

LIGIANA PRICILA GUIMARÃES FONSECA

**OTIMIZAÇÃO DA VOLUMETRIA DE UMA EDIFICAÇÃO DE
FACHADAS MULTIFACETADAS E DE SUA RELAÇÃO COM
O ENTORNO PARA A GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
FOTOVOLTAICA E CONSUMO DE ENERGIA**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Arquitetura e
Urbanismo, para obtenção do título de
Magister Scientae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2019

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

F676o
2019
Fonseca, Ligiana Pricila Guimarães, 1991-
Otimização da volumetria de uma edificação de fachadas multifacetadas e de sua relação com o entorno para a geração distribuída fotovoltaica e consumo de energia / Ligiana Pricila Guimarães Fonseca. – Viçosa, MG, 2019.
xvi, 125 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Joyce Correna Carlo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Fachadas (Arquitetura). 2. Geração de energia fotovoltaica. 3. Projeto auxiliado por computador. 4. Simulação (Computadores). I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. II. Título.

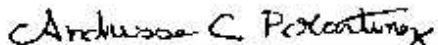
CDD 22. ed. 729.1

LIGIANA PRICILA GUIMARÃES FONSECA

**OTIMIZAÇÃO DA VOLUMETRIA DE UMA EDIFICAÇÃO DE
FACHADAS MULTIFACETADAS E DE SUA RELAÇÃO COM
O ENTORNO PARA A GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
FOTOVOLTAICA E CONSUMO DE ENERGIA**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa como
parte das exigências do Programa de
Pós Graduação em Arquitetura e
Urbanismo, para obtenção do título de
Magister Scientae.

APROVADA: 22 de janeiro de 2019.


Andressa Carmo Pena Martinez


Camila Carvalho Ferreira


Joyce Correna Carlo
(Orientadora)

À minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e pelo suporte ao longo dessa jornada.

À minha orientadora, professora Joyce, pelos ensinamentos, dedicação, apoio, e por abraçar este trabalho comigo.

À minha mãe, a quem as palavras não são suficientes para agradecer quando as razões vão além do produto que é a conclusão de um mestrado. Obrigada por todo seu altruísmo, pela educação que me ofereceu e por me ajudar a construir esse caminho. Ao meu pai, cuja força, apoio e exemplo foram essenciais para chegar até aqui. A Deus novamente agradeço por colocar pessoas tão especiais em minha vida!

Ao meu irmão pelo apoio e fraternidade que foram indispensáveis para a conclusão desta etapa.

Ao Rodrigo, por todo apoio, incentivo e companheirismo ao longo do mestrado.

Aos professores do PPGau e DAU, especialmente às professoras Andressa, Camila e Elza, que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores interdepartamentais da UFV: Heverton (DEL), André Gustavo, Daniel e Marcos (DPI) que contribuíram com a troca de conhecimentos.

Aos colegas e amigos do PPGau, especialmente à Megg e ao Hemani, pela troca de aprendizado e companheirismo.

Aos colegas e amigos do Latecae, especialmente ao Mario e à Íris, que contribuíram com a troca de conhecimentos na área de otimização em edificações.

Aos amigos que de forma direta ou indireta forneceram suporte e apoio indispensáveis.

À Capes pelo financiamento e apoio ao desenvolvimento desta pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xiii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT	xvi
Capítulo 1	1
1. OBJETIVOS.....	7
1.1 GERAL.....	7
1.2 ESPECÍFICOS	7
2. MATERIAL E MÉTODOS	8
3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	11
4. REFERÊNCIAS.....	12
Capítulo 2	14
RESUMO	14
<i>ABSTRACT</i>	14
1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Projeto e otimização de fachadas.....	20
2. MATERIAL E MÉTODOS	23
2.1. Pré-processamento	24
2.1.1. Modelagem algorítmica da edificação.....	24
2.1.2. Parametrização da forma.....	32
2.1.3. Preparação do modelo para otimização baseada em simulação	35

2.2. Execução da otimização	40
2.3. Tratamento e análise dos resultados.....	42
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
3.1. Modelo Original	43
3.2. Verificação dos resultados de geração de energia	44
3.3. Casos otimizados.....	45
3.3. Limitações do processo de modelagem do MIS e otimização	54
4. CONCLUSÕES.....	55
5. REFERÊNCIAS.....	56
Capítulo 3	61
RESUMO	61
<i>ABSTRACT</i>	62
1. INTRODUCTION	63
1.1. Optimization with GAs	67
2. MATERIAL AND METHODS.....	69
2.1. Creation of an initial building form.....	69
2.2. Energy simulation.....	78
2.3. Urban context modeling	82
2.4. Configuration for simulation-based optimization.....	88
3. RESULTS AND DISCUSSION.....	88
3.1. Optimization and convergence.....	89

3.2. Energy balance	93
3.3 PV energy generation and building form	98
3.3. Heat loads for optimized cases	104
4. CONCLUSIONS	106
5. REFERENCES	108
Considerações Finais.....	113
Sugestões para trabalhos futuros	116
APÊNDICE A	118
APÊNDICE B	119
APÊNDICE C	124

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

- Figura 1: Geração da forma de uma edificação inspirada nas *prairie houses* de Frank Lloyd Wright a partir da aplicação de uma gramática da forma parametrizada.....2
- Figura 2: Layouts gerados para duas diferentes volumetrias de edificações inseridas pelos autores e distribuição de zonas criada pelo MADE-Layout.....3
- Figura 3: Descrição dos modelos criados para aplicação da otimização baseada em simulação em cada capítulo.....9

Capítulo 2

- Figura 1: Modelos de desempenho: (a) Modelo de simulação convencional no CAD; (b) Modelo de desempenho..... 18
- Figura 2: Diagrama processual das etapas que envolvem a otimização baseada em simulação do trabalho 24
- Figura 3: Maquete de apresentação do Museu da Imagem e do Som - Copacabana-RJ25
- Figura 4: Análise da implantação - relação da projeção da edificação com o terreno 26
- Figura 5: Vista da edificação e entorno parcial 26
- Figura 6: Geração da forma inicial e método de criação dos eixos 27
- Figura 7: Método de criação dos pontos..... 27
- Figura 8: Método de criação da forma inicial e ações para geração da forma A1 a A7 (Planta pav. Térreo) 28
- Figura 9: Ações para a geração da forma A8 a A15 (Pav. Térreo) 29
- Figura 10: Ações para a geração da forma A16 a A22 (Pav. Térreo) 30
- Figura 11: Criação de um plano envidraçado vertical na fachada a partir da ligação de pontos criados no térreo, mezanino e primeiro pavimento (Ação 46) 31
- Figura 12: Alinhamentos de pontos identificados na fachada principal do projeto. Áreas em cinza claro correspondem aos planos envidraçados e áreas em cinza escuro, aos cobogós..... 31
- Figura 13: Linhas que definem escadas, patamares e varandas do projeto da edificação real. Linhas vermelhas encontram-se em um plano mais à frente da fachada em relação às linhas rosas 32
- Figura 14: Volumetria do MIS modelada no Grasshopper/Rhinoceros 32
- Figura 15: Pontos que geraram os cobogós na fachada principal. Em rosa, os pontos vinculados às escadas, e em vermelho, os não vinculados 33

Figura 16: Localização dos pontos parametrizados na fachada de acordo com sua possibilidade de movimentação	34
Figura 17: Pontos e respectivos eixos e intervalos de movimentação em planta (plano xy)	34
Figura 18: Movimentação do ponto B14 no eixo x em elevação	35
Figura 19: Esquema de cálculo da radiação solar incidente no módulo M0 para o dia 1 de janeiro às 9:00h.....	36
Figura 20: Média mensal da radiação direta e da radiação difusa diária do arquivo climático empregado	39
Figura 21: Geração 1 - Gráfico de convergência de parâmetros em destaque	42
Figura 22: Geração 96 - Gráfico de convergência de parâmetros em destaque	42
Figura 23: Identificação dos módulos na fachada principal.....	43
Figura 24: Classificação dos módulos quanto à sua inclinação na fachada	44
Figura 25: Desempenho de todas as soluções criadas pelo SPEA-2 a cada 10 gerações. A linha vermelha indica o desempenho do modelo baseado na geometria original	45
Figura 26: Desempenho das dez primeiras e das dez últimas gerações criadas pelo SPEA-2 (apenas as soluções do arquivo de <i>Pareto Front</i> do algoritmo)	46
Figura 27: Energia gerada pelas soluções das dez primeiras e dez últimas gerações criadas pelo SPEA-2 (apenas as soluções do Pareto Front do algoritmo)	47
Figura 28: Dez melhores (em vermelho) e dez piores (em cinza) soluções e gerações as quais pertencem.....	48
Figura 29: Área dos módulos fotovoltaicos pela energia gerada para as vinte soluções analisadas	50
Figura 30: Inclinação dos módulos fotovoltaicos pela energia gerada para as vinte soluções analisadas	50
Figura 31: Desempenho das dez melhores (linha contínua) e dez piores (linha tracejada) soluções e seus respectivos parâmetros.....	51
Figura 32: Parâmetros com movimentação no eixo y (B13, B14 e D9) nas soluções 1 e 20	52
Figura 33: Inclinação dos módulos fotovoltaicos da fachada principal.....	53
Figura 34: Inclinação dos módulos fotovoltaicos para as dez soluções de maior geração de energia	54
Figura 35: Inclinação dos módulos fotovoltaicos para as dez soluções de menor geração de energia	54

Capítulo 3

Figure 1: OBS applied to an optimization problem in building performance studies.	68
Figure 2: Geometric relationships in the building's floor plan and form.	70
Figure 3: Geometric relationships in the floor plan for the created model (site and building's projection).	71
Figure 4: Building's longitudinal section featured for the central atrium (in red), which connects the floors. In yellow, the underground.	71
Figure 5: Schema of connection of building's floors to the central atrium and floors' heights in the original museum.	72
Figure 6: Stairs' axes (in red) and landings (in black) of MIS main façade.	72
Figure 7: Beginning of the main façade generation of the proposed museum.	73
Figure 8: Creation of the first and second axis of the stairs, starting from the reception in the ground at the west wing.	73
Figure 9: Definition of other stairs crossing axes and of the alternative paths for the museum users.	73
Figure 10: Definition of the floors in the East and West wings of the proposed museum.	74
Figure 11: Points of the museum's geometry to be moved in the frontal façade.	74
Figure 12: Movable points plans along which the points move and their directions (in blue).	75
Figure 13: Simplification of the model to accommodate the thermal zones for simulation.	77
Figure 14: Final building's geometry with geometry's parameters (a) and the model extracted from Grasshopper/Rhinoceros (b).	78
Figure 15: Final geometry of the building in the .idf file. In blue, surfaces with glass panels in West façade; in purple, surfaces with STPV.	78
Figure 16: Adaptation of Kapsis' STPV module for the museum's modules of the façades.	80
Figure 17: Annual average of the daily horizontal global radiation of Brazil and chosen cities.	83
Figure 18: Curitiba's zoning map and museums. The arrow indicates the view taken from Google Maps.	84
Figure 19: Belo Horizonte's zoning map and museums. The arrows indicate the views taken from Google Maps.	85
Figure 20: Recife's zoning map and museums. The arrows indicate the views taken from Google Maps.	85
Figure 21: SE-CC zone's cutout and images from Street View taken from marked streets.	86

Figure 22: Scenario 1 - Maximum shading - minimal distances for parameters Front S and East S.....	87
Figure 23: Curitiba's convergence graph of the Pareto solutions extracted from Octopus and 9 best solutions for heat loads and PV electricity generation. Worst solutions (n) for both objective functions are shown in red.....	90
Figure 24: Belo Horizonte's convergence graph of the Pareto solutions extracted from Octopus and 9 best solutions for heat loads and PV electricity generation. Worst solutions (n) for both objective functions are shown in red.	91
Figure 25: Recife's convergence graph of the Pareto solutions extracted from Octopus and 9 best solutions for heat loads and PV electricity generation. Worst solutions (n) for both objective functions are shown in red.....	91
Figure 26: Best and worst solutions for PV electricity generation and heat loads for all cities.	92
Figure 27: Annual electricity consumption and electricity generation for the best PV cases and the worst (n) case among all selected for Curitiba	93
Figure 28: Annual electricity consumption and electricity generation for the best PV cases and the worst (n) case among all selected for Belo Horizonte	94
Figure 29: Annual electricity consumption and electricity generation for the best PV cases and the worst (n) case among all selected for Recife	94
Figure 30: Electricity generation and HVAC electricity consumption for best PV generation solutions (and the worst) and percentage of supplied energy for Curitiba	95
Figure 31: Electricity generation and HVAC electricity consumption for best PV generation solutions (and the worst) and percentage of supplied energy for Belo Horizonte	95
Figure 32: Electricity generation and HVAC electricity consumption for best PV generation solutions (and the worst) and percentage of supplied energy for Recife	96
Figure 33: Annual electricity consumption and generation for best heat loads cases and the worst one (n) and % of demand supplied by the HVAC system for Curitiba	97
Figure 34: Annual electricity consumption and generation for best heat loads cases and the worst one (n) and % of demand supplied by the HVAC system for Belo Horizonte . 97	
Figure 35: Annual electricity consumption and generation for best heat loads cases and the worst one (n) and % of demand supplied by the HVAC system for Recife	98
Figure 36: Best (1 to 9) and worst (n) solutions for PV electricity generation for Curitiba	99
Figure 37: Best (1 to 9) and worst (n) solutions for PV enlectricity generation for Belo Horizonte	100
Figure 38: Best (1 to 9) and worst (n) solutions for PV electricity generation for Recife	100
Figure 39: Generated electricity X Module area * tilt for the nine best solutions for Curitiba	101

Figure 40: Coefficients of determination for "generated electricity X Module area * tilt" for the nine best solutions for PV generation and the worst for all cities.	101
Figure 41: Façades modules tilts for Curitiba , latitude 25°25'. Modules in red present vertical or positive tilt for all nine best solutions; modules in pink present vertical, positive or light negative tilt; modules in black are the ones that can present negative tilts for some solutions.	102
Figure 42: Façades modules tilts for Belo Horizonte , latitude 19°55'. Modules in red present vertical or positive tilt for all nine best solutions; modules in pink present vertical, positive or light negative tilt; modules in black are the ones that can present negative tilts for some solutions.	102
Figure 43: Façades modules tilts for Recife , latitude 08°03'. Modules in red present vertical or positive tilt for all nine best solutions; modules in pink present vertical, positive or light negative tilt; modules in black are the ones that can present negative tilts for some solutions.	103
Figure 44: Best solution for PV electricity generation for Curitiba . Red PV modules present a vertical or positive tilt for all nine best solutions. Orange modules can present a vertical, positive or light negative tilt.	103
Figure 45: Best solution for PV electricity generation for Belo Horizonte . Red PV modules present a vertical or positive tilt for all nine best solutions. Orange modules can present a vertical, positive or light negative tilt.	104
Figure 46: Best solution for PV electricity generation for Recife . Red PV modules present a vertical or positive tilt for all nine best solutions.	104
Figure 47: Best (1 to 9) and worst (n) solutions for heat loads for Curitiba	105
Figure 48: Best (1 to 9) and worst (n) solutions for heat loads for Belo Horizonte	105
Figure 49: Best (1 to 9) and worst (n) solutions for heat loads for Recife	106

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1

Tabela 1: Procedimentos metodológicos realizados nos capítulos 2 e 3 da dissertação. 10

Capítulo 2

Tabela 1: Parâmetros criados, posição de referência no eixo em relação ao ponto de origem da modelagem (Figura 6) e intervalo de variação de acordo com o eixo estabelecido para movimentação 34

Tabela 2: Relação entre a área de cada módulo e sua respectiva produção de energia e inclinação para o caso base..... 44

Tabela 3: Dez melhores e dez piores soluções das dez gerações iniciais e finais e seu desempenho em relação à geração de energia 48

Capítulo 3

Table 1: Model's parameters..... 75

Table 2: Thermal properties of the building materials..... 78

Table 3: Characteristics of the photovoltaic module. 79

Table 4: Physical and electrical properties of STPV module. 80

Table 5: Internal loads of the zones. 81

Table 6: Operating hours of the museum. 82

Table 7: Chosen cities..... 83

Table 8: Urban parameters for each city..... 86

Table 9: Independent urban parameters for each city based on the shading angles..... 87

Table 10: Optimization time for each city and time of convergence. 89

Table 11: Solutions' improvement for the objective functions for each city. 92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BIPV - Building integrated photovoltaics

GA - Genetic algorithm

HVAC - Heating and ventilation air conditioning

MIS - Museu da Imagem e do Som / Museum of Image and Sound

OBS - Otimização baseada em simulação

PV - Photovoltaic

SBO - Simulation-base optimization

SPEA-2 - Strenght Pareto Evolutionary Algorithm

STPV - Semi-transparent photovoltaics

VRF - Variable refrigerant flow

RESUMO

FONSECA, Ligiana Pricila Guimarães, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, janeiro de 2019. **Otimização da volumetria de uma edificação de fachadas multifacetadas e de sua relação com o entorno para a geração distribuída fotovoltaica e consumo de energia.** Orientadora: Joyce Correna Carlo.

O desenvolvimento de ferramentas de modelagem paramétrica e programas que possibilitam a integração entre a modelagem da edificação com a avaliação de desempenho tem criado novos métodos de projeto. Na otimização baseada em simulação, o desempenho é o fator determinante na aceitação de soluções projetuais. Neste trabalho, a otimização baseada em simulação foi aplicada a um estudo da forma do Museu da Imagem e do Som (MIS), do Rio de Janeiro, para a criação de modelos de edificações de fachadas multifacetadas com sistema fotovoltaico integrado às fachadas. Na primeira etapa do trabalho, a fachada principal do MIS foi parametrizada com a aplicação de módulos fotovoltaicos em algumas das superfícies e otimizada para identificar soluções de melhor desempenho para geração de energia. Identificou-se que a inclinação dos módulos fotovoltaicos teve um impacto maior do que sua área no desempenho energético devido às limitações decorrentes da parametrização. Na segunda etapa, foi criado um modelo de edificação de fachadas multifacetadas, com a parametrização de alguns elementos de fachadas da edificação, inserido em contextos urbanos para três cidades brasileiras. A otimização baseada em simulação foi aplicada buscando-se maximizar a geração de energia por módulos fotovoltaicos e minimizar a carga térmica de condicionamento. Identificou-se que, para o caso de Curitiba, o percentual de atendimento à demanda de condicionamento pode chegar a 90,2% para os casos otimizados para a geração fotovoltaica; para Belo Horizonte, o percentual chega até 50,7%; e para Recife, até 30,5% apenas. Para os melhores casos com relação à carga térmica, o atendimento à demanda de condicionamento em Curitiba chega a 53,3%; em Belo Horizonte, 32,4% e em Recife, 11,9%. A otimização baseada em simulação possibilitou a criação de soluções com uma variação de até 340,8% na geração de energia (caso de Recife) e até 26,2% de variação na carga térmica (caso de Curitiba), se mostrando uma ferramenta importante para a obtenção de soluções de elevado desempenho termo-energético. O método

também possibilitou a identificação de tendências formais para as melhores soluções em cada cidade estudada.

ABSTRACT

FONSECA, Ligiana Pricila Guimarães, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, January, 2019. **Form optimization of a multifaceted building and its relationship to the surroundings for photovoltaic distributed energy generation and energy consumption.** Advisor: Joyce Correna Carlo.

The development of parametric modeling tools and software that allow the integration between building's modeling and evaluation of its performance have created new methods of design. In simulation-based optimization, performance is the determinant factor on the acceptance of design solutions. In this paper, optimization-based simulation was applied to a study of the form of the Museum of Image and Sound (MIS), located in Rio de Janeiro, for the creation of building models with multifaceted façades with an integrated photovoltaic system. In the first stage of the work, MIS' main façade was parameterized with the application of photovoltaic modules in some surfaces and optimized to identify solutions of best performance for electricity generation. It was identified that photovoltaic modules tilts had a higher impact than their areas on the energy performance due to the parameterization limitations. In the second stage, a building model of multifaceted façades was created with the parameterization of some elements in the façades. The building was inserted in urban contexts for three Brazilian cities. The optimization-based simulation was applied to maximize the electricity generation by the photovoltaic modules and minimize heat loads. It was identified that, for Curitiba's case, the percentage of heating and cooling demand supplied by photovoltaic generation can reach up to 90,2% for the optimized cases for photovoltaic generation; for Belo Horizonte, the percentage reaches up to 50.7%; and for Recife, up to 30.5% only. For the best cases for heat loads, the conditioning demand supplied by the PV system in Curitiba reaches up to 53.3%; in Belo Horizonte, 32.4% and in Recife, 11.9%. The optimization-based simulation allowed the creation of solutions with a variety of up to 340.8% in energy generation (Recife's case) and up to 26.2% of variation in thermal load (Curitiba's case), proving to be an important tool for the obtainment of high thermo-energetic performance solutions. The method also allowed the identification of formal trends for the best solutions in each studied city.

Capítulo 1

Introdução

Tradicionalmente, a incorporação de estratégias de eficiência energética em projetos de edificações é feita de duas formas: por meio de projetos complementares, realizados por especialistas, e que são adicionados ao projeto arquitetônico após sua concepção básica pelo projetista, ou por meio da adoção de estratégias conceituais, não quantificáveis, de projeto na fase inicial (SHI; YANG, 2013). Nos métodos tradicionais, a obtenção de soluções projetuais de elevado desempenho energético depende do nível de conhecimento e familiaridade com estratégias de eficiência energética do projetista ou de outros profissionais envolvidos com o projeto, e normalmente se baseia no método de tentativa e erro. Neste método são criadas soluções projetuais candidatas que são avaliadas conforme o atendimento a metas e restrições impostas ao projeto, e o processo se repete até que seja encontrada a solução que melhor atenda aos objetivos (ANDRADE; RUSCHEL; MOREIRA, 2011).

O desenvolvimento de tecnologias computacionais de modelagem paramétrica e simulação, em contrapartida, tem possibilitado a inserção de ferramentas de avaliação de desempenho dentro do processo de projeto desde a concepção da forma, permitindo-se assim avaliar o desempenho de soluções projetuais segundo diferentes critérios. Granadeiro *et al.* (2013) aplicaram um método de parametrização da forma para obtenção de diversas soluções de edificações residenciais baseadas nas *prairie houses* de Frank Lloyd Wright tendo em vista melhorar o desempenho energético da edificação sem alterar os princípios compositivos de determinação da forma do arquiteto (Figura 1). Fonseca *et al.* (2017) criaram alguns parâmetros relativos às dimensões de uma edificação residencial projetada para Viçosa-MG para otimização da forma tendo em vista encontrar soluções de menor graus-hora da envoltória e, simultaneamente, menor custo, considerando-se neste indicador os materiais construtivos empregados. Dino e Uçoluk (2017) aplicaram um método para a

concepção do projeto de uma biblioteca. Neste método, os autores inseriram volumetrias iniciais para a edificação e utilizaram um programa computacional (Multiobjective Architectural Design Explorer - MADE) para gerar diferentes layouts - com base em regras estabelecidas por eles - e encontrar soluções de melhor desempenho energético e luminoso (Figura 2).

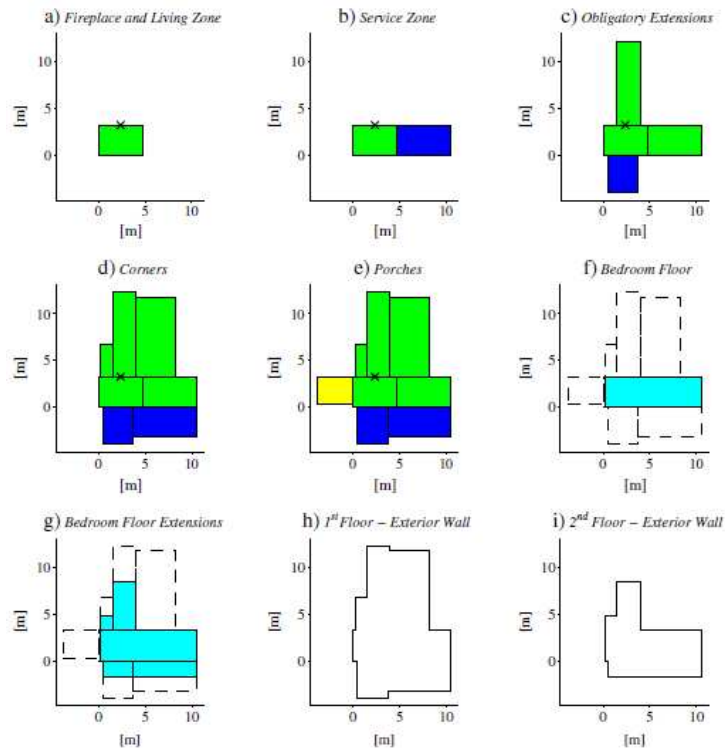


Figura 1: Geração da forma de uma edificação inspirada nas *prairie houses* de Frank Lloyd Wright a partir da aplicação de uma gramática da forma parametrizada.

Fonte: GRANADEIRO *et al.* (2013), p. 206.

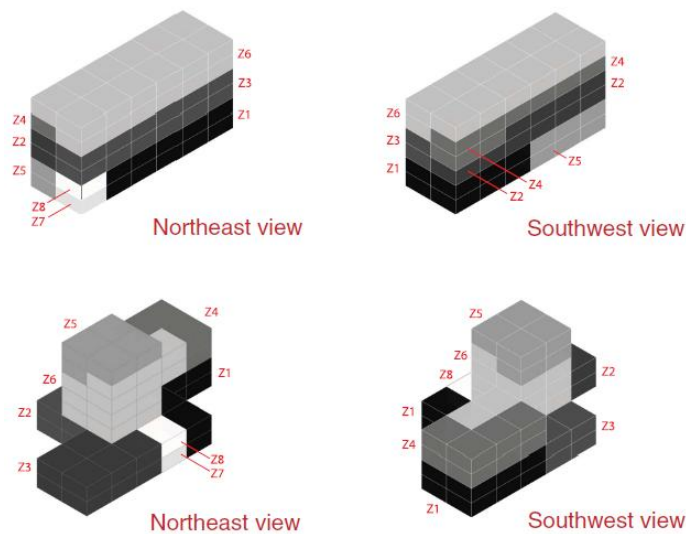


Figura 2: Layouts gerados para duas diferentes volumetrias de edificações inseridas pelos autores e distribuição de zonas criada pelo MADE-Layout.

Fonte: DINO; UÇOLUK (2017), p. 8.

Este processo, chamado projeto paramétrico, altera o modo de concepção projetual, pois o projetista se torna um codificador; ele estabelece regras para geração da forma, as converte em parâmetros e restrições e confia em programas computacionais para a geração de variadas soluções projetuais. Segundo Granadeiro *et al.* (2013, p. 199), "um sistema de projeto paramétrico consiste de um modelo geométrico que codifica características formais, comuns aos projetos do espaço de soluções" (GRANADEIRO *et al.*, 2013, p. 199, tradução nossa¹). Segundo os autores, as relações entre os elementos que compõem a forma são definidas como um conjunto de regras cujos parâmetros assumem valores dentro de intervalos pré-determinados - o modelo é então controlado por equações, e diversas soluções projetuais podem ser obtidas por meio da alteração dos parâmetros (GRANADEIRO *et al.*, 2013, p. 199).

Integrado a ferramentas de simulação e a algoritmos de otimização, este método pode conduzir a uma busca pela solução de melhor desempenho para uma ou mais funções objetivo dentro de um espaço de soluções possíveis criado pelo projetista na modelagem. Neste método, diversas soluções dentro do

¹A parametric design system consists of a geometric model that encodes formal features, common to the designs of its solution space (GRANADEIRO *et al.*, 2013, p. 199).

universo criado podem ser simuladas, e seus desempenhos - segundo o(s) indicador(es) da(s) função(ões) objetivo(s) - são computados, permitindo ao projetista ou ao programa utilizado a escolha da solução final. Este método, conhecido como otimização baseada em simulação (OBS), é uma alternativa promissora para emprego em projetos complexos, como os de arquitetura, engenharia e construção (AEC), em que o desempenho de uma solução projetual envolve a interação entre muitas variáveis (forma, custos, desempenho térmico, acústico, luminoso, estrutural etc.).

Estudos de OBS têm apresentado um elevado crescimento na ciência de edificações, especialmente a partir da segunda metade dos anos 2000 (NGUYEN, 2014), sendo a otimização do desempenho energético das edificações o tema mais comum, e a envoltória, o elemento mais estudado na otimização (EVINS, 2013).

No cenário de necessidade de investimentos em fontes alternativas e renováveis de geração de energia, a otimização da forma apresenta-se como método promissor para o projeto de edificações de menor consumo de energia e até mesmo de maior geração de energia, para o caso de sistemas de geração integrados à edificação. Alguns trabalhos de otimização da forma de edificações e de elementos compositivos das mesmas têm sido desenvolvidos para maximização da geração de energia por sistemas fotovoltaicos integrados, tais como Elsayed e Vermette (2016); Kämpf *et al.* (2010); Kämpf e Robinson (2010) e Lobacaro, Chatzichristos e Leon (2016). No entanto, grande parte destes estudos não considera o impacto do sombreamento causado por elementos do entorno sobre os módulos fotovoltaicos, o que pode reduzir consideravelmente a produção de energia.

No Brasil, o número de estudos para avaliação do potencial de geração de energia distribuída por sistema fotovoltaico tem crescido consideravelmente, devido principalmente à publicação da Resolução Normativa N° 482, em 2012, que estabeleceu condições gerais para o sistema de micro e minigeração de energia distribuída conectado à rede (ANEEL, 2012) e a alterações na matriz energética do país: em 2011, as fontes renováveis, incluindo hidrelétricas,

correspondiam a 88,9% da matriz elétrica; esse percentual caiu gradativamente para 75,5% em 2015 devido a termelétricas - BEN, 2016². Em relação à geração elétrica por fonte solar fotovoltaica, entre 2015 e 2016, esta subiu 44,7%, com um aumento na capacidade instalada de 13,1% (sem incluir geração distribuída) (BEN 2017).

Dentro deste cenário, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas no país para identificar e explorar o potencial de geração distribuída de energia elétrica por módulos fotovoltaicos. Rampinelli e Scardueli (2016) desenvolveram um método para estimar o potencial de atendimento à demanda de energia de edificações existentes por meio da geração de energia elétrica fotovoltaica distribuída em coberturas, e identificaram uma geração superior a duas vezes a demanda. Cronemberger, Caamaño-Martín e Sánchez (2012) criaram uma equação para determinação da inclinação ótima de módulos fotovoltaicos para diferentes cidades do território brasileiro em função da latitude. Variando a orientação e inclinação dos módulos, eles identificaram percentuais de aproveitamento da radiação para coberturas e fachadas em relação aos casos ótimos; mas, assim como Rampinelli e Scardueli (2016), não consideraram condições com obstruções causadas pelo entorno. Isto foi considerado por Gaviria, Pereira e Mizgier (2013), que identificaram percentuais de atendimento ao consumo de energia elétrica para nove modelos urbanos com módulos fotovoltaicos integrados às coberturas e fachadas, e encontraram um percentual máximo de atendimento do consumo de 33,79%.

No sistema de geração distribuída, a inclinação dos módulos fotovoltaicos, sua localização na edificação e elementos que podem causar sombreamento sobre eles têm impacto direto na produção de energia elétrica. Todos estes fatores, por sua vez, apresentam relação direta com a incidência

² Em 2016, o percentual de fontes renováveis na matriz elétrica subiu para 81,7% devido principalmente ao aumento da geração hidráulica (BEN, 2017) em função da alteração do regime de chuvas, que vem apresentando oscilações - o que indica a necessidade de diversificação da matriz energética brasileira.

solar - variável de acordo com a latitude, dentre outros³. Porém, muitos dos trabalhos encontrados na literatura estudam a geração fotovoltaica no meio urbano para um local específico apenas (RAMPINELLI; SCARDUELI, 2016; GAVÍRIA; PEREIRA; MIZGIER, 2013) e normalmente empregam um método de simulação paramétrica que incorpora poucas variáveis de projeto alteradas individualmente, enquanto as demais são constantes (NGUYEN, 2014). Portanto, não conduzem uma busca global por soluções. Outro fator que interfere na eficiência do sistema de geração distribuída⁴ (atendimento da demanda com geração local) é a forma da edificação e sua relação com o entorno. Como demonstrado por Fonseca *et al.* (2017) e por Hachem, Athienitis e Fazio (2012), a forma da edificação e o sombreamento causado pelo entorno têm impacto direto sobre o consumo de energia da edificação, devido a trocas térmicas pela envoltória. Sendo assim, a forma da edificação, o posicionamento dos módulos fotovoltaicos e a relação de ambos com o entorno são fatores conflitantes no sistema de geração de energia distribuída - problema apropriado para o emprego da otimização baseada em simulação (OBS).

Tendo em vista que a geometria da edificação bem como o entorno construído podem impactar diretamente o desempenho de um sistema de geração distribuída, buscou-se com este trabalho aplicar a parametrização da forma e a OBS em um estudo de uma edificação de fachadas multifacetadas sob duas condições: com e sem sombreamento, e analisar as soluções obtidas para diferentes cidades brasileiras.

³ Índice de turbidez do ar, tipo de céu e nebulosidade são algumas variáveis que afetam a incidência solar, mas que não variam com as características geométricas da edificação.

⁴ Geração distribuída é um sistema que possibilita ao consumidor gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração e fornecer o excedente produzido à rede de distribuição local (ANEEL, 2018). No Brasil, a geração distribuída funciona em um sistema de compensação, em que a energia enviada pelo consumidor para a rede é qualificada como crédito. Sendo assim, o consumidor pode utilizar da energia da rede em momentos onde o seu próprio sistema está inativo, e esse consumo é descontado de seus créditos (ANEEL, 2015). No entanto, o objetivo do sistema de geração distribuída é diminuir a sobrecarga dos sistemas de geração e distribuição tradicionais, contribuindo simultaneamente com a minimização de perdas, redução do impacto ambiental e diversificação da matriz energética (ANEEL, 2018).

A edificação tomada como referência para estudo é o Museu da Imagem e do Som (MIS), em construção no Rio de Janeiro. Em uma primeira etapa, a fachada principal da edificação é parametrizada com a aplicação de módulos fotovoltaicos, e então é aplicada a otimização baseada em simulação para melhoria do desempenho energético ao gerar energia elétrica. Na segunda etapa, é criado um modelo de museu de fachadas multifacetadas inspirado na linguagem formal do MIS para aplicação da OBS visando maximizar a geração de energia por módulos fotovoltaicos aplicados às fachadas e, simultaneamente, minimizar o consumo de energia para condicionamento. O segundo estudo considera o impacto do entorno urbano modelado, e é conduzido para três diferentes cidades brasileiras: Curitiba-PR; Belho Horizonte-MG e Recife-PE.

Com esse estudo busca-se identificar: quais relações entre parâmetros da volumetria de um modelo de edificação de fachadas multifacetadas e do entorno proporcionam a maior geração e o menor consumo de energia elétrica para diferentes cidades brasileiras?

A pesquisa toma partido do estudo de uma edificação de geometria complexa para aplicação da parametrização da forma e otimização baseada em simulação para melhoria do desempenho. Com este trabalho, além da identificação dos parâmetros mais impactantes no desempenho termo-energético, busca-se identificar e analisar outros aspectos do emprego da parametrização e otimização em edificações de volumetria complexa, tais como tempo de convergência, aspectos do processo de modelagem da edificação e de análise dos resultados, e potencial do método para o processo de projeto.

1. OBJETIVOS

1.1 GERAL

Identificar as relações entre parâmetros da volumetria de uma edificação de fachadas multifacetadas e sombreamento do entorno imediato com a geração e o consumo de energia elétrica para diferentes cidades brasileiras.

1.2 ESPECÍFICOS

- Analisar o potencial de geração de energia do Museu da Imagem e do Som (MIS) de Copacabana-RJ com a aplicação de módulos fotovoltaicos

em sua fachada principal considerando-se a parametrização de alguns elementos da fachada e empregando-se a otimização baseada em simulação.

- Parametrizar um modelo de museu de fachadas multifacetadas com módulos fotovoltaicos integrados às fachadas, tendo como base o estudo da forma do Museu da Imagem e do Som (MIS) de Copacabana-RJ.
- Parametrizar, de acordo com uma configuração urbana adequada à inserção da edificação modelada, condicionantes urbanísticos de um arranjo espacial de quadra.
- Otimizar a volumetria da edificação com módulos fotovoltaicos integrados às fachadas multifacetadas e a relação edificação-entorno para três diferentes combinações de latitudes/alturas solares e zonas bioclimáticas brasileiras.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Essa pesquisa é aplicada e experimental, pois se baseia na criação de um experimento com um objeto de estudo (um modelo de edificação de fachadas multifacetadas) (PRODANOV; FREITAS, 2013), para o qual são criadas variáveis independentes para análise do seu impacto no desempenho termo-energético da edificação.

O Capítulo 2, cujo objetivo é o primeiro objetivo específico da dissertação, apresenta um estudo da parametrização da fachada principal do MIS e o emprego da otimização baseada em simulação para otimização dessa fachada tendo por objetivo maximizar a geração de energia elétrica por módulos fotovoltaicos integrados às suas superfícies. Já o Capítulo 3 apresenta o processo de criação de um museu de volumetria parametrizada com fachadas multifacetadas, inspirado no MIS, e de um contexto urbano englobando também alguns parâmetros para aplicação da otimização baseada em simulação. No

segundo capítulo são criadas duas funções objetivo⁵ para guiar a otimização: maximização da geração de energia por módulos fotovoltaicos integrados às fachadas e minimização da carga térmica para resfriamento e aquecimento da edificação. Esse estudo é empregado para três diferentes cidades brasileiras (Figura 3).

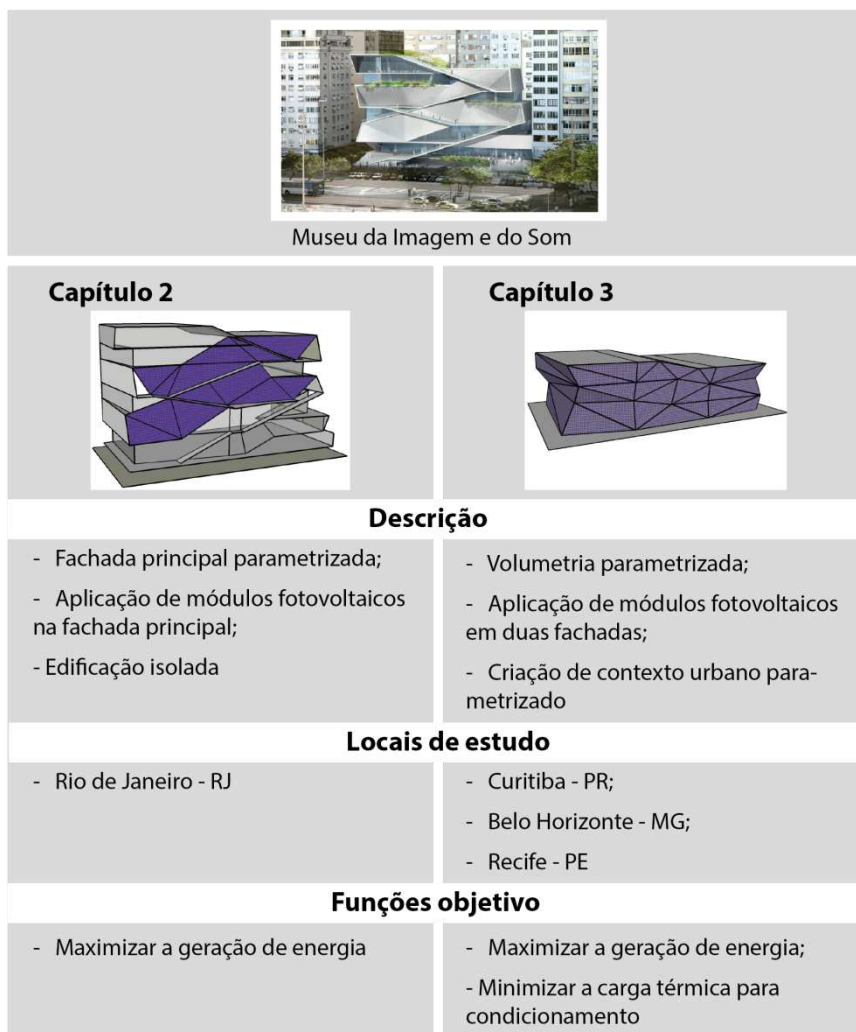


Figura 3: Descrição dos modelos criados para aplicação da otimização baseada em simulação em cada capítulo.

Ressalta-se que no Capítulo 2 é realizado um processo de parametrização de uma fachada do museu, enquanto que no Capítulo 3, apesar de os elementos parametrizados serem localizados também nas fachadas, estes

⁵ Função objetivo é uma métrica do desempenho da edificação (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014) relacionada com os objetivos da otimização.

causam um maior impacto na volumetria da edificação, que é levada em consideração para o cálculo da carga térmica. Sendo assim, optou-se pelo emprego do termo "volumetria" (*form*) no Capítulo 3 ao invés de "envoltória" ou "fachadas".

Ambos os capítulos 2 e 3 apresentam três etapas fundamentais para desenvolvimento da pesquisa, descritas por Nguyen, Reiter e Rigo (2014): pré-processamento, execução da otimização e pós-processamento. Em cada uma das etapas são realizados os seguintes procedimentos (Tabela 1):

Tabela 1: Procedimentos metodológicos realizados nos capítulos 2 e 3 da dissertação.

Capítulo 2	Capítulo 3
A - Pré-processamento - Definição do problema de otimização	
- Criação do modelo computacional (volumetria da edificação), tendo por base o projeto original do MIS. Modelagem realizada no Grasshopper/Rhinoceros.	- Criação de um novo modelo de museu, inspirado no conceito criado pelos projetistas do MIS para geração da volumetria da edificação original. Modelagem realizada no Grasshopper/Rhinoceros.
- Edificação isolada.	- Modelagem do entorno urbano, tendo por base um estudo de legislações urbanísticas locais e a configuração espacial de área escolhidas para implantação de um museu. Modelagem feita para três cidades em estudo: Curitiba-PR, Belo Horizonte-MG e Recife-PE.
- Definição dos parâmetros (variáveis a serem alteradas na otimização) e de restrições do modelo. Os parâmetros são alterações na volumetria da edificação, que implicam em variações de área e inclinação das superfícies nas fachadas. Essa etapa é realizada em conjunto com a modelagem computacional.	
- Criação da função objetivo: maximização da geração de energia	- Criação das funções objetivo: maximização da geração de energia e minimização da carga térmica para condicionamento.
- Modelagem do sistema fotovoltaico e dos materiais construtivos e configurações de cargas, ocupação e sistemas para simulação do desempenho energético da edificação*.	
* Modelagem realizada no <i>plugin</i> Archsim para simulação da geração de energia fotovoltaica no EnergyPlus.	*Modelagem realizada no <i>plugin</i> Ladybug/Honeybee para simulação da geração de energia e da carga térmica de resfriamento e aquecimento no EnergyPlus. Esse <i>plugin</i> foi escolhido para esse capítulo por ser mais robusto (apresenta mais funções para configuração na simulação) do que o Archsim e por possibilitar ao usuário maior flexibilidade na definição dos parâmetros da modelagem.

- Conexão da ferramenta que irá realizar a otimização com o modelo geométrico, com os parâmetros a serem otimizados e com as funções objetivo. O *plug-in* de otimização utilizado em foi o Octopus, e o algoritmo de otimização, o algoritmo genético SPEA-2, presente no Octopus.

B - Execução da otimização

- Monitoramento da convergência das soluções e dos parâmetros - o que determina o critério de parada da otimização.

- Monitoramento de erros e falhas durante o processo de otimização, para contorno.

C - Pós-processamento - Análise dos resultados

- Análise do processo de convergência.

- Análise das soluções obtidas: identificação das soluções de melhor desempenho para cada função objetivo e dos parâmetros mais impactantes para cada uma.

- Cálculo do consumo real de energia com sistema de ar-condicionado para comparação com a geração de energia e identificação do potencial de atendimento ao consumo de cada cidade.

- Geração de esquemas gráficos para apresentação das análises realizadas.

3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Essa dissertação foi estruturada em 4 capítulos, sendo os dois intermediários escritos no formato de artigos. O primeiro capítulo consiste na introdução do trabalho, com apresentação dos objetivos, justificativa e relevância da pesquisa e do objeto de estudo. Ele também apresenta resumidamente a metodologia empregada e os materiais utilizados.

