidade de impactos para 60 anos de vida útil da edificação (CURITIBA)										
CENÁRIOS	Método CML							Método CED		
	Depleção Abiótica	Depleção Abiótica (C.fósseis)	Aquecimento Global (GWP100a)	Destruição da Camada de Ozônio (ODP)	Oxidação Fotoquímica (POCP)	Acidificação (AP)	Eutrofização (EP)	Energia Total	Energia Não Renovável	Energia Renovável
	(kg Sb eq/m ²)	(MJ/m ²)	(kg CO ₂ eq/m ²)	(kg CFC-11 eq/m ²)	(kg C ₂ H ₄ eq/m ²)	(kg SO ₂ eq/m ²)	(kg PO ₄ eq/m ²)	(MJ/m ²)	(MJ/m ²)	(MJ/m ²)
FT VIn SDS 30	7,41E-04	7,41E-04	3,10E+02	7,41E-04	1,17E-01	1,39E+00	4,49E-01	7,59E+03	4,34E+03	4,34E+03
FT VDp SDS 30	7,35E-04	7,35E-04	3,04E+02	7,35E-04	1,15E-01	1,38E+00	4,40E-01	7,33E+03	4,15E+03	4,15E+03
FT VLw SDS 30	6,92E-04	6,92E-04	2,90E+02	6,92E-04	1,09E-01	1,31E+00	4,17E-01	6,91E+03	3,88E+03	3,88E+03
FT VRf SDS 30	6,65E-04	6,65E-04	2,80E+02	6,65E-04	1,05E-01	1,26E+00	4,02E-01	6,58E+03	3,67E+03	3,67E+03
FT VIn CDS 30	6,96E-04	6,96E-04	2,98E+02	6,96E-04	1,11E-01	1,36E+00	4,27E-01	6,81E+03	3,71E+03	3,71E+03
FT VDp CDS 30	7,03E-04	7,03E-04	2,98E+02	7,03E-04	1,11E-01	1,37E+00	4,28E-01	6,73E+03	3,63E+03	3,63E+03
FT VLw CDS 30	6,61E-04	6,61E-04	2,84E+02	6,61E-04	1,05E-01	1,30E+00	4,05E-01	6,32E+03	3,38E+03	3,38E+03
FT VRf CDS 30	6,42E-04	6,42E-04	2,77E+02	6,42E-04	1,02E-01	1,27E+00	3,94E-01	6,08E+03	3,23E+03	3,23E+03
FT VIn SDS 55	9,39E-04	9,39E-04	3,88E+02	9,39E-04	1,52E-01	1,78E+00	5,73E-01	1,02E+04	6,01E+03	6,01E+03
FT VDp SDS 55	9,05E-04	9,05E-04	3,68E+02	9,05E-04	1,43E-01	1,71E+00	5,43E-01	9,39E+03	5,43E+03	5,43E+03
FT VLw SDS 55	7,05E-04	7,05E-04	2,94E+02	7,05E-04	1,12E-01	1,37E+00	4,26E-01	6,99E+03	3,89E+03	3,89E+03
FT VRf SDS 55	7,92E-04	7,92E-04	3,29E+02	7,92E-04	1,27E-01	1,52E+00	4,82E-01	8,22E+03	4,71E+03	4,71E+03
FT VIn CDS 55	7,54E-04	7,54E-04	3,20E+02	7,54E-04	1,22E-01	1,50E+00	4,65E-01	7,52E+03	4,14E+03	4,14E+03
FT VDp CDS 55	7,96E-04	7,96E-04	3,31E+02	7,96E-04	1,26E-01	1,56E+00	4,82E-01	7,73E+03	4,23E+03	4,23E+03
FT VLw CDS 55	7,16E-04	7,16E-04	3,05E+02	7,16E-04	1,15E-01	1,44E+00	4,40E-01	6,97E+03	3,75E+03	3,75E+03
FT VRf CDS 55	6,91E-04	6,91E-04	2,95E+02	6,91E-04	1,11E-01	1,39E+00	4,25E-01	6,67E+03	3,57E+03	3,57E+03
FT VIn SDS 80	1,26E-03	1,26E-03	5,15E+02	1,26E-03	2,08E-01	2,39E+00	7,76E-01	1,45E+04	8,79E+03	8,79E+03
FT VDp SDS 80	1,20E-03	1,20E-03	4,80E+02	1,20E-03	1,92E-01	2,26E+00	7,21E-01	1,31E+04	7,79E+03	7,79E+03
FT VLw SDS 80	1,09E-03	1,09E-03	4,47E+02	1,09E-03	1,78E-01	2,10E+00	6,68E-01	1,21E+04	7,21E+03	7,21E+03
FT VRf SDS 80	1,01E-03	1,01E-03	4,14E+02	1,01E-03	1,65E-01	1,94E+00	6,17E-01	1,11E+04	6,53E+03	6,53E+03
FT VIn CDS 80	9,85E-04	9,85E-04	4,11E+02	9,85E-04	1,62E-01	1,94E+00	6,10E-01	1,06E+04	6,09E+03	6,09E+03
FT VDp CDS 80	9,87E-04	9,87E-04	4,04E+02	9,87E-04	1,58E-01	1,93E+00	5,98E-01	1,01E+04	5,70E+03	5,70E+03
FT VLw CDS 80	9,05E-04	9,05E-04	3,79E+02	9,05E-04	1,48E-01	1,81E+00	5,58E-01	9,42E+03	5,31E+03	5,31E+03

Quantidade de impactos para 60 anos de vida útil da edificação (CURITIBA) (conclusão)

CENÁRIOS	Método CML							Método CED		
	Depleção Abiótica	Depleção Abiótica (C.fósseis)	Aquecimento Global (GWP100a)	Destruição da Camada de Ozônio (ODP)	Oxidação Fotoquímica (POCP)	Acidificação (AP)	Eutrofização (EP)	Energia Total	Energia Não Renovável	Energia Renovável
	(kg Sb eq/m ²)	(MJ/m ²)	(kg CO ₂ eq/m ²)	(kg CFC-11 eq/m ²)	(kg C ₂ H ₄ eq/m ²)	(kg SO ₂ eq/m ²)	(kg PO ₄ eq/m ²)	(MJ/m ²)	(MJ/m ²)	(MJ/m ²)
FT VRf CDS 80	8,58E-04	8,58E-04	3,60E+02	8,58E-04	1,41E-01	1,72E+00	5,31E-01	8,85E+03	4,96E+03	4,96E+03
FC VIn SDS 30	2,42E-03	2,42E-03	4,42E+02	2,42E-03	1,70E-01	2,14E+00	6,53E-01	1,11E+04	6,25E+03	6,25E+03
FC VDp SDS 30	2,47E-03	2,47E-03	4,48E+02	2,47E-03	1,71E-01	2,15E+00	6,66E-01	1,10E+04	6,12E+03	6,12E+03
FC VLw SDS 30	2,38E-03	2,38E-03	4,24E+02	2,38E-03	1,62E-01	2,07E+00	6,25E-01	1,04E+04	5,79E+03	5,79E+03
FC VRf SDS 30	2,35E-03	2,35E-03	4,13E+02	2,35E-03	1,58E-01	2,01E+00	6,07E-01	1,01E+04	5,57E+03	5,57E+03
FC VIn CDS 30	2,31E-03	2,31E-03	4,06E+02	2,31E-03	1,54E-01	2,01E+00	5,94E-01	9,47E+03	5,08E+03	5,08E+03
FC VDp CDS 30	2,39E-03	2,39E-03	4,23E+02	2,39E-03	1,60E-01	2,06E+00	6,25E-01	9,78E+03	5,20E+03	5,20E+03
FC VLw CDS 30	2,30E-03	2,30E-03	4,01E+02	2,30E-03	1,51E-01	1,98E+00	5,86E-01	9,26E+03	4,90E+03	4,90E+03
FC VRf CDS 30	2,29E-03	2,29E-03	3,96E+02	2,29E-03	1,49E-01	1,96E+00	5,77E-01	9,10E+03	4,81E+03	4,81E+03
FC VIn SDS 55	2,55E-03	2,55E-03	4,92E+02	2,55E-03	1,94E-01	2,37E+00	7,37E-01	1,30E+04	7,52E+03	7,52E+03
FC VDp SDS 55	2,57E-03	2,57E-03	4,86E+02	2,57E-03	1,89E-01	2,34E+00	7,28E-01	1,24E+04	7,00E+03	7,00E+03
FC VLw SDS 55	2,46E-03	2,46E-03	4,54E+02	2,46E-03	1,77E-01	2,21E+00	6,76E-01	1,16E+04	6,56E+03	6,56E+03
FC VRf SDS 55	2,40E-03	2,40E-03	4,31E+02	2,40E-03	1,68E-01	2,10E+00	6,42E-01	1,09E+04	6,14E+03	6,14E+03
FC VIn CDS 55	2,33E-03	2,33E-03	4,09E+02	2,33E-03	1,57E-01	2,02E+00	6,05E-01	9,79E+03	5,30E+03	5,30E+03
FC VDp CDS 55	2,41E-03	2,41E-03	4,30E+02	2,41E-03	1,64E-01	2,11E+00	6,38E-01	1,02E+04	5,39E+03	5,39E+03
FC VLw CDS 55	2,31E-03	2,31E-03	4,02E+02	2,31E-03	1,54E-01	1,99E+00	5,92E-01	9,47E+03	5,03E+03	5,03E+03
FC VRf CDS 55	2,29E-03	2,29E-03	3,92E+02	2,29E-03	1,50E-01	1,95E+00	5,78E-01	9,22E+03	4,90E+03	4,90E+03
FC VIn SDS 80	2,83E-03	2,83E-03	5,98E+02	2,83E-03	2,41E-01	2,86E+00	9,08E-01	1,68E+04	1,00E+04	1,00E+04
FC VDp SDS 80	2,82E-03	2,82E-03	5,85E+02	2,82E-03	2,33E-01	2,80E+00	8,86E-01	1,59E+04	9,24E+03	9,24E+03
FC VLw SDS 80	2,67E-03	2,67E-03	5,33E+02	2,67E-03	2,12E-01	2,57E+00	8,04E-01	1,45E+04	8,42E+03	8,42E+03
FC VRf SDS 80	2,57E-03	2,57E-03	4,95E+02	2,57E-03	1,97E-01	2,39E+00	7,47E-01	1,33E+04	7,70E+03	7,70E+03
FC VIn CDS 80	2,51E-03	2,51E-03	4,78E+02	2,51E-03	1,88E-01	2,34E+00	7,17E-01	1,23E+04	6,96E+03	6,96E+03
FC VDp CDS 80	2,53E-03	2,53E-03	4,76E+02	2,53E-03	1,85E-01	2,33E+00	7,12E-01	1,19E+04	6,43E+03	6,43E+03
FC VLw CDS 80	2,45E-03	2,45E-03	4,51E+02	2,45E-03	1,76E-01	2,22E+00	6,73E-01	1,13E+04	6,22E+03	6,22E+03
FC VRf CDS 80	2,39E-03	2,39E-03	4,30E+02	2,39E-03	1,68E-01	2,12E+00	6,42E-01	1,07E+04	5,86E+03	5,86E+03

Fonte: A autora (2018), com base nos resultados extraídos pelo programa SimaPro.

