

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO

RODRIGO DIAS MACHADO

**Processos de otimização de envoltória de edifícios comerciais para a  
geração de energia renovável**

São Paulo

2022

RODRIGO DIAS MACHADO

**Processos de otimização de envoltória de edifícios comerciais para a  
geração de energia renovável**

**Versão Revisada**

Dissertação apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo

Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Andrade Roméro.

EXEMPLAR REVISADO E  
ALTERADO EM RELAÇÃO À  
VERSÃO ORIGINAL, SOB  
RESPONSABILIDADE DO AUTOR E  
ANUÊNCIA DO ORIENTADOR. A  
versão original, em formato digital,  
ficará arquivada na Biblioteca da  
Faculdade. São Paulo, 25 de julho de  
2022.

São Paulo

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na Publicação  
Serviço Técnico de Biblioteca  
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo

Machado, Rodrigo Dias

Processos de otimização de envoltória de edifícios comerciais para a geração de energia renovável / Rodrigo Dias Machado; orientador Marcelo de Andrade Roméro. - São Paulo, 2022.

199p.

Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura.

1. Eficiência Energética. 2. Energia eólica. 3. Energia Fotovoltaica. 4. Edifícios Comerciais. I. Roméro, Marcelo de Andrade, orient. II. Título.

Aos meus pais, João e Irene, e ao meu irmão, Rafael, por todo apoio e compreensão ao longo do período de elaboração deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Dr. Marcelo de Andrade Roméro, pelo acolhimento caloroso, pela paciência, por sua constante presença no processo de produção deste trabalho e pelos conselhos e orientações de muito valor.

À Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

Aos professores Dr. Alberto Hernandez Neto e Dr<sup>a</sup>. Alessandra Rodrigues Prata-Shimomura pelos conselhos e orientações colocados na banca de qualificação deste trabalho.

A cada um dos colegas que fiz no Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética (LABAUT) durante o período de mestrado.

**MACHADO, R. D. Processos de otimização de envoltória de edifícios comerciais para a geração de energia renovável.** 2022. Dissertação (Mestrado) em Tecnologia da Arquitetura – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2022

Visto o aumento da demanda energética provocada pelo crescimento urbano e pelas mudanças climáticas, a pesquisa busca entender como a edificação pode se tornar um elemento de geração de energia. Desta forma, este trabalho estuda a implantação de um algoritmo genético para a otimização da envoltória das edificações, a fim de que esta gere mais energia renovável eólica ou fotovoltaica num edifício do setor de serviços, localizado e projetado num vetor urbano de crescimento desta tipologia na cidade de São Paulo. A área escolhida para o estudo foi a região entre a avenida Engenheiro Luís Carlos Berrini e a avenida das Nações Unidas. Utilizou-se um modelo tridimensional da área de estudo para simulações de incidência de radiação solar e fluidodinâmica computacional para analisar a dinâmica da ventilação urbana. Foi criado um edifício de referência, baseado em revisão bibliográfica, para a comparação do consumo elétrico anual e a energia produzida pelos sistemas de geração de energia renovável aplicados à fachada. Verificou-se que, para o local escolhido, existe um baixo potencial para o uso da energia eólica, devido à baixa velocidade que o vento da região apresenta. A região também apresenta um potencial satisfatório de geração de energia solar, pois a envoltória do edifício de referência simulado gera em energia metade do consumo total de iluminação artificial, a geração de energia solar é dependente do entorno em que o edifício foi implantado. O processo de otimização também não se mostrou capaz de gerar mais energia solar, já que a envoltória que passou pelo processo teve a energia obtida inferior ao que a envoltória do edifício de referência produz.

Palavras-chave: Eficiência energética. Energia eólica. Energia fotovoltaica. Modelagem Urbana. Edifícios comerciais. Algoritmo genético

MACHADO, R. D. **Commercial buildings' envelope optimization processes for renewable energy generation.** 2022. Dissertação (Mestrado) em Tecnologia da Arquitetura – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2022

Given the increase in energy demand caused by urban growth and climate change, the research seeks to understand how the building can become an element of energy generation. In this way, this work studies the implementation of a genetic algorithm for the optimization of the building envelope, so that it generates more wind or photovoltaic renewable energy in a service sector building, located and projected in an urban growth vector of this typology in the Sao Paulo City. The area chosen for the study was the region between Avenida Engenheiro Luís Carlos Berrini and Avenida das Nações Unidas. A three-dimensional model of the study area was used to simulate the incidence of solar radiation and computational fluid dynamics to analyze the dynamics of urban ventilation. A reference building was created, based on a bibliographic review, to compare the annual electrical consumption and the energy produced by the renewable energy generation systems applied to the facade. It was found that, for the chosen location, there is a low potential for the use of wind energy, due to the low wind speed of the region. The region also has a satisfactory potential for generating solar energy, since the envelope of the simulated reference building generates half of the total consumption of artificial lighting in energy, the generation of solar energy is dependent on the surroundings in which the building was implanted. The optimization process also did not prove capable of generating more solar energy, since the envelope that passed through the process had less energy obtained than the envelope of the reference building produces.

Keywords: Energy efficiency. Wind energy. Photovoltaics Energy. Urban Modelling Commercial Buildings. Genetic algorithm.

## Lista de figuras

Figura 1 - Consumo final de energia para a climatização de ambientes por país/ região .....	13
Figura 2 - Comparação dos acumulados anuais de inflação (IPCA-15) e preços de energia elétrica no Brasil. ....	15
Figura 3 - Metodologia geral da pesquisa .....	24
Figura 4 - Delimitação da área de estudo. ....	25
Figura 5 - Corte do domínio e da malha tridimensional usada para a simulação em CFD. ....	30
Figura 6 - Curva de densidades de probabilidades de velocidades de vento. ....	31
Figura 7 - Turbina Hoyi 300.....	32
Figura 8 - Curva de potência da turbina Hoyi 300.....	32
Figura 9 - Turbina Proven 15kW .....	32
Figura 10 - Curva de potência da turbina Proven 15.....	32
Figura 11 - Turbina Raum 3,5kW. ....	33
Figura 12 - Curva de potência da turbina Raum 3,5.....	33
Figura 13 - Esquema de instalação do filme fino na envoltória do edifício de referência. ....	38
Figura 14 - Fluxo de potência global (em W/m <sup>2</sup> ). ....	40
Figura 15 - Radiação Global Horizontal Média no Brasil (kWh/m <sup>2</sup> ). ....	42
Figura 16 - Mapa de Incidência Solar Global no estado de São Paulo. ....	43
Figura 17 - Mapa de Incidência Solar Global na região metropolitana de São Paulo ....	44
Figura 18 - Gráfico de variação da radiação solar para cidade de São Paulo .....	45
Figura 19 - Gerações de tecnologias de células fotovoltaicas.....	47
Figura 20 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício cristalino.....	48
Figura 21 - Esquema dos componentes de um módulo fotovoltaico com células de silício cristalino. ....	49
Figura 22 - Fluxograma de decisão para implementação de elementos fotovoltaicos. ..	51
Figura 23 - Fachada do Manchester College of Art and Technology .....	53
Figura 24 - Planta da academia de Mont Cernis. ....	54
Figura 25 - Fachada a academia de Mont Cernis. ....	55
Figura 26 - Edifício sede da Caltrans .....	56
Figura 27 - Conjunto da sede da Telefónica em Madri.....	57
Figura 28 - Cobertura da sede da Telefónica em Madri .....	57
Figura 29 - Velocidade Média anual do vento a 100 metros de altura. ....	61
Figura 30 - Mapa de velocidades de vento a uma altura de 100m.....	63
Figura 31 - Mapa de densidade de potência do Estado de São Paulo.....	64
Figura 32 - Ocorrências da direção de vento na cidade de São Paulo. ....	65
Figura 33 - Frequência de vento de acordo com arquivo climático. ....	66
Figura 34 - Divisão da atmosfera urbana em subcamadas. ....	67
Figura 35 - Perfil logarítmico de vento.....	70



Figura 36 - Efeitos no perfil vertical de vento na velocidade, potência e turbulência causados por um edifício. ....	77
Figura 37 - Curvas de função de distribuição de densidade de Weibull para diferentes valores de k, para um vento de velocidade média 6 m/s.....	79
Figura 38 - Curva de potência típica de uma turbina eólica .....	81
Figura 39 - Exemplo de turbina de eixo horizontal.....	82
Figura 40 - Modelos de turbinas de eixo vertical (VAWT).....	83
Figuras 41 e 42 – Edifício Pearl River Tower (esq.) e sua turbina vertical em formato de hélice (dir.).....	85
Figura 43 - Torre do Bharain World Trade Center.....	86
Figura 44 - Corte e Planta do Bharain WTc .....	86
1. Figura 45 - Imagem do Strata Tower.....	87
Figura 46 - Torre de televisão em Cantão.....	89
Figura 47 - Corte do projeto do edifício City Hall, em Londres.....	90
Figura 48 - Fitness Landscape entre duas variáveis genéricas de projeto.....	92
Figura 49 - Exemplo de uma dominância de Pareto.....	94
Figura 50 - Diagrama de funcionamento do algoritmo NGSA-2.....	97
Figura 51 - Torre Seagram.....	99
Figura 52 - Edifício de referência .....	112
Figura 53 - Perfil de ocupação do edifício de referência .....	115
Figura 54 - Perfil de uso dos equipamentos elétricos do edifício de referência.....	116
Figura 55 - Perfil de uso de iluminação interna do edifício de referência .....	117
Figura 56 - Perfil de uso da iluminação externa do edifício de referência .....	117
Figura 57 - Perfil de uso do sistema de climatização do edifício de referência .....	118
Figura 58 - Sistema de ar-condicionado do edifício de referência- lado da demanda..	119
Figura 59 - Sistema de ar-condicionado do edifício de referência- loop de condensação .....	119
Figura 60 - Modelo tridimensional da área de estudo.....	122
Figura 61 - Análise de SVF da área de estudo.....	123
Figura 62 - Radiação cumulativa incidente no piso da área de estudo durante o ano.	124
Figura 63 - Radiação cumulativa incidente no piso da área de estudo durante o mês de junho.....	125
Figura 64 - Radiação cumulativa incidente no piso da área de estudo durante o mês de dezembro.....	126
Figura 65 - Radiação cumulativa incidente nas envoltórias das edificações da Região 01, durante o ano.....	127
Figura 66 - Radiação cumulativa incidente nas envoltórias das edificações da Região 01, durante o mês de junho.....	128
Figura 67 - Radiação cumulativa incidente nas envoltórias das edificações da Região 01, durante o mês de dezembro.....	129
Figura 68 - Radiação cumulativa incidente nas envoltórias das edificações da Região 02, durante o ano.....	130