O segundo capítulo apresenta um estudo inicial da parametrização da fachada principal do Museu da Imagem e do Som (MIS) para otimização de sua forma visando maximizar a geração de energia por módulos fotovoltaicos integrados à fachada. Tem como objetivo verificar as implicações da parametrização da forma da fachada na otimização da geração fotovoltaica, e é realizado na cidade original do MIS, Rio de Janeiro, RJ, porém com a fachada voltada a Norte, o que se diferencia do original.

O terceiro capítulo apresenta o processo de criação de um museu de fachadas multifacetadas, inspirado na linguagem formal do MIS, com a parametrização de alguns elementos de duas fachadas que impactam diretamente a volumetria da edificação. Nesse capítulo também são criados contextos urbanos parametrizados para três cidades brasileiras: Curitiba-PR,

Belo Horizonte-MG e Recife-PE. Para os três modelos de edificação com seus respectivos contextos urbanos é empregada a otimização baseada em simulação visando maximizar a produção de energia por módulos fotovoltaicos integrados às fachadas e minimizar a carga térmica de resfriamento e aquecimento da edificação, para posteriormente chegar ao consumo de energia elétrica. Os casos otimizados são analisados comparativamente para cada cidade, tanto quanto ao desempenho quanto ao resultado formal.

Por fim, o quarto capítulo apresenta as conclusões gerais da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

4. REFERÊNCIAS

ANDRADE, M. L. V. X.; RUSCHEL, R. C.; MOREIRA, D. C. O processo e os métodos. In: KOWALTOWSKI, D. C. C. K.; MOREIRA, D. C.; PETRECHE, J. R. D.; FABRICIO, M. M. **O processo de projeto em arquitetura: da teoria à tecnologia**. São Paulo: Oficina de textos, 2011. p. 80-100.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução normativa N° 482, de 17 de abril de 2012.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução normativa N° 687, de 24 de novembro de 2015.

ANEEL. **Geração distribuída**. Disponível em:
<http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset_publisher/CegkWaVJWF5E/content/geracao-distribuida-introducao-1/656827?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Finformacoes-tecnicas%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_CegkWaVJWF5E%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_pos%3D1%26p_p_col_count%3D2>. Acesso em 02 out. 2018.

BEN 2016. Balanço Energético Nacional 2016. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 2016.

BEN 2017. Balanço Energético Nacional 2017. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 2017.

CRONEMBERGER, J.; CAAMAÑO-MARTÍN, E; SÁNCHEZ, S. V. Assessing the solar irradiation potential for solar photovoltaic applications in buildings at low latitudes - Making the case for Brazil. **Energy and Buildings**, Elsevier, n. 55, p.264-272, 2012.

DINO, I. G.; UÇOLUK, G. Multiobjective design optimization of building space layout, energy, and daylighting performance. **Journal of Computing in Civil Engineering**, Elsevier, v. 31, n. 5, 2017.

ELSAYED, M. S. VERMETTE, C. H. Development of optimization methodology for increased energy efficiency of PV integrated curtain wall systems. In: eSim 2016, **Anais...** Hamilton: eSim, 2016.

EVINS, R. A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, n. 22, p. 230-245, 2013.

FONSECA, L. P. G.; NUNES, V. D. L.; SANTANA, L. O.; CARLO, J. C.; CÉSAR JÚNIOR, K. M. L. Otimização multiobjetivo das dimensões dos ambientes de uma residência unifamiliar baseada em simulação energética e estrutural. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 267-288, jan./mar. 2017.

GAVÍRIA, L. R.; PEREIRA, F. O. R.; MIZGIER, M. O. Influência da configuração urbana na geração fotovoltaica com sistemas integrados às fachadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 7-23, out./dez. 2013.

GRANADEIRO, V.; DUARTE, J. P.; CORREIA, J. R.; LEAL, V. M. S. Building envelope shape design in early stages of the design process: Integrating architectural design systems and energy simulation. **Automation in Construction**, Elsevier, n. 32, p. 196-209, 2013.

HACHEM, C.; ATHIENITIS, A.; FAZIO, P. Evaluation of energy supply and demand in solar neighborhood. **Energy and Buildings**, Elsevier, n. 49, 335-347, 2012.

LOBACCARO, G.; CHATZICHRISTOS, S.; LEON, V. A. Solar optimization of housing development. **Energy Procedia**, Elsevier, n. 91, p. 868-875, 2016.

KÄMPF, J. H.; MONTAVON, M.; BUNYESC, J.; BOLLIGER, R.; ROBINSON, D. Optimisation of buildings' solar irradiation availability. **Solar Energy**, Elsevier, n. 84, p. 596- 603, 2010.

KÄMPF, J. H.; ROBINSON, D. Optimisation of building form for solar energy utilisation using constrained evolutionary algorithms. **Energy and Buildings**, Elsevier, n. 42, 807-814, 2010.

NGUYEN, A.; REITER, S.; RIGO, P.. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, Elsevier, n.113, p. 1043-1058, ago. 2014.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Universidade Feevale, 2013. 276 p.

RAMPINELLI, G. A.; SCARDUELI, C. Desenvolvimento de metodologia para mapeamento da estimativa de geração distribuída com sistemas fotovoltaicos em áreas urbanas. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 4, p. 106-124, 2016.

SHI, X.; YANG, W. Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of architects. **Automation in Construction**, Elsevier, n. 32, p. 125-135, jan. 2013.

Parametrização e otimização da fachada do MIS-RJ para geração de energia fotovoltaica

RESUMO

A integração de ferramentas de projeto arquitetônico com ferramentas de simulação de desempenho proporciona a projetistas o desenvolvimento de projetos de elevada eficiência energética. Utilizadas em fases iniciais de projeto e integradas a algoritmos de otimização, estas ferramentas possibilitam a criação de diversas formas arquitetônicas de modo automatizado, porém respeitando-se uma linguagem formal e os parâmetros e restrições criados pelo projetista. O objetivo deste trabalho foi aplicar a modelagem algorítmica para parametrização da forma da fachada principal do Museu da Imagem e do Som (MIS) do Rio de Janeiro-RJ e otimizá-la para aumento da produção de energia elétrica por sistema fotovoltaico integrado às superfícies que constituem os cobogós do projeto original. Identificou-se uma melhoria de 27,0% na geração de energia em relação ao modelo original, em um intervalo de soluções de 41,3%, que abrangem o melhor e pior caso encontrados. Entre os parâmetros criados na modelagem, identificou-se um maior impacto da inclinação dos módulos fotovoltaicos sobre o desempenho da fachada do que a área destes. Apesar da complexidade do método de modelagem algorítmica da fachada do MIS, o processo de otimização baseada em simulação apresentou-se viável para o modelo criado.

Palavras-Chave: Modelagem paramétrica; Otimização baseada em simulação; Módulos fotovoltaicos.

ABSTRACT

The integration of architectural design tools with performance simulation tools allows designers to develop projects of high energy efficiency. These tools, if used in early phases of design and with integration to optimization algorithms, allow the creation of several architectural forms in an automated manner but at the same time respecting a formal language, parameters and constraints created by the designer. The objective of this work was to apply an algorithmic modeling for the parameterization of the main facade's form of the Museum of Image and Sound of Rio de Janeiro-RJ and optimizing it for increasing electric energy production of a photovoltaic system integrated to the surfaces that were design as leaked surfaces in the original project. An improvement of 27.0% in the energy generation was identified in relation to the original model, in a solution interval of 41.3% among the created solutions, considering the worst and best cases. Among the created parameters, a major impact of photovoltaic modules tilt over the performance was identified, and a minor impact of their areas. Although the

modeling method of the museum facade was complex, the simulation-based optimization was proved feasible for the created model.

Key-Words: *Parametric modeling; Simulation-based optimization; Photovoltaic modules.*

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o desempenho energético de edificações tem ganhado destaque no cenário nacional, sendo refletida, por exemplo, na criação do Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações pelo Inmetro e, a partir dele, na publicação do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) (INSTITUTO..., 2013), e na publicação da Resolução Normativa n° 482, que estabelece condições para a mini e microgeração distribuída de energia elétrica (ANEEL, 2012). No entanto, o maior desafio para a obtenção de edificações de elevado desempenho energético se insere no processo de projeto, uma vez que decisões tomadas em estágios iniciais possuem um grande impacto no desempenho da edificação (ELBELTAGI *et al.*, 2017). Em contrapartida, a avaliação do desempenho normalmente é realizada ao final de etapas de projeto (WEN; HIYAMA, 2016), quando ferramentas de simulação são empregadas para calcular com precisão o desempenho da solução final de projeto. Esse processo é orientado à avaliação, ao invés de servir como apoio à tomada de decisões projetuais em um processo de criação dinâmico (TOULOUPAKI; THEODOSIOU, 2017), que envolve o estabelecimento de um problema de projeto, análise, proposição de solução (síntese) e avaliação (LAWSON, 1997), que se repete de forma cíclica e não necessariamente nesta ordem até que seja encontrada uma solução satisfatória¹. Além disso, esta avaliação geralmente é realizada por especialistas em avaliação de desempenho, não havendo uma integração entre a avaliação de soluções projetuais e o processo de projeto.

Desta maneira, a incorporação de estratégias de eficiência energética ao processo de projeto é condicionada à adoção de técnicas conhecidas pelos

¹ Na abordagem em que a avaliação de desempenho faz parte do processo dinâmico de projeto, as ferramentas de simulação de desempenho são inseridas no meio do processo de projeto, auxiliando o projetista na tomada de decisões.

projetistas e aplicadas de modo empírico ao projeto, sem comprovação efetiva de seu desempenho. Segundo *Asl et al.* (2014), tradicionalmente, devido à ausência de ferramentas de fácil manuseio que possibilitem a arquitetos explorar alternativas de projeto e entender o impacto de variáveis arquitetônicas no desempenho energético da edificação, muitos projetistas se baseiam apenas em recomendações qualitativas na concepção de projetos de elevado desempenho energético, que podem ou não ser efetivamente eficientes. Segundo uma pesquisa de campo realizada por Cartana e Pereira (2007) em Florianópolis-SC, os métodos mais utilizados no desenvolvimento de projetos bioclimáticos por arquitetos para tomada de decisões são o uso da intuição e experiência profissional, consulta à legislação, elaboração de croquis e uso do computador para representação bidimensional, além da integração com outros profissionais. Rodrigues e Pedrini (2017) mostraram que a análise de desempenho pode ser incorporada ao processo de projeto em sua fase inicial, porém requer o acompanhamento de profissionais especialistas, tais como pesquisadores em eficiência energética, atuando como consultores. Portanto, na maior parte das vezes, a avaliação do desempenho da edificação, por meio de mecanismos certificados, tais como a simulação computacional e métodos prescritivos como os presentes nos RTQs, é delegada a outros profissionais, especialistas nestas áreas. Além disso, o uso de métodos matemáticos, tais como análises de gráficos, modelos matemáticos e uso de guias e manuais são pouco valorizados pelos arquitetos - que raramente utilizam programas computacionais para avaliação bioclimática, segundo a pesquisa realizada por Cartana e Pereira (2007).

Outro fator que condiciona esta prática é a complexidade na modelagem de edificações para avaliação do desempenho por meio de simulação computacional. A transferência de um modelo digital de projeto arquitetônico para um modelo energético é um processo que consome muito tempo, e é passível de erros, o que faz com que projetistas e avaliadores realizem esse processo para apenas um ou poucos modelos (*Asl et al.*, 2014). No entanto, a emergência crescente de projetos de elevada eficiência energética tem enfatizado a necessidade urgente de arquitetos aprenderem como aplicar métodos de projeto baseado em desempenho ao mesmo tempo que asseguram a qualidade do projeto e a essência de um projeto convencional (SHI; YANG, 2013): a preocupação com as características formais e estéticas. Recentes

avanços na tecnologia computacional têm promovido a integração entre o processo de projeto e a avaliação do desempenho energético, por meio de ferramentas como o Excel, novos softwares, programas BIM², e linguagens de programação visual³ integradas a processos de simulação (KONIS; GAMAS; KENSEK, 2016). Associadas a ferramentas de modelagem paramétrica, esses outros *softwares* possibilitam a projetistas analisar rapidamente o impacto causado pela alteração de variáveis do projeto sobre o seu desempenho.

Os programas de modelagem paramétrica se diferenciam de programas de modelagem tradicional ao criar conexões entre a geometria modelada e parâmetros (variáveis de projeto) de forma a possibilitar o ajuste de partes do projeto que, sendo feitos, afetam a forma como um todo (LEACH, 2014). Sendo assim, eles facilitam a implementação de alterações ao criar associações entre as diversas partes da geometria modelada e, assim, tornam possível ao projetista analisar rapidamente o impacto da alteração de uma variável sobre o projeto como um todo. A aplicação desses programas torna possível uma nova abordagem de projeto: o projeto paramétrico, que é, segundo Oxman (2017), uma manifestação da reflexão sobre o projeto que se baseia na exploração de um espaço de soluções e em processos de alteração de relações associativas de projeto. Segundo Yu e Gero (2016), o projeto paramétrico é um "processo baseado em regras controladas por variações e parâmetros, no qual múltiplas soluções de projeto podem ser desenvolvidas em paralelo" (YU; GERO, 2016, p. 2, tradução nossa), e ele é construído por meio de um raciocínio abstrato, matemático e algorítmico (WOODBURY, 2010). Segundo Oxman (2015), o pensamento abstrato é a base para o projeto paramétrico que funciona como um método generativo, utilizado para a produção de alternativas de projeto. O pensamento matemático está relacionado com teoremas e construções utilizados para definir a linguagem computacional (*scripting*) para a

² BIM: *Building Information Modeling* - é uma abordagem aplicada ao projeto, construção e gestão de edificações e elementos construtivos que se apropria da representação digital para facilitar na gestão de processos, nas trocas e interoperabilidade da informação ao longo do ciclo de vida de um produto (RUSCHEL, 2014).

³ Por meio da linguagem de programação visual, é possível a projetistas interagir graficamente com elementos de programas computacionais sem necessidade de entender e manipular linhas de código textuais (KONIS; GAMAS; KENSEK, 2016).

representação e geração do projeto. Já o pensamento algorítmico está relacionado com a confecção da linguagem de programação, com a criação de funções que permitem adicionar, repetir, modificar ou remover partes do projeto paramétrico (OXMAN; GU, 2015).

A integração entre as ferramentas de desenho paramétrico (que se enquadram na categoria CAD⁴) e as ferramentas de avaliação de desempenho (CAE⁵) têm alterado o processo de projeto de edificações. Segundo Oxman (2008), teorias e tecnologias de projeto digital têm apontado para uma transição da simulação analítica para o desenvolvimento de simulações para síntese e geração. Isso significa que ao invés do projetista realizar uma avaliação (A) do desempenho de um projeto (G) por meio da simulação (S) para então realizar alterações no projeto (Figura 1a), a integração entre as ferramentas mencionadas dentro do processo de projeto possibilita que simulações baseadas em desempenho alterem diretamente o projeto (OXMAN, 2008). O desempenho da edificação torna-se então o condutor da geração de soluções projetuais, que são então avaliadas (Figura 1b).

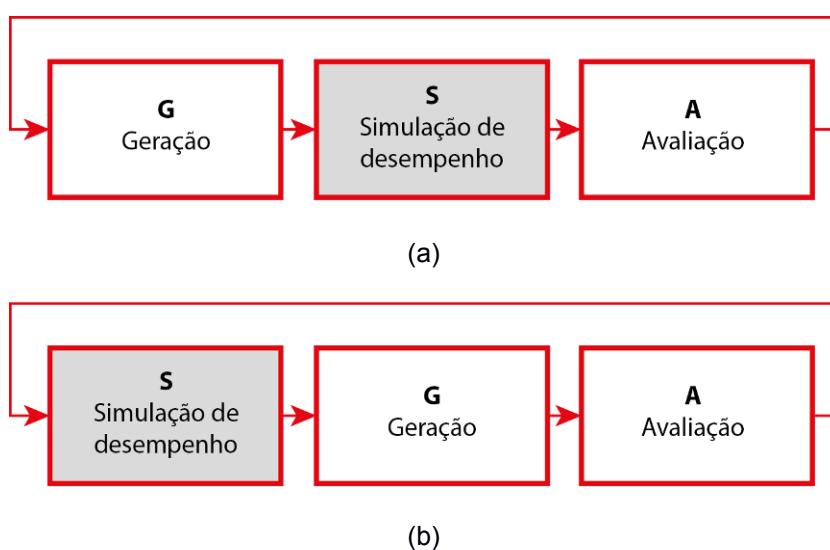


Figura 1: Modelos de desempenho: (a) Modelo de simulação convencional no CAD; (b) Modelo de desempenho

⁴ CAD - *Computer-aided Design*

⁵ CAE - *Computer-aided Engineering*

Fonte: Adaptado de Oxman (2008).

Esta tecnologia emergente tem possibilitado a projetistas estabelecer um processo de projeto auxiliado por ferramentas computacionais, em que o objetivo é encontrar, entre uma variedade de soluções projetuais, a solução de melhor desempenho para os critérios de projeto estabelecidos. Denominado por diversos autores (FERRARA *et al.*, 2017; NGUYEN; REITER; RIGO, 2014; STEVANOVIC, 2013) como otimização baseada em simulação, o método empregado no processo de projeto arquitetônico agrega ferramentas de desenho/projeto e ferramentas de simulação de desempenho com técnicas de otimização. A otimização baseada em simulação se baseia em métodos iterativos, que constroem sequências infinitas buscando se aproximar de uma solução no espaço de busca que satisfaça condições ótimas (WETTER, 2009), ou seja, por meio desse método são criadas diversas soluções de projeto em um processo de melhoramento das soluções, buscando-se encontrar a melhor para um ou mais objetivos de projeto, que, nesse caso, se baseiam numa melhoria de desempenho. Estes métodos são facilmente automatizados por programação computacional (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014).

A linguagem de programação visual tem se tornado uma ferramenta utilizada por projetistas para realizar mudanças em projetos por meio da alteração de parâmetros e para a incorporação de componentes de otimização (KONIS; GAMAS; KENSEK, 2016). Utilizando-se essa linguagem, projetistas podem criar modelos geométricos e relacionar os componentes da forma entre si por meio de equações e relações numéricas modeladas algoritmicamente por ele próprio. Sendo assim, o projetista pode desenvolver modelos paramétricos, que possibilitem alterações da geometria ou de elementos do projeto, respeitando-se restrições criadas por meio de equações. Entre as linguagens de programação visual mais populares atualmente encontram-se Simulink (MATHWORKS, 2018), Grasshopper (MCNEEL, 2018), Dynamo (AUTODESK, 2018) e Marionette (VECTORWORKS, 2018). O Grasshopper tem expandido sua popularidade em aplicações de modelagem paramétrica e otimização (ELBELTAGI *et al.*, 2017; ELSAYED; VERMETTE, 2016; KONIS; GAMAS; KENSEK, 2016; CALDERA; SILVA; LOYOLA, 2013) devido a sua integração com o programa de modelagem Rhinoceros (MCNEEL, 2018), e a possibilidade que ele fornece a usuários para a criação e adição de *plug-ins* por meio de linguagem de

programação, que expandem as possibilidades de modelagem do Grasshopper. O *plug-in* em si apresenta poucas atualizações enquanto que diversos colaboradores têm criado *plug-ins* adicionais ao Grasshopper para expandir suas funções, tais como possibilitar sua integração com programas de simulação como o EnergyPlus (Archsim; Ladybug/Honeybee), Daysim e Radiance (DIVA; Ladybug/Honeybee), CFD (Butterfly) etc.

1.1. Projeto e otimização de fachadas

O projeto de fachadas é uma tarefa crucial para arquitetos e engenheiros devido a fatores como o impacto no desempenho energético, no conforto térmico e visual e na aparência estética da edificação (NARANGEDDEL; LEE; STOUFFS, 2017). No entanto, alguns critérios no processo de projeto de fachadas podem ser conflituosos - por exemplo, em climas frios, o aumento do percentual de abertura na fachada proporciona ganho de calor no inverno⁶, porém aumenta a carga térmica de resfriamento no verão; se o percentual de abertura na fachada diminui, a quantidade de iluminação natural que adentra o ambiente também diminui, elevando o gasto com iluminação artificial (NARANGEDDEL; LEE; STOUFFS, 2017).

Além de serem parte de um sistema que possibilita trocas de calor, movimentação do ar e umidade, bloqueio ou atenuação de ruídos e penetração de iluminação natural (ZEMELLA; FARAGUNA, 2014), as fachadas vêm sendo trabalhadas por arquitetos como um elemento ativo no projeto de edificações de elevada eficiência energética. Em um sistema conhecido como *building integrated photovoltaics* (BIPV), elementos de vedação de edificações vêm sendo adaptados para gerar energia para uso na própria edificação, sem requerer espaço extra de instalação, pois substituem materiais tradicionais da edificação, se integrando à envoltória (DIDONÉ; WAGNER, 2013). No meio acadêmico, estudos são conduzidos para identificação de formas ótimas das

⁶ Os ganhos de calor dependem de outros fatores, tais como condições de nebulosidade locais, período do dia e propriedades dos sistemas envidraçados, tais como o fator solar dos vidros. Porém o projeto de áreas envidraçadas pode trazer benefícios para um objetivo de projeto (por exemplo, beneficiar a iluminação natural) e simultaneamente prejudicar outro objetivo relacionado ao desempenho (aumentar o consumo de energia para condicionamento).

fachadas e de elementos da edificação em que foram aplicados sistemas BIPV (ELSAYED; VERMETTE, 2016; KÄMPF *et al.*, 2010; KÄMPF; ROBINSON, 2010; LOBACCARO; CHATZICHRISTOS; LEON, 2016). A importância desses estudos se baseia na complexidade da interação entre diversos parâmetros de projeto sobre o desempenho de edificações com módulos fotovoltaicos integrados, como demonstrado por Hachem, Athienitis e Fazio (2012). Fatores como área de módulos fotovoltaicos, inclinação e orientação solar dos módulos e sombreamento causado pelo entorno impactam a geração de energia do sistema (HACHEM; ATHIENITIS; FAZIO, 2012; CRONEMBERGER; CAAMAÑO-MARTÍN; SÁNCHEZ, 2012). Esses mesmos parâmetros, bem como a forma da edificação e seu contexto urbano (sombreamento) influenciam a demanda por resfriamento e aquecimento - muitas vezes impactando positivamente esse fator de desempenho enquanto causam uma redução da geração de energia pelos módulos fotovoltaicos.

Com a disseminação das ferramentas de linguagem de programação visual, a produção arquitetônica tende a explorar geometrias mais complexas - não euclidianas - , pois as ferramentas permitem uma maior liberdade na geração da forma do projeto. Não são apenas ferramentas de representação gráfica, mas ferramentas de auxílio na criação e desenvolvimento do projeto. As ferramentas de linguagem de programação visual, integradas a ferramentas de avaliação de desempenho, possibilitam a geração da forma do projeto voltada à melhoria do desempenho energético e conforto ambiental da edificação, como demonstrado por Ko *et al.* (2012), Zhang, Zhang e Wang (2016) e Naragendel, Lee e Stouffs (2017), que trabalharam com geometrias complexas. Ko *et al.* (2012) e Naragendel, Lee e Stouffs (2017) utilizaram o Grasshopper para a modelagem de fachadas multifacetadas e a otimização baseada em simulação para identificação das soluções de melhor desempenho para o ganho de calor solar nas superfícies trianguladas (KO *et al.*, 2012) e para a carga térmica da edificação e níveis de iluminação satisfatórios (NARAGENDEL; LEE; STOUFFS, 2017). Zhang, Zhang e Wang (2016) aplicaram a otimização baseada em simulação por meio do Grasshopper e algoritmos genéticos de otimização para maximizar o ganho de radiação solar e a eficiência do espaço ao mesmo tempo que buscavam minimizar o coeficiente de forma de uma edificação de volumetria complexa.

No Brasil, em 2009, iniciou-se o projeto do novo Museu da Imagem e do Som (MIS) do Rio de Janeiro, em construção na Avenida Atlântica, em Copacabana (ARCOWEB, 2018). Projeto de Diller Scofidio + Renfro, o edifício apresenta uma volumetria complexa, sendo a fachada frontal demarcada pelos elementos de circulação vertical externos ao edifício, por superfícies trianguladas (cobogós) e planos envidraçados, compondo assim uma fachada multifacetada. Devido à complexidade da volumetria da edificação e à sua inserção no contexto de arquitetura contemporânea institucional no Brasil, decidiu-se utilizar o projeto como objeto de estudo para este trabalho. Nesse contexto, o presente trabalho busca responder às seguintes questões: Como transformar a linguagem formal do MIS (partido arquitetônico) em uma linguagem paramétrica? Qual o potencial do emprego da parametrização e da otimização baseada em simulação aplicados à otimização da forma de fachadas multifacetadas para a análise do desempenho?

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é interpretar e parametrizar um modelo de museu existente com fachadas multifacetadas para verificar as suas implicações na otimização mono-objetivo da geração fotovoltaica. Para isso, foi realizado um estudo da fachada principal do MIS para aplicação de módulos fotovoltaicos integrados às superfícies que constituem os cobogós no projeto da edificação.

O método apresentado visa gerar partidos formais para a fachada da edificação aplicando-se um objetivo ligado ao desempenho energético para a criação de soluções. A fachada foi selecionada como objeto de estudo devido à sua complexidade para o tema de geração fotovoltaica⁷. Apesar de o método ser aplicado para a busca de soluções de elevado desempenho, as ferramentas empregadas possuem limitações quanto ao cálculo preciso da energia gerada, porém o estudo é voltado à geração e análise de propostas formais, como forma de guiar o projetista na tomada de decisões com relação ao partido da

⁷ Diversos trabalhos afirmam que o potencial da cobertura é maior para a geração fotovoltaica do que as fachadas no território brasileiro (CRONEMBERGER; CAAMAÑO-MARTÍN; SÁNCHEZ, 2012; GAVIRIA; PEREIRA; MIZGIER, 2013), porém o escopo deste trabalho é realizar um estudo do potencial das fachadas, incluindo-se a avaliação de diversos aspectos intervenientes no desempenho (área dos módulos e inclinação).

edificação. O MIS foi adotado pelo potencial que a forma da fachada proporciona para o problema voltado à geração fotovoltaica. Apesar de os cobogós serem elementos de ventilação natural no MIS, não é escopo do trabalho avaliar o seu desempenho para o projeto original da edificação. Além disso, a geometria da fachada do MIS se adéqua à proposta de modelagem algorítmica para parametrização da fachada principal de uma edificação multifacetada.

Apesar de o método proposto ser empregado a uma edificação existente, cuja volumetria já foi definida, buscou-se parametrizar os elementos da fachada e alterá-la a fim de verificar o potencial da parametrização e otimização para geração de energia. Ressalta-se que, se aplicado em um projeto em fase de desenvolvimento, a concepção da fachada poderia fazer parte da concepção geral da forma da edificação e, assim, o método apresentaria maior impacto nos resultados obtidos. No entanto, o recorte deste estudo é nas fachadas multifacetadas, o que exclui forma geral e cobertura.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo apresentado é, de acordo com critérios apresentados por Nguyen, Reiter e Rigo (2014), multidimensional, pois envolve uma série de variáveis de projeto; dinâmico, pois apresenta dependências entre as variáveis inclinação e área dos módulos fotovoltaicos; e mono-objetivo, pois apresenta apenas uma função objetivo para guiar a otimização: produção de energia. As etapas de desenvolvimento da pesquisa foram divididas de acordo com uma relação definida por Nguyen, Reiter e Rigo (2014): pré-processamento, execução da otimização e pós processamento. Na etapa de pré-processamento, a edificação foi modelada de forma algorítmica no Grasshopper 0.0.0076/Rhinoceros 5.0, com a parametrização de alguns componentes da fachada principal, que promovem alteração da área e inclinação das superfícies multifacetadas (Figura 2). Ainda nessa etapa, foi utilizado o *plug-in* Archsim 4.0.2.16 para criação das configurações necessárias à simulação. Esse *plug-in* se conecta ao EnergyPlus 8.4 para simulação da geração de energia dos módulos fotovoltaicos da fachada principal - o Archsim envia o modelo do Grasshopper para o EnergyPlus que, após a simulação, retorna com os resultados para o Archsim. Esses resultados são utilizados para a criação da função objetivo: maximizar a geração de energia do sistema fotovoltaico. Na

etapa de otimização, o *plug-in* Octopus 0.35 é conectado à função objetivo e aos parâmetros do modelo para a criação de diversas soluções projetuais e para condução da otimização baseada em simulação. Por fim, é realizada a análise dos resultados obtidos, na etapa de pós-processamento. Cada etapa é descrita com mais detalhes a seguir.

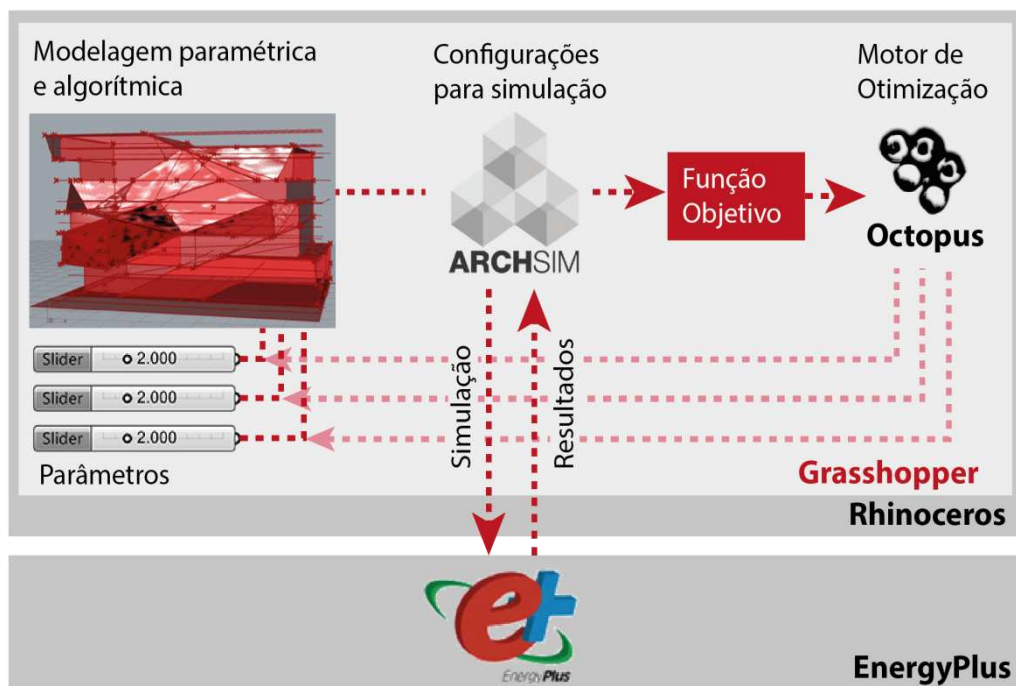


Figura 2: Diagrama processual das etapas que envolvem a otimização baseada em simulação do trabalho

2.1. Pré-processamento

Esta etapa incluiu a análise de desenhos técnicos e imagens do projeto do MIS, disponíveis na *web*, e criação de um método de modelagem algorítmica da envoltória no Grasshopper/Rhinoceros, com a parametrização de alguns elementos que compõem a fachada principal. Nessa etapa, os cobogós presentes na fachada principal do museu foram modelados como módulos fotovoltaicos para o cálculo do potencial de geração de energia elétrica para cada uma das soluções criadas no processo de otimização. Na modelagem, foram parametrizados alguns pontos criados para geração das superfícies dos módulos, respeitando-se restrições formais impostas.

2.1.1. Modelagem algorítmica da edificação

O método de modelagem da envoltória do MIS se baseou na análise de desenhos técnicos e de fotografias da edificação em construção e de imagens geradas pelos autores do projeto para divulgação (Figura 3). Foi identificada uma incompatibilidade entre algumas imagens e desenhos encontrados na *web* e os desenhos técnicos em relação à elevação da fachada principal (áreas envidraçadas e de cobogós, e geometria dos últimos). Optou-se por tomar como base os desenhos técnicos, sendo as imagens utilizadas apenas para compreensão da volumetria.

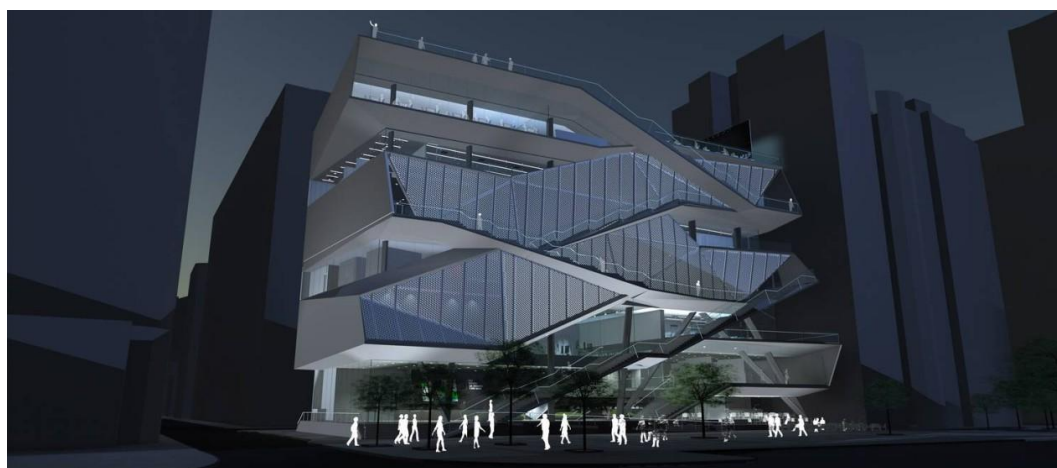


Figura 3: Maquete de apresentação do Museu da Imagem e do Som - Copacabana-RJ

Fonte: O GLOBO (2013).

O ponto de partida para modelagem da envoltória teve como base uma análise da volumetria da edificação e de sua projeção em planta e a análise do terreno (implantação). Verificou-se que existe uma relação direta entre a forma do terreno e a projeção do edifício (Figura 4). A relação entre a volumetria da edificação com sua implantação no terreno foi determinante para criação do ponto de partida para a modelagem algorítmica, pois definiu o ponto de partida para a criação de etapas sequenciais para a modelagem da volumetria.

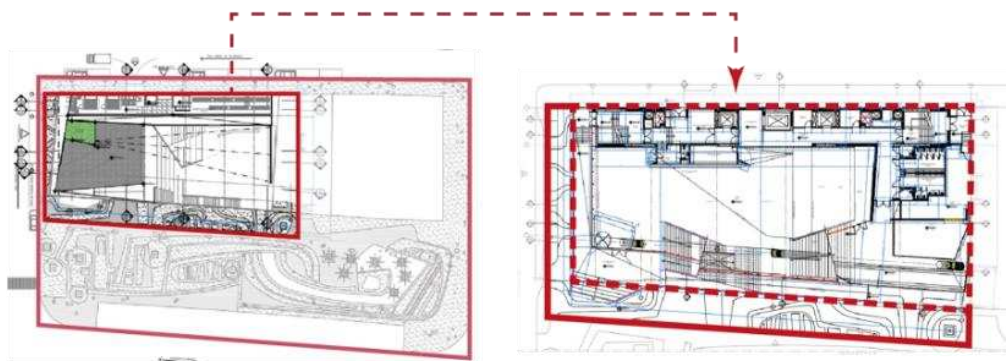


Figura 4: Análise da implantação - relação da projeção da edificação com o terreno

Fonte: Projeto técnico com edições da autora

A edificação em estudo apresenta vários recuos e recortes para acomodação das escadas externas, garantindo uma subida com vista livre para a praia de Copacabana (Figura 5). Verificou-se entretanto que, mesmo com os recortes e recuos, toda a volumetria encontra-se contida na área demarcada pela linha tracejada na Figura 4. Sendo assim, a área contida pela linha tracejada consiste em uma restrição geométrica para a geração da forma em planta da edificação no projeto original.



Figura 5: Vista da edificação e entorno parcial

Fonte: EBC (2015).

A partir da análise da implantação, a área que contém a edificação em planta foi desenhada, sendo esse o ponto de partida para modelagem do projeto. Tomou-se como origem o ponto demarcado como 0,0 na Figura 6 e, a partir da forma inicial em planta, foi criada uma sequência de etapas para a modelagem da volumetria da edificação, em um processo de modelagem algorítmica. O método de modelagem se baseou na construção de eixos em planta, paralelos às arestas que definem o polígono demarcado na Figura 6, que

eram movimentados nas direções dos eixos x e y para a criação de pontos que correspondem a vértices (pontos de encontro de faces em diferentes planos) da edificação.

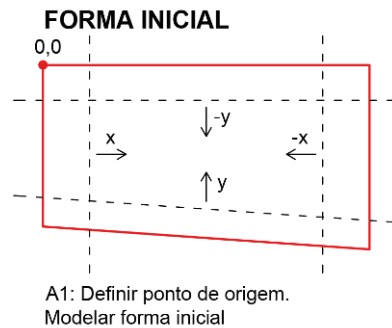


Figura 6: Geração da forma inicial e método de criação dos eixos

Os eixos foram criados a partir de dimensões identificadas nos desenhos técnicos em relação ao ponto de origem; e os pontos foram definidos de duas maneiras. Na primeira, um ponto (P1) é considerado uma variável pertencente a um eixo (x), porém apresenta movimentação independente no outro eixo (y) (Figura 7a). Na segunda forma, o ponto (P1) é criado a partir da interseção entre dois eixos - então este se torna uma variável dependente da movimentação dos dois eixos (x e y) (Figura 7b).

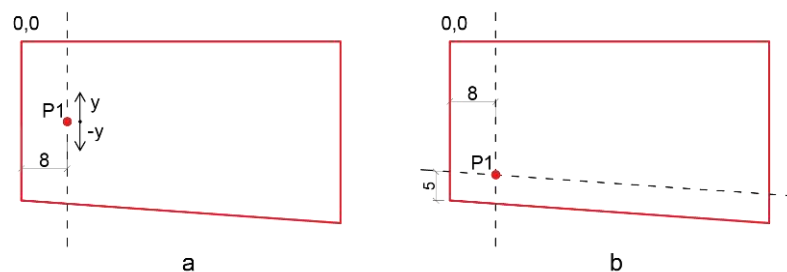


Figura 7: Método de criação dos pontos

A sequência de figuras 8 a 10 apresenta a criação de todos os pontos que definem o encontro das superfícies da envoltória no pavimento térreo. Cada desenho representa uma ação tomada em sequência para a criação de eixos, pontos, e ligação desses últimos para geração de superfícies que compõem a envoltória da edificação. Todas as entradas na forma de números - por exemplo, a ação A2 (afastamento lateral esquerdo de 3m) - possuem potencial para parametrização, pois o número de entrada pode ser trocado por qualquer outro valor, respeitado um intervalo pré-definido de um eixo. Já os pontos que foram

criados a partir de interseções entre eixos, não podem ser parametrizados independentemente - só se movimentarão se os eixos se movimentarem.

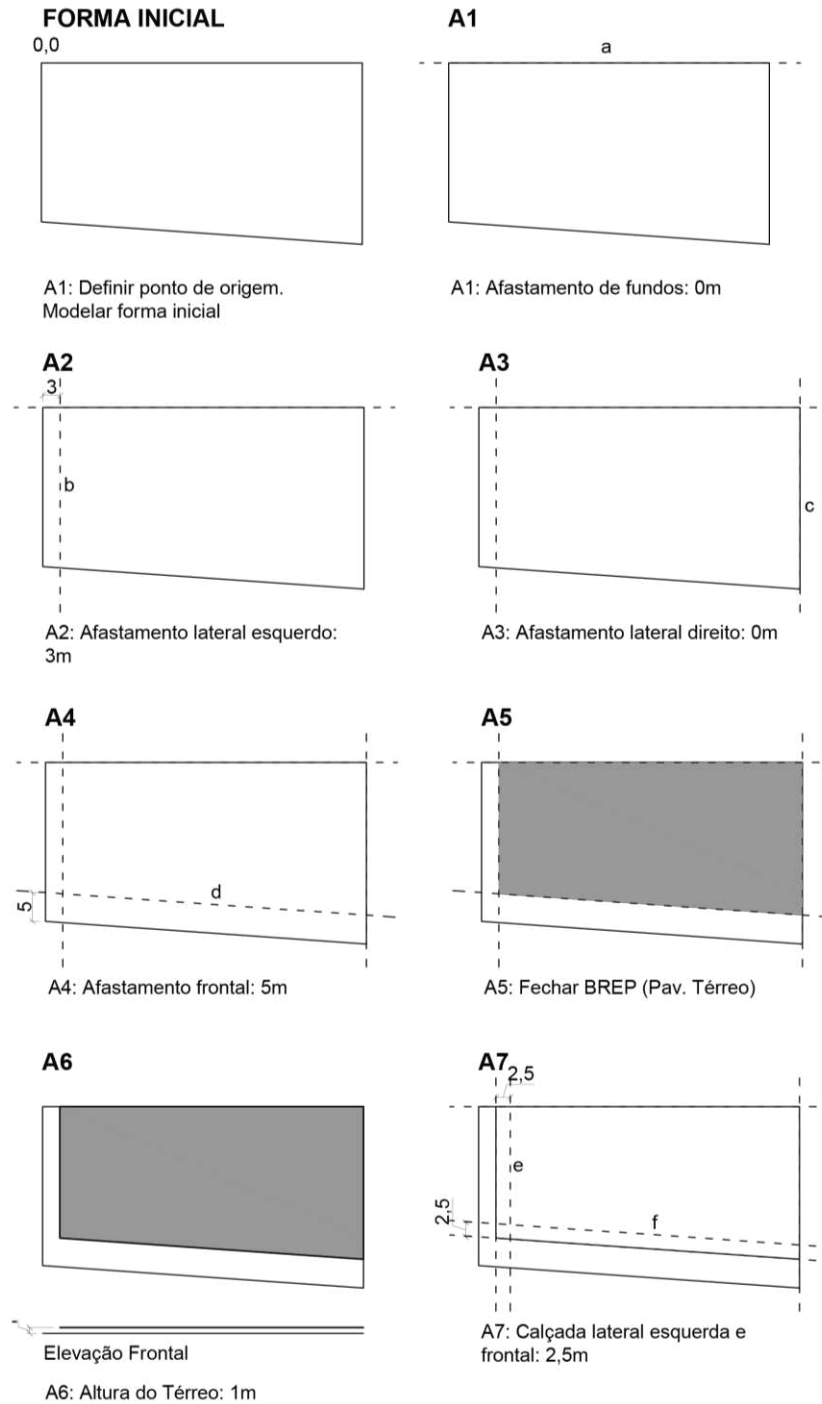


Figura 8: Método de criação da forma inicial e ações para geração da forma A1 a A7 (Planta pav. Térreo)

As dimensões apresentadas correspondem às do projeto real.