Quantidade de impactos para 60 anos de vida útil da edificação (SÃO PAULO)										
CENÁRIOS	Método CML							Método CED		
	Depleção Abiótica	Depleção Abiótica (C.fósseis)	Aquecimento Global (GWP100a)	Destruição da Camada de Ozônio (ODP)	Oxidação Fotoquímica (POCP)	Acidificação (AP)	Eutrofização (EP)	Energia Total	Energia Não Renovável	Energia Renovável
	(kg Sb eq/m ²)	(MJ/m ²)	(kg CO ₂ eq/m ²)	(kg CFC-11 eq/m ²)	(kg C ₂ H ₄ eq/m ²)	(kg SO ₂ eq/m ²)	(kg PO ₄ eq/m ²)	(MJ/m ²)	(MJ/m ²)	(MJ/m ²)
FT VIn SDS 30	8,62E-04	8,62E-04	3,58E+02	8,62E-04	1,38E-01	1,61E+00	5,24E-01	9,22E+03	5,41E+03	5,41E+03
FT VDp SDS 30	8,50E-04	8,50E-04	3,51E+02	8,50E-04	1,34E-01	1,59E+00	5,12E-01	8,89E+03	5,17E+03	5,17E+03
FT VLw SDS 30	8,25E-04	8,25E-04	3,43E+02	8,25E-04	1,31E-01	1,55E+00	5,00E-01	8,70E+03	5,06E+03	5,06E+03
FT VRf SDS 30	8,16E-04	8,16E-04	3,40E+02	8,16E-04	1,30E-01	1,53E+00	4,95E-01	8,60E+03	5,00E+03	5,00E+03
FT VIn CDS 30	8,09E-04	8,09E-04	3,43E+02	8,09E-04	1,30E-01	1,57E+00	4,98E-01	8,33E+03	4,71E+03	4,71E+03
FT VDp CDS 30	8,34E-04	8,34E-04	3,50E+02	8,34E-04	1,33E-01	1,61E+00	5,09E-01	8,49E+03	4,79E+03	4,79E+03
FT VLw CDS 30	8,09E-04	8,09E-04	3,43E+02	8,09E-04	1,30E-01	1,57E+00	4,97E-01	8,31E+03	4,69E+03	4,69E+03
FT VRf CDS 30	8,08E-04	8,08E-04	3,43E+02	8,08E-04	1,30E-01	1,57E+00	4,97E-01	8,32E+03	4,70E+03	4,70E+03
FT VIn SDS 55	1,06E-03	1,06E-03	4,37E+02	1,06E-03	1,73E-01	2,00E+00	6,51E-01	1,19E+04	7,12E+03	7,12E+03
FT VDp SDS 55	9,91E-04	9,91E-04	4,03E+02	9,91E-04	1,58E-01	1,86E+00	5,97E-01	1,06E+04	6,21E+03	6,21E+03
FT VLw SDS 55	9,60E-04	9,60E-04	3,96E+02	9,60E-04	1,55E-01	1,83E+00	5,85E-01	1,04E+04	6,16E+03	6,16E+03
FT VRf SDS 55	9,13E-04	9,13E-04	3,77E+02	9,13E-04	1,47E-01	1,74E+00	5,57E-01	9,85E+03	5,78E+03	5,78E+03
FT VIn CDS 55	8,47E-04	8,47E-04	3,57E+02	8,47E-04	1,38E-01	1,67E+00	5,23E-01	8,78E+03	4,96E+03	4,96E+03
FT VDp CDS 55	8,67E-04	8,67E-04	3,59E+02	8,67E-04	1,38E-01	1,69E+00	5,26E-01	8,70E+03	4,87E+03	4,87E+03
FT VLw CDS 55	8,36E-04	8,36E-04	3,52E+02	8,36E-04	1,36E-01	1,65E+00	5,15E-01	8,58E+03	4,82E+03	4,82E+03
FT VRf CDS 55	8,29E-04	8,29E-04	3,50E+02	8,29E-04	1,35E-01	1,63E+00	5,11E-01	8,53E+03	4,80E+03	4,80E+03
FT VIn SDS 80	1,44E-03	1,44E-03	5,85E+02	1,44E-03	2,37E-01	2,71E+00	8,84E-01	1,68E+04	1,03E+04	1,03E+04
FT VDp SDS 80	1,33E-03	1,33E-03	5,36E+02	1,33E-03	2,15E-01	2,51E+00	8,08E-01	1,50E+04	9,03E+03	9,03E+03
FT VLw SDS 80	1,25E-03	1,25E-03	5,09E+02	1,25E-03	2,05E-01	2,38E+00	7,64E-01	1,42E+04	8,59E+03	8,59E+03
FT VRf SDS 80	1,15E-03	1,15E-03	4,69E+02	1,15E-03	1,88E-01	2,19E+00	7,04E-01	1,29E+04	7,77E+03	7,77E+03
FT VIn CDS 80	1,12E-03	1,12E-03	4,66E+02	1,12E-03	1,85E-01	2,19E+00	6,95E-01	1,24E+04	7,32E+03	7,32E+03
FT VDp CDS 80	1,07E-03	1,07E-03	4,38E+02	1,07E-03	1,73E-01	2,09E+00	6,52E-01	1,13E+04	6,49E+03	6,49E+03
FT VLw CDS 80	1,01E-03	1,01E-03	4,19E+02	1,01E-03	1,66E-01	2,00E+00	6,22E-01	1,08E+04	6,23E+03	6,23E+03
FT VRf CDS 80	9,50E-04	9,50E-04	3,97E+02	9,50E-04	1,56E-01	1,88E+00	5,88E-01	1,01E+04	5,79E+03	5,79E+03
FC VIn SDS 30	2,55E-03	2,55E-03	4,94E+02	2,55E-03	1,93E-01	2,38E+00	7,36E-01	1,29E+04	7,46E+03	7,46E+03
FC VDp SDS 30	2,58E-03	2,58E-03	4,95E+02	2,58E-03	1,92E-01	2,36E+00	7,40E-01	1,26E+04	7,21E+03	7,21E+03
FC VLw SDS 30	2,50E-03	2,50E-03	4,74E+02	2,50E-03	1,84E-01	2,29E+00	7,03E-01	1,21E+04	6,93E+03	6,93E+03
FC VRf SDS 30	2,47E-03	2,47E-03	4,61E+02	2,47E-03	1,79E-01	2,23E+00	6,84E-01	1,17E+04	6,69E+03	6,69E+03

Quantidade de impactos para 60 anos de vida útil da edificação (SÃO PAULO) (conclusão)

CENÁRIOS	Método CML							Método CED		
	Depleção Abiótica	Depleção Abiótica (C.fósseis)	Aquecimento Global (GWP100a)	Destruição da Camada de Ozônio (ODP)	Oxidação Fotoquímica (POCP)	Acidificação (AP)	Eutrofização (EP)	Energia Total	Energia Não Renovável	Energia Renovável
	(kg Sb eq/m ²)	(MJ/m ²)	(kg CO ₂ eq/m ²)	(kg CFC-11 eq/m ²)	(kg C ₂ H ₄ eq/m ²)	(kg SO ₂ eq/m ²)	(kg PO ₄ eq/m ²)	(MJ/m ²)	(MJ/m ²)	(MJ/m ²)
FC VIn CDS 30	2,40E-03	2,40E-03	4,39E+02	2,40E-03	1,68E-01	2,15E+00	6,46E-01	1,06E+04	5,85E+03	5,85E+03
FC VDp CDS 30	2,45E-03	2,45E-03	4,46E+02	2,45E-03	1,70E-01	2,17E+00	6,62E-01	1,06E+04	5,75E+03	5,75E+03
FC VLw CDS 30	2,37E-03	2,37E-03	4,29E+02	2,37E-03	1,64E-01	2,11E+00	6,30E-01	1,02E+04	5,56E+03	5,56E+03
FC VRf CDS 30	2,35E-03	2,35E-03	4,23E+02	2,35E-03	1,61E-01	2,08E+00	6,21E-01	1,00E+04	5,46E+03	5,46E+03
FC VIn SDS 55	2,71E-03	2,71E-03	5,55E+02	2,71E-03	2,20E-01	2,65E+00	8,36E-01	1,51E+04	8,95E+03	8,95E+03
FC VDp SDS 55	2,70E-03	2,70E-03	5,40E+02	2,70E-03	2,13E-01	2,58E+00	8,14E-01	1,43E+04	8,26E+03	8,26E+03
FC VLw SDS 55	2,60E-03	2,60E-03	5,10E+02	2,60E-03	2,01E-01	2,46E+00	7,65E-01	1,36E+04	7,85E+03	7,85E+03
FC VRf SDS 55	2,53E-03	2,53E-03	4,83E+02	2,53E-03	1,90E-01	2,33E+00	7,24E-01	1,27E+04	7,33E+03	7,33E+03
FC VIn CDS 55	2,43E-03	2,43E-03	4,51E+02	2,43E-03	1,75E-01	2,21E+00	6,70E-01	1,12E+04	6,26E+03	6,26E+03
FC VDp CDS 55	2,49E-03	2,49E-03	4,60E+02	2,49E-03	1,77E-01	2,24E+00	6,86E-01	1,12E+04	6,10E+03	6,10E+03
FC VLw CDS 55	2,40E-03	2,40E-03	4,35E+02	2,40E-03	1,68E-01	2,14E+00	6,45E-01	1,06E+04	5,81E+03	5,81E+03
FC VRf CDS 55	2,37E-03	2,37E-03	4,23E+02	2,37E-03	1,64E-01	2,09E+00	6,28E-01	1,03E+04	5,63E+03	5,63E+03
FC VIn SDS 80	3,02E-03	3,02E-03	6,76E+02	3,02E-03	2,74E-01	3,21E+00	1,03E+00	1,94E+04	1,18E+04	1,18E+04
FC VDp SDS 80	2,99E-03	2,99E-03	6,52E+02	2,99E-03	2,62E-01	3,10E+00	9,91E-01	1,82E+04	1,08E+04	1,08E+04
FC VLw SDS 80	2,84E-03	2,84E-03	6,03E+02	2,84E-03	2,43E-01	2,89E+00	9,14E-01	1,69E+04	1,00E+04	1,00E+04
FC VRf SDS 80	2,73E-03	2,73E-03	5,59E+02	2,73E-03	2,25E-01	2,68E+00	8,48E-01	1,55E+04	9,16E+03	9,16E+03
FC VIn CDS 80	2,68E-03	2,68E-03	5,47E+02	2,68E-03	2,18E-01	2,65E+00	8,27E-01	1,47E+04	8,55E+03	8,55E+03
FC VDp CDS 80	2,70E-03	2,70E-03	5,41E+02	2,70E-03	2,13E-01	2,62E+00	8,15E-01	1,41E+04	7,94E+03	7,94E+03
FC VLw CDS 80	2,58E-03	2,58E-03	5,06E+02	2,58E-03	2,00E-01	2,47E+00	7,60E-01	1,32E+04	7,49E+03	7,49E+03
FC VRf CDS 80	2,51E-03	2,51E-03	4,77E+02	2,51E-03	1,89E-01	2,33E+00	7,17E-01	1,23E+04	6,97E+03	6,97E+03

Fonte: A autora (2018), com base nos resultados extraídos pelo programa SimaPro.

