



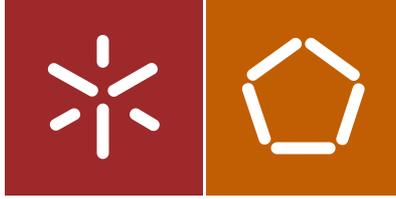
António Pedro Vieira Machado

Design Generativo aplicado à Conceção de  
Edifícios para Otimização do Desempenho  
Energético

Universidade do Minho  
Escola de Engenharia







Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

António Pedro Vieira Machado

Design Generativo aplicado à Conceção de  
Edifícios para Otimização do Desempenho  
Energético

Dissertação de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efectuado sob a orientação do  
Professor Doutor Dinis Miguel Campos Leitão

## DECLARAÇÃO

Nome: António Pedro Vieira Machado

Endereço eletrónico: a72290@alunos.uminho.pt Telefone: 969398119

Número do Bilhete de Identidade: 14907069

Título dissertação □/tese □ : Design Generativo aplicado à Conceção de Edifícios para Otimização do Desempenho Energético

Orientador(es): Professor Doutor Dinis Miguel Campos Leitão

Professora Doutora Ana Cristina Briga de Sá

Ano de conclusão: 2018

Designação do Mestrado ou do Ramo de Conhecimento do Doutoramento: Ciclo de Estudos Integrados Conducente ao Grau de Mestre em Engenharia Civil.

Nos exemplares das teses de doutoramento ou de mestrado ou de outros trabalhos entregues para prestação de provas públicas nas universidades ou outros estabelecimentos de ensino, e dos quais é obrigatoriamente enviado um exemplar para depósito legal na Biblioteca Nacional e, pelo menos outro para a biblioteca da universidade respetiva, deve constar uma das seguintes declarações:

1. É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, 19/12/2018

Assinatura: \_\_\_\_\_

*António Pedro Vieira Machado*

## **AGRADECIMENTOS**

Dado por concluído este ciclo de estudos que resulta na elaboração da presente dissertação, quero manifestar os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que deram o seu apoio e contributo para tornar possível a realização deste trabalho.

Em particular à Sr.<sup>a</sup> Professora Doutora Ana Sá e ao Sr. Professor Doutor Dinis Leitão, dirijo o meu especial agradecimento pela perseverança com que sempre incentivaram e acompanharam a realização deste trabalho. A total disponibilidade demonstrada e o apurado sentido crítico construtivo que caracterizaram a orientação, em muito contribuíram para a elaboração da dissertação.

À minha família, em especial aos meus pais e à minha irmã, pela indescritível paciência, ajuda e motivação constante, e acompanhamento ao longo de todo este processo.

À Ana pelo carinho, coragem e incentivo que me transmitiu.

Aos meus colegas que me acompanharam ao longo destes 5 anos e aos de longa data, por todo o apoio, pelos conselhos, pela disponibilidade e pelos momentos de descontração que muito ajudaram nesta etapa.

A todas as pessoas que contribuíram para a realização e concretização deste trabalho, deixo aqui o meu **Muito obrigado!**



## RESUMO

A preservação do meio ambiente é uma preocupação crescente da população em geral que procura reduzir o impacto da atividade humana no planeta. Consciente de que os edifícios são responsáveis por elevados consumos energéticos e emissões diretas e indiretas de carbono, o setor AEC (Arquitetura, Engenharia e Construção), tem demonstrado interesse em minimizar as consequências do elevado consumo energético dos edifícios no meio ambiente.

Para o efeito, numa primeira fase, foi levada a cabo uma revisão bibliográfica acerca das estratégias bioclimáticas no que concerne ao impacto da radiação solar, da iluminação natural e da orientação das fachadas, na eficiência energética. Além do referido, para uma melhor compreensão do panorama normativo no que respeita à eficiência energética dos edifícios, procedeu-se a um breve estudo da legislação europeia e nacional nesta matéria.

Posteriormente, foi abordado o conceito de *design* generativo enquanto forma de modelação, em geral, e enquanto uma potencial ferramenta na otimização do comportamento termo energético dos edifícios através da incorporação de algoritmos genéticos.

Numa terceira fase, procedeu-se a um estudo prático das potencialidades do design generativo na conceção de um hipotético edifício, aplicando-se conhecimentos de programação visual. Para tal, seleccionaram-se alguns parâmetros que podem ser analisados numa fase inicial do projeto do edifício como sejam a geometria solar e, conseqüentemente, a radiação solar e a iluminação natural, as vistas privilegiadas para o cenário escolhido, a percentagem de área útil com vista para o exterior e o cálculo energético global do edifício.

Com o decurso da investigação, efetuaram-se diversas simulações que permitiram avaliar o impacto da geometria dos edifícios no desempenho energético daqueles.

Por último, procedeu-se à agregação de todos os resultados das simulações realizadas numa plataforma *online*, tendo-se obtidos resultados satisfatórios, o que evidencia que, embora a utilização do design generativo como forma de projetar e estudar edifícios seja ainda pouco utilizada, constitui um recurso promissor neste setor.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Design* Generativo; Comportamento Termo Energético; Algoritmos Genéticos; Programação Visual; Fase Inicial do Projeto



## **ABSTRACT**

The environment preservation is a growing concern in the overall population which seeks to reduce the human activities impact on the planet. Conscious that buildings are responsible for high energy consumption and direct and indirect carbon emissions, the AEC (Architecture, Engineering and Construction) sector has shown interest in minimizing the consequences of the high energy consumption of buildings in the environment.

For this purpose, a bibliographical review was conducted on bioclimatic strategies regarding the impact of solar radiation, daylighting and façades orientation on buildings thermal behaviour. In addition, for a better understanding of the regulatory landscape with regard to the energy efficiency of buildings, a brief study of European and national legislation in this field was carried out.

The concept of generative design was approached as a form of modelling, in general, and as a potential tool in the optimization of thermal energetic building's behaviour through the incorporation of genetic algorithms.

In a third phase, a practical study of the capabilities of generative design in the design of a hypothetical building was carried out, applying visual programming knowledge. To do so, some parameters were selected to be analysed in an initial phase of the building design such as solar geometry and, consequently, solar radiation and daylighting, privileged views for the chosen scenario, percentage of floor area with exterior view and overall energy performance of the building.

During the investigation, several simulations were executed to evaluate the building's geometry impact on the energy performance of the buildings.

Finally, the results of the simulations performed on an online platform were aggregated and satisfactory were obtained, which that, although the use of generative design as a way of designing and studying buildings is still small, it is a promising resource in this sector.

**KEYWORDS:** Generative Design; Thermal Energy Behaviour; Genetic Algorithms; Visual Programming; Early Design Stage.



## ÍNDICE

1.	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento e Motivação.....	1
1.2	Objetivos do Trabalho .....	3
1.3	Estrutura da Dissertação.....	4
2.	Estado da Arte.....	5
2.1	Estratégias Bioclimáticas .....	5
2.1.1	A Energia Solar e os Edifícios .....	5
2.1.2	Geometria Solar .....	8
2.1.3	Orientação de Fachadas Envidraçadas .....	9
2.2	Eficiência Energética nos Edifícios.....	12
2.2.1	Legislação Europeia .....	12
2.2.2	Legislação Portuguesa .....	15
2.3	<i>Design</i> Generativo.....	20
2.3.1	<i>Design</i> Generativo associado ao Comportamento Termo Energético.....	22
2.3.2	Algoritmos Genéticos.....	23
2.4	Estratégias de Otimização.....	27
2.4.1	Tipos de Otimização.....	27
2.4.2	Otimização Mono e Multiobjetivo .....	28
2.4.3	Exemplos de aplicação.....	32
3.	Metodologia – Ferramentas Computacionais .....	39
3.1	Modelação no <i>Grasshopper</i> .....	39
3.1.1	Plugins de Análise e Simulação .....	43
3.1.2	Plugins de Otimização.....	49
3.2	Aplicabilidade no Caso de Estudo.....	52
4.	Caso de Estudo .....	55

4.1	Enquadramento e Definição.....	56
4.2	Modelação Geométrica .....	59
4.2.1	Fase Criativa e Ideológica.....	59
4.2.2	Modelação do Edifício no Contexto Urbano Selecionado.....	61
4.2.3	Estudos Experimentais Realizados.....	68
4.3	Otimização Mono-Objetivo.....	85
4.4	Otimização Multiobjetivo .....	86
4.5	Cálculo iterativo .....	86
5.	Considerações Finais.....	89
5.1	Conclusões.....	89
5.2	Limitações do estudo.....	90
5.3	Desenvolvimentos futuros .....	91
	Referências Bibliográficas .....	93
	Anexo I – Otimização Multiobjetivo.....	AI.1
	Anexo II – Otimização Mono-objetivo .....	AI.5
	Anexo III – Cálculo iterativo .....	AI.9

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1— Radiação solar direta em Portugal em kWh/m <sup>2</sup> .....	5
Figura 2.2— Radiação solar direta na Europa em kWh/m <sup>2</sup> .....	6
Figura 2.3— Representação esquemática da influência da atmosfera (em percentagem) nos fenômenos de absorção e difusão da radiação solar e da quantidade absorvida e refletida pela superfície terrestre.....	6
Figura 2.4— Geometria solar anual – cidade do porto.....	8
Figura 2.5— Representação esquemática dos valores da radiação nas fachadas de um edifício no verão e no inverno. ....	9
Figura 2.6— Iluminação natural de um espaço interior.....	10
Figura 2.7— Iluminâncias recomendadas no plano de trabalho em edifícios residenciais. ....	
Figura 2.8— Refletâncias recomendadas. ....	<b>Erro! Marcador não definido.</b>
Figura 2.9— Centro Aquático Nacional de Pequim. ....	21
Figura 2.10— Estádio Nacional de Pequim. ....	21
Figura 2.11— Paisagem de aptidão com base na evolução natural.....	25
Figura 2.12— Representação esquemática de um ciclo de <i>solver</i> evolucionário. ....	25
Figura 2.13— Esquema funcional dos algoritmos genéticos. ....	26
Figura 2.14— Seis categorias de algoritmos de otimização.....	28
Figura 2.15— O ótimo de Pareto entre duas funções. ....	29
Figura 2.16— Entradas/Saídas do modelo. ....	29
Figura 2.17— Espaço de soluções de acordo com dois objetivos.....	30
Figura 2.18— Visualização da frente ótima de Pareto e do ponto da utopia. ....	31
Figura 2.19— <i>Qintai International Tower</i> . ....	32
Figura 2.20— <i>Fifth XiangYa Hospital</i> . ....	33
Figura 2.21— Integração dos objetivos para a obtenção das soluções ótimas.....	34
Figura 2.22— Algumas soluções com a correspondente pontuação e desempenho .....	35
Figura 2.23— Integração dos objetivos para a análise evolutiva.....	36
Figura 2.24— Opções de variação da geometria e disposição no espaço dos blocos residenciais. ....	36
.....	
Figura 2.25— Opções de variação da geometria e disposição no espaço dos blocos de serviço. ....	37

Figura 2.26— Produto final do estudo.....	37
Figura 3.1— Comparação do código <i>Python</i> e sua construção no <i>Grasshopper</i> para desenhar uma senoide.....	40
Figura 3.2— Janela de edição principal (ou “ <i>canvas</i> ” em inglês).....	40
Figura 3.3— Exemplo de um fluxo de trabalho para gerar um determinado volume .....	42
Figura 3.4— Alguns estudos possíveis de realizar com o <i>plugin Ladybug</i> .....	43
Figura 3.5— Integração de um ficheiro de dados climáticos e possíveis análises a serem realizadas com estes dados. ....	44
Figura 3.6— Vínculo com as diferentes plataformas.....	45
Figura 3.7— Alguns estudos possíveis de realizar com o <i>plugin Honeybee</i> .....	46
Figura 3.8— Tipos de fachadas possíveis de construir com <i>plugin Skindesigner</i> . ....	47
Figura 3.9— Espaço de soluções multidimensional.....	49
Figura 3.10— Iterador do <i>plugin Colibri</i> . ....	50
Figura 3.11— Agregador do <i>plugin Colibri</i> .....	51
Figura 3.12— Interface do <i>Design Explorer</i> . ....	52
Figura 3.13— Fluxo de trabalho proposto para o caso de estudo.....	53
Figura 4.1— Localização do caso de estudo – Canide (Sul), Vila Nova de Gaia, Portugal.....	56
Figura 4.2— Contexto urbano exemplificativo.....	57
Figura 4.3— Dados meteorológicos. ....	57
Figura 4.4— Idealização de possibilidades arquitetónicas e funcionais para construção do modelo de caso de estudo. ....	59
Figura 4.5— 1ª Fase do desenvolvimento do caso de estudo (parte 1). ....	60
Figura 4.6— Modelo do contexto urbano importado do <i>Cadmapper</i> .....	61
Figura 4.7— Contexto urbano num espaço da cidade de Nova Iorque (junto ao <i>Central Park</i> )... ..	61
Figura 4.8— Contexto urbano a utilizado no caso de estudo.....	62
Figura 4.9— Bloco correspondente à definição das dimensões e forma geométrica base para o edifício .....	63
Figura 4.10— Bloco relativo ao número e altura entre pisos.....	64
Figura 4.11— Bloco gerador da rotação entre pisos .....	64
Figura 4.12— Bloco correspondente ao aumento/diminuição uniforme dos pisos .....	65
Figura 4.13— Geometria fechada .....	65
Figura 4.14— Algumas possibilidades de modelos base do caso de estudo.....	66

Figura 4.15— 1ª Fase do desenvolvimento do caso de estudo (parte 2). .....	66
Figura 4.16- Modelo gerado pela definição anterior. ....	67
Figura 4.17— Geometria solar anual, na cidade do Porto. ....	68
Figura 4.18— Resultados globais da iluminação natural no edifício. ....	69
Figura 4.19— Bloco algorítmico para o estudo da iluminação natural a 21 de dezembro. ....	69
Figura 4.20— Resultado obtido, da simulação de iluminação natural, para o 1º piso. ....	70
Figura 4.21— Bloco para estudos relativos à radiação solar. ....	71
Figura 4.22— Diagrama <i>Radiation Rose</i> para estudo da radiação solar. ....	71
Figura 4.23— Bloco algorítmico relativo ao estudo do número de horas que os espaços interiores estão sob radiação solar direta.....	72
Figura 4.24— Validação da correta construção do algoritmo para o estudo. ....	72
Figura 4.25— Cálculo do número de horas no período de arrefecimento para o modelo sem sistemas de proteção solar. ....	73
Figura 4.26— Cálculo do número de horas no período de arrefecimento para o modelo com sistemas de proteção solar. ....	73
Figura 4.27— a) Fachadas sem painéis e b) Fachadas com painéis. ....	74
Figura 4.28— Geometria solar na estação de aquecimento. ....	75
Figura 4.29— Geometria solar na estação de arrefecimento.....	75
Figura 4.30— Bloco algorítmico para a modelação das fachadas envidraçadas como os sistemas de proteção solar.....	75
Figura 4.31— Modelação das fachadas envidraçadas e dos sistemas de proteção solar, em função da radiação benéfica e prejudicial. ....	76
Figura 4.32— Render do pormenor envidraçado - sistema de proteção solar. ....	77
Figura 4.33— Render da fachada orientada a oeste. ....	77
Figura 4.34— Representação do sistema de proteção solar utilizado para o estudo. ....	78
Figura 4.35— Bloco relativo à análise do acesso visual para o exterior a partir do interior do edifício. ....	78
Figura 4.36— Vetores que definem o campo visual.....	79
Figura 4.37— Malha colorida do plano horizontal de teste que representa os pontos em percentagem do acesso visual para o exterior. ....	79
Figura 4.38— Cenário do caso de estudo. ....	80
Figura 4.39— Modelação da malha com os correspondentes pontos de teste.....	80

Figura 4.40— Percentagem de pontos teste que “a fachada vê” .....	81
Figura 4.41— Bloco para configuração das propriedades dos elementos construtivos.....	83
Figura 4.42— Algoritmo global para execução da análise energética e cálculo do valor EUI.....	83
Figura 4.43— Componentes para iterar as diferentes variáveis e agregar os resultados obtidos.	84
Figura 4.44— Espaço multidimensional de soluções dos diversos estudos experimentais na plataforma <i>Design Explorer</i> .....	84
Figura 4.45— Possível modelo integrador dos diversos estudos no local de implantação. ....	85
Figura 4.46— Código <i>Python</i> para seleção dos valores de iluminância (mínimo e máximo).....	85

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1— Iluminâncias recomendadas no plano de trabalho em edifícios residenciais Silva (2009, como citado em CIE, 1975; Santos, 2001, Santos, 2005). .....	11
Quadro 2.2— Refletâncias recomendadas Silva (2009, como citado em CIE, 1975; Santos, 2001, Santos, 2005). .....	11
Quadro 2.3— Impacto da radiação solar e iluminação natural nas fachadas nas diferentes orientações ao longo do período de aquecimento e arrefecimento (Silva, 2009) e (Gonçalves & Graça, 2004). .....	11



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

ADN — Ácido Desoxirribonucleico

AEC — Arquitetura, Engenharia e Construção

ASHRAE — *American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers*

AQS — Águas Quentes Sanitárias

AVAC — Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

CAD — *Computer Aided Design*

Cf. — Conforme

EPBD — *European Performance of Buildings Directive*

EUI — *Energy Use Intensity*

IWEC — *International Weather for Energy Calculations*

nZEB — Edifícios com necessidades quase nulas de energia

RECS — Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços

REH — Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

RSECE — Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios

SCE — Sistema Certificação Energética dos Edifícios

UE — União Europeia

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento e Motivação

A preocupação com a otimização dos recursos energéticos disponíveis, bem como com a proteção ambiental, são realidades que assumem um papel importante no setor AEC (Arquitetura, Engenharia e Construção).

Atualmente, verifica-se um crescente interesse no que concerne ao impacto negativo dos edifícios no meio ambiente, provocado pelos elevados consumos de energia e pelas emissões indiretas de carbono. Esta temática torna-se, assim, um foco de exploração e estudo por parte dos profissionais de arquitetura e engenharia que pretendem projetar além dos limites normativos, procurando a construção de edifícios energeticamente otimizados.

Reflexo dessa realidade é a legislação europeia, nomeadamente, a Diretiva relativa ao desempenho energético dos edifícios – reformulação<sup>1</sup> que estabelece os “edifícios com necessidades quase nulas de energia”<sup>2</sup> (nZEB) como o paradigma para os novos edifícios na UE (União Europeia) a partir de 2020<sup>3,4</sup>.

Para tal, torna-se necessário um trabalho assente num estudo multidisciplinar tendo em vista a aplicação de estratégias ambientais, de modo a reduzir o impacto do consumo energético dos edifícios (Konis, Gamas, & Kensek, 2016).

No que concerne ao processo de conceção do edifício, podem-se produzir resultados muito diferentes ao nível da estética e do desempenho. Nesse sentido, um estudo ambiental permite identificar os fatores com maior peso no projeto do edifício. Do mesmo modo, uma compreensão sustentada do problema do projeto e da condição ambiental do local, aumenta a capacidade de tomada de decisões ambientalmente responsáveis.

Simultaneamente, existe um interesse exponencial por parte dos projetistas na obtenção de um *feedback* rápido e iterativo relativo ao desempenho em fases iniciais do projeto, ao invés de uma

---

<sup>1</sup> Diretiva 2010/31/UE do Parlamento e do Conselho, de 19 de maio de 2010.

<sup>2</sup> O edifício com necessidades quase nulas de energia é “*um edifício com um desempenho energético muito elevado, determinado nos termos do anexo I. As necessidades de energia quase nulas ou muito pequenas deverão ser cobertas em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis, incluindo energia proveniente de fontes renováveis produzida no local ou nas proximidades*”, cfr. artigo 2.º, n.º2 da Diretiva 2010/31/UE do Parlamento e do Conselho, de 19 de maio de 2010.

<sup>3</sup> Cfr. artigo 9.º, n.º 1, alínea a) da Diretiva 2010/31/UE do Parlamento e do Conselho, de 19 de maio de 2010.

<sup>4</sup> Esta questão será objeto de abordagem e tratamento mais detalhado no subcapítulo 2.2, para o qual se remete.

análise, a final, que permite somente a verificação da conformidade e cumprimento de determinados requisitos. Na fase inicial do projeto, as decisões têm por base o sentido crítico pessoal que decorre da experiência, do conhecimento e da interpretação dos dados ambientais.

Face aos problemas complexos e morosos relativos ao desempenho dos edifícios, os projetistas da indústria AEC são incentivados a utilizar como instrumentos de estudo, *softwares* que lhes permitam executar simulações dinâmicas (Zanchetta, Cecchini, & Bellotto, 2018). No entanto, existe uma extensa gama de *softwares* que possibilitam executar este tipo de simulações, sendo os profissionais da área confrontados com dificuldades inerentes ao processo de seleção dessas ferramentas. Vários estudos demonstram que as ferramentas utilizadas são inadequadas, pouco *user friendly* e incompletas para serem utilizadas durante as fases iniciais do projeto (Lam, Huang & Zhai, 2004; Attia, Beltán, De Herde, & Hensen, 2009; Weytiens et al., 2012; Riether. & Butler, 2008) forçando a um maior investimento em instrumentos versáteis numa fase pré-concetual (Weytiens et al., 2012) de forma a acompanhar uma rápida mudança no processo de conceção dos edifícios.

A modelação paramétrica, uma tendência emergente nas últimas décadas, veio renovar a forma como os edifícios são projetados, cuja base assenta na criação de algoritmos capazes de gerar modelos totalmente controlados por um número reduzido de parâmetros chave (Azenha, Lino, & Caires, 2014). Esta ferramenta tem-se mostrado versátil e valiosa e, acompanhada dos avanços tecnológicos, revolucionou a forma de pensar e projetar, abrindo a possibilidade da automação de tarefas e integração de maior quantidade de dados. O modo de projetar sistemas, interligando componentes, enriquece o conjunto de soluções de problemas de elevada complexidade com a possível análise de múltiplas variáveis simultaneamente.

Ferramentas de programação visual, como o *Dynamo Studio*<sup>5</sup> para o *Autodesk Revit*<sup>6</sup> ou o *Grasshopper*<sup>7</sup> para o *Rhinoceros3D*<sup>8</sup>, permitem implementar o conceito de modelação paramétrica e de automatização de tarefas, assim como os *plugins* do *Grasshopper*, *Ladybug*<sup>9</sup> e *Honeybee*<sup>10</sup>, possibilitam a exploração abrangente de alternativas baseadas em desempenho à escala de construção (Touloupakia, & Theodosioua, 2016).

---

<sup>5</sup> Disponível em <https://www.autodesk.com/products/dynamo-studio/overview>

<sup>6</sup> Disponível em <https://www.autodesk.pt/products/revit/overview>

<sup>7</sup> Disponível em <https://www.grasshopper3d.com/>

<sup>8</sup> Disponível em <https://www.rhino3d.com/>

<sup>9</sup> Disponível em <https://www.ladybug.tools/ladybug.html>

<sup>10</sup> Disponível em <https://www.ladybug.tools/honeybee.html>

A principal preocupação reside na forma como os modelos geométricos e analíticos são combinados e na forma como os edifícios foram ou serão projetados e executados (Nengendahl, 2015).

Com efeito, torna-se necessário estudar e partilhar o conhecimento e as potencialidades resultantes da aplicação dos novos recursos na conceção dos edifícios.

É com este propósito que se elabora a presente dissertação, procurando contribuir, através de um caso de estudo, para uma melhor compreensão da integração de diferentes ferramentas de modelação na otimização do comportamento termo energético dos edifícios.

## **1.2 Objetivos do Trabalho**

Pretende-se com esta dissertação contribuir para a demonstração da importância da análise do comportamento termo energético dos edifícios numa fase inicial da conceção dos edifícios.

Para isso, recorrer-se-á à utilização de ferramentas de conceção tridimensional, de análise energética e de *performance* e, ainda, de programação visual (interligada com o *design* generativo).

Mais concretamente, pretende-se possibilitar a compreensão e a implementação da utilização do *software*, que será abordado no terceiro Capítulo, por parte dos técnicos da AEC, numa fase inicial do projeto de edifícios, com o intuito de contribuir para uma análise mais fundamentada do desempenho energético daqueles.

Pretende-se, sobretudo, contribuir para o estudo e partilha de conhecimento à cerca do *software*, no modo de conceber e projetar edifícios, tendo em vista obter uma otimização termo energética fundamentada, através do seguinte:

- Estudo das potencialidades e limitações das ferramentas a utilizar no caso de estudo orientadas para a modelação generativa e para o desempenho energético;
- Desenvolvimento de possíveis estudos a serem utilizados em fase de projeto que sirvam de apoio aos projetistas na tomada de decisões;
- Avaliação da integração de algoritmos evolutivos num algoritmo generativo;

Estes são os objetivos primordiais, sendo que se pretende, ainda, com os estudos a realizar, abordar vários conceitos que influenciam o comportamento termo energético dos edifícios, tais como: a geometria dos edifícios, a orientação das fachadas, os sistemas de proteção solar, os sistemas AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado), vãos envidraçados, entre outros.

### 1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos consistindo o primeiro deles num breve enquadramento do tema escolhido, assim como na enunciação dos objetivos e na apresentação da estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 procede-se ao estudo do estado da arte, sendo que este capítulo se encontra dividido em vários subcapítulos. No primeiro desses subcapítulos tem-se em vista o estudo das estratégias bioclimáticas no que respeita à interação entre a energia solar e os edifícios. No subcapítulo seguinte, é conferido algum destaque ao estudo do quadro legislativo nacional e europeu em matéria de eficiência energética dos edifícios. Contudo, o Capítulo 2 não se conclui sem o estudo do *design* generativo enquanto forma de modelação e das estratégias de otimização assentes na algoritmia genética.

No Capítulo 3 analisam-se os *softwares* e *plugins* (de análise e simulação, bem como de otimização) que serão utilizados como ferramenta no caso de estudo. Ainda, se explora a forma de construção do caso de estudo, bem como a aplicabilidade dos conceitos abordados na revisão bibliográfica.

O Capítulo 4 centra-se no caso de estudo que terá como objeto, um edifício hipotético, totalmente desenvolvido através do *design* generativo. Nesse seguimento, são feitos, embora não exaustivamente, estudos bioclimáticos para compreender o comportamento e a adaptabilidade do edifício ao ambiente em que estará inserido. Posteriormente, será feita uma simulação e otimização de cada tipo (mono e multiobjetivo), cujo princípio passa pela alteração geométrica do edifício e pela recolha dos resultados obtidos de cada uma das simulações independentes para, de seguida, se agregarem numa plataforma *online*.

Esta dissertação termina com a apresentação das conclusões decorrentes dos estudos desenvolvidos.

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1 Estratégias Bioclimáticas

Uma estratégia bioclimática<sup>11</sup>, com uma relação intrínseca ao clima e ao contexto geográfico, é essencial num projeto de arquitetura. Neste sentido, torna-se pertinente compreender a sua importância e a transposição para o projeto de edifícios.

Assim, neste capítulo, serão abordados, ainda que de forma sumária, os princípios bioclimáticos fundamentais, bem como a sua aplicação nos edifícios, ajustados às condições climáticas em Portugal.

#### 2.1.1 A Energia Solar e os Edifícios

A radiação solar é a principal fonte de energia para o planeta Terra, seja como fonte de calor como de luz, o que torna o Sol um elemento de elevada importância na interação com os edifícios (Silva, & Almeida, Sem Data).

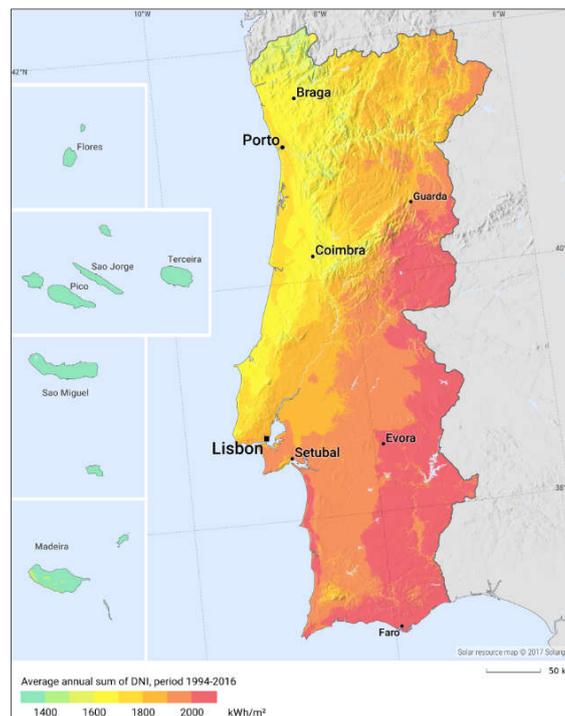


Figura 2.1— Radiação solar direta em Portugal em kWh/m<sup>2</sup> (Solargis, 2017).

---

<sup>11</sup> Conceito de bioclimático pode ser descrito como um método em que se tira proveito do clima através da aplicação correta de elementos de projeto e tecnologia de construção para uma economia energética e para garantir as condições de conforto em edifícios (Olgay, 1963).

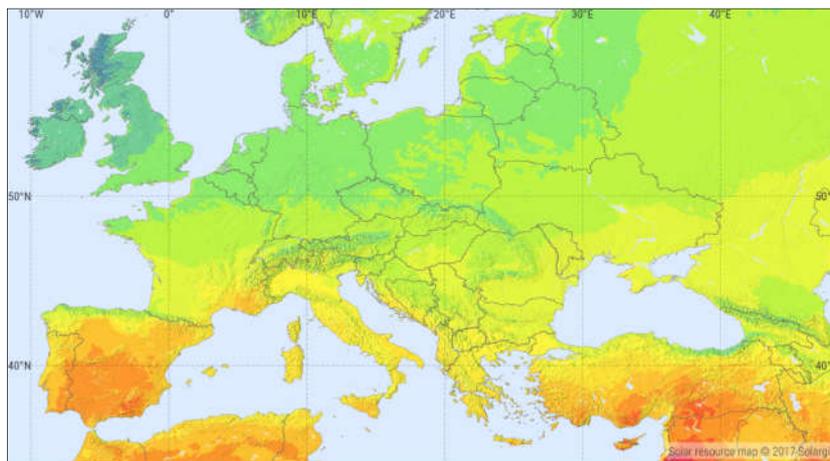


Figura 2.2— Radiação solar direta na Europa em kWh/m<sup>2</sup> (Solargis, 2017).

Analisando o mapa de radiação solar em Portugal e o mapa de radiação solar na Europa, Figura 2.1 e 2.2 respetivamente, verifica-se que Portugal se encontra numa posição privilegiada, apresentando-se, comparativamente com os restantes países da Europa, como um dos países com maior disponibilidade de recurso solar.

Tal como representado na Figura 2.3, as três componentes da radiação solar são (Silva, & Almeida, Sem Data):

- I. Radiação direta — atravessa a atmosfera unidireccionalmente e atinge diretamente a superfície;
- II. Radiação difusa celeste — dispersa em diferentes direções na atmosfera;
- III. Radiação difusa refletida ou albedo — radiação refletida pelo solo e objetos circundantes.

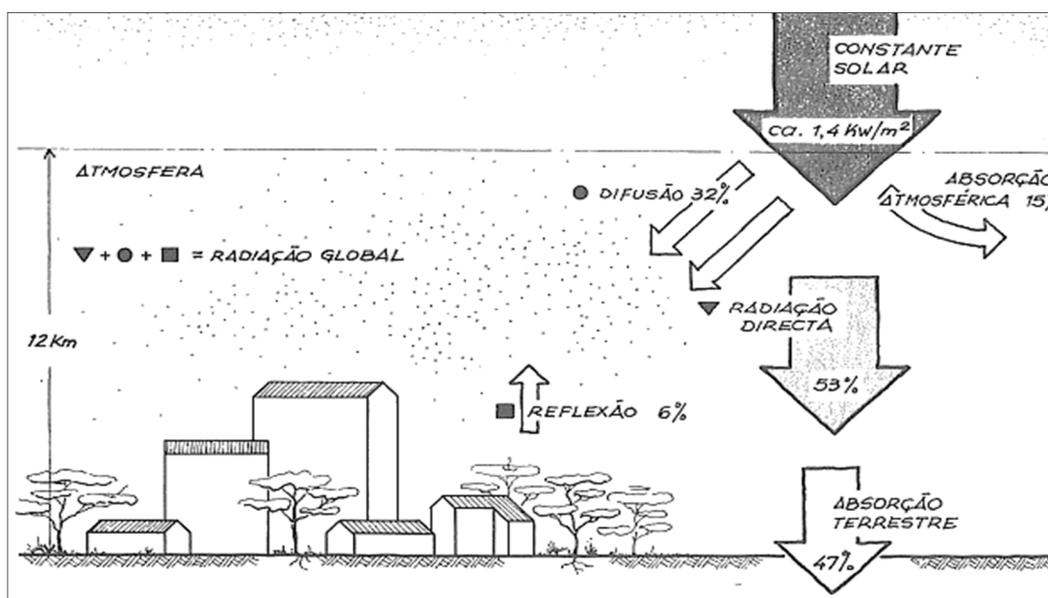


Figura 2.3— Representação esquemática da influência da atmosfera (em percentagem) nos fenómenos de absorção e difusão da radiação solar e da quantidade absorvida e refletida pela superfície terrestre (Moita, 1987).

Compreende-se como sendo os fatores mais preponderantes no comportamento termo energético dos edifícios a temperatura do ar exterior, a radiação solar e a iluminação natural.

Por um lado, a temperatura do ar é uma variável indutora das trocas de calor através da envolvente do edifício. Esta determina o estabelecimento de fluxos energéticos, do interior para o exterior no inverno (perdas térmicas); e do exterior para o interior no verão (ganhos térmicos).

Por outro, a radiação solar tem um papel determinante no conforto térmico do edifício, constituindo, de inverno, uma importante fonte de calor, contribuindo para o aumento da temperatura interior. Ao passo que no verão deve ser evitada, para reduzir o aumento da temperatura no espaço interior dos edifícios.

No que concerne à iluminação natural, esta assume uma relevância incontestável, no projeto de edifícios, não só por questões de visibilidade do espaço, mas também para se assegurar o adequado, seguro e confortável desenvolvimento das atividades. No que respeita à eficiência energética<sup>12</sup>, a iluminação natural permite uma redução nos consumos de energia elétrica inerentes à iluminação artificial, garantindo o conforto visual e bem-estar dos ocupantes.

Em suma, é importante compreender a interação entre o Sol e os edifícios, de forma a melhorar os projetos com uma base bioclimática.

---

<sup>12</sup> Será abordada com mais detalhe no subcapítulo 2.2, para o qual se remete.

## 2.1.2 Geometria Solar

A geometria solar, neste contexto, refere-se ao estudo relativo à forma do edifício e aos sistemas de proteção solar. Como tal, torna-se imperativo compreender os diferentes percursos do sol para um aproveitamento e/ou restrição da incidência da radiação solar nos edifícios.

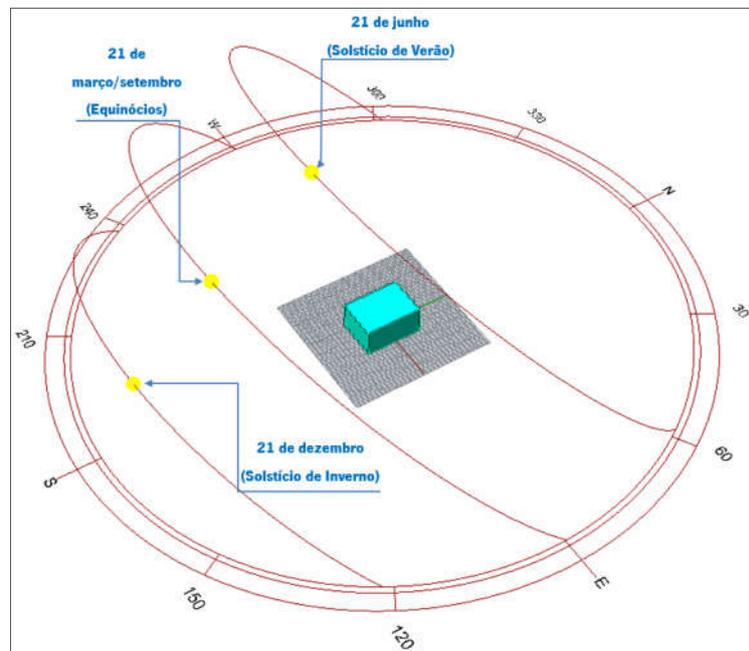


Figura 2.4– Geometria solar anual – cidade do porto.