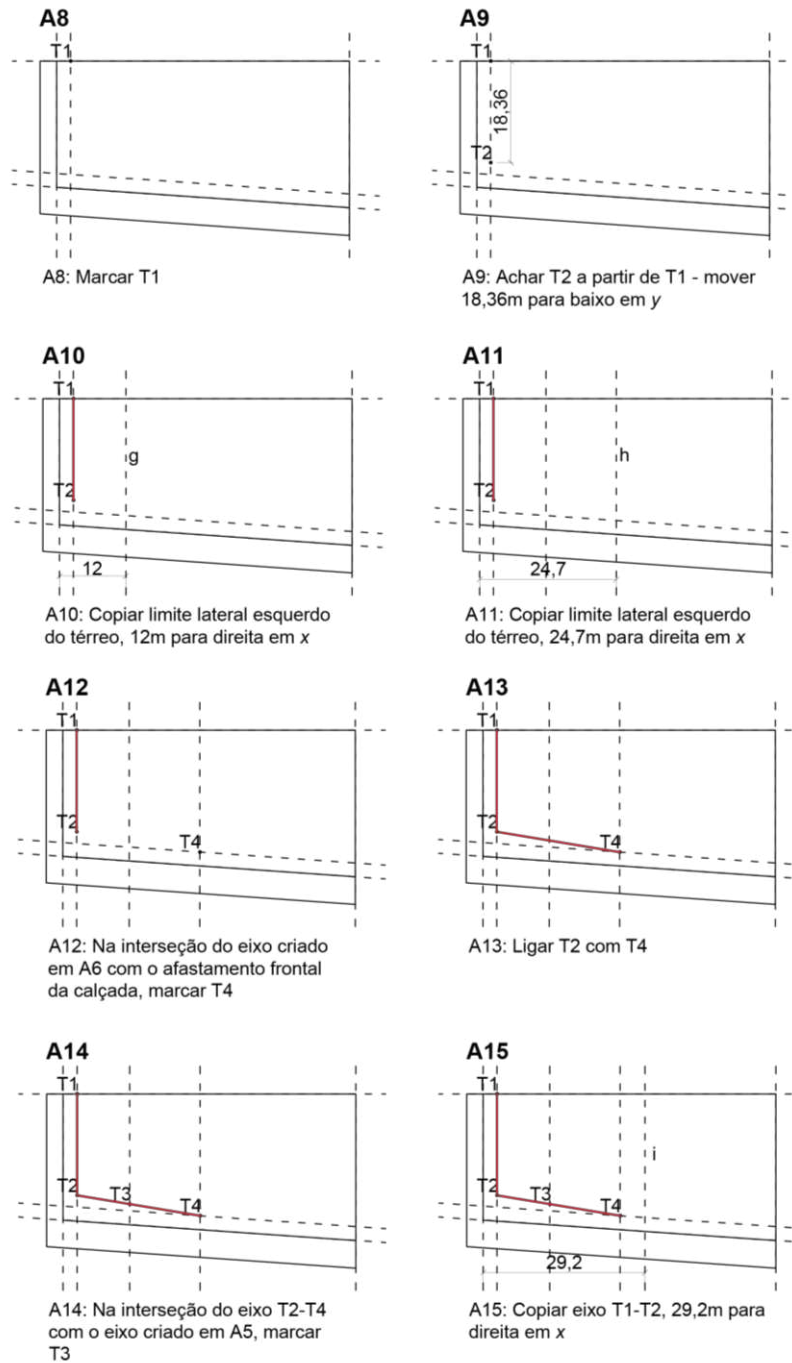


Figura 9: Ações para a geração da forma A8 a A15 (Pav. Térreo)

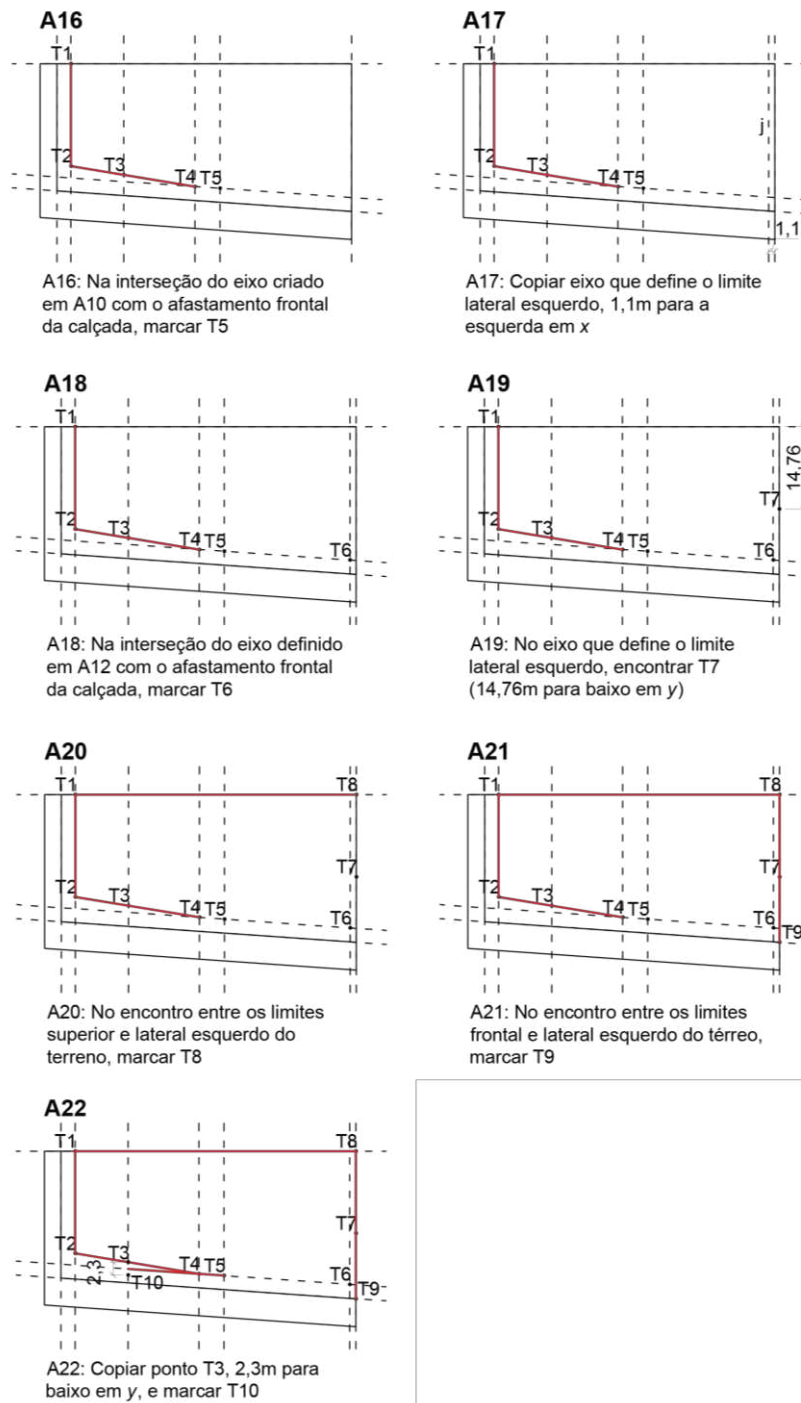


Figura 10: Ações para a geração da forma A16 a A22 (Pav. Térreo)

Após a marcação dos pontos do térreo, foram criados os pontos dos demais pavimentos, seguindo o mesmo método apresentado para o plano xy (planta); porém com a inclusão da movimentação de eixos em z (Figura 11). Os pontos localizados no pavimento térreo foram numerados sequencialmente

conforme as ações, precedidos por "T"; no pavimento Mezanino, por "M"; no primeiro pavimento, por "B"; no segundo, por C; no terceiro, por "D"; no quarto, por "E"; no quinto, por "F"; e no sexto, por "G". Essa numeração foi necessária para facilitar a identificação dos pontos para criação das superfícies e para sua posterior parametrização.

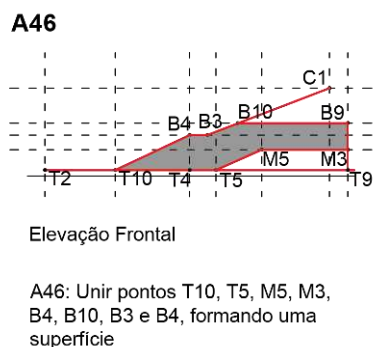


Figura 11: Criação de um plano envidraçado vertical na fachada a partir da ligação de pontos criados no térreo, mezanino e primeiro pavimento (Ação 46)

Nesta fase, muitos eixos foram criados vinculados a eixos no plano horizontal (xy) - por exemplo, cinco eixos, localizados no primeiro, segundo, terceiro, quarto e quinto pavimentos, alinhados em x , e que se movimentam juntos quando o valor de x é variado (Figura 12). Essa vinculação foi estabelecida a partir da identificação de alinhamentos encontrados no projeto original.

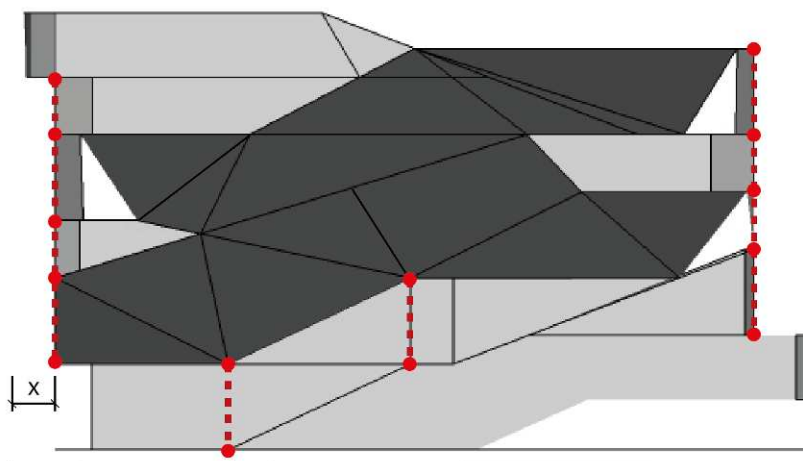


Figura 12: Alinhamentos de pontos identificados na fachada principal do projeto. Áreas em cinza claro correspondem aos planos envidraçados e áreas em cinza escuro, aos cobogós

No desenvolvimento da modelagem tridimensional do projeto, identificou-se que os lances de escadas externos e os patamares são os principais

elementos definidores da forma, e são normalmente as ligações entre eles que determinam as formas dos cobogós e planos envidraçados da fachada principal (Figura 13).

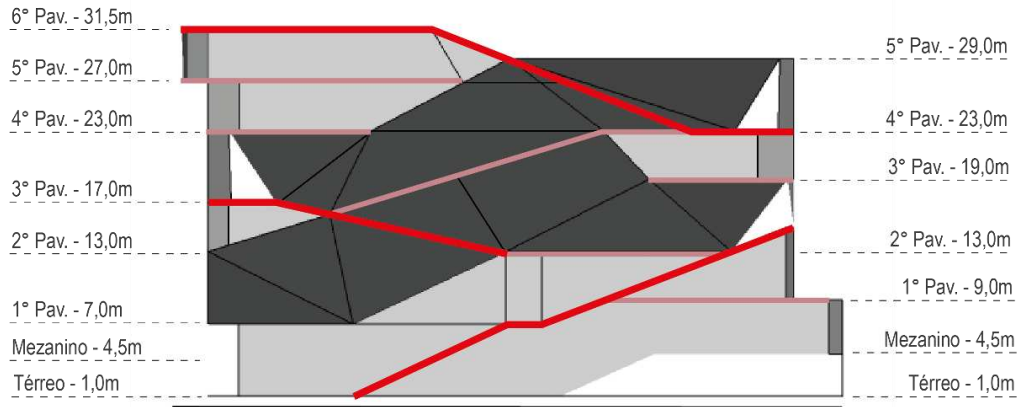


Figura 13: Linhas que definem escadas, patamares e varandas do projeto da edificação real. Linhas vermelhas encontram-se em um plano mais à frente da fachada em relação às linhas rosas

A Figura 14 apresenta a volumetria final da edificação, criada no Grasshopper. Ao todo, foram enumeradas 165 ações para geração da envoltória do museu.

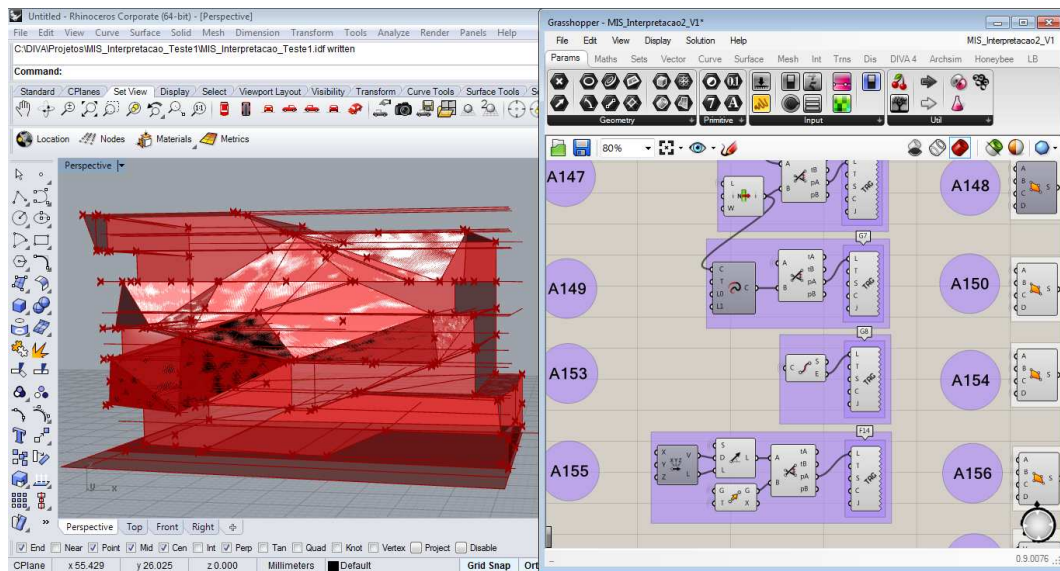


Figura 14: Volumetria do MIS modelada no Grasshopper/Rhino

2.1.2. Parametrização da forma

Com base na modelagem da geometria por meio de eixos e pontos, alguns destes elementos foram escolhidos para parametrização da fachada do MIS. Os pontos que geraram as superfícies que constituem os cobogós na

fachada principal estão identificados na Figura 15, bem como as superfícies, que constituirão os módulos fotovoltaicos. Os pontos em vermelho correspondem aos que são independentes dos eixos das escadas, e os que estão em rosa estão vinculados a estas e, portanto, não foram parametrizados - caso contrário, seria necessário um estudo do dimensionamento das escadas, e de sua relação com os pavimentos para criação de restrições à alteração da forma.

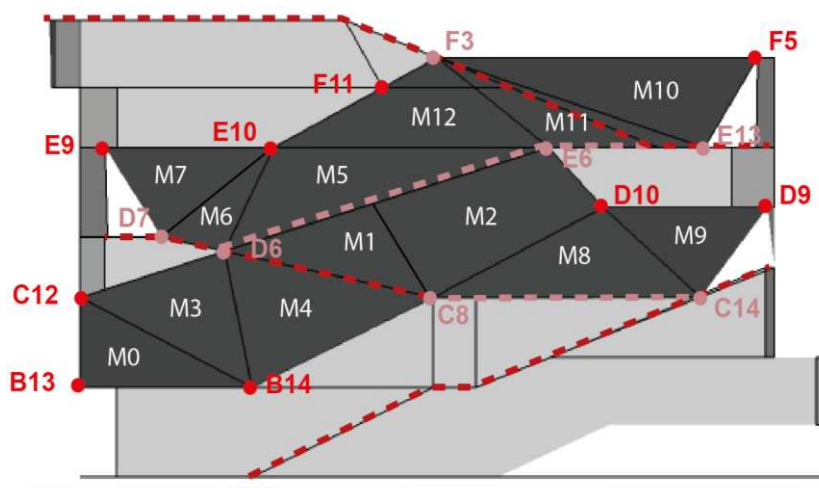


Figura 15: Pontos que geraram os cobogós na fachada principal. Em rosa, os pontos vinculados às escadas, e em vermelho, os não vinculados

Dos pontos vermelhos, alguns apresentavam vínculos com os eixos definidores das escadas, patamares e varandas, como os pontos C12, E9, F11 e F5. Desta forma, a movimentação desses pontos no eixo y implicaria em alterações na largura das escadas e em soluções não viáveis em termos de dimensionamento e, portanto, optou-se por não torná-los variáveis. Sendo assim, todos os pontos que foram parametrizados possuem movimentação livre, sem interferir nas áreas de circulação da edificação. Os pontos escolhidos para variação de posição estão identificados na Figura 16 e na Tabela 1 de acordo com os eixos nos quais podem se movimentar. Os parâmetros com menor intervalo de movimentação nos eixos foram definidos como variáveis contínuas, e os que apresentam maior intervalo de movimentação (por exemplo, de 33 a 46m em x) foram criados como variáveis discretas. A criação de variáveis contínuas e discretas em número reduzido é importante para viabilizar o processo de otimização, pois um elevado número de variáveis e de intervalos implica em um grande custo computacional. Os valores apresentados na Tabela 1 correspondem à posição do ponto em relação à origem definida para geração da forma (Figuras 17 e 18).

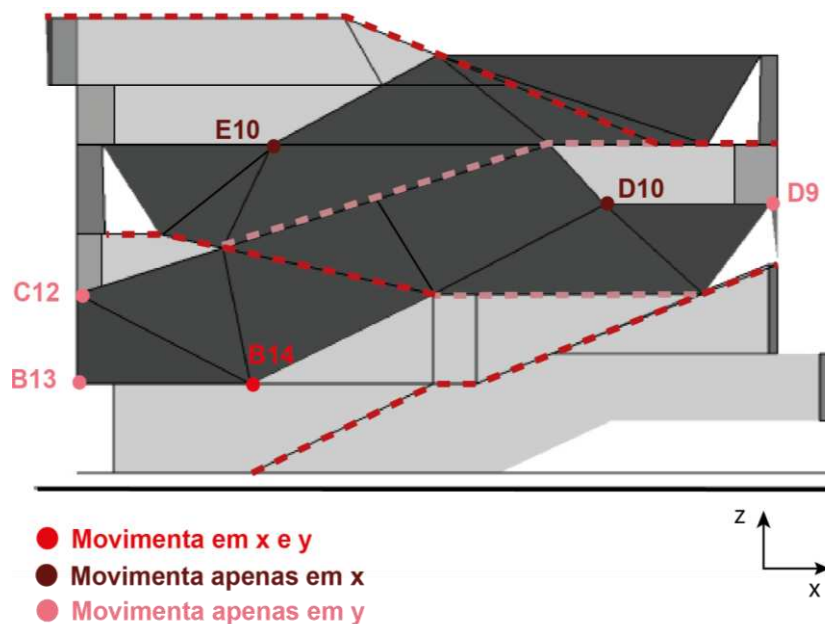


Figura 16: Localização dos pontos parametrizados na fachada de acordo com sua possibilidade de movimentação

Tabela 1: Parâmetros criados, posição de referência no eixo em relação ao ponto de origem da modelagem (Figura 6) e intervalo de variação de acordo com o eixo estabelecido para movimentação

Parâmetros	Valor original (m)	Intervalo de variação (m)	
B13_y	-22,8	-27	-18
B14_x	12,0	10,0	14,0
B14_y	-23	-28	-21
D9_y	-24,0	-24,7	-22,0
D10_x	40	33	46
E10_x	16,5	13,0	18,0

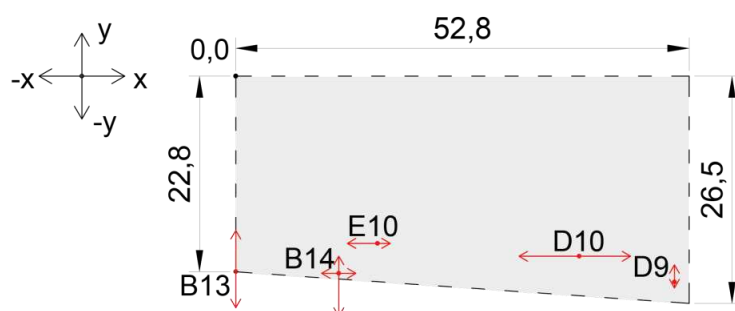


Figura 17: Pontos e respectivos eixos e intervalos de movimentação em planta (plano xy)

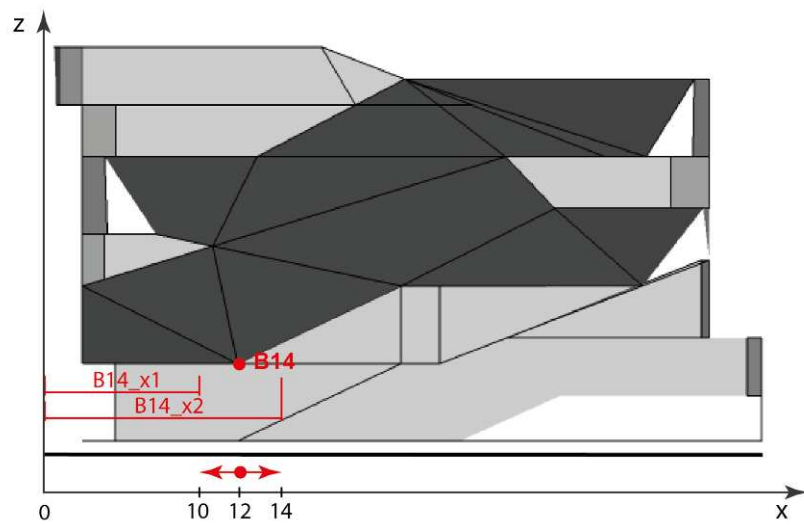


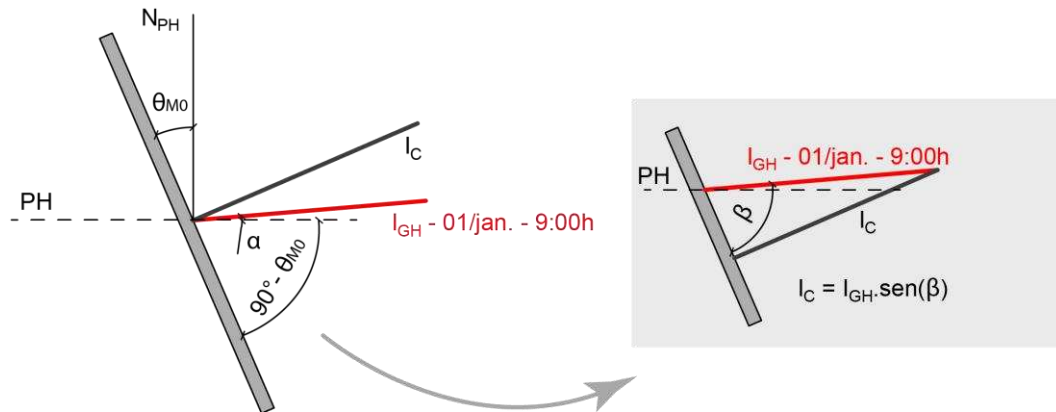
Figura 18: Movimentação do ponto B14 no eixo x em elevação

2.1.3. Preparação do modelo para otimização baseada em simulação

Após a modelagem da forma da fachada e a definição dos parâmetros, as superfícies que constituem os cobogós no projeto original foram conectadas ao *plug-in* Archsim como módulos fotovoltaicos, e as demais superfícies (áreas envidraçadas, de concreto e de alvenaria) que compõem a envoltória foram conectadas como elementos de sombreamento do entorno.

Foi definido que os módulos fotovoltaicos seriam customizados, com 80% de aproveitamento da área das superfícies dos cobogós por células fotovoltaicas. Foi definida uma eficiência de 15% para os módulos. O Archsim possui um único modelo para cálculo do sistema fotovoltaico (modelo simples), que considera a sua eficiência e o percentual da área das superfícies de entrada que receberão módulos fotovoltaicos. Como a potência dos módulos não é requerida como dado de entrada, foi realizado um cálculo para validação dos dados de energia gerada extraídos pelo Archsim.

A partir dos dados de radiação global horizontal (I_{GH}) e altura solar (α) fornecidos pelo arquivo climático, foi calculada a radiação horária incidente (I_C) no módulo fotovoltaico M_0 , que possui inclinação (θ_{M_0}) de $23,4^\circ$ com o plano vertical da fachada (Figura 19).



Sendo,

PH - Plano Horizontal

N_{PH} - Normal ao plano horizontal

I_{GH} - Radiação Global Horizontal horária (kWh/m^2)

I_C - Radiação horária calculada (kWh/m^2)

θ_{M0} - Inclinação do módulo $M0$

α - altura solar horária

$\beta = (90^\circ - \theta_{M0}) + \alpha$

Figura 19: Esquema de cálculo da radiação solar incidente no módulo $M0$ para o dia 1 de janeiro às 9:00h

A equação I_C (Eq. 1) foi aplicada para todas as horas do período de simulação (22 de junho a 22 de dezembro) com base no arquivo climático para obtenção da radiação solar incidente no plano inclinado do módulo. O I_C foi então utilizado para cálculo da potência do módulo fotovoltaico (P) (Eq. 2) que, por sua vez, foi utilizado para cálculo da geração de energia horária (E) (Eq. 3) do módulo fotovoltaico ao longo desse período, extraído e adaptado de Salamoni, Knobb e Ruther (2003).

$$I_C = I_{GH} \times \text{sen } \beta \quad \text{Eq. 1}$$

$$P = A_M \times \%Cel_M \times Eff_M \quad \text{Eq. 2}$$

$$E = Eff_i \times P \times I_C \quad \text{Eq. 3}$$

Sendo,

I_C - Radiação horária calculada (kWh/m^2);

I_{GH} - Radiação global horizontal horária (kWh/m^2);

β - Ângulo obtido a partir da inclinação do módulo e altura solar horária (Figura 22);

P - Potência de pico do módulo fotovoltaico (kW);

A_M - Área do módulo fotovoltaico (m^2);

$\%C_M$ - percentual da área do módulo coberta por células fotovoltaicas (0,80);

Eff_M - Eficiência do módulo fotovoltaico (0,15);

E - Energia horária gerada pelo módulo (kWh);

Eff_i - Eficiência do inversor (0,90)

A quantidade de energia gerada calculada foi então comparada com os dados de energia gerada para o módulo M0, extraídos do Archsim. Os resultados são apresentados no tópico 3.2.

Na simulação no EnergyPlus, tendo por base o modelo de cálculo da distribuição solar do EnergyPlus, definido como "*Full Exterior with Reflections*", o modelo geométrico de entrada e o arquivo climático com os dados de radiação, o programa, acionado pelo Archsim, calcula a quantidade de energia produzida pelo sistema fotovoltaico. O modelo simples apresenta limitações para o cálculo da energia produzida real, pois não considera a interação entre variáveis climáticas locais, tais como a temperatura do ar, a radiação e a ventilação, que interferem na temperatura operativa da célula fotovoltaica e, conseqüentemente, na quantidade de energia produzida. Porém, para esse processo de otimização da forma, no qual busca-se encontrar um partido projetual entre diversas soluções candidatas, o modelo simples é adequado por levar menos tempo para a realização da simulação de cada solução criada pelo motor de otimização com relação aos demais modelos de cálculo de sistemas fotovoltaicos do EnergyPlus (ENERGY PLUS, 2014). Além disso, é o modelo recomendado pelo EnergyPlus para análises de projetos em fases iniciais (ENERGY PLUS, 2014), que leva em consideração a geometria total da edificação para o cálculo da radiação incidente, a trajetória solar, e sombreamentos e reflexões causados pelo entorno. O modelo de cálculo de distribuição da radiação solar *Exterior with*

Reflections computa não apenas a radiação direta incidente nos módulos, mas também a que é captada e refletida pelas superfícies que compõem a envoltória da edificação (superfícies de vedação opacas e envidraçadas e escadas externas). O albedo utilizado para a edificação foi 0,2, padrão do Archsim/EnergyPlus. A edificação foi modelada na condição isolada, de modo que as soluções obtidas representem apenas o impacto da forma da fachada na geração de energia do sistema fotovoltaico.

A orientação solar definida para a fachada principal da edificação foi a norte, e o período considerado para o cálculo da geração de energia dos módulos fotovoltaicos foi de seis meses (22 de junho a 22 de dezembro). O período foi escolhido tendo-se em vista buscar uma diminuição do tempo de simulação de cada solução, considerando-se que a trajetória solar se repete no período seguinte - mesmo que as condições de nebulosidade sejam distintas, a área e inclinação dos módulos será dada pela posição do sol. Um reduzido tempo de simulação por solução é desejável devido à capacidade do Rhinoceros/Grasshopper/Octopus em armazenar as soluções criadas a medida que a otimização avança nas buscas, como identificado por Santana (2016). Além disso, a capacidade de processamento e a interação entre os programas e o computador (uso dos núcleos) influencia no tempo despendido na otimização (SANTANA, 2016). Uma vez que se trata de um estudo de otimização de um partido volumétrico para a fachada frontal, ideal para ser aplicado em fases iniciais de projeto, o modelo de cálculo da geração de energia empregado pelo EnergyPlus e a otimização com base na trajetória solar foram considerados satisfatórios para obtenção das soluções formais para análise nessa etapa de projeto. O arquivo climático utilizado para os cálculos foi o TRY (1963 a 2005) do Rio de Janeiro-RJ, disponibilizado na *web* pelo LabEEE.

A Figura 20 apresenta os dados de radiação média mensais para o arquivo climático empregado, com destaque para o período de análise. Percebe-se que a radiação difusa apresenta um perfil semelhante para os meses entre janeiro e junho e entre junho e dezembro. A radiação direta apresenta diferenças, porém, como os resultados de energia gerada não serão comparados com o consumo de energia, e a posição dos módulos fotovoltaicos (volumetria da edificação) é gerada principalmente em função da posição solar,

os seis meses de análise foram considerados satisfatórios para condução da otimização.

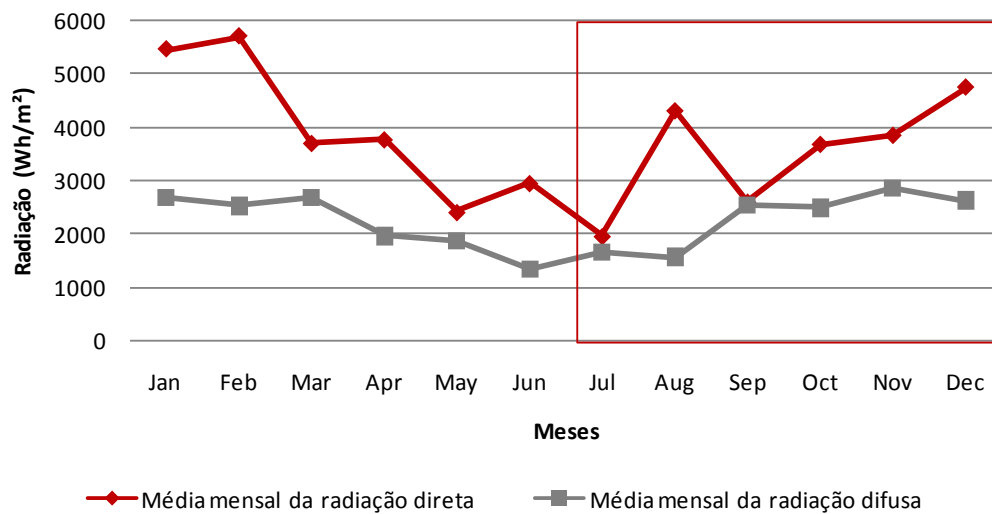


Figura 20: Média mensal da radiação direta e da radiação difusa diária do arquivo climático empregado

Para a condução da otimização baseada em simulação, foi criada uma função objetivo: energia elétrica total produzida pelo sistema fotovoltaico ao longo do período de análise, e adicionada uma segunda função objetivo para garantir uma busca global pelo espaço de soluções: diversidade de parâmetros. Este segundo objetivo é importante para garantir que o algoritmo não se prenda a uma solução, e então comece a realizar uma busca local, deixando de explorar todo o espaço de soluções possíveis. Como o objetivo da otimização é buscar um valor máximo para a geração de energia, e o funcionamento do algoritmo é baseado na teoria da evolução das espécies (EVINS, 2013), a tendência é que, a medida que o algoritmo avança nas buscas, ele descarte as soluções de pior desempenho e mantenha apenas as que possuem maior geração de energia. Com isso, soluções que apresentam baixa geração de energia, mas que apresentam parâmetros que possuem um impacto positivo na função objetivo, poderiam ser descartadas, e seu potencial, desperdiçado. Isso faz com que o algoritmo tenda a realizar uma busca local por soluções, ou seja, se prenda a um ponto específico do espaço de soluções possíveis, buscando melhorar as soluções próximas daquele espaço e ignorando outras soluções candidatas que poderiam apresentar valores potenciais para algum parâmetro. A "diversidade de parâmetros" presente no Octopus, em contrapartida, busca impedir que esse

fenômeno aconteça ao tentar manter uma diversidade de parâmetros entre as soluções criadas (VIERLINGER, 2015), promovendo uma busca global.

2.2. Execução da otimização

A otimização foi conduzida em um computador Intel Core i5 3.10 GHz com 4 GB de RAM. As simulações para o cálculo da energia gerada pelos módulos fotovoltaicos na fachada principal do MIS foram conduzidas pelo Archsim, que conecta a geometria modelada no Grasshopper/Rhinoceros com o EnergyPlus. O Octopus, por sua vez, foi conectado aos parâmetros e ao objetivo da otimização, sendo então a ferramenta responsável pela geração das soluções por meio da combinação entre os parâmetros. O algoritmo genético SPEA-2, do Octopus, foi configurado para criar uma geração inicial de 100 soluções, cada uma levando um tempo médio de 15 segundos para simulação no EnergyPlus. Com base no princípio dos algoritmos genéticos, o SPEA-2 cria dois conjuntos de 100 soluções cada, que são todas simuladas no EnergyPlus (FONSECA *et al.*, 2017). Essas soluções iniciais são criadas de forma aleatória, combinando-se os parâmetros definidos pelo usuário da ferramenta (ZITZLER; LAUMANN; THIELE, 2001), e seu agrupamento é chamado de geração inicial. Cada solução simulada recebe então um valor *fitness*, que corresponde ao seu desempenho comparado às demais soluções. Esse desempenho é calculado de acordo com conceitos de dominância. Diz-se que uma solução é não dominada se ela não for pior que nenhuma outra solução encontrada para todas as funções objetivo e for melhor em pelo menos uma das funções (WANG; ZMEUREANU; RIVARD, 2005). Todas as soluções não dominadas compõem o que é chamado de *Pareto Front*.

No caso do SPEA-2, o algoritmo cria a geração inicial e, simultaneamente cria um arquivo no qual são salvas as melhores soluções. De início, o algoritmo salva nesse arquivo apenas as soluções não-dominadas; porém, se o tamanho do arquivo for superior ao tamanho do conjunto de soluções não-dominadas, o algoritmo então seleciona as melhores soluções dominadas e preenche o espaço livre do arquivo com essas soluções (ZITZLER; LAUMANN; THIELE, 2001). Se, ao contrário, o tamanho do conjunto de soluções não-dominadas for superior ao tamanho do arquivo, o algoritmo aplica um operador de truncamento para selecionar soluções que serão removidas do arquivo. Se o critério de

término da otimização for satisfeito, as soluções criadas são então disponibilizadas para análise. Se não, o algoritmo aplica o operador de seleção dos pares de soluções que serão combinados: são aplicados processos de *crossover* e mutação para a geração de novas soluções (ZITZLER; LAUMANN; THIELE, 2001). No *crossover*, os parâmetros de cada par de soluções (chamadas de pais) são combinados para gerar a prole de soluções; na mutação é aplicada uma alteração aleatória dos parâmetros, gerando assim uma diversificação na nova geração de soluções. Novamente são calculados os valores *fitness* de cada uma das soluções para a seleção das melhores para "sobreviverem" para a próxima geração. Esse processo ocorre ininterruptamente até que seja estabelecido um término para o processo de otimização. O critério de término estabelecido para este projeto foi a convergência dos parâmetros.

Além do critério de término da otimização e do tamanho da população, o Octopus permite ao usuário definir alguns parâmetros que impactam no tempo de convergência e na diversidade de soluções: a seleção e a taxa do elitismo (soluções de bom desempenho de gerações anteriores são migradas para a próxima sem passarem por nenhuma alteração); a probabilidade de mutação; a taxa de mutação e de *crossover* e o tipo de operador de mutação. A taxa de mutação foi aplicada conforme Magnier (2008): $1/\text{número de variáveis}$, e o tipo de operador de mutação foi o *Polynomial*, utilizado pelo mesmo autor. Os demais parâmetros foram mantidos de acordo com valores padrão do Octopus, e entende-se que a sua escolha requer estudos mais avançados na área de otimização computacional, envolvendo a exploração do impacto da complexidade do modelo computacional e do número e tipo de variáveis no desempenho da otimização.

O processo de otimização do modelo durou 69,5 horas e foi monitorado por meio dos gráficos apresentados pelo Octopus (Figuras 21 e 22). Observa-se, pela Figura 21, que as *polylines*, que indicam os parâmetros para cada solução gerada pelo Octopus, encontram-se emaranhadas. Já na Figura 22 existe uma sobreposição das *polylines*, indicando a convergência dos parâmetros para as soluções criadas.

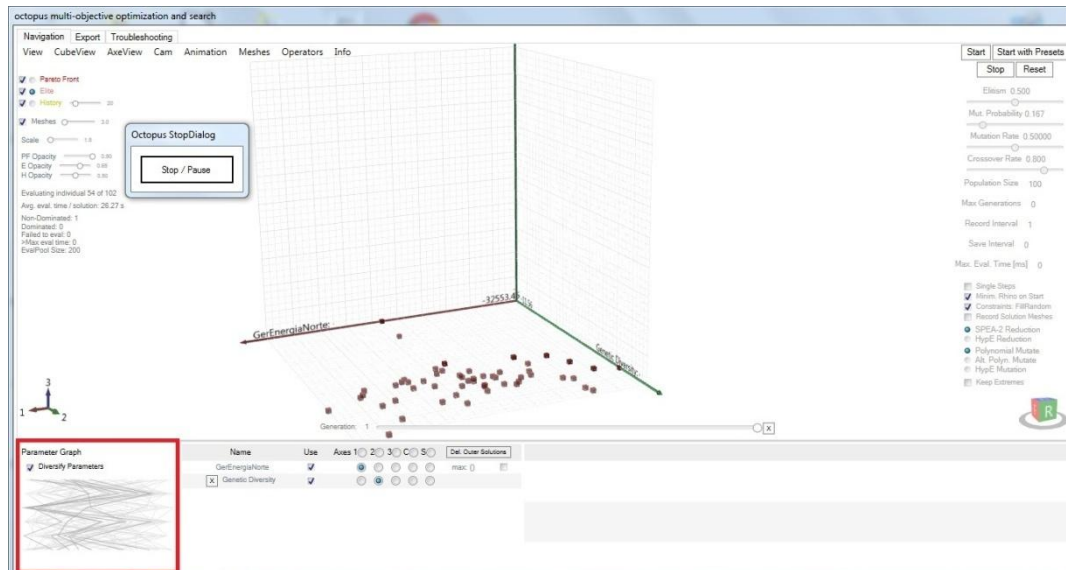


Figura 21: Geração 1 - Gráfico de convergência de parâmetros em destaque

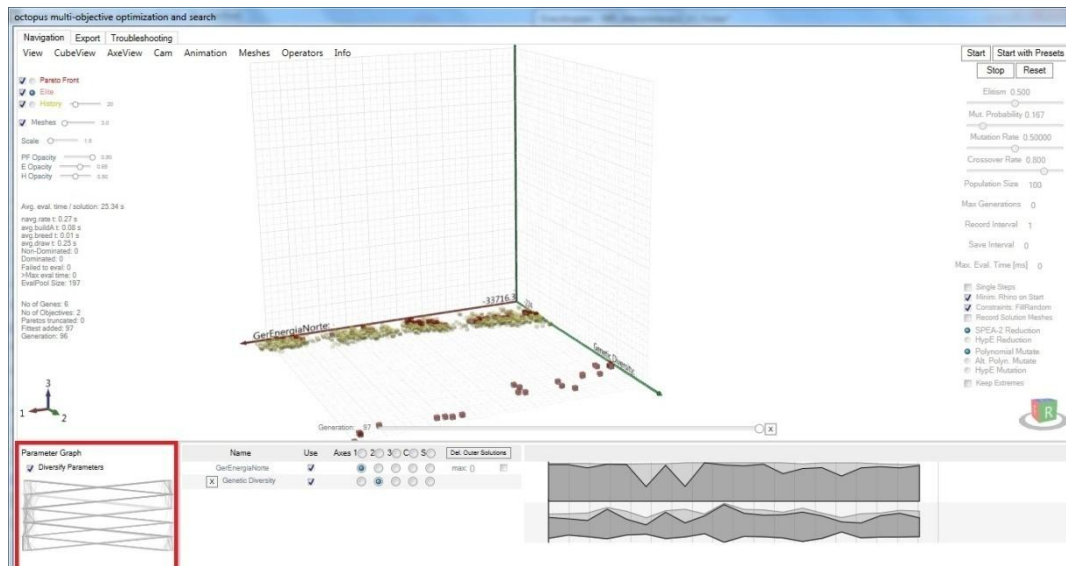


Figura 22: Geração 96 - Gráfico de convergência de parâmetros em destaque

O processo de otimização foi interrompido na geração 96, totalizando uma criação de 18.558 soluções.

2.3. Tratamento e análise dos resultados

Após interrompido o processo de otimização, foram extraídos os resultados das funções objetivo e dos parâmetros do Octopus por geração. O conjunto de todas as soluções criadas foi utilizado para análise do processo de convergência: buscou-se identificar em qual geração o SPEA-2 começou a convergir em relação às funções objetivo. Foram também extraídos os arquivos

de soluções de *Pareto Front* do Octopus, organizados por gerações. Desses arquivos foram extraídas as dez gerações iniciais e as dez gerações finais para análise da convergência das soluções de Pareto e identificação das soluções de melhor e pior desempenho. Com base nesses dados de saída do Octopus, foram selecionadas as dez melhores e dez piores soluções para geração de energia, que, por sua vez, foram recriadas para identificação dos parâmetros mais impactantes no desempenho. Os parâmetros de impacto analisados foram área dos módulos fotovoltaicos na fachada e sua inclinação. Foram também identificados os módulos que mais contribuíram para a geração de energia e a sua relação com a volumetria final da fachada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Modelo Original

A Figura 23 e a Tabela 2 apresentam a relação entre os módulos fotovoltaicos identificados na fachada principal do museu e suas respectivas áreas, inclinação e produção de energia para o caso base (Modelo original, não otimizado). Ainda na Figura 23, os módulos foram classificados conforme sua inclinação: positiva, negativa ou módulo vertical. Essa classificação corresponde ao indicado na Figura 24: se a superfície do módulo for perpendicular ao plano horizontal, este é classificado como vertical; se ela for voltada para cima, a inclinação é considerada positiva; ao contrário, negativa.

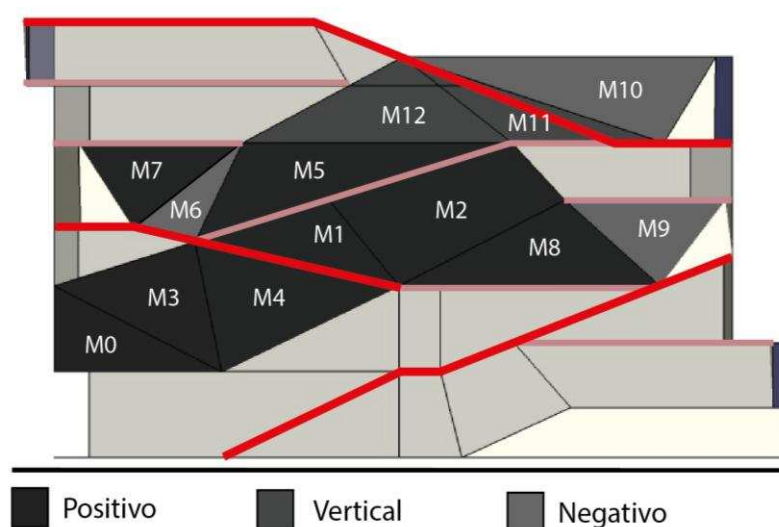


Figura 23: Identificação dos módulos na fachada principal

Tabela 2: Relação entre a área de cada módulo e sua respectiva produção de energia e inclinação para o caso base

Painel	Área* (m ²)	Produção de energia (kWh)	Inclinação** (°)
M0	39,23	2.687,75	+23,4
M1	36,64	1.544,43	+8,0
M2	84,64	2.308,39	+1,6
M3	49,85	2.494,63	+9,8
M4	64,62	2.445,56	+11,2
M5	66,97	3.044,27	+2,5
M6	17,09	756,63	-4,6
M7	35,53	1.666,79	+0,9
M8	56,17	2.593,72	+1,0
M9	36,30	1.321,24	-11,4
M10	70,95	2.544,61	-16,1
M11	32,78	1.414,90	0,0
M12	57,98	1.718,83	0,0
Todos os módulos	648,75	26.541,75	

* As áreas apresentadas se referem às superfícies na fachada principal. A área coberta por células fotovoltaicas corresponde a 80% da área de cada módulo.

** A inclinação dos módulos foi obtida com relação ao plano vertical.

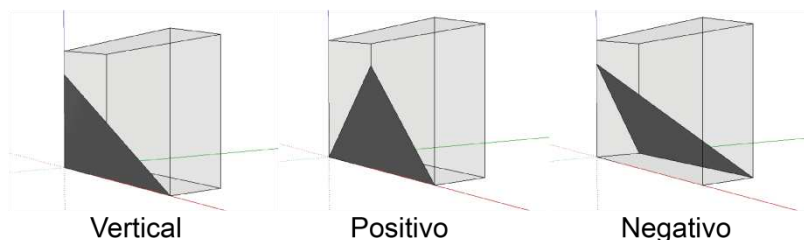


Figura 24: Classificação dos módulos quanto à sua inclinação na fachada

Percebe-se que os módulos de maior área (M2 e M10, por exemplo, com 84,64m² e 70,95m² respectivamente) tendem a gerar a maior quantidade de energia, mesmo possuindo inclinação desfavorável. Porém, módulos com áreas reduzidas (por exemplo, o M0, que possui menos da metade da área do M2) e inclinação favorável (+23,4°) tendem a gerar praticamente a mesma quantidade de energia (2.688 kWh produzidos pelo M0 e 2.308 kWh produzidos pelo M2).