Quantidade de impactos para 60 anos de vida útil da edificação (MANAUS)										
CENÁRIOS	Método CML							Método CED		
	Depleção Abiótica	Depleção Abiótica (c,fósseis)	Aquecimento Global (GWP100a)	Destruição da Camada de Ozônio (ODP)	Oxidação Fotoquímica (POCP)	Acidificação (AP)	Eutrofização (EP)	Energia Total	Energia Não Renovável	Energia Renovável
	(kg Sb eq/m ²)	(MJ/m ²)	(kg CO ₂ eq/m ²)	(kg CFC-11 eq/m ²)	(kg C ₂ H ₄ eq/m ²)	(kg SO ₂ eq/m ²)	(kg PO ₄ eq/m ²)	(MJ/m ²)	(MJ/m ²)	(MJ/m ²)
FT VIn SDS 30	2,03E-03	2,03E-03	8,25E+02	2,03E-03	3,35E-01	3,72E+00	1,25E+00	2,49E+04	1,57E+04	1,57E+04
FT VDp SDS 30	1,74E-03	1,74E-03	7,06E+02	1,74E-03	2,83E-01	3,19E+00	1,06E+00	2,08E+04	1,29E+04	1,29E+04
FT VLw SDS 30	1,87E-03	1,87E-03	7,62E+02	1,87E-03	3,08E-01	3,44E+00	1,15E+00	2,28E+04	1,43E+04	1,43E+04
FT VRf SDS 30	1,78E-03	1,78E-03	7,26E+02	1,78E-03	2,93E-01	3,27E+00	1,10E+00	2,16E+04	1,35E+04	1,35E+04
FT VIn CDS 30	1,95E-03	1,95E-03	7,99E+02	1,95E-03	3,22E-01	3,62E+00	1,21E+00	2,36E+04	1,47E+04	1,47E+04
FT VDp CDS 30	1,68E-03	1,68E-03	6,87E+02	1,68E-03	2,74E-01	3,12E+00	1,03E+00	1,97E+04	1,21E+04	1,21E+04
FT VLw CDS 30	1,81E-03	1,81E-03	7,43E+02	1,81E-03	2,98E-01	3,37E+00	1,12E+00	2,17E+04	1,35E+04	1,35E+04
FT VRf CDS 30	1,73E-03	1,73E-03	7,11E+02	1,73E-03	2,85E-01	3,22E+00	1,07E+00	2,07E+04	1,28E+04	1,28E+04
FT VIn SDS 55	2,31E-03	2,31E-03	9,35E+02	2,31E-03	3,82E-01	4,25E+00	1,42E+00	2,86E+04	1,81E+04	1,81E+04
FT VDp SDS 55	2,15E-03	2,15E-03	8,66E+02	2,15E-03	3,52E-01	3,95E+00	1,32E+00	2,61E+04	1,63E+04	1,63E+04
FT VLw SDS 55	2,23E-03	2,23E-03	9,03E+02	2,23E-03	3,69E-01	4,12E+00	1,37E+00	2,75E+04	1,73E+04	1,73E+04
FT VRf SDS 55	2,18E-03	2,18E-03	8,82E+02	2,18E-03	3,60E-01	4,01E+00	1,34E+00	2,68E+04	1,69E+04	1,69E+04
FT VIn CDS 55	2,23E-03	2,23E-03	9,09E+02	2,23E-03	3,70E-01	4,15E+00	1,38E+00	2,73E+04	1,71E+04	1,71E+04
FT VDp CDS 55	1,92E-03	1,92E-03	7,78E+02	1,92E-03	3,13E-01	3,58E+00	1,18E+00	2,27E+04	1,40E+04	1,40E+04
FT VLw CDS 55	2,09E-03	2,09E-03	8,55E+02	2,09E-03	3,47E-01	3,92E+00	1,29E+00	2,54E+04	1,58E+04	1,58E+04
FT VRf CDS 55	1,99E-03	1,99E-03	8,12E+02	1,99E-03	3,29E-01	3,72E+00	1,23E+00	2,40E+04	1,49E+04	1,49E+04
FT VIn SDS 80	2,75E-03	2,75E-03	1,11E+03	2,75E-03	4,58E-01	5,08E+00	1,70E+00	3,45E+04	2,19E+04	2,19E+04
FT VDp SDS 80	2,58E-03	2,58E-03	1,03E+03	2,58E-03	4,24E-01	4,76E+00	1,58E+00	3,16E+04	1,99E+04	1,99E+04
FT VLw SDS 80	2,62E-03	2,62E-03	1,06E+03	2,62E-03	4,34E-01	4,84E+00	1,61E+00	3,26E+04	2,06E+04	2,06E+04
FT VRf SDS 80	2,55E-03	2,55E-03	1,03E+03	2,55E-03	4,24E-01	4,71E+00	1,57E+00	3,17E+04	2,01E+04	2,01E+04
FT VIn CDS 80	2,63E-03	2,63E-03	1,07E+03	2,63E-03	4,39E-01	4,91E+00	1,63E+00	3,27E+04	2,06E+04	2,06E+04
FT VDp CDS 80	2,50E-03	2,50E-03	1,01E+03	2,50E-03	4,11E-01	4,65E+00	1,53E+00	3,03E+04	1,89E+04	1,89E+04
FT VLw CDS 80	2,57E-03	2,57E-03	1,04E+03	2,57E-03	4,28E-01	4,81E+00	1,59E+00	3,17E+04	1,99E+04	1,99E+04
FT VRf CDS 80	2,51E-03	2,51E-03	1,02E+03	2,51E-03	4,19E-01	4,70E+00	1,56E+00	3,10E+04	1,95E+04	1,95E+04
FC VIn SDS 30	3,94E-03	3,94E-03	1,05E+03	3,94E-03	4,22E-01	4,88E+00	1,59E+00	3,12E+04	1,93E+04	1,93E+04
FC VDp SDS 30	3,78E-03	3,78E-03	9,69E+02	3,78E-03	3,87E-01	4,50E+00	1,47E+00	2,83E+04	1,72E+04	1,72E+04
FC VLw SDS 30	3,82E-03	3,82E-03	1,00E+03	3,82E-03	4,02E-01	4,67E+00	1,51E+00	2,96E+04	1,82E+04	1,82E+04
FC VRf SDS 30	3,75E-03	3,75E-03	9,73E+02	3,75E-03	3,90E-01	4,53E+00	1,47E+00	2,86E+04	1,76E+04	1,76E+04

Quantidade de impactos para 60 anos de vida útil da edificação (MANAUS) (conclusão)

CENÁRIOS	Método CML							Método CED		
	Depleção Abiótica	Depleção Abiótica (c,fósseis)	Aquecimento Global (GWP100a)	Destruição da Camada de Ozônio (ODP)	Oxidação Fotoquímica (POCP)	Acidificação (AP)	Eutrofização (EP)	Energia Total	Energia Não Renovável	Energia Renovável
	(kg Sb eq/m ²)	(MJ/m ²)	(kg CO ₂ eq/m ²)	(kg CFC-11 eq/m ²)	(kg C ₂ H ₄ eq/m ²)	(kg SO ₂ eq/m ²)	(kg PO ₄ eq/m ²)	(MJ/m ²)	(MJ/m ²)	(MJ/m ²)
FC Vin CDS 30	3,78E-03	3,78E-03	9,91E+02	3,78E-03	3,97E-01	4,64E+00	1,50E+00	2,89E+04	1,76E+04	1,76E+04
FC VDp CDS 30	3,59E-03	3,59E-03	9,02E+02	3,59E-03	3,57E-01	4,22E+00	1,36E+00	2,56E+04	1,54E+04	1,54E+04
FC VLw CDS 30	3,67E-03	3,67E-03	9,46E+02	3,67E-03	3,77E-01	4,44E+00	1,42E+00	2,73E+04	1,66E+04	1,66E+04
FC VRf CDS 30	3,59E-03	3,59E-03	9,15E+02	3,59E-03	3,64E-01	4,30E+00	1,38E+00	2,63E+04	1,59E+04	1,59E+04
FC Vin SDS 55	4,08E-03	4,08E-03	1,10E+03	4,08E-03	4,46E-01	5,11E+00	1,67E+00	3,32E+04	2,06E+04	2,06E+04
FC VDp SDS 55	4,01E-03	4,01E-03	1,06E+03	4,01E-03	4,28E-01	4,94E+00	1,62E+00	3,16E+04	1,94E+04	1,94E+04
FC VLw SDS 55	4,00E-03	4,00E-03	1,07E+03	4,00E-03	4,33E-01	4,98E+00	1,63E+00	3,21E+04	1,98E+04	1,98E+04
FC VRf SDS 55	3,94E-03	3,94E-03	1,04E+03	3,94E-03	4,23E-01	4,86E+00	1,59E+00	3,13E+04	1,93E+04	1,93E+04
FC Vin CDS 55	3,93E-03	3,93E-03	1,05E+03	3,93E-03	4,23E-01	4,90E+00	1,59E+00	3,11E+04	1,91E+04	1,91E+04
FC VDp CDS 55	3,75E-03	3,75E-03	9,64E+02	3,75E-03	3,85E-01	4,51E+00	1,46E+00	2,78E+04	1,68E+04	1,68E+04
FC VLw CDS 55	3,81E-03	3,81E-03	9,97E+02	3,81E-03	4,01E-01	4,68E+00	1,51E+00	2,92E+04	1,78E+04	1,78E+04
FC VRf CDS 55	3,72E-03	3,72E-03	9,62E+02	3,72E-03	3,86E-01	4,51E+00	1,46E+00	2,81E+04	1,71E+04	1,71E+04
FC Vin SDS 80	4,43E-03	4,43E-03	1,24E+03	4,43E-03	5,06E-01	5,73E+00	1,89E+00	3,80E+04	2,38E+04	2,38E+04
FC VDp SDS 80	4,34E-03	4,34E-03	1,19E+03	4,34E-03	4,84E-01	5,53E+00	1,82E+00	3,61E+04	2,22E+04	2,22E+04
FC VLw SDS 80	4,30E-03	4,30E-03	1,19E+03	4,30E-03	4,85E-01	5,52E+00	1,81E+00	3,62E+04	2,25E+04	2,25E+04
FC VRf SDS 80	4,23E-03	4,23E-03	1,16E+03	4,23E-03	4,72E-01	5,37E+00	1,77E+00	3,53E+04	2,20E+04	2,20E+04
FC Vin CDS 80	4,28E-03	4,28E-03	1,18E+03	4,28E-03	4,83E-01	5,52E+00	1,81E+00	3,59E+04	2,22E+04	2,22E+04
FC VDp CDS 80	4,22E-03	4,22E-03	1,15E+03	4,22E-03	4,64E-01	5,35E+00	1,75E+00	3,41E+04	2,09E+04	2,09E+04
FC VLw CDS 80	4,23E-03	4,23E-03	1,16E+03	4,23E-03	4,73E-01	5,43E+00	1,77E+00	3,50E+04	2,16E+04	2,16E+04
FC VRf CDS 80	4,16E-03	4,16E-03	1,14E+03	4,16E-03	4,62E-01	5,30E+00	1,73E+00	3,42E+04	2,11E+04	2,11E+04

Fonte: A autora (2018), com base nos resultados extraídos pelo programa SimaPro.

APÊNDICE F

Valores normalizados referentes aos indicadores (categorias de impacto) presentes nas dimensões ambiental e econômica previstas pela MARS-SC, para os 48 cenários do clima de São Paulo (SP).