A trajetória do Sol ao longo do ano varia conforme o dia do ano e a latitude do local, o que afeta o nascimento e o pôr-do-sol bem como a duração do dia. Tal como representado na Figura 2.4 (acima), percebe-se que (Silva, & Almeida, Sem Data) e (Gonçalves, & Graça, 2004):

- O ângulo de altura do Sol é mais alto em 21 de junho (solstício de verão) e mais baixo em 21 de dezembro (solstício de inverno);
- No solstício de verão (21 de junho) o nascer do Sol ocorre próximo da orientação Nordeste e o pôr-do-sol próximo da orientação Noroeste;
- Nos equinócios (21 de março e 21 de setembro) o nascer e pôr-do-sol ocorrem desde a orientação Este para Oeste; e
- No solstício de inverno (21 de dezembro) o nascer do Sol ocorre próximo da orientação Sudeste e o pôr-do-sol próximo da orientação Sudoeste;

### 2.1.3 Orientação de Fachadas Envidraçadas

#### ➤ Radiação Solar

A posição do sol ao longo do ano é relevante no que respeita à definição da localização das superfícies envidraçadas num edifício, à sua dimensão e ao tipo de vidro que se escolhe.

Seguem-se algumas linhas orientadoras para boas práticas na orientação de fachadas envidraçadas (Figura 2.5).

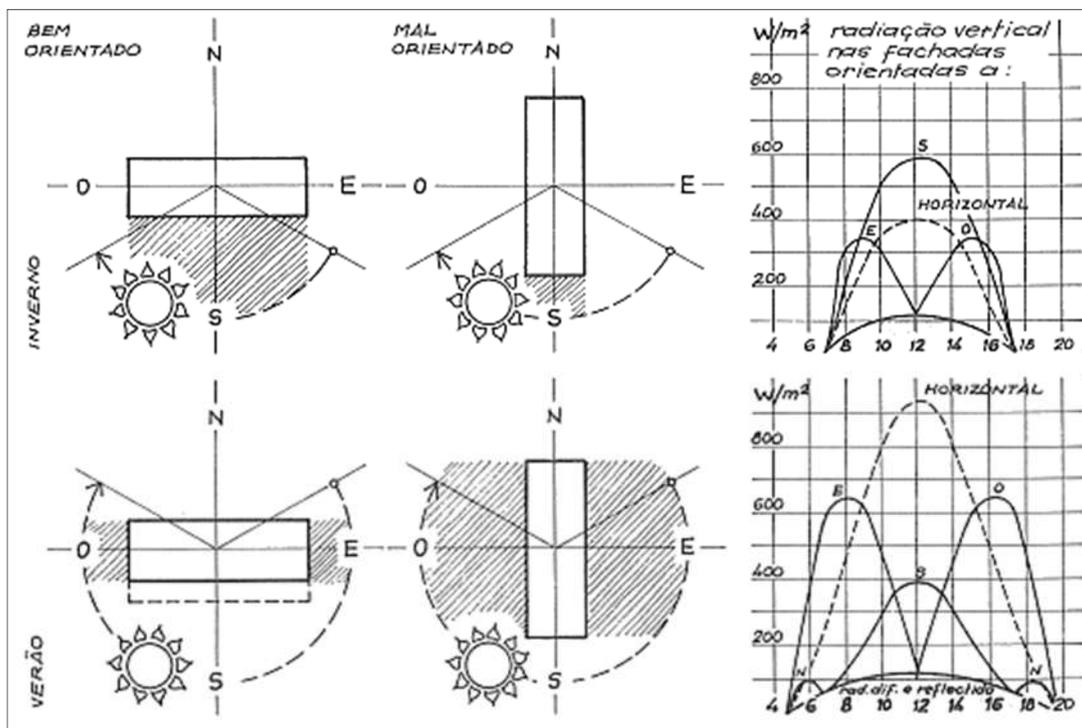


Figura 2.5— Representação esquemática dos valores da radiação nas fachadas de um edifício no verão e no inverno (Moita, 1987).

Um edifício mal orientado não só é mais frio no inverno (radiação máxima a sul com a dimensão da fachada reduzida), como é mais quente no verão (fachadas de grandes dimensões, orientadas a Este e a Oeste, expostas à máxima radiação). Se bem orientado, o edifício consegue, com um sistema de proteção solar no verão, atenuar a radiação na fachada orientada a sul, o que dificilmente se consegue nas restantes fachadas.

## ➤ Iluminação Natural

A utilização da luz natural em edifícios é uma prática recorrente pelas suas diversas vantagens, entre elas: a qualidade da luz, a comunicação visual com o espaço exterior, a conservação e proteção de recursos naturais, a economia de energia, bem como benefícios psicológicos e fisiológicos.

Ainda que se deva complementar a iluminação natural com iluminação artificial, devido à aleatoriedade e variabilidade, a iluminação natural é preferível, em especial, em situações de ocupação predominantemente diurna, o que pode contribuir de forma significativa para a eficiência energética. Nesse sentido, deverá ser tomada em consideração, por parte dos projetistas, a implementação de estratégias de aproveitamento de luz natural mais adequadas (Silva, 2009).

Assim, torna-se relevante garantir um ambiente luminoso interior, livre de desconforto devido a fatores como o sobreaquecimento (em períodos quentes) ou arrefecimento excessivo (em períodos frios), que podem ocorrer devido a um incorreto projeto dos vãos envidraçados.

Portanto, a iluminação natural disponível no interior dos edifícios depende da disponibilidade de luz natural no exterior, possuindo a influência do sol consequências importantes nas condições ambientais interiores térmicas e de iluminação natural, como mostra a seguinte Figura 2.6:



Figura 2.6— Iluminação natural de um espaço interior (Silva, 2009).

Para a caracterização das condições de iluminação natural é necessário atender:

- Às condições de nebulosidade do céu;
- Ao período do dia e do ano;
- Ao tipo de espaço interior do edifício (Quadro 2.1);
- Às dimensões dos vãos envidraçados;
- À existência de obstruções exteriores; e
- Às iluminâncias recomendadas no plano de trabalho em edifícios residenciais (Quadro 2.2).

Quadro 2.1— Iluminâncias recomendadas no plano de trabalho em edifícios residenciais Silva (2009, como citado em CIE, 1975; Santos, 2001, Santos, 2005).

Edifícios Residenciais	Iluminância (lx)
zonas de passagem ("halls")	50 - 100
salas de jantar	100
salas de estar, cozinhas	200
zonas de estudo	300 - 500

Quadro 2.2— Refletâncias recomendadas Silva (2009, como citado em CIE, 1975; Santos, 2001, Santos, 2005).

Compartimento	Reflectâncias
Tectos	0,70 - 0,85
Paredes próximas de fontes de luz	0,60 - 0,70
Outras paredes	0,40 - 0,50
Pavimentos	0,15 - 0,30

Tal como ensina Silva (2009) e Gonçalves & Graça (2004), apresenta-se no Quadro 2.3 um resumo da interação entre a radiação solar e a iluminação natural, nas diferentes orientações nos períodos de aquecimento e arrefecimento.

Quadro 2.3— Impacto da radiação solar e iluminação natural nas fachadas nas diferentes orientações ao longo do período de aquecimento e arrefecimento. Adaptado de: (Silva, 2009; Gonçalves & Graça, 2004).

	Período de Aquecimento (inverno)	Período de Arrefecimento (verão)
<b>Radiação Solar</b>		
Norte	A fachada orientada a Norte não recebe radiação solar direta.	A radiação solar direta (apenas uma pequena fração) incide, essencialmente, no princípio da manhã e fim da tarde.
Este	Esta orientação recebe pouca radiação solar, uma vez que o sol nasce próximo da orientação Sudeste, incidindo na fachada durante poucas horas do período da manhã.	A radiação solar incide durante longas horas da manhã, e os ângulos de incidência são próximos da perpendicular à fachada, o que maximiza a captação de energia solar, que nesta estação é indesejável.
Sul	Orientar fachadas a Sul, pelo percurso do sol no inverno, torna-se vantajoso pois desta forma maximizam-se os ganhos solares.	Neste período, a radiação solar é facilmente atenuada através de proteções solares horizontais.
Oeste	Nesta orientação, a fachada recebe pouca radiação solar durante poucas horas do período da tarde. Ainda, os ângulos de incidência são elevados, o que reduz o efeito da radiação.	Esta é a fachada mais problemática no Verão, pois a radiação solar incide em abundância durante longas horas, desde o meio-dia até ao pôr do Sol.

(Continua)

Quadro 2.1— Impacto da radiação solar e iluminação natural nas fachadas nas diferentes orientações ao longo do período de aquecimento e arrefecimento. Adaptado de (Silva, 2009; Gonçalves & Graça, 2004).

Iluminação Natural	
Norte	Os envidraçados a Norte permitem o aproveitamento de luz natural de qualidade e consistência (sem grande variabilidade ao longo do dia e do ano). A orientação Norte constitui uma boa opção quando se pretenda excluir a radiação solar direta.
Este	Os envidraçados a Este proporcionam iluminação natural essencialmente da parte da manhã. A diminuição da área envidraçada e/ou a utilização de sistemas de controlo dos ganhos solares podem ser uma opção para melhorar o desempenho dos envidraçados nesta orientação.
Sul	Com esta orientação, a iluminação natural mostra-se forte e contrastante, embora com variações significativas ao longo do dia e do ano. A orientação Sul é preferencial para os vãos envidraçados.
Oeste	Nesta orientação, a iluminação natural ocorre da parte da tarde. O sombreamento pode ser problemático, mas essencial para se garantirem condições de conforto (térmico e lumínico).

(Continuação)

## 2.2 Eficiência Energética nos Edifícios

Atualmente, vive-se num período em que a proteção do meio ambiente e a redução da pegada ecológica da humanidade são preocupações prementes, sendo a eficiência energética um tema central na indústria AEC.

Segundo a Agência Internacional de Energia, “a eficiência energética é uma forma de gerir e restringir o crescimento do consumo de energia. Algo é mais eficiente em termos de energia se fornecer mais serviços para a mesma entrada de energia, ou os mesmos serviços para um menor consumo de energia” (International Energy Agency, 2011).

### 2.2.1 Legislação Europeia

Nas últimas décadas do século XX, as pessoas em geral, e a comunidade científica, em particular, começaram a tomar consciência da existência de uma relação direta entre a emissão de gases com efeito de estufa e as alterações climáticas. Conscientes da urgência de encontrar uma solução para travar as alterações climáticas, foi assinado durante a Convenção do Quadro das Nações Unidas para as Mudanças Climáticas, o Protocolo de Quioto<sup>13</sup>, que fixou os objetivos a atingir ao nível da preservação do ambiente.

---

<sup>13</sup> O Protocolo de Quioto é um tratado internacional que foi assinado 11 de dezembro de 1997 e ratificado por mais de 55 países que juntos produzem 55% das emissões de gases com efeito de estufa. Este acordo internacional

Atendendo a que o sector residencial e terciário, na sua maioria composto por edifícios, absorve mais de 40% do consumo final de energia da UE, a eficiência energética dos edifícios e a redução do consumo energético tornou-se um objetivo da Comunidade Europeia (Šajin, 2016).

Assim, e para responder aos objetivos definidos pelo Protocolo de Quioto, que tinham em vista a redução do consumo de energia e a consequente diminuição da emissão de gases com efeito estufa, foi aprovada a Diretiva 2002/91/CE relativa ao desempenho energético dos edifícios, comumente designada *European Performance of Buildings Directive* (EPBD).

Contudo, considerando a constante definição de novos objetivos a atingir em matéria de redução da emissão de gases com efeito estufa, a referida Diretiva foi objeto de sucessivas alterações, entre as quais há a destacar a reformulação operada pela Diretiva 2010/31/UE e, mais recentemente, a alteração introduzida pela Diretiva 2018/844<sup>14</sup>.

Centrando a atenção naquele que foi o quadro em matéria de eficiência energética dos edifícios definido pela primeira versão da EPBD, a Diretiva aprovada em dezembro de 2002 considerou que, uma vez que os edifícios terão, a longo prazo, um maior impacto no consumo de energia, os novos edifícios deverão cumprir requisitos mínimos de desempenho energético, adaptados às condições climáticas locais<sup>15</sup>. Deste modo, assume-se, inequivocamente, como principal objetivo a melhoria do desempenho energético dos edifícios na União Europeia, atendendo às condições climáticas externas e às condições locais, bem como às exigências em matéria de clima interior e à rentabilidade económica<sup>16</sup>.

Atendendo ao objetivo acima descrito, a EPBD recomenda aos Estados-Membros os requisitos a adotar em matéria de:

- a) Enquadramento geral para uma metodologia de cálculo do desempenho energético integrado dos edifícios;
- b) Aplicação de requisitos mínimos para o desempenho energético dos novos edifícios;
- c) Aplicação de requisitos mínimos para o desempenho energético dos grandes edifícios existentes que sejam sujeitos a importantes obras de renovação;
- d) Certificação energética dos edifícios; e

---

impõe aos estados signatários um conjunto de metas tendo em vista a redução da emissão de gases, em pelo menos, 5,2% em relação aos níveis de 1990, no período entre 2008 e 2012.

<sup>14</sup> Diretiva (UE) 2018/844 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 30 de maio de 2018, que altera a Diretiva 2010/31/UE relativa ao desempenho energético dos edifícios e a Diretiva 2012/27/UE sobre a eficiência energética.

<sup>15</sup> cf. considerando (12) da Directiva 2002/91/CE

<sup>16</sup> cf. artigo 1.º da Directiva 2002/91/CE

- e) Inspeção regular de caldeiras e instalações de ar condicionado nos edifícios e, complementarmente, avaliação da instalação de aquecimento quando as caldeiras tenham mais de 15 anos.

Estabelece a referida Diretiva que os Estados-Membros devem aplicar uma metodologia, a nível nacional ou regional, para o cálculo do desempenho energético dos edifícios<sup>17</sup>, que deverá integrar, pelo menos, os seguintes aspetos:

- a) Características térmicas do edifício (envolvente e divisões internas, etc.). Estas características poderão também incluir a estanquidade ao ar;
- b) Instalação de aquecimento e fornecimento de água quente, incluindo as respetivas características de isolamento;
- c) Instalação de ar condicionado;
- d) Ventilação;
- e) Instalação fixa de iluminação (em especial do sector não residencial);
- f) Posição e orientação dos edifícios, incluindo condições climáticas exteriores;
- g) Sistemas solares passivos e proteção solar;
- h) Ventilação natural;
- i) Condições climáticas interiores, incluindo as de projeto.

Porém, a metodologia para o cálculo do desempenho energético dos edifícios poderá também ter em consideração a influência positiva de outros aspetos dos quais são exemplo a iluminação natural ou a existência de sistemas urbanos ou coletivos de aquecimento e arrefecimento.

Para o cálculo do desempenho energético dos edifícios, estes devem ser classificados nas seguintes categorias:

- (i) habitações unifamiliares de diversos tipos;
- (ii) edifícios de apartamentos;
- (iii) edifícios de escritórios;
- (iv) estabelecimentos escolares;
- (v) hospitais;
- (vi) hotéis e restaurantes;
- (vii) instalações desportivas;

---

<sup>17</sup> cf. artigo 3.º da Diretiva 2002/91/CE

- (viii) edifícios destinados a serviços de comércio grossista e retalhista; ou
- (ix) outros edifícios que consomem energia.

A Diretiva obriga os Estados-Membros a tomar as medidas necessárias para que sejam estabelecidos requisitos mínimos em matéria de desempenho energético dos edifícios, podendo estes, fazer uma distinção entre edifícios novos, edifícios existentes e entre diferentes categorias de edifícios.

Por um lado, relativamente ao tratamento a conferir aos edifícios novos, recomenda a Diretiva que sejam adotadas medidas para que os edifícios novos cumpram os requisitos mínimos de desempenho energético<sup>18</sup>. A EPBD encontra nas grandes obras de renovação dos edifícios existentes uma oportunidade para aplicar medidas economicamente rentáveis de melhoria de desempenho energético, pelo que aconselha que, aquando da realização de obras de renovação importantes em edifícios com área útil total superior a 1000 m<sup>2</sup>, o seu desempenho energético seja melhorado, de forma a cumprir os requisitos mínimos<sup>19</sup>.

Uma das medidas com maior impacto apresentadas naquele diploma europeu, prende-se com a obrigatoriedade de fornecer ao proprietário, ao potencial comprador ou ao arrendatário, o certificado de desempenho energético<sup>20</sup> aquando da construção, da venda ou do arrendamento de um edifício, conforme os casos, sendo que tal certificado não deve ter uma validade superior a 10 anos.

### 2.2.2 Legislação Portuguesa

Todas estas medidas/objetivos que constam da EPBD teriam de ser transpostas para a ordem jurídica interna dos Estados-Membros até 4 de janeiro de 2006.

Em Portugal, a transposição da Diretiva concretizou-se com a aprovação de três diplomas: Decreto Lei n.º 78/2006<sup>21</sup>, Decreto Lei n.º 79/2006<sup>22</sup>, e o Decreto-Lei n.º 80/2006<sup>23</sup>.

---

<sup>18</sup> Cf. artigo 5.º da Diretiva 2002/91/CE

<sup>19</sup> Cf. artigo 6.º da Diretiva 2002/91/CE

<sup>20</sup> O certificado de desempenho energético de um edifício é definido nos termos do artigo 2.º, n.º 1 da Diretiva como “um certificado reconhecido pelo Estado-Membro ou por uma pessoa coletiva designada por esse Estado, que inclui o resultado do cálculo do desempenho energético do edifício segundo uma metodologia com base no enquadramento geral definido no anexo”.

<sup>21</sup> Decreto-Lei n.º 78/2006, de 4 de abril de 2006, referente à aprovação do Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE).

<sup>22</sup> Decreto-Lei n.º 79/2006, de 4 de abril de 2006, referente à aprovação do Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE).

<sup>23</sup> Decreto-Lei n.º 80/2006, de 4 de abril de 2006, referente à aprovação do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE).

O Regulamento das Características de Comportamento Técnico do Edifício, surge como uma profunda revisão do diploma original que datava de 1990, dada a necessidade de se adaptar à Diretiva Europeia e a circunstância de o panorama dos edifícios em Portugal ter alterado significativamente desde então.

As principais alterações introduzidas passaram pelos seguintes aspetos:

- Aumento da exigência dos requisitos da envolvente de referência em cerca de 40%;
- Alteração na metodologia de cálculo das necessidades energéticas;
- Modificações substanciais nos dados climáticos e das condições de conforto;
- Maior relevância e detalhe na análise de pontes térmicas;
- Maior complexidade no cálculo dos ganhos solares úteis e da renovação do ar;
- Determinação das necessidades de energia para a preparação de águas quentes sanitárias;
- Obrigatoriedade da colocação de equipamentos com recurso a energia proveniente de fonte renovável para a preparação de águas quentes sanitárias.

Nas medidas apontadas, é evidente a intenção de conduzir o setor habitacional num caminho de sustentabilidade, alicerçado nas energias renováveis.

Relativamente ao Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios (RSECE), revisto pelo Decreto-Lei n.º 79/2006, este veio responder, mais uma vez, à necessidade de adaptação da legislação nacional à Diretiva Europeia.

Antes da referida revisão, a estratégia passava por uma limitação da potência de climatização instalada, de modo a evitar uma prática enraizada na área da construção que passava pelo sobredimensionamento. Com o Decreto-lei n.º 79/2006 foram acrescentados limites ao consumo por tipologia quer dos sistemas de climatização, quer de outros sistemas energéticos dos edifícios.

Com este diploma, tornaram-se mais exigentes os requisitos de sistemas de AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado), passando a manutenção a ser obrigatória e periódica. Foram, ainda, acolhidas soluções energeticamente mais eficientes, e sistemas baseados em energias renováveis.

Apesar de os valores de referência para os consumos de algumas tipologias serem demasiado ambiciosos, e de não existir qualquer referência aos sistemas de iluminação dos edifícios, que têm um papel significativo no consumo final, esta legislação constituiu uma mudança importante relativamente ao regulamento de 1998.

Como já ficou dito, o Sistema Nacional de Certificação Energética e de Qualidade do Ar interior dos Edifícios (SCE) surgiu sob a forma do Decreto-Lei 78/2006, dando resposta à imposição da

Diretiva de implementação de um sistema de certificação energética de forma a informar o cidadão sobre a qualidade térmica dos edifícios.

O certificado de eficiência energética informa de modo sucinto, a classe de desempenho energético, classificando em 9 classes (de A+ a G), a quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> do edifício e, no caso dos edifícios existentes, a indicação se está sujeito a um Plano de Racionalização Energética e/ou a um Plano de Ações Corretivas da Qualidade do Ar Interior.

O processo de certificação de todos os edifícios só se iniciou a 1 de janeiro de 2009, data definida na Portaria n.º 461/2007<sup>24</sup>

Atendendo às metas energéticas traçadas para 2020, a União Europeia sentiu a necessidade de rever os seus objetivos e reforçar os mecanismos na área da eficiência energética dos edifícios, pelo que, em 2010, foi aprovada a Diretiva 2010/31/UE relativa ao desempenho energético dos edifícios, também designada por EPBD *recast*, que revogou a Diretiva 2002/91/CE, com o objetivo de alcançar um melhor desempenho energético dos edifícios e atingir um nível de energia quase nula, “*nearly-zero-energy*”.

Os “*nearly-zero-energy buildings*”, ou nZEB correspondem a edifícios com um balanço energético quase nulo que associam a diminuição das necessidades energéticas do edifício à satisfação das mesmas, sobretudo, através do recurso a energia proveniente de fontes renováveis.

A EPBD reformulada teve em vista acompanhar a evolução tecnológica no que diz respeito à eficiência energética, impondo alguns requisitos mais exigentes, que passam pelo seguinte:

- Os requisitos mínimos rentáveis de desempenho energético devem ser definidos pelas autoridades nacionais e revistos, pelo menos, a cada cinco anos;
- Os edifícios novos estão obrigados a cumprir as normas mínimas, dispondo de sistemas alternativos de elevada eficiência. Todos os edifícios públicos devem alcançar o estatuto de “Edifício com necessidade quase nula de energia” até 31 de dezembro e os restantes até dois anos mais tarde;
- Os requisitos mínimos para a eficiência energética devem seguir o princípio da viabilidade económica, ou seja, ter em conta as poupanças nos consumos de energia durante toda a vida do edifício, o que será fixado por uma metodologia de cálculo comum elaborada pela Comissão Europeia;

---

<sup>24</sup> Portaria n.º 461/2007 de 5 de junho de 2007, referente à calendarização da aplicação do Sistema de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos edifícios (SCE).

- A informação constante nos certificados energéticos de edifícios deve passar a ser mencionadas nos anúncios publicados nos meios de comunicação comercial sempre que sejam colocados à venda ou para arrendamento;
- Foi abolido o limite de 1000 m<sup>2</sup> para a aplicação dos regulamentos em casos de grandes remodelações.

A transposição da Diretiva 2010/31/UE para o ordenamento jurídico português concretizou-se com a aprovação do Decreto-Lei n.º 118/2013<sup>25</sup> e da Lei n.º 58/2013<sup>26</sup>. O legislador nacional viu na transposição da Diretiva Europeia uma oportunidade para melhorar a sistematização e o âmbito de aplicação do sistema de certificação energética e respetivos regulamentos.

Face ao exposto, o Decreto-Lei n.º 118/2013 acolheu em si matérias que anteriormente estavam dispersas por três diplomas distintos, passando a prever o SCE, REH e o RECS. Esta compilação de legislação permitiu uma melhoria ao nível da metodização e âmbito de aplicação, harmonizando conceitos e nomenclaturas transversais a toda a regulamentação.

O Decreto-Lei n.º 118/2013, operou uma clara separação do âmbito de aplicação do REH e do RECS, passando o primeiro a incidir apenas sobre os edifícios de habitação e o último, sobre os edifícios de comércio e serviços, reconhecendo-se, deste modo, as especificidades técnicas de cada tipo de edifício.

No que se refere ao Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, uma das grandes novidades introduzidas é a consideração de nZEB. A legislação portuguesa define este tipo de edifícios como aqueles que têm um muito elevado desempenho energético, em que as necessidades de energia quase nulas ou muito reduzidas são em larga medida satisfeitas com recurso a energia proveniente de fontes renováveis<sup>27</sup>.

---

<sup>25</sup> Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de agosto de 2013, referente à aprovação do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação e do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços, e transpõe a Diretiva n.º 2010/31/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010, relativa ao desempenho energético dos edifícios.

<sup>26</sup> Lei n.º 58/2013, de 20 de agosto de 2013, referente à aprovação dos requisitos de acesso e de exercício da atividade de perito qualificado para a certificação energética e de técnico de instalação e manutenção de edifícios e sistemas, conformando-o com a disciplina da Lei n.º 9/2009, de 4 de março, que transpõe a Diretiva n.º 2005/36/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 7 de setembro de 2005, relativa ao reconhecimento das qualificações profissionais.

<sup>27</sup> cf. artigo 16.º, n.º 2 do Decreto-Lei 118/2013

Os edifícios com necessidade quase nulas de energia deverão passar a constituir o padrão para a nova construção a partir de 2020, ou de 2018, no caso de edifícios novos de entidades públicas, bem como uma referência para as grandes intervenções no edificado existente<sup>28</sup>.

O certificado de sistema de certificação energética<sup>29</sup> tem, obrigatoriamente, de ser apresentado aquando da celebração do contrato de compra e venda, locação ou arrendamento do edifício em questão.

Contudo, nos casos em que esteja em curso o procedimento de licenciamento ou de autorização de construção de um edifício, não é emitido um certificado energético, mas antes um Pré-Certificado onde se atesta que o projeto cumpre os requisitos impostos pelos regulamentos.

Relativamente ao REH que ocupa o capítulo III do Decreto-Lei n.º 118/2013, este estabelece os requisitos mínimos para os edifícios de habitação, novos ou sujeitos a intervenções, bem como os parâmetros e metodologias de caracterização do desempenho energético, em condições normais, de todos os edifícios de habitação e dos seus sistemas técnicos<sup>30</sup>.

Os edifícios de habitação devem ser avaliados e sujeitos a requisitos tendo em vista promover a melhoria do seu comportamento térmico, a prevenção de patologias, o conforto ambiente e a redução das necessidades energéticas, incidindo, para esse efeito, nas características da envolvente opaca e envidraçada, na ventilação e nas necessidades nominais anuais de energia para aquecimento e arrefecimento.

No que concerne ao RECS, este “estabelece as regras a observar no projeto, construção, alteração, operação e manutenção de edifícios de comércio e serviços e seus sistemas técnicos, bem como os requisitos para a caracterização do seu desempenho, no sentido de promover a eficiência energética e a qualidade do ar interior”<sup>31</sup>.

Os edifícios abrangidos pelo RECS devem ser avaliados e sujeitos a requisitos com o objetivo de melhorar o seu comportamento térmico, prevenir patologias e o conforto ambiente, incidindo nas características da envolvente opaca e transparente. Estes requisitos, em conjunto com os requisitos dos sistemas técnicos e o cálculo do desempenho energético, estão definidos na Portaria n.º 349-

---

<sup>28</sup> cf. artigo 16º, n.º 3 do Decreto-Lei 118/2013

<sup>29</sup> Definido no artigo 2.º, alínea h) do Decreto-Lei 118/2013 como “o documento com número próprio, emitido por perito qualificado para a certificação energética para um determinado edifício ou fração, caracterizando-o em termos de desempenho energético”.

<sup>30</sup> cf. artigo 22º Decreto-lei 118/2013

<sup>31</sup> cf artigo 32º Decreto-Lei n.º 118/2013

D/2013<sup>32</sup>, que diz respeito à qualidade térmica da envolvente e eficiência dos sistemas técnicos dos edifícios novos, sujeitos a grandes intervenções e existentes.

Cabe assinalar a recente alteração ao Decreto-Lei n.º 118/2013 introduzida pela Lei n.º 52/2018, de 20 de agosto, que veio estabelecer o regime de prevenção e controlo da doença dos legionários.

Por último, cumpre apenas referir a Lei n.º 58/2013, aprovada aquando a transposição da EPBD *recast*, que disciplina a matéria relativa aos requisitos de acesso e exercício da atividade profissional dos peritos qualificados para a certificação energética e dos técnicos de instalação e manutenção de edifícios e sistemas.

De modo a conseguir-se a conceção de edifícios energeticamente eficientes, que atinjam as metas e os requisitos definidos pela legislação portuguesa e europeia, serão apresentados, ao longo dos próximos subcapítulos, novos conceitos e formas de projetar.

### **2.3 *Design* Generativo**

O projeto de arquitetura é influenciado pelas potencialidades das geometrias computacionais algorítmicas com múltiplas hierarquias e alto nível de complexidade. Modelar superfícies e curvas de forma livre como elementos de construção que estão associados a componentes diferentes e que possuem vários padrões, não é uma tarefa simples de executar com os métodos tradicionais.

Uma das formas de projetar é o *design* generativo, que consiste num processo baseado em algoritmos através dos quais se criam modelos.

Este tipo de *design* permite a definição de metas e restrições de alto nível, através do uso da capacidade computacional e da automação para exploração de um *design* amplo, na procura de modelos que estejam otimizados em várias vertentes e que atendam às necessidades (Benjamin, 2016).

Nas Figuras 2.9 e 2.10, mostram-se alguns exemplos de edifícios que recorrem a esta “arte de projetar”.

---

<sup>32</sup> Portaria n.º 349-D/2013, de 2 de dezembro de 2013, referente ao estabelecimento dos requisitos de conceção relativos à qualidade térmica da envolvente e à eficiência dos sistemas técnicos dos edifícios novos, dos edifícios sujeitos a grande intervenção e dos edifícios existentes.

Nas figuras 2.9 e 2.10, é possível observar a aplicação do *design* generativo no centro aquático nacional de Pequim e no estádio nacional de Pequim.

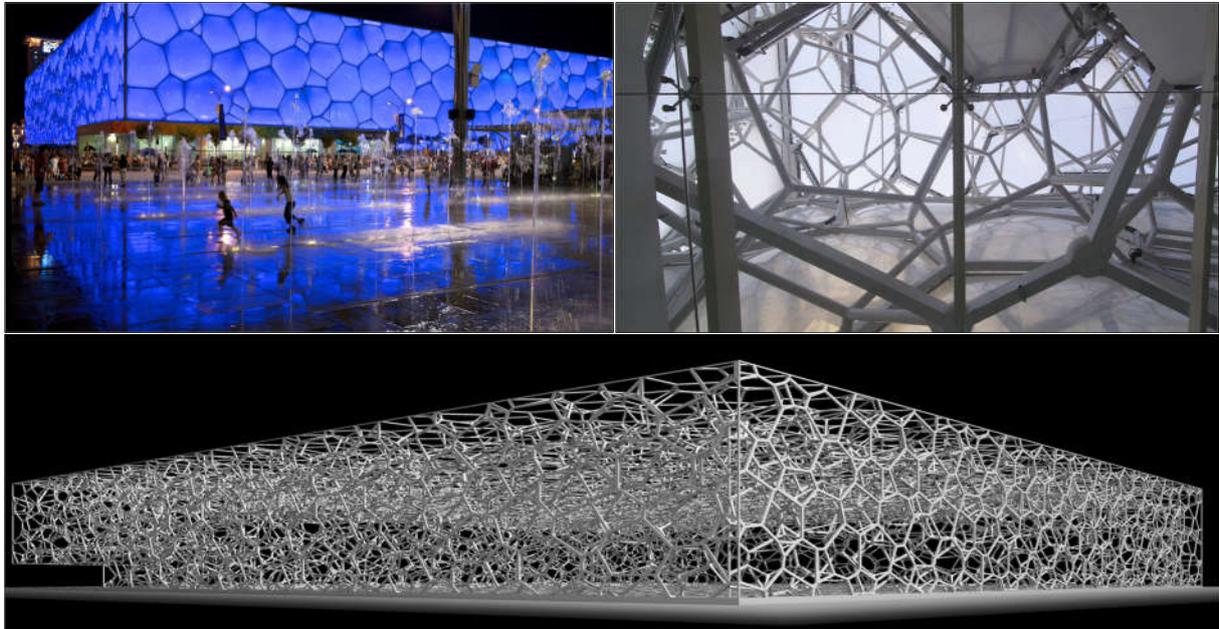


Figura 2.7— Centro Aquático Nacional de Pequim (PTW Architects, Sem Data).



Figura 2.8— Estádio Nacional de Pequim (Arup, Sem Data).

Neste projeto foram aplicados conceitos de modelação paramétrica e *design* generativo, não só por questões arquitetónicas, mas também pela pesquisa de novas soluções estruturais baseadas num padrão natural de células orgânicas e na formação de bolhas de sabão num curto espaço de tempo (Stocking, 2009).

Na Figura 2.10 é possível observar a capacidade do *design* generativo no apoio ao longo de uma linha estética e funcional. Este conceito permite criar formas complexas, otimizadas com base em objetivos e restrições.

Dentro do contexto do *design* generativo é importante discutir a relação existente entre parametrização e procedimentos baseados em regras ou algoritmos.

Segundo Terzidis (2006), “*um algoritmo não tem que ver com a percepção ou interpretação, mas sobre exploração, codificação e extensão da mente humana*”.

Dessa forma, como refere Gero (1996), os algoritmos são elaborados com a intenção de contribuir e estender o pensamento humano, ampliando o processo de solução para áreas não imaginadas e imprevistas, fazendo com que o sistema atue de forma criativa.

A modelação paramétrica é vista como forma de projetar, onde as variações ao longo do projeto são facilmente alteradas, evoluindo de singularidade para multiplicidade ao longo do projeto. O modelo paramétrico é uma representação computacional de um projeto cujas propriedades geométricas estão dotadas de dados variáveis (atributos passíveis de ser alterados) e de restrições (atributo fixo).

Este tipo de modelação confere ao modelo uma rápida resposta face às mudanças que ocorrem ao longo do projeto, adaptando ou reconfigurando os valores anteriores. Do mesmo modo, o projetista pode usufruir das variáveis para explorar outras alternativas para os problemas que possam surgir. Isto exige um raciocínio rigoroso para modelar uma estrutura geométrica sofisticada, incorporada num modelo complexo e flexível o suficiente para permitir a variação dos parâmetros.

Ainda que seja uma tarefa difícil, devido à natureza imprevisível do projeto, o projetista deve antecipar que tipo de variações do modelo deseja explorar para posteriormente determinar que tipo de transformações devem ser feitas ao modelo paramétrico (Barrios Hernandez, 2006) e (Aghaei Meibodi, 2016).

### 2.3.1 *Design* Generativo associado ao Comportamento Termo Energético

É certo que, as fases iniciais do projeto assentam numa série de decisões, que têm uma forte influência no desempenho do edifício durante os processos a jusante, pelo que é importante compreender que essas decisões têm influência e consequências posteriormente (Petersen & Svendsen, 2010).

Tal como foi referido anteriormente, o *design* generativo consiste na definição de um conjunto de regras destinadas a restringir o conceito geral de um edifício, permitindo que o utilizador faça algumas alterações nos valores das dimensões ou relações específicas, produzindo inúmeras opções de *design*.

Assim, ao associar-se uma abordagem de *design* generativo a um sistema de avaliação eficiente, os projetistas poderão explorar mais opções de projeto que levam em consideração o comportamento energético, mesmo nas fases iniciais do projeto.

Aquando da execução de uma simulação de análise energética com base num algoritmo generativo, fornece-se à ferramenta de análise um modelo tridimensional ou um conjunto de parâmetros que descrevem esse mesmo modelo, dependendo da ferramenta em utilização. Considerando que cada simulação de análise é morosa para executar e produzir resultados, e que qualquer alteração no modelo para testar novas possibilidades implica custos temporais, poderá desmotivar os projetistas para obter melhores resultados.