3.2. Verificação dos resultados de geração de energia

Aplicando-se o método de cálculo da energia gerada, tendo por base a radiação horária incidente calculada, foi obtida uma geração de energia de 3.227,53kWh para o período de análise para o módulo fotovoltaico M0. Comparando-se esse valor com o obtido pela simulação (2.687,75kWh) observa-se que os resultados estão em acordo, uma vez que a simulação é mais complexa por considerar os efeitos de sombreamento causados pela geometria da edificação, que não foram considerados no cálculo manual.

3.3. Casos otimizados

As 18.558 soluções criadas nas 96 gerações são apresentadas na Figura 25. Percebe-se que para o modelo utilizado no processo de otimização - com seis variáveis (3 contínuas e 3 discretas) e duas funções objetivo - o algoritmo SPEA-2, do Octopus, iniciou a convergência de soluções entre as gerações 20 e 30. As soluções criadas nas 96 gerações variaram de 33.716,30 kWh a 23.698,95 kWh de energia produzida - uma melhoria de 27,0% em relação ao caso base (26.541,75 kWh) e uma piora de 10,7% em relação ao mesmo caso. A solução do caso base (não otimizado) está demarcada por uma linha vermelha, indicando o seu desempenho em relação à energia gerada.

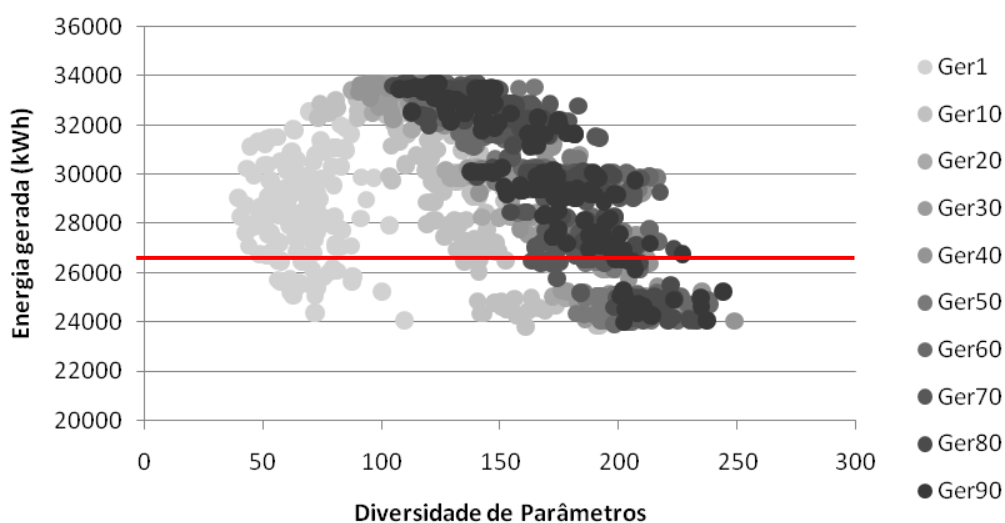


Figura 25: Desempenho de todas as soluções criadas pelo SPEA-2 a cada 10 gerações. A linha vermelha indica o desempenho do modelo baseado na geometria original

As soluções pertencentes ao arquivo de Pareto do Octopus das dez primeiras e dez últimas gerações foram identificadas de acordo com a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos e com o objetivo "Diversidade de

Parâmetros", na Figura 26. Observa-se novamente a convergência de soluções das dez últimas gerações (em vermelho) e a sua melhoria no desempenho em relação aos casos iniciais (em cinza).

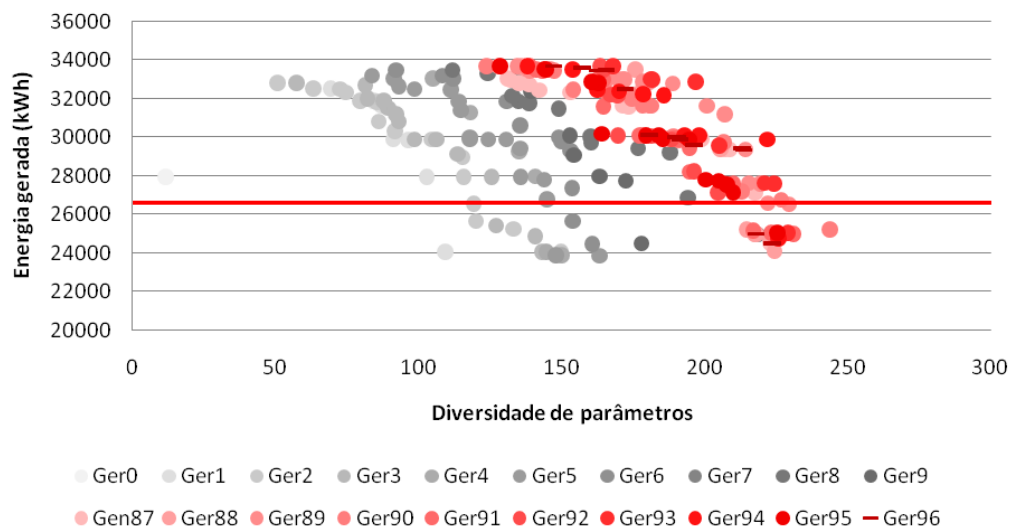


Figura 26: Desempenho das dez primeiras e das dez últimas gerações criadas pelo SPEA-2 (apenas as soluções do arquivo de *Pareto Front* do algoritmo)

Como a "Diversidade de Parâmetros" foi um objetivo de otimização criado apenas com o intuito de garantir que o algoritmo realizasse uma busca global e não se prendesse a soluções locais, ele foi descartado das análises subsequentes (Figura 27). As dez melhores e dez piores soluções de Pareto encontradas nas vinte gerações selecionadas foram numeradas (Figura 28 e Tabela 3). Identifica-se, pela figura, que a melhor solução (1, em vermelho) pertence a todas as dez últimas gerações, indicando o comportamento do algoritmo genético em manter as soluções de melhor desempenho para criação de novas soluções em gerações seguintes. Da mesma forma, percebe-se que a maior parte das soluções de melhor desempenho (em vermelho) pertencem às gerações finais, enquanto que as piores soluções (em cinza) encontram-se distribuídas em ambas as dez primeiras e dez últimas gerações. Este fato indica um comportamento específico do SPEA-2, que mantém soluções de baixo desempenho para a criação de novas gerações para garantir uma maior diversidade de parâmetros e impedir que o algoritmo se prenda a uma busca local por soluções. Relacionando-se essa figura com a Figura 26, pode-se perceber também que as soluções do arquivo de Pareto buscam preservar os

limites extremos das curvas de Pareto - o que também gera a dispersão entre os resultados de energia produzida entre as soluções selecionadas pelo algoritmo.

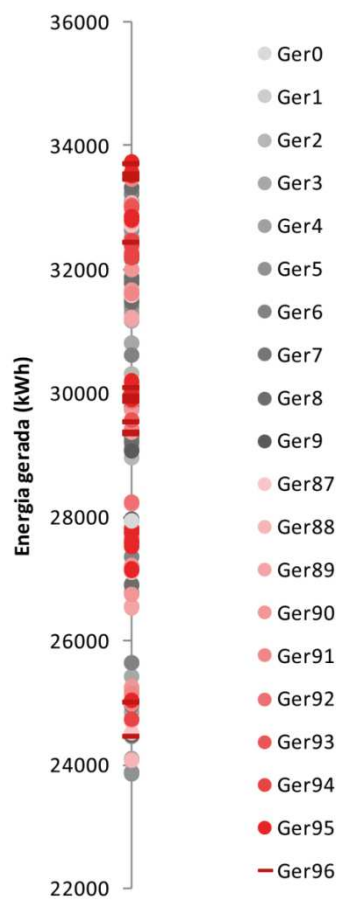


Figura 27: Energia gerada pelas soluções das dez primeiras e dez últimas gerações criadas pelo SPEA-2 (apenas as soluções do Pareto Front do algoritmo)

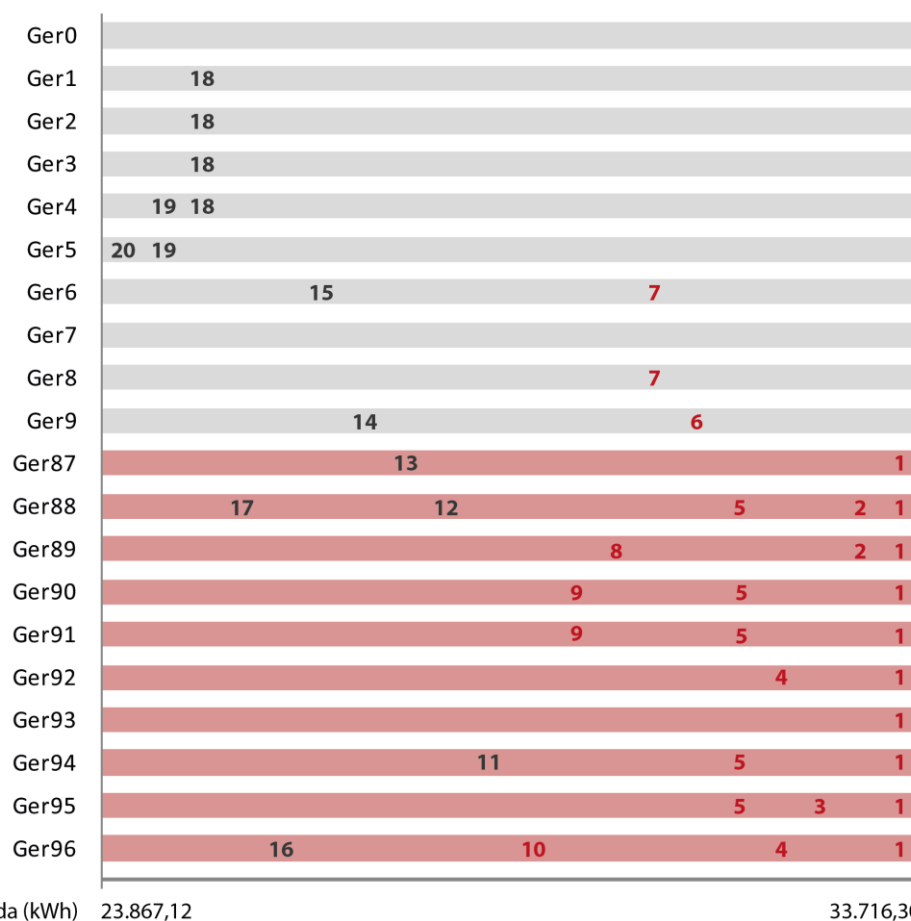


Figura 28: Dez melhores (em vermelho) e dez piores (em cinza) soluções e gerações as quais pertencem

Tabela 3: Dez melhores e dez piores soluções das dez gerações iniciais e finais e seu desempenho em relação à geração de energia

Solução	Energia gerada (kWh)	Área dos módulos (m ²)
1	33.716,30	693,94
2	33.557,50	719,97
3	33.555,72	720,00
4	33.549,51	722,54
5	33.547,99	722,38
6	33.535,80	722,22
7	33.503,37	692,12
8	33.492,35	721,30
9	33.476,01	698,44
10	33.467,05	696,93
11	24.757,75	662,14
12	24.734,33	661,66

13	24.528,48	634,59
14	24.505,16	662,96
15	24.490,05	656,77
16	24.459,89	660,12
17	24.100,63	649,40
18	24.077,74	625,54
19	23.904,74	625,98
20	23.867,12	626,66

Percebe-se ainda, pela Tabela 3, que as dez melhores soluções, em geral, apresentaram maiores áreas de módulos fotovoltaicos do que as demais, porém, apenas a comparação entre a área dos módulos e a energia produzida não é suficiente para entender os fatores de maior impacto no desempenho do sistema. A solução de maior geração de energia não corresponde à de maior área de módulos fotovoltaicos, por exemplo. Ao correlacionar a geração de energia por módulo fotovoltaico com a sua respectiva área, identifica-se que existe uma correlação entre esses parâmetros para as vinte soluções analisadas (Figura 29), porém, o coeficiente de determinação é baixo ($R^2=0,466$). Analisando-se a correlação entre a geração de energia e a inclinação dos módulos, percebe-se que o coeficiente também é baixo ($R^2=0,454$) (Figura 30), e entre a energia gerada e o produto da área e inclinação dos módulos segue o mesmo padrão, com comportamento muito semelhante à relação geração de energia X inclinação dos módulos ($R^2=0,457$). Assim, percebe-se que outros fatores da geometria impactam a geração de energia neste caso, tais como sombreamento de um módulo sobre o outro, e a relação não linear de alteração da inclinação com a área ocasionada pela própria concepção de dependência entre si dos vértices das superfícies multifacetadas.

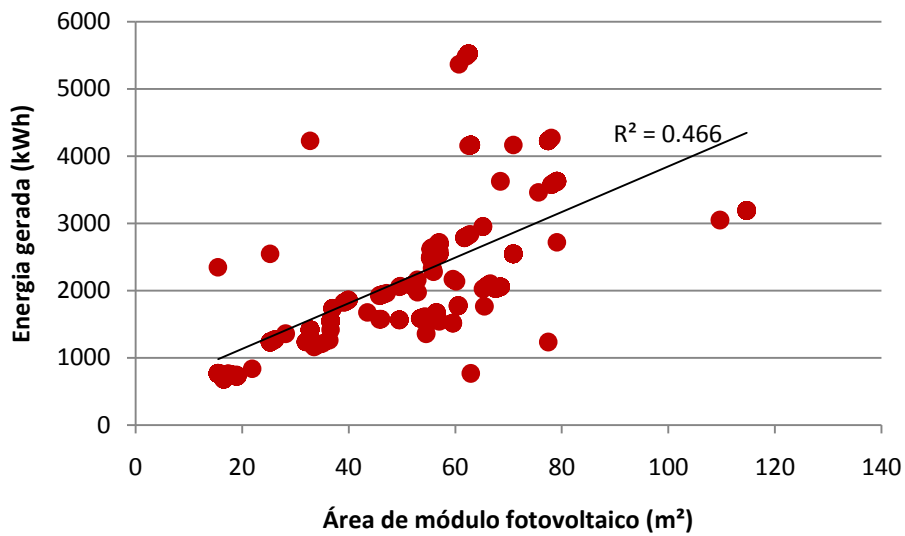


Figura 29: Área dos módulos fotovoltaicos pela energia gerada para as vinte soluções analisadas

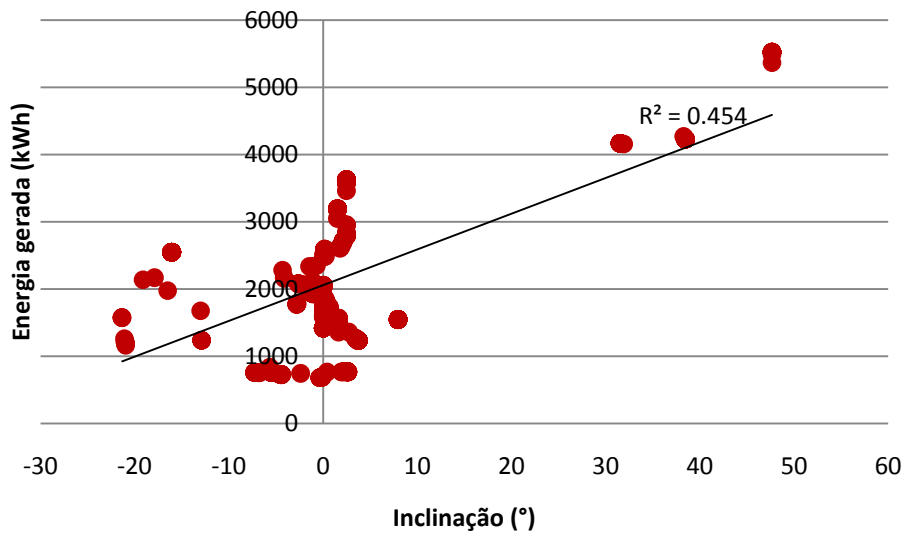


Figura 30: Inclinação dos módulos fotovoltaicos pela energia gerada para as vinte soluções analisadas

A Figura 31 apresenta os intervalos de distribuição das áreas (eixo "Área MF") para as melhores soluções (em vermelho) e piores (em cinza). Apesar de haver duas distintas concentrações nos dois extremos, observa-se a dispersão das áreas de módulos fotovoltaicos para os dois conjuntos de soluções. Outros fatores, tais como inclinação das superfícies e sombreamento causado por elementos da fachada influenciaram diretamente no desempenho das soluções. Portanto, os parâmetros utilizados na otimização foram avaliados para

identificação dos que apresentaram maior impacto no desempenho das soluções (Figura 31).

Na Figura 31, os parâmetros da otimização são apresentados nos eixos verticais. Os parâmetros com final x indicam movimentações nesse eixo, que implicam em alterações na área dos módulos fotovoltaicos. Já os parâmetros com final y correspondem aos que geram, principalmente, alteração na inclinação dos módulos. Em cada um desses, é indicado o ponto em que o módulo fotovoltaico diretamente conectado a ele encontra-se em posição vertical, e a direção a partir desse ponto em que o módulo adquire inclinação positiva ou negativa.

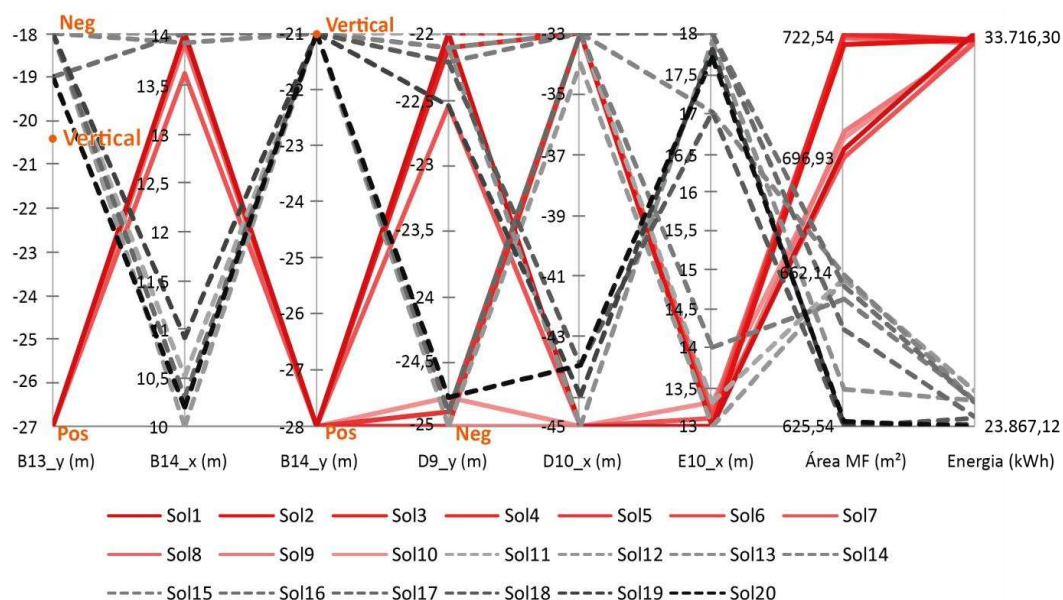


Figura 31: Desempenho das dez melhores (linha contínua) e dez piores (linha tracejada) soluções e seus respectivos parâmetros

O intervalo de variação da geração de energia das soluções analisadas de 23.867,12 kWh a 33.716,30 kWh foi de 41,3%, indicado na representação da Figura 31, que permite identificar as correlações entre o desempenho das soluções e seus parâmetros. Percebeu-se que, em geral, a inclinação apresentou uma correlação melhor que a área total dos módulos, dada pela concentração dos melhores casos vermelhos em alguns pontos de cada eixo da Figura 31, opostas à concentração das piores soluções (B13_y e B14_y). Como exemplo, o gráfico indicou uma inclinação positiva dos módulos M0, M3 e M4 para aumentar a geração de energia por meio dos parâmetros B13_y e B14_y, enquanto a condição de módulo fotovoltaico vertical ou com inclinação negativa

reduziu a quantidade de energia gerada pelos módulos (Figura 32). Porém, o parâmetro D9_y, que possibilita também alterações na volumetria quanto à inclinação do módulo M9, não apresentou correlação direta com a energia gerada - ambas as melhores e piores soluções se distribuem nos dois extremos do intervalo de variação do parâmetro (Figura 31). Independentemente de sua movimentação, o módulo M9 apresenta sempre inclinação negativa (Figura 32).

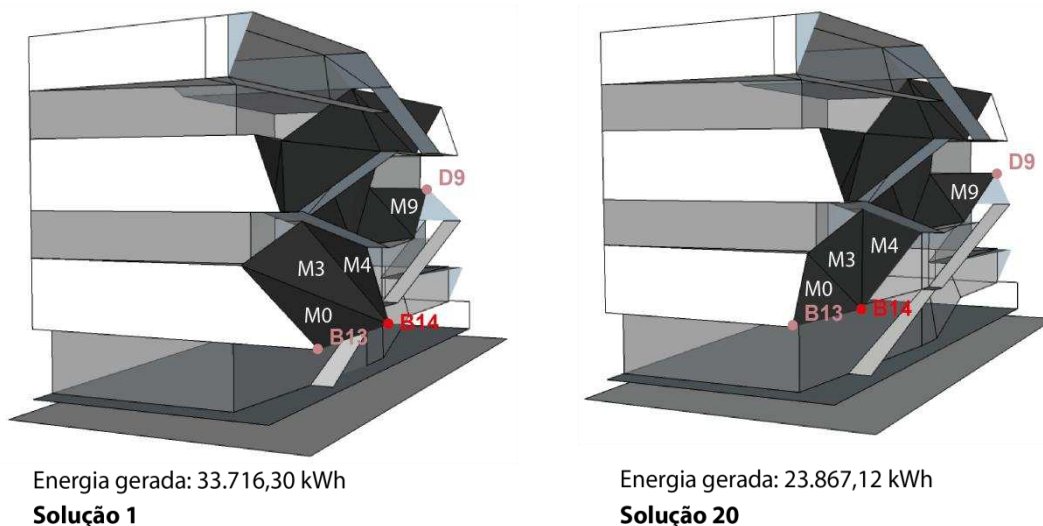


Figura 32: Parâmetros com movimentação no eixo y (B13, B14 e D9) nas soluções 1 e 20

Com relação aos parâmetros que correspondem a movimentações no eixo x (B14_x; D10_x e E10_x), responsáveis principalmente pela variação da área de módulos fotovoltaicos, também não foi identificada correlação entre eles e a energia gerada (Figura 31) - uma vez que ambas as dez melhores e dez piores soluções possuem valores dos parâmetros em ambos os extremos dos intervalos.

As Figuras 34 e 35 apresentam uma análise mais aprofundada do impacto da inclinação dos módulos fotovoltaicos. Para interpretação das figuras é necessária uma análise em paralelo da Figura 33, que apresenta os módulos fotovoltaicos da fachada que apresentaram alteração de sua inclinação durante a otimização. Apesar de os módulos 6, 7 e 8 não possuem nenhum dos vértices parametrizados como variáveis independentes, devido a conexões com os eixos criados na modelagem paramétrica, eles apresentam inclinação variável.

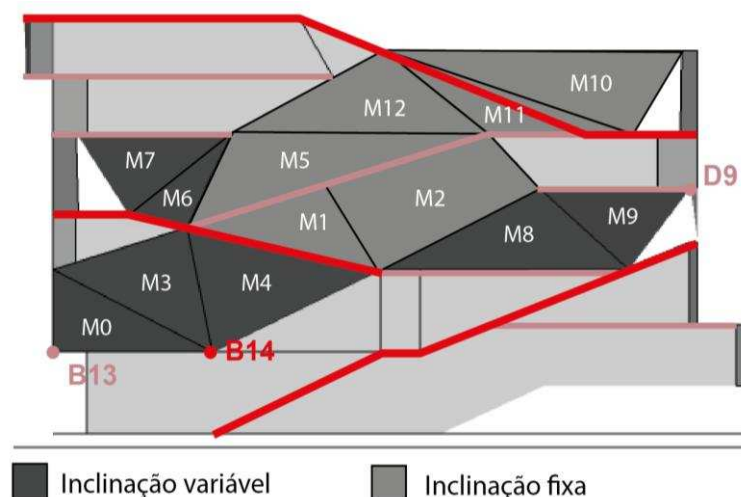


Figura 33: Inclinação dos módulos fotovoltaicos da fachada principal

Na Figura 34 foram indicadas as dez melhores soluções, com seus respectivos módulos fotovoltaicos indicados no eixo x e as respectivas inclinações no eixo y . Observa-se que os módulos 0, 3, 4, 6, 7 e 8, apesar de poderem apresentar variação de inclinação, apresentam, para todas as soluções (1 a 10), inclinação semelhante, identificada pela sobreposição dos pontos que representam as respectivas soluções para cada módulo. Esses módulos tenderam sempre a manter o ângulo máximo de inclinação possível de acordo com os parâmetros criados. Já o módulo 9 apresenta uma dispersão maior entre as melhores soluções quanto à inclinação: observa-se que as soluções 8, 9 e 10, que apresentaram menor geração de energia, possuem inclinação negativa para o módulo 9. Com isso, pode-se concluir que dentre todos os módulos que apresentaram variações de sua inclinação, o algoritmo de otimização interpretou que a inclinação do módulo 9 (sempre negativa ou vertical) possuiu o menor impacto na geração de energia. Além disso, observa-se que, em concordância com a Figura 31, a inclinação dos módulos apresenta um impacto maior do que a sua área sobre a geração de energia, e que o parâmetro $D9_y$ apresenta pouca influência no desempenho.

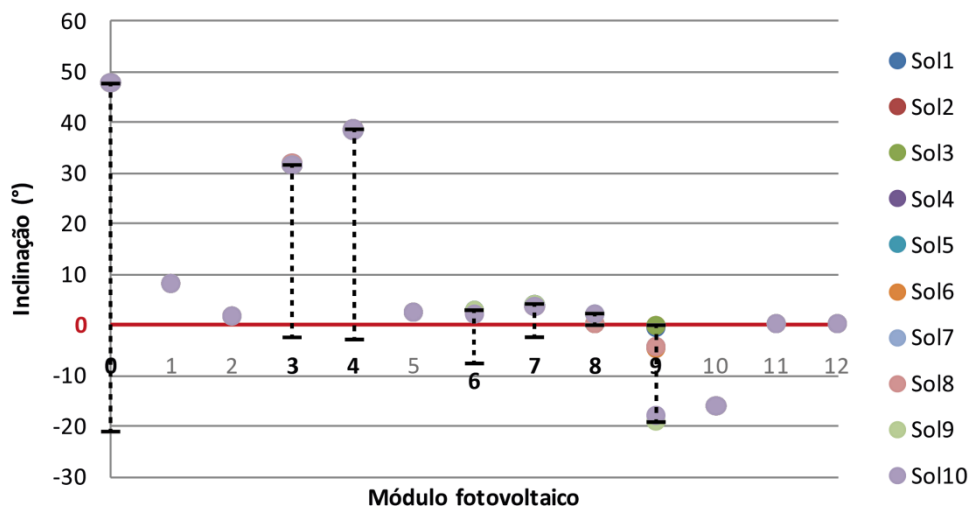


Figura 34: Inclinação dos módulos fotovoltaicos para as dez soluções de maior geração de energia

Em negrito são destacados os módulos que poderiam apresentar variação de inclinação na modelagem e seus respectivos intervalos de variação

A Figura 35 apresenta a inclinação dos módulos para as soluções de menor geração de energia. Observa-se que a inclinação de todos os módulos tende a ser negativa ou vertical - opostas à inclinação das melhores soluções.

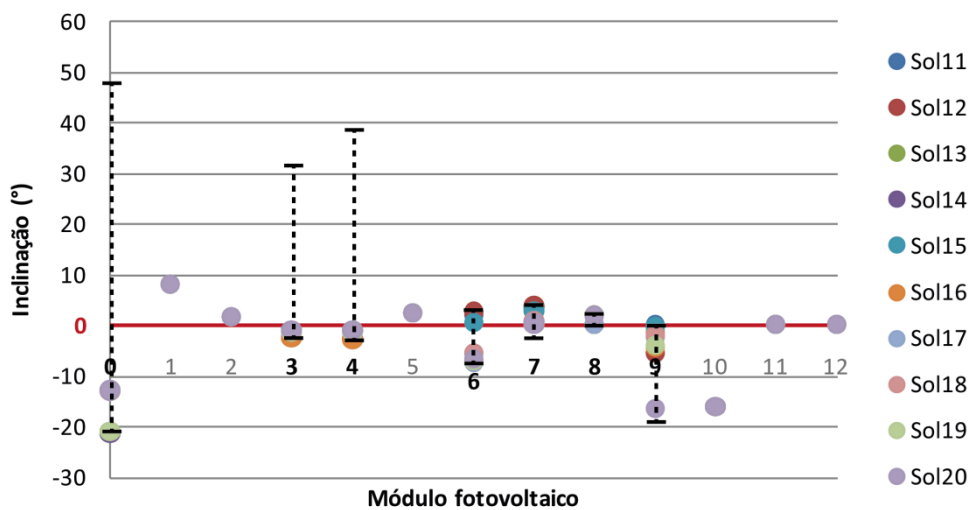


Figura 35: Inclinação dos módulos fotovoltaicos para as dez soluções de menor geração de energia

3.3. Limitações do processo de modelagem do MIS e otimização

A modelagem algorítmica do projeto do MIS proporcionou a criação de um modelo 3D bastante similar ao projeto original da edificação. No entanto, o processo criado para a modelagem resultou em uma grande dependência entre

as faces da edificação e os eixos das escadas e patamares. Para contornar essas dependências seria necessário realizar uma análise mais aprofundada do impacto da alteração de um ponto na fachada sobre a funcionalidade e acessibilidade dos elementos de circulação conectados a eles, anteriormente à modelagem. Além disso, a tentativa de aproximar a modelagem da edificação parametrizada do projeto original ocasionou uma complexidade na alteração da geometria base do MIS - o que resultou em um número reduzido de parâmetros a serem analisados. No entanto, esta redução facilitou a análise das relações entre áreas e inclinação dos módulos com a energia gerada pelo sistema fotovoltaico. Para trabalhos futuros, sugere-se iniciar o estudo com a modelagem de uma forma mais simplificada e que possibilite a criação de mais parâmetros a serem otimizados. Além disso, sugere-se que o método seja empregado em etapas mais iniciais do projeto, quando a geometria da edificação ainda não foi completamente definida.

4. CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido propôs um método de modelagem algorítmica da forma para edificações de geometrias complexas para parametrização e otimização. A pesquisa constituiu-se em um avanço em relação à parametrização da forma de edificações compostas pela junção de blocos (cubos), e o método proposto atendeu ao objetivo de gerar uma forma similar à do projeto real do Museu da Imagem e do Som. No entanto, um dos aspectos negativos da modelagem do MIS apresentada é que, ao se tentar ser fiel à geometria original da fachada, a criação de variáveis se tornou limitada e, portanto, a parametrização da forma se tornou muito restritiva. Por outro lado, a criação de poucas variáveis independentes (sentidos de movimentação de alguns pontos na fachada nos eixos x e y) tornou possível a análise de relações entre a área de módulos fotovoltaicos e sua inclinação com a geração de energia do sistema. Identificou-se que existe baixa correlação entre geração de energia e a área dos módulos fotovoltaicos para o modelo investigado, e que a inclinação dos módulos fotovoltaicos interfere mais na energia gerada do que a área de módulos. Esse fato possui relação com a dependência de mobilidade dos vértices parametrizados, e indica que a sensibilidade no desempenho deve ser conhecida pelo projetista, visto que o próprio método de parametrização irá direcionar as soluções possíveis.

Com relação à modelagem da forma da fachada, verificou-se que para a criação das variáveis, deve ser feito um estudo detalhado para elaboração de restrições à geração da forma (por exemplo, acessibilidade e funcionalidade das escadas e elementos de circulação). Este trabalho mostrou a importância do pré-processamento para eliminação de erros antes da execução do processo de otimização final, tais como interferências da variação de um parâmetro sobre outro.

O processo de otimização mostrou-se viável para a forma do museu e o cálculo de geração de energia pelos módulos fotovoltaicos por meio da simulação no Archsim/EnergyPlus - sendo o tempo médio de simulação de cada solução de 15 segundos. No entanto, o modelo de sistema fotovoltaico utilizado apresenta-se limitado para avaliação de soluções finais, em que fatores como o clima local e a tecnologia dos módulos fotovoltaicos e do sistema afetam o seu desempenho. Sendo assim, este método de parametrização e otimização da forma de fachadas para avaliação de seu desempenho para geração de energia apresenta-se interessante e viável para estágios iniciais de projeto, em que a forma da edificação se apresenta em processo de criação.

5. REFERÊNCIAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução normativa N° 482, de 17 de abril de 2012.

ARCOWEB. Diller Scofidio + Renfro: Museu da Imagem e do Som, Rio de Janeiro - Identidade carioca terá novo templo em Copacabana. Projeto Design. Disponível em: <<https://www.arcoweb.com.br/projetodesign/arquitetura/diller-scofidio-renfro-museu-rio-16-03-2011>>. Acesso em 02 fev. 2018.

ASL, M. R.; BERGIN, M.; MENTER, A.; YAN, W. BIM-based parametric building energy performance multi-objective optimization. In: Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe conference 32, Vol. 2, **Anais...** Newcastle upon Tyne: eCAADe 32, 2014, p. 445-464.

AUTODESK. Open source graphical programming for design. Disponível em: <<http://dynamobim.org/>>. Acesso em 29 jan. 2018.

CALDERA, S.; SILVA, G.; LOYOLA, M. Uso de herramientas paramétricas de optimización evolutiva y simulación energética en el diseño basado en performance. In: XVII Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics, **Anais...** Valparaíso: SIGraDi, 2013.

CARTANA, R. P.; PEREIRA, F. O. R. Limitações e oportunidades para bioclimatologia aplicada aos projetos arquitetônicos desenvolvidos no mercado

da construção civil. In: IX Encontro Nacional e V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, **Anais...**Ouro Preto: IX ENCAC; V ELACAC, 2007, p. 320-328.

CRONEMBERGER, J., CAAMAÑO-MARTÍN, E.; SÁNCHEZ, S. V. Assessing the solar irradiation potential for solar photovoltaic applications in buildings at low latitudes – Making the case for Brazil. **Energy and Buildings**, Elsevier, v. 55, p. 564-272, 2012

DIDONÉ, E. L.; WAGNER, A. Semi-transparent PV-windows: A study for office buildings in Brazil. **Energy and Buildings**, Elsevier, v. 67, p. 136-142, 2013.

EBC. **Ilustração do novo MIS - vista diurna**. 2015. Imagem de divulgação do projeto. Disponível em: <<http://www.ebc.com.br/cultura/2015/09/nova-sede-do-museu-da-imagem-e-do-som-sera-inaugurada-no-ano-que-vem>>. Acesso em 02 fev. 2018.

ELBELTAGI, E.; WEFKI, H.; ABDRABOU, S.; DAWOOD, M.; RAMZY, A. Visualized strategy for predicting buildings energy consumption during early design stage using parametric analysis. **Building Engineering**, Elsevier, v. 13, p. 127-136, 2017.

ELSAYED, M. S. VERMETTE, C. H. Development of optimization methodology for increased energy efficiency of PV integrated curtain wall systems. In: eSim 2016, **Anais...** Hamilton: eSim, 2016.

ENERGY PLUS Input Output Reference. The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output. Illinois: EnergyPlus, 29 set. 2014.

EVINS, R. A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 230-245, 2013.

FERRARA, M.; SIROMBO, E.; MONTI, A.; FABRIZIO, E.; FILIPPI, M. Influence of envelope design in the optimization of the energy performance of a multi-family building. **Energy Procedia**, Elsevier, v. 111, p. 308-117, 2017.

FONSECA, L. P. G.; NUNES, V. D. L.; SANTANA, L. O.; CARLO, J. C.; CÉSAR JÚNIOR, K. M. L. Otimização multiobjetivo das dimensões dos ambientes de uma residência unifamiliar baseada em simulação energética e estrutural. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 267-288, jan./mar. 2017.

GAVIRIA, L. R.; PEREIRA, F. O. R.; MIZGIER, M. O. Influência da configuração urbana na geração fotovoltaica com sistemas integrados às fachadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 7-23, out./dez. 2013.

HACHEM, C.; ATHIENITIS, A.; FAZIO, P. Evaluation of energy supply and demand in solar neighborhood. **Energy and Buildings**, Elsevier, v. 49, 335-347, 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Regulamento Técnico da Qualidade Para o Nível de Eficiência Energética Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C)**. Rio de Janeiro:

INMETRO, 2010. Portaria n.372, com alterações das portarias n. 17 (2012) e n. 299 (2013).

KÄMPF, J. H.; MONTAVON, M.; BUNYESC, J.; BOLLIGER, R.; ROBINSON, D. Optimisation of buildings' solar irradiation availability. **Solar Energy**, Elsevier, v. 84, p. 596- 603, 2010.

KÄMPF, J. H.; ROBINSON, D. Optimisation of building form for solar energy utilisation using constrained evolutionary algorithms. **Energy and Buildings**, Elsevier, v. 42, 807-814, 2010.

KONIS, K.; GAMAS, A.; KENSEK, A. Passive performance and building form: An optimization framework for early-stage design support. **Solar Energy**, Elsevier, v. 125, p. 161-179, 2016.

LAWSON, B. Route maps of the design process. In: _____. **How designers think: The design process demystified**. 4. ed. Oxford: Architectural Press, 2005. p. 31-50.

LEACH, N. Parametrics explained. **Next Generation Buildings**, v. 1, p. 33-42, 2014.

LOBACCARO, G.; CHATZICHRISTOS, S.; LEON, V. A. Solar optimization of housing development. **Energy Procedia**, Elsevier, v. 91, p. 868-875, 2016.

MAGNIER, L. **Multiobjective optimization of building design using Artificial Neural Network and Multiobjective Evolutionary Algorithms**. 2008. Dissertação (Mestrado em Applied Science - Building Engineering) - Department of Building, Civil and Environmental Engineering. Concordia University, Quebec, Canada.

MATHWORKS. Simulation and model-based design. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/simulink.html>>. Acesso em 29 jan. 2018.

MCNEEL. About Grasshopper... Disponível em: <<http://www.grasshopper3d.com/>>. Acesso em 29 jan. 2018.

NARAGENDEL, A.; LEE, J. H.; STOUFFS, R. Thermal and daylighting optimization of complex 3D faceted façade for office building. In: Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe conference 35, Vol. 2, **Anais...** Rome: eCAADe 35, 2017, p. 183-192.

NGUYEN, A. T.; REITER, S.; RIGO, P. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, Oxford, v. 113, p. 1043-1058, 2014.

O GLOBO. **Ilustração do novo MIS - vista noturna**. 2013. Imagem de divulgação do projeto. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/rio/novo-museu-tera-mirante-debrucado-sobre-praia-de-copacabana-9255365>>. Acesso em 02 fev. 2018.

OXMAN, R. Digital architecture as a challenge for design pedagogy: theory, knowledge, models and medium. **Design Studies**, v. 29, n. 02, p. 99-120, 2008.

OXMAN, R. Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. **Design Studies**, Elsevier, v. 52, p. 4-39, set. 2017.

OXMAN, R.; GU, N. Theories and models of parametric design thinking. In: Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe conference 33, Vol. 2, **Anais...** Vienna: eCAADe 33, 2015, p. 477-482.

RODRIGUES, C. O. de M.; PEDRINI, A. Integração da simulação termoenergética nas primeiras fases do processo projetual: o estudo de seis casos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 245-266, jan./mar. 2017.

RUSCHEL, R. C. To BIM or not to BIM? In: III Encontro da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, **Anais...** São Paulo: III Enanparq, 2014, p. 1-15.

SALAMONI, I; KNOB, P.; RUTHER, R. Metodologia para cálculo do potencial de geração de energia fotovoltaica em áreas urbanas. In: VII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído; III Conferência Latino-Americana sobre Conforto e Desempenho Energético de Edificações, **Anais...** Curitiba: VII ENCAC; III COTEDI, 2003, p. 937-943.

SANTANA, L. O. Otimização multiobjetivo da geometria de edificações residenciais energeticamente eficientes por meio de algoritmos genéticos. 2016. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

SHI, X.; YANG, W. Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of architects. **Automation in Construction**, Elsevier, v. 32, p. 125-135, jan. 2013.

STEVANOVIC, S. Optimization of passive solar design strategies: A review. **Renewable and Sustainable Energy Review**, Elsevier, v. 25, p. 177-196, 2013.

TOULOUPAKI, E.; THEODOSIOU, T. Performance simulation integrated in parametric 3D modeling as a method for early stage design optimization - A review. **Energies**, v. 10, n. 5, 2017.

VECTORWORKS. The future of algorithmic design. Disponível em: <<http://www.vectorworks.net/training/marionette>>. Acesso em 29 jan. 2018.

VIERLINGER, R. Octopus Manual v. 0.35. 2015, 5p. Disponível em: <<https://www.food4rhino.com/app/octopus>>. Acesso em 25 set. 2018.

WEN, L.; HIYAMA, K. A review: Simple tools for evaluating the energy performance in early design stages. **Procedia Engineering**, Elsevier, v. 146, p. 32-39, 2016.

WANG, W.; ZMEUREANU, R.; RIVARD, H. Applying MultiObjective Genetic Algorithms in Green Building Design Optimization. **Building and Environment**, Elsevier, v. 40, n. 11, p. 1512-1525, 2005.

WETTER, M. **Generic optimization program user manual version 3.0.0.** Lawrence Berkeley National Laboratory. California: University of California, 2009. 104 p. Relatório.

WOODBURY, R. **Elements of parametric design.** 1. ed. New York: Routledge, 2010. 300 p.

YU, R.; GERO, J. S. An empirical basis for the use of design patterns by architects in parametric design. **International Journal of Architectural Computing**, v. 14, n. 3, p. 289-302.

ZHANG, L.; ZHANG, L.; WANG, Y. Shape optimization of free-form buildings based on solar radiation gain and space efficiency using a multi-objective genetic algorithm in the severe cold zones of China. **Solar Energy**, Elsevier, v. 132, p. 38-50, 2016.

ZEMELLA, G.; FARAGUNA, A. **Evolutionary Optimisation of Façade Design.** Londres: Springer, 2014. 121 p.

ZITZLER, E.; LAUMANN, M.; THIELE, L. **SPEA-2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm.** Computer Engineering and Networks Laboratory. Zurich: ETH, 2001. 21 p. Relatório 103.

Multi-objective optimization of a museum of multifaceted façades for photovoltaic generation and energy consumption

FONSECA, L. P. G.; CARLO, J. C.; MARTINEZ, A. C. P.

RESUMO

A forma de edificações possui um elevado impacto no seu desempenho termoenergético, devido à envoltória ser o elemento que proporciona trocas térmicas entre os ambientes internos e o exterior. No emprego de sistemas fotovoltaicos integrados à edificações, a forma da edificação deve ser projetada para elevar o potencial de geração de energia elétrica. No entanto, simultaneamente, o projeto voltado à geração fotovoltaica pode contribuir para elevação da carga térmica para aquecimento e resfriamento da edificação. Com a aplicação da otimização baseada em simulação (OBS), é possível ao projetista identificar as características das edificações que conduzem a um bom desempenho quanto à geração de energia e quanto ao consumo para condicionamento. Neste estudo, a OBS é empregada em um modelo de edificação de fachadas multifacetadas para obtenção de soluções de elevada geração de energia e baixo consumo para condicionamento para três diferentes cidades brasileiras, considerando contextos urbanos. Foi gerado um modelo parametrizado de museu de fachadas multifacetadas, inspirado no Museu da Imagem e do Som, do Rio de Janeiro, cujos parâmetros promovem variações na volumetria da edificação: área e inclinação das superfícies multifacetadas, nas quais foi aplicado um sistema fotovoltaico integrado. Para cada cidade, Curitiba-PR, Belo Horizonte-MG e Recife-PE, foram modelados contextos urbanos tendo por base um estudo da configuração urbana local. Nos contextos urbanos modelados foram parametrizados ângulos de sombreamento causados pelo entorno sobre as fachadas da edificação. Com o emprego da OBS foi identificada uma variação quanto à geração de energia para as soluções criadas de até 340.8% e de até 26.2% com relação à carga térmica para aquecimento e resfriamento. Curitiba foi a cidade que apresentou maior potencial de atendimento ao consumo para condicionamento (resfriamento e aquecimento) da edificação: até 90.2% para as soluções otimizadas para a geração de energia, enquanto que Recife, apesar de possuir as maiores taxas de radiação, apresentou o menor atendimento ao consumo. Com o

método empregado, foram identificadas as volumetrias e contextos urbanos que proporcionaram os melhores desempenhos para cada um dos objetivos da otimização. Considera-se que o método de parametrização e otimização é adequado ao estudo de edificações de volumetria complexa com o emprego de sistemas fotovoltaicos integrados e proporciona a auxilia projetistas na tomada de decisões quando objetivos de projeto conflitantes estão em questão.