Figura 69 - Radiação cumulativa incidente nas envoltórias das edificações da Região 02, durante o mês de junho.....	131
Figura 70 - Radiação cumulativa incidente nas envoltórias das edificações da Região 02 .....	131
Figura 71 - Radiação cumulativa incidente nas envoltórias das edificações da Região 02, durante o ano. ....	132
Figura 72 - Radiação cumulativa incidente nas envoltórias das edificações da Região 0, durante o mês de junho. Fonte: Elaborado pelo autor, 2022 .....	133
Figura 73 - Radiação cumulativa incidente nas envoltórias das edificações da Região 02, durante o mês de dezembro.....	134
Figura 74 - Consumo energético mensal do edifício de referência, cenário sem entorno. ....	136
Figura 75 - Consumo energético para dias frios do edifício de referência, cenário sem entorno. ....	136
Figura 76 - Consumo energético para dias quentes do edifício de referência, cenário sem entorno. ....	137
Figura 77 - Consumo energético mensal do edifício de referência implantado na região 01. ....	138
Figura 78 - Consumo energético para dias frios do edifício de referência, implantado na região 01. ....	139
Figura 79 - Consumo energético para dias quentes do edifício de referência, implantado na Região 01. ....	140
Figura 80 - Consumo energético mensal do edifício de referência implantado na região 02. ....	142
Figura 81 - Consumo energético para dias frios do edifício de referência, implantado na região 02. ....	143
Figura 82 - Consumo energético para dias quentes do edifício de referência, implantado na Região 02. ....	143
Figura 83 - Consumo energético mensal do edifício de referência implantado na região 02. ....	145
Figura 84 - Consumo energético para dias frios do edifício de referência, implantado na região 03. ....	146
Figura 85 - Consumo energético para dias quentes do edifício de referência, implantado na Região 03. ....	146
Figura 86 - Fluxo de vento na área de estudo a 5 metros de altura. ....	148
Figura 87 - Fluxo de vento na área de estudo a 75 metros de altura. ....	149
Figura 88 - Corte da área de estudo, mostrando o fluxo de vento. ....	150
Figura 89 - Fluxo de vento na Região 01 a 5 metros de altura.....	151
Figura 90 - Fluxo de vento na Região 01 a 75 metros de altura.....	151
Figura 91 - Corte da região 01, mostrando o fluxo de vento. ....	152
Figura 92 - Fluxo de vento na Região 02 a 5 metros de altura.....	153
Figura 93 - Fluxo de vento na Região 02 a 75 metros de altura.....	153
Figura 94 - Corte da região 02, mostrando o fluxo de vento. ....	154

Figura 95 - Fluxo de vento na Região 03 a 5 metros de altura.....	155
Figura 96 - Fluxo de vento na Região 02 a 75 metros de altura.....	156
Figura 97 - Corte da região 02, mostrando o fluxo de vento .....	157
Figura 98 - Geração de energia eólica por densidade de probabilidade.....	158
Figura 99 - Geração de energia eólica diária da turbina HoYi 300 segundo simulação no EnergyPlus.....	159
Figura 100 - Geração de energia eólica diária da turbina Raum 3,5 kW segundo simulação no EnergyPlus.....	160
Figura 101 - Geração de energia eólica diária da turbina Proven 15 segundo simulação no EnergyPlus.....	160
Figura 102 - Geração de energia mensal da envoltória do edifício de referência sem entorno.....	162
Figura 103 - Geração de energia diária para os dias de inverno da envoltória do edifício de referência sem entorno.....	163
Figura 104 - Geração de energia diária para os dias de verão da envoltória do edifício de referência sem entorno.....	163
Figura 105 - Geração de energia mensal da envoltória do edifício de referência implantado na Região 01.....	164
Figura 106 - Geração de energia diária para os dias de inverno da envoltória do edifício de referência implantado na Região 01.....	165
Figura 107 - Geração de energia diária para os dias de verão da envoltória do edifício de referência implantado na Região 01.....	165
Figura 108 - Geração de energia mensal da envoltória do edifício de referência implantado na Região 02.....	166
Figura 109 - Geração de energia diária para os dias de inverno da envoltória do edifício de referência implantado na Região 02.....	167
Figura 110 - Geração de energia diária para os dias de verão da envoltória do edifício de referência implantado na Região 02.....	167
Figura 111 - Geração de energia mensal da envoltória do edifício de referência implantado na Região 03.....	168
Figura 112 - Geração de energia diária para os dias de inverno da envoltória do edifício de referência implantado na Região 02.....	169
Figura 113 - Geração de energia diária para os dias de verão da envoltória do edifício de referência implantado na Região 03.....	169
Figura 114 - Algoritmo de otimização da forma.....	171
Figura 115 - Divisão entre grupos de indivíduos da última geração simulada.....	172
Figura 116 - Divisão entre grupos de indivíduos da última geração simulada.....	175
Figura 117 - Divisão entre grupos de indivíduos da última geração simulada.....	178

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	QUESTÃO CENTRAL DA PESQUISA	18
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA	19
1.3	SÚMULA METODOLÓGICA	20
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>23</b>
2.1	ÁREA DE ESTUDO	25
2.1.1	<b>Características do bairro</b>	<b>25</b>
2.2	ANÁLISE DO RECURSO SOLAR	26
2.2.1	<b>Análise do SVF do piso do bairro</b>	<b>26</b>
2.2.2	<b>Cálculo da radiação solar incidente no piso e nos edifícios</b>	<b>27</b>
2.3	ANÁLISE DO RECURSO EÓLICO	29
2.3.1	<b>Simulação numérica para verificação de velocidades de vento</b>	<b>29</b>
2.3.2	<b>Cálculo do potencial geração de energia eólica gerada da área de estudo através de densidade de probabilidade</b>	<b>31</b>
2.3.3	<b>Cálculo da geração de energia eólica gerada pela edificação de referência através do software energy plus</b>	<b>33</b>
2.3.4	<b>Validação dos resultados</b>	<b>34</b>
2.4	DETERMINAÇÃO DO EDIFÍCIO DE REFERÊNCIA, SEU CONSUMO E GERAÇÃO	34
2.4.1	<b>Cálculo da energia fotovoltaica gerada pela edificação de referência</b>	<b>37</b>
2.5	OTIMIZAÇÃO UTILIZANDO PROCESSO META- HEURÍSTICO	38
2.5.1	<b>O plugin Wallacei e o Algoritmo NSGA II</b>	<b>38</b>
2.5.2	<b>Definição do problema e da solução</b>	<b>39</b>
<b>3</b>	<b>ENERGIA FOTOVOLTAICA NA ARQUITETURA</b>	<b>40</b>
3.1	RADIAÇÃO SOLAR	40
3.1.1	<b>Conceitos gerais</b>	<b>40</b>
3.1.2	<b>Radiação solar incidente no Brasil</b>	<b>41</b>
3.1.3	<b>Radiação solar incidente no estado de São Paulo</b>	<b>42</b>
3.1.4	<b>Radiação solar incidente na cidade de São Paulo</b>	<b>43</b>
3.2	FORMA URBANA E RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE	45

3.3	TIPOS DE PLACAS DE ENERGIA FOTOVOLTAICA.....	46
3.3.1	<b>Células mono e poli cristalinas de silício .....</b>	<b>47</b>
3.3.2	<b>Células e módulos fotovoltaicos de filmes finos.....</b>	<b>49</b>
3.3.3	<b>Células orgânicas e corantes .....</b>	<b>50</b>
3.4	APLICAÇÃO DE ELEMENTOS FOTOVOLTAICOS NA ENVOLTÓRIA DE EDIFICAÇÕES.....	50
3.4.1	<b>Fachada ventilada.....</b>	<b>52</b>
3.4.2	<b>Curtain Wall (Fachada cortina).....</b>	<b>53</b>
3.4.3	<b>Brisas soleil.....</b>	<b>55</b>
3.4.4	<b>Integração fotovoltaica em coberturas e claraboias .....</b>	<b>56</b>
3.5	ESTUDOS ACADÊMICOS.....	57
3.6	LEGISLAÇÃO BRASILEIRA A RESPEITO DA GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL E DISTRIBUÍDA .....	58
4	<b>ENERGIA EÓLICA.....</b>	<b>59</b>
4.1	FORMAÇÃO DO VENTO.....	59
4.2	RECURSO EÓLICO.....	60
4.2.1	<b>Recurso Eólico no Brasil .....</b>	<b>60</b>
4.2.2	<b>Recurso Eólico no Estado de São Paulo .....</b>	<b>61</b>
4.2.3	<b>Recurso Eólico na cidade de São Paulo.....</b>	<b>64</b>
4.3	VENTO NA ESCALA URBANA.....	66
4.3.1	<b>Caracterização física do escoamento do vento em relação a obstáculos.....</b>	<b>68</b>
4.3.2	<b>Fluxo Laminar e turbulento, número de Reynolds .....</b>	<b>70</b>
4.3.3	<b>Turbulência e seus efeitos.....</b>	<b>71</b>
4.3.4	<b>Aerodinâmica urbana e das edificações. ....</b>	<b>73</b>
4.4	CARACTERIZAÇÃO DO VENTO PARA AVALIAÇÃO DO RECURSO EÓLICO 76	
4.4.1	<b>Medição de vento.....</b>	<b>78</b>
4.5	TURBINAS EÓLICAS.....	80
4.5.1	<b>Eficiência do rotor .....</b>	<b>80</b>
4.5.2	<b>Curva de potência.....</b>	<b>80</b>
4.5.3	<b>Turbinas eólicas de eixo horizontal (HAWT).....</b>	<b>81</b>
4.5.4	<b>Modelos de Eixo Vertical .....</b>	<b>83</b>
4.6	ARQUITETURA E TURBINAS EÓLICAS.....	85