Deste modo, o recurso ao *design* generativo para melhorar o desempenho energético de um edifício poderá ser uma ótima forma de reduzir o tempo despendido na realização dessa tarefa.

Assumindo um bom conhecimento das ferramentas de modelação e boas habilidades de programação, o tempo despendido na produção manual de um modelo pode ficar próximo do tempo gasto na criação de um conjunto de algoritmos para gerá-lo. A diferença reside, essencialmente no tempo que se necessita para gerar novos modelos.

Relativamente a uma simulação de qualquer tipo, em geral, o tempo de execução depende da complexidade do modelo e das configurações definidas no *software* para o detalhe da análise. Após a execução da primeira simulação, avaliam-se os resultados e altera-se o modelo de acordo com determinado valor.

Neste ponto, além da economia de tempo que o *design* generativo permite obter, permite igualmente tornar o processo de alteração do modelo mais expedito. É apenas necessário um ajuste dos parâmetros de acordo com as mudanças pretendidas e executar o programa novamente para obter um novo modelo.

### 2.3.2 Algoritmos Genéticos

Os algoritmos genéticos são métodos adaptativos que podem ser usados para resolver problemas de procura e otimização (Beasley, Bull, & Martin, 1993), tendo sido desenvolvidos, desde 1975, a partir de algoritmos evolutivos, por John Holland.

Os princípios evolutivos implementados estão diretamente relacionados e inspirados no conceito de seleção natural, proposto por Charles Darwin, sendo um mecanismo chave da evolução das espécies de seres vivos (Rutten, 2010).

Antes de se prosseguir na explicação dos algoritmos genéticos, é necessário compreender os conceitos subjacentes à teoria de Darwin. De acordo com a teoria da seleção natural, numa população, os organismos apresentam diferentes características (variabilidade intraespecífica), pelo que uns indivíduos têm características mais favoráveis (mais aptos) do que outros, em função do meio num dado momento.

A evolução do conhecimento, na área da Biologia e da Genética, permitiu compreender que a informação genética se encontra organizada em cromossomas, constituídos por ácido desoxirribonucleico (ADN), contendo vários genes.

De uma forma simplista, pode-se dizer que os genes são unidades funcionais dos cromossomas, responsáveis pela determinação das características de um indivíduo. Assim, foi possível explicar que a variabilidade intraespecífica, referida por Darwin, deve-se, em parte, ao processo de formação dos gâmetas durante o qual podem ocorrer mutações aleatórias e *crossing-over*<sup>33</sup>, bem como ao resultado das possíveis interações entre o conjunto de genes desses indivíduos e o meio e, ainda, à aleatoriedade da reprodução. Estes operadores contribuem para a lenta e progressiva modificação do conjunto de genes que caracterizam a população, conduzindo a alterações das características da mesma, que podem concorrer para a sua evolução. Os membros menos aptos, da população, são menos propensos a serem selecionados para a reprodução deixando, como tal, menos descendência, enquanto os indivíduos mais aptos têm maior probabilidade de se reproduzir transmitindo essas características às gerações seguintes. A nova geração terá uma maior percentagem das características mais aptas da geração anterior conduzindo a que, ao longo de muitas gerações, essas características estejam disseminadas na população.

Os algoritmos genéticos assentam numa analogia direta do comportamento natural. Estes trabalham com uma população de indivíduos, em que cada um representa uma possível solução para um determinado problema. Posteriormente, cada indivíduo recebe uma "pontuação" (*ranking* em inglês) de acordo com a qualidade da solução que representa. A título exemplificativo, fazendo o paralelismo com a natureza, a pontuação equivale a avaliar quão apto está o organismo para competir pelos recursos essenciais.

---

<sup>33</sup> Troca de genes entre cromossomas homólogos durante o processo de formação dos gâmetas.

Os indivíduos mais aptos têm mais oportunidade de se reproduzir, através de cruzamentos com outros indivíduos da população. A nova geração surge influenciada por operadores estocásticos como: mutação e *crossing-over*. Se o algoritmo genético tiver sido bem projetado, a população convergirá para uma gama de soluções ótimas para o problema (Beasley, et al., 1993; Haupt & Haupt, 2004; McCall, 2005). Estes processos são iterados “n” vezes até que seja conseguida uma solução próxima daquela que seria a ótima ou até atingir o número máximo de iterações.

Em algoritmos genéticos, um vetor solução é chamado de cromossoma onde os genes são as variáveis do modelo. À medida que os genes mudam o estado do modelo, a adequação do modelo muda. A "paisagem da aptidão" com dois genes é mostrada em (1) nas Figuras 2.11 e 2.2. Algoritmos genéticos trabalham com uma coleção de cromossomas, chamada população. Esta população é geralmente inicializada aleatoriamente (2). A aptidão de cada cromossoma é avaliada e os cromossomas mais aptos são mantidos para reprodução (3). A próxima geração é constituída por esta “raça” e, se o processo for como pretendido, é mais apto do que a geração anterior (4). Esse processo é repetido e, eventualmente, a procura converge para a(s) solução(ões) ótima(s) representada(s) em (5).

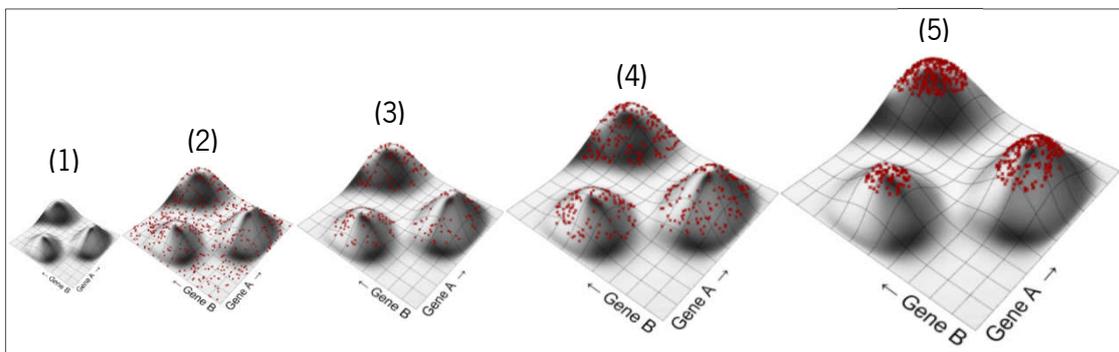


Figura 2.9— Paisagem de aptidão com base na evolução natural (Rutten, 2010).

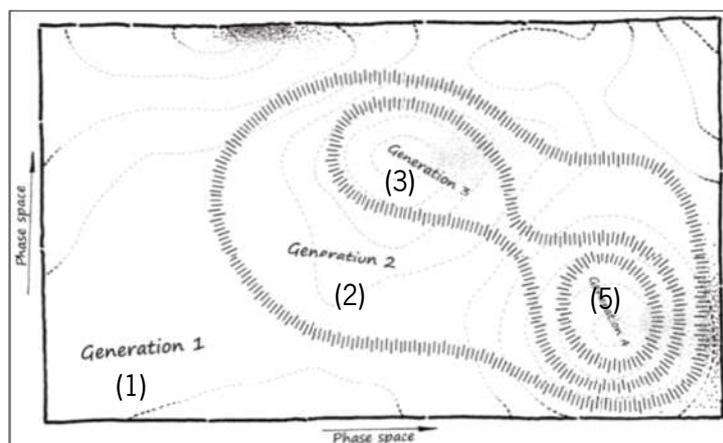


Figura 2.10— Representação esquemática de um ciclo de *solver* evolucionário (Rutten 2013).

A utilização de algoritmos evolutivos como um método para resolver problemas complexos tem aspectos positivos e negativos, evidenciando duas principais vulnerabilidades.

Em primeiro lugar, a convergência para o resultado é mais lenta do que aquela que se verifica com o recurso a outras técnicas de otimização, ao ponto da computação para a solução de alguns problemas poder demorar dias. Além disso, devido à sua natureza estocástica, esse tipo de algoritmo não garante a identificação exata da solução ótima, mas na maioria das vezes deteta uma boa aproximação.

Por estas razões, a aplicação de algoritmos evolucionários não é adequada para todo tipo de problemas, mas são particularmente úteis quando a função objetivo é muito complexa para ser rapidamente maximizada com métodos não-estocásticos (Zanchetta, Cecchini, & Bellotto, 2018).

A Figura 2.13 esquematiza a relação entre os algoritmos genéticos e a teoria da seleção natural que foi explicada no decurso do presente ponto 2.3.2.

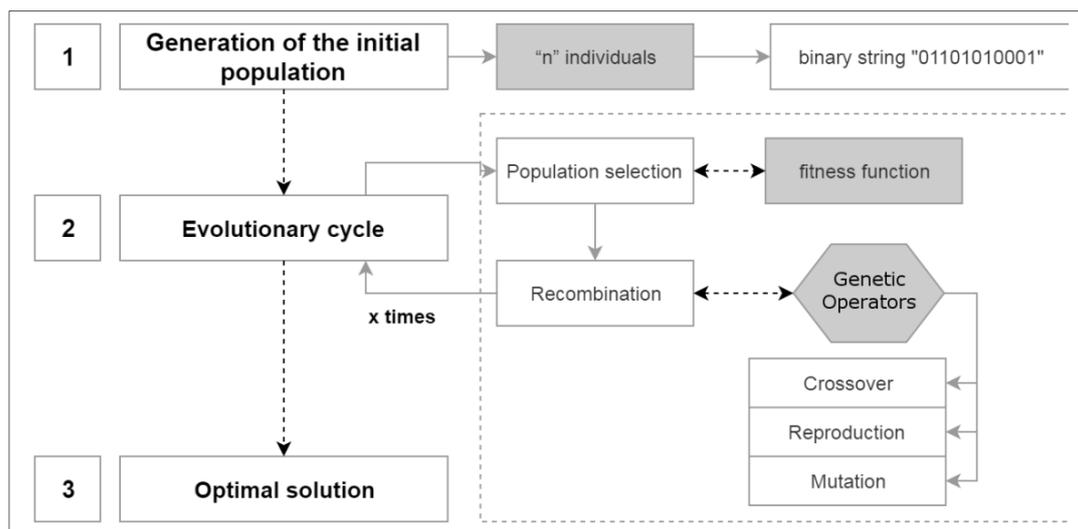


Figura 2.11— Esquema funcional dos algoritmos genéticos (Zanchetta et al., 2018).

Assim, como evidenciado na Figura 2.13, os algoritmos genéticos geram aleatoriamente uma população com "n" indivíduos que possuem diferentes características (variabilidade intraespecífica de Darwin). Em seguida, é selecionada uma população onde os operadores genéticos vão atuar (mutações, *crossing-over* e reprodução) conduzindo à recombinação dos indivíduos através da qual o ciclo geracional é concluído (sobrevivência dos mais aptos e reprodução diferencial). Este ciclo vai-se repetir até se encontrar a solução ótima definida no algoritmo.

## 2.4 Estratégias de Otimização

Nas últimas décadas, os temas relacionados com a simulação de conforto adquiriram foco no processo de construção, exigindo análises cada vez mais completas. Neste campo, a otimização multidisciplinar baseada na simulação pode ser uma vantagem no auxílio da investigação de alternativas de projeto para obtenção de melhores soluções apoiadas pelo rigor científico (Zanchetta et al., 2018).

O recurso a ferramentas de simulação computacional tem vindo a aumentar consideravelmente, pelo que hoje em dia os projetistas do setor AEC recorrem com frequência a *softwares* capazes de realizar simulações dinâmicas, de forma a estudar o comportamento energético dos edifícios. Associando a estas ferramentas uma abordagem paramétrica, é possível calcular os extremos, mínimo e máximo, de funções intrínsecas às simulações dinâmicas.

Com a finalidade de obter uma solução melhorada, de forma mais rápida e menos trabalhosa, o modelo pode ser resolvido através de métodos iterativos, que consistem em aproximações sucessivas, conduzindo a uma solução que satisfaça as condições ótimas (Zanchetta et al., 2018; Nguyen, Reiter, & Rigo, 2014).

A rápida evolução tecnológica impulsionou estes métodos e ferramentas para resolver vários problemas de diferentes complexidades, tais como, a forma e a envolvente do edifício, a gestão dos sistemas AVAC e a utilização de energia renovável (Zanchetta et al., 2018).

### 2.4.1 Tipos de Otimização

Geralmente, os algoritmos de otimização são categorizados em seis pares de diferentes aspetos, não necessariamente exclusivos entre si, como se pode constatar na Figura 2.14. Por exemplo, um problema de otimização dinâmica pode subdividir-se num tipo de problema com restrições ou sem restrições, sendo que algumas das variáveis podem ser contínuas ou discretas (Haupt & Haupt, 2004).

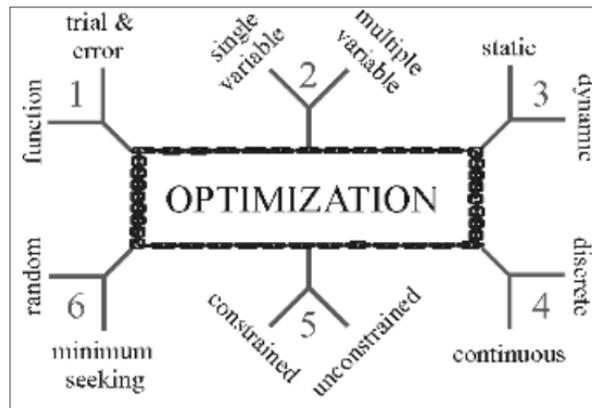


Figura 2.12— Seis categorias de algoritmos de otimização (Haupt & Haupt, 2004).

Relativamente ao número de funções a serem otimizadas, estas podem ser agrupadas em dois processos principais (Zanchetta et al., 2018):

1. Otimização mono-objetivo
2. Otimização multiobjetivo

#### 2.4.2 Otimização Mono e Multiobjetivo

Focalizando todos os processos de otimização, descritos na literatura, cerca de 60% dos casos assentam numa análise mono objetivo (Evins, 2013).

Numa situação em que haja um único objetivo (ou uma função mono-objetivo), o problema em questão será, de certa forma, evidente. No entanto, a engenharia depara-se com a existência de objetivos conflituosos que exigem uma otimização multiobjetivo para a sua resolução. A otimização multiobjetivo pode ser abordada de duas formas:

1. Através da soma ponderada dos vários objetivos que combinados formam um único objetivo;
2. Por meio da otimização multiobjetivo, também conhecida como otimização de Pareto.

Na simulação mono-objetivo (abordagem mais comum), atribui-se pesos diferentes a cada função em causa que, conseqüentemente, originam uma função objetivo ponderada com base nos critérios adotados. O algoritmo de otimização procura a solução que minimiza (ou maximiza) a função objetivo (Wright, Loosemore, & Farmani, 2002) e (Haupt & Haupt, 2004).

Por outro lado, na simulação multiobjetivo, procura-se uma gama de soluções que contemplem os *trade-off* entre os vários objetivos. O *trade-off* ou frente de Pareto, é fixado com base no conceito de dominância, que se pode visualizar na Figura 2.15.

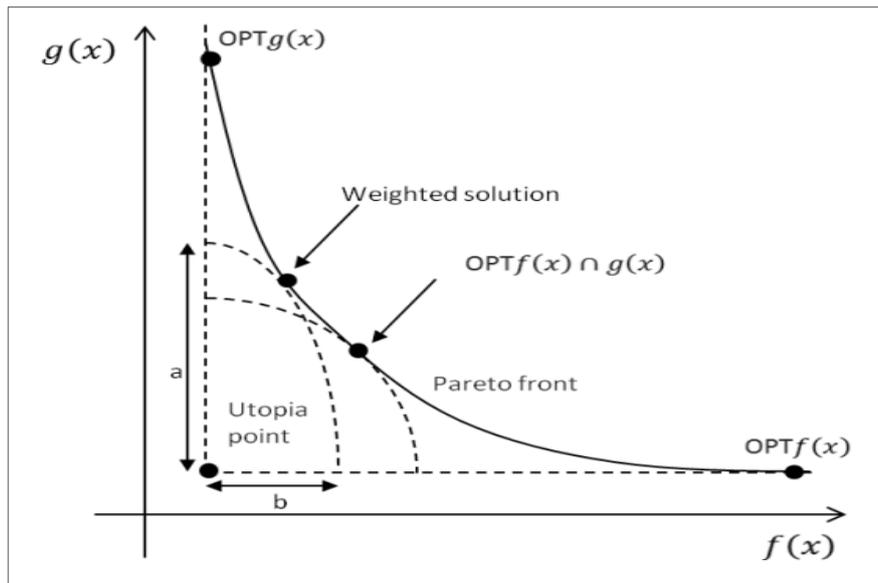


Figura 2.13– O ótimo de Pareto entre duas funções (Zanchetta et al., 2018).

Os pontos designados como “ótimos” encontram-se ao longo da curva fronteira de Pareto. Estes pontos representam as soluções das duas funções para as quais não é possível melhorar todos os objetivos. À luz dos resultados obtidos, cabe ao projetista escolher a melhor solução ou a mais adequada ao problema (Zanchetta et al., 2018).

Para melhor compreensão e desmistificando este conceito de otimização multiobjetivo, considere-se o seguinte exemplo apresentado por Danil Nagy (2017): a Figura 2.16 apresenta uma superfície fechada através de 3 círculos.

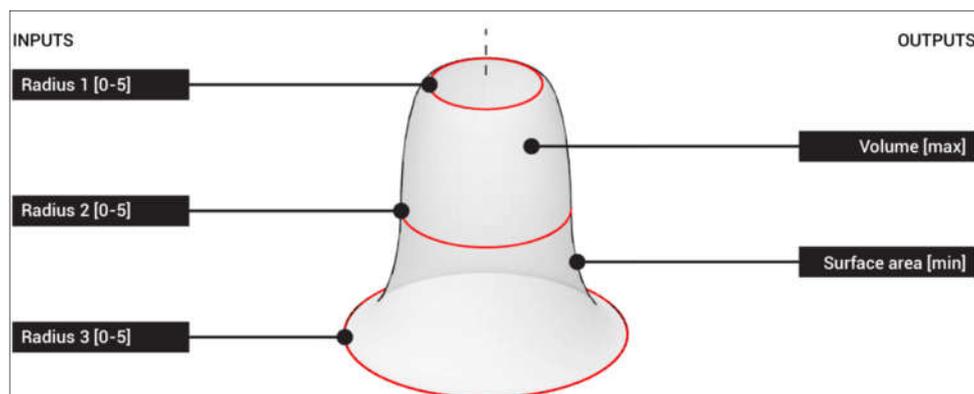


Figura 2.14– Entradas/Saídas do modelo (Nagy, 2017).

O diagrama da Figura 2.16 mostra as entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) do modelo. As entradas são os diâmetros dos três círculos. Os objetivos passam por maximizar o volume e minimizar sua área de superfície. Pode, facilmente, compreender-se que estes objetivos estão em conflito entre si.

Embora a intuição conduza à forma de uma esfera, é evidente que não existe uma solução única que mostre que há uma menor área face a um maior volume.

Na Figura seguinte (2.17) exemplifica-se o espaço de *design* multidimensional das várias soluções possíveis:

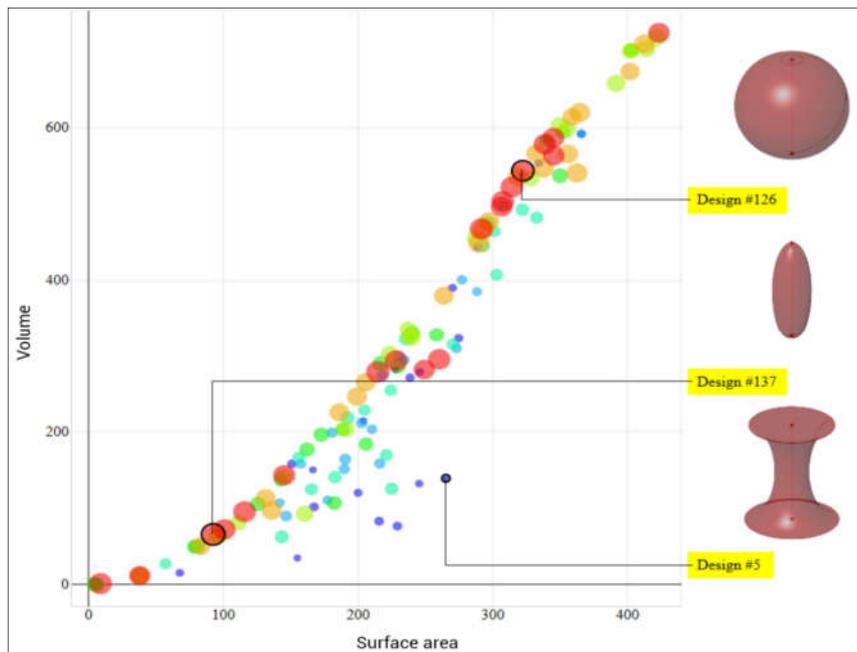


Figura 2.15— Espaço de soluções de acordo com dois objetivos (Nagy, 2017).

A Figura 2.17 apresenta um gráfico cuja área é representada ao longo do eixo das abcissas e o volume no eixo das ordenadas, sendo que cada ponto é referente à forma de cada solução no espaço de *design*. A cor e o tamanho de cada círculo mostram a sequência segundo a qual foram calculadas as soluções. Analisando o gráfico percebe-se o tipo de relação quase linear que existe entre os dois objetivos, pois as formas com mais volume tendem a ter maior área de superfície. As soluções número 126 e 137, podem ser consideradas ótimas, dado que para cada uma não há outro modelo que as supere, da mesma forma que a solução número 5 não é considerada ótima pois são várias as soluções que a superam em mais volume e menos área de superfície. Logo, a linha onde estão dispostas as várias soluções denomina-se de frente de Pareto.

Aprofundando esta análise, o autor deste exemplo, Nadil Nagy, definiu um ponto utopia como representação da melhor solução hipotética face a todos os objetivos, sendo que esta solução será um volume infinito sem área de superfície, o que é difícil de conceber (Figura 2.18).

Todos os projetos tenderão a aproximar-se deste “ponto utopia sem que ultrapassem a curva fronteira de Pareto que delimita os projetos ótimos.

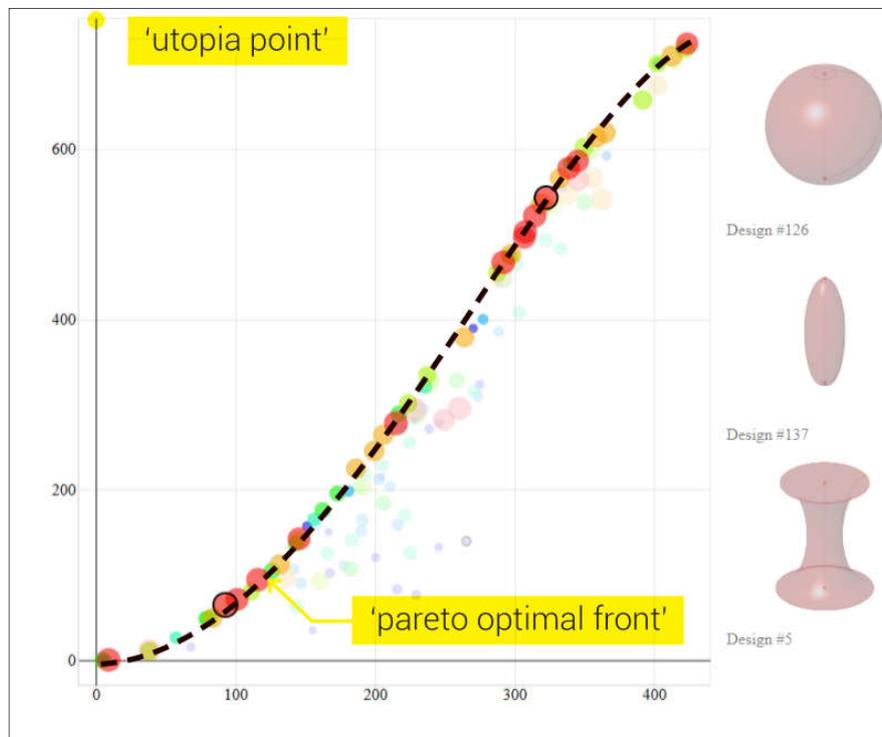


Figura 2.16— Visualização da frente ótima de Pareto e do ponto da utopia (Nagy, 2017).

Quanto ao contributo do algoritmo genético na procura das melhores soluções possíveis, dentro do espaço multidimensional, este explora todas as soluções dispostas ao longo da frente de Pareto. Acresce que, o algoritmo, para garantir que não ignora nenhuma solução da frente de Pareto, explora várias soluções otimizadas e tenta aproximar a curva em direção ao ponto “utopia”. Na prática, a frente de Pareto nem sempre é facilmente visível e clara, quando contrastada com a anteriormente analisada, que implementava apenas dois objetivos, dado que na realidade são vários os objetivos remetendo para “n” dimensões.

### 2.4.3 Exemplos de aplicação

#### ➤ ***Qintai International Tower, China***

A Qintai International Tower, projeto de Adrian Smith + Gordon Gill Architecture, é um edifício que foi concebido com o recurso a ferramentas de modelação paramétrica.

O parametrismo utilizado na fase de conceção permitiu que fosse possível ajustar a curvatura da fachada numa linha diagonal para otimizar o auto-sombreamento e minimizar a exposição solar nas zonas onde o efeito da radiação solar é mais severo, sem que se perdesse o conceito estético e cultural. Este edifício (Figura 2.19) foi também otimizado relativamente à orientação, com o intuito de maximizar as vistas para as grandes massas de água de Wuhan, inclusive o Lago Moon e o Rio Hanshui.



Figura 2.17— *Qintai International Tower* (Adrian Smith + Gordon Gill Architecture, 2012).

### ➤ **Fifth XiangYa Hospital, China**

O Fifth XiangYa Hospital é um centro hospitalar que faz parte de uma rede de hospitais de ensino da Universidade do Sul Central. Este projeto foi desenvolvido com linhas sustentáveis e inovadoras, através da utilização de estratégias de parametrização, de estudos ambientais e de otimizações. Desta forma, foi possível melhorar vários aspetos importantes na sua performance, de modo particular, através do *design* generativo da fachada associado a um estudo ambiental, tendo sido possível obter os seguintes ganhos:

- 2,1 horas de conforto adicional por dia devido à geometria da fachada + sistema de sombreamento (Figura 2.20);
- Redução de 42% no pico de energia e dimensionamento de equipamentos AVAC nas zonas de perímetro;
- Redução de 74% na *energy use intensity* (EUI);
- 65% da área em quartos de pacientes têm iluminação natural entre as 9h e as 17h; e
- Acesso visual para os espaços exteriores permitindo que o ambiente de cura do complexo – natureza, jardins, luz do dia e vistas – tenha maior impacto.



Figura 2.18— *Fifth XiangYa Hospital* (Payette, Sem Data).

➤ **One Vanderbilt, Estados Unidos da América**

One Vanderbilt é um edifício de escritórios adjacente ao *Grand Central Terminal*, no coração de Midtown Manhattan.

O tamanho e a complexidade do *One Vanderbilt*, combinados com o seu denso contexto urbano, elevaram as várias expectativas das partes interessadas num desafio significativo. A KPF criou ferramentas de avaliação personalizadas e usou a análise de dados para reconciliar objetivos concorrentes e facilitar o *design* do mais recente ícone da cidade de Nova Iorque (KPF, Sem Data).

Na Figura 2.21 é possível identificar os vários objetivos (como permitir que a luz do dia percorra as ruas envolventes, melhorar os acessos pedonais, não obstruir as vistas para o *Grand Central Terminal*) colocados por parte do cliente, bem como a tentativa de harmonização entre o edifício e a cidade/comunidade.

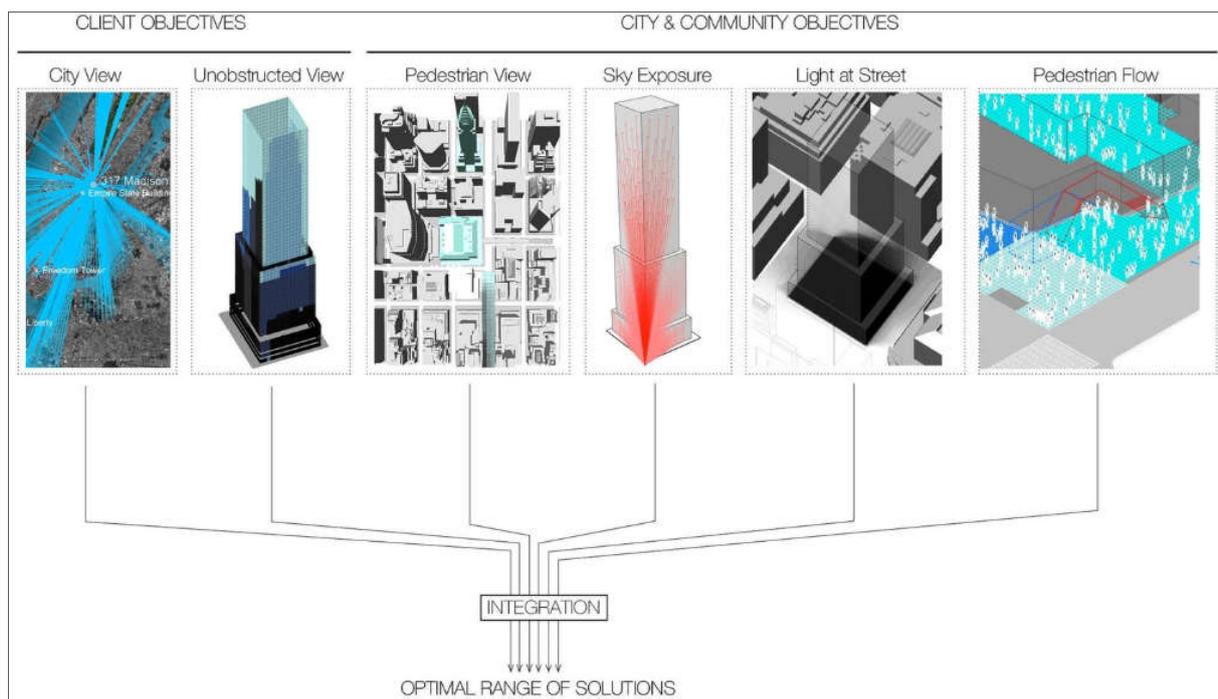


Figura 2.19— Integração dos objetivos para a obtenção das soluções ótimas (KPF, Sem Data).

Na Figura 2.22 apresentam-se alguns resultados da geometria do edifício, bem como do desempenho face aos objetivos e restrições impostas.

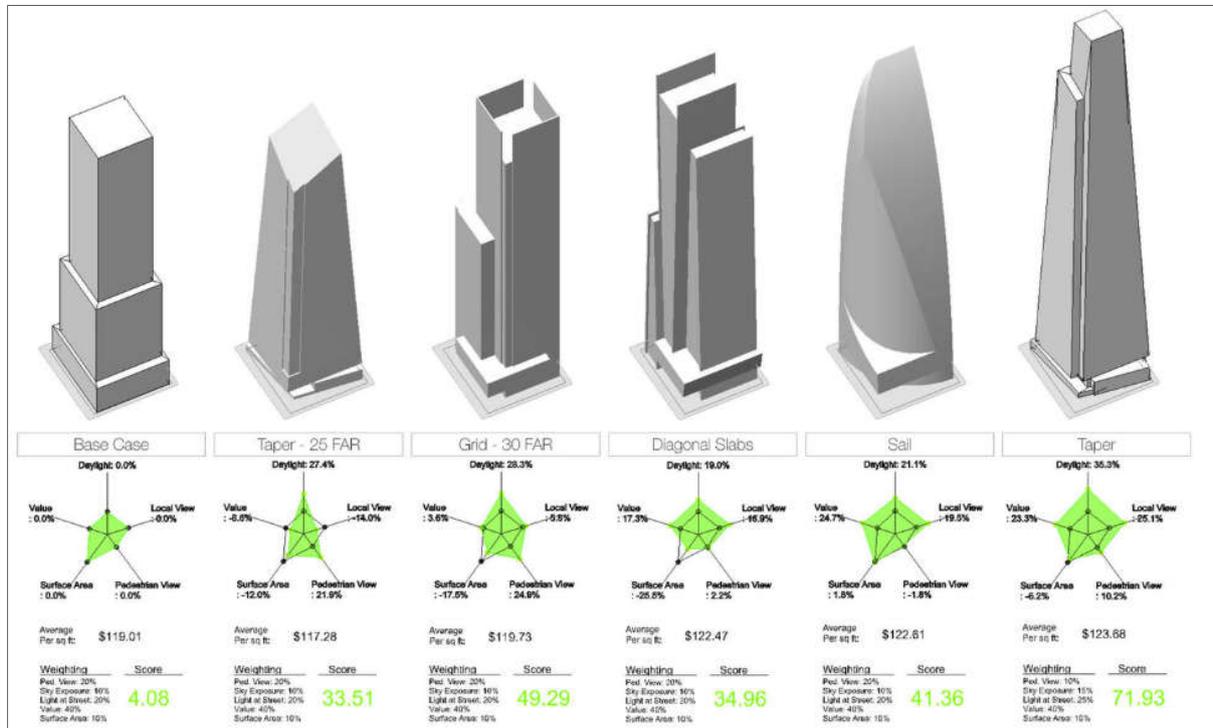


Figura 2.20— Algumas soluções com a correspondente pontuação e desempenho (KPF, Sem Data).

Mais uma vez, esteve presente o conceito de *design* generativo aliado a análises de desempenho e de otimização, servindo de ponte entre os vários objetivos.

### ➤ **Crystal Plaza, China**

O projeto do *Crystal Plaza*, em Xangai, previa a construção de 297290 m<sup>2</sup> de escritórios, residências e lojas em cinco blocos.

As restrições impostas pelos regulamentos de construção e planeamento dificultaram a adaptação da área de implantação do local. A KPFui, empresa de arquitetura, desenvolveu modelos virtuais das várias regulamentações da cidade que permitiram a repetição de dezenas de milhares de opções em massa, para determinar a gama de configurações de planos principais que atendessem aos regulamentos:

- Altura máxima de construção: especificada por bloco;
- Iluminação natural no bloco habitacional: os quartos e salas de estar devem ter pelo menos uma hora de luz direta no solstício de inverno;
- Separação de edifícios: dimensões determinadas com base na utilização (escritório/residencial), altura e orientação do edifício.

Os requisitos previstos foram integrados num único modelo de análise (Figura 2.23):

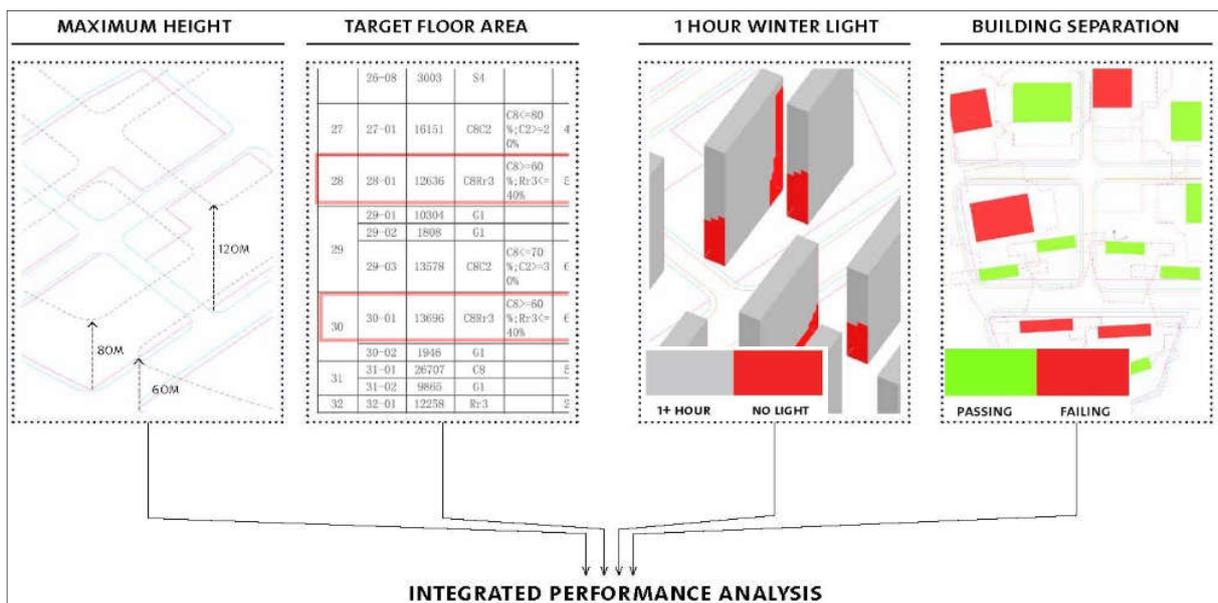


Figura 2.21— Integração dos objetivos para a análise evolutiva (KPF, Sem Data).