ABSTRACT

Buildings' form has a high impact on their thermo-energetic performance, for the envelope is the element that provides thermal changes between indoor and outdoor environments. When using photovoltaic systems integrated into buildings, the building form must be designed to increase its potential of generating electric energy. However, simultaneously, the design focused on photovoltaic generation can contribute to increasing the building thermal loads for heating and cooling. With the use of simulation-based optimization (SBO), it is possible for the designer to identify buildings' features that lead to a good performance for electric energy generation and conditioning consumption. In this study, SBO is applied to a building model of multifaceted façades for the obtainment of solutions of high energy generation and low conditioning consumption for three different Brazilian cities, considering urban contexts. A parameterized model of a multifaceted façades building, created based on Museum of Image and Sound, located in Rio de Janeiro, was generated. The parameters cause variations on the building form: areas and tilts of the multifaceted surfaces, in which an integrated photovoltaic system was applied. For each city, Curitiba-PR, Belo Horizonte-MG and Recife-PE, urban contexts were modeled based on a study of the local urban set. For the modeled urban contexts, shading angles, caused by the surroundings over the building's façades, were parameterized. With the application of SBO, a variance of up to 340.8% was identified among the solutions for energy generation and variance of up to 26.2% for heating and cooling loads. Curitiba was the city that presented the highest potential of supplying the building energy consumption for conditioning (cooling and heating): up to 90.2% for the solutions optimized for energy generation, whereas Recife, although the city presents the highest radiation rates, presented the lowest consumption supply. With the method employed, buildings forms and urban contexts that provide the best performances for each of the optimization objectives were identified. It is considered that the parameterization and optimization method employed is suitable for the study of complex form buildings with the use of photovoltaic systems integrated, and it assists the designers on the decision-making process concerning conflicting design objectives.

1. INTRODUCTION

Building's form is, according to Nagy *et al.* [1], an element of great impact under a visual point of view (envelope, façades and visible elements for building's external users), and it also presents a great contribution to the building performance. The envelope is the element that provides thermal and air mass exchanges between the internal rooms and the building's exterior; it also allows the entrance (or obstruction) of daylight, noise, pollution etc. [2]. In addition, building's form has a direct impact on heat loads for heating and cooling, as shown by Fonseca *et al.* [3]. Regarding building form relationship to the surroundings, it can also modify many urban factors in a local scale, such as wind flow, temperature, shading and access to the sun [4][5]. However, many times form generation in Architecture does not take into account aspects that can affect the energy performance of the building. Only after many form aspects are determined, design strategies are incorporated with the goal of improving the building performance.

According to Shi and Yang [6], two categories of architects in practice use traditional methods of design to obtain solutions that take into account sustainable strategies. The architects of the first category develop the design in a conventional way, concerning to issues regarding geometry, aesthetics, functionality etc., and they accredit to other professionals, such as consulting engineers and mechanical engineers, the adoption of green technologies to improve the energy performance of the building [6]. The architects of the second category try to apply technologies to improve the building performance in the first stages of design – however, these professionals rely on conceptual and not quantifiable knowledge, which usually are inefficient to obtain high performance solutions [6].

One of the methods of energy performance evaluation of buildings used in the present days is a numerical simulation, whereby a computational program is used to model the building's geometry, the constructions, lighting systems, HVAC, water heating and building use, such as occupation, lighting and equipment loads [7]. This method allows the prediction of buildings' energy consumption and helps to identify the systems that present highest energy demands. Energy consumption is increasing with the increasing rate of

urbanization¹ associated with a rising population, expanding the economy and need for improving life quality. That leads to greenhouse emissions and consequent pressure on existing energy sources [8]. However, most simulation processes of building performance have focused on the preview of energy performance in the last design stages [9], when building's aspects that have a great impact on performance are already defined, such as solar orientation, geometry, opaque and glazed areas etc.

The process of design thinking is changing with the improvement of digital technologies, especially with the emergence of parametric tools [10] as digital tools are assuming an active role in the design process [11]. Parametric and algorithmic design have risen within digital research units in large Architecture offices as a need for designing and constructing complex buildings in an efficient and cost-effective approach to commercial practice in Architecture. For instance, the Specialist Modelling Group at Foster and Partners, Gehry Technologies spun off of Gehry Partners, the Advanced Geometry Unit at Arup, and CODE at Zaha Hadid Architects are some pioneer offices that applied this technology in design [12] In the first decade of the 21st century, an effective transformation in terms of design technology in architecture applied to the creative process was seen in an accessible way to independent professionals and students, rather restricted to academic circles and large offices of Architecture and Engineering [13]. Parametric modeling tools were integrated into popular design software, such as Generative Components (2003), Grasshopper (2007) for Rhinoceros and Dynamo (2013) for Revit.

The creation of parametric design tools and the updating of traditional software used by architects and designers into a parametric modeling approach have made performance-based design using simulation more accessible to designers. In this approach, building's performance is the guide to the design, and the achievement of solutions of high performance becomes the goal that will conduct the design decisions. Until recently, improvement of solutions to enhance the performance with the use of simulation, or to identify building impact on energy performance, used to be conducted through parametric simulation.

¹ Rate of urbanization is the average annual rate of change of the percentage urban [54].

Hachem, Athienitis and Fazio [14], for example, investigated the impact of form and sun orientation of some residential building models on the energy demand for heating and cooling of each housing unit and a group of buildings; Gaviria, Pereira and Mizgier [15] created models of building groups in an urban context by varying occupancy rate (and consequent form of buildings and their spatial relationship) in order to investigate the potential of meeting the energy demand of the set with building integrated photovoltaics (BIPV) applied to façades and roofs. These authors created models to be analyzed, varying one parameter at a time and testing only some solutions. They did not apply a method of optimization trying to find optimal or suboptimal solutions.

However, this scenario is changing: in recent years means of integration of building design and performance simulation tools are being developed, which enables the evaluation of performance on the level of design execution [10][16]. These methods created scenarios until recently inaccessible to architects and engineers, and they made the supply of feedback of building performance directly to the design modeling platform possible [16]. Simulation-based optimization (SBO) is an outcome of performance-based design, in which iterative simulations of design solutions are produced seeking to achieve an optimal solution (or close to it) with performance goals as optimization criteria [17]. This method is usually automated with computational programming [18], and because of that, it considerably decreases the simulator/designer work, compared to the parametric simulation method. Whereas in parametric simulation each design variable is changed individually while the others are kept constant [18] or depend on the simulator engineering decision, SBO algorithms perform the combination itself of many variables over the analysis of the building performance.

According to Nguyen, Reiter and Rigo [18], the application of optimization methods in buildings is not a new science, and it has been theme of publications since the 1980's. Among these methods, the most usual are neural networks [19], regression analysis [20], factor analysis and statistical sampling of iterative solutions. However, computational advancements made the integration of buildings' energy simulation and algorithmic optimization tools possible, contributing to an accelerated growth of publications in the field of buildings' science from the middle 2000's [18]. Evins [21] made a review of researches that applied computational simulation to sustainable buildings' design problems,

covering a total of 74 works published in journals and international conferences between 1990 and 2012. The author identified that 38% of the publications were about envelope optimization, 21% related to the form, 17% to HVAC systems, 16% to renewable energy, 7% to controls and 1% to lighting. In addition, energy performance stood out among all optimization objectives found in the publications, with an occurrence approximately three times higher than the second optimization objective: construction cost [21].

According to Colgaigh *et al.* (1999) *apud* Elbeltagi *et al.* [22], form and correct orientation of a building can reduce 30-40% of energy consumption without additional costs, which explains the high number of publications about the theme. Some works apply SBO methods seeking to decrease energy consumption for heating, cooling and lighting systems in buildings [23][24][25]. Other works recently published apply SBO methods for maximization of the potential of distributed energy generation by photovoltaic panels integrated to buildings' envelopes [26][27][28]. Both the optimization objectives cited (minimization of energy consumption and maximization of energy generation) stand as conflicting performance criteria when they are applied to the same object. Then, multi-objective SBO methods have a greater potential to identify high performance solutions for all optimization objectives than a designer's empirical concepts.

The creation of buildings' geometries for SBO is based on parametric modeling, which consists of the creation of a "geometric model that encodes formal features, common to the design of its solution space" ([29], p. 199). This method consists of topological relations between the parts that compose the model and variations in its dimensions. The relations between the elements that compose the form of the model are defined as a set of equations with variables (parameters) that assume values inside intervals pre-determined by the designer. Therefore, parametric modeling is intrinsic to the generative design system, which consists of the application of a set of computational rules for the generation of alternative designs. The designer is responsible for the creation of the rules that encode constraints to the model, in order to create only desired solutions [29]. The designer creates an initial model, composed of constraints and parameters to be varied, and an algorithm is used for the generation of many solutions created through the combination of pre-determined design parameters.

One of the challenges for SBO methods applied to the optimization of buildings with BIPV systems is modeling the urban context. Most studies that consider this context on energy performance evaluation apply generic relations. For example, Hachem, Athienitis and Fazio [14] modeled groups of buildings with pre-defined forms to evaluate the energy generation in neighborhood models created by the authors; Gaviria, Pereira and Mizgier [15] created a group of buildings of square floor shape that varied in floor area, number of floors and distance among buildings to calculate the annual electricity generation; Kampf *et al.* [27] created urban scenarios with hypothetical building forms to search for the urban contexts with highest received irradiance. None of these cases were based on contexts for real cities.

1.1. Optimization with GAs

Two fundamental kinds of tools are needed for the application of SBO methods: a simulation software and an optimization algorithm. Basically, an optimization process is conducted as in Figure 1, created by Nguyen, Reiter and Rigo [18]. The optimizer creates one or more objective functions, based on the performance criteria to be minimized or maximized. Then, he/she assigns the optimization settings as inputs in an optimization engine. This optimization engine automatically calls a set of runs to the simulation software, that returns the performance results used to calculate a value for each objective function. If the stopping criteria is met, optimization results are extracted to be analyzed; otherwise, the optimization engine changes some input variables in order to create a set of new models that will be simulated. The red loop indicated in Figure 1 is repeated n times until the stopping criteria is met.

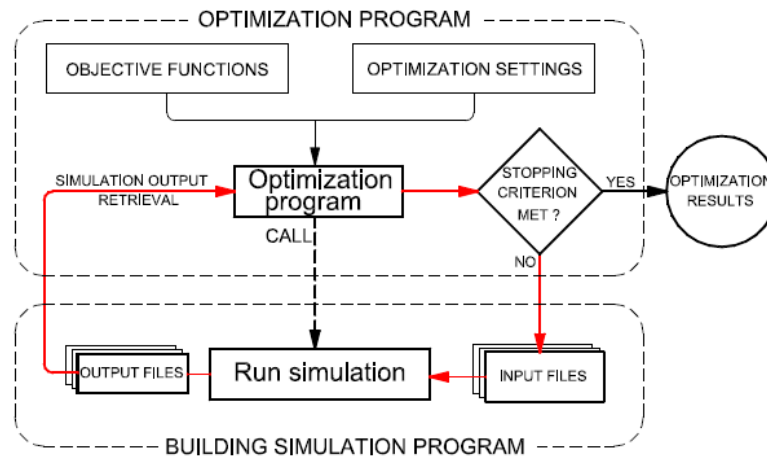


Figure 1: OBS applied to an optimization problem in building performance studies.

Source: Nguyen *et al.* [18].

Several optimization algorithms can be used in optimization problems, grouped into: local or global methods; heuristic or meta-heuristic methods; deterministic or stochastic methods; derivative-based or derivative-free methods, trajectory or population-based methods, bio-inspired or non bio-inspired methods, single-objective or multi-objective algorithms etc. [18]. Genetic algorithms (GA) are a meta-heuristic and population-based method [30], and are the most used for building performance problem solving according to Evins' [21] review. GAs are evolutionary algorithms based on Darwin's evolution theory: they create a population of solutions (initial generation) and apply the principle of survival of the fittest in order to select the best solutions to be kept in the new generation, while the weakest are eliminated. Then the GAs apply crossover, switching parameters from different solutions, and mutation, introducing random changes, operators in order to generate new solutions [21]. Although some algorithms can outperform GAs regarding convergence and of finding the best solutions [31], they have many advantages in applications on building optimization: they can conduct a global search, provide a wide availability of different solutions and deal with multi-objective problems [32][21]. In addition, there is not a consensus about which algorithm is best for each optimization problem. Many variables have an influence on convergence speed and achievement of best solutions: problem complexity, number and type of variables, population size (for evolutionary algorithms) etc. [31].

The objective of this work is to verify the potential of multi-objective optimization for photovoltaic energy generation and consumption of a building with multifaceted façades, integrating urban criteria for three different locations in Brazil.

2. MATERIAL AND METHODS

The initial model of the multifaceted museum was created in Rhinoceros 5.0 through Grasshopper 0.9.0076, inspired on the Museum of Image and Sound (MIS) of Rio de Janeiro, designed by Diller Scofidio+Renfro². Technical drawings of the museum original project were used, as well as sketches available in the web, information about the concept and form, and the parameterized model of the museum created by the authors in an initial phase of this project. The plug-ins used in the work were Ladybug 0.0.65/Honeybee 0.0.62, used as interoperable tools between Rhino/Grasshopper and EnergyPlus 8.9.0, and Octopus 0.36 to conduct the optimization process.

A parameterized building model was designed in Grasshopper with an urban context in order to generate alternative design solutions for three different locations in Brazil. The museum's form was inspired by MIS original building, but with façade surfaces simplification and photovoltaic modules in the main façades in a BIPV system. Four steps were conducted to model the initial case: (1) creation of an initial building form; (2) configuration for energy simulation; (3) urban context modeling and (4) configuration for simulation-based optimization. The third step was applied for three Brazilian cities, and involved a study of the location's urban contexts, which generated three parameterized surroundings for the initial building model. Later, a process of SBO was applied to each initial case in order to identify the potential of optimization to find the best solutions for energy consumption for heating and cooling and energy generation.

2.1. Creation of an initial building form

²The referenced Museum of Image and Sound is being built in the Avenida Atlântica, in Copacabana, Rio de Janeiro-RJ. It was originally designed by Diller Scofidio+Renfro, an office from New York, and it relies on the partnership with the Brazilian office Índio da Costa Arquitetura, Urbanismo e Transporte, which conducts the execution project, initiated in 2009 [33].

The interpretation of MIS multifaceted façade conducted the modeling of the initial case. In the analysis of MIS original project the most prominent elements of the building's geometry were identified, such as the proportion between width and depth in the floor plan and an absence of a proportional relationship between width and height in the vertical plan (Figure 2) - the building's height being determined by the seven floors above the ground. Furthermore, a direct relationship between the site's shape and the plan projection of the building was observed. In the original design, the site and building's projection are parallelepiped, whose front and back faces are not parallel. For the created model, it was designed an orthogonal site whose building's projection follows its alignment (Figure 3). In this model, the proportions identified in the floor plan in the original model were followed. The volumetric relation of the façade's plan, number of floors and, consequently, the building's height, was simplified in order to reduce the number of thermal zones.

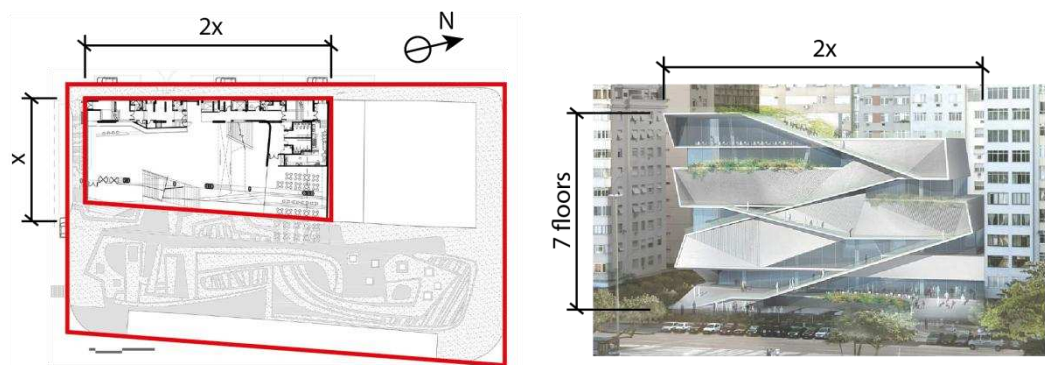


Figure 2: Geometric relationships in the building's floor plan and form.

Source: Adapted from Corbioli [33].

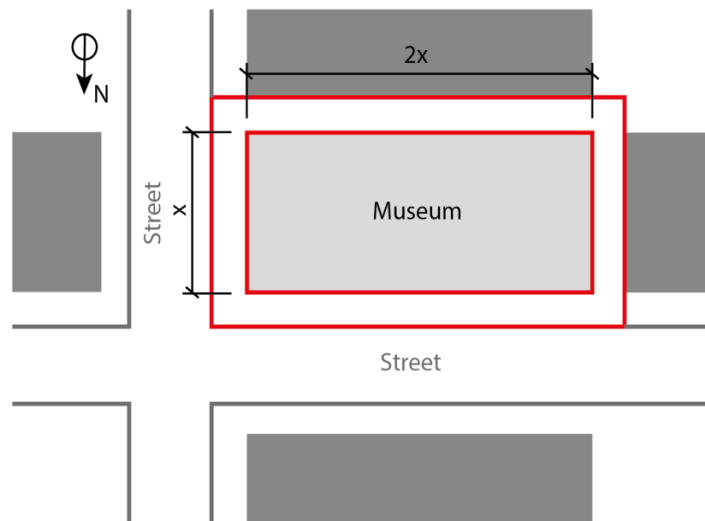


Figure 3: Geometric relationships in the floor plan for the created model (site and building's projection).

Furthermore, considering that the proposed model would be inserted in an urban context, the building was located in a corner lot, with two main façades towards the streets (Figure 3).

The MIS building's form is based on the folding of Copacabana's boardwalk [33], creating a vertical circulation element, external to the building, which connects the museum's floors. The floors, where visitation and service spaces for tourists are located, are distributed in both two extreme sides of the building, and some are placed in different levels connected by a central atrium (Figures 4 and 5).

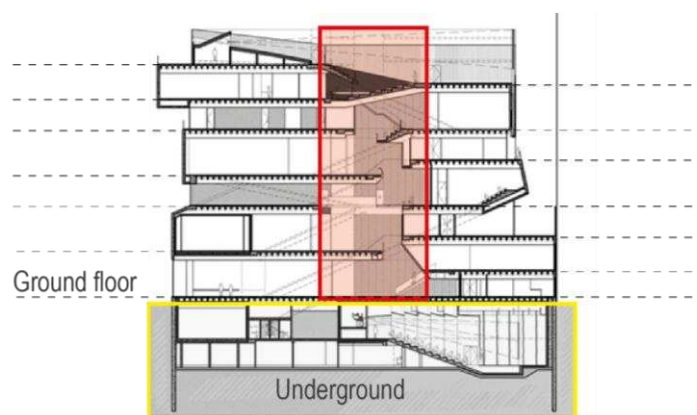


Figure 4: Building's longitudinal section featured for the central atrium (in red), which connects the floors. In yellow, the underground.

Source: Adapted from Corbioli [33].

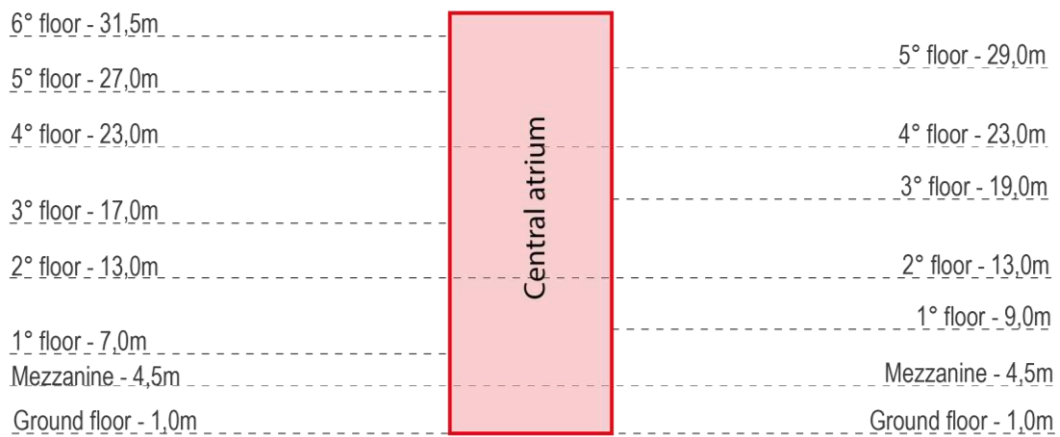


Figure 5: Schema of connection of building's floors to the central atrium and floors' heights in the original museum.

For the proposed model, a central atrium was created, connecting the two edges of the building where the museum visitation spaces would be located. The larger façades face North and South. This geographic orientation was established due to the greatest availability of sun radiation on North façade in the largest part of Brazilian territory in the South hemisphere, except close to the Ecuador Line.

In MIS design, ceiling heights vary from 2.5m to 6m. The floors' ceiling heights were created based on modules of 4m and 6m to generate the floors and stairs.

It was identified that the generation of the main façade's form of MIS is based on two crossed pairs of parallel axes that generate the stairs in the main façade and connect the floors (Figure 6). These axes also determine the shape of the frontal façade plans of the museum.

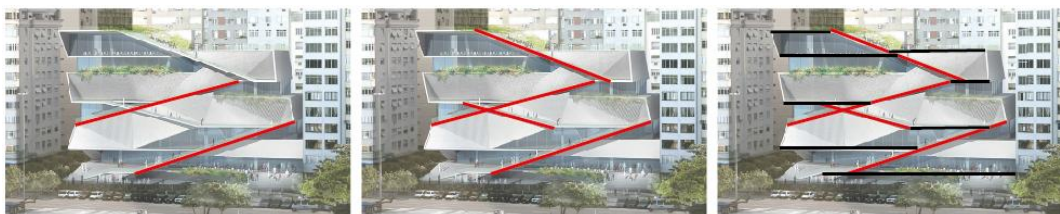


Figure 6: Stairs' axes (in red) and landings (in black) of MIS main façade.

Source: Adapted from Corbioli [33].

In the proposed model, the main façade's form was created through these two pairs of axes (Figure 7).

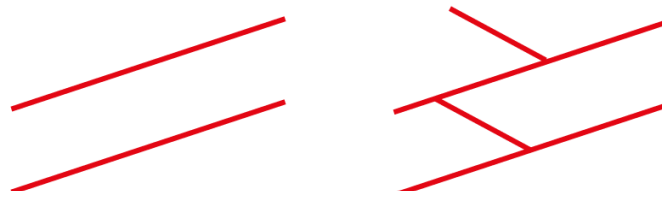


Figure 7: Beginning of the main façade generation of the proposed museum.

Then, form generation of the proposed museum was conducted by associating the axes with the modulation established for the creation of the floors in East and West wings (Figure 8).

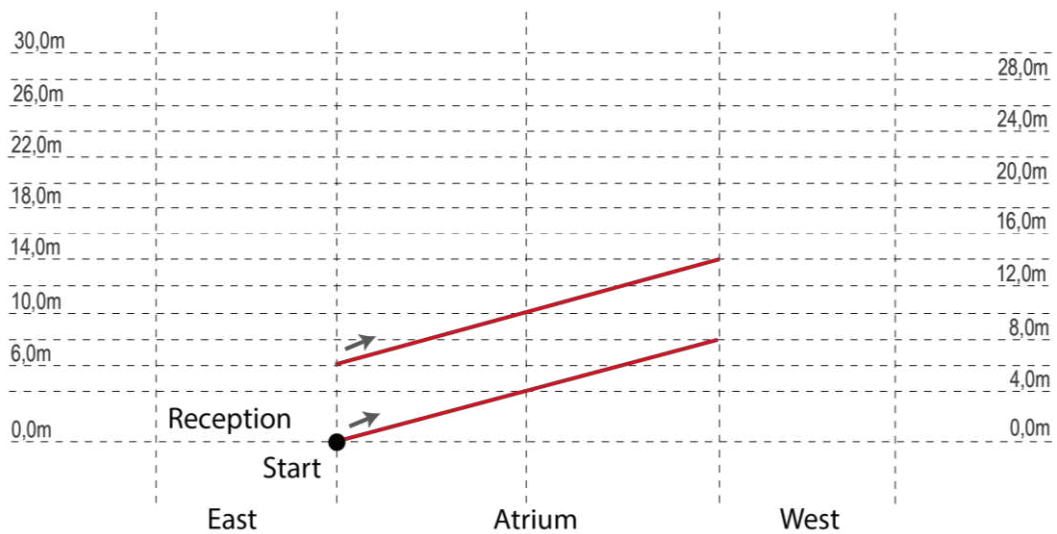


Figure 8: Creation of the first and second axis of the stairs, starting from the reception in the ground at the west wing.

As in MIS, the concept that guided the axes' crossing, and, consequently, the building's stairs, was to enable the museum's users to choose their path (Figure 9).

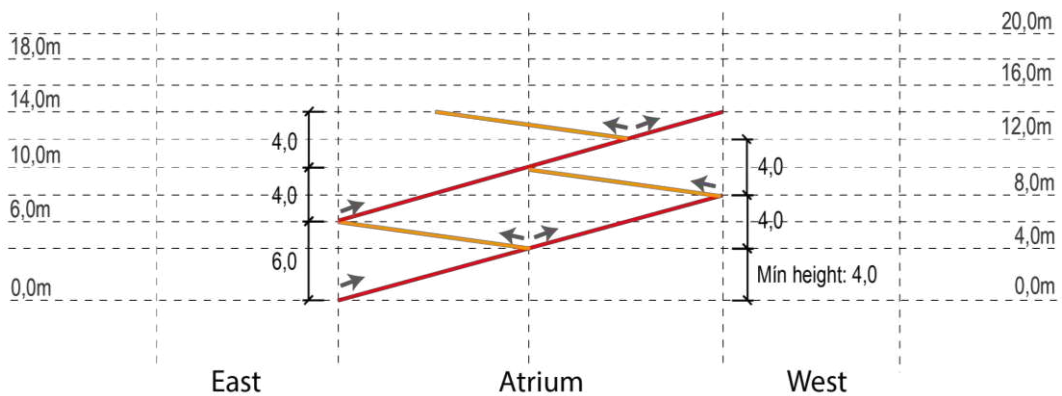


Figure 9: Definition of other stairs crossing axes and of the alternative paths for the museum users.

After the stairs' axes were defined, museum's floors were modeled, located in different levels according to the East and West wings and united by the stair axes in the central region of the atrium (Figure 10). As mentioned, three floors in each wing were created in order to limit the number of thermal zones to seven, including the atrium and then, to reduce simulation time. The roof was modeled as an accessible outdoor space for the building's users.

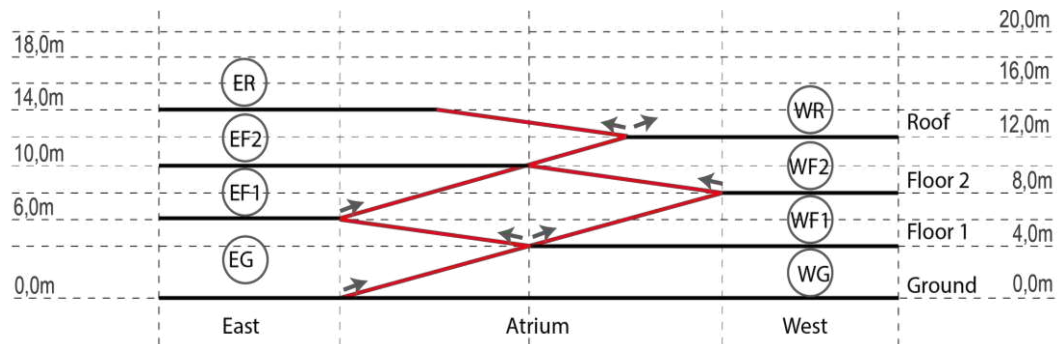


Figure 10: Definition of the floors in the East and West wings of the proposed museum.

The central axis of the building's form was defined as an anchor element³, with the coordinates (0, 0, +z). The elements that were changed in the building's geometry are the points that represent connections among the stairs' axes and landings and the points that define the edges of the floors (Figure 11). The latter present movements regarding the axes x and y, defined in the plan. Z axes (floors' heights) were constant.

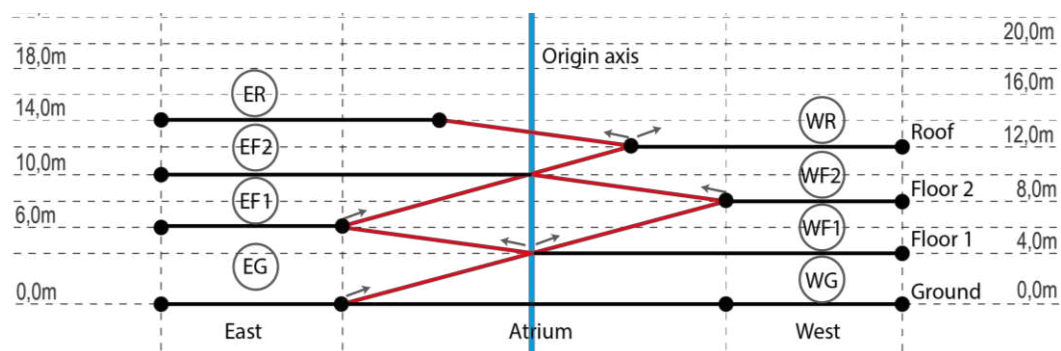


Figure 11: Points of the museum's geometry to be moved in the frontal façade.

³ Anchor element: origin of the geometry. All axes' and points' movements in the building's geometry will be changed from this point, which is kept fixed.

The points (parameters) to be moved in the building's geometry were named according to the floor in which they are found, and they are presented in Figure 12 and Table 1. From the central axis, defined as an anchor element, anchor plans were created to complete the building geometry. The highlighted vertices of the building's geometry in Figure 12 can be moved along the plans: xz and yz , which belong to the East and frontal façades due to the site plan and subsequent urban parameters. Thus, the West façade, which would be shaded by urban surroundings, was designed in a way to reduce direct radiation incidence and focus the analysis on the impact of North and East façades' forms on energy generation and consumption. Twenty-three parameters with free movement and five parameters whose movements were dependent of others were created, as presented in Table 1. They were named according to the wing and floor they are located. Combination of all form parameters could generate a total of $4,48 \times 10^{18}$ possible design solutions.

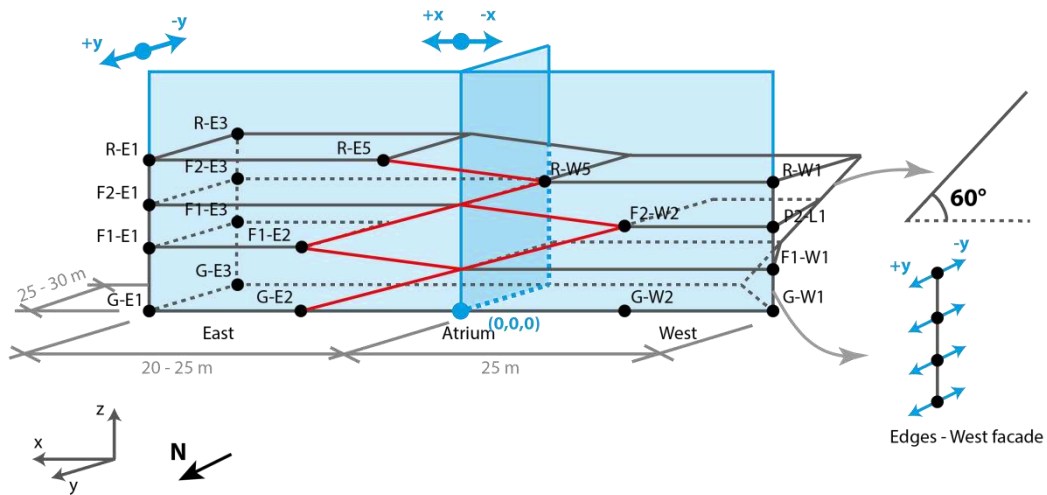


Figure 12: Movable points plans along which the points move and their directions (in blue).

Table 1: Model's parameters

Point	Movement	Position in the axis (m)
G-E1x	Free	20 to 25
G-E1y	Free	0 to 5
G-E2x / F1-E2x / G-W2x / F2-W2x	Free/Dep/Dep/Dep	9.2 to 12.5 to the East wing and -12.5 to -9.2 to the West wing*
G-E2y	Free	0 to 5
G-E3x	Free	20 to 25
G-W1y	Free	0 to 5

G-W2y	Free	0 to 5
F1-E1x	Free	20 to 25
F1-E1y	Free	0 to 5
F1-E2y	Free	0 to 5
F1-E3x	Free	20 to 25
F1-W1y	Free	0 to 5
F2-E1x	Free	20 to 25
F2-E1y	Free	0 to 5
F2-E3x	Free	20 to 25
F2-W1y	Free	0 to 5
F2-W2y	Free	0 to 5
R-E1x	Free	20 to 25
R-E1y	Free	0 to 5
R-E3x	Free	20 to 25
R-W1y	Free	0 to 5
R-E5x / R-W5x	Dep/Dep	1/2 of the distance between the central axis (0, 0, 0) with the vertical axis generated from GW-02 and GE-02**
R-E5y	Free	0 to 5
R-W5y	Free	0 to 5

*Points G-E2x , F1-E2x, G-W2x and F2-W2x are bound to each other. If G-E2x moves +0.1 in x, automatically, point F1-E2x moves +0.1 and points G-W2x and F2-W2x move - 0.1 in x.

** R-E5x and R-W5x depend on vertical axes movements (in z) generated from points G-E2x and G-W2x. For example, if G-E2x is 9.2, G-W2x is -9.2; R-E5x is 4.6 and R-W5x is 4.6.

Adjustments in the floors' dimensions and their connections with the stairs in the building's atrium were required as seen in Figure 13, to generate a closed thermal zone with less interior surfaces, while the atrium connects all peripheral zones (floors).

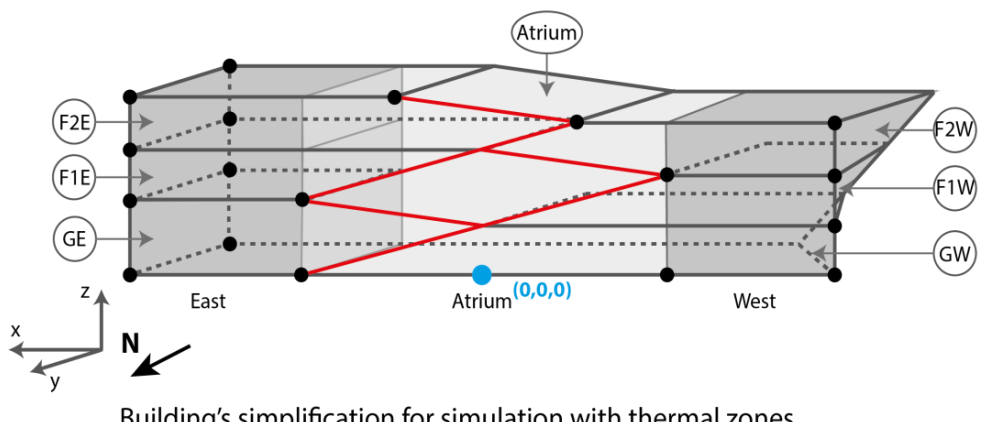
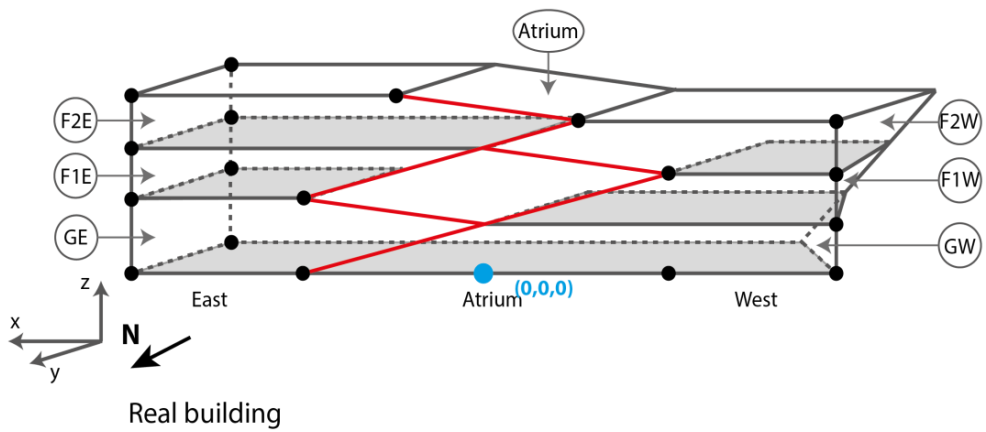
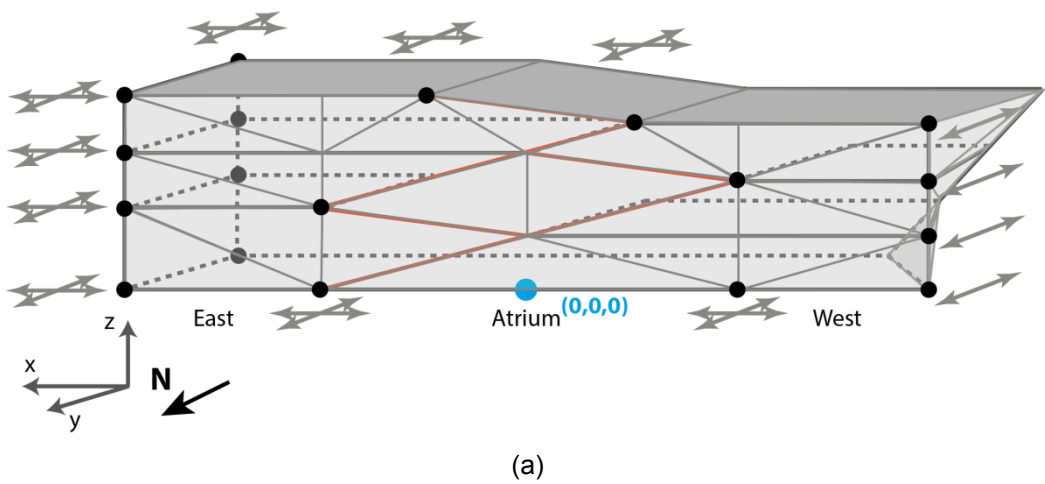


Figure 13: Simplification of the model to accommodate the thermal zones for simulation.

The building's final geometry was created after connecting the points of the façade to generate triangular surfaces, resulting in 30 surfaces in the North and East façades to be parameterized (Figure 14).



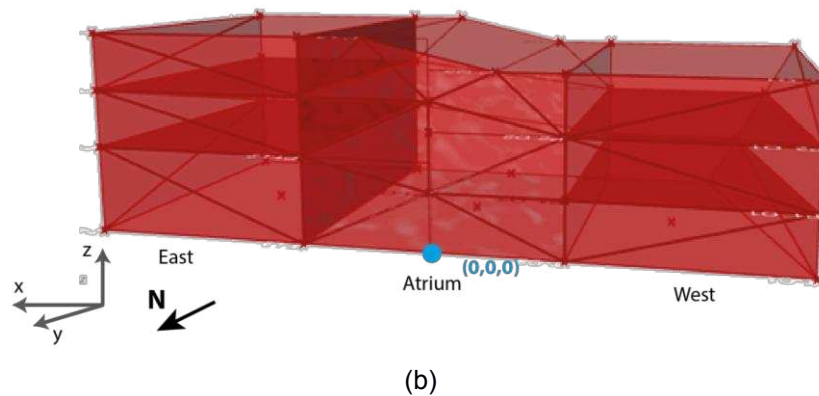


Figure 14: Final building's geometry with geometry's parameters (a) and the model extracted from Grasshopper/Rhinoceros (b).

2.2. Energy simulation

Figure 15 shows the geometry of the thermal model and the constructions applied in each façade, and Table 2 presents the thermal properties of surfaces' materials and constructions. Ordenes method was followed in order to model some constructions, such as the masonry system and the floors with ribbed slabs [34]. Photovoltaic modules were modeled as glazing with thermal properties from Kapsis [35].

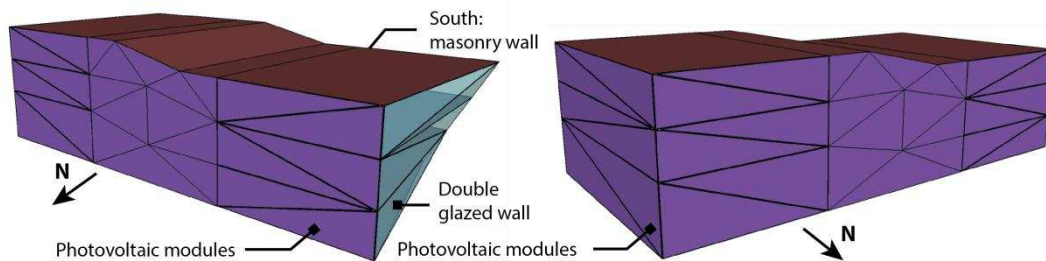


Figure 15: Final geometry of the building in the .idf file. In blue, surfaces with glass panels in West façade; in purple, surfaces with STPV.

Table 2: Thermal properties of the building materials.

Construction	Material	Thickness (m)	Density (kg/m ³)	Conductivity (W/m.K)	Specific heat (J/kg.K)
Masonry wall	Plaster mortar	0.025	2000	1.15	1000
	Ceramic brick of 8 holes: face 1	0.014	2252	0.9	920
	Air	R = 0.16 (m ² .K)/W			

	Ceramic brick of 8 holes: face 2	0.014	2252	0.9	920
	Plaster mortar	0.025	2000	1.15	1000
Ground floor	Concrete slab	0.1	2400	1.75	1000
	Plaster mortar	0.025	2000	1.15	1000
	Ceramic floor	0.01	1600	0.9	920
Other floors and roof	Plaster	0.01	750	0.35	840
	Air	$R = 0.14$ (m ² .K)/W			
	Ribbed slab	0.44*	493*	1.75	1000
	Plaster mortar	0.025	2000	0.9	1000
	Ceramic floor	0.01	1600	0.9	920
Photovoltaic module	U = 2.011W/(m ² .K); SHGC = 0.322; VT = 0.285				
STPV_WIN29%					
Double glazed wall	U = 1.3 W/(m ² .K); SHGC = 0.23; VT = 0.39				

* Values calculated based on the constructions adaptation method for simulation in Visual Doe 3.1 of Ordenes *et al.* [34].

Source: Ordenes *et al.* [34] ABNT [36] Inmetro [37] Kapsis [35].

The applied PV system was named STPV_WIN29% and consists of two types of glass separated by a sealed air cavity: STPV_34% and a commercial clear glass. STPV_34% consists of spaced opaque PV cells, with poly-Si technology applied on the exterior glass layer of the construction. The properties of the photovoltaic module (STPV_WIN29%) are in Table 3. The chosen STPV module has a visible transmittance of 29% while the STPV glass has a visible transmittance of 34%. An efficiency of 10% was obtained by Kapsis [35] for the tested PV module (Table 4) and used to calculate the opaque and glazed areas to adapt Kapsis' model to the proposed building's modules (Figure 16), considering that their areas and tilts would vary during the optimization.

Table 3: Characteristics of the photovoltaic module.