CENÁRIOS	DIMENSÕES							ECONÔMICA CCV
	AMBIENTAL						GWP	
	ODP	AP	POCP	EP	ENR			
FT VIn SDS 30	C 1	0,3602	0,1133	0,1132	0,1426	0,1127	0,1128	0,9892
FT VDp SDS 30	C 2	0,3686	0,1147	0,1151	0,1427	0,1153	0,1155	0,9780
FT VLw SDS 30	C 3	0,3771	0,1166	0,1177	0,1429	0,1180	0,1178	0,9908
FT VRf SDS 30	C 4	0,3810	0,1173	0,1190	0,0777	0,1190	0,1190	1,0000
FT VIn CDS 30	C 5	0,3768	0,1190	0,1163	0,0760	0,1184	0,1184	0,9766
FT VDp CDS 30	C 6	0,3687	0,1172	0,1135	0,0742	0,1159	0,1161	0,9420
FT VLw CDS 30	C 7	0,3769	0,1190	0,1160	0,0759	0,1186	0,1183	0,9545
FT VRf CDS 30	C 8	0,3772	0,1190	0,1164	0,0761	0,1186	0,1185	0,9586
FT VIn SDS 55	C 9	0,2703	0,0963	0,0853	0,0556	0,0844	0,0850	0,8418
FT VDp SDS 55	C 10	0,3093	0,1035	0,0953	0,0622	0,0964	0,0969	0,8534
FT VLw SDS 55	C 11	0,3173	0,1054	0,0979	0,0639	0,0990	0,0989	0,8664
FT VRf SDS 55	C 12	0,3382	0,1094	0,1044	0,0682	0,1053	0,1053	0,9030
FT VIn CDS 55	C 13	0,3613	0,1163	0,1093	0,0715	0,1129	0,1128	0,9291
FT VDp CDS 55	C 14	0,3586	0,1155	0,1076	0,0705	0,1121	0,1122	0,8818
FT VLw CDS 55	C 15	0,3665	0,1174	0,1103	0,0722	0,1148	0,1142	0,8948
FT VRf CDS 55	C 16	0,3695	0,1179	0,1116	0,0730	0,1155	0,1152	0,9058
FT VIn SDS 80	C 17	0,1032	0,0644	0,0355	0,0229	0,0325	0,0341	0,5849
FT VDp SDS 80	C 18	0,1587	0,0746	0,0497	0,0324	0,0496	0,0511	0,5993
FT VLw SDS 80	C 19	0,1894	0,0811	0,0590	0,0384	0,0592	0,0596	0,6452
FT VRf SDS 80	C 20	0,2339	0,0897	0,0723	0,0471	0,0726	0,0731	0,7184
FT VIn CDS 80	C 21	0,2381	0,0929	0,0720	0,0470	0,0745	0,0750	0,7290
FT VDp CDS 80	C 22	0,2695	0,0985	0,0794	0,0520	0,0842	0,0848	0,7093
FT VLw CDS 80	C 23	0,2906	0,1031	0,0859	0,0563	0,0909	0,0904	0,7417
FT VRf CDS 80	C 24	0,3158	0,1079	0,0938	0,0614	0,0983	0,0982	0,7875
FC VIn SDS 30	C 25	0,2055	0,0770	0,0587	0,1402	0,0655	0,0658	0,2879
FC VDp SDS 30	C 26	0,2052	0,0665	0,0598	0,1403	0,0645	0,0653	0,2819
FC VLw SDS 30	C 27	0,2289	0,0784	0,0650	0,1406	0,0728	0,0718	0,3064
FC VRf SDS 30	C 28	0,2435	0,0841	0,0693	0,0457	0,0771	0,0765	0,3283
FC VIn CDS 30	C 29	0,2685	0,0916	0,0748	0,0495	0,0854	0,0852	0,3503
FC VDp CDS 30	C 30	0,2604	0,0796	0,0738	0,0488	0,0820	0,0824	0,3333
FC VLw CDS 30	C 31	0,2796	0,0907	0,0777	0,0514	0,0890	0,0876	0,3513
FC VRf CDS 30	C 32	0,2870	0,0949	0,0800	0,0529	0,0911	0,0901	0,3632
FC VIn SDS 55	C 33	0,1371	0,0552	0,0390	0,0257	0,0433	0,0432	0,1925
FC VDp SDS 55	C 34	0,1536	0,0406	0,0442	0,0292	0,0480	0,0467	0,1997
FC VLw SDS 55	C 35	0,1874	0,0594	0,0528	0,0349	0,0590	0,0570	0,2369
FC VRf SDS 55	C 36	0,2182	0,0704	0,0619	0,0408	0,0681	0,0669	0,2831
FC VIn CDS 55	C 37	0,2549	0,0804	0,0707	0,0467	0,0800	0,0789	0,3271
FC VDp CDS 55	C 38	0,2446	0,0607	0,0683	0,0452	0,0766	0,0745	0,2964
FC VLw CDS 55	C 39	0,2723	0,0782	0,0752	0,0497	0,0857	0,0830	0,3251
FC VRf CDS 55	C 40	0,2857	0,0859	0,0793	0,0524	0,0895	0,0876	0,3466
FC VIn SDS 80	C 41	0,0000	0,0199	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
FC VDp SDS 80	C 42	0,0272	0,0000	0,0075	0,0050	0,0087	0,0057	0,0115
FC VLw SDS 80	C 43	0,0825	0,0278	0,0228	0,0150	0,0258	0,0232	0,0777
FC VRf SDS 80	C 44	0,1323	0,0448	0,0373	0,0245	0,0406	0,0390	0,1520

CENÁRIOS		DIMENSÕES						
		AMBIENTAL						ECONÔMICA
		GWP	ODP	AP	POCP	EP	ENR	CCV
FC VIn CDS 80	C 45	0,1456	0,0505	0,0395	0,0261	0,0453	0,0441	0,1687
FC VDp CDS 80	C 46	0,1531	0,0268	0,0414	0,0275	0,0479	0,0439	0,1523
FC VLw CDS 80	C 47	0,1925	0,0515	0,0522	0,0345	0,0601	0,0567	0,1959
FC VRf CDS 80	C 48	0,2251	0,0652	0,0619	0,0408	0,0696	0,0673	0,2460

Fonte: A autora (2018).

APÊNDICE G

Valores referentes ao custo, consumo de recursos energéticos e GWP considerados para a Análise de Custo Ótimo, para os 48 cenários do clima de São Paulo (SP).

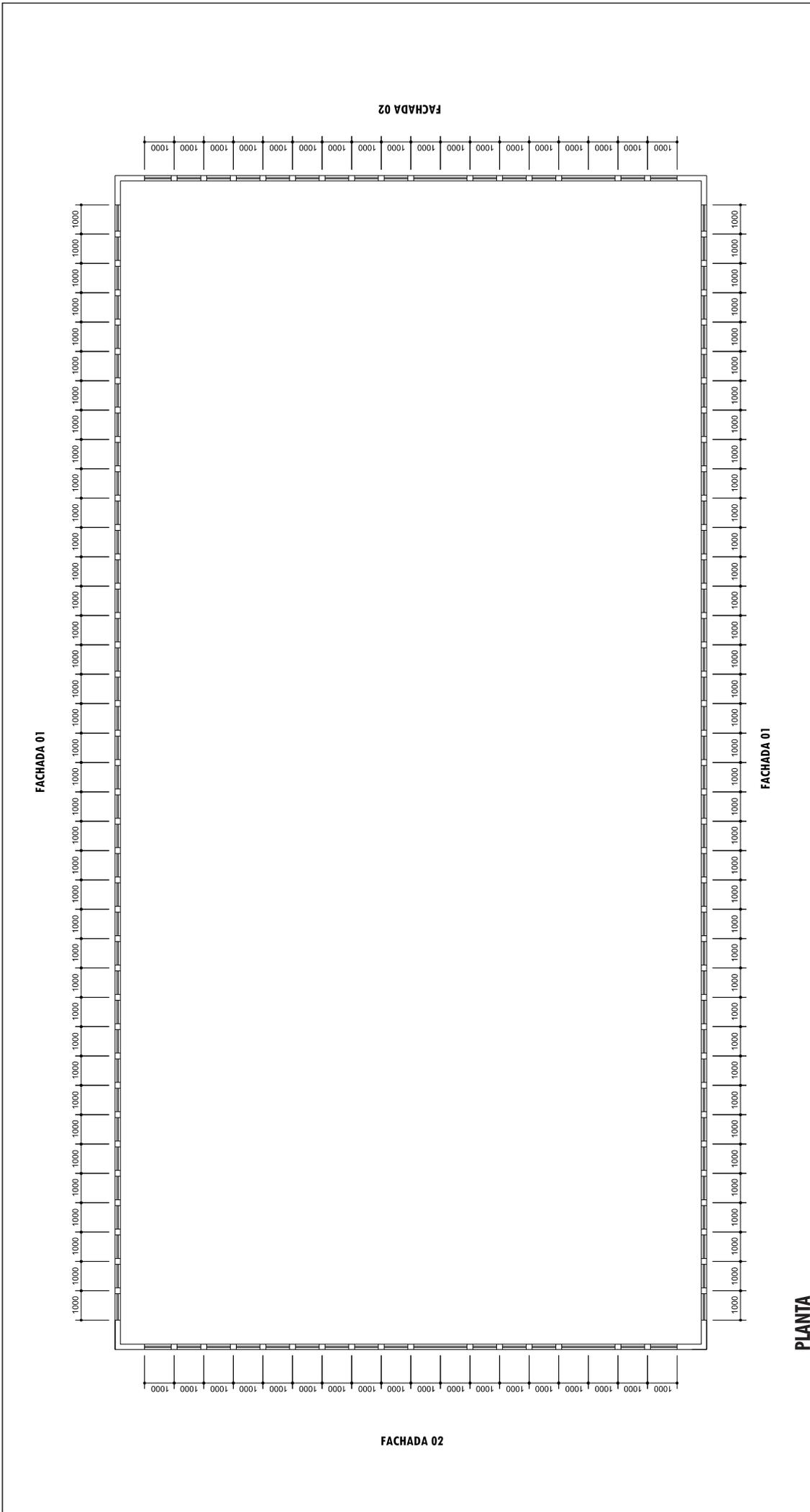
CENÁRIOS	AMBIENTAL		CUSTO (CCV)		
	GWP (Kg/CO ₂ eq/m ² .ano)	Ettotal (MJ/m ² .ano)	CC (R\$/m ²)	CO (60 anos) (R\$/kWh/m ² .ano)	
FT VIn SDS 30	C 1	357,99	9223,73	688,37	652,56
FT VDp SDS 30	C 2	350,54	8890,20	737,22	622,86
FT VLw SDS 30	C 3	343,09	8701,88	728,76	609,28
FT VRf SDS 30	C 4	339,66	8603,59	720,29	602,07
FT VIn CDS 30	C 5	343,32	8333,63	799,21	563,21
FT VDp CDS 30	C 6	350,48	8493,44	848,06	573,62
FT VLw CDS 30	C 7	343,25	8312,68	839,59	560,66
FT VRf CDS 30	C 8	342,97	8320,22	831,13	562,05
FT VIn SDS 55	C 9	437,26	11878,51	730,22	862,98
FT VDp SDS 55	C 10	402,85	10562,81	822,09	751,16
FT VLw SDS 55	C 11	395,85	10445,40	806,17	744,86
FT VRf SDS 55	C 12	377,34	9852,72	790,25	698,14
FT VIn CDS 55	C 13	357,04	8775,20	850,08	593,69
FT VDp CDS 55	C 14	359,39	8700,73	941,95	582,78
FT VLw CDS 55	C 15	352,38	8582,74	926,02	576,44
FT VRf CDS 55	C 16	349,79	8527,84	910,10	573,45
FT VIn SDS 80	C 17	584,68	16832,46	772,79	1260,20
FT VDp SDS 80	C 18	535,68	14950,71	908,32	1100,05
FT VLw SDS 80	C 19	508,65	14213,73	884,83	1044,93
FT VRf SDS 80	C 20	469,35	12934,61	861,34	943,10
FT VIn CDS 80	C 21	465,67	12419,46	901,79	884,43
FT VDp CDS 80	C 22	437,93	11255,70	1037,32	782,65
FT VLw CDS 80	C 23	419,37	10804,56	1013,83	750,77
FT VRf CDS 80	C 24	397,11	10100,76	990,35	695,71
FC VIn SDS 30	C 25	494,38	12872,71	1654,40	886,92
FC VDp SDS 30	C 26	494,66	12639,24	1695,41	856,24
FC VLw SDS 30	C 27	473,78	12136,65	1686,50	823,28
FC VRf SDS 30	C 28	460,93	11737,02	1677,58	794,55
FC VIn CDS 30	C 29	438,83	10602,14	1749,14	685,33
FC VDp CDS 30	C 30	445,99	10601,38	1790,15	673,58
FC VLw CDS 30	C 31	429,09	10233,02	1781,24	651,52
FC VRf CDS 30	C 32	422,57	10046,81	1772,32	640,15
FC VIn SDS 55	C 33	554,77	15133,30	1634,13	1070,62
FC VDp SDS 55	C 34	540,21	14328,02	1708,70	983,74
FC VLw SDS 55	C 35	510,38	13565,56	1692,49	936,11
FC VRf SDS 55	C 36	483,24	12710,08	1676,28	873,28
FC VIn CDS 55	C 37	450,89	11231,14	1737,89	736,38
FC VDp CDS 55	C 38	459,98	11224,38	1812,46	714,42
FC VLw CDS 55	C 39	435,47	10641,88	1796,25	681,42
FC VRf CDS 55	C 40	423,71	10305,42	1780,04	660,79
FC VIn SDS 80	C 41	675,69	19440,86	1613,53	1420,69
FC VDp SDS 80	C 42	651,72	18245,05	1722,40	1292,14
FC VLw SDS 80	C 43	602,88	16884,60	1698,73	1202,49
FC VRf SDS 80	C 44	559,02	15491,47	1675,07	1098,97

CENÁRIOS		AMBIENTAL		CUSTO (CCV)	
		GWP (Kg/CO ₂ eq/m ² .ano)	Ettotal (MJ/m ² .ano)	CC (R\$/m ²)	CO (60 anos) (R\$/kWh/m ² .ano)
FC VIn CDS 80	C 45	547,26	14709,91	1726,43	1019,07
FC VDp CDS 80	C 46	540,62	14099,50	1835,31	938,11
FC VLw CDS 80	C 47	505,92	13216,06	1811,64	887,25
FC VRf CDS 80	C 48	477,15	12332,58	1787,97	825,16

Fonte: A autora (2018).