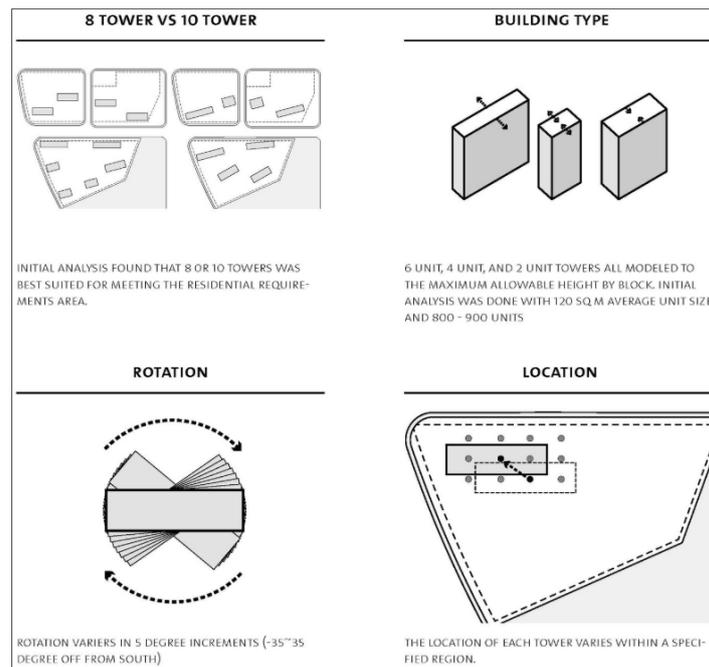


Figura 2.22— Opções de variação da geometria e disposição no espaço dos blocos residenciais (KPF, Sem Data).

Para estudar e alargar o leque de opções possíveis, que obedecessem às regulamentações, desenvolveram-se modelos generativos capazes de alterar a geometria do edifício, bem como a sua localização na área de implantação de forma expedita. Os parâmetros que variaram (no domínio das restrições regulamentares), tanto nos blocos residenciais como nos de serviço foram os seguintes (Figura 2.24 e 2.25):

- Rotação;
- Localização;
- Comprimento e altura;
- Número de blocos.

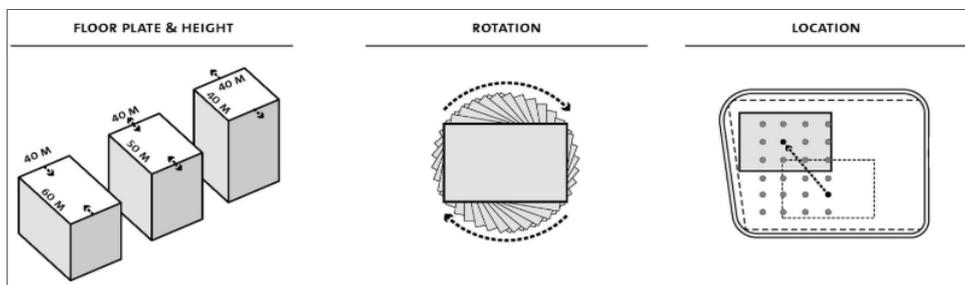


Figura 2.23— Opções de variação da geometria e disposição no espaço dos blocos de serviço (KPF, Sem Data).



Figura 2.24— Produto final do estudo (KPF, Sem Data).

Após as análises e processos de otimização realizados pela empresa, na Figura 2.26 é possível visualizar o resultado final de todo o estudo.

Tal como referido pelos colaboradores da KPFui, estas ferramentas e metodologia evitam o tempo despendido para determinar e testar projetos individualmente verificando a conformidade com os regulamentos.



### 3. METODOLOGIA — FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

O recurso a *softwares* de modelação capazes de conceber geometrias arbitrárias, ou também conhecida como forma livre, gera um conjunto de oportunidades e desafios para o projeto arquitetónico e de engenharia. Neste capítulo, serão apresentados o *software* utilizado e *plugins* associados, bem como os desafios e oportunidades, e as razões pelas quais foram selecionados para o caso de estudo. Será, também, apresentado o caminho a percorrer, que passa por uma breve explicação de cada *software* e *plugins* a utilizar e o raciocínio que lhe está subjacente. Numa fase final, será abordada a metodologia utilizada no caso de estudo.

#### 3.1 Modelação no *Grasshopper*

##### ➤ ***Rhinoceros3D/ Grasshopper***

O *Grasshopper* (um *plugin* para o *Rhinoceros3D*), é um editor de programação visual desenvolvido por David Rutten em 2014, na Robert McNeel & Associates.

O *Rhinoceros3D* e o *Grasshopper*, utilizados em conjunto, permitem a diversas áreas, tais como a arquitetura, a engenharia, o *design* de produto, definir um controlo paramétrico sobre os modelos desenvolvidos num ambiente robusto e versátil, explorando fluxos de trabalho e de *design* generativo multifacetados, constituindo uma plataforma para o desenvolvimento de uma programação lógica de alto nível dentro de uma interface gráfica intuitiva.

Ainda que o objetivo da programação visual seja suprir as dificuldades de sintaxe, o utilizador deverá ter alguns conhecimentos e estar familiarizado com conceitos genéricos da programação em geral, isto é, ter em mente o conceito de variável, de regras e funções, de ciclos, entrada e saída de dados, etc. Como exemplo da diferença entre a programação em código *Python* e visual, na Figura 3.1, para a construção de uma senoide, exemplifica-se a sua construção através dos dois tipos de sintaxe abordados.

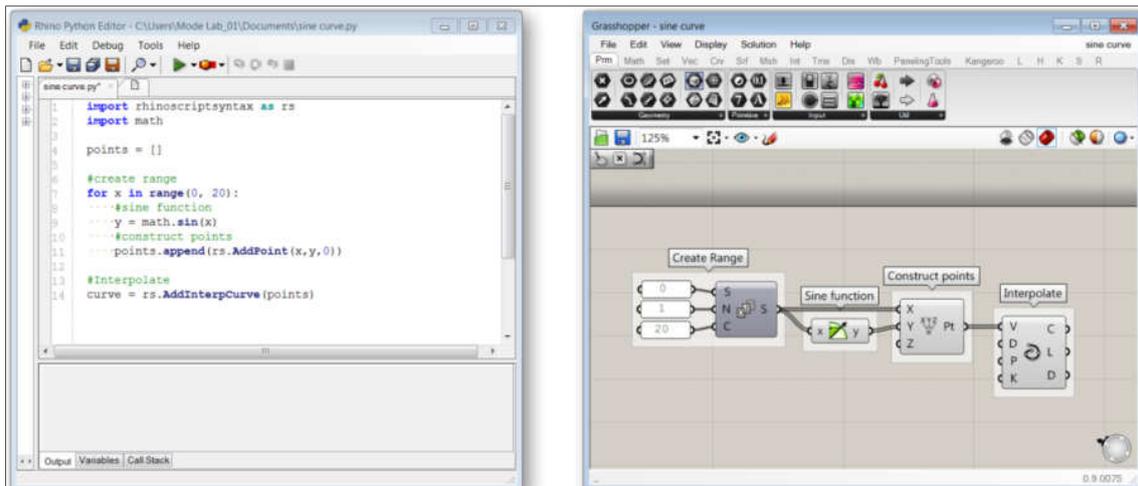


Figura 3.1— Comparação do código *Python* e sua construção no *Grasshopper* para desenhar uma senoide (Mode Lab, 2014).

Assim, e resumidamente, apresenta-se os conceitos gerais do *Grasshopper* e a interação entre as componentes para a construção das definições. No *Grasshopper*, o utilizador seleciona a componente que deseja, a arrasta e solta para a janela de edição principal construindo, desta forma, o modelo ou o algoritmo pretendido. A janela de edição principal pode ser vista na Figura 3.2.

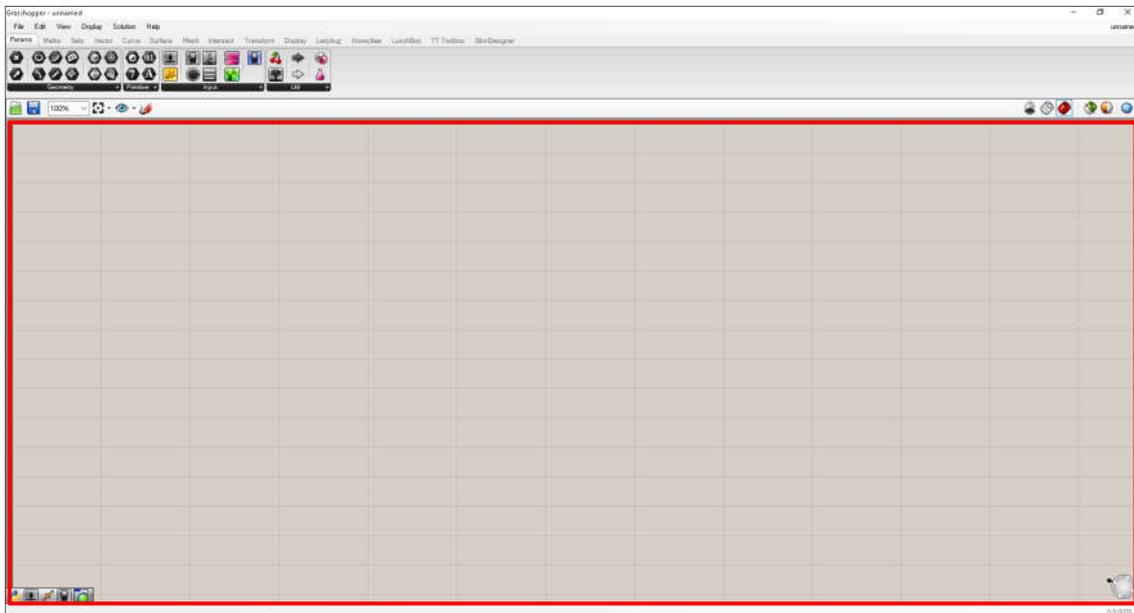


Figura 3.2— Janela de edição principal (ou “*canvas*” em inglês).

Na janela de edição principal procede-se à modelação (generativa ou não, através da interligação entre as diversas componentes por forma a automatizar tarefas no *Rhinceros3D*.

A representação geométrica do modelo é feita através da janela de visualização do *Rhinoceros3D*. A geometria é sempre atualizada (embora a atualização automática é passível de desativação através da função de bloqueio). No que respeita à construção do algoritmo esta é feita através da ligação entre nó, sendo que cada nó (entrada ou saída de dados) é interligado através de fios.

No *Grasshopper* existem duas realidades: as componentes e os parâmetros. Os parâmetros armazenam os dados de forma estática ou dinâmica, enquanto que as componentes executam dados provenientes de outras componentes ou parâmetros, originando assim um novo conjunto de dados.

Dito de outro modo, as componentes executam uma operação/função com os dados de entrada (provenientes de parâmetros ou outras componentes) e apresentam os dados de saída para, posteriormente, fazer a ligação com outra componente de visualização, de execução de uma determinada tarefa ou um parâmetro para armazenamento de dados.

No que concerne ao tratamento e utilização de dados, estes podem assumir várias formas: valores numéricos, texto explícito, informação com origem numa base de dados, formas geométricas, entre outras. Além disso, os dados importados podem ser internalizados, contudo, esta versatilidade ainda que vantajosa, deve ser tratada com cuidado.

Acresce que, as componentes do *Grasshopper* se encarregam da compatibilidade/conversão dos dados de entrada que, de um modo geral, são sensíveis ao tipo de dados de entrada *versus* requerida. Neste ponto, as componentes de conversão de dados ganham ênfase resolvendo incompatibilidades.

Sendo a definição construída parametricamente, as mudanças nos dados de entrada são refletidas instantaneamente em todo o modelo (como referido anteriormente), abrindo uma vasta gama de alternativas ao projeto. Os parâmetros de entrada dinâmicos também podem ser modificados por outros componentes nativos ou com origem noutra *plugin* como por exemplo o *Galapagos* ou o *Octopus*. Na Figura 3.3, é possível perceber a interação entre as componentes para gerar um determinado volume, bem como a construção algorítmica para realizar esta tarefa.

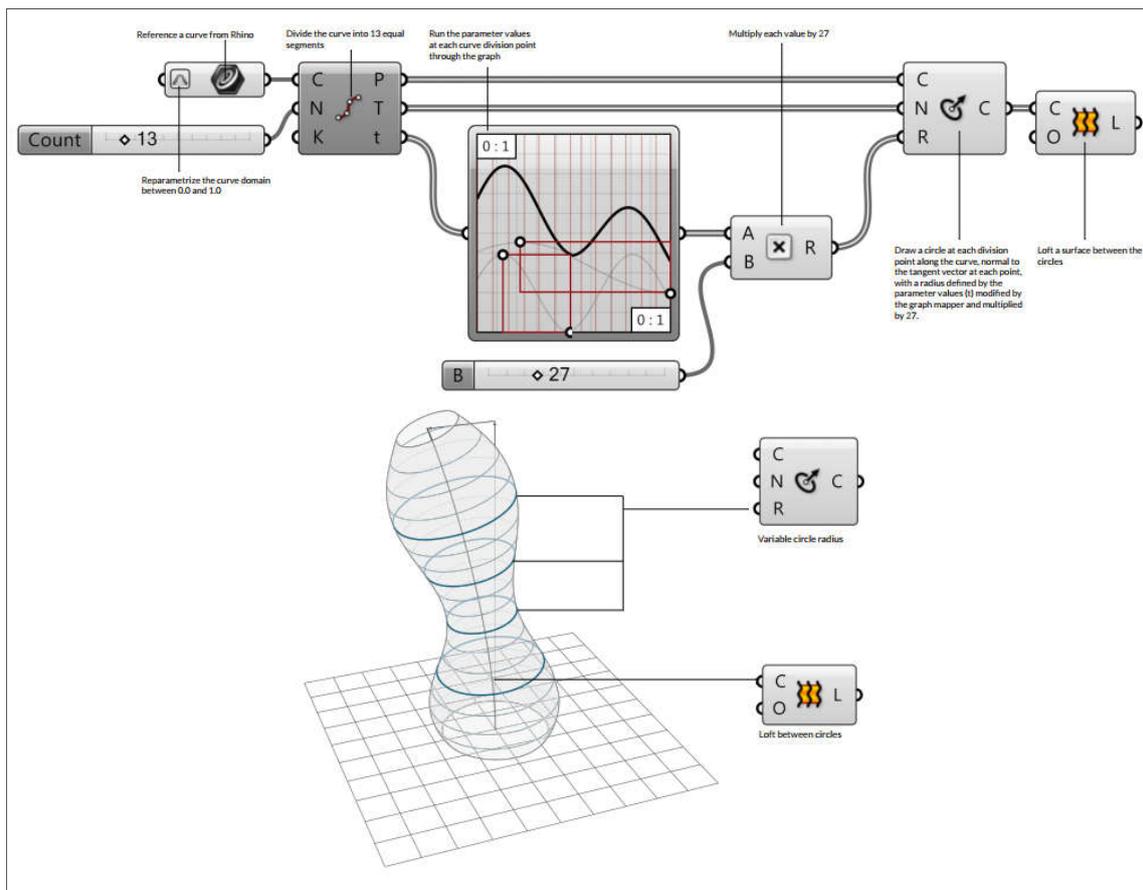


Figura 3.3— Exemplo de um fluxo de trabalho para gerar um determinado volume (Mode Lab, 2014).

O fluxo de trabalho, com as componentes nativas do *Grasshopper*, é expansível a outras componentes oriundas de outros *plugins*, o que possibilita o fluxo dos dados entre diversas componentes de vários *plugins* sem problemas (desde que se respeite a compatibilidade de dados). No caso de estudo será demonstrado este fluxo de trabalho entre múltiplos *plugins*. Através das diversas características desta ferramenta é aberta a porta às mais diversas disciplinas, desde a arquitetura e *design* de produto até aos diversos ramos da engenharia (eletrônica, civil, mecânica, etc.).

### 3.1.1 Plugins de Análise e Simulação

#### ➤ **Ladybug**

*Ladybug* é um *plugin* ambiental que realiza análises detalhadas com base em dados climáticos. Através deste *plugin* é possível produzir visualizações interativas e personalizadas para projetos ambientalmente informados. Na Figura 3.4 são identificados alguns estudos possíveis de realizar, como por exemplo (Roudsari, & Pak, 2013):

- Conforto térmico em espaços interiores e exteriores;
- Seleção/separação da radiação (em benéfica e prejudicial em função das estações de aquecimento e arrefecimento) para otimização da orientação das fachadas dos edifícios, bem como da dimensão dos envidraçados;
- Impacto da envolvente no modelo (obstrução solar);
- Relação entre sistemas de proteção solar e a conexão visual para o exterior;
- Estimativa da energia gerada através de sistemas de energia renovável.

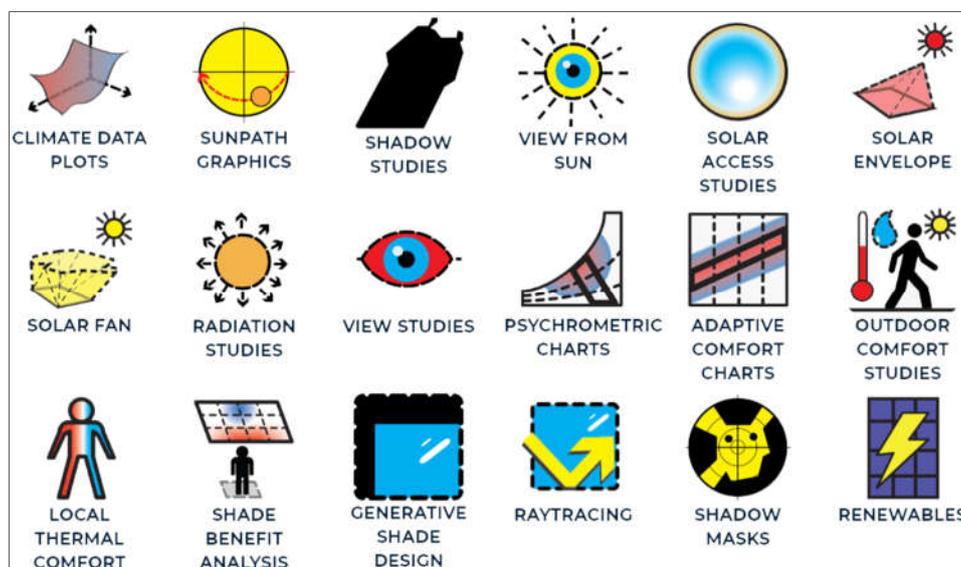


Figura 3.4— Alguns estudos possíveis de realizar com o *plugin Ladybug* (Ladybug tools, Sem Data).

Com a interligação entre um ficheiro de dados \*.epw (*EnergyPlus Weather*) e o *Ladybug* (interação apresentada na Figura 3.5), a tomada de decisões torna-se mais consciente e importante em fases preliminares do projeto.

Os estudos de radiação solar, a quantificação da vista para o exterior, os estudos de conforto térmico, entre outros, integrados com ambientes de programação e modelação paramétrica fornecem

um *feedback* instantâneo, sobre o impacto da introdução de alterações no projeto refletindo-se no desempenho, através de informações e análises interativas.

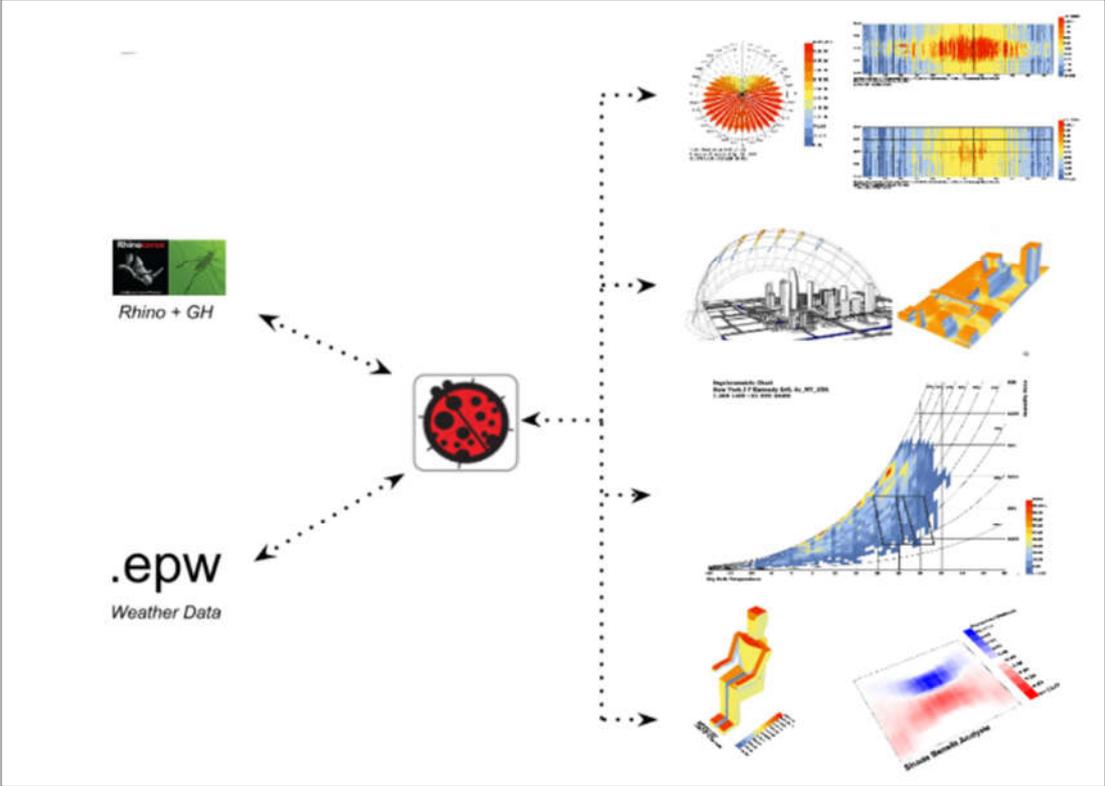


Figura 3.5– Integração de um ficheiro de dados climáticos e possíveis análises a serem realizadas com estes dados (Ladybug tools, Sem Data).

### ➤ **Honeybee**

Ao contrário do *Ladybug*, o *Honeybee* é um *plugin* que suporta análises no âmbito do comportamento termo energético dos edifícios através de operações em plataformas “externas” de forma paramétrica. Especificamente, cria, executa e proporciona resultados visuais através do vínculo com plataformas diferentes como o *EnergyPlus/ OpenStudio*, *Radiance*, *Daysim* (Figura 3.6).

O *Ladybug* e o *Honeybee* estão perfeitamente integrados, e são praticamente partes do mesmo *software*, mas com nomes diferentes (Roudsari et al. 2013). O *Honeybee* tira proveito das componentes de visualização do *Ladybug* e ambos podem ser usados próximos um do outro, num fluxo de trabalho simplificado que oferece avaliações de desempenho e simulações que vão desde esboços iniciais do projeto até modelos virtuais informados.

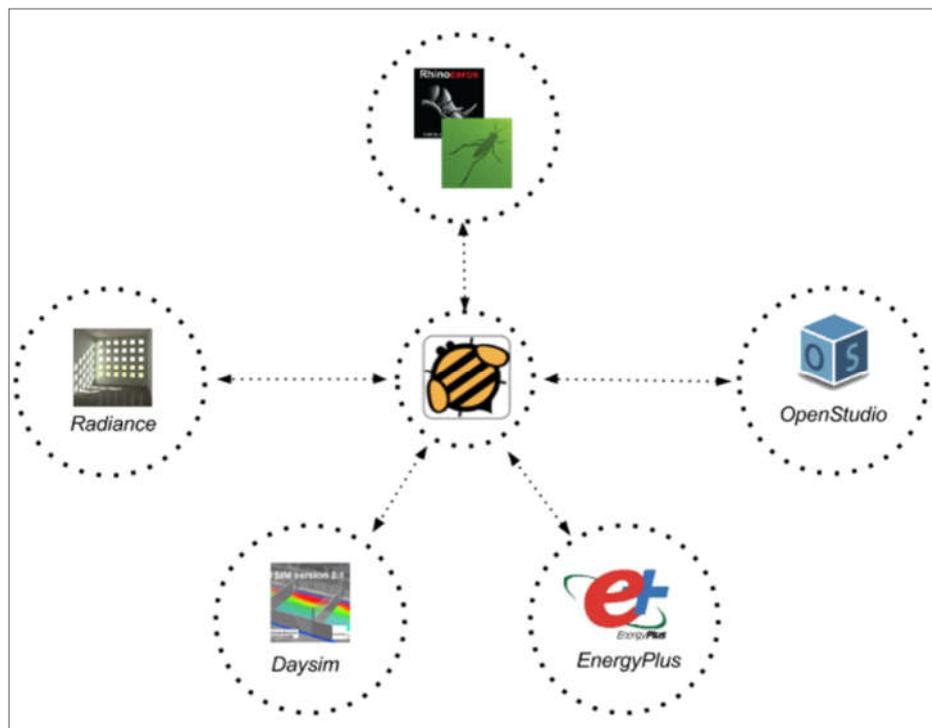


Figura 3.6— Vínculo com as diferentes plataformas (Ladybug tools, Sem Data).

Na interação entre este conjunto de plataformas e *plugins* são inúmeros os estudos nas mais diversas áreas designadamente (Figura 3.7):

- Execução de simulações de iluminação para o dimensionamento das luzes elétricas de modo a cumprir determinadas normas de iluminação em função do tipo de tarefa;
- Realização de simulações energéticas anuais detalhadas;
- Dimensionamento de sistemas AVAC e cálculo de picos de carga;

- Quantificação do impacto de estratégias que utilizam sistemas AVAC;
- Desenho de gráficos de balanço energético;
- Mapeamento espacial do conforto térmico do ocupante;
- Visualização de microclimas internos e externos;
- Estratégias de sistemas passivos, incluindo ventilação natural, tubos de terra, torres de arrefecimento evaporativo, chaminés de ventilação, etc.;
- Dimensionamento do sistema de águas quentes sanitárias;
- Cálculo da região onde a sombra exterior é mais desejável para diminuir os gastos de energia de arrefecimento, sem afetar a utilização de energia para aquecimento;

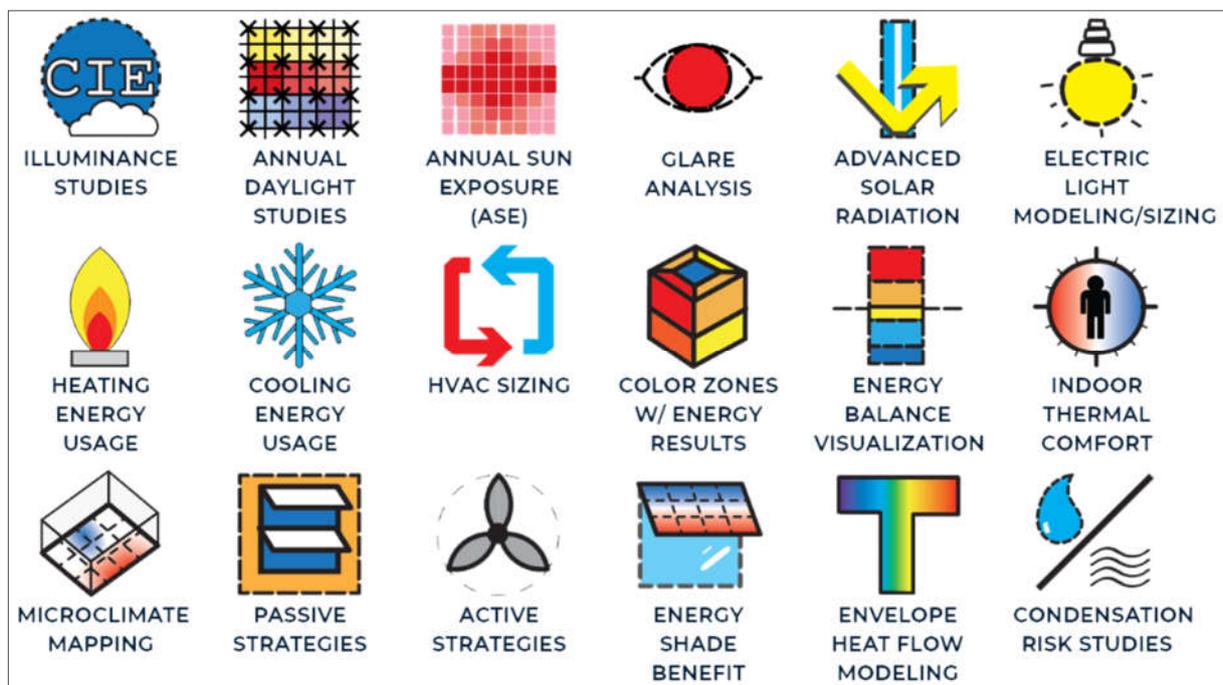


Figura 3.7— Alguns estudos possíveis de realizar com o *plugin Honeybee* (Ladybug tools, Sem Data).

### ➤ **SkinDesigner**

O *SkinDesigner* é um *plugin* do *Grasshopper* que é utilizado na geração (virtual) expedita da geometria de fachadas em contraste com os fluxos de trabalho tradicionais com componentes nativos do *Grasshopper* para gerar tais fachadas.

Para além da criação de fachadas personalizáveis e sistemas de sombreamento, também é dotado de componentes capazes de serem integradas em estudos ambientais.

Abaixo, na Figura 3.8 demonstram-se algumas competências deste *plugin*.



Figura 3.8— Tipos de fachadas possíveis de construir com *plugin SkinDesigner* (Garay, Sem Data).

A utilização deste tipo de metodologia na projeção dos sistemas de janelas e de sombreamento permite aos projetistas explorar a utilização de diferentes tipos de painéis utilizados nos edifícios.

### ➤ **OpenStudio**

O *OpenStudio*<sup>34</sup> é uma ferramenta que suporta a modelação energética de todo o edifício, utilizando o *EnergyPlus*<sup>35</sup> e a análise avançada de luz do dia com recurso ao *Radiance*<sup>36</sup>. Esta ferramenta contém todos os recursos para os modelos do *OpenStudio*, incluindo a envolvente, cargas, agendamentos de utilização e sistemas AVAC. Acresce que, pode ser aliado à modelação paramétrica seguindo uma linha de estudo do impacto da aplicação de várias medidas num modelo básico, bem como exportar os resultados da análise. Este, faz o cálculo do EUI (*Energy Use Intensity*) cujas unidades são expressas em kWh/m<sup>2</sup> e é feito através da equação (3.1):

$$EUI = \frac{\text{Annual Building Energy Use}}{\text{Building Area}} \quad [\text{kWh/m}^2 \cdot \text{year}] \quad (3.1)$$

Esta métrica permite comparar diferentes edifícios com a mesma utilização energética num ano, mas com áreas diferentes, isto é, dois edifícios com o mesmo gasto anual, têm diferentes EUI em função da área.

Como referido no subcapítulo 2.2, em Portugal, atualmente, encontram-se em vigor disposições do REH no que concerne aos edifícios habitacionais. Porém, o *Openstudio*, utiliza as Diretivas americanas, nomeadamente, as Diretivas ASHRAE (*American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers*). Deste modo, ainda que ambas sejam válidas, podem conduzir a resultados diferentes.

---

<sup>34</sup> Disponível em: <https://www.openstudio.net/>

<sup>35</sup> Disponível em: <https://energyplus.net/>

<sup>36</sup> Disponível em: <https://www.radiance-online.org/>

### 3.1.2 Plugins de Otimização

#### ➤ **Galapagos**

O *Galapagos* é um *solver* evolucionário (*plugin* do *Grasshopper*), que fornece uma plataforma genérica para a aplicação de algoritmos evolutivos, para ser usado numa ampla variedade de problemas por não-programadores (Rutten, 2013).

Estes algoritmos evolutivos são aplicados de forma simples, o que permitem transmitir à componente um problema, para que este encontre o maior número de soluções possíveis para o mesmo. Dentro do espaço de soluções encontradas, apenas os modelos “mais eficientes” serão apresentados consoante o *ranking* que lhes foi atribuído. Este *plugin* tem por base os conceitos referidos no Capítulo 2, em particular, o exposto nos pontos 2.4.2 e 2.4.3 no que concerne à otimização mono-objetivo e à genética.

#### ➤ **Octopus**

O *Octopus* é um *plugin* cujo objetivo passa pela aplicação de princípios evolutivos na modelação paramétrica e na resolução de problemas. O processo de otimização concretiza-se através da definição dos parâmetros, estáticos ou dinâmicos, e dos objetivos. Como resultado da análise de otimização, a componente devolve um espaço multidimensional (Figura 3.9) de soluções.

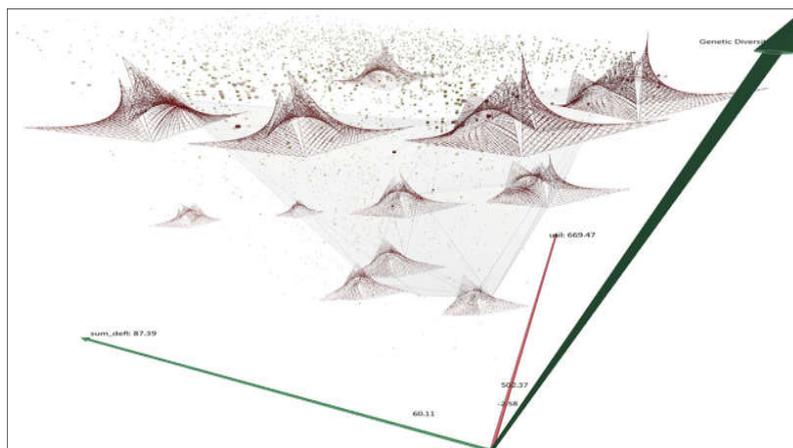


Figura 3.9— Espaço de soluções multidimensional (Vierlinger & Bollinger+Grohmann Engineers, Sem Data).

Embora o *Octopus* e o *Galapagos* sejam *solvers* evolucionários diferentes, com uma base de resolução/otimização distinta, o funcionamento é semelhante. Estes diferem no tipo de problemas a que dão resposta. Enquanto o *Octopus* é capaz de resolver vários problemas, o *Galapagos* responde somente a problemas específicos. Assim, se, por um lado, o *Galapagos* é capaz de auxiliar na decisão de um problema específico, por outro, pode ficar limitado quando aplicado a diversos problemas de projeto. Deste modo, o *Octopus* surge como uma solução face às limitações do *Galapagos*, expandindo o domínio de problemas que pode ser solicitado.

### ➤ **Colibri**

O *Colibri* é um *plugin* do *Grasshopper* que permite a transformação das definições do *Grasshopper* num espaço de *design* compatível com *Design Explorer*.

Na sua utilização percorre-se essencialmente duas etapas: uma é a iteração e outra é a agregação, como se pode constatar na Figura 3.10 (Howes, 2017).

A componente de iteração é ligada aos controlos deslizantes (por exemplo, a componente *slider* nativa do *Grasshopper*) que, conseqüentemente, ativa o mecanismo de iteração entre os vários valores dentro do domínio da componente deslizante.