4.6.1	Pear River Tower .....	85
4.6.2	Bahrain WTC twin towers .....	86
4.6.3	Strata e1 Tower .....	86
<b>5</b>	<b>ARQUITETURA GENERATIVA .....</b>	<b>88</b>
5.1	PROJETO BASEADO EM DESEMPENHO. ....	90
5.2	OTIMIZAÇÃO .....	91
5.2.1	Elementos de um processo de otimização .....	93
5.3	ALGORITMOS GENÉTICOS .....	95
<b>6</b>	<b>UM BREVE HISTÓRICO DA EVOLUÇÃO DA TIPOLOGIA DE EDIFÍCIOS COMERCIAIS. ....</b>	<b>98</b>
6.1	A CIDADE DE SÃO PAULO.....	100
6.1.1	Classificação histórica dos edifícios de São Paulo.....	101
6.1.2	Avenida Eng Luiz Carlos Berrini .....	103
6.1.3	Edifícios comerciais contemporâneos .....	105
<b>7</b>	<b>EDIFÍCIO DE REFERÊNCIA.....</b>	<b>108</b>
7.1	BASES DE DADOS PARA CARACTERIZAÇÃO GERAL DO EDIFÍCIO DE REFERÊNCIA.....	108
7.2	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E FÍSICAS DA ENVOLTÓRIA .....	112
7.3	PADRÕES DE USO DA EDIFICAÇÃO .....	115
7.4	SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR.....	118
7.5	INTENSIDADE DE USO ENERGÉTICO EUI.....	121
7.6	VALIDAÇÃO DO EDIFÍCIO DE REFERÊNCIA .....	35
<b>8</b>	<b>SIMULAÇÕES E VARIAÇÕES PARAMÉTRICAS .....</b>	<b>122</b>
8.1	DETERMINAÇÃO DA GEOMETRIA .....	122
8.2	ANÁLISE DA RADIAÇÃO SOLAR .....	122
8.2.1	Análise por regiões .....	126
8.3	EDIFÍCIO DE REFERÊNCIA.....	134
8.3.1	Consumo anual.....	135
8.4	ANÁLISE DA DINÂMICA DO RECURSO EÓLICO DA REGIÃO DE ESTUDO 147	
8.4.1	Geral .....	147
8.4.2	Análise por regiões .....	150
8.4.3	Geração de energia eólica .....	157

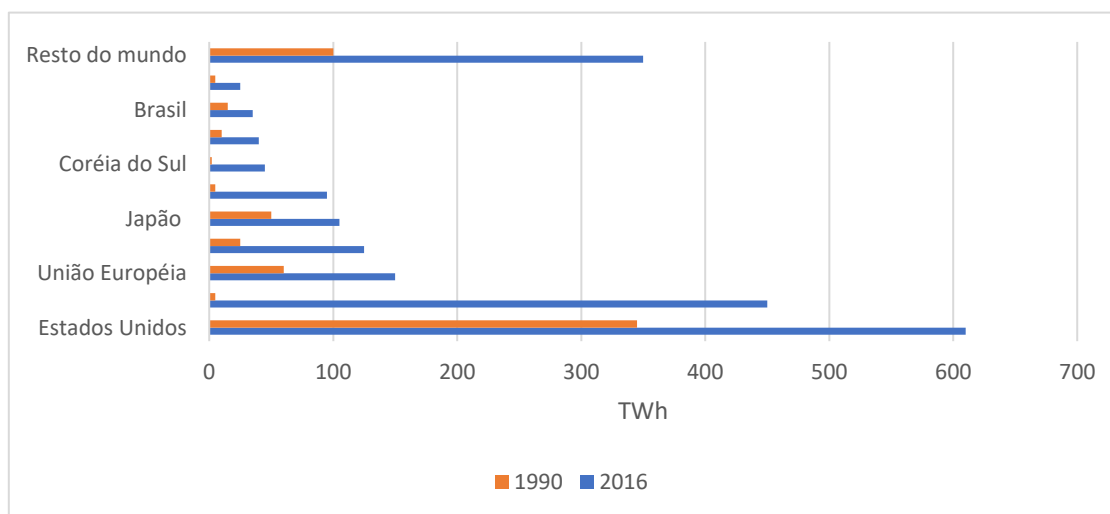
8.5	GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA.....	161
8.5.1	<b>Sem entorno.....</b>	<b>161</b>
8.5.2	<b>Região 01.....</b>	<b>163</b>
8.5.3	<b>Região 02.....</b>	<b>165</b>
8.5.4	<b>Região 03.....</b>	<b>167</b>
8.6	ENVOLTÓRIA OTIMIZADA.....	170
8.6.1	<b>Algoritmo de otimização .....</b>	<b>170</b>
8.6.2	<b>Região 01.....</b>	<b>172</b>
8.6.3	<b>Região 02.....</b>	<b>175</b>
8.6.4	<b>Região 03.....</b>	<b>177</b>
<b>9</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>181</b>
9.1	LIMITAÇÕES DA PESQUISA .....	183
9.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	184
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>185</b>

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com o programa Observatório Urbano da ONU, existem 4,2 bilhões de pessoas vivendo em áreas urbanas, o que equivale a quase 54% da população mundial. A taxa de crescimento populacional é estimada em 1 milhão de novos habitantes urbanos a cada 10 dias. (UNITED NATIONS, 2021) Dessa forma, prevê-se que em 2030 as áreas urbanas devam abrigar cerca de 60% da população mundial (UNITED NATIONS, DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS, POPULATIONS DIVISION, 2018). Conseqüentemente, a demanda energética para as cidades também cresce.

De acordo com a International Energy Agency – IEA (2020), o consumo energético mundial em edificações subiu de 118 EJ, em 2010, para 128 EJ, em 2019. A agência indica que os principais motivos desse aumento, que tange ao consumo elétrico é o aumento do uso de sistemas de climatização. Em razão da grande importância desse uso final para as edificações urbanas, a IEA publicou o relatório *The Future of Cooling* de onde o gráfico da figura 01 é originário. A figura demonstra o crescimento do consumo final energético para resfriamento em alguns países do mundo, com um destaque para o China e o Oriente Médio (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018).

Figura 1 - Consumo final de energia para a climatização de ambientes por país/ região



Fonte: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018



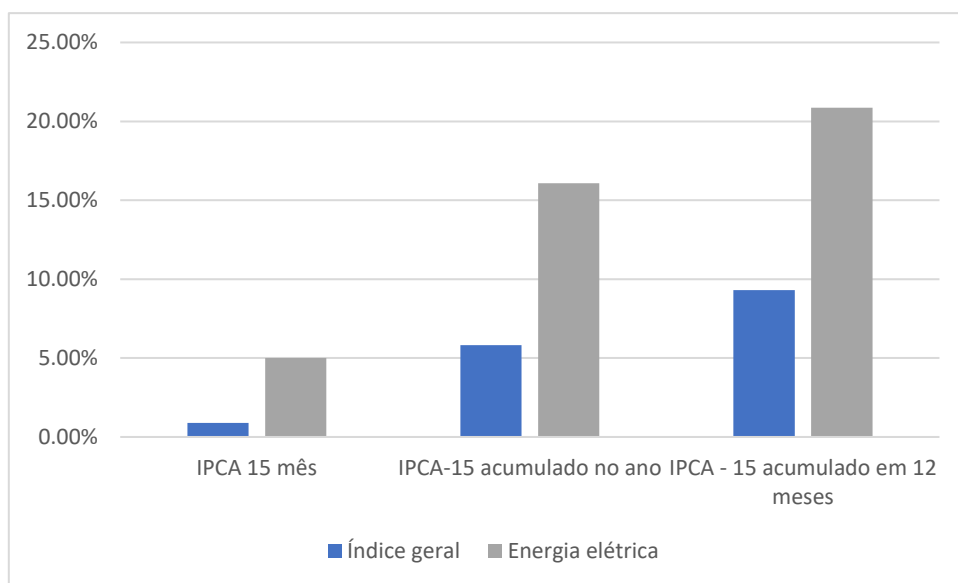
O relatório explica que existem duas principais causas para esse efeito. Uma delas é o que há um aumento da população urbana em países que possuem clima mais quente e, paralelamente a isso, há um aumento da necessidade de climatização de edificações, provocado pelas mudanças climáticas que estão em curso.

Um exemplo do impacto que a mudança climática pode provocar na demanda energética das edificações é o estudo feito por Invidiata e Ghisi (2016) em que se avaliou, num cenário de mudança climática o impacto nas demandas de aquecimento e resfriamento em uma residência padrão do programa Minha Casa Minha Vida. O impacto na demanda energética da edificação causado pelo aumento das temperaturas é da ordem de até 185% para o cenário climático previsto em 2080. (INVIDIATA; GHISI, 2016)

Ao mesmo tempo, o impacto ambiental causado pelo crescimento desordenado das cidades pode acabar impactando nos níveis de precipitação de uma região, o que pode prejudicar a geração de eletricidade num país que é bastante dependente da geração hidrelétrica. Os estudos de Otto et al. (2015) e Coelho (2015) indicam que o período de estiagem que o estado de São Paulo passou durante os anos de 2014 e 2015 foram causados pelo aumento do consumo hídrico causado pelo crescimento urbano desorganizado na região. (COELHO et al., 2015; OTTO et al., 2015).