Photovoltaic module STPV_WIN29%	outer	3.2 mm tempered, antireflective-coated, white glass
	STPV glass	Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) encapsulant layer
	STPV_34%	Poly-Si spaced PV cells layer
		Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) encapsulant layer
		Polyvinyl Fluoride (PVF) transparent backsheet
	Air	25.4 mm sealed air cavity
inner	Clear glass	5.64 mm commercial clear glass with low emissivity coating (emmissivity=0.157)

Source: Data extracted from Kapsis [35].

Table 4: Physical and electrical properties of STPV module.

Number of PV cells	Cell technology	Electrical efficiency (%)	Nominal maximum power (W)	Module area (m ²)	PV cell area (m ²)	% Opaque area	% Glazed area (m ²)
48	Poly-Si	10	187.90	1.9012	0.0243	61.44	38.56

Source: Data extracted from Kapsis [35].

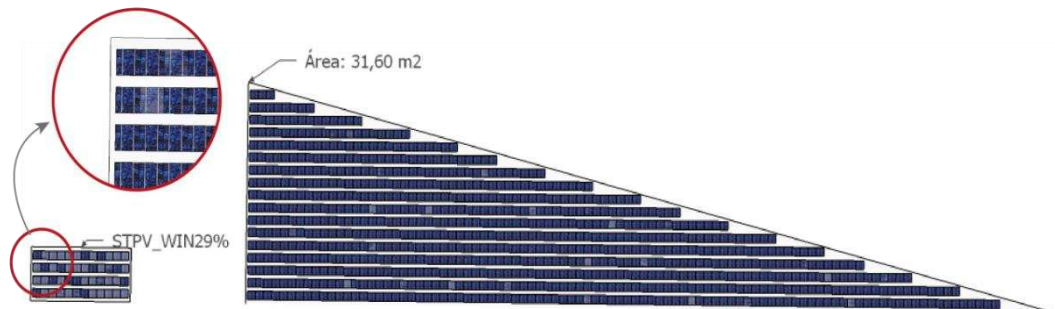


Figure 16: Adaptation of Kapsis' STPV module for the museum's modules of the façades.

The museum's PV modules were modeled in Honeybee based on the calculated percentage of opaque area for a PV module of 1m² (61.44% composed of PV cells).

A limitation of PV modeling for simulation was regarding the energy calculation method. Although EnergyPlus methods "Equivalent One-Diode Model" and "Sandia Photovoltaic Performance Model" are more precise and close to real situations, for they consider the impact of cells' temperature on the produced energy [38], it is time cost consuming. "Simple" model was used instead, which is suitable for design analysis in their initial phases [39], for it considers the modeled geometry, solar distribution, modules' efficiency and

power output, and radiation data extracted from the weather file to preview the amount of energy generated by the photovoltaic system. For initial design phases and use on simulation-based optimization, the simple model is suitable to obtain a preview of a great number of buildings forms with high electric energy generation; if the designer's goal is to evaluate real energy production, the other EnergyPlus models are necessary.

In addition, in the proposed model for SBO application, the building's form can cause auto-shading on the PV modules, which causes an impact on the produced energy. A real photovoltaic system for this model would require that each BIPV module would be customized, with bypass diodes designed to avoid hot spots [40], which can damage the PV cells. Energy Plus simple model does not model bypass diodes, so the simulations did not include this calculation option.

Equipment and lighting power loads and occupation were established according to Table 5.

Table 5: Internal loads of the zones.

Zone	Activity	Occupation (people/m²)*	Methabolic activity (W/m²)**	Lighting density (W/m²)***	Equipments (W/m²)****
G-W	Kitchen/Restaurant	0.2	70	9.6	10
Atrium	Exhibition room	0.025	93	11.4	10
G-E	Exhibition room	0.025	93	11.4	10
F1-W	Exhibition room	0.025	93	11.4	10
F1-E	Auditorium/projections' space	0.5	60	8.9	10
F2-W	Exhibition room	0.025	93	11.4	10
F2-E	Exhibition room	0.025	93	11.4	10

*Calculated based on Gomes [41].

** Data extracted from ANSI/ASHRAE [42] and ISO 7730 (2005) *apud* Lamberts *et al.* [43]. They correspond to the quantity of energy produced per m² of a person's skin, who is doing a certain activity. These values were multiplied per 1.80 (the average amount of skin of an adult).

*** Acceptable maximum limit of lighting power density to achieve level A of efficiency in the building's area method. Extracted from RTQ-C [37].

**** Equipment loads were estimated based on an approximation to data of 'THEpUBLIC' Arts Center, which is a contemporary museum in the UK [44] once there was not available data for MIS.

Museum's operating hours were determined based on operating hours of the Museum of Image and Sound of São Paulo (Table 6). HVAC setpoint temperature is fixed to 18°C for heating and 24°C for cooling for the whole year. To reduce time cost consumption, the optimization was performed using the calculation of internal loads and PV generation. After the optimization process, an auto-sized variable refrigerant flow (VRF) system was modeled and simulated in EnergyPlus (v. 8.9) for selected Pareto Front cases. The hours not met by the HVAC were up to 300h, according to ASHRAE Standard 90.1 Appendix G [45]. A cooling COP of 3.3 and heating COP of 3.4 were established. In addition, the solar distribution model used during simulations was Full Exterior with Reflections.

Table 6: Operating hours of the museum.

	Weekday	Operating hours
People	Sunday	10-19h
	Monday	Closed
	Otherdays	10-21h
Lighting	Sunday	7-20h
	Monday	Off
	Otherdays	7-22h
Equipment	Sunday	9-20h
	Monday	Off
	Otherdays	9-22h
HVAC	Sunday	7-20h
	Monday	Off
	Otherdays	7-22h

People occupation rate for each zone was set accordingly to a schedule, shown in Appendix A.

2.3. Urban context modeling

An urban context for the proposed museum was modeled for three different cities, which are capital of states in Brazil; are located in different latitudes and bioclimatic zones - each urban context causes different relationships of the building form to the surroundings that affect the performance, even with an identical parameterization process. The studied cities were Recife-PE, Belo Horizonte-MG and Curitiba-PR (Figure 17 and Table 7).

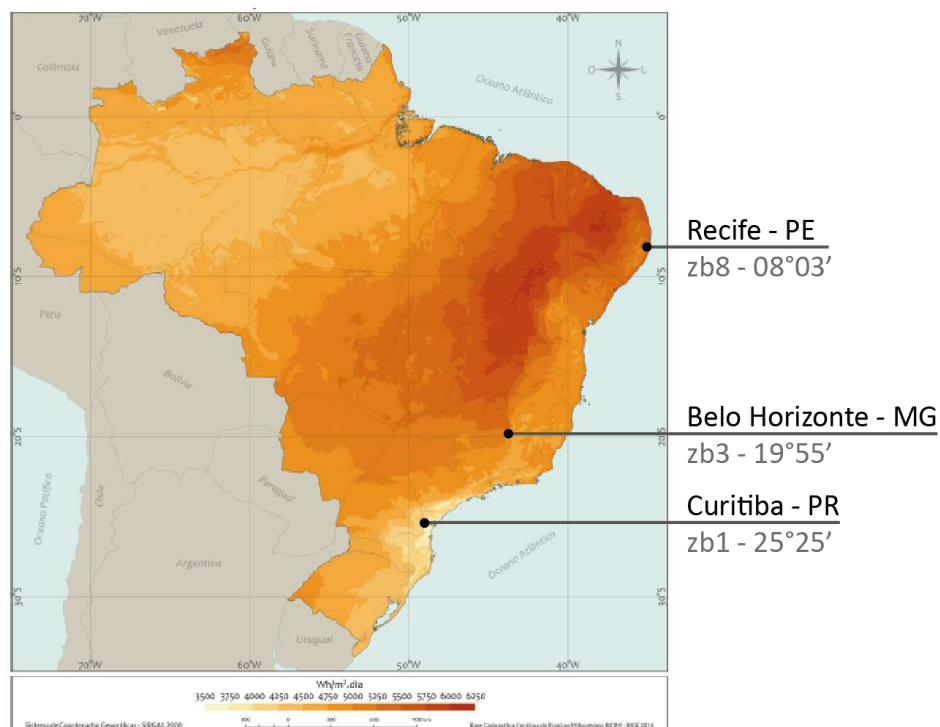


Figure 17: Annual average of the daily horizontal global radiation of Brazil and chosen cities.

Source: Pereira *et al.* [46].

Table 7: Chosen cities.

	Recife - PE	Belo Horizonte - MG	Curitiba - PR
Latitude	08°03'14"S	19°55'15"S	25°25'40" S
Longitude	34°52'52"W	43°56'16"W	49°16'23" W
Altitude (m)	4	858	934
Bioclimatic zone	8	3	1
Winter average temperature (°C)	24.2	19.6	15.3
Summer average temperature (°C)	26.9	23.2	20.1
Annual average of daily solar radiation (W/m².dia)	5,340	5,130	4,200

City codes were analyzed, such as Land Use and Occupation Laws and Master Plans, as well as Google Earth and Street View tools. First, museums concentration districts in each city were identified using Google Maps to be linked

to the current city code zoning. The Street View tool was used to analyze the occupation density of each zone. The goals that guided the selected urban zones were the proximity to other museums, based on a cultural corridor concept⁴, and a proper urban density for a museum with BIPV on its façades. Therefore, highly dense areas were excluded. The city codes were consulted to identify restrictions to land use and occupation, such as building's heights, the distance among buildings and between buildings and sidewalks. These parameters were used to create minimum or maximum constraints for the urban model. Images from Street View were used to determine the other parameters' intervals that would be modeled, such as buildings' heights and streets' and sidewalks' widths.

Figures 18, 19 and 20 present the zoning map for concentrated museum areas in each city, with an aerial view for choosing a site for the museum.

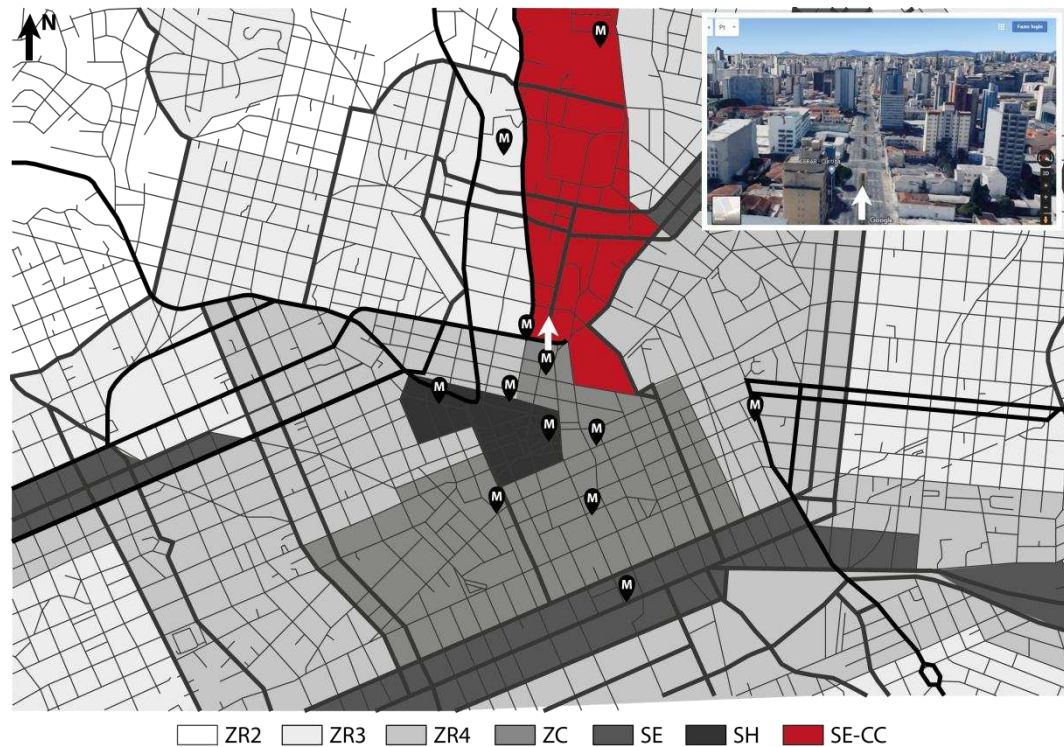


Figure 18: Curitiba's zoning map and museums. The arrow indicates the view taken from Google Maps.

Source: Drawn based on [47] and Google Maps.

⁴ A cultural corridor is a planned district or route that features or connect many cultural attractions with the goal of attracting tourism or promoting urban revitalization [55].

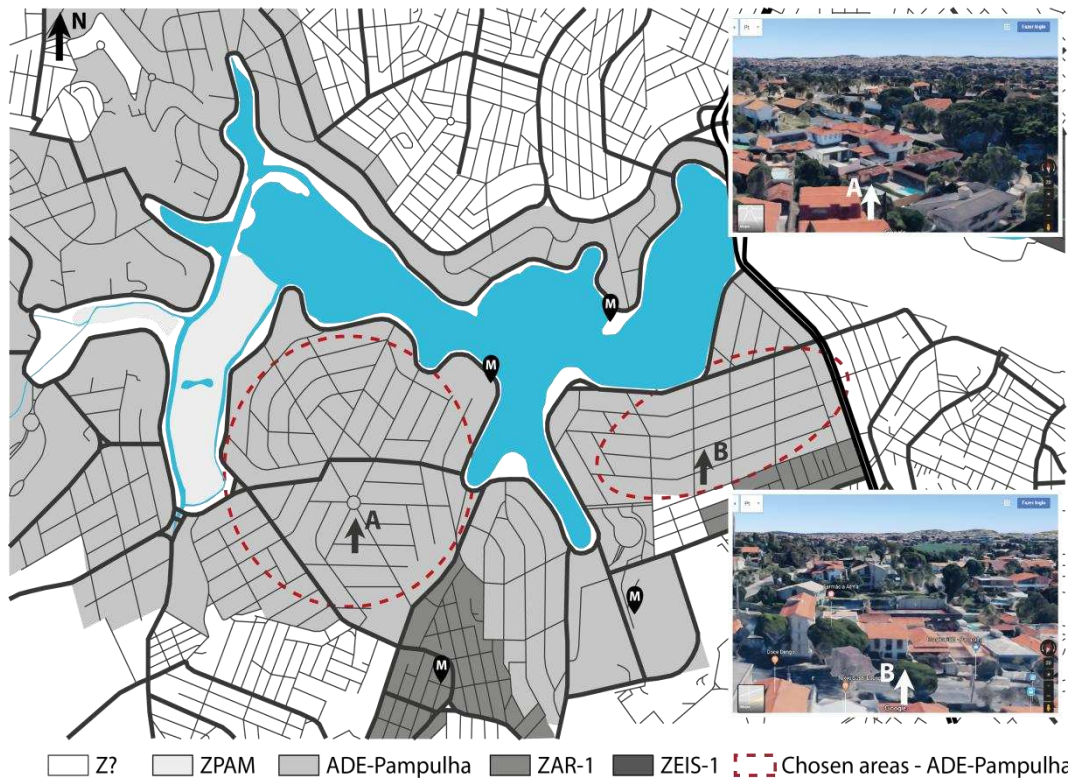


Figure 19: Belo Horizonte's zoning map and museums. The arrows indicate the views taken from Google Maps.

Source: Drawn based on [48] and Google Maps.

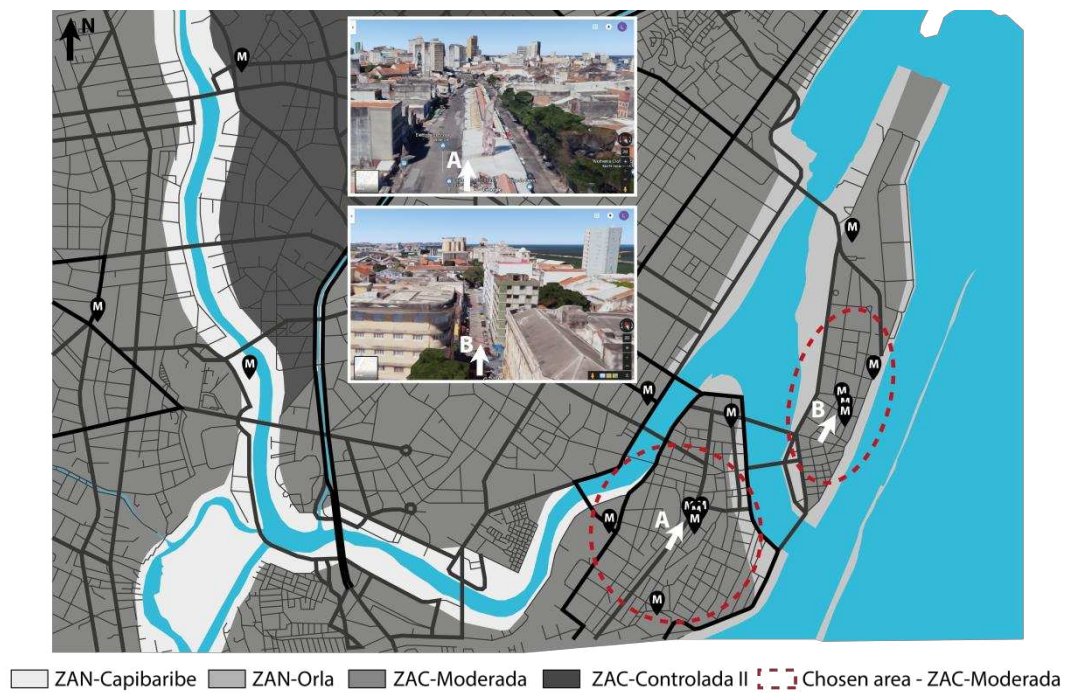


Figure 20: Recife's zoning map and museums. The arrows indicate the views taken from Google Maps.

Source: Drawn based on [49] and Google Maps.

For each chosen area in each city, some streets oriented East-West were analyzed to identify urban parameters (streets' width; sidewalks' width; distance among buildings; building's heights etc.), which would be used to build possible urban scenarios for each zone. Figure 21 presents an example for Curitiba.

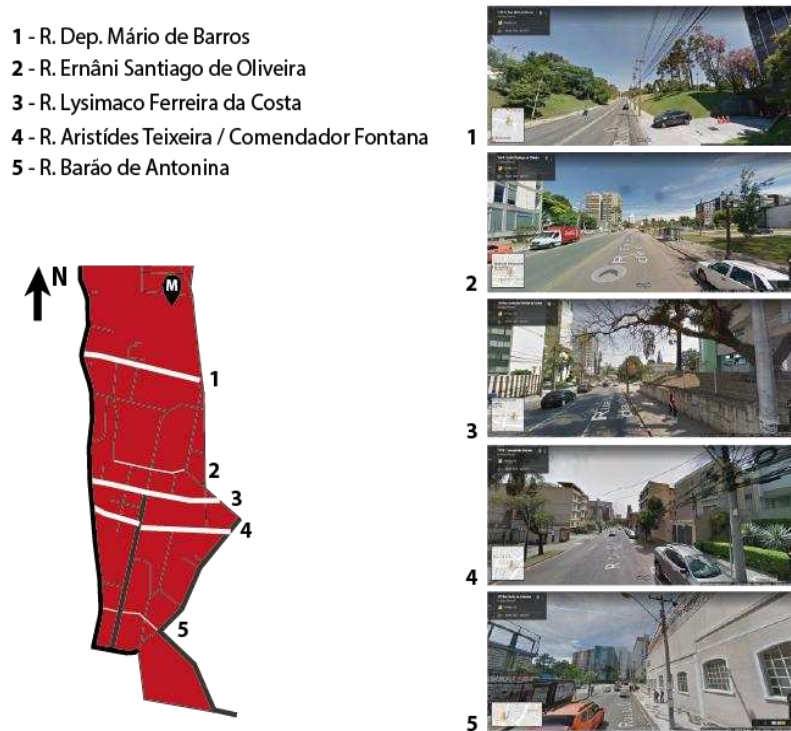


Figure 21: SE-CC zone's cutout and images from Street View taken from marked streets.

Two scenarios were created: the least and the most favorable shading scenario for PV energy generation according to distances for sidewalks and streets combined with buildings heights (Table 8). Min S defines the minimal shading scenario (most favorable for PV energy generation) and Max S defines the maximum shading scenario (least favorable for the PV system). In general, the minimal shading scenario was based on a case with large streets and sidewalks combined to a one floor building or vacant site surrounded by a wall. The parameters indicated in Table 8 are presented in Figure 22, which is an example of how the urban parameters were created.

Table 8: Urban parameters for each city.

	Curitiba		Belo Horizonte		Recife	
Parameter	Min S	Max S	Min S	Max S	Min S	Max S

A	Building height	12 m		9 m		12 m	
B	Building height	4 m	26 m	2.5 m	9 m	4 m	45 m
a	Front setback	15 m	5 m	15 m	5 m	15 m	4.75 m
b	Sidewalk width	4 m	1.5 m	7 m	1.5 m	4 m	1 m
c	Street width	16 m	9 m	10 m	7 m	11 m	5 m
d	Side/rear setback	5 m		6 m		5.5 m	
2a+2b+c		54 m	22 m	54 m	20 m	49 m	16.5 m

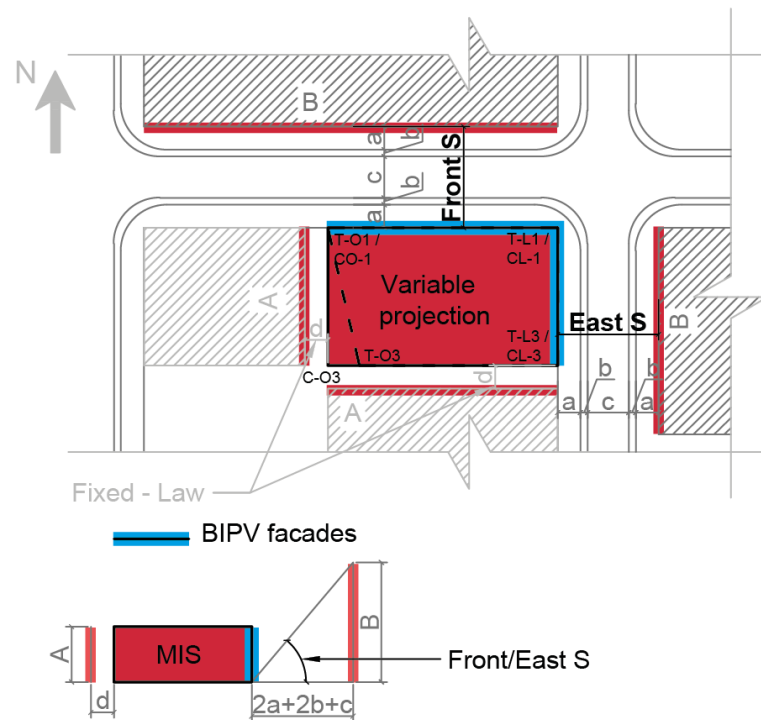


Figure 22: Scenario 1 - Maximum shading - minimal distances for parameters Front S and East S.

In each scenario, for each city, two independent urban parameters were created: Front S and East S, which are the shading angles, created based on the distances between the museum North or East façade and the surrounding building. Table 9 presents the intervals for the parameters Front S and East S for each city.

Table 9: Independent urban parameters for each city based on the shading angles.

Curitiba - PR	Belo Horizonte - Recife - PE
----------------------	-------------------------------------

	MG		
East D	5° - 50°	3° - 24°	5° - 70°
Front D	5° - 50°	3° - 24°	5° - 70°
Step	5°	3°	5°

2.4. Configuration for simulation-based optimization

Simulation-based optimization was conducted in Octopus 0.36 for the three created models. The algorithm selected to generate the solutions was SPEA-2, a genetic algorithm present in Octopus that was set to create a population of 100 solutions per generation. This number is duplicated in each generation to create the parents and proceed with crossover operations [3]. Mutation probability was set to 0.04, based on recommendations from Magnier [50]: $1/\text{number of variables}$; and the type of mutation was Polynomial [51].

The two objective functions that conducted the optimization were minimizing annual heat loads for heating and cooling per building area and maximizing the annual electricity generated by the STPV system. Also, maximizing parameters diversity was chosen in Octopus as a third objective function to guarantee a diversity of solutions and avoid that the algorithm is confined into a local search. Optimization termination criterion was convergence, monitored with the genetic distance graphic for each model. When convergence was reached, all solutions were saved according to the generation they were found.

Optimization was conducted in a computer Intel Core i5 3.00 GHz, with 8 GB of RAM. The weather files used are in TRY format, with base years 2001-2010, and were extracted from Inmet [52].

After optimization, some Pareto solutions were selected for analysis, and the VRF HVAC was inserted and simulated in EnergyPlus.

3. RESULTS AND DISCUSSION

For each optimization process, convergence time was identified and some solutions were chosen in order to identify forms that led to the highest PV energy generation and lowest thermal loads.

3.1. Optimization and convergence

Table 10 presents the time spent in the optimization process for each city, the number of generations that were created and when convergence started to happen. Appendix B present graphs of the convergence, comparing the last generation and the previous ones. Analyzing these graphs, one could consider a different generation interval to define as convergence point, however for this research, the point considered as convergence was when the border of the Pareto front curve stopped presenting alterations between the generations. In Table 10, it can be observed that although approximately the same amount of generations were created for Belo Horizonte and Recife, the last one's optimization time was higher. It happened because for Recife, six design days were used, while for the other cities, only two were set. Because Recife is a city considerably hotter than the other ones, a different strategy to size the HVAC system was needed, in order to keep the number of unmet hours under 300h, complying with Standard 90.1 limit [45]. However, both cities' models, Belo Horizonte and Recife, converged between generations 55 and 60. Curitiba converged faster, as shown in Appendix B, even though the number of possible solutions was higher than Belo Horizonte (Table 10). It could be due to the random feature of SPEA-2, which employs a random method for creating solutions combined with a selection method based on the objective functions' results.

Table 10: Optimization time for each city and time of convergence.

	Curitiba - PR	Belo Horizonte - MG	Recife - PE
Optimization time (h)	212	284	375
Number of generations	60	82	83
Convergence (generation)	40-45	55-60	55-60
Number of possible solutions*	4.48×10^{19}	3.58×10^{19}	6.27×10^{19}

* Number of solutions that could be created by the optimization algorithm if all parameters were combined for each city.

Figures 23, 24 and 25 present the convergence graphs of the Pareto file solutions, extracted from Octopus. The solutions of each five generations are presented, with 20 highlighted cases (in red): 9 best solutions for heat loads and PV electricity generation each, and the worst solution for heat loads and PV generation (n). The convergence graphs are similar for all the cities, however the results for each objective function present different ranges: heat loads of 20.11 to 27.23 kW/m² and PV generation of 21,454.36 to 55,705.55 kWh in Curitiba, the coldest city with higher latitude; heat loads of 75.99 to 92.80 kW/m² and PV generation of 31,977.07 to 68,737.92 kWh in Belo Horizonte; and heat loads of 231.77 to 275.36 kW/m² and PV generation of 18,428.04 to 81,233.70 kWh in Recife, the hottest city located close to the Equator. Figure 26 presents the highlighted cases that show this difference of interval.

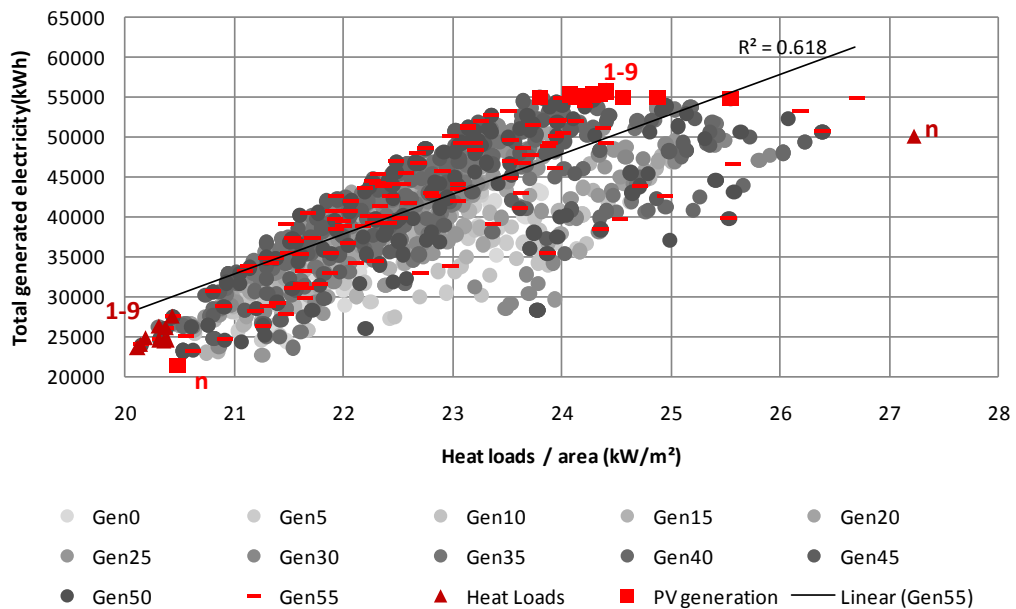


Figure 23: **Curitiba's** convergence graph of the Pareto solutions extracted from Octopus and 9 best solutions for heat loads and PV electricity generation. Worst solutions (n) for both objective functions are shown in red.

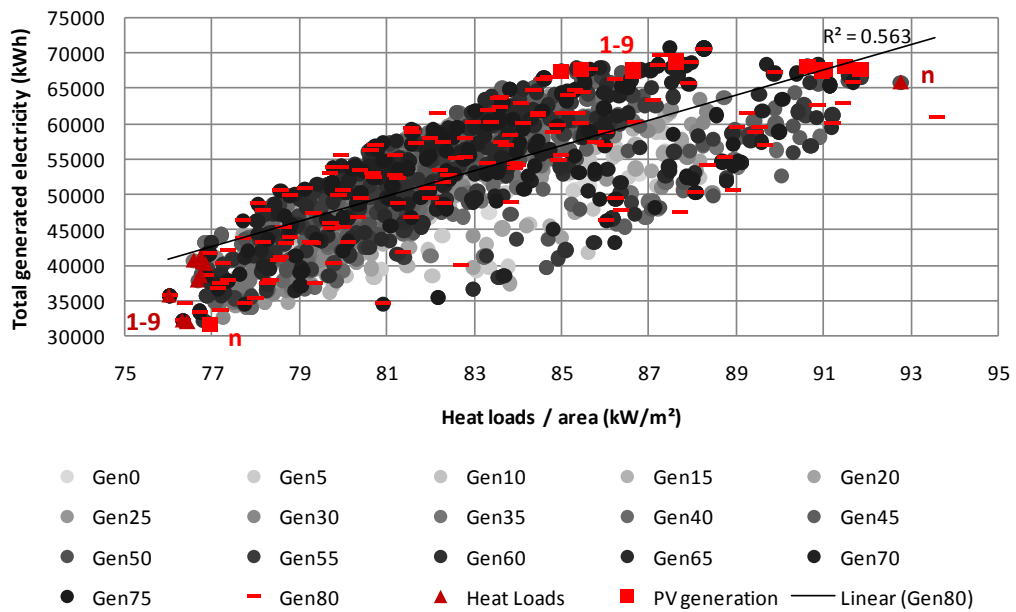


Figure 24: **Belo Horizonte's** convergence graph of the Pareto solutions extracted from Octopus and 9 best solutions for heat loads and PV electricity generation. Worst solutions (n) for both objective functions are shown in red.

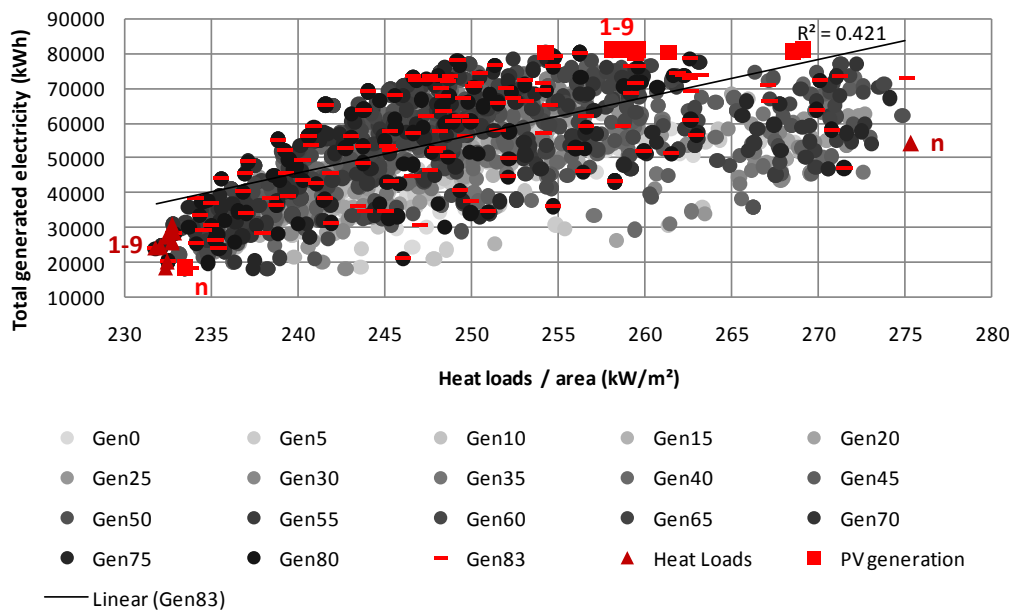


Figure 25: **Recife's** convergence graph of the Pareto solutions extracted from Octopus and 9 best solutions for heat loads and PV electricity generation. Worst solutions (n) for both objective functions are shown in red.

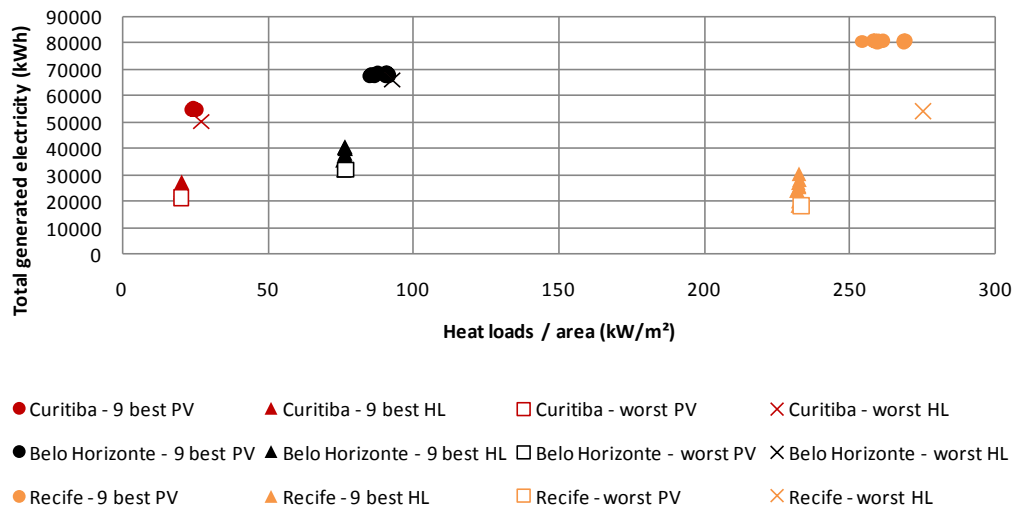


Figure 26: Best and worst solutions for PV electricity generation and heat loads for all cities.

The trend lines in Figures 23 to 25 show the dispersion of the solutions of the last generation for each city. A low determination coefficient, varying from 0.421 to 0.618, indicates how the algorithm conducts the optimization to avoid local search that may forfeit the results, provided by setting the function "diversify parameters". In addition, SPEA-2 saves either the fittest solutions in the Pareto file to compose new generations and not optimal solutions to guarantee parameters diversity [53]. Besides that, because the optimization was set to three objective functions, the Pareto front formed during the optimization was likely a surface, and when the "diversify parameters" was excluded from the analysis, it caused a dispersion of some solutions in Figures 27 to 29. Thus, a clear and unique Pareto front curve is not seen in these figures.

Table 11 presents the improvement of solutions reached by the optimization for each city. It can be observed that Curitiba, which presented the lowest heat loads, also presented the highest potential for improvement on this objective function (26.15%), while Recife, with the highest potential for PV electricity generation and highest heat loads, presented the highest range for PV electricity generation (340.8%) and lowest improvement on heat loads (15.9%). Overall, for all cities, PV electricity generation was the most sensitive objective function for the designed model.

Table 11: Solutions' improvement for the objective functions for each city.

	Curitiba - PR	Belo Horizonte - MG	Recife - PE
Improvement on Heat loads*	26.2%	18.9%	15.9%
Improvement on PV electricity generation**	159.7%	115.0%	340.8%

* Based on the maximum for heating and cooling.

** Based on the minimum.

3.2. Energy balance

It can be noted that Curitiba, in Figure 27, and Belo Horizonte, in Figure 28, presented a similar potential for supplying the building's electricity consumption - up to 16.1% and 16.5% respectively. Recife presented a maximum supply of 13.9% and the highest electricity consumption (Figure 29).

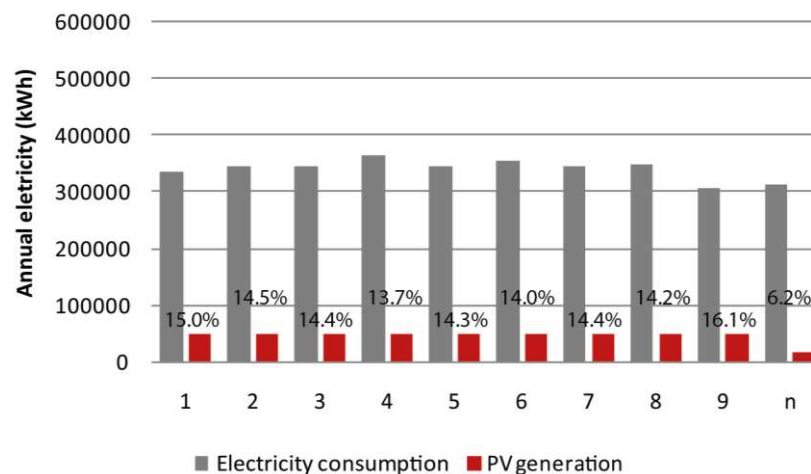


Figure 27: Annual electricity consumption and electricity generation for the best PV cases and the worst (n) case among all selected for **Curitiba**.

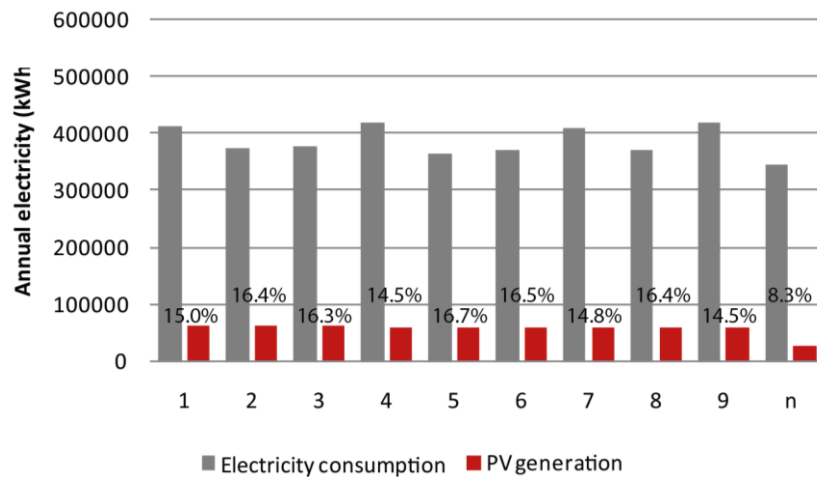


Figure 28: Annual electricity consumption and electricity generation for the best PV cases and the worst (n) case among all selected for **Belo Horizonte**.

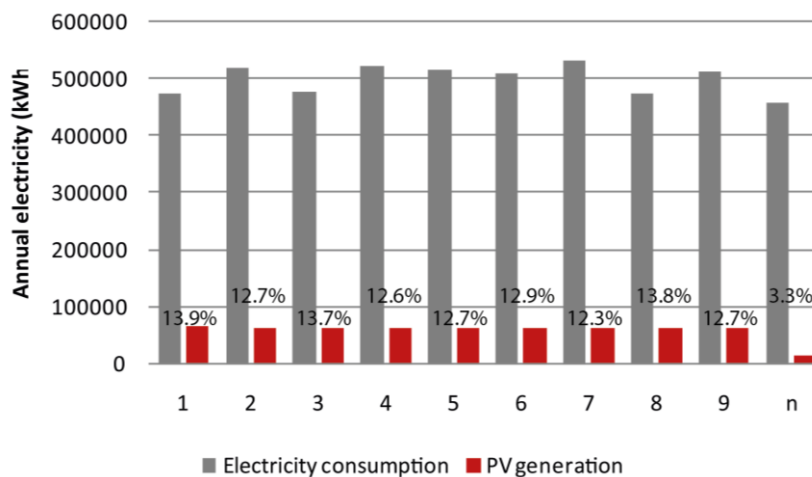


Figure 29: Annual electricity consumption and electricity generation for the best PV cases and the worst (n) case among all selected for **Recife**.

Although the electricity generation seems low, it can supply up to 90.2% of the HVAC consumption of Curitiba optimized buildings (Figure 30), although lighting and equipment end uses of all solutions are approximately 82%. In addition, because Curitiba is located in the highest latitude among the studied cities, PV modules on façades tend to be more efficient for electricity generation. For Belo Horizonte, the PV system can supply up to 50.7% of the HVAC electricity consumption while the end uses of the lighting and equipment systems are close to 67% of the building electricity consumption (Figure 31). In Recife, the sum of the end uses of lighting and equipment of 55% is close to HVAC electricity consumption of 45% due to Recife's highest HVAC demand. Then, the PV system can supply up to 30.5% of the HVAC electricity consumption (Figure 32).

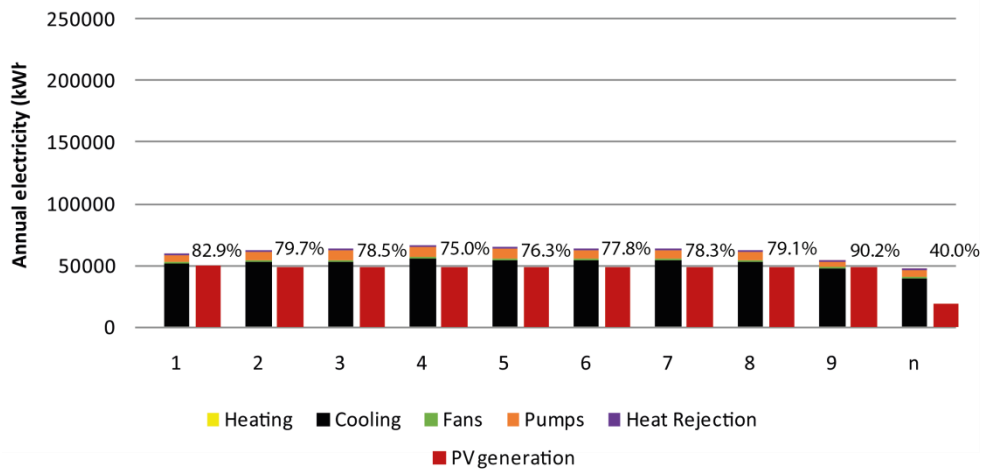


Figure 30: Electricity generation and HVAC electricity consumption for best PV generation solutions (and the worst) and percentage of supplied energy for **Curitiba**.

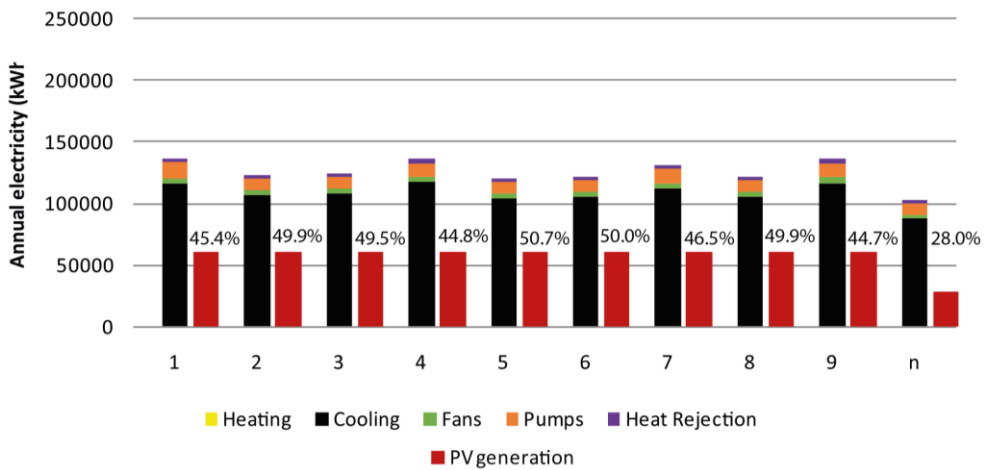


Figure 31: Electricity generation and HVAC electricity consumption for best PV generation solutions (and the worst) and percentage of supplied energy for **Belo Horizonte**.