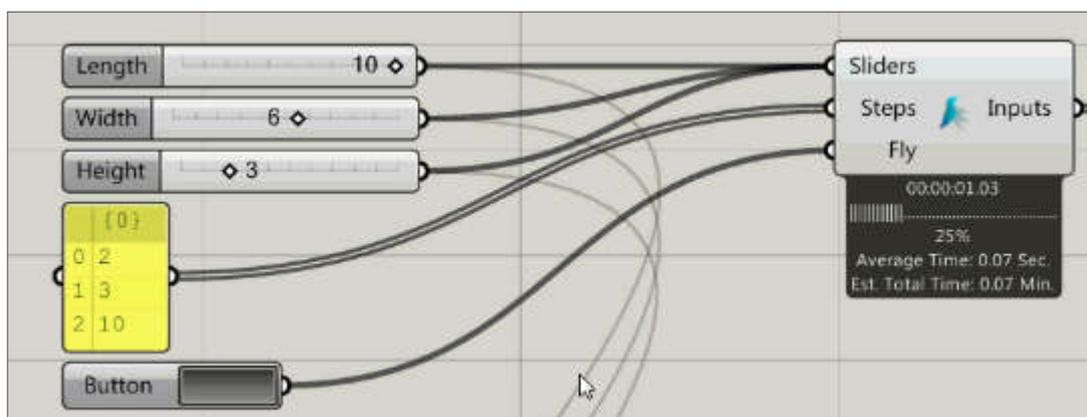


Figura 3.10— Iterador do *plugin Colibri* (Howes, 2017).

A capacidade de definir o domínio do controlo deslizante, bem como a grandeza de cada *step*, proporciona um controlo do tamanho do espaço de *design*. A cada iteração executada é feita a gravação e recolha dos dados (do tipo textual, numérico, imagem, etc.) pela componente agregador e os dados são gravados num arquivo de dados \*.csv, *Excel* (Figura 3.11).

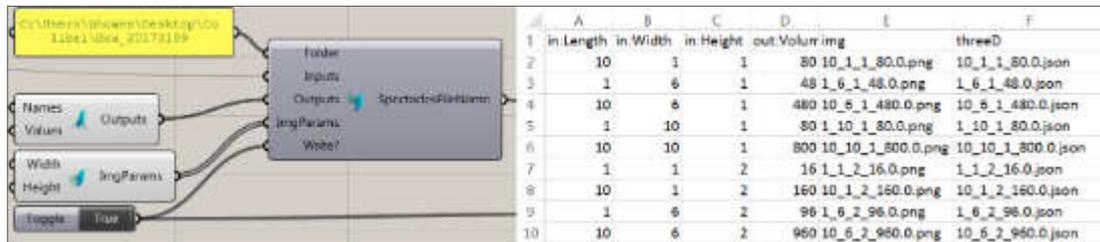


Figura 3.11— Agregador do *plugin Colibri* (Howes, 2017).

Este arquivo (\*.csv) pode ser analisado através do *plugin Design Explorer*, que será apresentado de seguida.

### ➤ **Design Explorer**

O *Design Explorer* é uma interface que permite analisar os resultados obtidos pela componente do *Colibri* apresentado anteriormente. Para que possa ler os resultados em formato \*.csv ou \*.png, estes devem ser carregados num sistema de armazenamento em nuvem (*Google Drive*, *Dropbox*, etc.) e exportados através de um *link* partilhável, por exemplo, pelo *Google Drive*.

Na importação, o *Design Explorer* recolhe e lê a informação (dados) e gera um espaço de *design* em duas dimensões designado coordenadas paralelas. No eixo vertical é representado o valor das variáveis e no eixo horizontal são representados os vários parâmetros a analisar.

As linhas que percorrem horizontalmente a plotagem representam o conjunto de modelos paramétricos dispersos num espaço multidimensional.

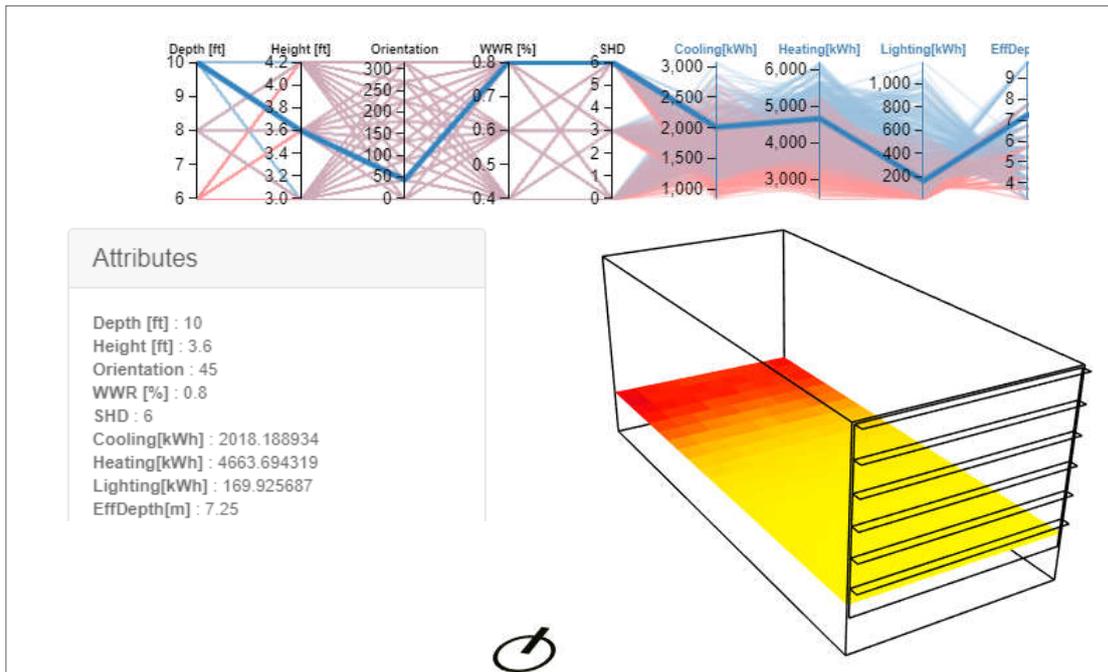


Figura 3.12— Interface do *Design Explorer* (Howes, 2017).

Além disso, cada linha, que percorre horizontalmente as diferentes variáveis, corresponde a um modelo em particular, focando a análise num modelo 3D em concreto, com a informação específica, como se vê na Figura 3.12 acima apresentada.

### 3.2 Aplicabilidade no Caso de Estudo

Para o desenvolvimento do caso de estudo (apresentado no capítulo seguinte) pensou-se numa aplicabilidade o mais abrangente possível em relação à fase concetual inicial explorando uma estrutura lógica que seja capaz de auxiliar tanto os profissionais de arquitetura como de engenharia.

Este auxílio idealizado segue algumas diretrizes:

- Estudo da envolvente da área de implantação (por exemplo, espaços turístico-culturais, espaços verdes, cursos de água, edificação existente, etc.);
- Análise do clima;
- Compreensão da melhor localização para as fachadas envidraçadas;
- Estudo das componentes que têm maior impacto no desempenho do edifício; e
- Utilização de uma plataforma multidimensional de análise de dados.

A modelação do edifício apenas será feita após a compreensão das linhas diretoras iniciais do estudo.

Nessa fase recorrer-se-á ao *design* generativo através da algoritmia e da programação, o que traz enormíssimas vantagens através da potencialização da capacidade de adaptação do edifício aos fatores acima referidos.

Nesse seguimento, será feito um estudo mais aprofundado acerca do impacto dos fatores ambientais e dos requisitos que um eventual cliente, no edifício.

O que se pretende, sobretudo, é que o modelo do caso de estudo seja completamente versátil, passível de se adaptar às condicionantes ambientais e às exigências de um possível cliente, respondendo de forma positiva e expedita aos desafios apresentados.

Para prosseguir esses objetivos, seguir-se-á um fluxo de trabalho que poderá ser representada através do esquema na Figura 3.13:

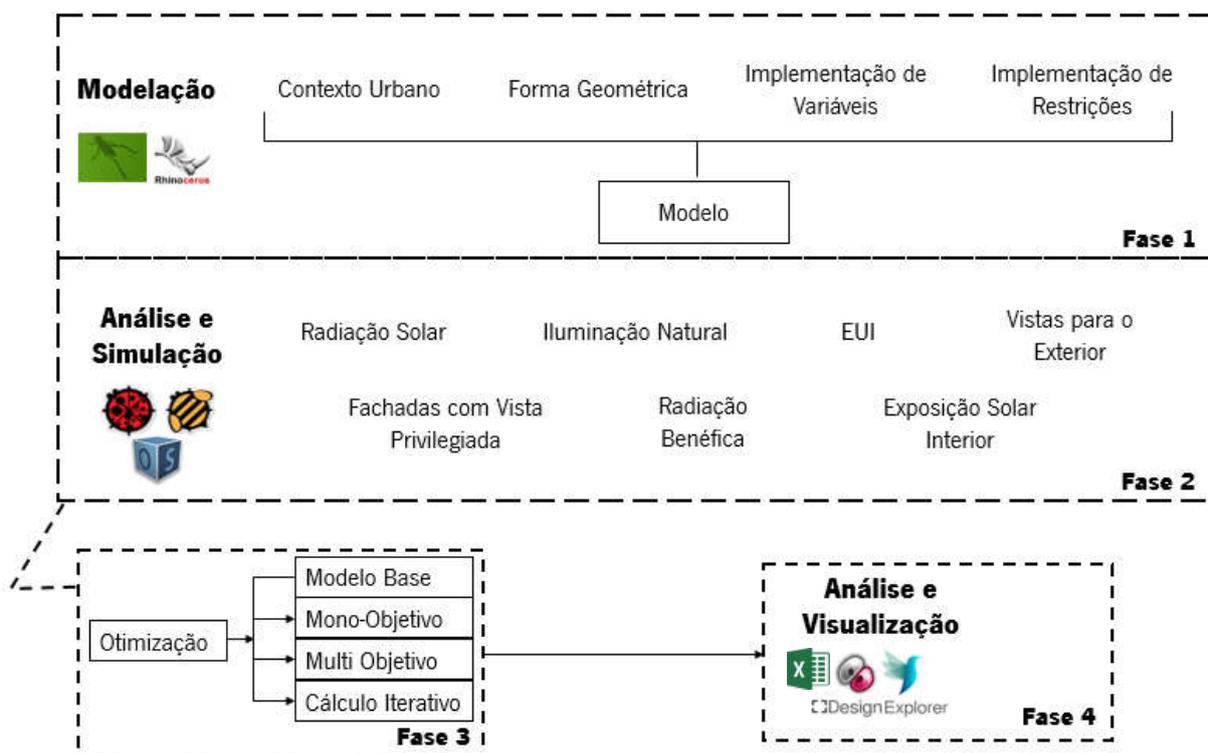


Figura 3.13— Fluxo de trabalho proposto para o caso de estudo.

O fluxo de trabalho previsto (apresentado na Figura 3.13) para o caso de estudo será explorado de forma faseada e pormenorizada ao longo do Capítulo 4.



#### 4. CASO DE ESTUDO

A espinha dorsal deste caso de estudo assenta numa abordagem criativa cujo processo tem início nas pessoas para as quais se está a projetar e termina com soluções que serão concretizadas para atender às suas necessidades.

Com o caso de estudo não se pretende “reinventar a roda” nem projetar um edifício fora do comum, mas antes explorar a implementação de uma nova forma de projetar capaz de construir uma maior proximidade entre as pessoas e o edifício, de estudar e construir protótipos, de partilhar as soluções com as pessoas e, eventualmente, aplicar-se à realidade de maneira mais eficiente.

Esta diversidade de opções referida, é uma manifestação da possibilidade de criar infinitas variáveis para serem estudadas, tirando partido do conceito de diversidade para a resolução de problemas específicos e tendo em conta os objetivos pretendidos. De salientar que, qualquer alteração nas variáveis é transposta em tempo real, pelo que o *feedback* é obtido de imediato.

Como tal, e por forma a compreender as potencialidades da utilização e funcionalidade do design generativo em fases iniciais do projeto, apresenta-se o seguinte caso de estudo, ao qual foi aplicado um fluxo de trabalho referido anteriormente. Ainda relativamente ao processo de otimização e de cálculo iterativo, foi selecionado um caso como exemplo para cada processo.

## 4.1 Enquadramento e Definição

O primeiro passo para o desenvolvimento do caso de estudo passou por se definir a localização do edifício. O edifício estará localizado na cidade de Vila Nova de Gaia, mais especificamente junto à praia de Canide (Sul), como enquadra a Figura 4.1.

Dada a localização<sup>37</sup> definida, o edifício será pensado como um modelo sustentável para o desenvolvimento urbano e, que simultaneamente, tenha uma perfeita integração na topografia local, onde os habitantes se sintam imersos na Natureza, através das vistas abundantes e privilegiadas para o oceano atlântico e para a orla costeira arborizada, bem como para a área verde circundante ao edifício.

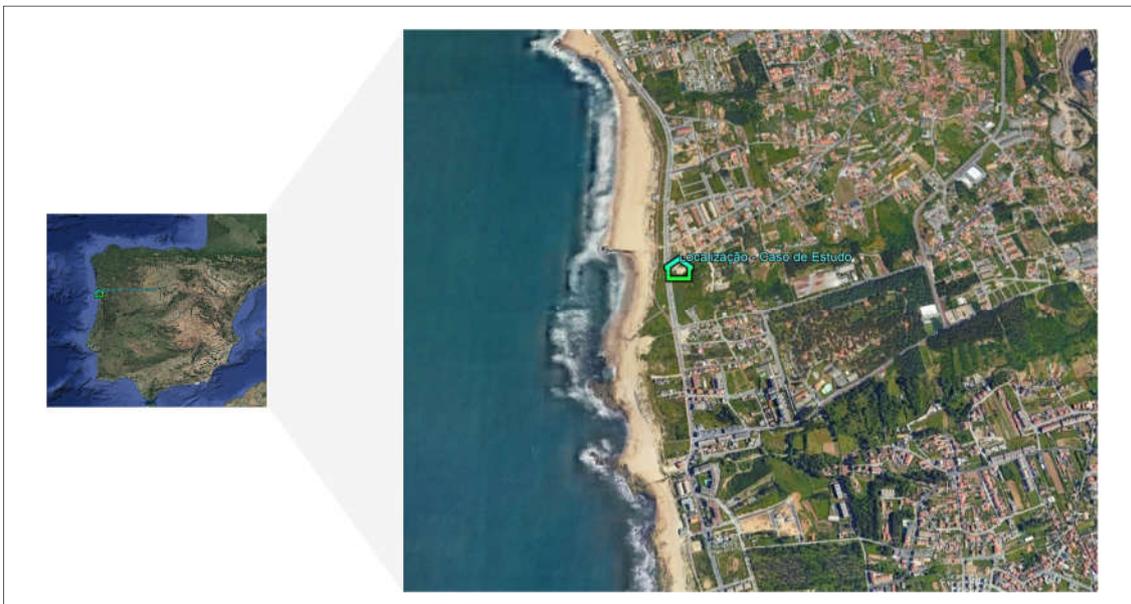


Figura 4.1— Localização do caso de estudo – Canide (Sul), Vila Nova de Gaia, Portugal (*Google Earth Pro* (2018)).

Com o intuito de agilizar a rápida visualização e modelação do contexto urbano circundante, que influencia os ganhos solares e a iluminação natural, recorreu-se ao *software Cadmapper*<sup>38</sup>.

Este *software* transforma os dados de fontes públicas em arquivos CAD (*Computer Aided Design*, em inglês) ordenadamente organizados como se pode ver na Figura exemplificativa 4.2.

---

<sup>37</sup> A definição da localização teve como critérios de seleção o contexto urbano, a paisagem circundante (Oceano Atlântico e espaços verdes), cidade portuguesa, entre outros.

<sup>38</sup> Disponível em: <https://cadmapper.com/>

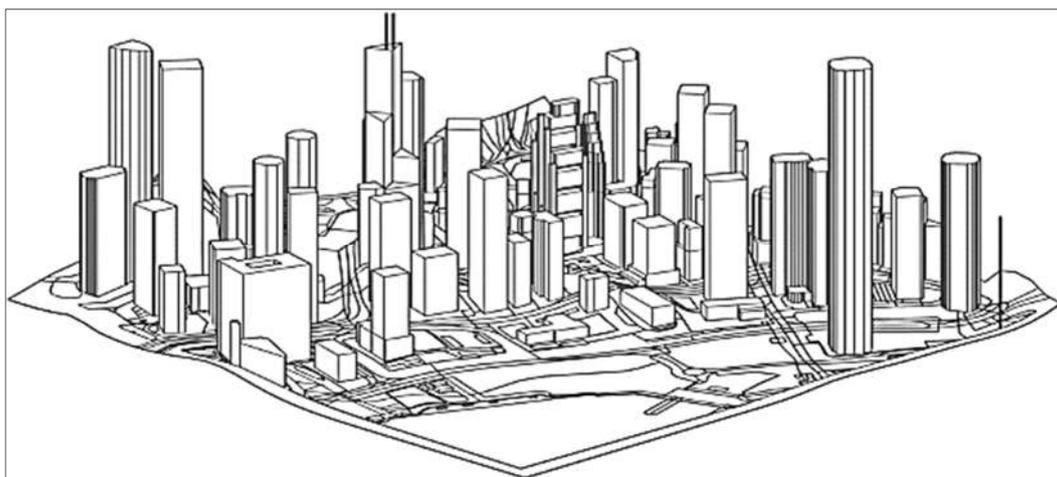


Figura 4.2— Contexto urbano exemplificativo (Cadmapper, 2018).

Relativamente ao ficheiro obtidos pelo *cadmapper*, e embora este permita a exportação do ficheiro do contexto urbano em formato (.3dm) nativo do *Rhinoceros3D*, há três aspetos importantes a serem descritos: (i) a geometria dos edifícios circundantes será utilizada como objetos de sombreamento em todas as análises (expostas ao longo deste capítulo); (ii) a geometria do contexto urbano importada no modelo não inclui a presença de vegetação, como árvores, o que pode sobrestimar os resultados relativos à disponibilidade de luz natural e os ganhos provenientes da radiação solar; (iii) e por fim, dada a localização selecionada para o caso de estudo, o contexto urbano não estava totalmente transposto no ficheiro CAD ao contrário do que acontece com grandes cidades onde o meio urbano está mais detalhado na base de dados.

Definida as matérias da localização e contexto urbano, é necessário recolher informação meteorológica para se poder realizar as análises previstas.

Para tal, recolheram-se os dados (Figura 4.3) de uma plataforma *online* (*epwmap* de *ladybug tools*<sup>39</sup>) que partilha os dados climáticos dos *websites* *Energyplus*<sup>40</sup> e *Onebuilding*<sup>41</sup>.

---

<sup>39</sup> <https://www.ladybug.tools/>

<sup>40</sup> <https://www.energyplus.net/>

<sup>41</sup> <http://climate.onebuilding.org/>

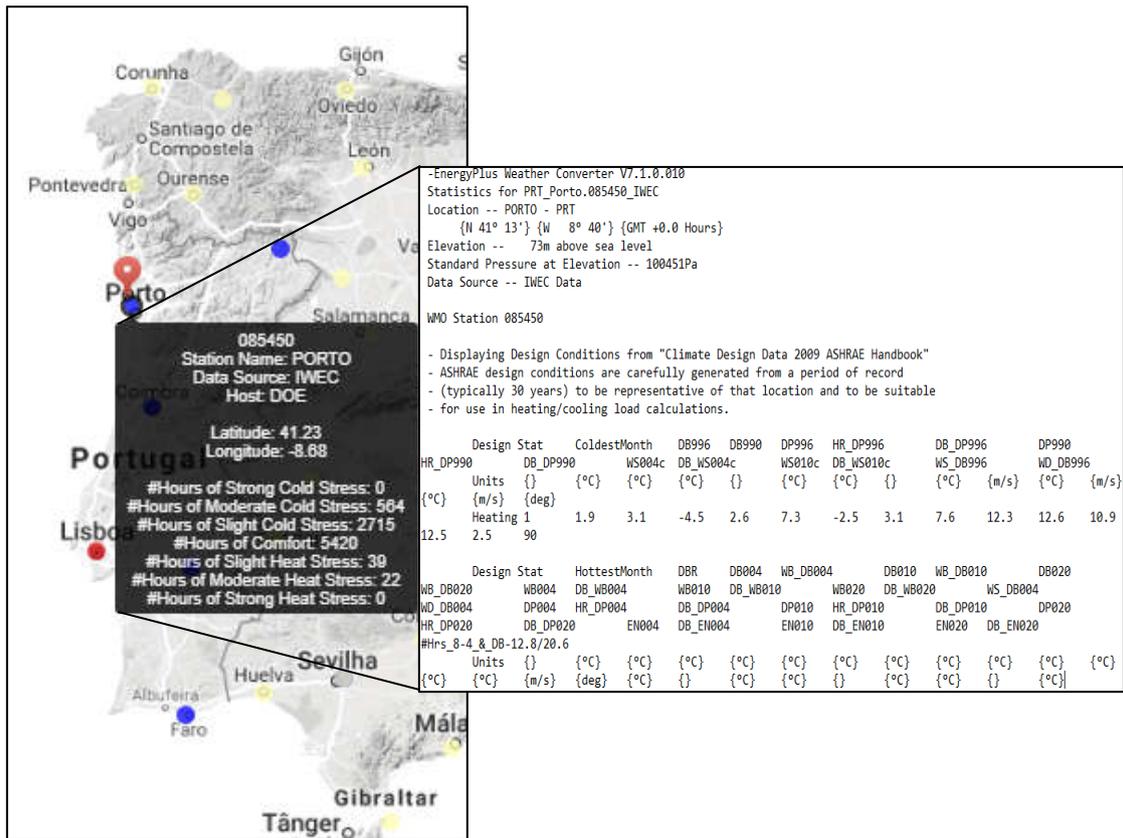


Figura 4.3— Dados meteorológicos (epwmap, 2018).

Os dados provêm do IWECC (*International Weather for Energy Calculations*) que é composto por arquivos climáticos “típicos”, adequados para o uso com programas de simulação de energia em edifícios, sendo que os arquivos são derivados de até 18 anos (1982–1999) para a maioria das estações. Adicionalmente, os dados meteorológicos são complementados pela radiação solar estimada numa base horária da geometria solar e elementos meteorológicos por hora, particularmente informações sobre a quantidade de nuvens (Weather Data Sources | EnergyPlus, 2018).

## 4.2 Modelação Geométrica

### 4.2.1 Fase Criativa e Ideológica

Nesta fase, e posteriormente à seleção do local de implantação do edifício e à obtenção dos dados meteorológicos para o estudo, delineou-se o método de desenvolvimento do modelo de caso de estudo.

Importa referir que, para que se possa tirar vantagem do *design* generativo, bem como dos algoritmos genéticos para a otimização do edifício, é necessário que este seja construído de forma a ser capaz de se adaptar e moldar ao contexto em que estará inserido e aos fatores de natureza meteorológica a que estará sujeito.

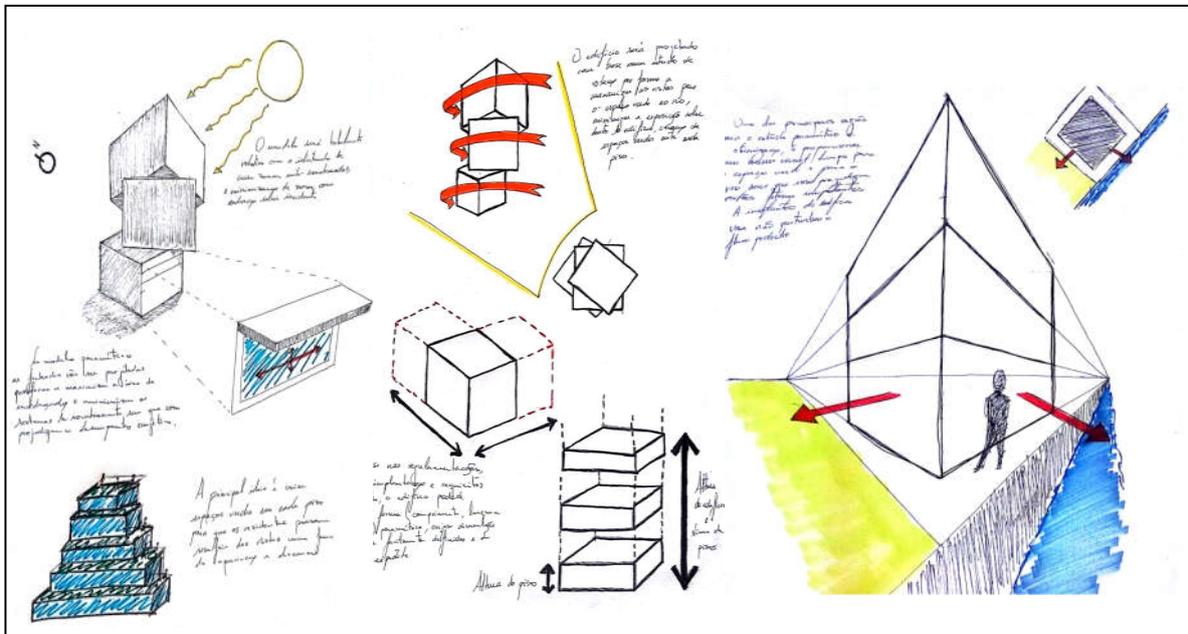


Figura 4.4— Idealização de possibilidades arquitetónicas e funcionais para construção do modelo de caso de estudo.

Nesse sentido, as variáveis implementadas no algoritmo do caso de estudo (como se pode ver na Figura 4.4), são as descritas nos seguintes tópicos:

- I. Comprimento e largura;
- II. Pé-direito;
- III. Número de pisos;
- IV. Forma geométrica em função do número de faces (por exemplo, triangular, quadrada, retangular, pentagonal, etc.);

- V. Rotatividade dos pisos;
- VI. Posicionamento e dimensão das fachadas envidraçadas (em função da radiação solar, vistas para o ambiente exterior, etc.);
- VII. Dimensões dos sistemas de proteção solar passivos; e
- VIII. Incremento (positivo ou negativo) da área do piso desde o rés do chão até ao último piso.

Relativamente às variáveis<sup>42</sup> anteriormente referidas, é de salientar que a escolha parte da tentativa de utilização de várias variáveis sem que a forma geométrica seja demasiado complexa, na medida em que, a complexidade geométrica apenas aumentaria o tempo de simulação e recolha de dados.

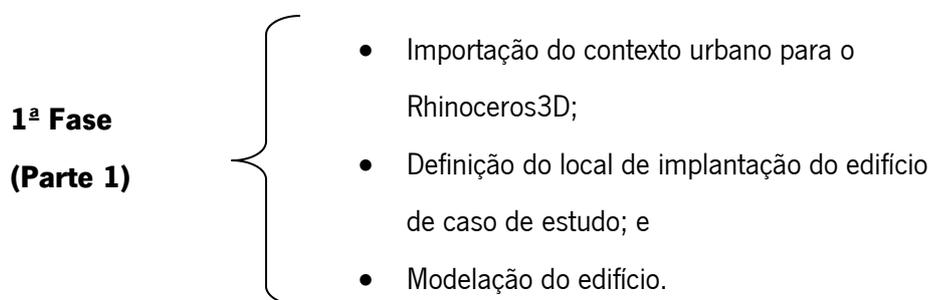


Figura 4.5— 1ª Fase do desenvolvimento do caso de estudo (parte 1).

Nesta primeira fase foi construído o algoritmo seguindo as diretrizes expostas na Figura 4.5. Ainda, o modelo resultante do algoritmo (construído no *Grasshopper*) será pré-visualizado na janela principal do *Rhinoceros3D* (que servirá apenas para pré-visualização do modelo em desenvolvimento). O exposto é aplicável a todas as fases do caso de estudo desde o início até ao fim.

---

<sup>42</sup> A ordem de grandeza das variáveis foi selecionada apenas para a realização do estudo.

#### 4.2.2 Modelação do Edifício no Contexto Urbano Selecionado

##### ➤ Importação do ambiente construído

Como já referido, para a importação do contexto urbano do local de implantação do edifício recorreu-se ao *Cadmapper*. A importação foi realizada num formato \*.3dm (formato nativo do *Rhinoceros3D*).

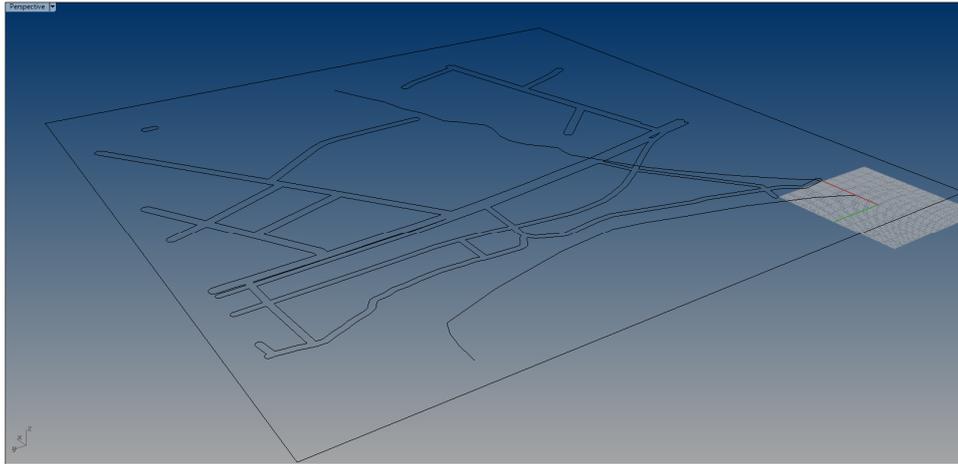


Figura 4.6— Modelo do contexto urbano importado do *Cadmapper*.

Como se depreende pela observação da Figura 4.6, não existe informação do ambiente construído em modelos tridimensionais nesta localidade. O mesmo não acontece com as cidades de grande dimensão, onde existe mais informação relativa ao contexto urbano é mais abundante. Para elucidação e a título meramente exemplificativo será ilustrado na Figura 4.7, um contexto urbano, da cidade de Nova Iorque, com mais modelos 3D.

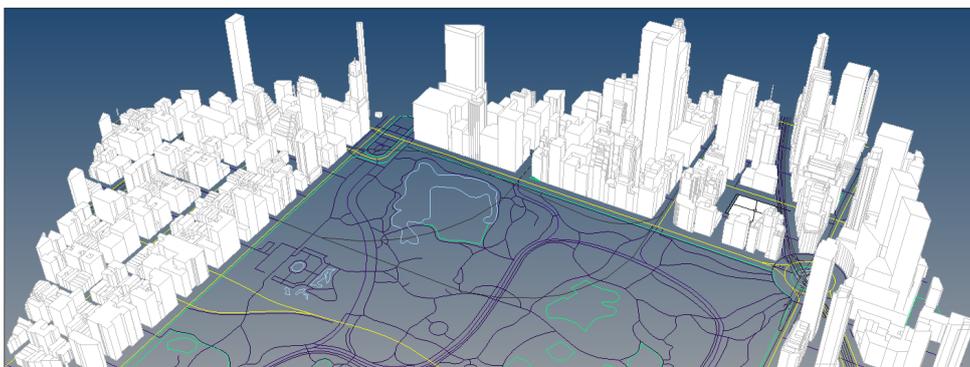


Figura 4.7— Contexto urbano num espaço da cidade de Nova Iorque (junto ao *Central Park*).

Ter informação acerca do ambiente construído envolvente (no caso, modelos 3D) revela-se bastante útil na medida em que estes, têm influência direta nas questões de exposição solar, iluminação natural, sombreamento, obstrução das vistas para um determinado cenário, entre outras.

Dada a importância desses elementos, para o caso de estudo, procedeu-se à modelação de alguns volumes em representação do ambiente construído (Figura 4.8).

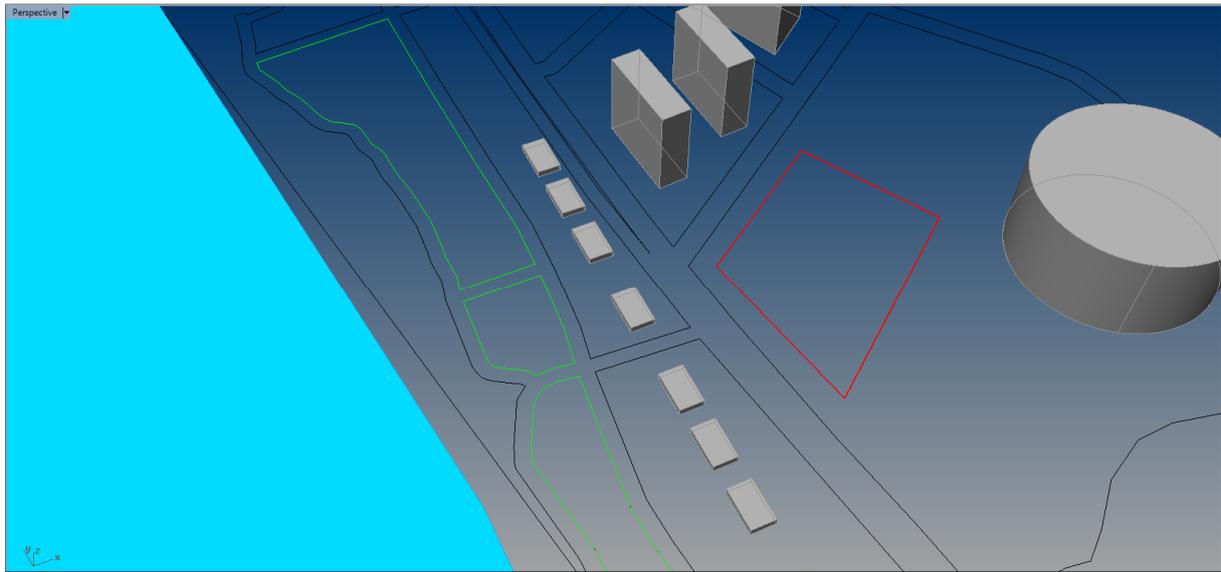


Figura 4.8— Contexto urbano a utilizado no caso de estudo.

Modelada a envolvente do espaço, delimitou-se com a cor vermelha, o local de implantação do edifício.

### ➤ **Geometria Base**

Numa fase inicial, e para melhor compreensão, o algoritmo será exposto em blocos pelo que o primeiro bloco diz respeito à definição das dimensões e forma geométrica base para o edifício (Figura 4.9). A forma geométrica base, bem como as suas dimensões, podem alterar-se consoante as seguintes variáveis: número de arestas, comprimento e largura. Adicionalmente as variáveis comprimento e largura podem variar entre números pares ou ímpares, ou através de expressões matemáticas como funções algorítmicas, exponenciais, trigonométricas, entre outras.

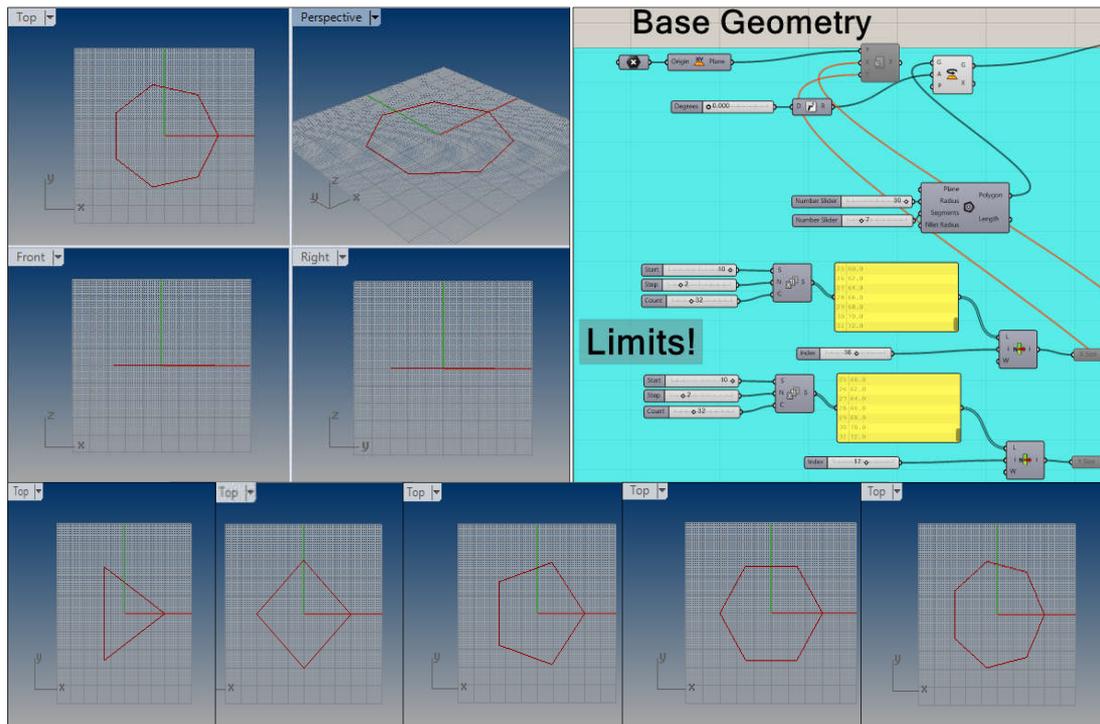


Figura 4.9— Bloco correspondente à definição das dimensões e forma geométrica base para o edifício.