Por ter uma base de geração de eletricidade basicamente hídrica, a capacidade de geração de energia no sistema elétrico fica bastante dependente do nível d'água dos reservatórios das usinas hidrelétricas. Dessa forma, um período de seca mais rígido pode comprometer a capacidade de fornecimento de energia originário das hidrelétricas. Fato esse que aconteceu em setembro de 2021 e pressionou os preços de fornecimento de energia para o consumidor (conforme o gráfico da figura 02), já que o governo foi obrigado a acrescentar mais uma bandeira tarifária, e assim aumentar seu preço, para diminuir o consumo de energia (SOUZA, 2021).

Figura 2 - Comparação dos acumulados anuais de inflação (IPCA-15) e preços de energia elétrica no Brasil.



Fonte: SILVEIRA, ALVAGRENGA, GERBELI, 2021.

Certamente, uma das estratégias para mitigar esses riscos é promover projetos urbanos e de edificações que sejam pensados com estratégias de eficiência energética. Ou seja, projetos de edificações e urbanos que demandam menos energia através da substituição de equipamentos mais antigos pelos que consomem menos eletricidade ou que usem estratégias passivas (ou seja, que não demandam energia para funcionarem, bastando-se apenas dos recursos naturais existentes no ambiente em que se encontra). Certificações ambientais e programas governamentais que estimulam projetos com uma maior eficiência energética já estão consolidados como práticas de mercado, e trazendo uma diminuição das emissões de gases de efeito estufa. (ROMÉRO; BRUNA, 2010)

A partir dessa problemática, a discussão sobre a resiliência urbana tem ganhado bastante relevância nas pesquisas acadêmicas focadas em sustentabilidade e planejamento urbano. O termo é retirado do campo da Física e da Psicologia e é definido como “a capacidade de um objeto em retornar para sua posição original depois de ter levado um golpe e a capacidade de sobreviver satisfatoriamente após um choque ou trauma”. Nesse sentido, pode-se extrapolar a definição de resiliência para um sistema de geração ou distribuição de energia urbano. Alguns estudos elencam, entre outras características, que um sistema energético urbano resiliente deve possuir robustez,

independência, ser redundante e diverso.(MEEROW; NEWELL; STULTS, 2016; SHARIFI; YAMAGATA, 2015, 2016)

A redundância energética é definida como a disponibilidade de componentes com funções similares no sistema urbano para aumentar a capacidade de absorção de choque e adaptabilidade, e garantir que eventos inconstantes causem a falha ou a substituição de um componente não resultaria na falha de todo o sistema.(SHARIFI; YAMAGATA, 2016).

Um exemplo de medida de resiliência urbana adotadas para o sistema energético de uma cidade que visam a redundância é o programa Virtual Power Plant (DEVLIN,2017), implantado pela cidade de Wellington (Nova Zelândia) e pela companhia de energia que atende a cidade. Neste programa, a prefeitura da cidade pagou a compra e a instalação de um módulo de geração de energia solar em 25 residências desde que o proprietário se comprometesse a disponibilizar a energia gerada pelas placas com os vizinhos para o caso de algum choque que interrompesse o fornecimento de energia que ocorresse na região como terremotos, que são frequentes (WELLINGTON CITY COUNCIL, 2017).

Dessa forma, para aumentar a resiliência de um sistema elétrico urbano e diminuir a possibilidade de cortes de energia numa região devido a um choque, as edificações, além de diminuir seu consumo energético pode também servir como pontos geradores de energia, através da implantação de tecnologias proativas (ROMÉRO, REIS, 2012). Esses elementos podem ser geradores movidos a combustíveis fósseis ou a fontes renováveis, como painéis solares fotovoltaicos ou geradores eólicos.

Painéis de geração fotovoltaica são dispositivos eletrônicos que essencialmente convertem a energia solar, proveniente da radiação solar incidente, em energia elétrica. Um dos principais aspectos desse modo de geração é a sua capacidade de converter a radiação solar sem a utilização de partes móveis como turbinas e geradores e sem produção de poluentes durante o processo de geração de energia (como uma usina termoelétrica ou um gerador a diesel). Este sistema pode ser implantado tanto no sítio da edificação quanto na edificação em si, além de requerer um custo de operação e

manutenção menor. Originalmente as usinas fotovoltaicas eram compostas de placas rígidas montadas, formato que é mais propício para cobertura em águas e lajes planas. Existem também módulos flexíveis que podem ser colocados na envoltória da arquitetura, substituindo uma cobertura (sem a necessidade desta cobertura ser plana), revestimento, janelas e elementos de sombreamento. Esse tipo de módulo fotovoltaico recebe o nome de BIPV, do inglês, Building Integrated Photovoltaics (WALKER; HOFER; SCHLUETER, 2019).

Uma outra forma de usina de geração de energia renovável é a instalação de turbinas eólicas na cobertura das edificações. Este sistema tem um dimensionamento mais complexo, por ter de determinar o comportamento dos ventos na região do entorno. Além disso, as turbinas de eixo vertical (mais comuns) podem trazer efeitos de vibração na estrutura. O entorno da edificação tem grande influência na eficiência das pás, já que a malha urbana gera turbulências no vento, redução de sua velocidade e efeitos de escoamento (CARPENTIERI; ROBINS, 2015).

Existem projetos que conseguem aliar a diminuição de sua demanda energética com a geração de energia in loco. São chamados de edifícios de energia zero, que são definidos como “um edifício comercial ou residencial com uma grande redução de suas necessidades energéticas através de ganhos de eficiência tanto que o balanço de sua necessidade energética pode ser suprido com tecnologias renováveis.”(TORCELLINI et al., 2006).

Assim, com a apresentação desse contexto, se conclui que existe o potencial de que os próprios edifícios que compõem um tecido urbano possam gerar energia limpa e que esse investimento é interessante no sentido da resiliência urbana e seguridade do sistema de geração e distribuição de eletricidade. Portanto, a dissertação se propõe em verificar o potencial de geração de energia renovável dentro do tecido urbano, incorporando os dispositivos de geração de energia renovável na envoltória de uma edificação. O objetivo é verificar se um edifício típico comercial de uma região da cidade de São Paulo pode gerar energia renovável através da instalação destes dispositivos na sua envoltória produzindo energia suficiente para suprir as suas necessidades energéticas.

O uso do computador causa grande impacto nos processos de projeto de edificações e na avaliação do desempenho dos edifícios projetados. Os projetos deixaram de ser feitos com linhas e curvas e começam a ser definidos por parâmetros geométricos e para que cumpram certas demandas ambientais, de consumo de energia e de conforto ao usuário. Essas ferramentas conseguem integrar ao projeto teorias matemáticas e de engenharia mais avançadas, como a otimização.

De acordo com Brasil e Silva (2019), otimização é “o processo de se determinar entre várias opções de um objeto aquela que é a melhor possível dentro de certos critérios de escolha e limitações, com os recursos disponíveis”. A otimização pode ser feita se utilizando da experiência de um projetista, que escolhe as melhores opções porque ele tem um conhecimento aprofundado sobre elas, ou algebricamente, através de algoritmos, determinando um conjunto de soluções, restrições e uma meta de onde se quer chegar. Um exemplo de algoritmo para otimização são os algoritmos genéticos.

Algoritmos genéticos se valem da teoria neodarwiniana da evolução, na qual há a uma população de soluções e que individualmente são avaliadas de acordo com um critério que se pretende otimizar. As soluções que mais se adequam ao critério são selecionadas e cruzadas entre si, surgindo uma nova população de soluções que será avaliada novamente, esse processo segue até o limite do número estipulado de gerações ou se chega a uma região-limite de otimização, definido como Fronteira de Pareto (GASPAR-CUNHA; TAKAHASHI; ANTUNES, 2013).

## 1.1 QUESTÃO CENTRAL DA PESQUISA

Sob todo esse contexto, a pesquisa tenta responder a seguinte questão principal: entender como a forma da edificação pode contribuir para uma maior geração de energia renovável para um edifício de serviços na cidade de São Paulo. Desta questão principal se origina as seguintes questões secundárias:

- a) Quanto de energia renovável a envoltória de um edifício projetado com o modelo adotado no atual vetor de expansão de edifícios pode gerar?

- b) Quanto que essa geração de energia compensa do consumo típico que a tipologia de edifícios de escritórios possui?
- c) Quanto de energia renovável a mais pode ser obtida por uma envoltória gerada por processos de otimização, via algoritmo genético, no contexto urbano da cidade de São Paulo?

Assim, para responder as questões propostas, a pesquisa que compõe essa dissertação utilizará a simulação computacional (GROAT, 2013) para comparar a geração de energia renovável através da envoltória de um edifício comercial típico de uma região da cidade de São Paulo e suas necessidades energéticas, e verificar quais parâmetros geométricos dessa envoltória contribuem para uma maior geração de energia renovável.

## 1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo da pesquisa de mestrado é criar um algoritmo num software de modelagem paramétrica e programação visual, para o auxílio de uma envoltória que possa gerar energia renovável via implantação de placas, filmes fotovoltaicos ou geradores de energia eólica num edifício de escritório no setor de serviços, na cidade de São Paulo.