ANEXOS

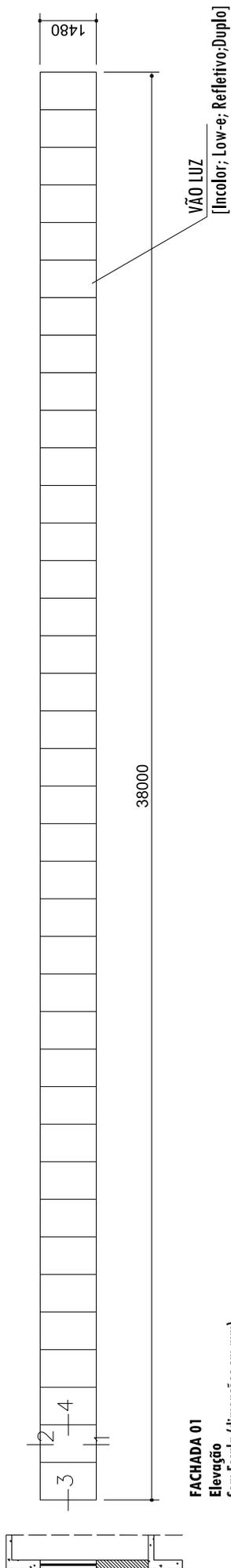
Neste item são apresentados os desenhos técnicos (plantas, cortes e elevações) referentes ao detalhamento das Fachadas Tradicional (apenas esquadria) e Cortina (completa). Os desenhos estão sem escala (porque foram adaptados da prancha de projeto), porém com cotas – representadas em milímetros -, a partir das quais é possível se ter ideia das reais dimensões dos desenhos. Tal detalhamento de projeto foi realizado junto à empresa *Visual Urban*, a qual gerou o projeto executivo das fachadas com base no modelo de edifício estudado nesta tese. Os desenhos apresentados aqui referem-se a um pavimento da edificação – assim como as análises apresentadas nesta tese-, e apenas para os cenários com PAF de 55%. O cálculo da quantidade de materiais foi feito inicialmente para esse cenário e, posteriormente, as quantidades dos demais PAF's (30% e 80%) foram calculadas e adaptadas com base neste cenário inicial.



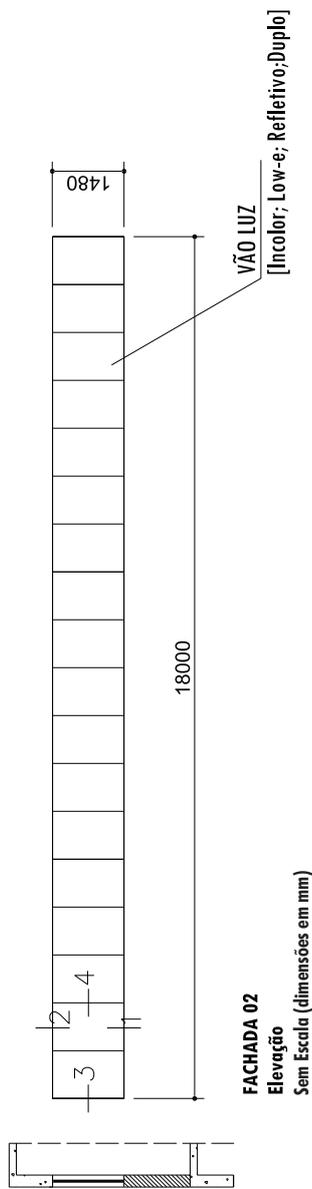
PLANTA
Sem Escala (dimensões em mm)

Descrição: Planta Cor da esquadria: A Definir	Tipo PLANTA FACHADA TRADICIONAL	Número do projeto ROS-FC12-PE-006-TIPO-R00	Fase: ESTUDO	Folha: 001
	Observações: Projeto elaborado com perfil de alumínio, sistema Stick Fachada Belmetal Atlanta.			





FACHADA 01
Elevação
Sem Escala (dimensões em mm)

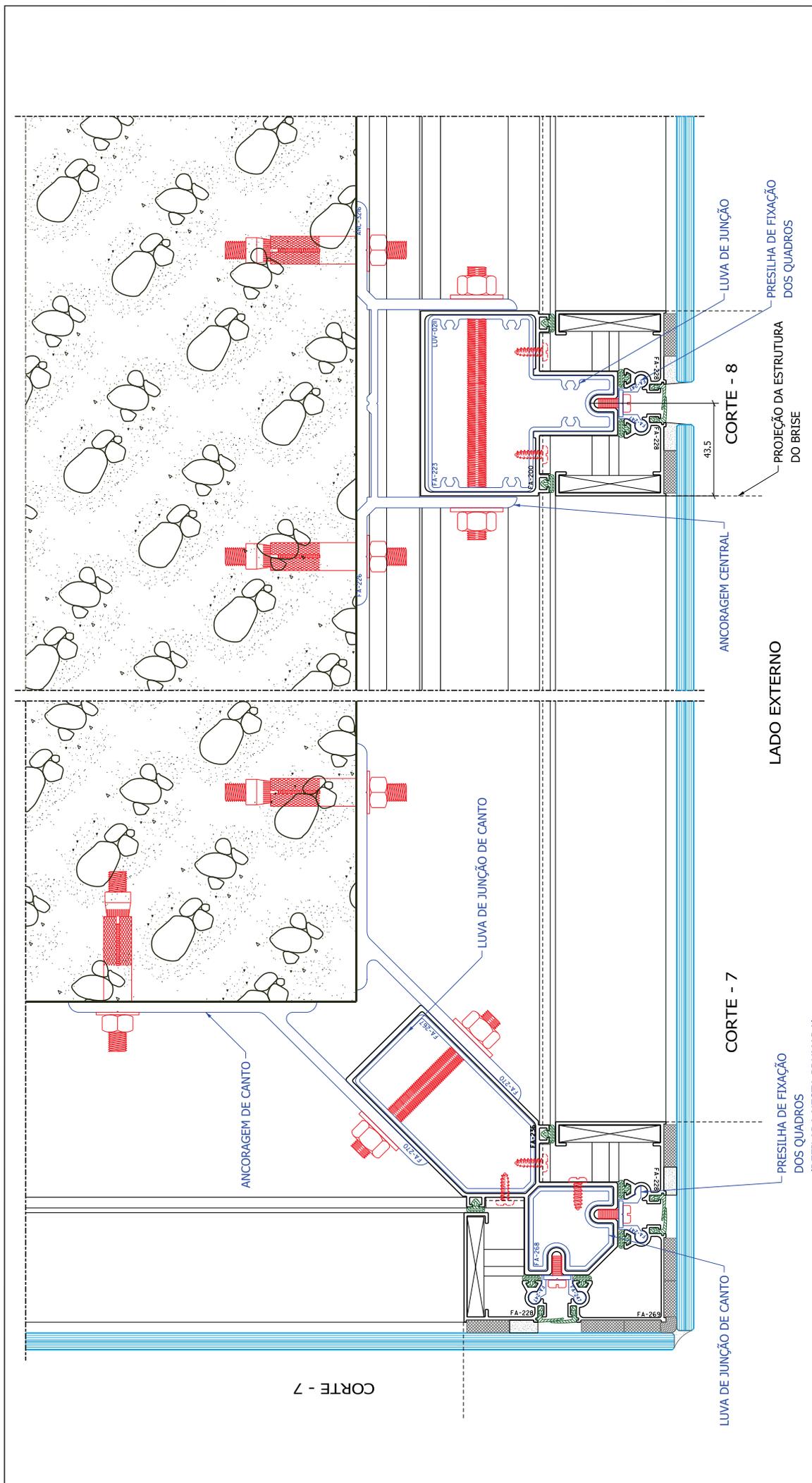


FACHADA 02
Elevação
Sem Escala (dimensões em mm)

Itens	Quantidade	Largura	Altura
FACHADA 01	02	38000	1480
FACHADA 02	02	18000	1480

Descrição: Elevação e Cortes Cor da esquadria: A Definir	Tipo FACHADAS 1 e 2 (TRADICIONAL)	FOLHA U R B A N
	Número do projeto ROS-FC12-PE-006-TIPO-R00	
Observações: Projeto elaborado com perfil de alumínio, sistema Stick Fachada Belmetal Atlanta.	Fase: ESTUDO	Folha: 002
	Coordenador: Arq. Márcio Marques	

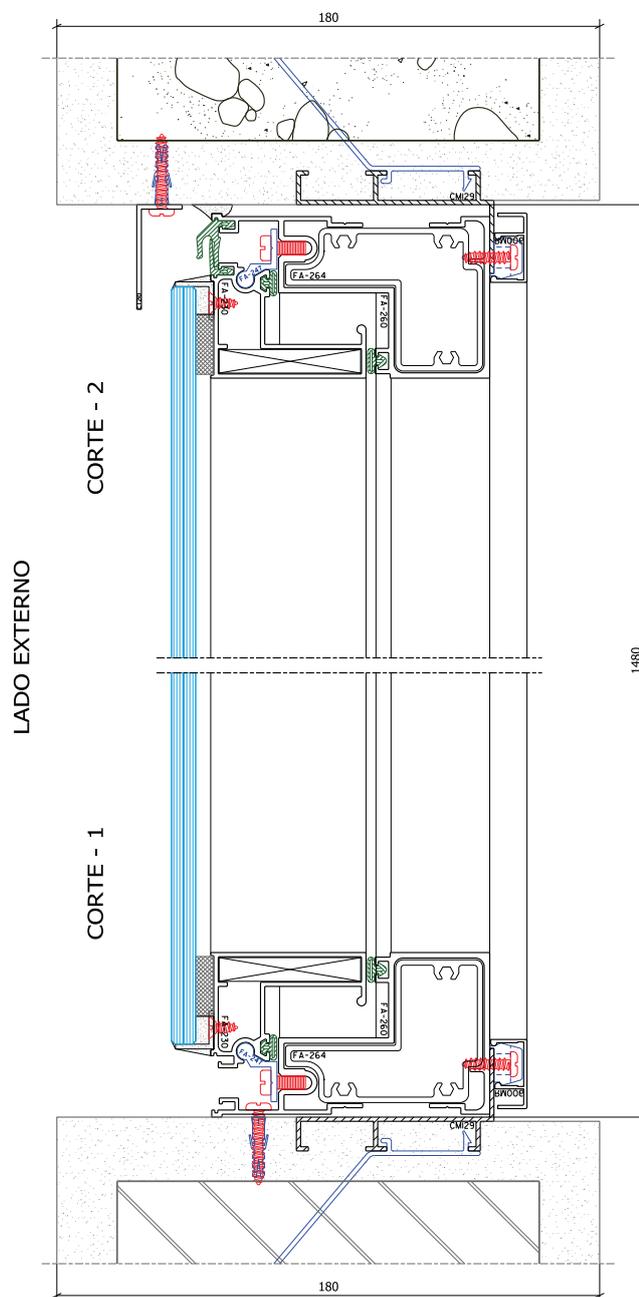




CORTE HORIZONTAL
Sem Escala (dimensões em mm)