## ➤ Pisos

Para definir o número de pisos e a correspondente altura entre cada um, utilizou-se a componente, *Series*. Esta componente cria uma série de números espaçados de acordo com o valor de *Step*. Assim, o intervalo está compreendido entre 0 e *n* pisos, com um valor de *Step* igual à altura entre cada piso. A altura entre cada piso pode ser igual ou diferir em pisos específicos. Estes valores são conectados a uma componente vetorial que fará a translação da base, ao longo do eixo Z, como ilustra a Figura 4.10.

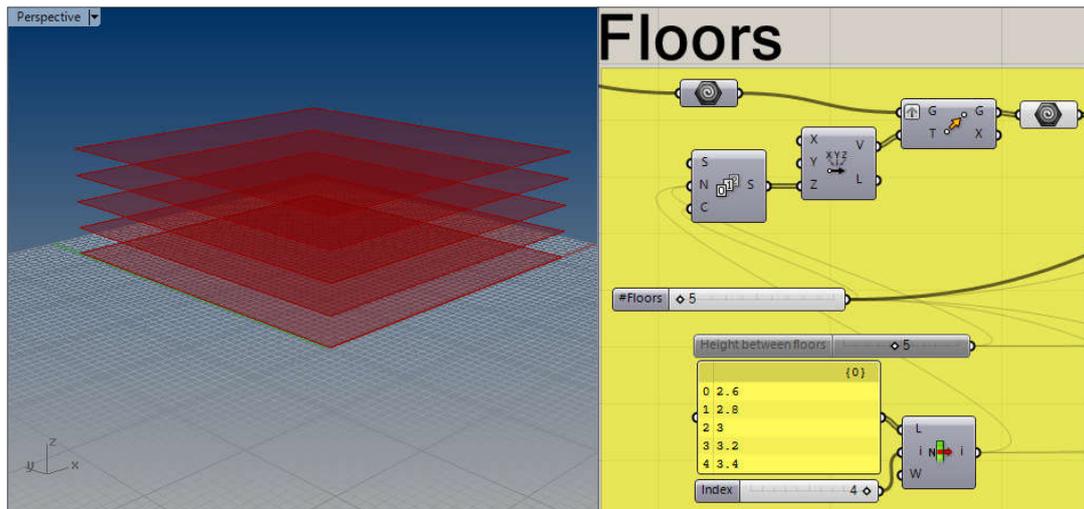


Figura 4.10— Bloco relativo ao número e altura entre pisos.

### ➤ Rotação entre Pisos

Para implementar a rotação entre pisos, aplicou-se o mesmo raciocínio anteriormente utilizado para a modelação dos pisos.

Genericamente, a variável que diz respeito ao ângulo de rotação (em graus) é dividida por todos os pisos. Por exemplo, se for aplicada uma rotação de  $1000^\circ$  e o edifício for constituído por 5 pisos, então cada piso terá uma rotação de  $200^\circ$  em relação ao piso 0 (Figura 4.11).

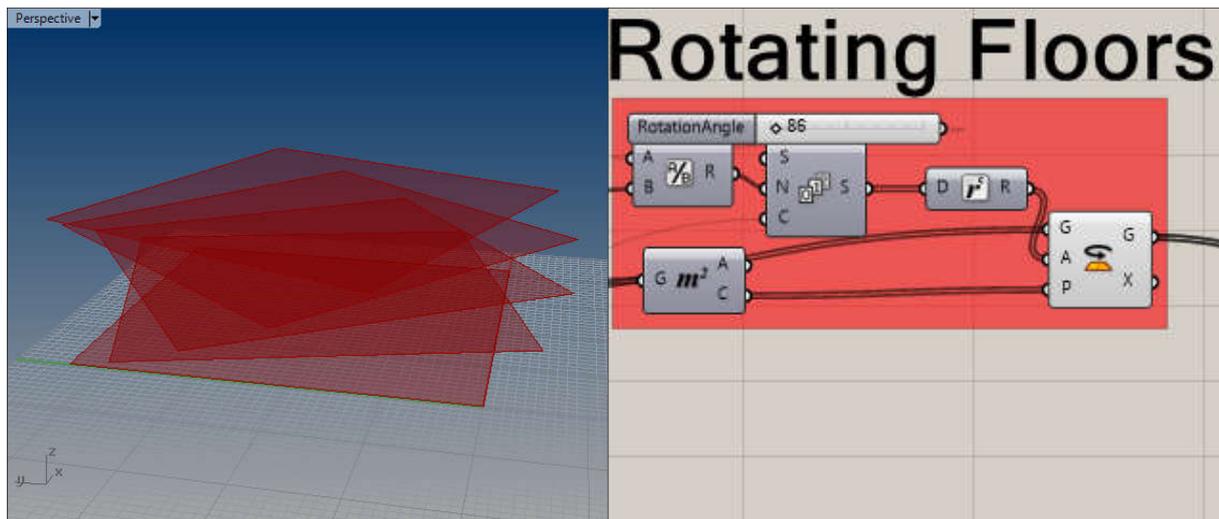


Figura 4.11— Bloco gerador da rotação entre pisos.

### ➤ Aumento/Diminuição dos pisos

Este bloco serve como forma de escalar (num aumento ou diminuição) uniformemente a área dos pisos proporcionalmente em percentagem. Se na variável for introduzido um valor, por exemplo, de 50% então, a área do último piso será superior em 50% à área do piso 0, e vice-versa conforme se pode observar na Figura 4.12.

Este raciocínio pode ser aplicado, nas situações de necessidade de sombreamento dos pisos inferiores, ou na criação, de espaços verdes em cada piso.

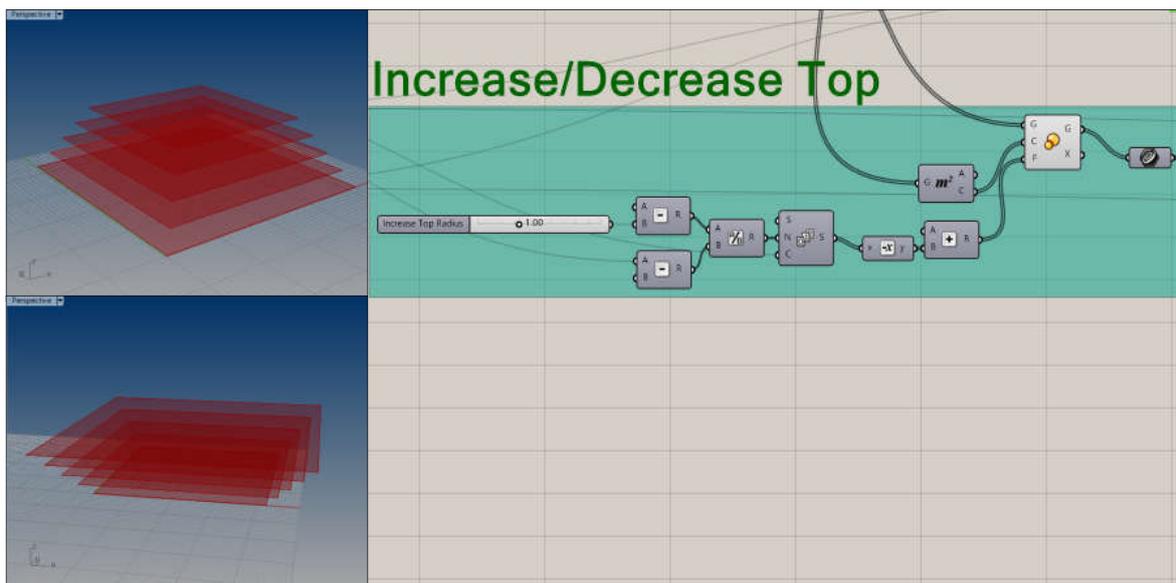


Figura 4.12— Bloco correspondente ao aumento/diminuição uniforme dos pisos.

### ➤ Geometria Fechada em Volumes

Com o bloco final exposto na Figura 4.13, através das funções *Extrude* e *Cap Holes* fecha-se a geometria criando um volume.

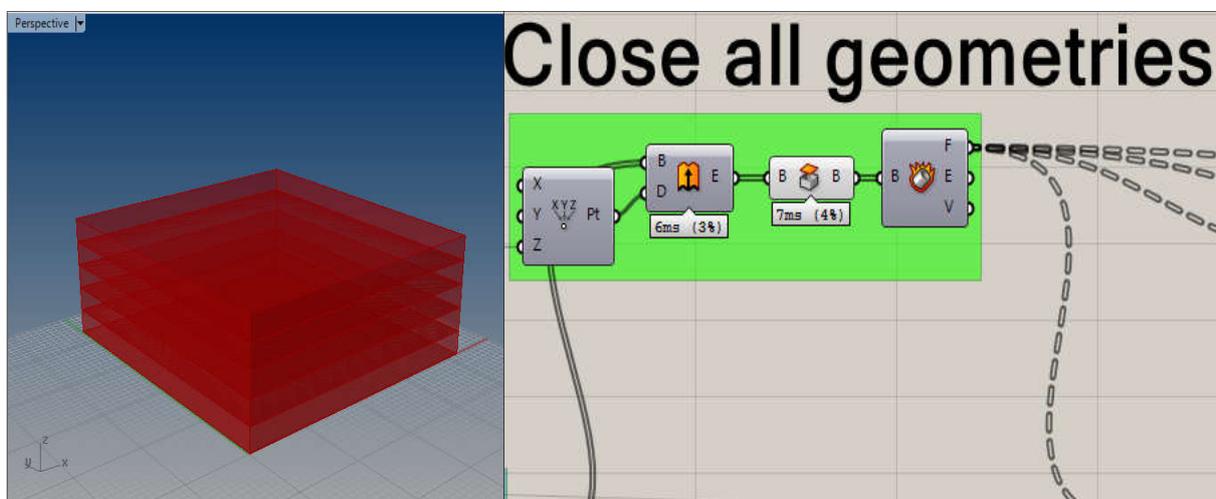


Figura 4.13— Geometria fechada.

Consequentemente, são apresentadas na Figura 4.14 algumas formas possíveis de geometria para o edifício.

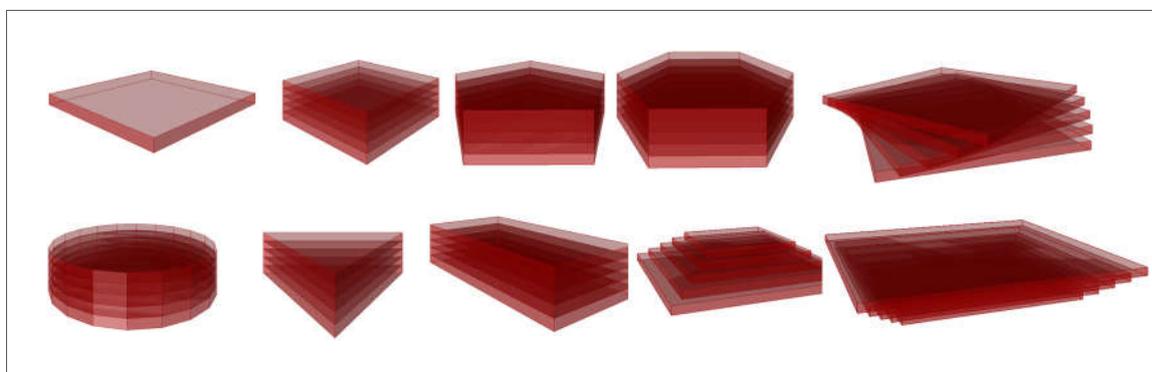


Figura 4.14— Algumas possibilidades de modelos base do caso de estudo.

Finalizada, parte da 1ª fase do desenvolvimento do algoritmo, entra-se numa 2ª parte, que passa pela execução dos tópicos ilustrados na Figura 4.15.

**1ª Fase  
(Parte 2)**

- Definição do tipo de edifício em estudo;
- Divisão dos pisos em zonas;
- Modelação das dimensões e posicionamentos dos envidraçados;
- Colocação de sistemas de proteção solar; e
- União das zonas num modelo único

Figura 4.15— 1ª Fase do desenvolvimento do caso de estudo (parte 2).

Em primeiro lugar, definiu-se que será um edifício do tipo *Midrise Apartment* (o mais próximo da realidade do caso de estudo), mas poderia se tratar de um edifício escolar, hospitalar, de um hotel, restauração, serviços, entre outros.

A jusante desta definição, procedeu-se à conversão do modelo geométrico anteriormente modelado em massa, num modelo definido por zonas. De seguida, para cada zona e para cada superfície, é definido o seu tipo (parede, laje, janela, fundação, outro) e consequentemente convertida

numa *Honeybee surface*. Prosseguiu-se com a modelação dos envidraçados para a orientação de cada piso, assim como dos sistemas de proteção solar.

Abaixo é representado, o modelo resultante da definição anterior (Figura 4.16).

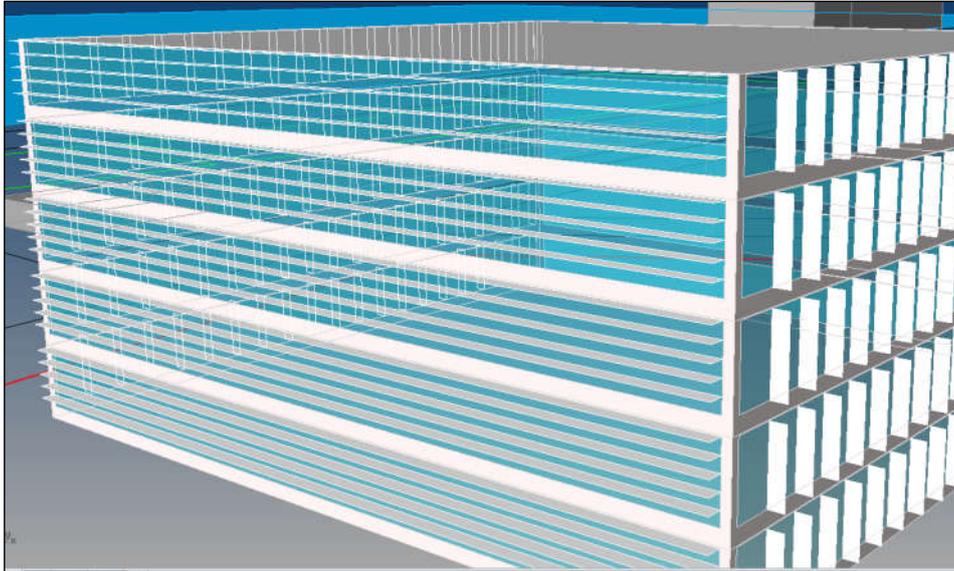


Figura 4.16- Modelo gerado pela definição anterior.

Terminada esta fase, o modelo está preparado para realizar diferentes análises e simulações. Importa referir que, ao longo do caso de estudo, foram sendo avaliadas as diferentes análises inicialmente previstas e outras que surgiram no decorrer dos estudos.

### 4.2.3 Estudos Experimentais Realizados

A 2ª fase do desenvolvimento do algoritmo, corresponde aos diferentes estudos realizados, que serão explicados ao longo dos pontos seguintes.

#### ➤ Geometria Solar

O bloco apresentado na Figura 4.17, diz respeito à importação dos dados meteorológicos e ao seu processamento para construção do diagrama de geometria solar anual na cidade de Vila Nova de Gaia.

O algoritmo está preparado para estudos em diferentes períodos do ano, bem como para estudos de determinados dias específicos. Com efeito, durante o inverno (período em que a altura do sol é menor) estar-se-á interessado em receber a maior quantidade e energia possível através da radiação solar, incidente nas fachadas envidraçadas, de modo a reduzir os gastos energéticos para aquecimento do edifício – os ganhos solares podem constituir uma grande parcela da energia necessária para o aquecimento ambiente interior.

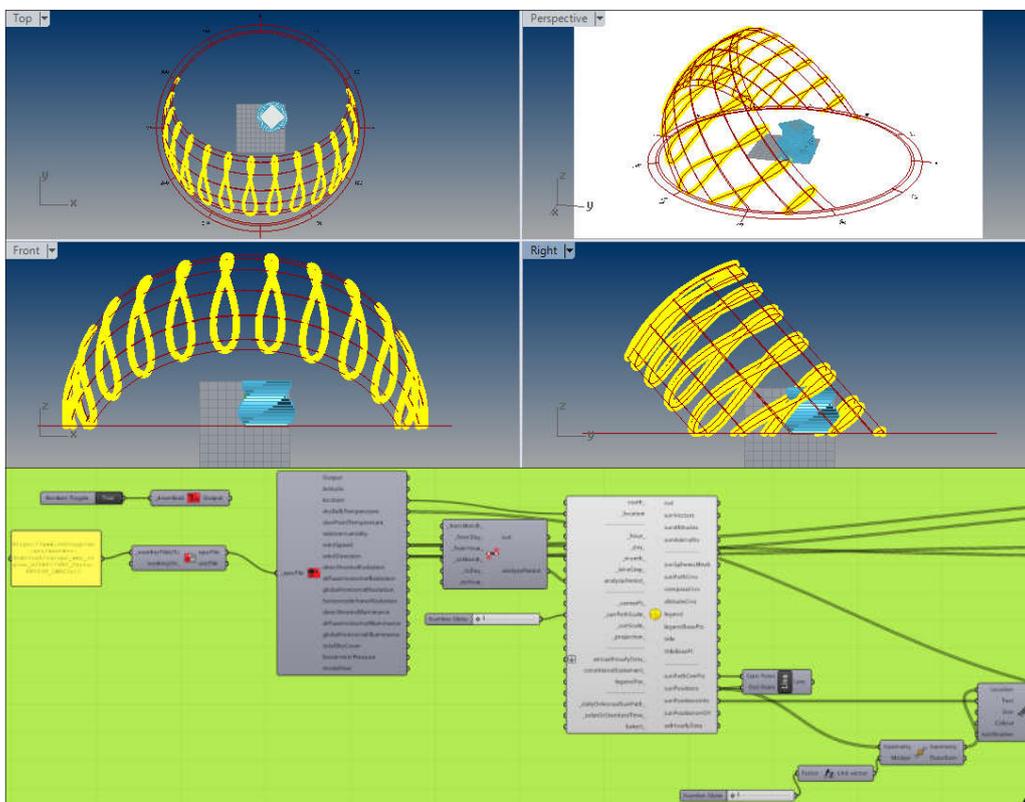


Figura 4.17– Geometria solar anual, na cidade do Porto.

Assim, do diagrama de geometria solar produzido, pode, desde já, retirar-se duas conclusões interessantes no que concerne à orientação do edifício:

- No inverno a altura do sol é menor e uma superfície vertical orientada a Sul recebe os raios solares durante mais tempo que outra com uma orientação diferente; e
- No verão, uma superfície vertical com orientação a Sul recebe radiação solar durante menos tempo do que no inverno, pois o sol está mais alto.

### ➤ Iluminação Natural

No que respeita à iluminação natural, o bloco algorítmico representado na Figura 4.19, ilustra o raciocínio subjacente ao estudo.

Primeiramente, criou-se uma malha, num plano horizontal interior, à cota do plano de trabalho. Num momento posterior, através da componente *genStandardCIEsky*, definiu-se o modelo de iluminância do céu como: céu encoberto padrão CIE. Na parte final, que diz respeito à simulação propriamente dita, os inputs foram: a geometria do edifício (inclusive os elementos de obstrução), as características de cada superfície (refletância<sup>43</sup>), a transmitância do vidro (0,5 por defeito), a malha modelada, o céu encoberto padrão CIE, e o dia da simulação.

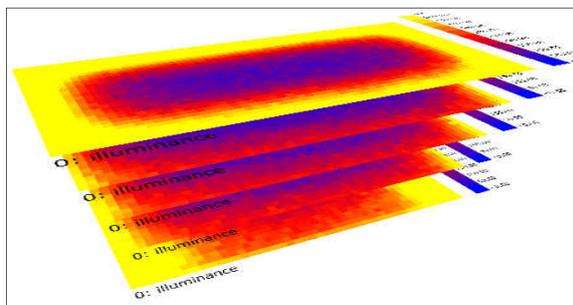


Figura 4.18— Resultados globais da iluminação natural no edifício.

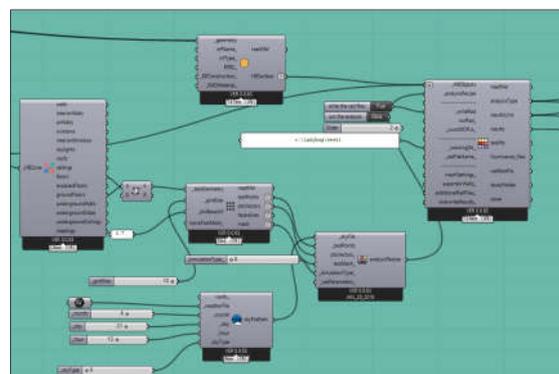


Figura 4.19— Bloco algorítmico para o estudo da iluminação natural a 21 de dezembro.

---

<sup>43</sup> Remete-se para a Figura 2.8 (dos quais foram utilizados os valores intermédios).

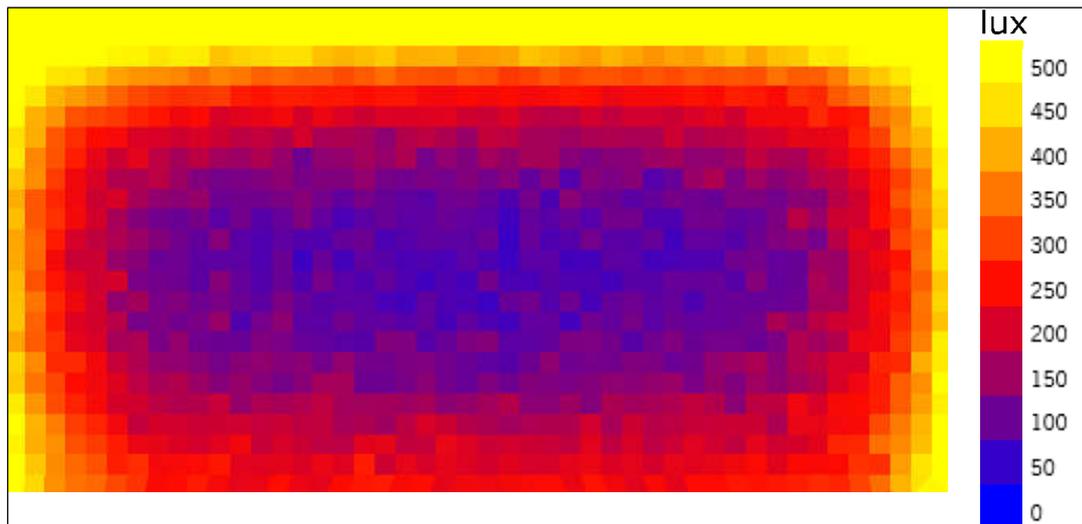


Figura 4.20— Resultado obtido, da simulação de iluminação natural, para o 1º piso.

Observando o resultado obtido (Figuras 4.18 e 4.20), verifica-se o cumprimento dos valores recomendados para espaços interiores, de habitação, e que o caso ilustrado na figura, corresponde ao 1º piso (este é o mais problemático, por ter como obstrução, para além dos sistemas de proteção solar, a laje dos pisos superiores). Pode, ainda, constatar-se que o valor da iluminância mínima, na zona central do espaço interior, é de 55,96 lux, à diferença do valor (<50 lux) que a escala utilizada possa induzir.

### ➤ **Radiação Solar**

Relativamente à radiação solar (Figura 4.21), o *Ladybug* dispõe de componentes capazes de gerar o céu de um determinado período do ano para que se possa proceder à análise da radiação solar incidente num edifício.

Para a análise da radiação solar, o algoritmo foi desenhado para, através dos dados meteorológicos do local do edifício, bem como o período da análise durante o ano. Como tal, pretendeu-se perceber quais as fachadas com maior incidência solar.

Resultado do estudo, compreende-se que a fachada orientada a sul é a que recebe maior radiação solar (kWh/m<sup>2</sup>), ao invés da fachada orientada a norte que é a que recebe menos radiação solar. Esta compreensão é facilmente dedutível a partir da Figura 4.22.

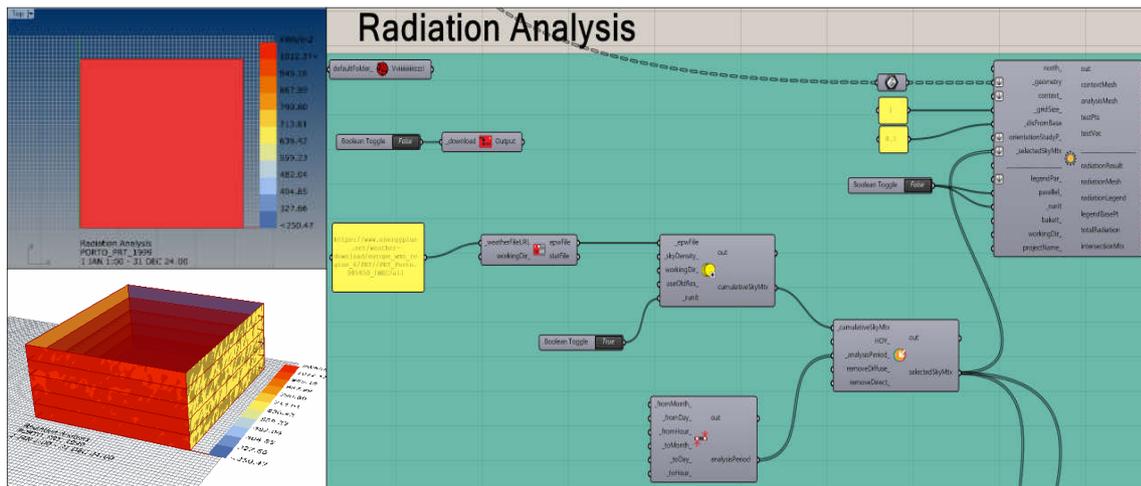


Figura 4.21– Bloco para estudos relativos à radiação solar.

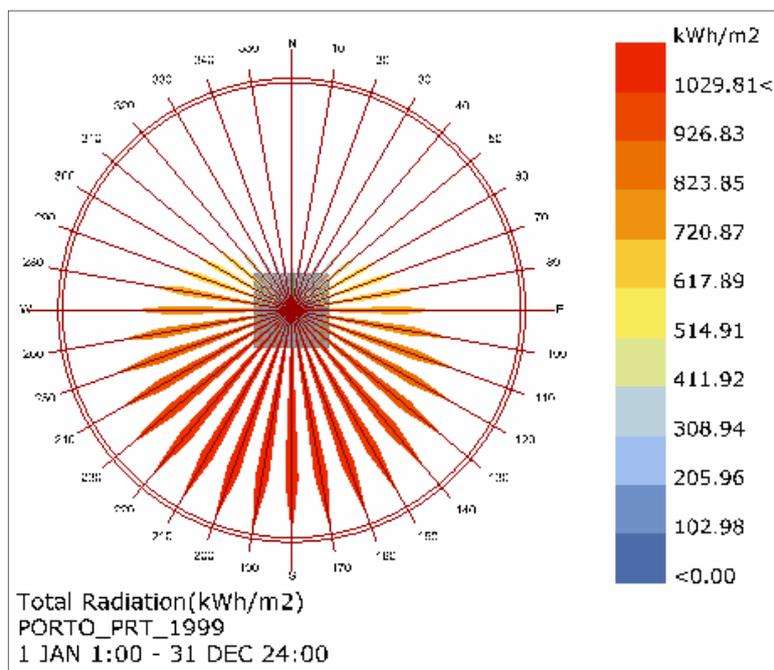


Figura 4.22– Diagrama *Radiation Rose* para estudo da radiação solar.

Adicionalmente, e para o número de horas de exposição solar direta a que o espaço interior está sujeito, é necessário perceber qual o impacto dos sistemas de proteção solar nas diferentes orientações do edifício, e como fazer a interligação com os sistemas de proteção solar. Por isso, o seguinte bloco algorítmico (Figura 4.23) assenta num estudo do número de horas que os espaços interiores estão sujeitos à radiação solar direta.



Assim, exemplificando, será seguidamente exposto o estudo para o período de arrefecimento que compreende sensivelmente uma duração de 4 meses (junho, julho, agosto e setembro). Este, será dividido em duas partes: uma delas com o sistema de proteção solar ativado e outra com o sistema desativado.

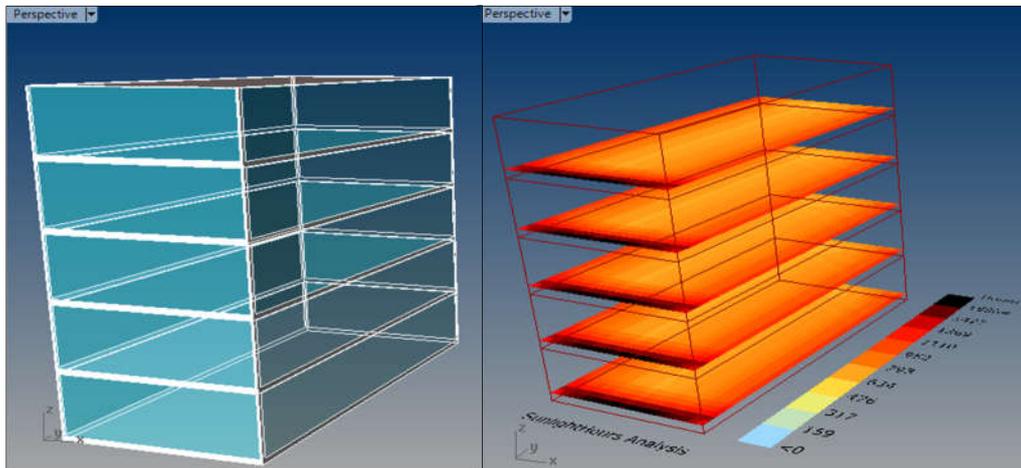


Figura 4.25— Cálculo do número de horas no período de arrefecimento para o modelo sem sistemas de proteção solar.

Como demonstra a Figura 4.25, o espaço interior próximo à fachada de orientação Sul, é aquele que recebe radiação solar direta durante mais tempo no período de arrefecimento, embora os restantes espaços interiores também recebem radiação durante consideráveis horas. Isto deve-se, em parte, a dois fatores: ao facto de não ter os sistemas de proteção solar e às dimensões dos envidraçados.

De forma a fazer um estudo comparativo, e para se compreender o impacto dos sistemas de proteção (lâminas), estes foram ativados no bloco algorítmico (Figura 4.26).

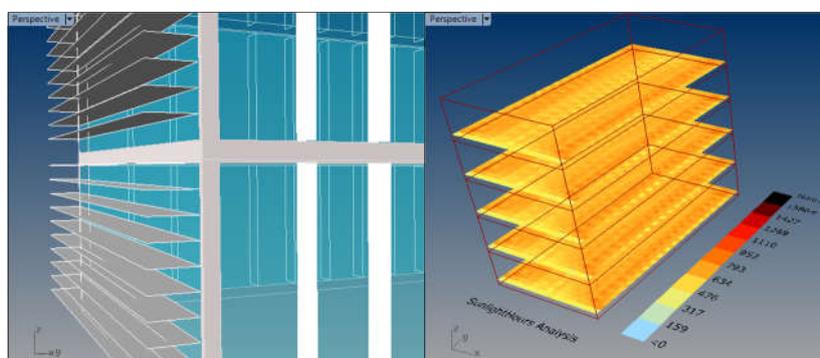


Figura 4.26— Cálculo do número de horas no período de arrefecimento para o modelo com sistemas de proteção solar.

Tal como expectável, com os sistemas de proteção solar verificou-se uma atenuação, maior na zona interior junto à fachada de orientação Sul, do número de horas de exposição solar.

Este estudo pode, facilmente, ser aplicado na estação de aquecimento dadas as vantagens do *design* generativo e algorítmico.

### ➤ Radiação solar benéfica e prejudicial

À semelhança do ponto anterior, relativo à radiação solar incidente no edifício, neste ponto pretende-se aprofundar e explorar um outro método para a otimização do desempenho termo energético. Este método utilizado, no presente caso de estudo, é inspirado no edifício *Fifth XiangYa Hospital*<sup>44</sup>.

A metodologia passa por diferenciar a radiação solar em benéfica e prejudicial. Por um lado, a radiação benéfica consiste na radiação que conduz a temperaturas (do ar) superiores a 20°C no período de aquecimento (inverno). Por outro, a radiação prejudicial compreende temperaturas superiores a 25°C no período de arrefecimento (verão). Após esta diferenciação, é feito um balanço entre os dois tipos de radiação de forma a obter a radiação solar benéfica (líquida).

Um valor positivo indica que a radiação benéfica é superior à prejudicial, pelo que, quanto maior for este valor, melhor orientado está o edifício tendo em conta apenas a radiação solar incidente.

Passando a explicar o raciocínio subjacente à construção do algoritmo: o primeiro passo passa pela modelação, de painéis com 1 m de largura e altura igual ao pé direito de cada piso, nas fachadas do edifício, através do *plugin Skindesigner* (Figura 4.27).

Importa referir que, o edifício tem uma configuração diferente, das que se tem apresentado, por forma a mostrar a adaptabilidade face aos estudos pretendidos.

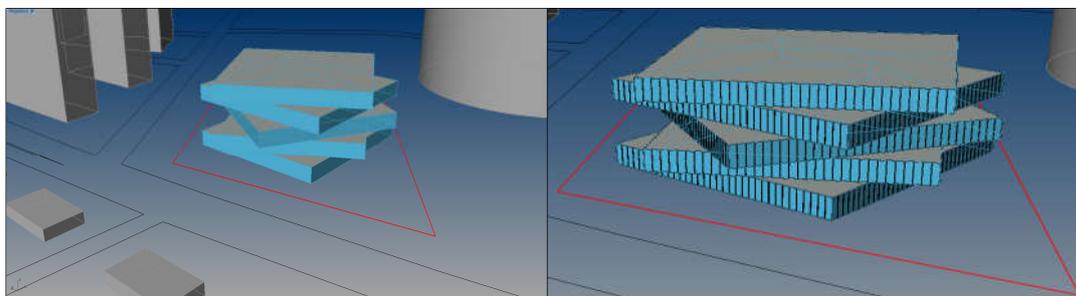


Figura 4.27— a) Fachadas sem painéis e b) Fachadas com painéis.

---

<sup>44</sup> Veja-se, para mais detalhes, o referido o capítulo 2.4.3.

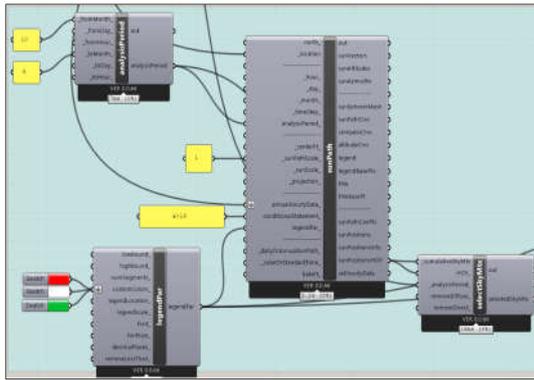


Figura 4.28— Geometria solar na estação de aquecimento.