Além desse objetivo geral, existem os seguintes objetivos específicos:

- a) Análise e atualização de um padrão de consumo desagregado por usos finais de um edifício típico de escritórios na cidade de São Paulo;
- b) Construção de um modelo de referência para simulação termo energética baseado nas edificações do vetor de expansão de edifícios de escritórios em São Paulo, com descrição de elementos geométricos (dimensões, window wall ratio et.), materiais, e de consumos desagregados em iluminação artificial, equipamentos elétricos, climatização;
- c) Análise crítica do edifício de referência obtido sobre a ótica do potencial de geração de energia renovável;

- d) Análise crítica das formas de envoltória geradas pelo processo de algoritmo de otimização sobre a ótica do potencial de geração de energia renovável, e comparação com os resultados obtidos de referência.

### 1.3 SÚMULA METODOLÓGICA

Para cumprir com os objetivos e obter as respostas para as questões enunciadas, a pesquisa foi feita em quatro etapas. A pesquisa foi dividida em quatro partes que serão explicadas a seguir:

Na primeira parte, levantamento de dados secundários, foi feita uma revisão bibliográfica sobre o atual estágio de desenvolvimento das tecnologias de geração de energia renovável do tipo fotovoltaica e eólica que podem ser instaladas na envoltória da edificação. Foram também levantados dados a respeito dos temas de projetos paramétricos e de um modelo de algoritmo de otimização que pode ser aplicado nos projetos arquitetônicos, o algoritmo genético.

Para a segunda parte, identificação do vetor de crescimento de edificações de escritório do setor de serviços da cidade de São Paulo e análise de seu potencial de geração de energia renovável, foi escolhido um vetor de crescimento da tipologia escolhida para fazer uma análise do potencial de geração de energia eólica e energia solar.

Em seguida, para a terceira parte, a pesquisa cria um edifício de referência, baseado em revisão bibliográfica, para estabelecer um consumo médio em kWh/m<sup>2</sup> para essa tipologia, além de um consumo desagregado por usos finais para sistema de climatização, equipamentos internos e iluminação.

A quarta parte é referente aos simulações para determinação do potencial de geração de energia renovável de um edifício de referência e a posterior aplicação do processo de otimização na forma de sua envoltória, levantado na parte de revisão bibliográfica. São feitas comparações entre a geração de energia entre o edifício otimizado e o edifício de referência e seu consumo, ambos implantados na área de estudo.

## 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.

A dissertação terá a seguinte divisão de capítulos:

- Capítulo 02 – Metodologia da Pesquisa

O capítulo de metodologia é dedicado a mostrar como a pesquisa responde às questões centrais e complementares e como ela alcança seus objetivos. Explica, com maior detalhamento, quais são os procedimentos tomados para os experimentos e simulações e define o edifício de referência usado nas simulações.

- Capítulo 03 – Energia Fotovoltaica e arquitetura

Este capítulo abordará conceitos básicos do funcionamento dos geradores de energia fotovoltaica, explorando as definições de radiação solar, dimensionamento dos dispositivos de geração e o impacto que o entorno urbano traz na distribuição de radiação solar numa superfície e, portanto, numa possível geração de energia.

Serão também discutidos aspectos legais da instalação de geradores distribuídos em cidades, e apontados os métodos de aplicação desses dispositivos de geração em envoltórias de edificações.

- Capítulo 04 – Energia eólica e arquitetura

O capítulo sobre energia eólica abordará temas como a geração da ventos e como a malha urbana influencia no seu fluxo e em sua velocidade. Discutirá questões de aerodinâmica das edificações e como o vento flui pelos corpos não aerodinâmicos. Mais adiante se falará dos tipos de geradores eólicos que existem e sua aplicação na arquitetura.

- Capítulo 05- Projeto paramétrico e algoritmo de otimização

O capítulo 05 será dedicado à explicação do que são o projeto paramétrico e o algoritmo de otimização genético. Será mostrado desde a origem da parametrização em outras indústrias que também tem como base o ato de projetar, como a indústria



automobilística e a naval, e o surgimento dos processos de otimização com o algoritmo genético, desenvolvido por John Holland na década de 1970.

- Capítulo 06 – Aspectos da verticalização e dos edifícios comerciais em São Paulo

Este capítulo abordará, de forma sucinta, um histórico do desenvolvimento da tipologia de edifícios verticais comerciais, passando pelas ideias internacionalizantes de Mies Van der Rohe até os edifícios com certificação ambiental que adotaram sistemas prediais sofisticados para atender os requisitos da certificação.

Nesta parte também se explicará, resumidamente, o processo de desenvolvimento dos vetores de construção de edifícios comerciais na cidade de São Paulo, no centro da cidade até seus vetores atuais, na zona sul, seguindo a marginal Pinheiros.

- Capítulo 07 – Edifício de referência

O capítulo abordará, com um maior detalhamento, as características do edifício de referência produzido para este trabalho. O texto trará informações a respeito das bases de dados utilizadas para sua idealização, características físicas de sua envoltória, características de seus sistemas e programações de uso.

- Capítulo 08 – Variações Paramétricas

O sétimo capítulo abordará os resultados e a posterior análise e comparações entre os edifícios otimizados e o edifício de referência.

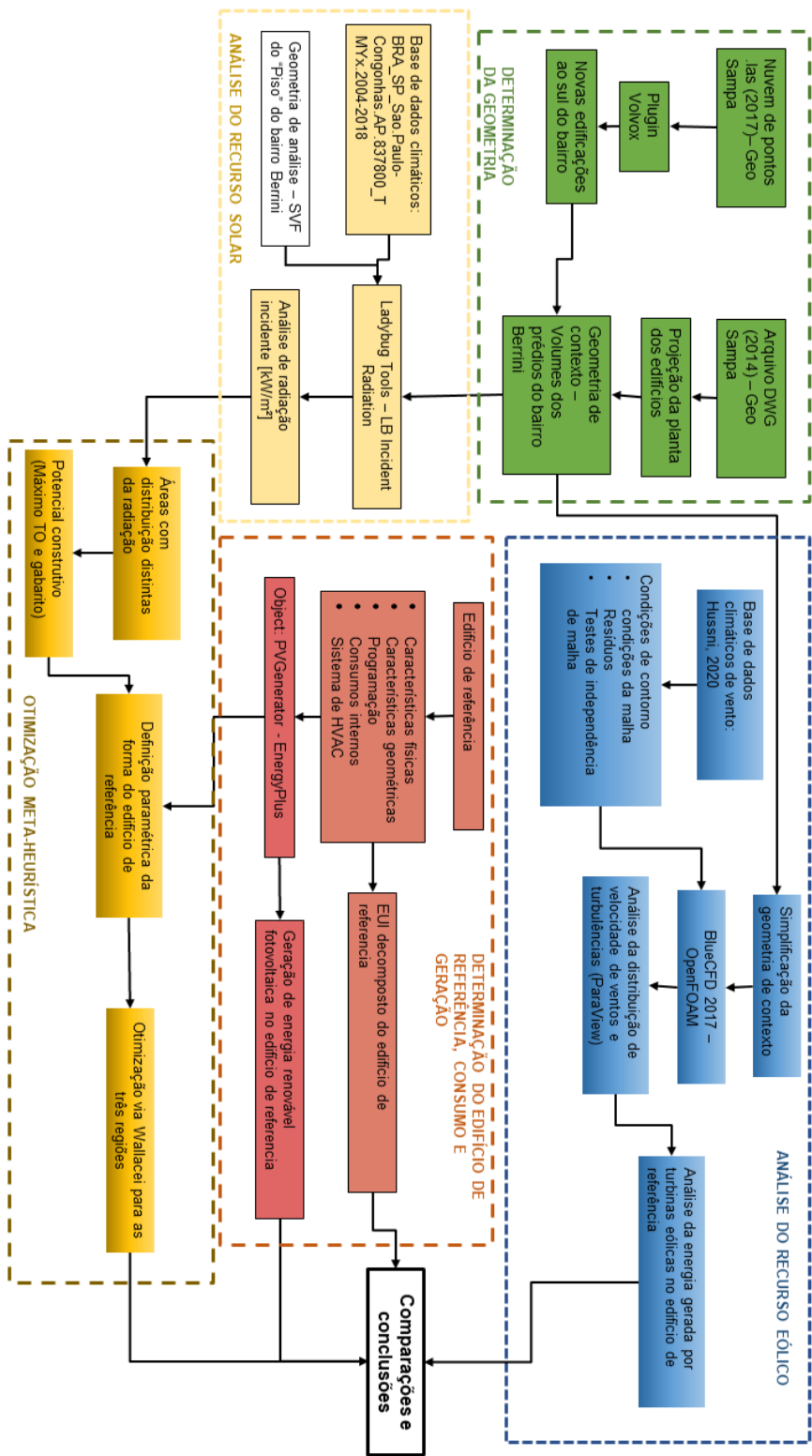
- Capítulo 09 – Conclusão

Este capítulo trará as conclusões as quais a pesquisa chegou, verificando se conseguiu responder as questões centrais e os objetivos. Também fará uma breve colocação a respeito das limitações que a pesquisa tem e de projetos futuros em que se pode encaminhar a pesquisa.

## **2 METODOLOGIA**

Como explicado na introdução, a pesquisa tem como questão central entender como a envoltória pode gerar energia renovável solar ou eólica para um edifício comercial de serviços localizado na cidade de São Paulo. Para responder esta questão, o trabalho utiliza de uma metodologia de natureza experimental usando modelos de simulação. A figura 03 mostra o fluxograma geral da pesquisa

Figura 3 - Metodologia geral da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2022)

## 2.1 ÁREA DE ESTUDO

### 2.1.1 Características do bairro

A área de análise da pesquisa é determinada pela Rua Oswaldo Casimiro Müller, Avenida Eng. Luís Carlos Berrini, Avenida Jornalista Roberto Marinho e Avenida Nações Unidas, como mostrado na figura 04. É uma área representativa do vetor de crescimento das edificações verticais de tipologia de serviços, que começou a ser desenvolver nos anos 2000.