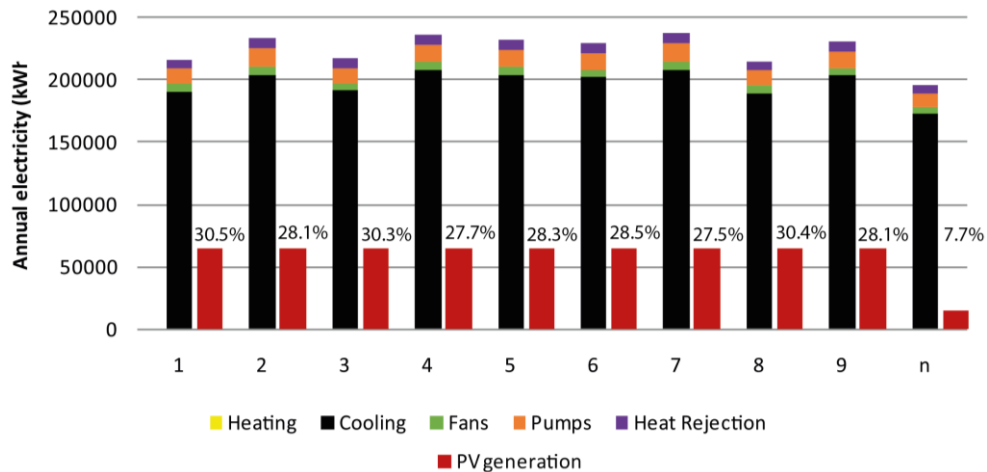


Figure 32: Electricity generation and HVAC electricity consumption for best PV generation solutions (and the worst) and percentage of supplied energy for **Recife**.

In summary, although the hottest city, Recife, presents the highest electricity generation, it also presents the highest energy demand for air conditioning and, consequently, the lower PV electricity supply. In addition, the North and East glazed façades with PV cells contribute to the increase of HVAC cooling loads. Although Curitiba presents low winter temperatures, heating loads were almost insignificant. The glazed façades contributed to decrease heating loads and, consequently, the electricity generated by the PV system could supply almost entirely⁵ (79.6%) of the HVAC consumption. In addition, the roof also has a possibility to generate more electricity, which was not considered in the present study as it aimed to analyze the façade composition due to the PV generation optimization.

Figures 33 to 35 compare electricity generation and consumption for the best solutions for heat loads. The building demand supplied by the photovoltaic system is low for all cities, reaching a maximum of 8.0% among the ones with the lowest heat loads per building area for Curitiba, 9.6% for Belo Horizonte and 4.8% for Recife.

⁵ It must be considered that the PV system employed is a simplified model, suitable for initial design phases. To identify electricity consumption and generation with more precision, the solutions at study need to be refined in later phases of design, when more detailed information is gathered.

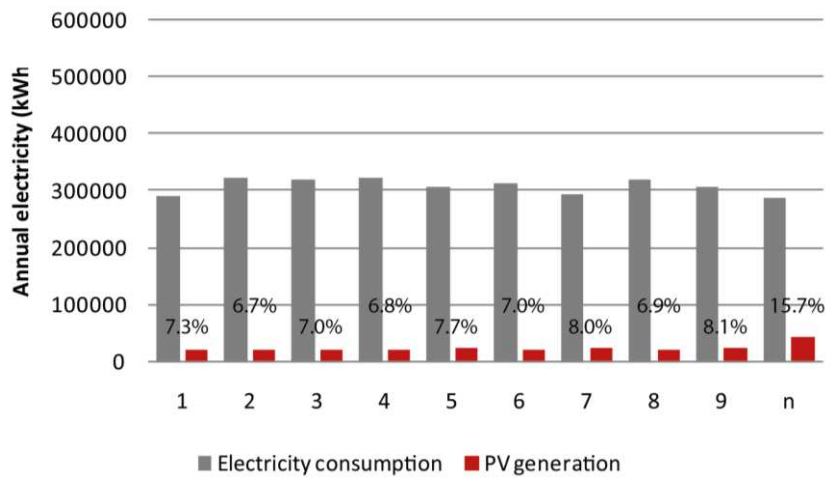


Figure 33: Annual electricity consumption and generation for best heat loads cases and the worst one (n) and % of demand supplied by the HVAC system for **Curitiba**.

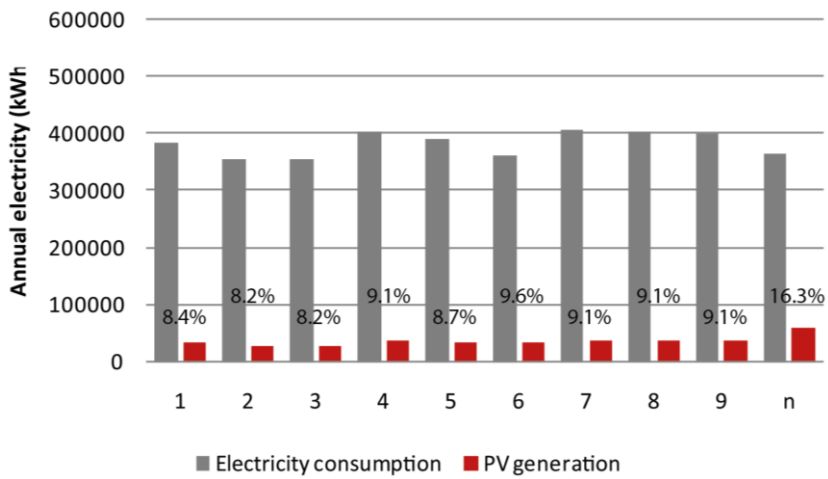


Figure 34: Annual electricity consumption and generation for best heat loads cases and the worst one (n) and % of demand supplied by the HVAC system for **Belo Horizonte**.

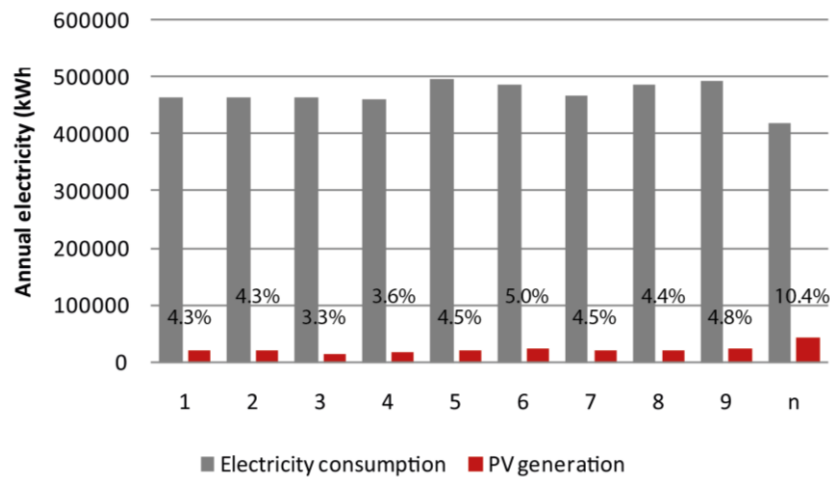


Figure 35: Annual electricity consumption and generation for best heat loads cases and the worst one (n) and % of demand supplied by the HVAC system for **Recife**.

Comparing the percentage of the buildings consumption supplied by the PV system between the best solutions for PV electricity generation and heat loads, it can be inferred that optimizing for PV generation is more efficient. The decrease in electricity consumption caused by the buildings form is not compensated by the losses in electricity generation. This fact is due to the movement of points in the facades cause a great variability on the modules areas and tilts, while it causes small changes in the rooms areas and, consequently, on heat loads.

3.3 PV energy generation and building form

Figures 36 to 38 present the form of the nine best solutions (1 to 9) for PV generation - which were highlighted in Figures 23 to 25 - and the worst solution (n) for each city. Concerning the shading angle caused by the surroundings in North and East façades, it can be noted that for Curitiba, the angle is always minimal for North façade in the best solutions (varying from 5°-10°) while for East façade it presents a higher range (10°-15°). For Belo Horizonte, in North façade, the angle is always minimal (3°) and in East façade, it varies from 3°- 6°. For Recife, both North and East façades present shading angle varying from 5°-10°. The worst solutions for PV electricity generation present expected shading angles. In Curitiba, 50° at both North and East façades, while in Belo Horizonte, a maximum angle of 21° at North façade and 15° at the East. Recife presented a maximum shading angle of 70° at both façades. These results indicate that in general, the East façade is less dependent on the shading angle than the North.

Regarding the form of the solutions, a wide variety can be noted for the nine best solutions for all cities. Although there is a trend for the model to acquire a pyramid's form, some modules do have a negative tilt. Especially, in East façades some solutions have only the two superior modules among six facing the sky dome, such as solution 7 for Curitiba and solutions 1 and 4 for Belo Horizonte. These two modules are more horizontally tilted to receive beam solar radiation when the sun altitude is higher. Despite shading over the lower modules, the receiving radiation of these two modules compensate the lower electricity production of the other modules. Finally, worst solutions for all the cities present a similar form: in addition to high self-shading angles, the solutions present an inverted pyramid form.

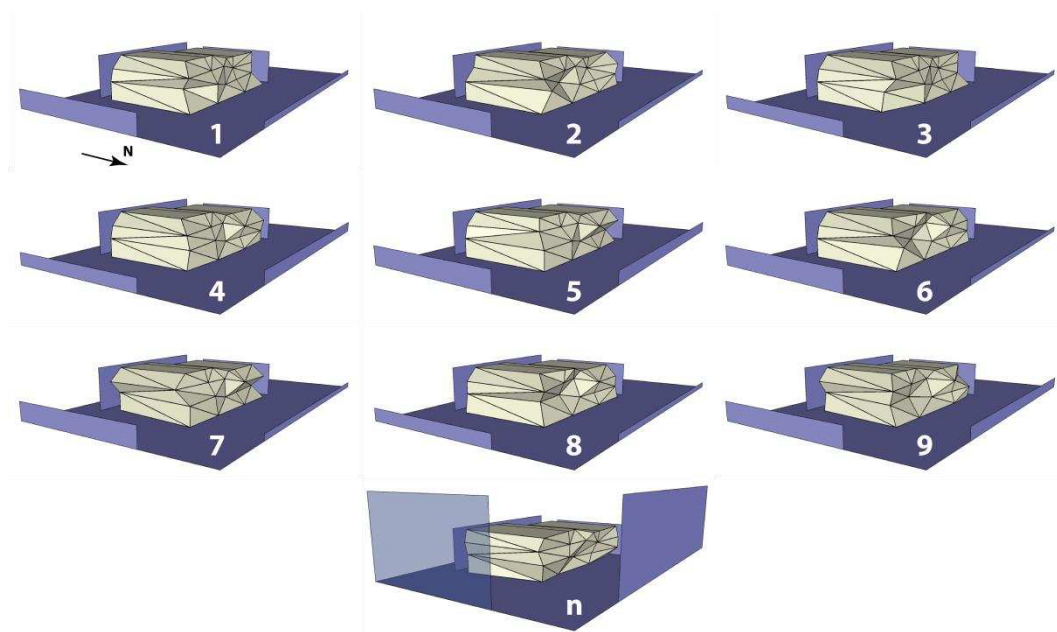


Figure 36: Best (1 to 9) and worst (n) solutions for PV electricity generation for **Curitiba**.

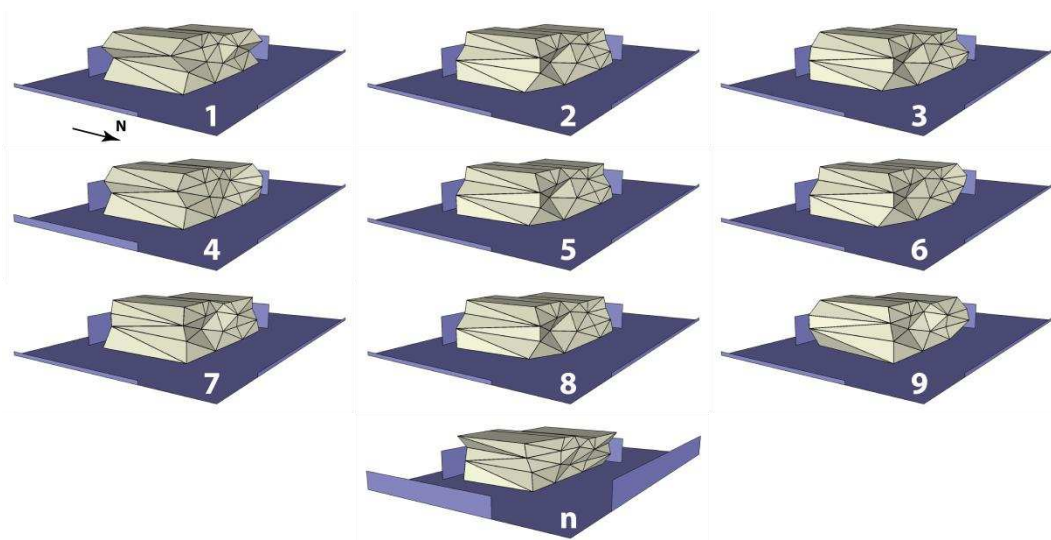


Figure 37: Best (1 to 9) and worst (n) solutions for PV electricity generation for **Belo Horizonte**.

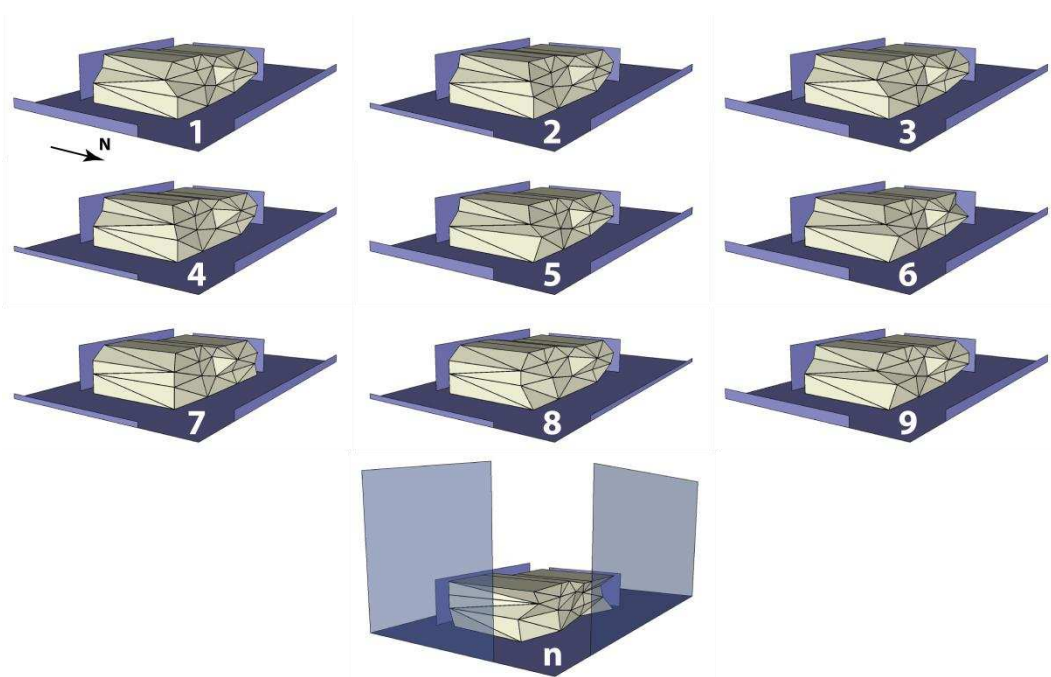


Figure 38: Best (1 to 9) and worst (n) solutions for PV electricity generation for **Recife**.

The form parameters correlation with the produced electricity is presented in Figure 39 with a coefficient of determination (R^2) of 0.688 for Curitiba. Belo Horizonte and Recife's cases presented a similar pattern and similar coefficients of determination, 0.674 and 0.667 respectively. Although the R^2 are low, a good relationship between the product of module area with the tilt and the generated electricity for modules of positive tilts can be seen. On the other hand, modules of negative tilts and high areas do not present a good linear relationship.

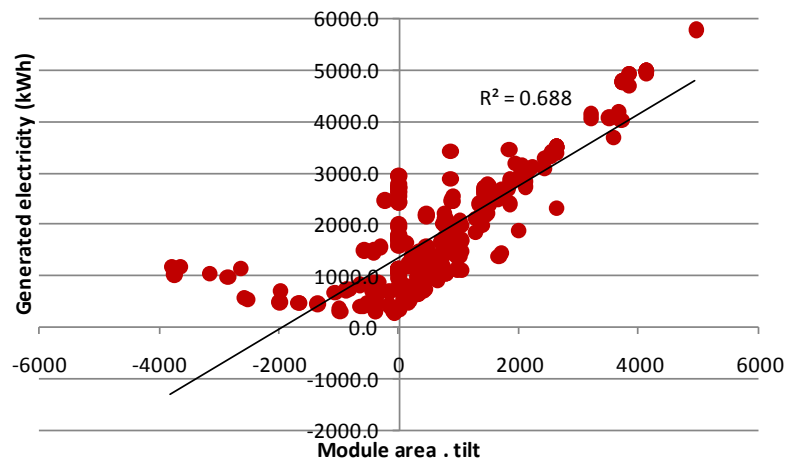


Figure 39: Generated electricity X Module area * tilt for the nine best solutions for **Curitiba**.

Figure 40 presents the coefficients of determination (R^2) for each of the nine best solutions and the worst one (n) for all the studied cities, considering the electricity generated and the product of the modules areas by the tilts. It can be noted that all the nine best solutions present a medium to high R^2 , varying from 0.537 to 0.867, while the worst solutions have a R^2 varying from 0.161 to 0.289. It can be seen how the building forms relate to electricity performance.

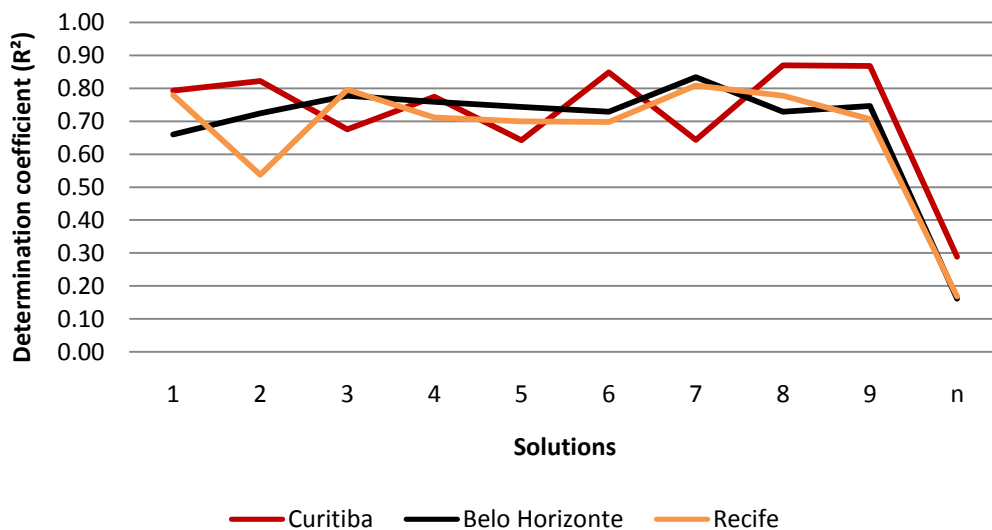


Figure 40: Coefficients of determination for "generated electricity X Module area * tilt" for the nine best solutions for PV generation and the worst for all cities.

Figures 41 to 43 present an analysis of each façade module tilt for each of the nine best solutions and the worst for PV electricity generation for all the cities. Associated to Figures 44 to 46, these figures indicate which modules always

present a positive tilt and how is the form of the façades for the best electricity generation case.

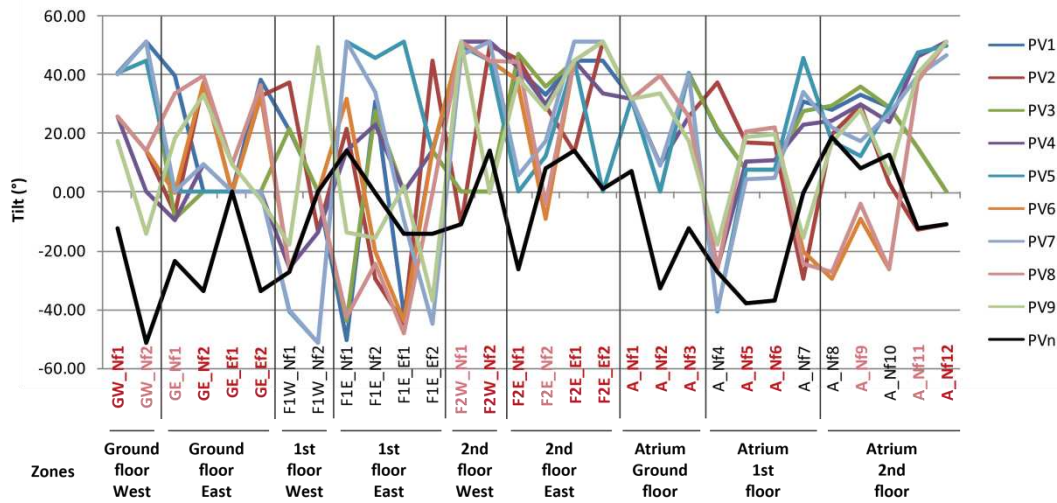


Figure 41: Façades modules tilts for **Curitiba**, latitude 25°25'. Modules in red present vertical or positive tilt for all nine best solutions; modules in pink present vertical, positive or light negative tilt; modules in black are the ones that can present negative tilts for some solutions.

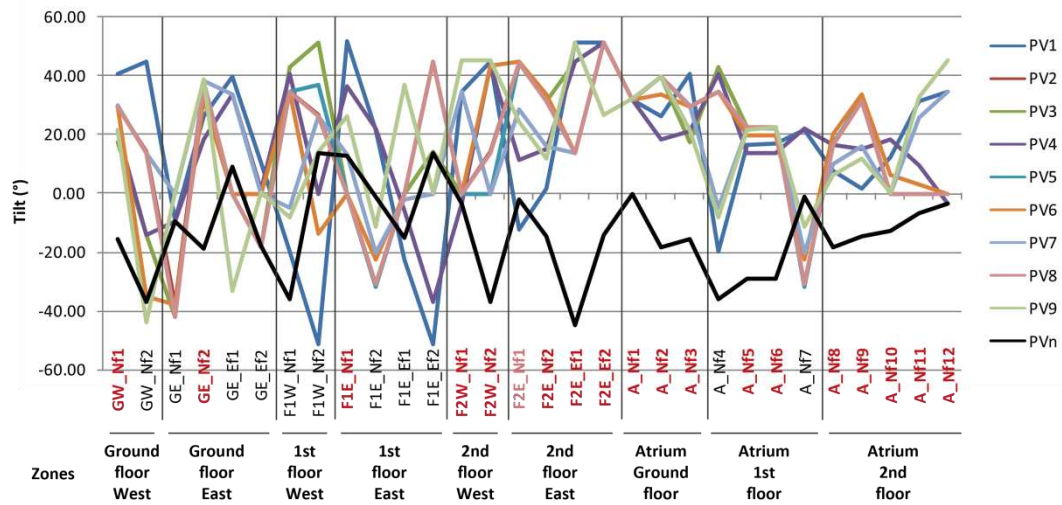


Figure 42: Façades modules tilts for **Belo Horizonte**, latitude 19°55'. Modules in red present vertical or positive tilt for all nine best solutions; modules in pink present vertical, positive or light negative tilt; modules in black are the ones that can present negative tilts for some solutions.

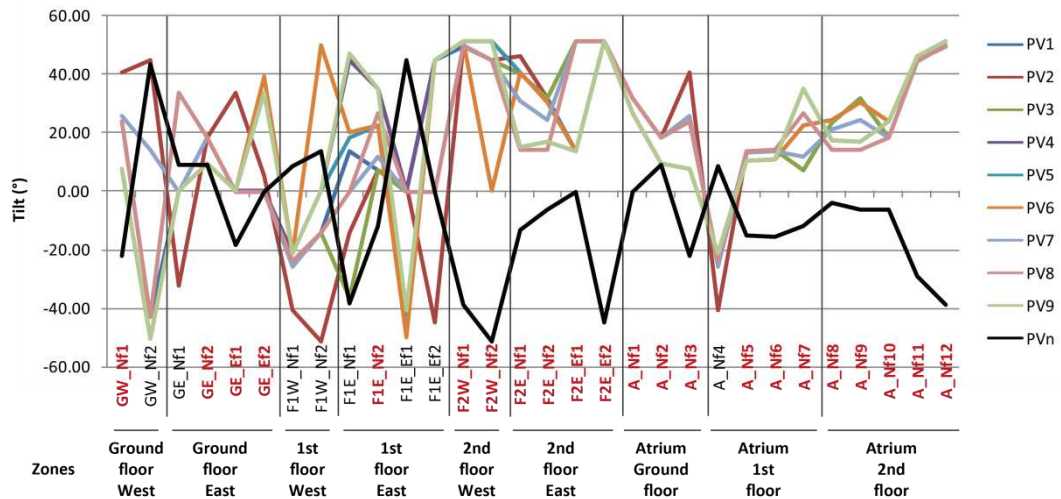


Figure 43: Façades modules tilts for **Recife**, latitude 08°03'. Modules in red present vertical or positive tilt for all nine best solutions; modules in pink present vertical, positive or light negative tilt; modules in black are the ones that can present negative tilts for some solutions.

Figures 41 and 44 show a trend for all modules at the ground floor to present a positive tilt, facing the sky dome, in Curitiba. Most modules at the second floor also tend to present the same behavior. This form decreases the PV electricity generation of the intermediate modules, located at the first floor, but the other floors compensate the electricity production.

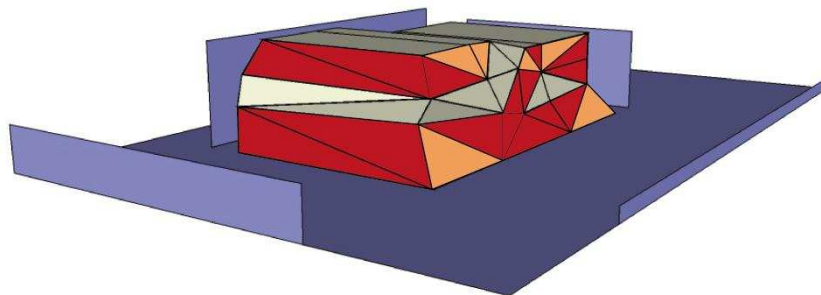


Figure 44: Best solution for PV electricity generation for **Curitiba**. Red PV modules present a vertical or positive tilt for all nine best solutions. Orange modules can present a vertical, positive or light negative tilt.

The electricity generation of the modules at the first floor is not relevant in Belo Horizonte's case of Figures 42 and 45, except for the lower modules in the atrium. The second floor tends to present a high positive tilt, especially for East and West zones.

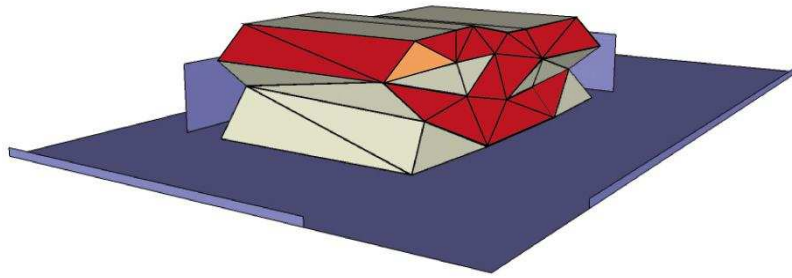


Figure 45: Best solution for PV electricity generation for **Belo Horizonte**. Red PV modules present a vertical or positive tilt for all nine best solutions. Orange modules can present a vertical, positive or light negative tilt.

Recife's case in Figures 43 and 46 presents a similar trend to Belo Horizonte, but the atrium has a pyramid form. All intermediate and higher modules of the atrium present high positive tilts. The ground floor modules also tend to present positive tilts.

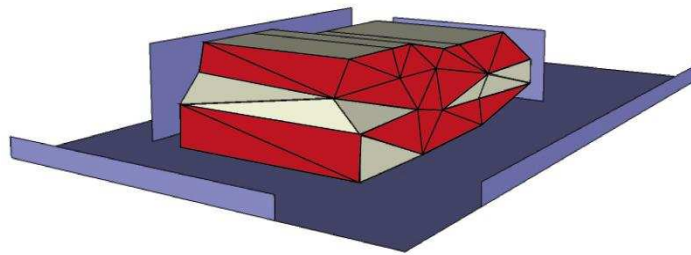


Figure 46: Best solution for PV electricity generation for **Recife**. Red PV modules present a vertical or positive tilt for all nine best solutions.

3.3. Heat loads for optimized cases

Best solutions for heat loads are presented in Figures 47 to 49 (1 to 9). It can be observed that the façade North, for all cities, presented a shading angle caused by the surrounding buildings close to the maximum allowed for each city: 35° - 50° for Curitiba, 21° - 24° for Belo Horizonte and 70° for Recife. In addition to a high shading angle, for all solutions, the North façades tend to be inverted pyramids in all solutions - except a few in Recife. Despite the roof area increase, the inverted pyramidal form surface(s) as a protection from heat gains for glazed façades. Recife's models that presented the highest shading angle also presented a vertical North façade that implies how the surrounding shades exclude the need of the pyramid self-shading form. For East façades, the surrounding shading angle is not a parameter of high impact for Curitiba and Belo Horizonte: in some cases for the first city, the shading angle over the East façade is 25°, while it is 3° for Belo Horizonte's buildings. In addition, the inverted

pyramid is occasional in East façade's form and independent from the climate. For Curitiba and Belo Horizonte, even when the surrounding shading angle is low, some solutions present a vertical form for East façade. The worst solution (n), for all cities and façades - except for East façade in Belo Horizonte's case - present low shading angle. The buildings' forms, however, are different for each city. In Curitiba and Belo Horizonte's cases, most PV modules face the top and, at the same time, create shades over other modules. In Recife's case, the form creates a lot of shades among the modules for the worst case for heat loads.

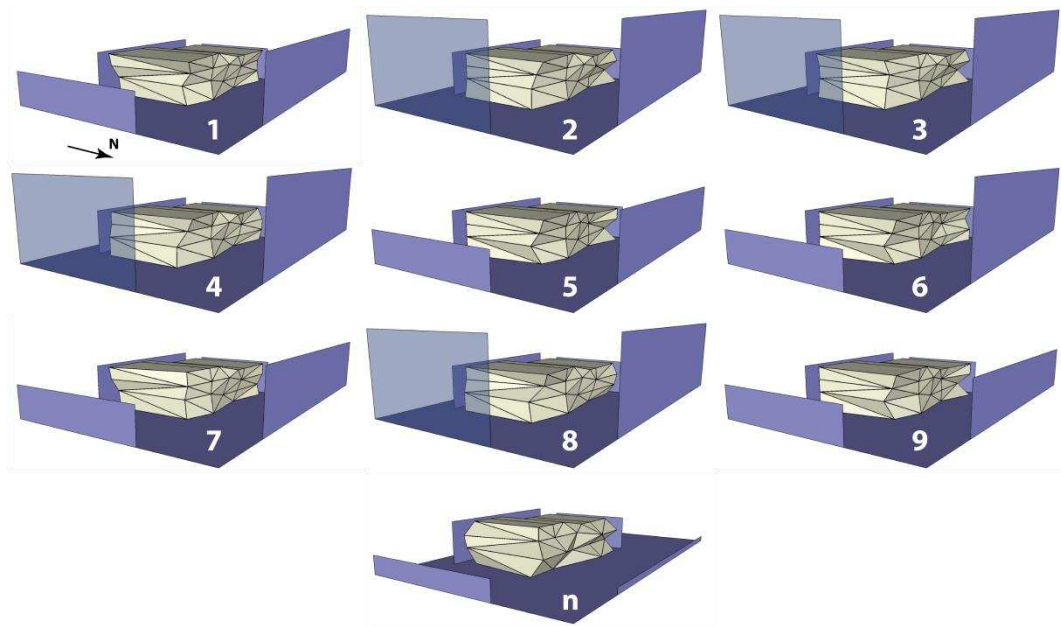


Figure 47: Best (1 to 9) and worst (n) solutions for heat loads for **Curitiba**.

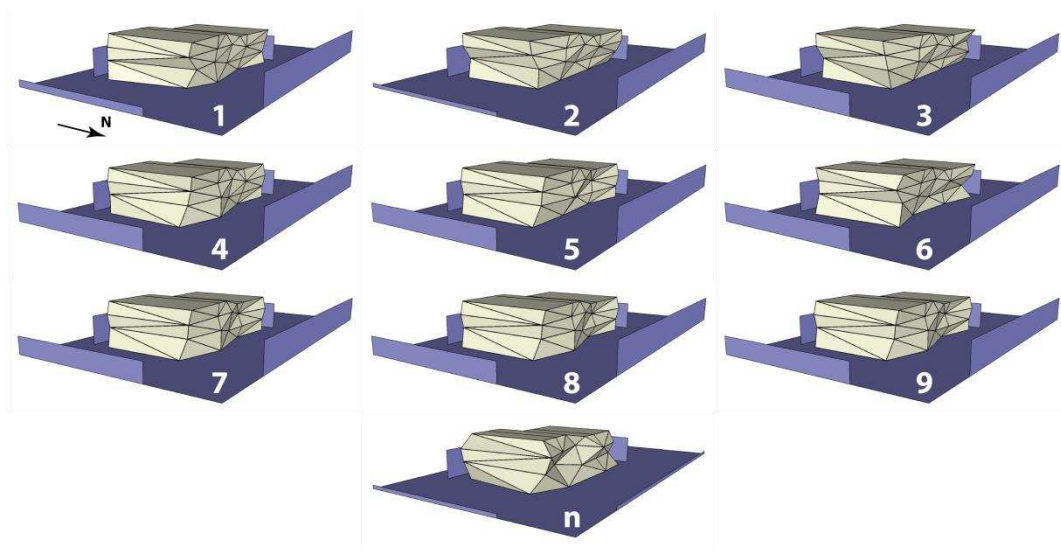


Figure 48: Best (1 to 9) and worst (n) solutions for heat loads for **Belo Horizonte**.

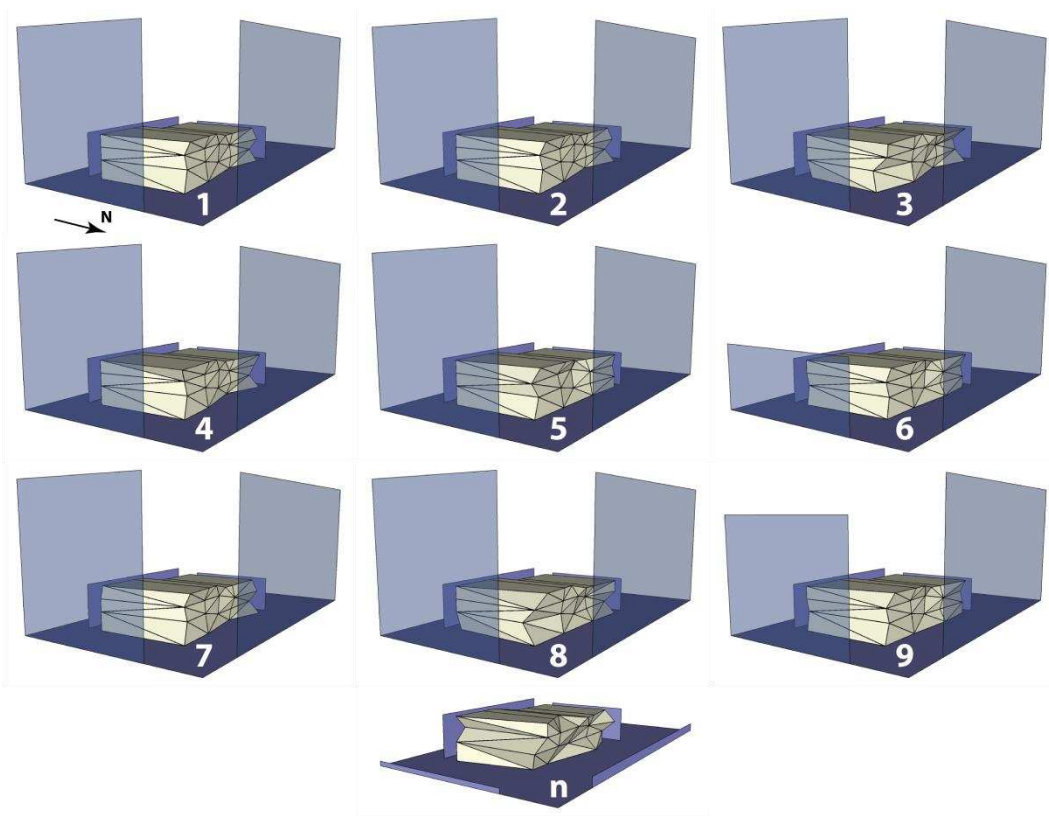


Figure 49: Best (1 to 9) and worst (n) solutions for heat loads for **Recife**.

Figures in Appendix C presents the relationship between the generated electricity and the product of the modules area by the tilts, which is lower than the relationship for the best solutions for PV electricity generation.

4. CONCLUSIONS

The process of building a parameterized model based on a clear concept, extracted from MIS original project, produced a model of high flexibility for the determination of parameters. For the proposed model, all vertices that define the edges of the zones' floors and intersections with stairs were possible to be parameterized, generating a façade composed of intersecting triangles: a multifaceted façade. Honeybee also allowed flexible modeling, once the plug-in presents a high number of inputs that the user can set and also allows expert users to modify the codes. In the case of this research, a limitation of plug-in version and expertise on coding made the optimization considering a real HVAC system for energy consumption calculation impossible - which was bypassed by the appliance of a real HVAC later, on the phase of analysis of some solutions. Tools limitations make the process of applying optimization-based simulation to

design process and solutions analysis time-consuming. However, increasing the use of this method tends to contribute as an incentive for developers to improve the tools and create new ones that facilitate the process of solutions analysis.

The optimization processes applied to all cities also showed to be time-consuming. However, the user is free to determine which point of the optimization process is suitable to stop the simulations: it relies on how close to the maximum or minimum value for the objective functions the user wants to get. In this study, the objective was to analyze characteristics in common for the best solutions; then a high number of generations was needed. However, the user must be aware that the number of independent variables, type (discrete or continuous) and range (range size for each parameter) influence the convergence time.

The method applied to model the urban context was based on real situations observed in the studied cities. It was based on a minimal shading scenario: for example, a combination between large streets and sidewalks and a low rise building surrounding the museum site, or a square or empty site surrounded by a wall; and a maximum shading scenario: narrow streets and sidewalks and high rise buildings. The method, which was based on law codes and street view analysis, allowed to model a simplified context geometry, which provided less time-consuming simulations.

The results of this research showed that although Curitiba has the lowest radiation rates among the cities, it presented the highest potential for energy consumption supply by the PV system applied to the museum's façades. It is due to climate (lowest cooling loads due to the lowest temperatures in summer among the cities, and highest demand on heating loads in winter, which is decreased to almost zero by the glazed PV system applied on the façades) and latitude (Curitiba also has the lowest latitude and present a more favorable scenario for PV appliance on façades). On the other hand, Recife, which presents the highest potential for PV energy generation, presents the lowest energy consumption supply, due to high energy consumption for heat loads.

As expected, in general, best solutions for PV electricity generation presented a low shading angle combined to a generic pyramid-like form, and the best solutions for heat loads presented opposite characteristics. However, among the façades, the shading angle proved to have a higher impact for North façades

than the East ones for both objective functions: maximizing PV electricity generation and minimizing heat loads.

Façades modules tilts multiplied by their areas presented a high determination coefficient for PV electricity generation for the best solutions for this objective function (from 0.537 to 0.867). This relationship is not seen for the worst solutions for PV electricity generation, for shading on the modules does not seem to respond linearly to electricity production. Overall, the best solutions for PV electricity generation in Curitiba's case present modules with positive tilt (facing the top) on the ground and second floor. For Belo Horizonte's case, the observed trend is that the modules in the second floor present a higher positive tilt, and the atrium modules on North façade tend to compose a pyramid-like form. In Recife's case, a higher percentage of modules tend to present positive tilts, with the atrium and second-floor modules presenting a higher impact on electricity production.

5. REFERENCES

- [1] Z. Nagy, B. Svetozarevic, P. Jayathissa, M. Begle, J. Hofer, G. Lydon, A. Willmann, A. Schlueter, The adaptive solar facade: From concept to prototypes, *Frontiers of Architectural Research*. 5 (2016) 143–156. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.foar.2016.03.002>.
- [2] G. Zemella, A. Faraguna, *Evolutionary Optimisation of Façade Design*, 1st ed., Springer London, London, 2014. doi:[10.1007/978-1-4471-5652-9](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5652-9).
- [3] L.P.G. Fonseca, V.D.L. Nunes, L.O. Santana, J.C. Carlo, K.M.L. César Júnior, Otimização multiobjetivo das dimensões dos ambientes de uma residência unifamiliar baseada em simulação energética e estrutural, *Ambiente Construído*. 17 (2017) 267–288. doi:<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000100135>.
- [4] B. Givoni, *Climate considerations in building and urban design*, 1st ed., John Wiley & Sons, New York, 1998.
- [5] E.J. Gago, J. Roldan, R. Pacheco-Torres, J. Ordóñez, The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 25 (2013) 749–758. doi:[10.1016/j.rser.2013.05.057](https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.057).
- [6] X. Shi, W. Yang, Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of architects, *Automation in Construction*. 32 (2013) 125–135. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.01.015>.

- [7] O. of E.E.& R. Energy, About Building Energy Modelling, (n.d.). <https://energy.gov/eere/buildings/about-building-energy-modeling> (accessed November 6, 2017).
- [8] V.S.K. V. Harish, A. Kumar, A review on modeling and simulation of building energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 56 (2016) 1272–1292. doi:10.1016/j.rser.2015.12.040.
- [9] L. Wen, K. Hiyama, A review: simple tools for evaluating the energy performance in early design stages, *Procedia Engineering*. 146 (2016) 32–39. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.349>.
- [10] R. Oxman, Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking, *Design Studies*. 52 (2017) 4–39. doi:<https://doi.org/10.1016/j.destud.2017.06.001>.
- [11] L. Sanches, J.G.F. Abdalla, K.C. Alberto, As pesquisas sobre sistemas generativos: uma revisão sistemática de literatura, *PARC Pesquisa Em Arquitetura e Construção*. 9 (2018) 133–151. doi:<https://doi.org/10.20396/parc.v9i2.8650200>.
- [12] N. Leach, Parametrics Explained, *Next Generation Building*. 1 (2014) 1–10. doi:10.7564/14-NGBJ10.
- [13] G. Celani, A.M.R.G. Monteiro, J.M.S. Franco, V. Calixto, Integração de tecnologias CAD/CAE/CAM no ateliê de arquitetura: Uma aplicação no projeto de edifícios altos, *Gestão & Tecnologia de Projetos*. 12 (2017) 29–52. doi:<http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v12i1.99222>.
- [14] C. Hachem, A. Athienitis, P. Fazio, Evaluation of energy supply and demand in solar neighborhood, *Energy and Buildings*. 49 (2012) 335–347. doi:10.1016/j.enbuild.2012.02.021.
- [15] L.R. Gavia, F.O.R. Pereira, M.O. Mizgier, Influência da configuração urbana na geração fotovoltaica com sistemas integrados às fachadas, *Ambiente Construído*. 13 (2013) 7–23. doi:<http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212013000400002>.
- [16] K. Negendahl, Building performance simulation in the early design stage: An introduction to integrated dynamic models, *Automation in Construction*. 54 (2015) 39–53. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.002>.
- [17] M. Wetter, GenOpt: Generic Optimization Program - User Manual Version 3.0.0, (2009) 104. <https://escholarship.org/uc/item/0wc872r6>.
- [18] A.T. Nguyen, S. Reiter, P. Rigo, A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis, *Applied Energy*. 113 (2014) 1043–1058. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061>.
- [19] D. Gossard, B. Lartigue, F. Thellier, Multi-objective optimization of a building envelope for thermal performance using genetic algorithms and artificial neural network, *Energy and Buildings*. 67 (2013) 253–260. doi:10.1016/j.enbuild.2013.08.026.