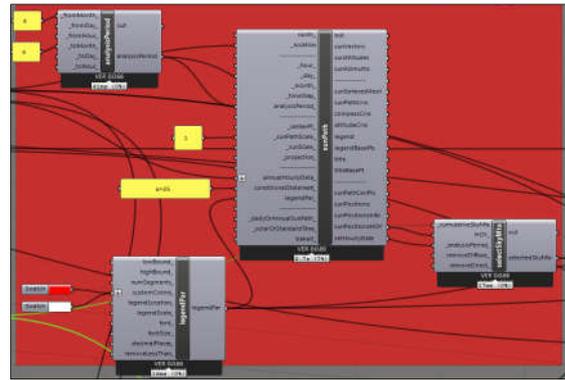


Figura 4.29— Geometria solar na estação de arrefecimento.

O próximo passo consiste na diferenciação da geometria solar no período de aquecimento e arrefecimento (representado algoritmicamente através das Figuras 4.28 e 4.29 respetivamente).

Para tal, através de uma *conditional statement*, selecionaram-se as temperaturas superiores a 20°C para o período de aquecimento (radiação benéfica) e a 25°C para o período de arrefecimento (radiação prejudicial). Por fim, é feita a simulação da radiação solar incidente de forma independente para os dois períodos.

Ainda, e para minimizar os ganhos térmicos no verão e maximizar os ganhos no inverno, procedeu-se ao desenho de um bloco algorítmico (com recurso, mais uma vez, ao *plugin Skindesigner*) para modelar as fachadas envidraçadas com sistema de proteção solar.

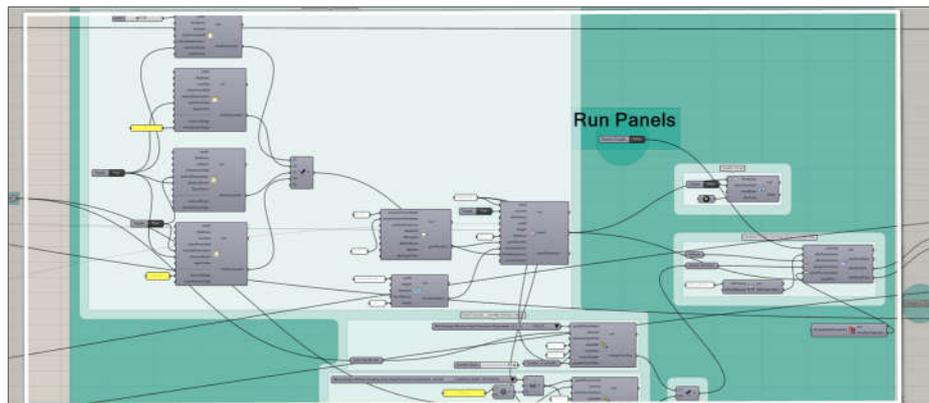


Figura 4.30— Bloco algorítmico para a modelação das fachadas envidraçadas como os sistemas de proteção solar.

A Figura 4.30 ilustra o algoritmo para a modelação das fachadas envidraçadas bem como para a modelação dos sistemas de protecção solar. Este algoritmo incorpora um pequeno pormenor que fará grande diferença na modelação referida. Esse pormenor, consiste na relação entre o valor otimizado (da radiação benéfica) e o intervalo de valores para as dimensões dos envidraçados e das protecções. Desta forma, pretende-se que as dimensões dos vãos envidraçados sejam tanto maiores quanto maior for o valor da radiação benéfica e tanto menores quanto menor for o valor da radiação prejudicial (Figura 4.31). A mesma lógica se aplica aos sistemas de protecção solar, isto é, estes serão maioritariamente aplicados onde haja maior quantidade de radiação prejudicial, em detrimento dos locais onde haja maior quantidade de radiação benéfica.

Cumprе referir que, nas fachadas com a radiação benéfica se aplicam os sistemas de protecção, já que, embora, a radiação benéfica esteja presente maioritariamente, não exclui por completo a radiação prejudicial, que pode existir em determinados períodos do ano, na mesma zona dessas fachadas. E não menos importante, é de referir que, este tipo de estudo relativo à diferenciação da radiação solar, não indica a economia de X% do balanço energético final do edifício face a determinada orientação e forma geométrica do edifício, pois, uma vez que não estão definidos os sistemas construtivos bem como as propriedades dos materiais, é difícil prever com alguma precisão em fases iniciais de concepção do projeto de edifícios.

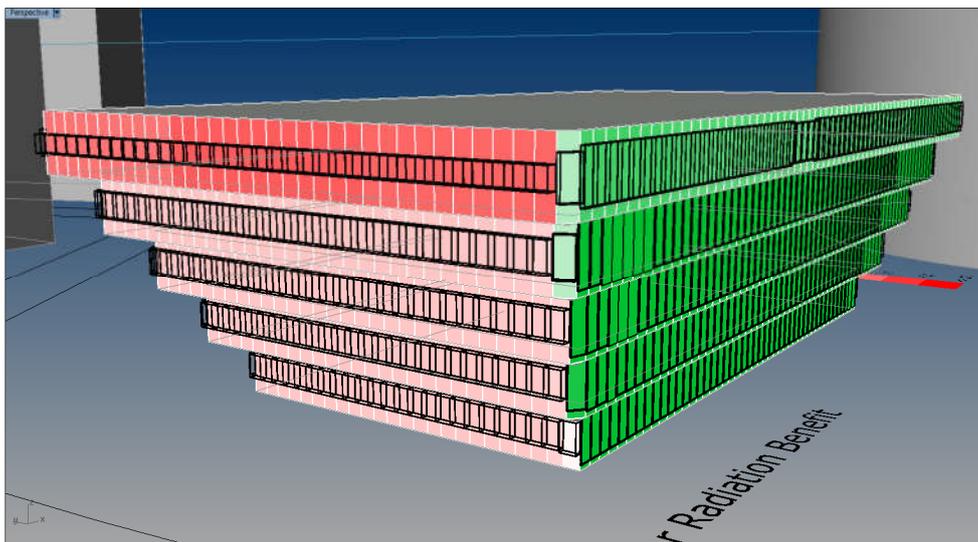


Figura 4.31— Modelação das fachadas envidraçadas e dos sistemas de protecção solar, em função da radiação benéfica e prejudicial.

As Figuras 4.32 e 4.33, exemplificam, precisamente, o edifício com as fachadas envidraçadas e com sistemas de proteção solar, em função do tipo de radiação.

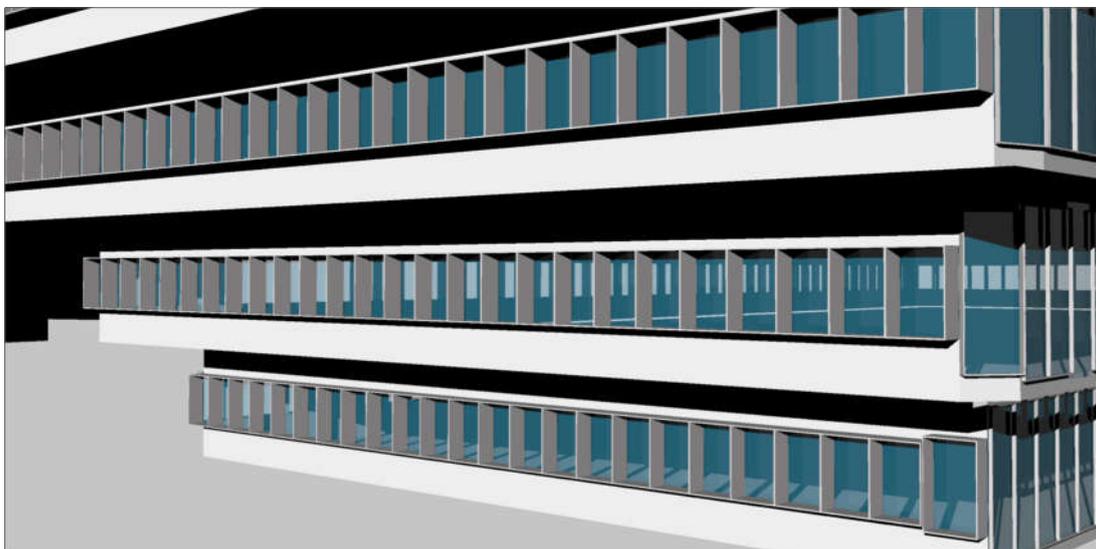


Figura 4.32— Render do pormenor envidraçado - sistema de proteção solar.

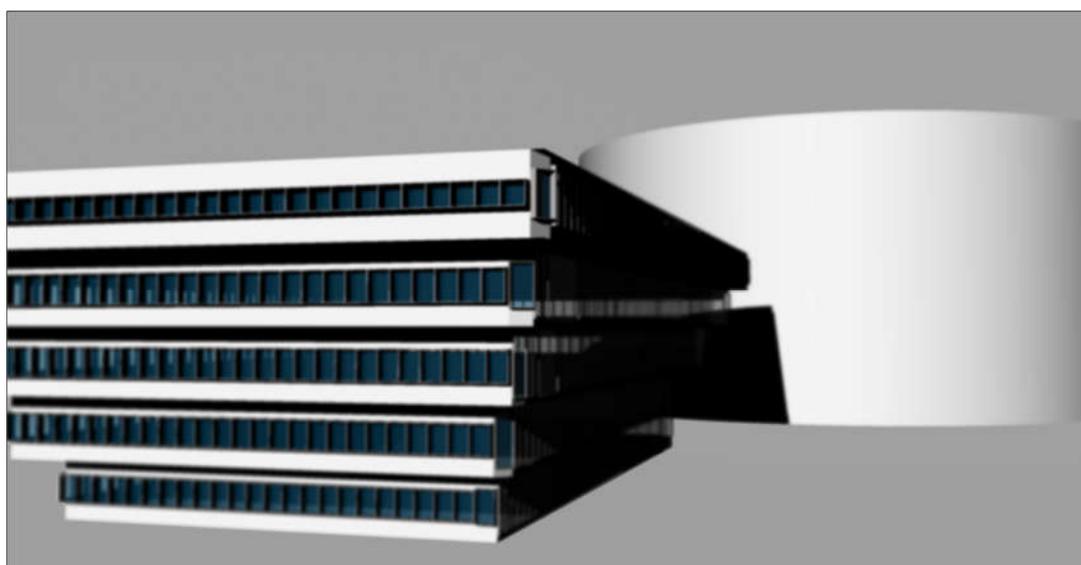


Figura 4.33— Render da fachada orientada a oeste.

## ➤ Vistas para o exterior

Neste ponto, pretendeu-se implementar no caso de estudo a capacidade da quantificação da área útil que tem acesso visual para o exterior.

Este tipo de análise mostra-se interessante quando se utilizam sistemas de proteção solar — como palas de sombreamento — para garantir o bloqueio da radiação solar, que atenua a ativação de sistemas de proteção solar interior (como por exemplo persianas interiores), preservando ainda o campo visual para o exterior quando os sistemas de proteção internos não estão ativados.

Na Figura 4.34 é apresentado um possível sistema de proteção solar (particularmente neste caso de estudo têm uma orientação vertical e horizontal) que foi utilizado no algoritmo e que poderá ter impacto na quantificação do acesso visual para o exterior.

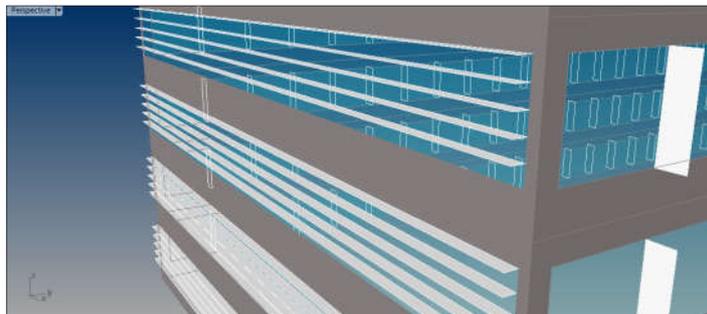


Figura 4.34— Representação do sistema de proteção solar utilizado para o estudo.

O algoritmo foi construído através de uma linha que conduz à componente do *View Analysis* (Figura 4.35), em que é necessário definir a geometria opaca (isto é, que impede a conexão visual interior — exterior) e o plano horizontal onde será transposto o resultado. A percentagem do campo visual de 360° é limitada em cima e em baixo por um desvio de 30 graus a partir da horizontal (derivada do cone de visão humano) como se verifica na Figura 4.36.

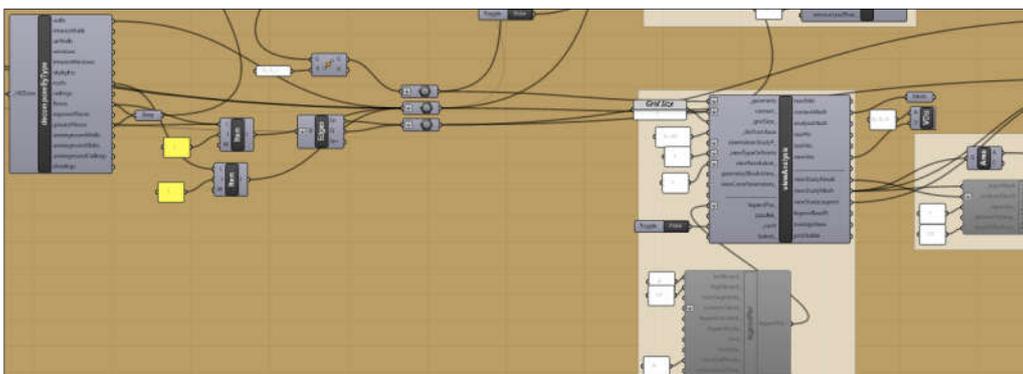


Figura 4.35— Bloco relativo à análise do acesso visual para o exterior a partir do interior do edifício.

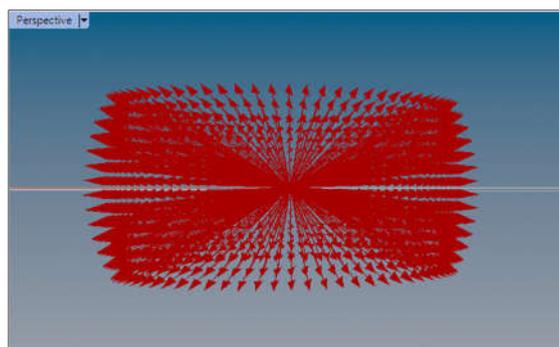


Figura 4.36— Vetores que definem o campo visual.

Relativamente aos resultados, estes são gerados bidimensionalmente (Figura 4.37) e permite verificar a percentagem de área útil que tem “X” percentagem de acesso visual do interior para o exterior tendo em conta os sistemas de proteção solar.

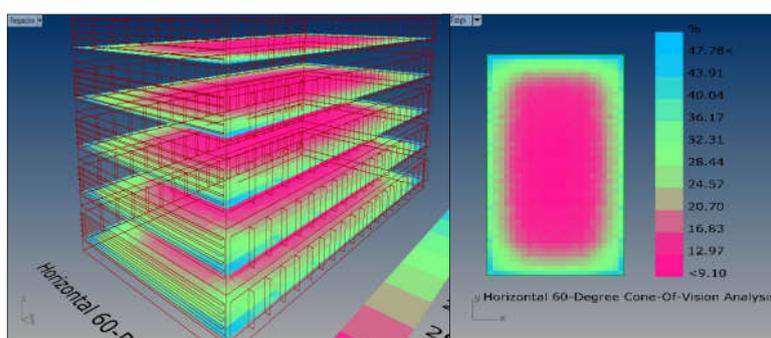


Figura 4.37— Malha colorida do plano horizontal de teste que representa os pontos em percentagem do acesso visual para o exterior.

### ➤ Fachadas com vista privilegiada

Neste tópico, o objetivo do algoritmo passa por quantificar a área das fachadas com vista privilegiada para determinados cenários. Esta funcionalidade pode ser útil, por exemplo, no cálculo do montante de imposto a pagar a título de IMI (Imposto Municipal sobre Imóveis).

No caso aqui em estudo, o cenário é o Oceano Atlântico (representado na Figura 4.38 como uma malha a cor vermelha), pelo que é em relação a este que se quantificarão a área de fachadas com vista privilegiada.

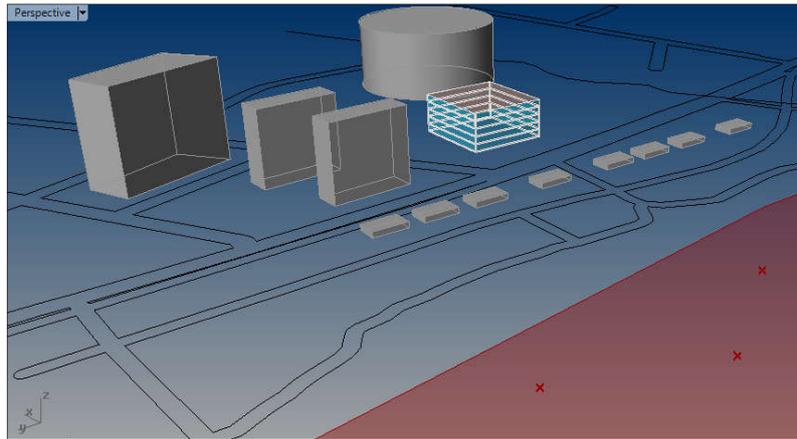


Figura 4.38— Cenário do caso de estudo.

Para se proceder à quantificação das fachadas com vistas privilegiadas foi necessário modelar uma pequena malha de teste para o efeito (Figura 4.39).

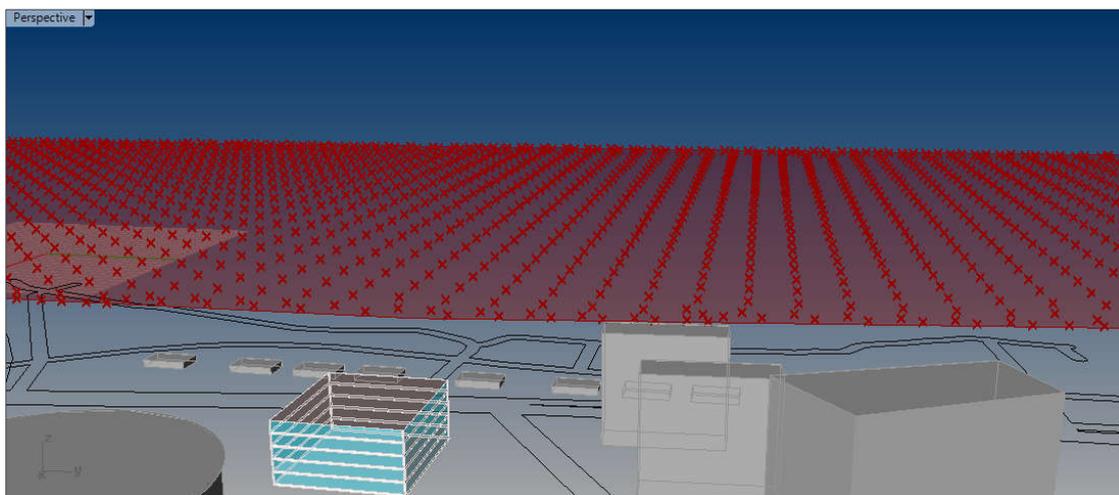


Figura 4.39— Modelação da malha com os correspondentes pontos de teste.

Efetuada a simulação, é possível determinar a percentagem de pontos “visto pelas fachadas”, bem como a percentagem mínima de pontos para que se considere uma vista com qualidade (ou vista privilegiada) como se mostra na Figura 4.40.

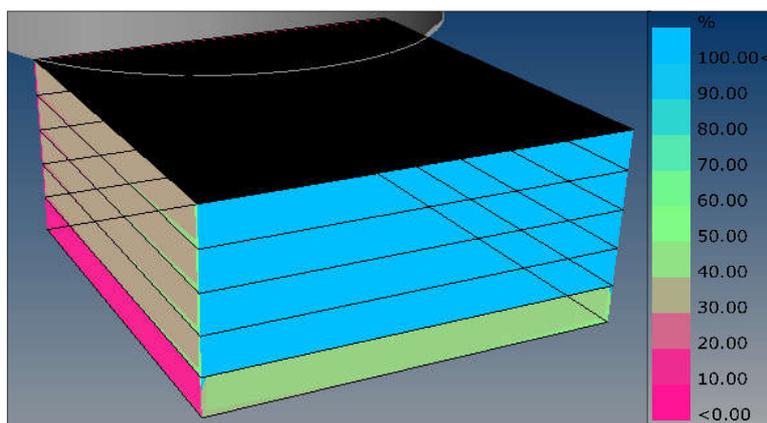


Figura 4.40— Percentagem de pontos teste que “a fachada vê”.

### ➤ Estudo Energético

Neste ponto, será explanado o modo como, o algoritmo dotado da capacidade de realizar uma simulação energética, foi construído. O cálculo energético previsto para o caso de estudo foi concebido para prever, ainda em fase de modelação, o desempenho termo energético do edifício<sup>45</sup>.

Inicialmente, foi necessário definir as propriedades térmicas dos elementos construtivos, tais como paredes, vãos envidraçados, cobertura e pisos, tendo por base a Portaria n.º 349-B/2013<sup>46</sup>, de 20 de novembro com as alterações introduzidas pelas Portarias n.º 379-A/2015 e n.º 319/2016.

Tendo em conta que Vila Nova de Gaia se encontra na zona climática I1 e V2<sup>47</sup>, das tabelas, que constam da Portaria n.º 379-A/2015, extraíram-se os valores relativos ao  $U_{m\acute{a}x}$ <sup>48</sup> (Figura 4.41)<sup>49</sup>:

- Elementos opacos verticais: 1,75;
- Elementos opacos horizontais: 1,25; e
- Vãos envidraçados: 2,80.

Recorde-se que foram utilizados os valores máximos admissíveis, para que o estudo fosse realizado para o cenário mais desfavorável de modo a potenciar uma melhor compreensão do impacto de outros fatores. Ainda, relativamente aos vãos envidraçados, foi definido como 0,5 para o fator solar global do envidraçado, como valor por defeito.

<sup>45</sup> No presente caso de estudo foram utilizados os valores recomendados pelo *plugin* e valores mais desfavoráveis necessários para executar a análise energética.

<sup>46</sup> Da referida Portaria, foram utilizadas as tabelas, I.05A e I.05B.

<sup>47</sup> Dados extraídos do Quadro III.1 do RCCTE.

<sup>48</sup>  $U_{m\acute{a}x}$ - Coeficiente de transmissão térmica superficial máximo admissível de elementos opacos e de vãos envidraçados [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ].

<sup>49</sup> Foram utilizados estes valores, embora não estejam em vigor desde 2006.



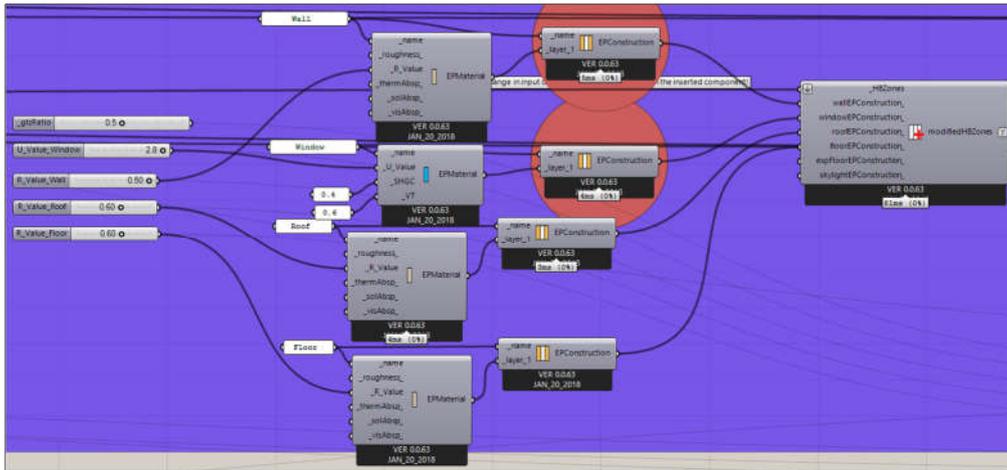


Figura 4.41– Bloco para configuração das propriedades dos elementos construtivos.

No módulo seguinte (Figura 4.42), reservou-se algum espaço para o sistema AVAC. O sistema AVAC utilizado foi o PTHP, recomendado pela componente *HVACSystem* (para um edifício habitacional com pelo menos 5 pisos). O sistema PTHP (em inglês, *Packaged Terminal Heat Pumps*) é um sistema de bomba de calor como solução para aquecimento e arrefecimento dos espaços interiores. Neste sistema foi configurado o termostato, para regulação da temperatura nos períodos de aquecimento e arrefecimento, com temperaturas de 25°C e 20°C respetivamente, para o espaço interior.

Para a realização da análise, através do plugin *OpenStudio*, foi estabelecida uma configuração básica (recomendada pela componente *simulationoutput* para este tipo de metodologia) para o cálculo, cujos valores calculados foram os seguintes: parâmetros de aquecimento e arrefecimento, eletricidade necessária para o funcionamento de equipamentos e sistema de iluminação<sup>50</sup>. Obteve-se como resultado, o valor EUI expresso em kWh/m<sup>2</sup>.ano.

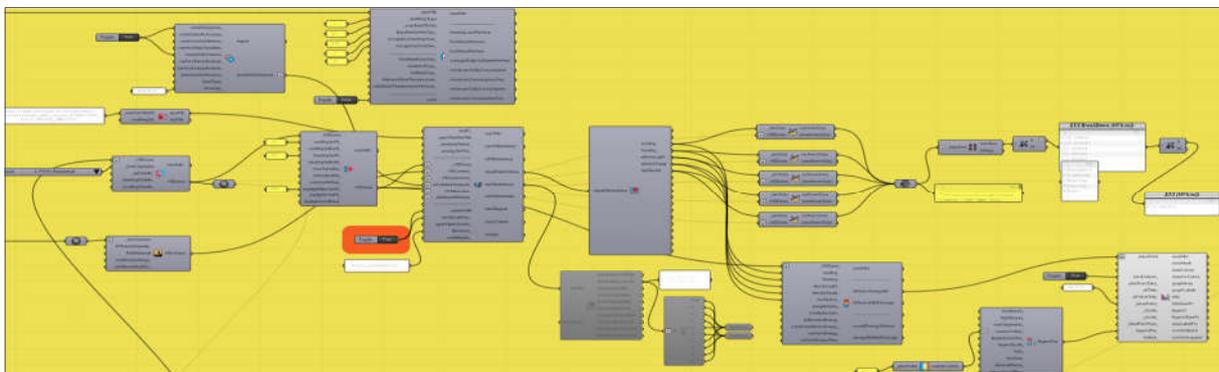


Figura 4.42– Algoritmo global para execução da análise energética e cálculo do valor EUI.

<sup>50</sup> Embora não se tenha definido o sistema de iluminação artificial, os equipamentos e os períodos de ocupação, o *OpenStudio* atribuiu por defeito os valores necessários para o cálculo.

➤ **Agregação dos resultados das diferentes simulações**

Como forma de integração e ligação dos diferentes estudos, utilizou-se o *plugin Colibri* (Figura 4.43). Criou-se uma análise integradora, através de uma componente que itera os diferentes valores para cada variável, e uma componente agregadora das iterações. Particularmente, as variáveis são o *genome* e o *phenome* (função *fitness* ou “função de adequação”). Após ativar a componente iteradora e agregadora, cada resultado foi exportado para uma folha *Excel*. Posteriormente, os valores registados na folha de cálculo, foram exportados para a plataforma *Design Explorer* (Figura 4.44).

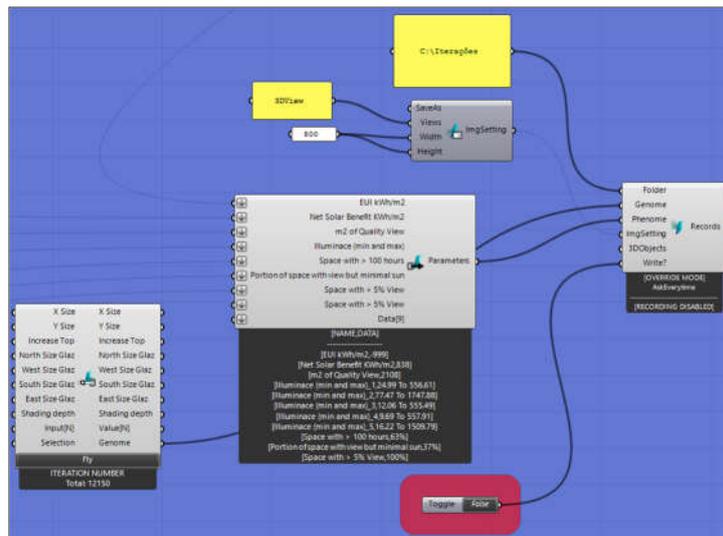


Figura 4.43– Componentes para iterar as diferentes variáveis e agregar os resultados obtidos.

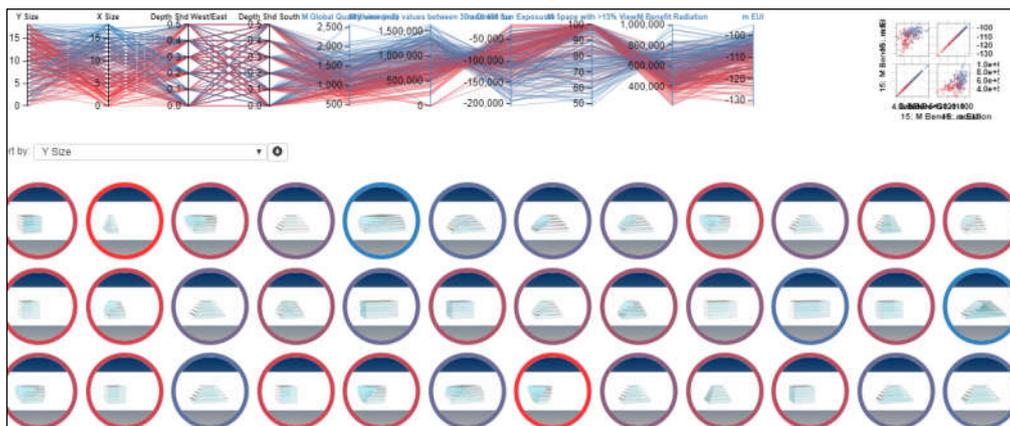


Figura 4.44– Espaço multidimensional de soluções dos diversos estudos experimentais na plataforma *Design Explorer*.

Dos modelos gerados e explorados, exemplifica-se através da Figura 4.45, a aplicação no espaço urbano selecionado inicialmente, um modelo do espaço de soluções aleatório.



Figura 4.45— Possível modelo integrador dos diversos estudos no local de implantação.

### 4.3 Otimização Mono-Objetivo

Após se ter realizado diferentes estudos e se ter compreendido os aspetos importantes subjacentes a cada, procedeu-se à realização de uma otimização mono-objetivo. Para tal, e como recurso a um *solver* evolucionário, seleccionou-se a maximização da percentagem de iluminâncias entre 50 e 500 lux nos espaços interiores de todo o edifício, como objetivo. Neste ponto, sentiu-se a necessidade de uma componente que seleccione as iluminâncias objetivo, mínima e máxima, para otimização. Assim, com recurso à programação, mas desta vez em código *Python*, programou-se uma componente, para efetuar esse trabalho (Figura 4.46).

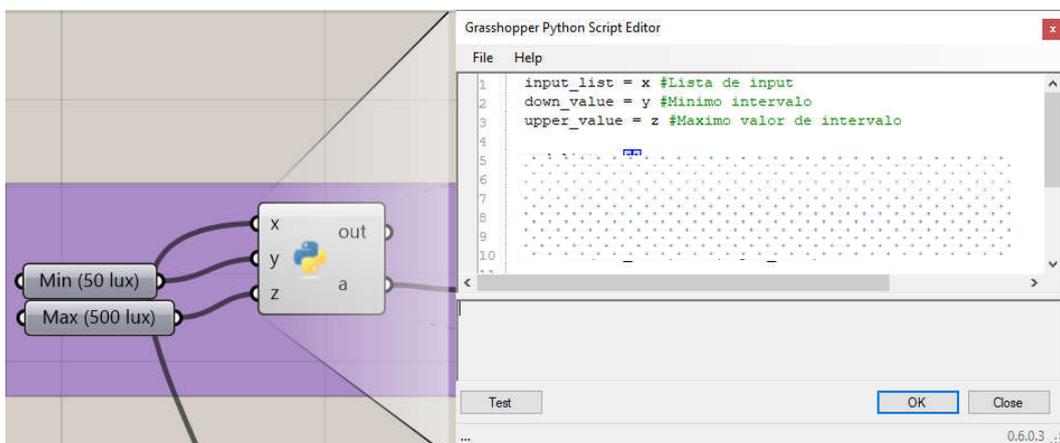


Figura 4.46— Código *Python* para seleção dos valores de iluminância (mínimo e máximo).

Nesta otimização, a forma geométrica do edifício considerou-se como constante e igual à geometria resultante da otimização multiobjectivo relativa à radiação solar incidente nas fachadas do edifício. Esta decisão, simula aquilo que poderia acontecer num caso real, em que face a uma otimização multiobjectivo de um aspeto em geral, se pretende otimizar algo em particular sem que se altere os parâmetros anteriormente tidos como otimizados.

Desta forma, para esta otimização, as variáveis são: as dimensões dos vãos envidraçados (percentagem de envidraçado/parede) e as dimensões dos dispositivos de proteção solar (e número de lâminas).

Procedeu-se então à otimização, do qual foi possível obter resultados positivos sendo que o mais favorável, teve como impacto uma otimização na ordem dos 12% face ao modelo base comparativo<sup>51</sup>.

#### **4.4 Otimização Multiobjectivo**

Para a realização de uma otimização multiobjectivo (a primeira na 3ª fase), selecionou-se como objetivos, a maximização dos ganhos solares no período de aquecimento e minimização dos ganhos solares no período de arrefecimento<sup>52</sup>. Este foi escolhido, dada a importância que tem no comportamento termo energético de um edifício.

O *plugin* utilizado para a otimização multiobjectivo foi o *Galapagos*, pela capacidade que demonstrou, nas fases de teste, na resolução deste tipo de problemas.

O processo de otimização foi parado à quinquagésima sexta geração, sendo que os valores ótimos foram encontrados à quadragésima sexta geração com uma variação entre si, de 1%. A população total gerada neste processo de otimização foi de 5600 indivíduos. Com esta otimização, conseguiu-se perceber qual a forma geométrica mais adequada bem como a orientação das fachadas<sup>53</sup>.

#### **4.5 Cálculo iterativo**

Para que não haja uma restrição, ou obrigatoriedade na utilização destes *solvers* na obtenção de valores ou modelos ótimos, propõe-se neste ponto, a utilização do Colibri como alternativa. Através deste, foi feito um cálculo iterativo (entre valores máximos e mínimos) abordando os estudos, como:

---

<sup>51</sup> Os resultados e processo de otimização encontram-se nos Anexos AII.6 a AII.8

<sup>52</sup> Veja-se, para mais detalhes, o tópico - radiação solar benéfica e prejudicial - relativo ao ponto 4.2.3.

<sup>53</sup> Recomenda-se a consulta dos Anexos AI.2 a AI.4.

- Estimativa da radiação benéfica;
- Cálculo da área útil com vista para o exterior acima de 15%<sup>54</sup>;
- Quantificação da área das fachadas com vista privilegiada;
- Determinação da percentagem de área útil com iluminação compreendida entre 50 e 500 lux;
- Quantificação do EUI.

A utilização de valores máximos e mínimo teve como propósito acentuar a variação entre os resultados dos diversos estudos, trabalhando com valores favoráveis e/ou desfavoráveis para cada estudo e, ainda, a redução do número de iterações que, favoravelmente, diminuiu o tempo de cálculo, mas, desfavoravelmente, reduziu o número de análises e modelos estudados.

Deste modo, à semelhança dos procedimentos anteriores, exportou-se os resultados para a plataforma *Design Explorer*<sup>55</sup>.

Dos vários modelos produzidos, cabe ao projetista definir prioridades, isto é, utilizar uma espécie de *benchmark* para se poder analisar criticamente este tipo de otimização multiobjectivo. Sem que haja valores de ponderação ou mesmo uma *benchmark* é difícil atribuir graus de desempenho aos modelos.