Figura 4 - Delimitação da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Sobre as capacidades construtivas da área de análise, ela é localizada numa zona comercial (ZC), de acordo com Lei de uso e ocupação do Solo (LUOS), seu coeficiente de aproveitamento é 2,00 e a taxa de ocupação é 0,7 (SÃO PAULO, 2007).

#### 1.1.1. Determinação da Geometria

A modelagem tridimensional da região foi desenvolvida a partir de duas bases de dados distintas, ambos originários do sistema de georreferenciamento público da cidade de São Paulo (GeoSampa). Foi usado um arquivo em .dwg, produzido em 2014, com a definição da projeção de alguns edifícios que foram construídos até o momento de seu desenvolvimento. As alturas das edificações foram obtidas através do programa Google Earth. Entretanto, foi notado que esse arquivo de .dwg não possuía novas edificações que foram construídas ao sul da área de estudo, próxima a Avenida Jornalista Roberto Marinho. Dessa maneira, usou-se também uma base de dados da região ,através de levantamento utilizando tecnologia de detecção remota, Lidar (Light Detection and Ranging), que foram produzidas em 2017.

O arquivo em Lidar não é um desenho vetorial, mas sim uma nuvem de pontos. Dessa forma, para incorporar esse banco de dados no Rhinoceros, modelador tridimensional, essa nuvem de pontos precisa passar pelo plugin Volvox, que transforma o arquivo .laz em uma nuvem de pontos apropriado para o uso do Rhinoceros. Com essa nuvem de pontos criada, é possível levantar dados de altura e planta das edificações construídas em 2017.

## 2.2 ANÁLISE DO RECURSO SOLAR

### 2.2.1 Análise do SVF do piso do bairro

A partir do modelo tridimensional, foi possível fazer algumas análises de como o sol incide sobre os prédios da área de estudo. Conforme discutido no capítulo 02, segundo Chatzopoulka et al (2018), o SVF (*Sky View Factor*) é um indicador de forma urbana importante para o cálculo do acesso do recurso solar para a produção de energia, já que ele é definido pela obstrução de edifícios do entorno que barram a incidência da radiação solar nas superfícies. Portanto, será analisado o SVF do piso do Bairro Berrini, a fim de auxiliar na determinação do potencial de geração de energia solar do bairro.

Para alcançar esse fim, foi feito um algoritmo dentro do plugin *Honeybee* que usa o componente *Skyview*. Este componente calcula a abertura de céu como uma porcentagem do domo celeste visto pela superfície, não importando um céu nublado ou

um céu uniforme. Ressalta-se que esse cálculo não considerou a presença de superfícies transparentes na envoltória dos edifícios, nem as características de emissividade e absorvância dessas mesmas envoltórias.

O piso do bairro, aqui definido como a superfície inferior do pavimento térreo dos edifícios do bairro, é dividido em uma grelha de pontos 5,00m por 5,00m, e o SFV calculado.

### **2.2.2 Cálculo da radiação solar incidente no piso e nos edifícios**

Depois da avaliação do Sky View Factor na área de estudo foi feita uma simulação da radiação incidente no piso da região, a simulação feita contemplou tanto a simulação anual quanto mensal.

A base de dados climáticos utilizada é BRA\_SP\_Sao.Paulo-Congonhas.AP.837800\_TMYx.2004-2018, obtida do sítio de internet: [https://climate.onebuilding.org/WMO\\_Region\\_3\\_South\\_America/BRA\\_Brazil/index.html#IDSP\\_Sao\\_Paulo-](https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html#IDSP_Sao_Paulo-). As simulações foram feitas no software Ladybug, plugin do Rhinoceros, usando o componente *Ladybug\_radiation Analysis*. Os resultados e análises serão mostrados no capítulo subsequente.

A partir dos resultados obtidos, pode-se então dividir a região em 3 malhas com SFV de piso diferente e radiação anual incidente no piso diferente, estas regiões são descritas na tabela 01

Tabela 1 - Divisão da área de estudo em regiões menores. Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Nome da Região	Ruas Limites	Imagem
Região 01	Rua Osvaldo Muller, Avenida engenheiro Luís Carlos Berrini, Rua Guararapes e Avenida das Nações Unidas	
Região 02	Rua José Carlos Borges, Avenida Engenheiros Luís Carlos Berrini, Rua Flórida e Avenida das Nações Unidas	
Região 03	Rua Hans Oersted, Avenida Engenheiro Luís Carlos Berrini, Avenida Jornalista Roberto Marinho e Avenida das Nações Unidas	

## 2.3 ANÁLISE DO RECURSO EÓLICO

A análise do recurso eólico faz o uso de uma simulação numérica como elemento principal para entender qualitativamente o fluxo de ventos na região de estudo, entretanto a metodologia utiliza outros métodos mais simples como uma análise de probabilidade e simulação de geração de energia eólica através do software EnergyPlus para aferir a quantidade de energia gerada pelas turbinas eólicas. A figura 15 mostra o fluxograma da metodologia para análise do recurso eólico.

### 2.3.1 Simulação numérica para verificação de velocidades de vento

Para a simulação numérica de dinâmica de fluídos computacional (CFD) foi usado o software BlueCFD 2017, software que gera um terminal no sistema Windows para operar o programa de simulação OpenFoam, em sua versão 5.x. As geometrias foram feitas a partir do software Rhinoceros utilizando o modelo confeccionado conforme a seção 2.1 deste capítulo. As geometrias dos edifícios foram simplificadas a fim de diminuir o tempo de simulação e diminuir a possibilidade de divergência.

Parte da base de dados utilizada foi a velocidade média da cidade de São Paulo calculada por Hussni (2020). Além disso outros dados para o cálculo da Atmospheric Boundary Layer (ABL) e do perfil logarítmico de vento vieram do artigo de Hargreaves e Wright (2006). Os dados são explicitados na tabela 02.

Tabela 2 - Dados para a criação do perfil logarítmico de vento. Fonte: Elaborado pelo autor,2022.

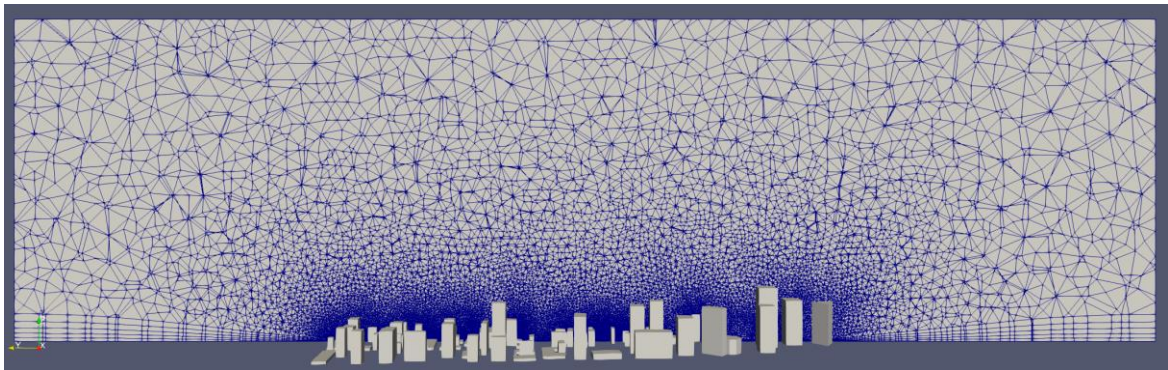
Símbolo	significado	Valor	Fonte
Kappa	Constante de von Kárman	0,4	Hargreaves, Wright, 2006
Cmu	Constante originada de modelo empírico	0,09	Hargreaves, Wright, 2006
Uref	Velocidade média de referência	3,92	Hussni, 2020
Zref	Altura de referência	85	Hargreaves, Wright, 2006
Z0	Rugosidade da Superfície	3	Fadigas, 2011



O domínio do modelo foi feito usando os aplicativos *blockMesh* e o *SnappyHexMesh*, internos ao Open Foam, que criam uma malha prismática para o modelo. O domínio, que possui formato prismático, do modelo possui dimensões proporcionais ao ponto mais alto das edificações modeladas. De acordo com recomendações encontradas na literatura, o domínio do modelo simulado possui 6 vezes a altura do edifício mais alto nas laterais, superfície de inlet, do vento, altura e possui 15 vezes a altura do edifício mais alto de distância para a superfície de outlet. Foram feitos testes de independência de malha com os modelos usados para a simulação em CFD. O domínio possui 8.188,461 células sendo 1.620.490 prismas e 6.567.971 tetraedros. A figura 05 mostra um corte da do domínio e de sua malha.

Definidas as sub-regiões de estudo, elas também foram modeladas e passaram pelos mesmos procedimentos explicados anteriormente, com as suas simulações atendendo os requisitos do COST 732. Porém as sub-regiões foram simuladas com o edifício de referência.

Figura 5 - Corte do domínio e da malha tridimensional usada para a simulação em CFD.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

### 2.3.2 Cálculo do potencial geração de energia eólica gerada da área de estudo através de densidade de probabilidade.

Para auxiliar a análise da quantidade de energia gerada pela ação do vento que ocorre na área de estudo, a pesquisa vai utilizar de um cálculo simplificado do potencial de energia eólica através do uso da densidade de probabilidade de Weibull.