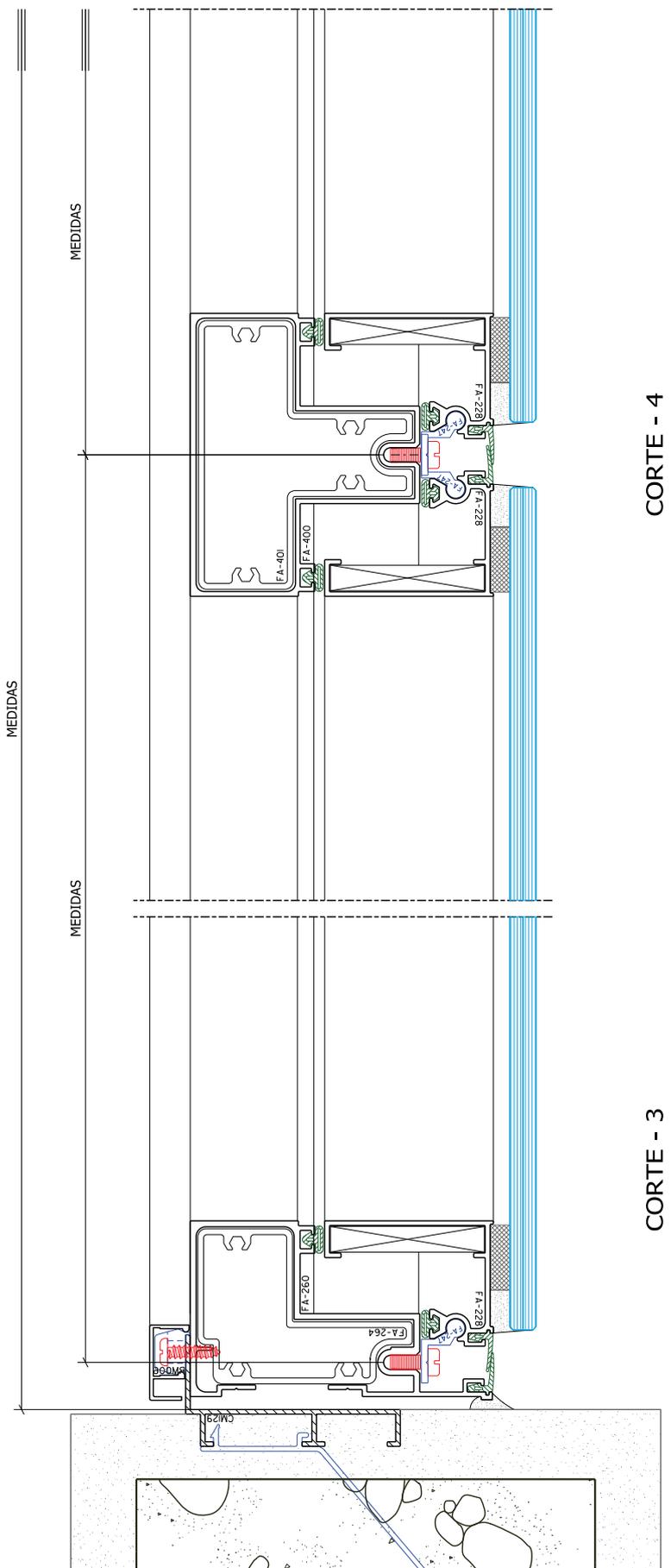
Descrição:	Tipo	FACHADA CORTINA Número do projeto ROS-FCCV-PE-004-TIPO-R00
Corte Horizontal Cor da esquadria: A Definir	Observações: Projeto elaborado com perfil de alumínio. Referência a esquadria modelo para apreciação do cliente. Esse modelo não terá referência de piso acabado, o mesmo será instalado na situação atual da obra, ou seja, sem piso acabado.	
Fase: ESTUDO Coordenador: Arq. Márcio Marques		Folha: 003





CORTE VERTICAL
Sem Escala (dimensões em mm)

Descrição: Corte Vertical	Tipo FACHADA TRADICIONAL		
Cor da esquadria: A Definir	Número do projeto ROS-FEVH-PE-005-TIPO-R00		
Observações: Projeto elaborado com perfil de alumínio. Referência a esquadria modelo para apreciação do cliente. Esse modelo não terá referência de piso acabado, o mesmo será instalado na situação atual da obra, ou seja, sem piso acabado.	Fase: ESTUDO	Folha:	004
	Coordenador: Arq. Márcio Marques		



CORTE - 4

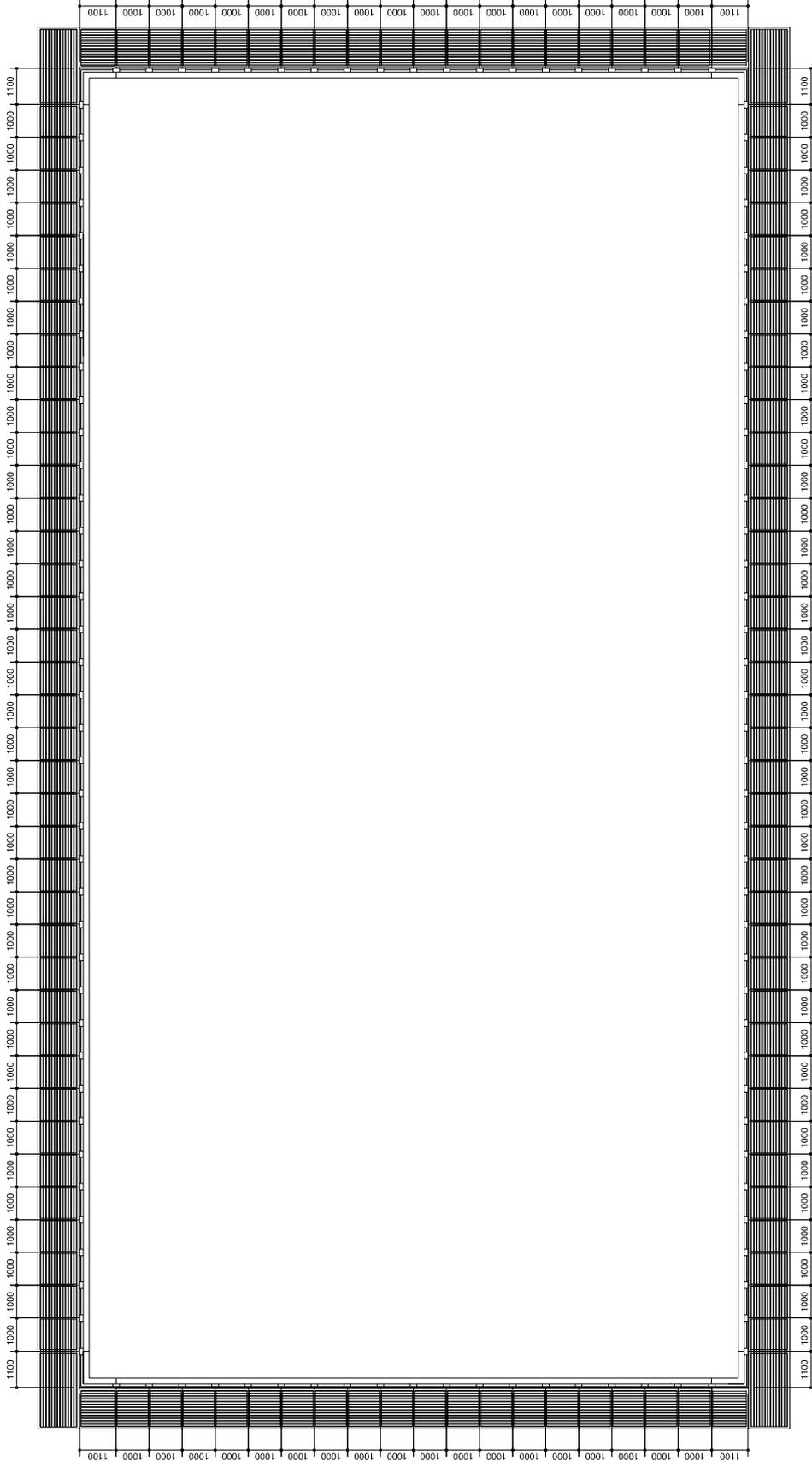
CORTE - 3

LADO EXTERNO

CORTE HORIZONTAL
Sem Escala (dimensões em mm)

Descrição: Corte Horizontal Cor da esquadria: A Definir Observações: Projeto elaborado com perfil de alumínio. Referência a esquadria modelo para apreciação do cliente. Esse modelo não terá referência de piso acabado, o mesmo será instalado na situação atual da obra, ou seja, sem piso acabado.	Tipo FACHADA TRADICIONAL Número do projeto ROS-FEVH-PE-005-TIPO-R00	Fase: ESTUDO Coordenador: Arq. Márcio Marques	Folha: 005
	Visual U R B A N		

FACHADA 05

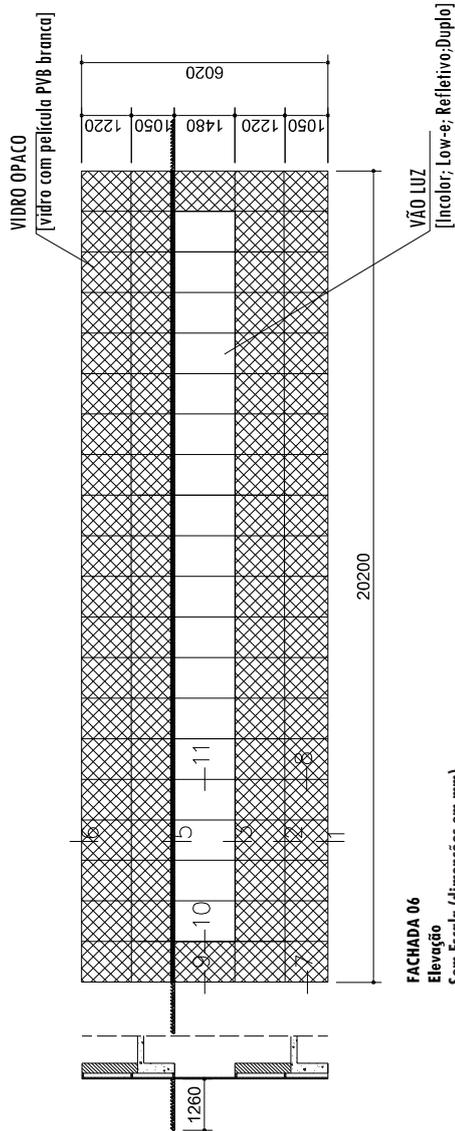
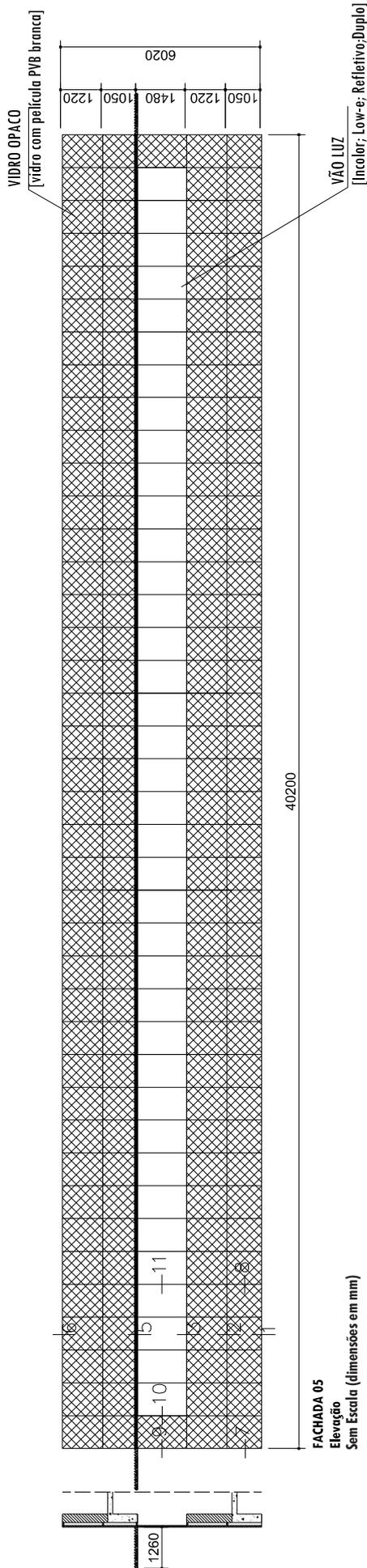


FACHADA 06

Planta
Sem Escala (dimensões em mm)

FACHADA 05

<p>Descrição:</p> <p>Plantas (Brise)</p> <p>Cor da esquadria:</p> <p>A Definir</p> <p>Observações:</p> <p>Projeto elaborado com perfil de alumínio, sistema Stick Fachada Belmetal Atlanta.</p>	<p>Tipo</p> <p>FACHADA CORTINA (COM BRISE)</p> <p>Número do projeto</p> <p>ROS-FC56-PE-009-TIPO-R00</p>	
		<p>Fase:</p> <p>ESTUDO</p> <p>Coordenador:</p> <p>Arq. Márcio Marques</p>
		<p>Folha:</p> <p>006</p>



Itens	Quantidade	Largura	Altura
FACHADA 05	02	40200	6020
FACHADA 06	02	20200	6020

Descrição:	Elevações e Cortes	Tipo FACHADAS 5 e 6 (CORTINA COM BRISE)
	Cor da esquadria: A Definir	Número do projeto ROS-FC56-PE-008-TIPO-R00

Observações:
Projeto elaborado com perfil de alumínio, sistema Stick Fachada Belmetal Atlanta.