---

<sup>54</sup> Este valor (15%) é meramente para efeitos de estudo de aplicabilidade, de modo que, não tem qualquer fundamento.

<sup>55</sup> Consultar Anexo AIII.10



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Conclusões

A sustentabilidade ambiental tem merecido a atenção da comunidade científica, extravasando o quotidiano da população em geral. Indiferente a essa temática não ficou o setor da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), que tendo presente o impacto do consumo energético dos edifícios no cômputo geral dos consumos energéticos, tem procurado, por diversas vias, caminhar no sentido da otimização do desempenho termo energético dos edifícios.

Ao longo do Capítulo 2, com a revisão bibliográfica, foi possível compreender a importância das estratégias bioclimáticas nos edifícios e o impacto que a orientação e a geometria dos edifícios têm nos ganhos térmicos, que são desejáveis na estação de aquecimento e indesejáveis na de arrefecimento.

Ainda, no Capítulo 2, foi possível apreender os principais requisitos da legislação nacional e europeia em matéria de eficiência energética e compreender os “edifícios com necessidades quase nulas” como paradigma da política energética, o que evidencia a preocupação com o desempenho energético dos edifícios.

Com a revisão da literatura, no que refere o *design* generativo, compreendeu-se que este traz uma “lufada de ar fresco” não só à forma como os edifícios são concebidos, mas também ao modo como são idealizados. O *design* generativo revelou-se uma espécie de “extensão da mente humana” pela capacidade de gerar formas e sistemas construtivos difíceis de imaginar dadas as inúmeras possibilidades. Este, como referem diferentes autores, tem sido utilizado por várias entidades do setor AEC na conceção de edifícios desafiantes do ponto de vista da engenharia.

Foi, ainda, possível constatar que as vantagens do *design* generativo referidas, são enriquecidas pela algoritmia genética. O paralelismo que é feito entre as leis Darwinianas da Biologia e da Genética, transformou positivamente a capacidade de otimização, seja mono, seja multiobjectivo, dos modelos.

No que concerne ao Capítulo 3, depreendeu-se que o conjunto, *software* + *plugins*, selecionado criteriosamente, permitiu a aplicação da metodologia generativa e de programação. Através de casos reais em que estes métodos foram utilizados, confirmou-se que estes seriam uma mais valia para o desenvolvimento do caso de estudo, bem como confirmam a validade para aplicar a casos reais (excluindo a ideia de que apenas funcionam na teoria).

Com efeito, no Capítulo 4, que respeita ao caso de estudo, concluiu-se que o *design* generativo, corretamente utilizado entre os diversos *plugins* de análise e simulação, expande o espaço de soluções/modelos de estudo e reduz, exponencialmente, o tempo na realização de qualquer alteração

no modelo. Acresce ainda que, esta forma de projetar dotou os estudos realizados de uma maior versatilidade e dinamismo.

Não menos importante, os algoritmos evolutivos permitiram, durante um estudo relativo à radiação solar benéfica e prejudicial, identificar e otimizar de forma expedita, a geometria do edifício “mais apta” para o meio ambiente em que está inserido. O que seria uma tarefa complexa — perceber qual a forma ótima —, para o *solver* evolucionário, foi uma tarefa simples de realizar.

Do mesmo modo, através do *plugin Colibri* verificou-se que é possível, iterar várias variáveis e agregar os resultados obtidos numa folha de cálculo como o *Excel*. A importação deste ficheiro \*.csv na plataforma *Design Explorer*, mostrou-se interessante, como forma de compreensão da influência das diversas variáveis nos diferentes estudos através de um espaço multidimensional.

Ainda, todas as componentes dos diferentes plugins mostraram-se compatíveis, respeitando o carácter dos valores de entrada e saída, o que facilitou a construção algorítmica, utilizada no caso de estudo.

De modo global, cumpriram-se os objetivos inicialmente estabelecidos, contribuindo para o estudo e partilha do conhecimento destas matérias.

## **5.2 Limitações do estudo**

No decurso da investigação foram sentidas várias limitações no que concerne à aquisição de conhecimentos acerca dos softwares utilizados. Embora exista um fórum ativo para partilha de ideias e conhecimentos acerca destes *plugins*, é notória a necessidade de um manual que apresente de forma sistematizada os principais aspetos e informações acerca da sua utilização e capacidades.

Uma outra limitação a assinalar, está relacionada com as dificuldades ao nível dos recursos computacionais e do conhecimento de técnicas de refinamento de malha, que tiveram particular impacto no estudo da iluminação natural. A elevada densidade das malhas implica um enorme dispêndio de tempo na sua simulação, pelo que faltou tempo e conhecimento para conceber uma malha de melhor qualidade.

No que respeita à fase de otimização dos modelos, a principal limitação prende-se com a morosidade que a utilização de diversas variáveis aliado ao escasso poder computacional disponível, implicam.

Além disso, verificou-se, aquando a otimização das dimensões dos vãos envidraçados face à radiação solar (benéfica ou prejudicial) incidente nas fachadas, que a capacidade de armazenamento do *software* é limitada e insuficiente para abarcar todas as soluções resultantes desse processo.

Foram também sentidas dificuldades no estudo concreto de algumas imposições regulamentares, a partir dos dados obtidos nas simulações, dado que as componentes de simulação, por vezes, não têm como *outputs* os dados necessários para tal.

Por último, cumpre fazer menção de que o *software* não dispõe de componentes específicas para a modelação do sistema de águas quentes sanitárias (AQS), motivo pelo qual esse sistema não foi tido em conta no processo de cálculo energético.

### **5.3 Desenvolvimentos futuros**

Uma vez que o tema em estudo é recente e encontra-se em constante evolução, poderá ser complementado e desenvolvido através dos estudos que a seguir se propõem:

- Desenvolvimento de um estudo que compare projetos concretos já realizados, com a hipótese de esses poderem ser concebidos através do *design* generativo e, desse modo, aferir, se permitiria obter uma otimização energética;
- Realização de um estudo que explore as potencialidades e capacidades do *design* generativo numa equipa de projeto multidisciplinar;
- Concretização de um trabalho de expansão/inclusão das seguintes variáveis: custo, conforto térmico, produção de energia, sistemas de AQS, ciclo de vida de vida dos materiais, entre outros;
- Elaboração de um estudo que aprofunde a análise multiobjectivo, relativamente às características das soluções construtivas, para otimização e uma escolha mais consciente destas, face ao custo-benefício;
- Desenvolvimento de uma *benchmark* para estudos de otimização multiobjectivo.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adrian Smith + Gordon Gill Architecture (2012). *Qintai International Tower*. (Imagem). Disponível em: [http://smithgill.com/work/qintai\\_international\\_tower/](http://smithgill.com/work/qintai_international_tower/) (Acedido a 14/08/2018).

Aghaei Meibodi, M. (2016). *Generative Design Exploration: Computation and Material Practice*. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm. ISBN: 978-91-7595-839-2.

Arup (Sem Data). *National Stadium (Bird's Nest)* (Imagem). Disponível em: <https://www.arup.com/projects/chinese-national-stadium>. (Acedido a: 3/09/2018).

Attia, S., Beltrán, L., De Herde, A., & Hensen, J. (2009). 'Architect friendly': a comparison of ten different building performance simulation tools. International Building Performance Simulation Association 2009. (pp. 204-211). Disponível em: [http://www.ibpsa.org/proceedings/bs2009/bs09\\_0204\\_211.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/bs2009/bs09_0204_211.pdf) (Acedido a: 25/06/2018).

Azenha, M., Lino, J. C., & Caires, B. (2014). *Building Information Modeling*. (Curso BIM realizado pela Ordem dos Engenheiros).

Barrios Hernandez, C. R. (2006). *Thinking parametric design: introducing parametric Gaudi*. Design Studies, 27(3), 309–324. doi: 10.1016/j.destud.2005.11.006

Beasley, D., Bull, D., & Martin, R. (1993). *An Overview of Genetic Algorithms: Part 1, Fundamentals*. Inter-University Committee on Computing. 15(2) (pp. 58-69). Disponível em: <http://mat.uab.cat/~alseda/MasterOpt/Beasley93GA1.pdf> (Acedido a: 9/06/2018).

Benjamin, D. (2016). *Generative Design in Architecture | In the Innovation Zone at AU with David Benjamin* [video online]. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=TmAY6qycBsk> (Acedido a: 15/07/2018).

CADMapper - *Worldwide map files for any design program*. (2018). Disponível em: <https://cadmapper.com/> (Acedido a: 16/06/2018).

Cavaco, A., Silva, H., Canhoto, P., Neves, S., Neto, J., & Pereira, M. (2016). *Radiação Solar Global em Portugal e a sua variabilidade, mensal e anual*. Disponível em : <http://www.ipes.pt/ipes/wpcontent/uploads/2017/10/Radia%C3%A7%C3%A3o-Solar-Global-em-Portugal-e-a-sua-variabilidade.pdf> (Acedido a: 1/10/2018).

Decreto-Lei n.º 118/2013, do Ministério da Economia e do Emprego, 20 de agosto de 2013, relativa à aprovação do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação e do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços. Diário da República n.º 159/2013, Série I, (2013-08-20), (pp. 4988-5005). Ministério da Economia e do Emprego: Lisboa.

Decreto-Lei n.º 78/2006, do Ministério da Economia e da Inovação, 4 de abril de 2006, relativa à aprovação do Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios. Diário da República n.º 67/2006, Série I-A, (2006-04-04), (pp. 2411-2415). Ministério da Economia e da Inovação: Lisboa.

Decreto-Lei n.º 79/2006, do Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, 4 de abril de 2006, relativa à aprovação do Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios. Diário da República n.º 67/2006, Série I-A, (2006-04-04), (pp. 2416-2468). Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações: Lisboa.

Decreto-Lei n.º 80/2006, do Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, 4 de abril de 2006, relativa à aprovação do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). Diário da República n.º 67/2006, Série I-A, (2006-04-04), (pp. 2468 - 2513). Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações: Lisboa.

Design Explorer 2. (2018). Disponível em: <https://tt-acm.github.io/DesignExplorer/> (Acedido a: 20/09/2018).

Diretiva (UE) 2018/844 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 30 de maio de 2018, que altera a Diretiva 2010/31/UE relativa ao desempenho energético dos edifícios e a Diretiva 2012/27/UE sobre a eficiência energética. Jornal Oficial da União Europeia. L 156, (19.6.2018), (pp. 75–91). Parlamento Europeu: Bruxelas.

Diretiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de dezembro de 2002, relativa ao desempenho energético dos edifícios. Jornal Oficial da União Europeia. L 1, (4.1.2003), (pp. 65–71). Parlamento Europeu: Bruxelas.

Diretiva 2010/31/UE do Parlamento e do Conselho, de 19 de maio de 2010, relativa ao desempenho energético dos edifícios. Jornal Oficial da União Europeia. L 153/13, (18.6.2010), (pp. 13–35). Parlamento Europeu: Bruxelas.

EnergyPlus. (2018). *Weather Data Sources*. Disponível em: <https://energyplus.net/weather/sources#IWEC> (Acedido a: 10/07/2018).

Epwmap. (2018). Disponível em: <http://www.ladybug.tools/epwmap/> (Acedido a: 17/05/2018).

Evins, R. (2013). *A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, (pp. 230–245) doi: 10.1016/j.rser.2013.02.004

Garay, S. (Sem Data). *Skindesigner*. Disponível em: <https://www.food4rhino.com/app/skindesigner> (Acedido a: 3/06/2018).

Gero, J. S. (1996). *Creativity, emergence and evolution in design*. *Knowledge-Based Systems* 9 (pp. 435-448) doi: 10.1016/s0950-7051(96)01054-4

Gonçalves, H., & Graça, J. M. (2004) *Conceitos bioclimáticos para os edifícios em Portugal*. DGGE/IP-3E: Lisboa. ISBN: 972-8268-34-3.

Google. (2018). *Google Earth Pro* (Version 7.3.2.5491) [Windows]. Disponível em: <https://www.google.com/earth/download/gep/agree.html> (Acedido a: 28/07/2018).

Haupt, R., & Haupt, S. (2004). *Practical genetic algorithms*. (2ª ed.) John Wiley & Sons, Inc., Hoboken: New Jersey. ISBN: 0-471-45565-2

Howes, B. (2017). *Colibri Release*. Disponível em: <http://core.thorntontomasetti.com/colibri-release/> (Acedido a: 26/07/2018).

Howes, B. (2017). *Design Explorer Announcement*. Disponível em: <http://core.thorntontomasetti.com/design-explorer-announcement/> (Acedido a: 30/07/2018).

International Energy Agency, (2011). *Energy efficiency is an essential part of efforts to slash global CO2 emissions*. Disponível em: <https://www.iea.org/newsroom/news/2011/march/2011-03-08-.html> (Acedido a: 10/08/2018).

Konis, K., Gamas, A., & Kensek, K. (2016). *Passive performance and building form: An optimization framework for early-stage design support*. *Solar Energy*, 125, (pp. 161–179. doi: 10.1016/j.solener.2015.12.020

KPF – Kohn Pedersen Fox Associates (Sem Data). *Project Approach (One Vanderbilt, Ideal Block & Master Plan, Crystal Plaza)*. Disponível em: <https://ui.kpf.com/projects> (Acedido a: 11/09/2018).

Ladybug tools (Sem Data). *What is Ladybug? / What is Honeybee?* (Imagens). Disponível em: <https://www.ladybug.tools/index.html> (Acedido a: 6/05/2018).

Lam, Khee & Huang, Y & Zhai, Q. (2004). *Energy modelling tools assessment for early design phase*. Research Report Prepared for Northwest Energy Efficiency Alliance. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/285632296\\_Energy\\_modelling\\_tools\\_assessment\\_for\\_early\\_design\\_phase](https://www.researchgate.net/publication/285632296_Energy_modelling_tools_assessment_for_early_design_phase) (Acedido a: 19/05/2018).

Lei n.º 58/2013, da Assembleia da República, 20 de agosto de 2013, relativa à aprovação dos requisitos de acesso e de exercício da atividade de perito qualificado para a certificação energética e de

técnico de instalação e manutenção de edifícios e sistemas. Diário da República n.º 159/2013, Série I (2013-08-20), (pp. 4923-4926). Assembleia da República: Lisboa.

McCall, J. (2005). *Genetic algorithms for modelling and optimisation*. Journal of Computational and Applied Mathematics 184 (pp. 205–222). doi: 10.1016/j.cam.2004.07.034

Mode Lab (2014). *Foundations - The Grasshopper Primer Third Edition*. (Imagens). Disponível em: <https://aae280.files.wordpress.com/2014/10/mode-lab-grasshopper-primer-third-edition.pdf> (Acedido a: 5/07/2018).

Moita, F. (1987). *Energia Solar Passiva*. Direção Geral de Energia. Imprensa Nacional – Casa da Moeda: Lisboa. ISBN: 9789728479732

Nagy, D. (2017). *Evolving design*. Disponível em: <https://medium.com/generative-design/evolving-design-b0941a17b759> (Acedido a: 19/08/2018).

Negendahl, K. (2015). *Building performance simulation in the early design stage: An introduction to integrated dynamic models*. Automation in Construction, 54, (pp. 39–53). doi:10.1016/j.autcon.2015.03.002

Nguyen, A.-T., Reiter, S., & Rigo, P. (2014). *A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis*. Applied Energy, 113, (pp. 1043–1058). doi: 10.1016/j.apenergy.2013.08.061

Olgay, V. (1963). *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Journal of Architectural Education (1947-1974). doi: 18. 10.2307/1424217

Payette (Sem Data). *Central South University - Fifth XiangYa Hospital*. (Imagens). Disponível em: <https://www.payette.com/project/fifth-xiangya-hospital/> (Acedido a: 13/08/2018).

Petersen, S., & Svendsen S. (2010). *Method and simulation program informed decisions in the early stages of building design*. Journal of Energy and Buildings 42 (pp. 1113–1119). doi:10.1016/j.enbuild.2010.02.002

Portaria n.º 349-D/2013, dos Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social, 2 de dezembro de 2013, relativa ao estabelecimento dos requisitos de conceção relativos à qualidade térmica da envolvente e à eficiência dos sistemas técnicos dos edifícios novos, dos edifícios sujeitos a grande intervenção e dos edifícios existentes. Diário da República n.º 233/2013, 2º Suplemento, Série I, (2013-12-02), (pp. 6628-(40) a 6628-(73). Lisboa.

Portaria n.º 461/2007, do Ministério da Administração Interna; Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações; Ministério do Ambiente do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional; Ministério da Economia e da Inovação, 5 de junho de 2007, relativa à calendarização da aplicação do Sistema de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos edifícios (SCE). Diário da República, 2ª série - n.º 108, (2007-06-05), (pp. 15378). Lisboa.

PTW Architects, (Sem Data). *Watercube – National Swimming Centre* (Imagens). Disponível em: [http://www.ptw.com.au/ptw\\_project/watercube-national-swimming-centre/](http://www.ptw.com.au/ptw_project/watercube-national-swimming-centre/) (Acedido a: 3/09/2018).

Riether, G., & Butler, T. (2008). *Simulation space-a new design environment for architects* 26th eCAAD Conference proceedings. Muyelle, M., ed., Antwerp, Belgium, Disponível em: [https://cumincad.architexturez.net/system/files/pdf/ecaade2008\\_136.content.pdf](https://cumincad.architexturez.net/system/files/pdf/ecaade2008_136.content.pdf) (Acedido a: 26/05/2018).

Robert McNeel & Associates. (2018). *Grasshopper - Algorithmic Modeling for Rhino* (Versão 0.9.0076) [Windows]. Disponível em: <https://www.rhino3d.com/download/grasshopper/1.0/wip/rc> (Acedido a: 05/04/2018).

Robert McNeel & Associates. (2018). *Rhinoceros: design, model, present, analyze, realize...* (Versão 5) [Windows]. Disponível em: <https://www.rhino3d.com/download/rhino/5/latest> (Acedido a: 5/05/2018).

Roudsari, M., & Pak, M. (2013). *Ladybug: a parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design*. Proceedings of the 13th International IBPSA Conference Held in Lyon, France Aug 25–30th. Disponível em: [http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p\\_2499.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p_2499.pdf) (Acedido a: 8/05/2018).

Roudsari, M., & Pak, M. (2018). *Ladybug tools*. Disponível em: <https://www.ladybug.tools/> (Acedido a: 6/04/2018).

Rutten, D. (2010). *Evolutionary Principles applied to Problem Solving*. [publicação em blog]. Disponível em: <https://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles> (Acedido a: 14/06/2018).

Rutten, D. (2013). *Galapagos: On the Logic and Limitations of Generic Solvers*. Architectural Design, 83(2), (pp. 132-135). doi:10.1002/ad.1568

Rutten, D. (2018). *Galapagos: Evolutionary Solver* [Windows]. Disponível em: <https://www.rhino3d.com/download/grasshopper/1.0/wip/rc> (Acedido a: 9/05/2018).

Šajin, N. (2016). *Energy efficiency of buildings: A nearly zero-energy future?* (Briefing do Parlamento Europeu, maio de 2016). Disponível em: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/582022/EPRS\\_BRI%282016%29582022\\_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/582022/EPRS_BRI%282016%29582022_EN.pdf) (Acedido a: 29/08/2018).

Silva, S. (2009). *A Sustentabilidade e o Conforto das Construções*. (Tese de Doutoramento). Universidade do Minho, Guimarães.

Silva, S., & Almeida, M. (Sem Data). *Física das Construções* (Apontamentos – Cap. 5-6). Universidade do Minho, Guimarães.

Stocking, A. (2009). *Generative Design Is Changing the Face of Architecture*. Disponível em: <http://www.cadalyst.com/cad/building-design/generative-design-is-changing-face-architecture-12948> (Acedido a: 16/08/2018).

Terzidis, K. (2006). *Algorithmic Architecture*. (ed. 1). (pp. 27). Architectural. Press, Oxford, UK.  
ISBN: 978-0750667258

Tomasetti, T. (2018). *TT Toolbox* (Versão 1.9) [Windows]. Disponível em:  
<https://www.food4rhino.com/app/tt-toolbox> (Acedido a: 19/08/2018).

Touloupakia, E., & Theodosioua, T. (2016). *Energy performance optimization as a generative design tool for nearly zero energy buildings*. International High- Performance Built Environment Conference – A Sustainable Built Environment Conference 2016 Series. doi:  
10.1016/j.proeng.2017.04.278

Vierlinger, R., & Bollinger+Grohmann Engineers (Sem Data). *Octopus*. Disponível em:  
<https://www.food4rhino.com/app/octopus> (Acedido a: 3/08/2018).

Weytjens, L., Attia, S., Verbeeck, G., & De Herde, A. (2011). *The “Architect-friendliness” Of Six Building Performance Simulation Tools: A Comparative Study*. International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development, 2(3), (pp.237–244). doi:10.5390/susb.2011.2.3.237

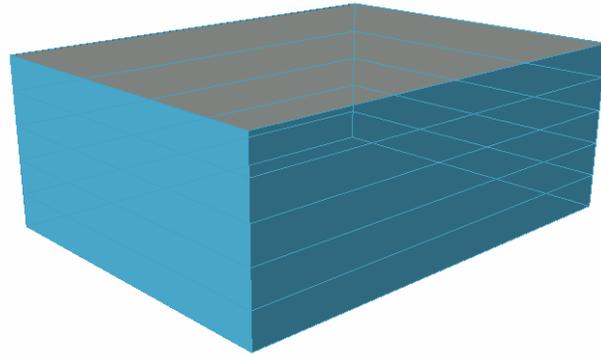
Wright, J. A., Loosemore, H. A., & Farmani, R. (2002). *Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm*. Energy and Buildings, 34(9), (pp. 959–972) .doi:  
10.1016/S0378-7788(02)00071-3

Zanchetta, C., Cecchini, C., & Bellotto, C. (2018). *BIM-Based multi-objective optimization process for energy and comfort simulation: existing tools analysis and workflow proposal on a case study*. Journal of Buildings and Sustainability. Vol.1. No.1. Disponível em:  
[http://www.insightcore.com/journal/bim\\_based\\_multi-objective\\_optimization\\_process\\_energy\\_comfort\\_simulation\\_existing\\_tools\\_analysis\\_workflow\\_proposal\\_case\\_study\\_zanchetta\\_cecchini\\_bellotto.html](http://www.insightcore.com/journal/bim_based_multi-objective_optimization_process_energy_comfort_simulation_existing_tools_analysis_workflow_proposal_case_study_zanchetta_cecchini_bellotto.html) (Acedido a: 29/07/2018).

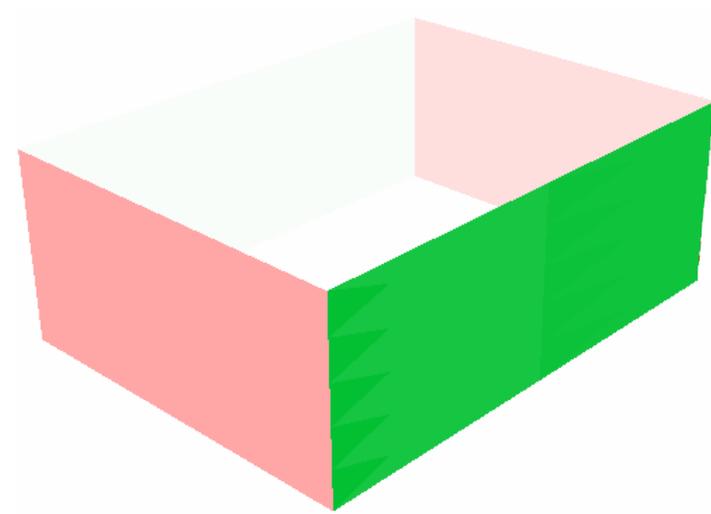
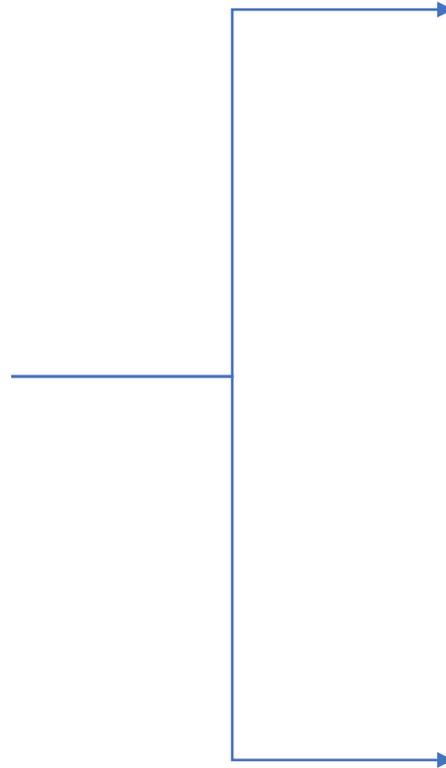
## **ANEXO I – OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO**

## Modelo Base

Análise de Radiação Solar  
(Benéfica vs. Prejudicial)



Modelo Base



Radiação Prejudicial= 8975 kWh/m<sup>2</sup>

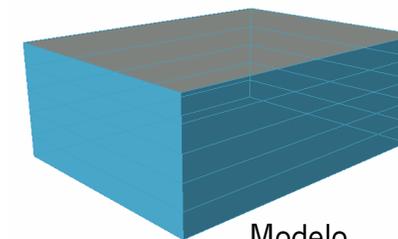
Radiação Benéfica= 9930 kWh/m<sup>2</sup>

Radiação benéfica (líquida)= 955 kWh/m<sup>2</sup>

# Modelo Base

## Análise de Radiação Solar

(Maximização da radiação solar benéfica incidente nas fachadas.)



### Dados de Entrada

X size (m) 40

Y size (m) 30

Rotation angle (deg) 0

Increase top (%) 0

### Variação:

30 ~ 48

30 ~ 48

0 ~ 1800

0,5 ~ 1,5

Genome  
Fitness

Objetivo - Maximização

0.1

### Dados de Saída

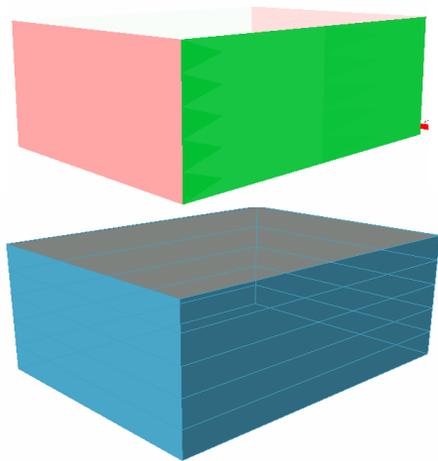
*Net Benefit Radiation (kWh/m<sup>2</sup>)*  
No data was collected..



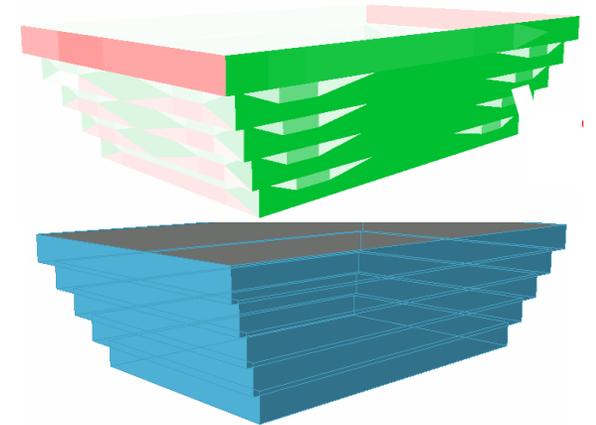
# Modelo Base vs. Modelo Otimizado

## Análise de Radiação Solar

(Maximização da radiação solar benéfica incidente, nas fachadas.)



```
Generation 47 (...)
{
  Bio-Diversity: 0.553
  Genome[0], Fitness=1884.71, Genes [100% · 0% · 50% · 80%]
  {
    Record: Point Mutation at index 2: 0.4444 -> 0.4404
  }
  Genome[1], Fitness=1849.14, Genes [100% · 11% · 50% · 80%]
  {
    Record: Point Mutation at index 3: 0.4 -> 0.4064
  }
  Genome[2], Fitness=1828.15, Genes [100% · 22% · 50% · 80%]
  (...)
}
```



Resultado:

Radiação Prejudicial= 8975 kWh/m<sup>2</sup>

Radiação Benéfica= 9930 kWh/m<sup>2</sup>

Radiação benéfica (líquida)= 955 kWh/m<sup>2</sup>



Resultado:

Radiação Prejudicial= 5540 kWh/m<sup>2</sup>

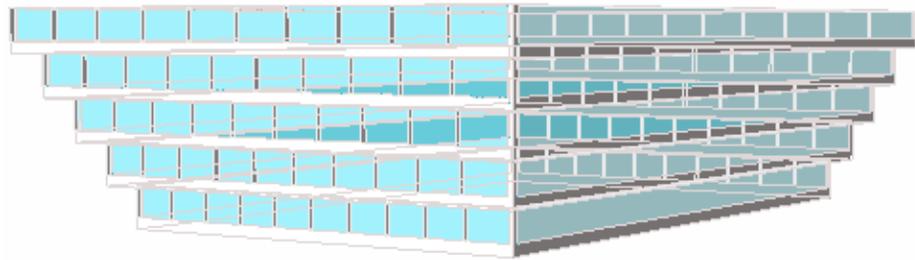
Radiação Benéfica= 7425 kWh/m<sup>2</sup>

Radiação benéfica (líquida)= 1885 kWh/m<sup>2</sup>

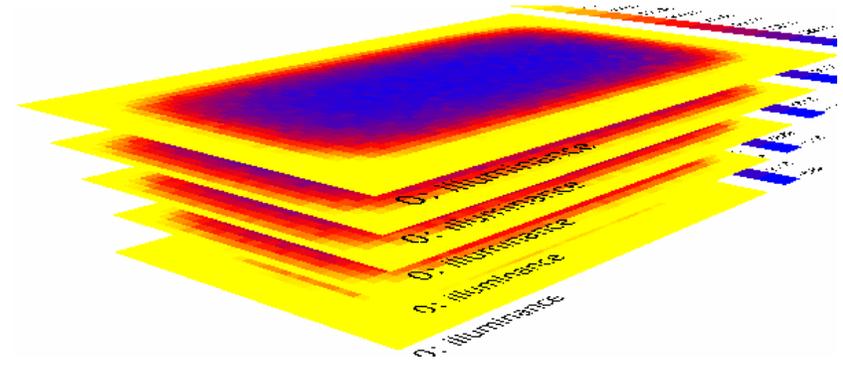


# Modelo Base

Iluminação Natural



Modelo Base

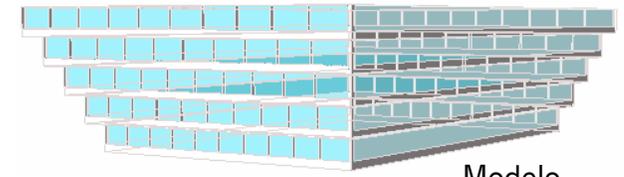


Percentagem de área útil com Iluminância (50-500 lux):  
60%

# Modelo Base

## Iluminação Natural

(Valores de Iluminância entre 50–500 lux)



### Dados de Entrada

NGS

WGS

SGS

EGS

Shd E/W depth

Nr. Shd West/East

Shd S depth

Nr. Shd South

**North Shd**

### Variação:

0,7 ~ 0,95

0,7 ~ 0,95

0,7 ~ 0,95

0,7 ~ 0,95

0,4 ~ 1

10 ~ 30

0,4 ~ 1

1 ~ 6

0

Genome

Fitness

Min (50 lux)

Max (500 lux)

x out

y a

z

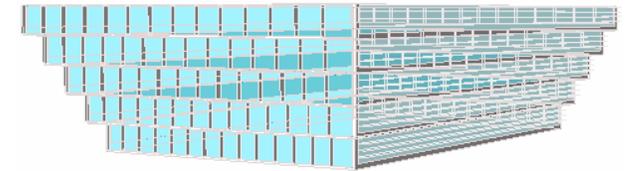
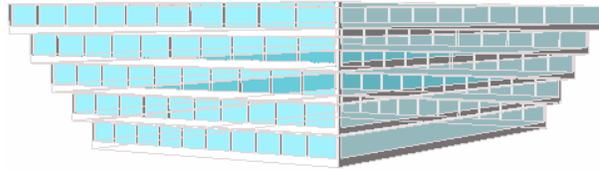
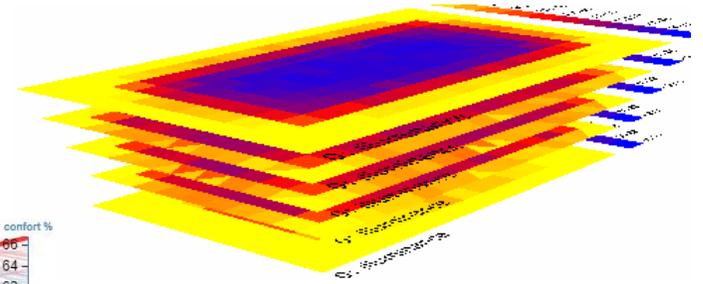
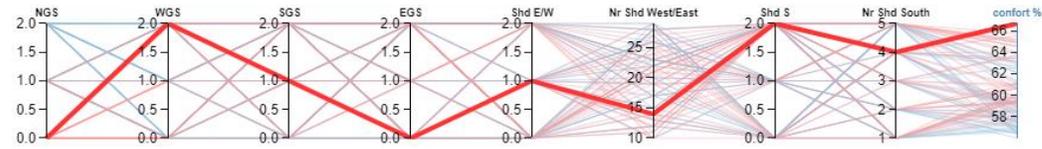
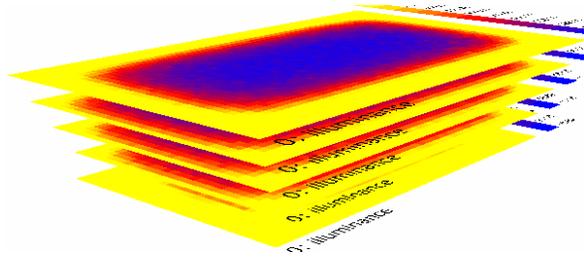
Objetivo - Maximização

0.1

# Modelo Base vs. Modelo Otimizado

## Iluminação Natural

(Maximização das iluminâncias entre 50-500 lux)



Resultado:

Percentagem de área útil com Iluminância (50-500 lux): 60%



**12%**

Resultado:

Percentagem de área útil com Iluminância (50-500 lux): 67%

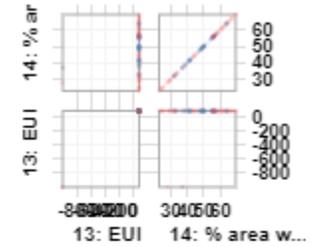
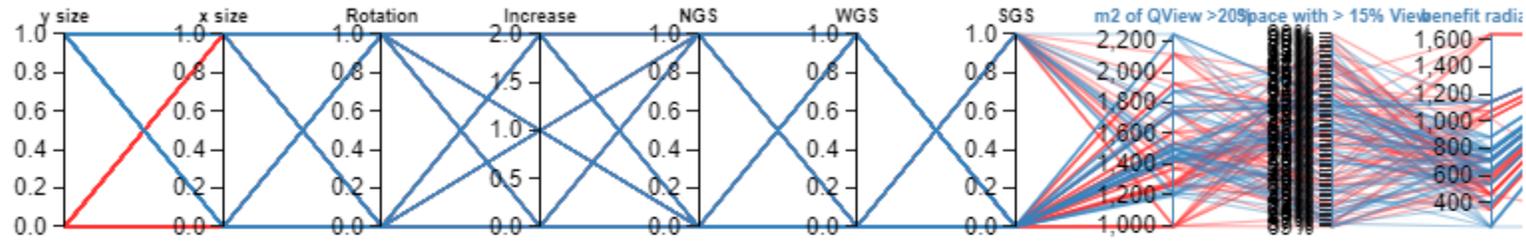


# Modelos — Cálculo Iterativo

◀ ▼ Reset Selection Exclude Selection Zoom to Selection Save Selection to File My Static Link Tutorial Services Info ⓘ

Setting L M S ▶

© 2017 Thornton Tomasetti



Sort by: y size ▼ ⓘ