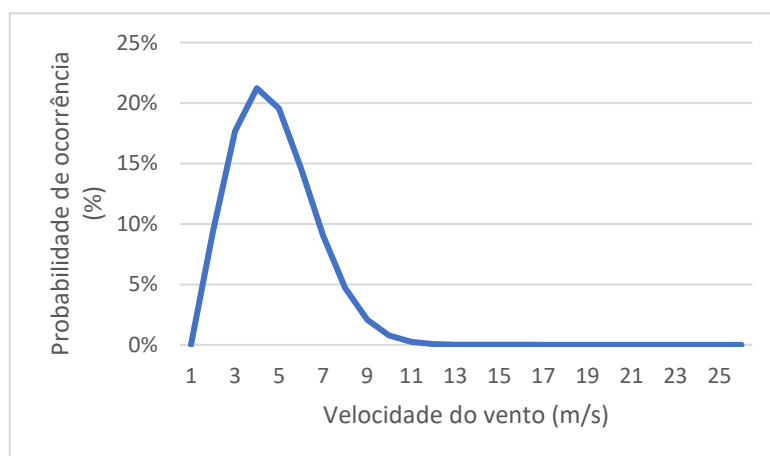
A curva das densidades de probabilidade é definida através de dois parâmetros, o fator  $c$ , de escala e o fator  $k$  de forma. A base de dados de vento utilizada é a mesma usada para o cálculo da radiação (FADIGAS, 2011). A curva então é definida pelos parâmetros mostrados na tabela 03.

Tabela 3- Parâmetros para o cálculo da curva de probabilidades.

Parâmetro	Valor
Fator de escala ( $c$ )	4,218
Fator de forma ( $k$ )	2,13
Desvio padrão da velocidade da base climática. ( $\sigma$ )	1,85577

A altura em que é definida a análise é a cobertura do edifício de referência  $z=75,00\text{m}$ . A curva de Weibull, obtida do cálculo, é mostrada na figura 06.

Figura 6 - Curva de densidades de probabilidades de velocidades de vento.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2002.

A partir da curva de Weibull, para se determinar a quantidade de energia gerada é necessário cruzar com a curva de potência e resolver a integral da área de

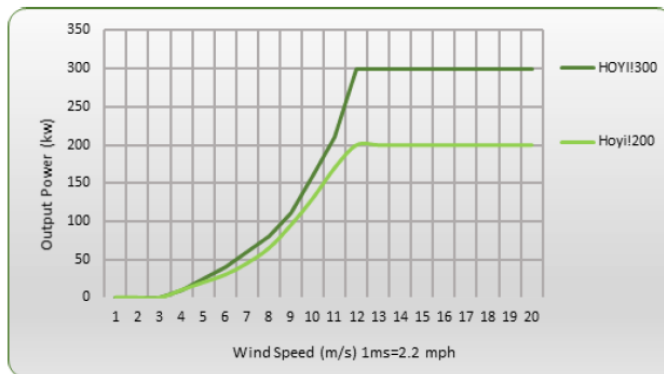
cruzamento das duas curvas. São mostradas nas figuras 08, 10 e 12 as curvas dos modelos de turbinas que foram obtidos para o experimento, uma vertical de 300W de potência, uma HAWT de 3,5 kW e uma de 15 kW também de eixo horizontal.

Figura 7 - Turbina Hoyi 300



Fonte: V-AIR WIND TECHNOLOGIES, 2020

Figura 8 - Curva de potência da turbina Hoyi 300.



Fonte: V-AIR WIND TECHNOLOGIES, 2020

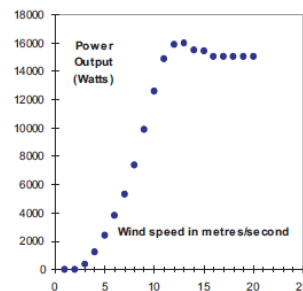
Figura

Figura 9 - Turbina Proven 15kW



Fonte: PROVEN ENERGY, 2020.

Figura 10 - Curva de potência da turbina Proven 15.



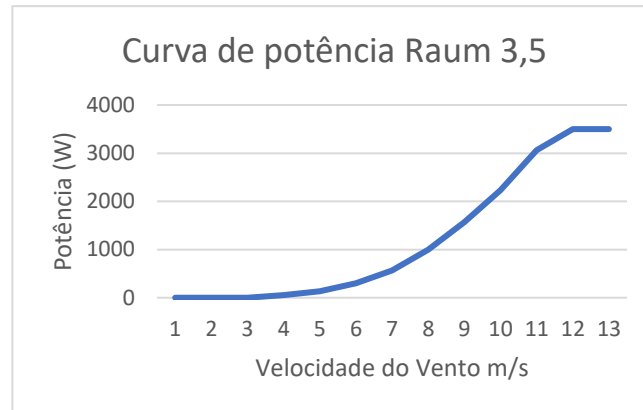
Fonte: PROVEN ENERGY, 2020.

Figura 11 - Turbina Raum 3,5kW.



Fonte: RAUM ENERGY, 2020

Figura 12 - Curva de potência da turbina Raum 3,5.



Fonte: RAUM ENERGY, 2020

### 2.3.3 Cálculo da geração de energia eólica gerada pela edificação de referência através do software energy plus.

Depois da análise via curva de densidades de potência, é feita uma simulação no software EnergyPlus utilizando o objeto Generator: Wind Turbine.

O modelo deste objeto é feito para calcular para estimar a produção de potência elétrica para sistema de geração de energia a partir de turbinas horizontais e verticais. O modelo estima a densidade e velocidade do ar em uma altura particular do sistema e fatora as diferenças entre a velocidade do vento dos dados climáticos e a velocidade do vento local. O modelo também requer a colocação de velocidades de vento anuais médias que representam o perfil de vento na localidade. O cálculo da produção de energia é feito para as turbinas de eixo horizontal quanto para vertical através de equações matemáticas genéricas. O modelo assume geração constante de energia a determinada velocidade do vento quando o vento do ambiente está ente a velocidade determinada e a velocidade do vento de *cut out*. (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2021).

Os dados que foram inseridos para simular as turbinas elencadas na sessão anterior estão descritas na tabela 04.

Tabela 4 - Características das turbinas inseridas no software Energy Plus.

Valor	Proven 15	Raum 3,5	HoYi 300
Velocidade nominal do rotor (rev/min)	150	350	300
Diâmetro do rotor (m)	9	4	2,8
Potência nominal (W)	15000	3500	300
Velocidade de vento nominal (m/s)	12	11	12
Velocidade de Cut in (m/s)	2,5	2,8	2,5
Velocidade de Cut out (m/s)	25	22	30

#### **2.3.4 Validação dos resultados**

Os resultados serão comparados com os trabalhos acadêmicos de Hussni (2021) e de Valença (2010), trabalhos que estudaram a questão da energia eólica no meio urbano, e serão verificadas as semelhanças e diferenças nos resultados.

#### **2.4 DETERMINAÇÃO DO EDIFÍCIO DE REFERÊNCIA, SEU CONSUMO E GERAÇÃO**

O edifício de referência, usado para comparação, é baseado em um banco de dados bibliográfico, suas características geométrica, físicas e quais sistemas prediais são instalados serão detalhados no capítulo 07.

O consumo elétrico do edifício de referência será calculado utilizando software de simulação termo energético EnergyPlus 9.5.0. Serão retirados dados de consumo anual, mensal e de dois dias representativos do ano, um de verão e outro de inverno, além de seu consumo separado por uso final por área.

## 2.5 VALIDAÇÃO DO EDIFÍCIO DE REFERÊNCIA

Os resultados de consumo do edifício de referência serão confrontados com a fórmula de *benchmark* detalhado fornecido pelo relatório DEO. O benchmark cria níveis de boa prática e típicos em kWh/m<sup>2</sup>. Que se segue:

$$E_{benchmark} = C_0 + C_1 * \frac{GHR}{1000} + C_2 * \frac{A_{estac}}{A_{util\_ocupada}} + C_3 * (N_{f,média} - N_f) + C_4 * N_{andar} * \frac{N_{elev}}{A_{util\_ocup}} + \frac{E_{CPD}}{A_{util\_ocup}} + \frac{E_{outros}}{A_{util\_ocup}}$$

As variáveis de projeto a serem colocadas na fórmula são as seguintes:

Tabela 5 - Lista de variáveis da fórmula do benchmark. Fonte CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 2016.

Variável	Significado	Valor adotado	Fonte
	É o consumo		
E benchmark	energético, médio em kWh/ano/m <sup>2</sup>	A ser calculado	–
GHR	Graus hora resfriamento de bulbo úmido, com temperatura base de 15º CBU	14,172, para São Paulo	VERSAGE, BORGSTEIN, LAMBERTS, 2014
A estac	Área de estacionamento coberto, ventilado e iluminado	0 m <sup>2</sup>	Edifício de referência
A util_cup	Área útil ocupada e condicionada	33600 m <sup>2</sup>	Edifício de referência
N f, média	Densidade média de funcionários em escritórios corporativos	11,1 m <sup>2</sup>	DEO
Nf	Densidade de ocupação no edifício	10,0 m <sup>2</sup>	Edifício de Referência

	durante um dia típico de operação		
$N_{\text{andar}}$	Número de andares	21	Edifício de referência
$N_{\text{elev}}$	Número de elevadores em uso	14	DEO
$E_{\text{CPD}}$	Consumo energético anual medido do CPD, incluindo consumo do sistema de resfriamento	0 kWh/ ano	Edifício de referência
$E_{\text{coz}}$	Consumo elétrico anual de cargas especiais, como a cozinhas ou laboratórios	0 kWh/ ano	Edifício de referência

Sendo que os coeficientes C0 a C4 são definidos pela tabela 06, abaixo:

Tabela 6 - Lista de constante da fórmula do benchmark. Fonte CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 2016.