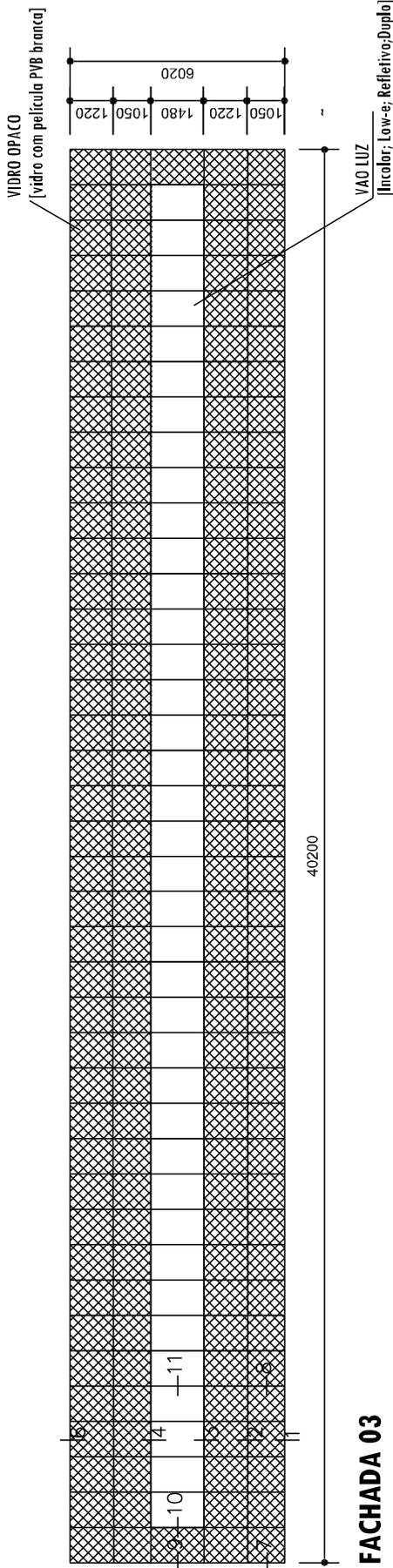
VISUAL
U R B A N

Fase:
ESTUDO

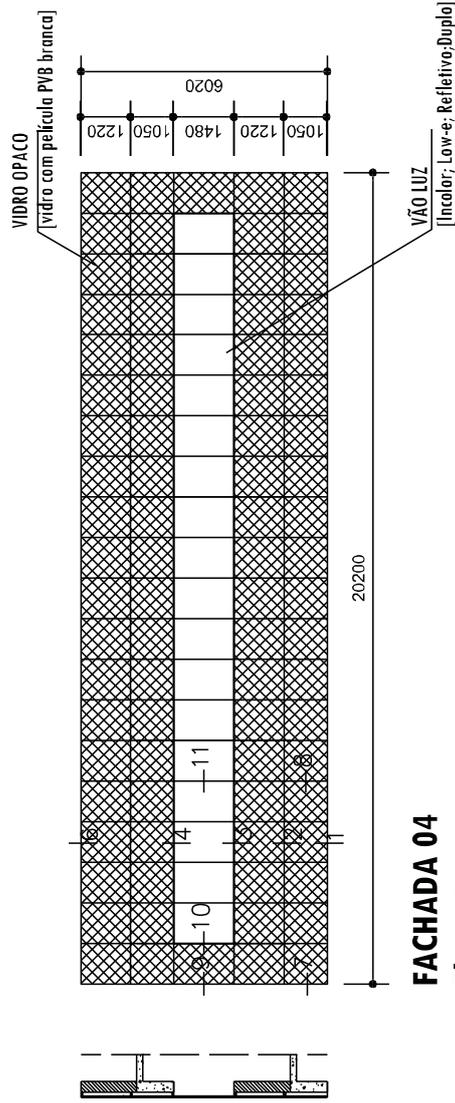
Coordenador:
Arq. Márcio Marques

Folha:

007



FACHADA 03
Elevação
Sem Escala (dimensões em mm)

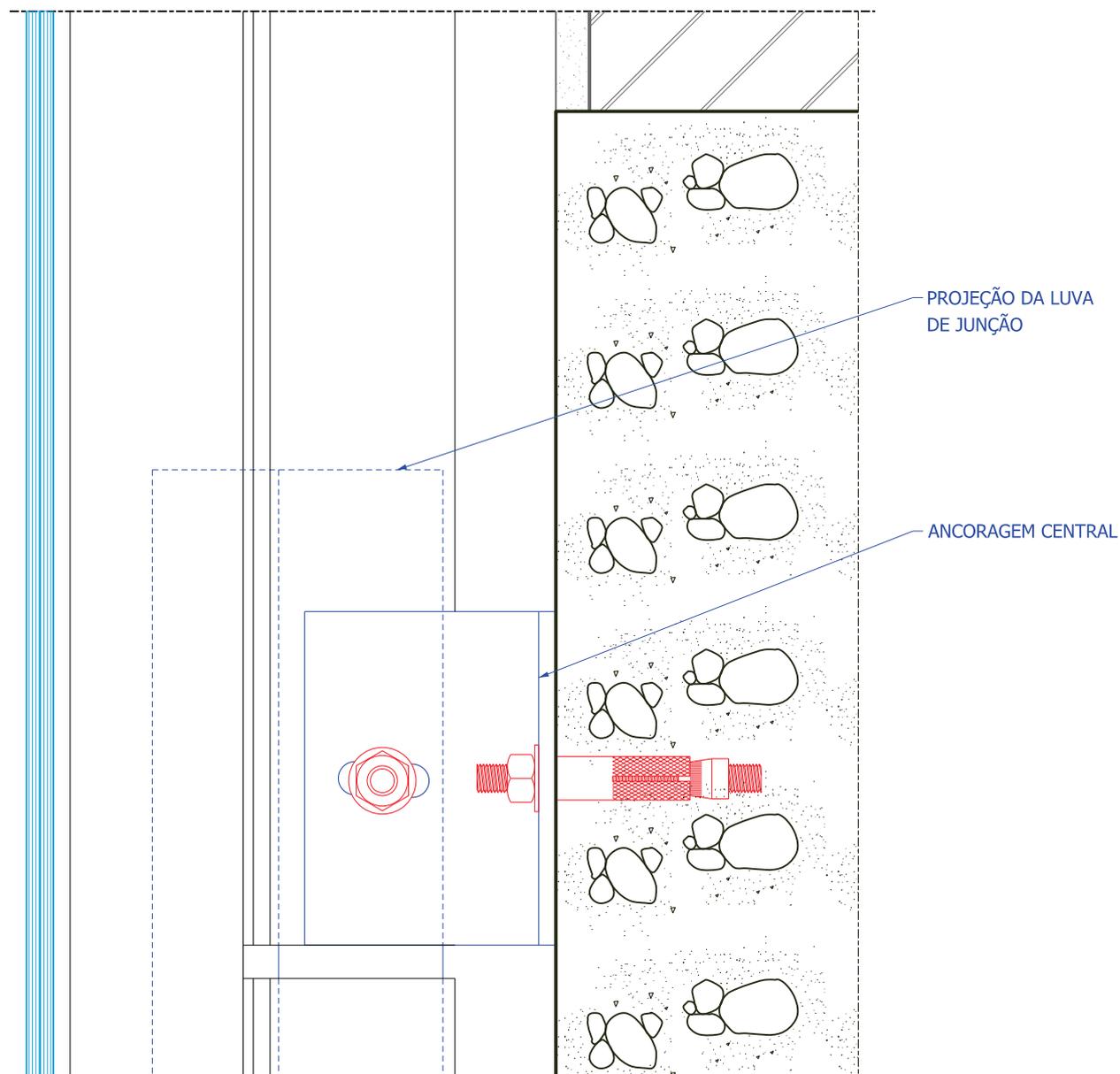


FACHADA 04
Elevação
Sem Escala (dimensões em mm)

Itens	Quantidade	Largura	Altura
FACHADA 03	02	40200	6020
FACHADA 04	02	20200	6020

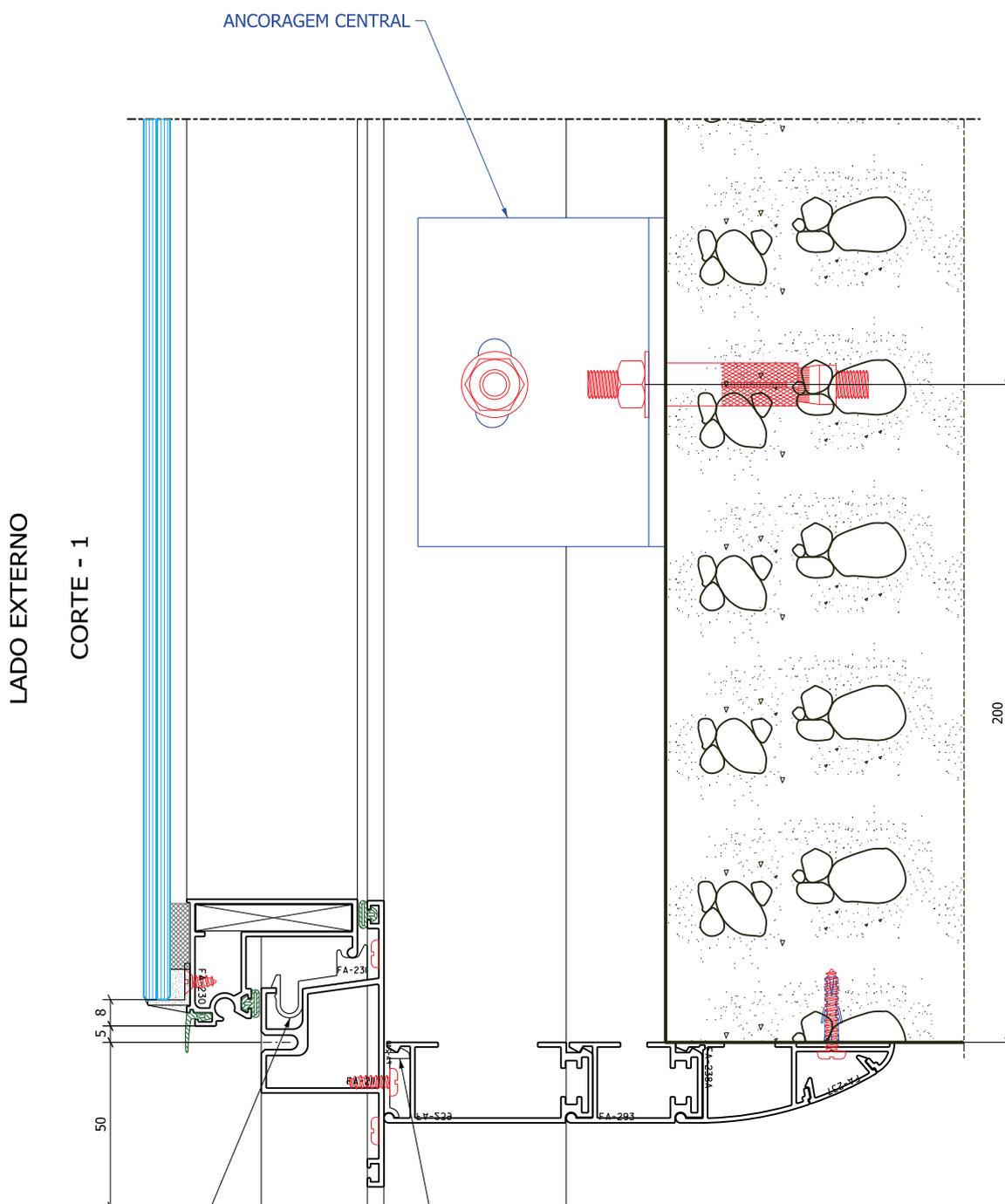
Descrição: Elevações e Cortes Cor da esquadria: A Definir Observações: Projeto elaborado com perfil de alumínio, sistema Stick Fachada Belmetal Atlanta.	Tipo FACHADAS 3 e 4 (CORTINA) Número do projeto ROS-FC34-PE-007-TIPO-R00	Fase: ESTUDO Coordenador: Arq. Márcio Marques	Folha: 008
	Visual U R B A N		