- [20] S. Asadi, S.S. Amiri, M. Mottahedi, On the development of multi-linear regression analysis to assess energy consumption in the early stages of building design, *Energy and Buildings*. 85 (2014) 246–255. doi:10.1016/j.enbuild.2014.07.096.
- [21] R. Evins, A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 22 (2013) 230–245. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.004.
- [22] E. Elbeltagi, H. Wefki, S. Abdrabou, M. Dawwod, A. Ramzy, Visualized strategy for predicting buildings energy consumption during early design stage using parametric analysis, *Journal of Building Engineering*. 13 (2017) 127–136. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jobee.2017.07.012.
- [23] T. Méndez Echenagucia, A. Capozzoli, Y. Cascone, M. Sassone, The early design stage of a building envelope: Multi-objective search through heating, cooling and lighting energy performance analysis, *Applied Energy*. 154 (2015) 577–591. doi:10.1016/j.apenergy.2015.04.090.
- [24] I.G. Dino, G. Üçoluk, Multiobjective Design Optimization of Building Space Layout, Energy, and Daylighting Performance, *Journal of Computing in Civil Engineering*. 31 (2017). doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000669.
- [25] M. Ferrara, E. Sirombo, A. Monti, E. Fabrizio, M. Filippi, Influence of Envelope Design in the Optimization of the Energy Performance of a Multi-family Building, *Energy Procedia*. 111 (2017) 308–317. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.095.
- [26] J.H. Kämpf, D. Robinson, Optimisation of building form for solar energy utilisation using constrained evolutionary algorithms, *Energy and Buildings*. 42 (2010) 807–814. doi:10.1016/j.enbuild.2009.11.019.
- [27] J.H. Kämpf, M. Montavon, J. Bunyesc, R. Bolliger, D. Robinson, Optimisation of buildings' solar irradiation availability, *Solar Energy*. 84 (2010) 596–603. doi:10.1016/j.solener.2009.07.013.
- [28] G. Lobaccaro, S. Chatzichristos, V.A. Leon, Solar Optimization of Housing Development, *Energy Procedia*. 91 (2016) 868–875. doi:10.1016/j.egypro.2016.06.253.
- [29] V. Granadeiro, J.P. Duarte, J.R. Correia, V.M.S. Leal, Building envelope shape design in early stages of the design process: Integrating architectural design systems and energy simulation, *Automation in Construction*. 32 (2013) 196–209. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2012.12.003.
- [30] S. Bucking, R. Zmeureanu, A. Athienitis, An information driven hybrid evolutionary algorithm for optimal design of a Net Zero Energy House, *Solar Energy*. 96 (2013) 128–139. doi:10.1016/j.solener.2013.07.011.
- [31] T. Wortmann, G. Nannicini, Black-box optimisation methods for architectural design, in: *21st International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA 2016*, Hong Kong, 2016: pp. 1–10.

- [32] T. Wortmann, OPOSSUM Introducing and evaluating a model-based optimization tool for Grasshopper, in: Proceedings of the 22nd International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, Hong Kong, 2017: pp. 283–292.
- [33] N. Corbioli, Diller Scofidio + Renfro: Museu da Imagem e do Som, Rio de Janeiro – Identidade carioca terá novo templo em Copacabana, Arcoweb. (n.d.). <https://www.arcoweb.com.br/projetodesign/arquitetura/diller-scofidio-renfro-museu-rio-16-03-2011> (accessed November 7, 2017).
- [34] M. Ordenes, A. Pedrini, E. Ghisi, R. Lamberts, Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e componentes construtivos brasileiros para simulações no VisualDoe-3.1, Santa Catarina, 2003.
- [35] K. Kapsis, Modelling, design and experimental study of semi-transparent photovoltaic windows for commercial building applications, Concordia University, 2016.
- [36] A.B. de N.T. ABNT, NBR 15220: desempenho térmico de edificações, (2003) 66.
- [37] Q. e T. INMETRO, Instituto Nacional de Metrologia, Regulamento Técnico da Qualidade Para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C), Inmetro, Rio de Janeiro, Brazil, 2013.
- [38] T.T. Rodrigues, J.C. Carlo, Simulação térmica de sistemas BIPV por meio do EnergyPlus, in: XIV Encontro Nacional de Conforto No Ambiente Construído (ENTAC); X Encontro Latino-Americano de Conforto No Ambiente Construído (ELACAC), Balneário Camboriu, 2017: pp. 808–817.
- [39] EnergyPlus, Engineering Reference Manual, (2018) 1715.
- [40] S. Silvestre, A. Boronat, A. Chouder, Study of bypass diodes configuration on PV modules, Applied Energy. 86 (2009) 1632–1640. doi:10.1016/j.apenergy.2009.01.020.
- [41] J.J.C. Gomes, Simulação dinâmica detalhada de um grande edifício no âmbito do RSECE, Universidade do Minho, 2012.
- [42] R. and A.E. ANSI/ASHRAE, American National Standards Institute; American Society of Heating, ANSI/ASHRAE 55-2010: thermal environmental conditions for human occupancy, (2010) 44.
- [43] R. Lamberts, E. Ghisi, A.L.P. Abreu, J.C. Carlo, J.O. Batista, D.L. Marinowski, A. Naranjo, V.C.P. Duarte, Desempenho térmico de edificações, 7th ed., LabEEE, Florianópolis, 2016.
- [44] G. Zannis, M. Santamouris, V. Geros, S. Karatosou, K. Pavlou, M.N. Assimakopoulos, Energy efficiency in retrofitted and new museum buildings in Europe, International Journal of Sustainable Energy. 25 (2006) 199–213. doi:http://dx.doi.org/10.1080/14786450600921645.

- [45] R. and A.E. ANSI/ASHRAE, American National Standards Institute; American Society of Heating, ANSI/ASHRAE 90.1: Energy standard for buildings except low-rise residential buildings - Appendix G, (2013).
- [46] E.B. Pereira, F.R. Martins, A.R. Gonçalves, R.S. Costa, F.J.L. Lima, R. Ruther, S.L. Abreu, G.M. Tiepolo, S. V. Pereira, J.G. Souza, Atlas brasileiro de energia solar, 2nd ed., INPE, São José dos Campos, 2017.
- [47] Curitiba, Dispõe sobre a revisão do Plano Diretor de Curitiba, Brazil, 2000. <https://leismunicipais.com.br/a/pr/c/curitiba/lei-ordinaria/2015/1477/14771/lei-ordinaria-n-14771-2015-dispoe-sobre-a-revisao-do-plano-diretor-de-curitiba-de-acordo-com-o-disposto-no-art-40-3-do-estatuto-da-cidade-para-orientacao-e-controle-do-desenvolvim>.
- [48] B. Horizonte, Altera as leis n. 7165/96 e 7166/96, Brazil, 2010. <https://leismunicipais.com.br/a/mg/b/belo-horizonte/lei-ordinaria/2010/995/9959/lei-ordinaria-n-9959-2010-altera-as-leis-n-7165-96-que-institui-o-plano-diretor-do-municipio-de-belo-horizonte-e-n-7-166-96-que-estabelece-normas-e-condicoes-para-parcelamento>.
- [49] Recife, Promove a revisão do Plano Diretor do município de Recife, Brazil, 2008.
- [50] L. Magnier, Multiobjective optimization of building design using Artificial Neural Network and Multiobjective Evolutionary Algorithms, Concordia University, 2008.
- [51] L. Magnier, F. Haghghat, Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network, Building and Environment. 45 (2010) 739–746. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.016>.
- [52] M. Roriz, Arquivos climáticos em formato TRY, SWERA, CSV e BIN, (n.d.). <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin> (accessed September 2, 2018).
- [53] E. ZITZLER, M. LAUMANN, L. THIELE, SPEA-2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm, (2001) 21 p.
- [54] U. Nations, World Urbanization Prospects, New York, 2014. doi:10.4054/DemRes.2005.12.9.
- [55] E.O.L. Dictionary, Cultural corridor, (n.d.). https://en.oxforddictionaries.com/definition/cultural_corridor (accessed December 8, 2018).

Considerações Finais

Esta pesquisa constituiu-se de um processo de investigação da parametrização e otimização baseada em simulação aplicadas ao estudo de uma edificação de fachadas multifacetadas para melhoria de seu desempenho termo-energético. O potencial de aplicação do método foi demonstrado por meio da alta variabilidade nos resultados das funções objetivo para os modelos criados: no caso da modelagem do Museu da Imagem e do Som-RJ no segundo capítulo, o emprego da otimização gerou soluções com potencial de geração de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos com uma melhoria de até 27,0% em relação ao projeto original da edificação. No caso do modelo de museu de fachadas multifacetadas do terceiro capítulo, o potencial de geração de energia elétrica por sistema fotovoltaico aplicado às fachadas da edificação alcançou uma variação de até 340,8% entre as soluções criadas, para o caso de Recife-PE, e a variação de carga térmica chegou até 26,2% para as soluções criadas para Curitiba-PR. Esta diferença de resultados do potencial de aplicação da otimização baseada em simulação para a geração de energia entre os modelos dos dois capítulos se deve principalmente à liberdade de manipulação da forma induzida pela criação dos parâmetros: no modelo do capítulo 2 foram criadas apenas seis variáveis independentes, e algumas causavam apenas pequenas alterações na volumetria da edificação. Já no terceiro capítulo, o número de parâmetros criados foi 25.

A quantidade de parâmetros criados foi responsável por uma variação no tempo de convergência dos processos de otimização: maior número de variáveis; maior o tempo de convergência. Além disso, o número de variáveis afeta também a complexidade das análises: no capítulo 2 foi fácil identificar as variáveis mais impactantes no desempenho do sistema fotovoltaico, enquanto que no capítulo 3, foi gerada uma maior diversidade de soluções formais com desempenhos semelhantes. No modelo do capítulo 2, foi identificado que a inclinação dos módulos fotovoltaicos integrados à fachada principal possui um impacto maior na geração de energia do que a sua área, enquanto que no

modelo do capítulo 3, cujos módulos da fachada apresentavam maior liberdade de variação quanto à área e inclinação, esta relação não ficou tão evidente. No entanto, a relação do produto da área pela inclinação dos módulos fotovoltaicos apresentou um bom coeficiente de determinação (R^2 médio de 0,676) com relação à energia gerada para os módulos de inclinação positiva.

No capítulo 3 foi estudada a aplicação da parametrização e otimização baseada em simulação para análise de um modelo de edificação de fachadas multifacetadas com relação à geração de energia e carga térmica para três cidades diferentes. Identificou-se que, apesar de Recife apresentar as maiores taxas de radiação, foi a cidade que apresentou o menor percentual de atendimento ao consumo, devido à sua elevada demanda de resfriamento, enquanto que a cidade com menores taxas de radiação, Curitiba, apresentou o maior percentual de atendimento, chegando a atender até mais de 90% do consumo para condicionamento da edificação para algumas soluções otimizadas. Em geral, as melhores soluções para geração de energia para as três cidades apresentaram baixos ângulos de sombreamento dos edifícios vizinhos sobre as fachadas com sistema fotovoltaico, enquanto as melhores soluções para carga térmica apresentaram ângulos elevados. As volumetrias otimizadas das edificações apresentaram grandes variações, porém o padrão pirâmide para geração de energia e pirâmide invertida para carga térmica foram as maiores tendências. Detalhes quanto à volumetria final das soluções otimizadas para cada cidade foram apresentados, mostrando a tendência para a inclinação dos módulos fotovoltaicos.

Com essas duas análises realizadas, observa-se que o método de otimização baseada em simulação é apropriado para problemas de projeto que envolvem muitas variáveis e funções objetivo conflitantes. A dificuldade em se determinar uma correlação elevada entre a geração de energia e a área e inclinação dos módulos fotovoltaicos prova que em casos de grande complexidade formal - como no caso dos modelos de edificação de fachadas multifacetadas em meio urbano, envolvendo o autosombreamento e o sombreamento do entorno - estratégias empíricas empregadas pelo projetista têm potencial limitado de oferecer soluções formais de alto desempenho se comparadas com o método de otimização baseada em simulação. Quando são empregadas funções objetivo conflitantes, como no caso da maximização da

geração de energia pelo sistema fotovoltaico e minimização do consumo para condicionamento, a otimização apresenta a possibilidade de fornecer ao simulador uma grande variedade de soluções e o poder de escolha sobre quais as mais interessantes de acordo com o peso que almeja atribuir a cada função. No caso deste trabalho, foi possível perceber que as variáveis empregadas - movimentação dos pontos nas fachadas - tornaram a otimização mais sensível à geração de energia. Sendo assim, com base nessas variáveis, é mais interessante otimizar priorizando a maximização da geração de energia elétrica ao invés da minimização do consumo. O trabalho também apontou que cidades de maior latitude no Brasil - por exemplo, Curitiba - apresentam maior potencial de atendimento ao consumo por meio de sistemas fotovoltaicos aplicados às fachadas, pois apresentam um menor consumo para condicionamento da edificação.

Com relação ao processo de modelagem paramétrica dos modelos de museu de fachadas multifacetadas criados, identificou-se que uma simplificação dos modelos - não com relação ao número de parâmetros, mas com relação à volumetria da edificação - conduz a uma modelagem mais rápida. No capítulo 2, o projeto do MIS foi modelado com base nos desenhos técnicos existentes, enquanto que no capítulo 3, o conceito que os projetistas utilizaram para a criação da volumetria do MIS foi utilizado para criação de um novo modelo de museu de fachadas multifacetadas. O segundo método possibilitou uma maior liberdade na criação dos parâmetros e, conseqüentemente, maior variação quanto à variabilidade da geração de energia entre as soluções criadas. Portanto, os métodos utilizados comprovam que, se aplicada em fases iniciais de projeto, a modelagem paramétrica e otimização baseada em simulação, apresentam maior potencial de melhoria do desempenho das soluções criadas.

Em relação à aplicação da otimização baseada em simulação, identificou-se que esta abordagem exige um domínio técnico do projetista para a modelagem dos sistemas necessários ao cálculo do desempenho. Além disso, os *plug-ins* utilizados (Archsim e Honeybee), que permitem a conexão entre o modelo geométrico criado no Grasshopper com o programa de simulação, EnergyPlus, apresentam ainda limitações para o cálculo preciso de geração de energia e limitações quanto à modelagem de alguns sistemas. Entre essas limitações, pode-se citar a impossibilidade de se modelar sistemas mais robustos

para o cálculo da geração de energia fotovoltaica, disponíveis no EnergyPlus e a limitação quanto à possibilidade de configuração de alguns parâmetros para simulação. Considera-se que limitações não impedem sua aplicação em estágios iniciais de projeto, quando a forma/volumetria da edificação se encontra em estudo. No caso do Honeybee, se o usuário da ferramenta for também um programador, essas limitações podem ser contornadas, uma vez que atualmente o *plug-in* possui código aberto. No entanto, o usuário dessas ferramentas deve estar ciente das limitações para programar o seu tempo de dedicação na aplicação do método de otimização apresentado. Devido ao fato de os *plug-ins* encontrarem-se em estágio de aperfeiçoamento pelos desenvolvedores, os usuários das ferramentas constituem-se importantes colaboradores para sua melhoria. No entanto, eles devem estar atentos para que as limitações dos *plug-ins* não afetem o desenvolvimento de suas pesquisas.

Sugestões para trabalhos futuros

A partir desse trabalho recomenda-se um estudo mais aprofundado da geração de energia fotovoltaica para as soluções selecionadas para análise com a aplicação de um modelo mais robusto de cálculo da geração fotovoltaica. Com isso, a estimativa do potencial de atendimento ao consumo poderá ser estimada com maior precisão para as soluções de maior potencial de geração de energia identificadas na otimização. Outras sugestões de estudos compreendem:

- avaliação do potencial de atendimento ao consumo de edificações de superfícies multifacetadas, considerando-se a aplicação de módulos fotovoltaicos também na cobertura, com o emprego da otimização baseada em simulação;

- análise da convergência das soluções para o modelo proposto considerando-se outros algoritmos de otimização para verificação de quais algoritmos são mais rápidos em atingir a convergência.

Com este trabalho, verificou-se ainda a necessidade de melhoria das ferramentas empregadas, de modo que as análises de soluções pudessem ser realizadas diretamente no Grasshopper/Rhinoceros e, assim, poupando tempo no tratamento de dados. Como exemplo, o Octopus poderia fornecer, além do gráfico, uma lista com os resultados das funções objetivo para todas as soluções

criadas, de modo que o projetista pudesse encontrar as soluções pelo desempenho, e não de forma visual apenas. Outros *plug-ins*, como por exemplo, o Archsim e o Heneybee, precisam ser aperfeiçoados para fornecer uma simulação mais detalhada, com resultados mais precisos. Pesquisas com o emprego da otimização baseada em simulação apresentam potencial para fornecer *feedback* para os desenvolvedores das ferramentas para sua crescente melhoria.

APÊNDICE A

People occupation rate for each zone for the proposed museum. Maximum value (1) means that 100% of people determined in Table 5 is in the respective zone.

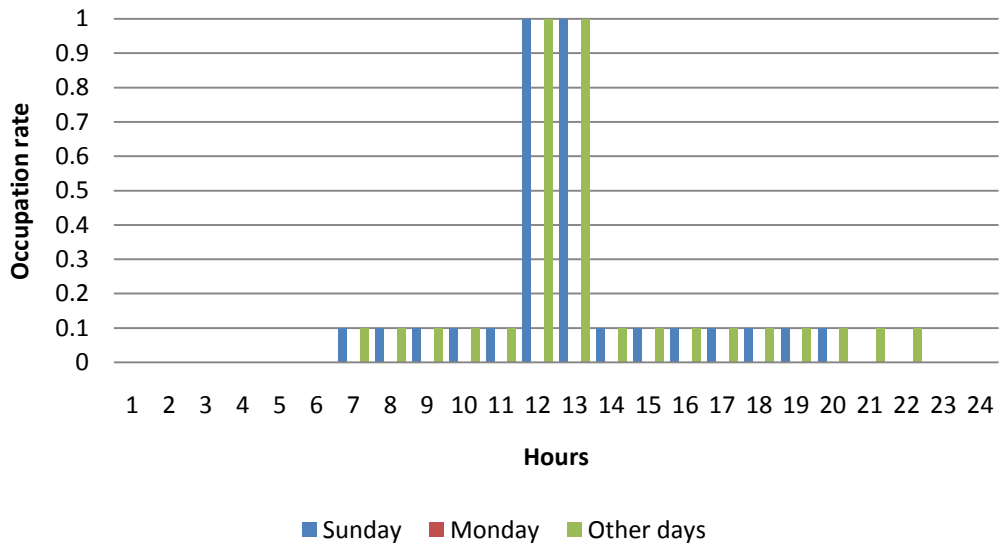


Figure 1: Occupation rate - Kitchen/Restaurant (G-W).

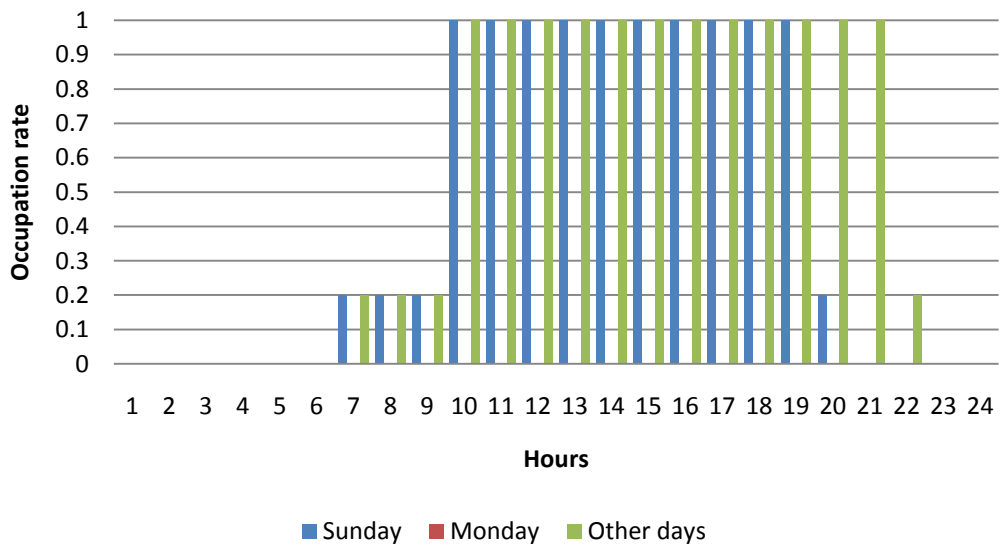


Figure 2: Occupation rate - Exhibition rooms (Atrium, G-E, F1-W, F2-W, F2-E).

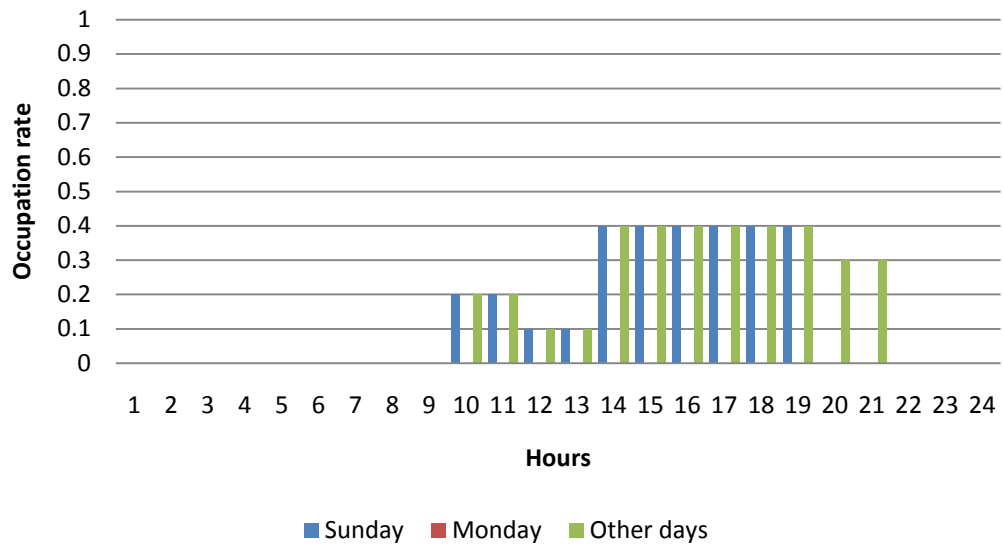
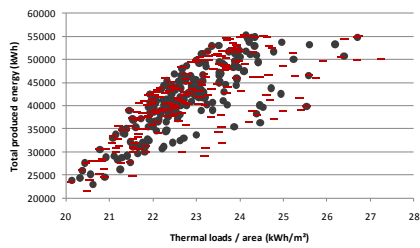


Figure 3: Occupation rate - Auditorium/Projection's space (F1-E).

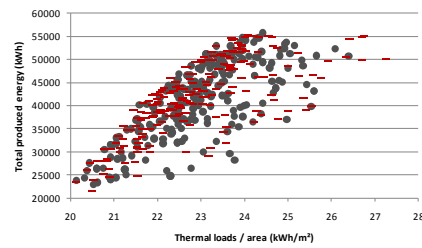
APÊNDICE B

Curitiba's optimization - Convergence

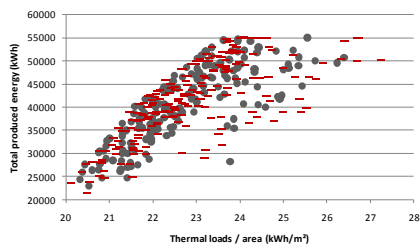
Generations 59 and 55



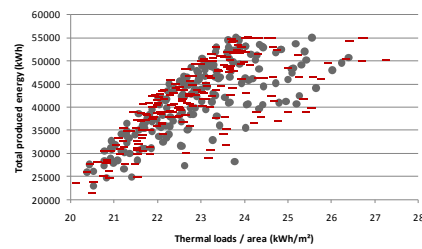
Generations 59 and 50



Generations 59 and 45

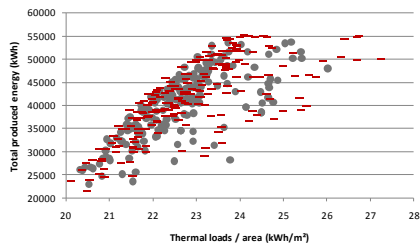


Generations 59 and 40

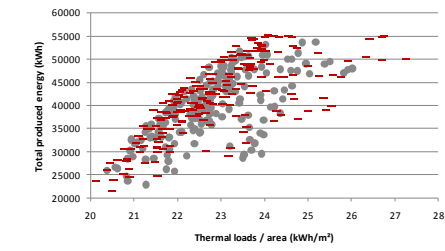
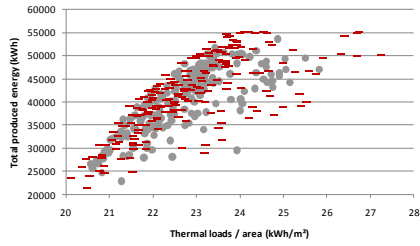


Generations 59 and 35

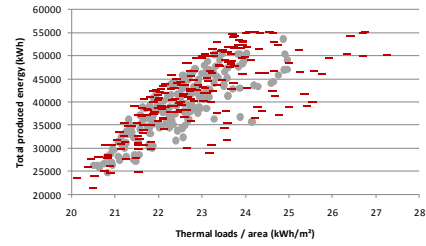
Generations 59 and 30



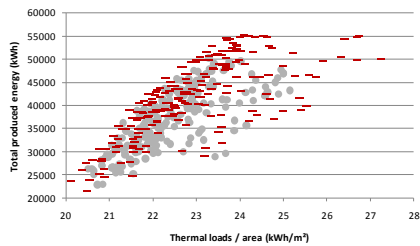
Generations 59 and 25



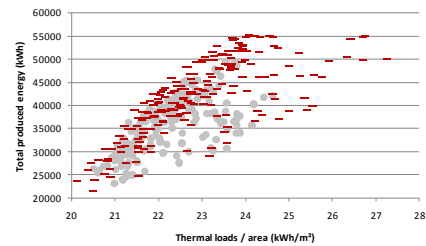
Generations 59 and 20



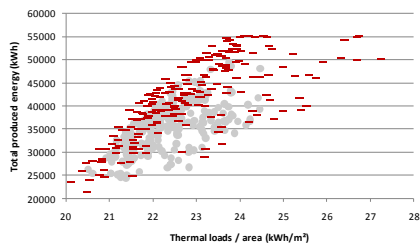
Generations 59 and 15



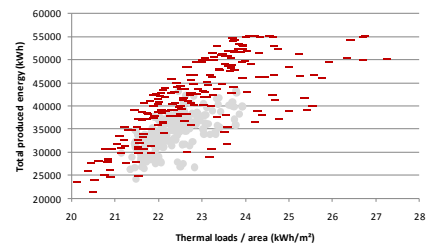
Generations 59 and 10



Generations 59 and 5



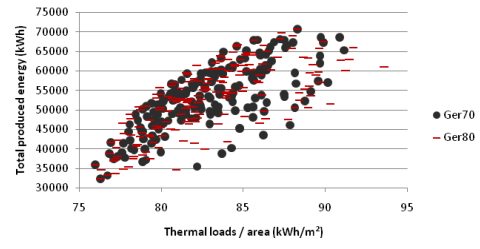
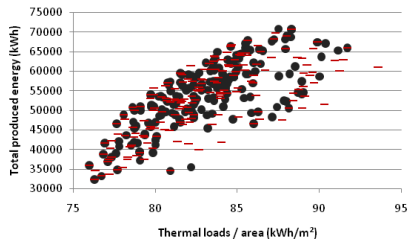
Generations 59 and 0



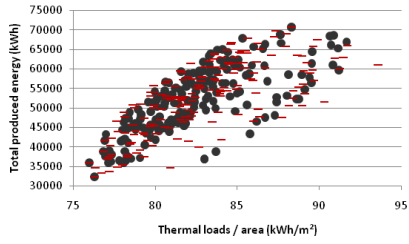
Belo Horizonte's optimization - Convergence

Generations 80 and 75

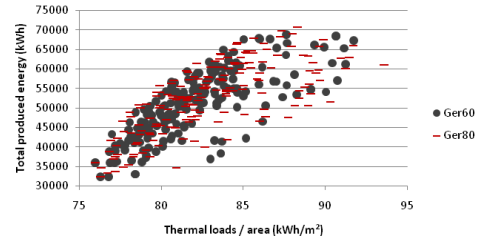
Generations 80 and 70



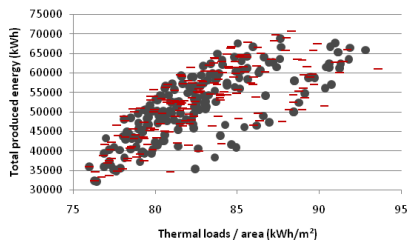
Generations 80 and 65



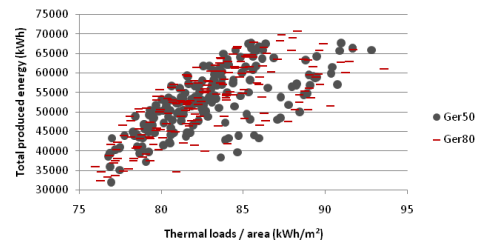
Generations 80 and 60



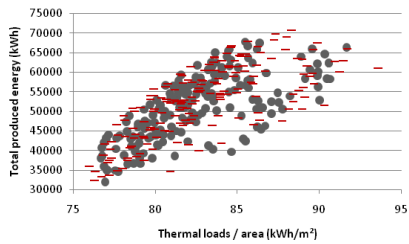
Generations 80 and 55



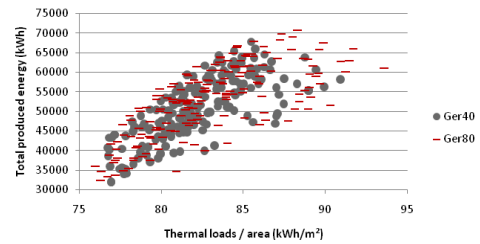
Generations 80 and 50



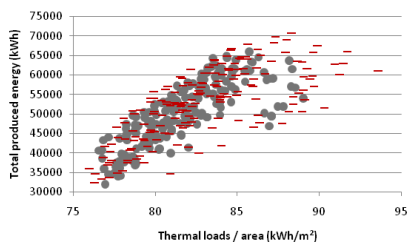
Generations 80 and 45



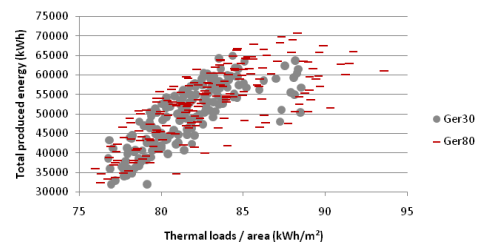
Generations 80 and 40



Generations 80 and 35

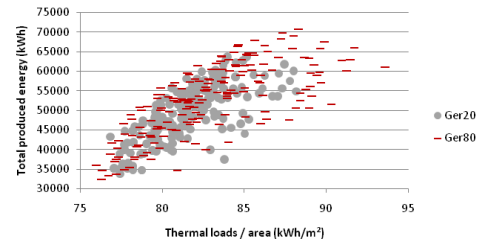
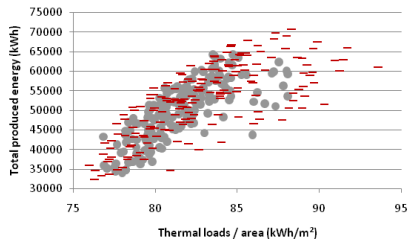


Generations 80 and 30

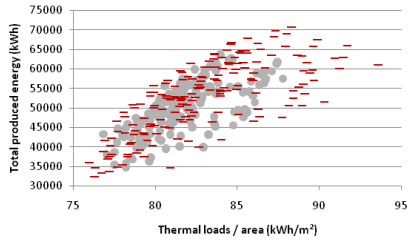


Generations 80 and 25

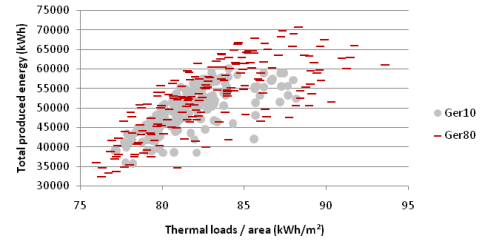
Generations 80 and 20



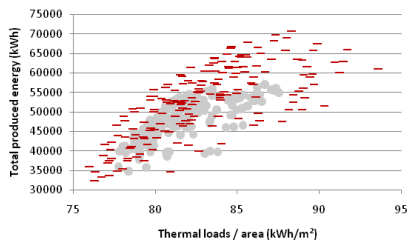
Generations 80 and 15



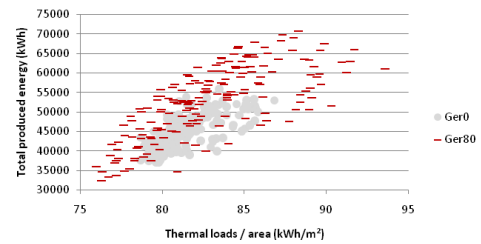
Generations 80 and 10



Generations 80 and 5

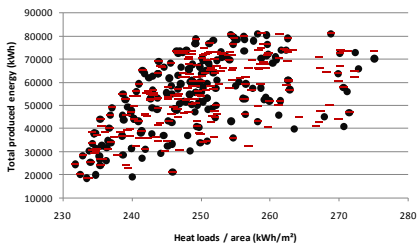


Generations 80 and 0

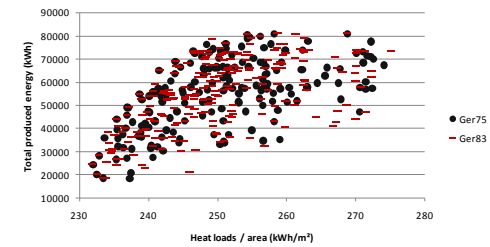


Recife's optimization - Convergence

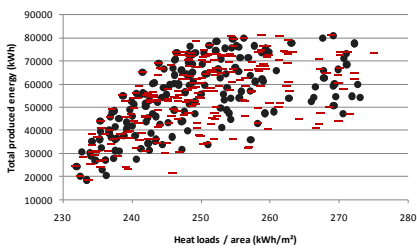
Generations 83 and 80



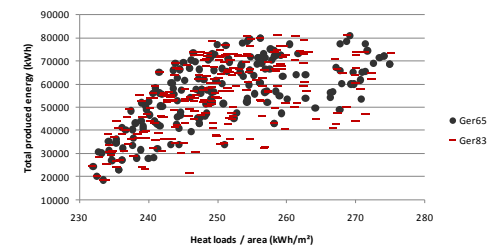
Generations 83 and 75



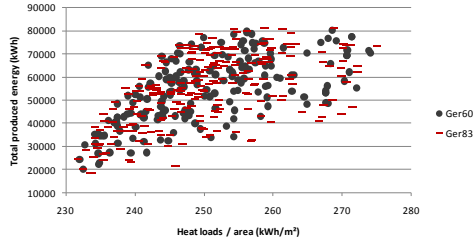
Generations 83 and 70



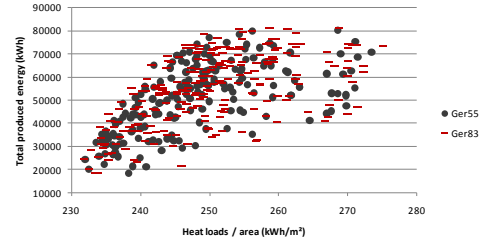
Generations 83 and 65



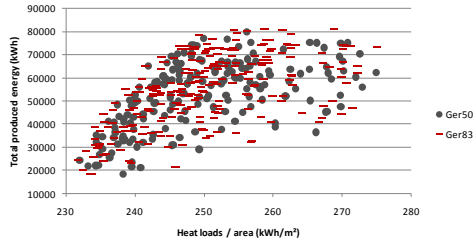
Generations 83 and 60



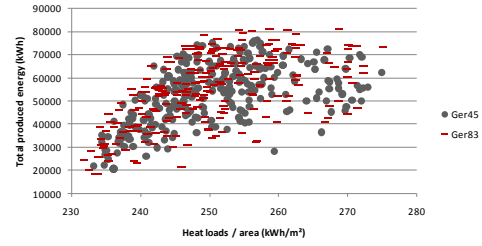
Generations 83 and 55



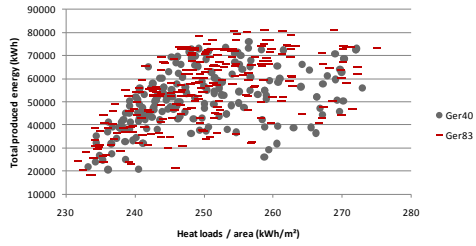
Generations 83 and 50



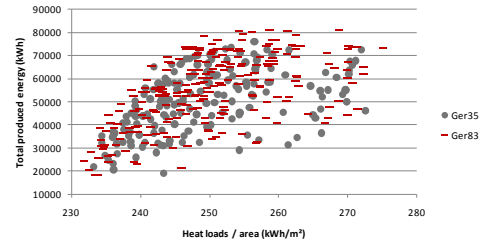
Generations 83 and 45



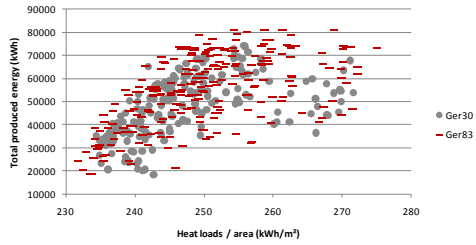
Generations 83 and 40



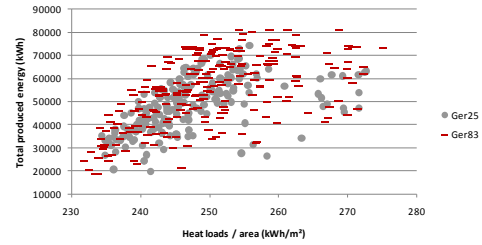
Generations 83 and 35



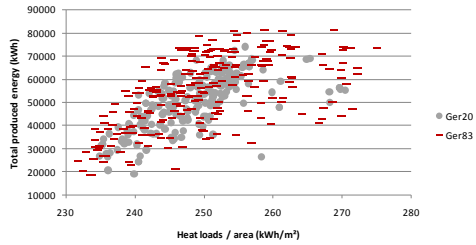
Generations 83 and 30



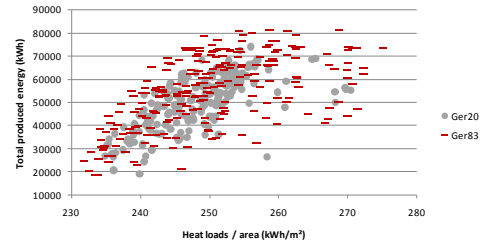
Generations 83 and 25



Generations 83 and 20

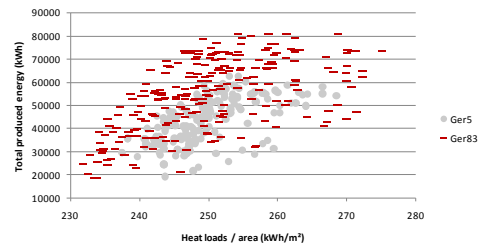
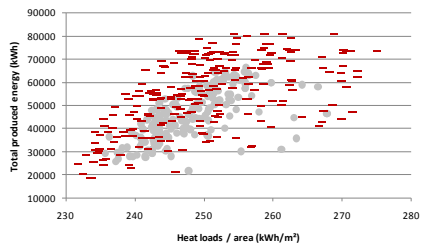


Generations 83 and 15

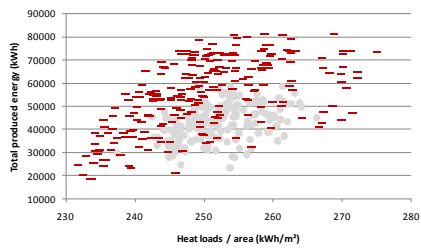


Generations 83 and 10

Generations 83 and 25



Generations 83 and 0



APÊNDICE C

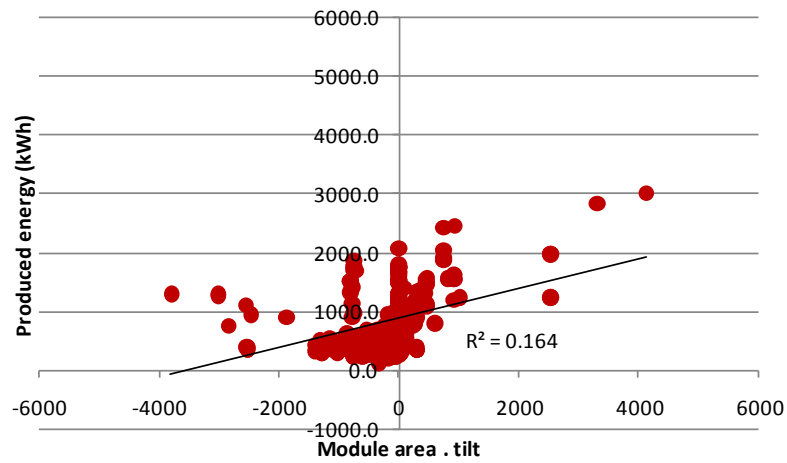


Figure 1: Produced energy X Module area * tilt for the nine heat loads best solutions for **Curitiba**.

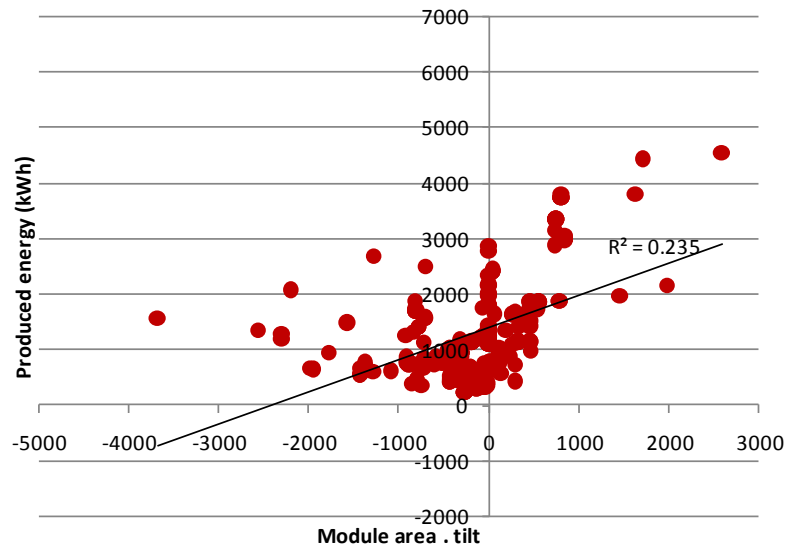


Figure 2: Produced energy X Module area * tilt for the nine heat loads best solutions for **Belo Horizonte**.

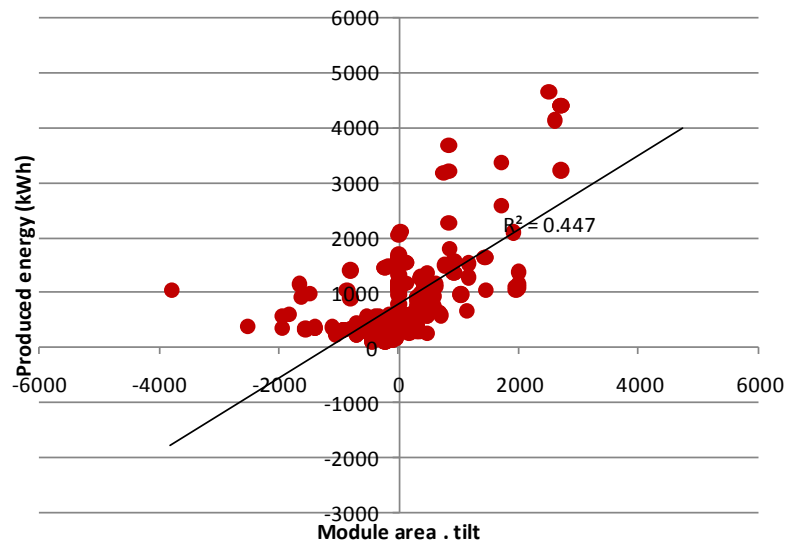


Figure 3: Produced energy X Module area * tilt for the nine heat loads best solutions for **Recife**.