CORTE - 2



CORTE HORIZONTAL
Sem Escala (dimensões em mm)

Descrição: Corte Horizontal	Tipo FACHADA CORTINA		
Cor da esquadria: A Definir	Número do projeto ROS-FCCV-PE-001-TIPO-R00		
Observações: Projeto elaborado com perfil de alumínio. Referencia a esquadria modelo para apreciação do cliente. Esse modelo não terá referência de piso acabado, o mesmo será instalado na situação atual da obra, ou seja, sem piso acabado.	Fase: ESTUDO	Folha: 009	
	Coordenador: Arq. Márcio Marques		

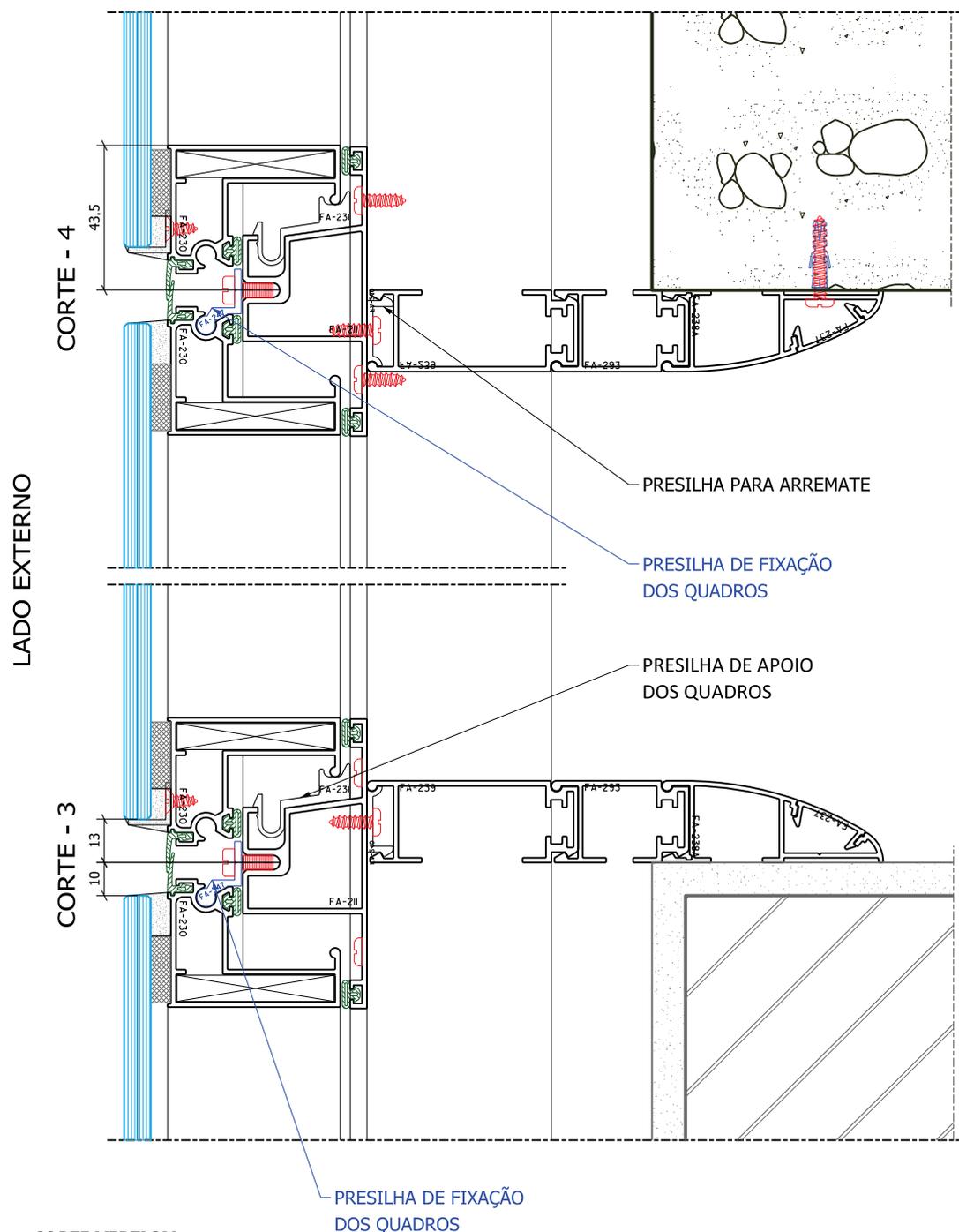


PRESILHA DE APOIO DOS QUADROS

PRESILHA PARA ARREMATE

CORTE VERTICAL
Sem Escala (dimensões em mm)

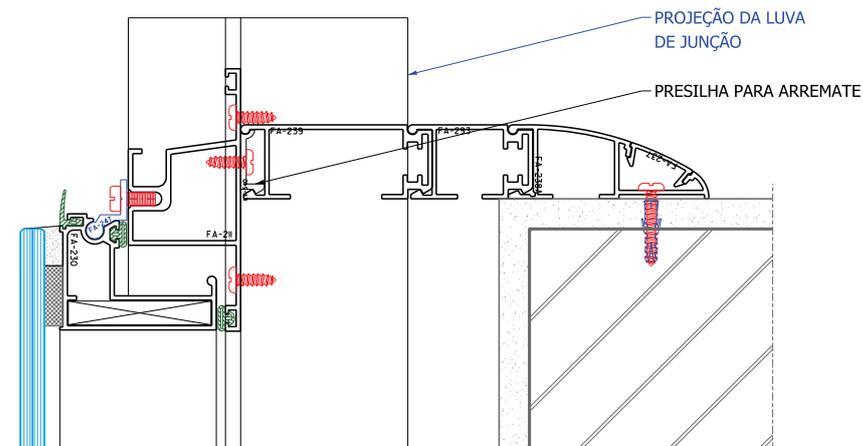
Descrição: Corte Vertical	Tipo FACHADA CORTINA		
Cor da esquadria: A Definir	Número do projeto ROS-FCCV-PE-001-TIPO-R00		
Observações: Projeto elaborado com perfil de alumínio. Referencia a esquadria modelo para apreciação do cliente. Esse modelo não terá referência de piso acabado, o mesmo será instalado na situação atual da obra, ou seja, sem piso acabado.		Fase: ESTUDO Coordenador: Arq. Márcio Marques	Folha: 010



CORTE VERTICAL
Sem Escala (dimensões em mm)

Descrição: Corte Vertical	Tipo FACHADA CORTINA		
Cor da esquadria: A Definir	Número do projeto ROS-FCCV-PE-002-TIPO-R00		
Observações: Projeto elaborado com perfil de alumínio. Referência a esquadria modelo para apreciação do cliente. Esse modelo não terá referência de piso acabado, o mesmo será instalado na situação atual da obra, ou seja, sem piso acabado.		Fase: ESTUDO Coordenador: Arq. Márcio Marques	Folha: 011

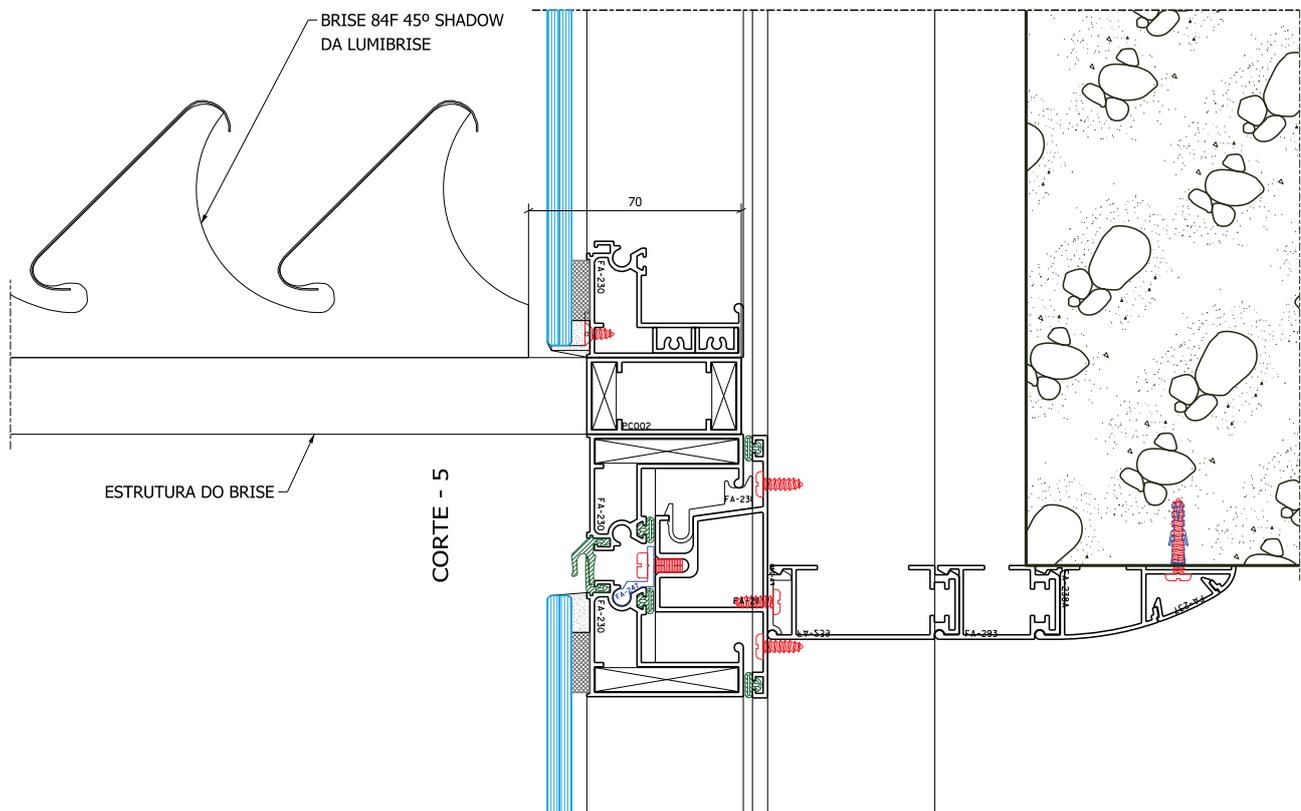
CORTE - 6



BRISE 84F 45° SHADOW DA LUMIBRISE

ESTRUTURA DO BRISE

CORTE - 5



**CORTE VERTICAL (detalhe brise)
Sem Escala (dimensões em mm)**

<p>Descrição: Corte Vertical</p>	<p>Tipo FACHADA CORTINA (BRISE)</p>		
<p>Cor da esquadria: A Definir</p>	<p>Número do projeto ROS-FCCV-PE-002-TIPO-R00</p>		
<p>Observações: Projeto elaborado com perfil de alumínio. Referência a esquadria modelo para apreciação do cliente. Esse modelo não terá referência de piso acabado, o mesmo será instalado na situação atual da obra, ou seja, sem piso acabado.</p>		<p>Fase: ESTUDO</p> <p>Coordenador: Arq. Márcio Marques</p>	<p>Folha: 012</p>