Constante	Típico	Boa prática	Unidades
C0	145,15	111,31	kWh/m <sup>2</sup> /ano
C1	0,39	0,33	kWh/m <sup>2</sup> /(1000GHR) /ano
C2	14,4	10,0	kWh/m <sup>2</sup> /ano
C3	4,15	4,15	kWh/pessoa/ano
C4	700	700	kWh/andar/elevador/ano

Aplicando os valores da fórmula tem-se os resultados de Benchmark, que estão discriminados na tabela 07:

Tabela 7 - Resultados do cálculo de Benchmark do edifício de referência. Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

---

E benchmark Típico	150,33 kWh/ano/m <sup>2</sup>
--------------------	-------------------------------

---

E benchmark boas práticas	116.49 kWh/ano/m <sup>2</sup>
---------------------------	-------------------------------

---

Dessa forma, a intensidade do uso energético anual do edifício de referência deve estar entre 150,33 e 116,49 kWh/ano/m<sup>2</sup> para ser validado como um edifício de referência próximo à prática comum de consumo elétrico dos edifícios de São Paulo

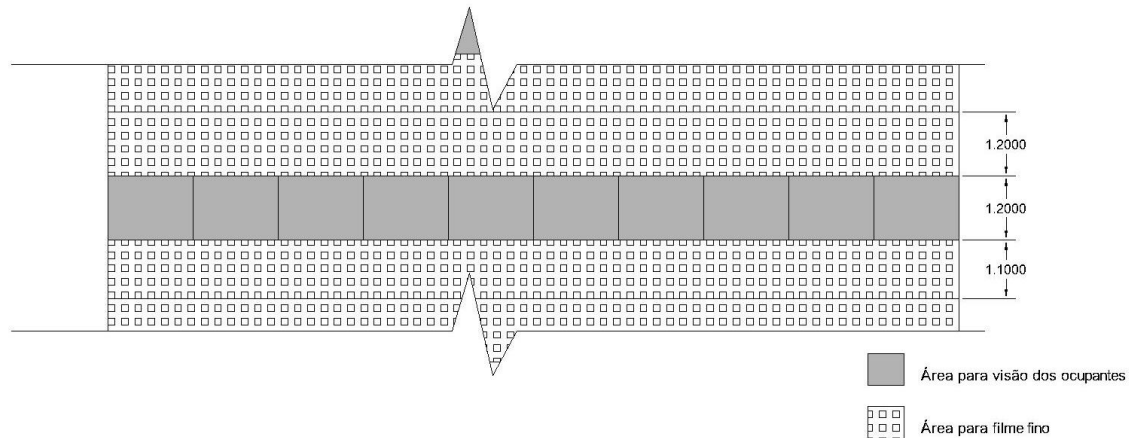
### **2.5.1 Cálculo da energia fotovoltaica gerada pela edificação de referência**

Além da avaliação da radiação e dos ventos da área de estudo e do cálculo de geração de energia renovável eólica, a pesquisa apresentará cálculos para as estimativas de geração de energia fotovoltaica para o edifício de referência. Para o cálculo de geração de energia solar, foi usado o objeto PVWatts do EnergyPlus. O objeto PWatts é baseado num módulo do software da NREL System Advisor Model (SAM) que estima a produção de eletricidade de um de um sistema fotovoltaico conectado ao grid urbano baseado em alguns poucos inputs. Além disso, o objeto consegue trabalhar com filmes aplicados a envoltória e vidros fotovoltaicos, capacidade que os outros objetos do software não são indicados. Entretanto, há estudos que apontam que o software faz um sobredimensionamento dos resultados da ordem de 20% (MUN *et al.*, 2020).

Primeiramente se avaliará o potencial de geração de energia fotovoltaica do edifício de referência.. A energia será gerada através da adição de um filme fino fotovoltaico do tipo CIGS que possui eficiência de 13,5%. O filme fino é instalado numa área de 3.091,2 m<sup>2</sup> na envoltória e 1600 m<sup>2</sup> filme instalado na cobertura. Na envoltória o filme foi instalado de maneira a deixar uma área de visão para os ocupantes de 1,2 metros de altura e ocupando um total de 76,8 m<sup>2</sup> na área de envoltória do pavimento tipo. A figura 13 ilustra em uma das envoltórias a colocação da área de visão e do envidraçado com filme fino.



Figura 13 - Esquema de instalação do filme fino na envoltória do edifício de referência.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

O edifício será avaliado em quatro contextos de entorno diferentes, sem entorno e implantado nas três regiões determinadas na seção 6.2.2.

## 2.6 OTIMIZAÇÃO UTILIZANDO PROCESSO META- HEURÍSTICO.

Depois das análises de geração de energia renovável pela envoltória do edifício de referência é necessário verificar se e quanto a implantação de um algoritmo de otimização na geometria da envoltória pode melhorar a produção de energia da envoltória, comparado com o edifício de referência. O algoritmo é implantado no software de programação visual Grasshopper, um plugin do software de modelagem tridimensional, Rhinoceros 7.

### 2.6.1 O plugin Wallacei e o Algoritmo NSGA II

A otimização será feita via utilização do algoritmo NSGA II (DEB, *et al.* 2002) que está implantado no plugin Wallacei do Rhinoceros 7, este plugin foi escolhido por ser uma solução que permite o uso de diversas ferramentas de análise para seleção de soluções (chamados de fenótipos) e poder selecionar qualquer solução de qualquer geração.

### **2.6.2 Definição do problema e da solução.**

Para o bom funcionamento do processo de otimização a partir de um algoritmo meta heurístico é necessário definir bem o problema a ser otimizado e o quanto mais próximo da solução ideal o algoritmo deve chegar para que o processo pare. (Rutten, 2011). Dessa forma pensou-se no seguinte algoritmo para gerar a geometria otimizada: geraram-se formatos de plantas com raio variável entre 20 e 15 metros e número de arestas variando de 3 até 20 (saindo de uma planta de formato triangular e podendo chegar num icoságono, que é próximo de um círculo), esse formato é extrudado até o próximo pavimento e assim por diante, mantendo o pé direito em 3,5 m e a altura total do prédio em 75 metros. Pede-se que o algoritmo de otimização faça a envoltória com o máximo de radiação solar incidente possível (calculado através do componente Ladybug Radiation\_Analysis) e com a maior área possível.

Foram geradas 1.250 envoltórias para cada uma das três regiões analisadas, separados em 50 gerações de 25 fenótipos cada. Calculou-se a geração de energia solar da 50ª geração, a mais próxima da fronteira de Pareto, usando o componente PVWatts do plugin Ladybug, presente no Rhinoceros 7. Foi utilizado um filme fino, do tipo CIGS, de mesma eficiência do edifício de referência.

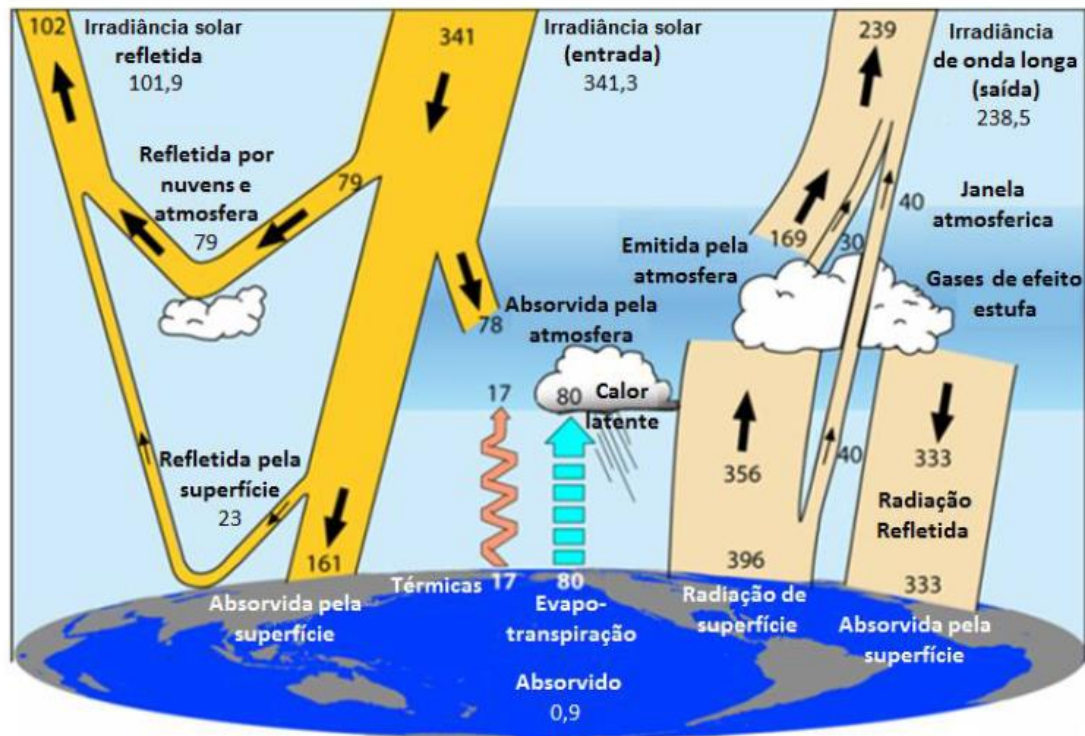
### 3 ENERGIA FOTOVOLTAICA NA ARQUITETURA

#### 3.1 RADIAÇÃO SOLAR

##### 3.1.1 Conceitos gerais

O sol é uma estrela que emite energia em forma de radiação eletromagnética, esta radiação viaja o espaço e é filtrada pela atmosfera, perdendo parte de sua energia. O valor dessa energia antes de chegar à atmosfera é de  $1367 \text{ W/m}^2$ . Este valor recebe o nome de constante solar. A figura abaixo mostra que cerca de 46% da irradiância que chega do sol na atmosfera são absorvidos ou refletidos diretamente por ela. Dos 54% restantes que incidem na superfície terrestre, a maior parte (47%) é absorvida e o restante (7%) refletidos pela superfície terrestre.

Figura 14 - Fluxo de potência global (em  $\text{W/m}^2$ ).



Fonte: Pinho; Galdino, 2014

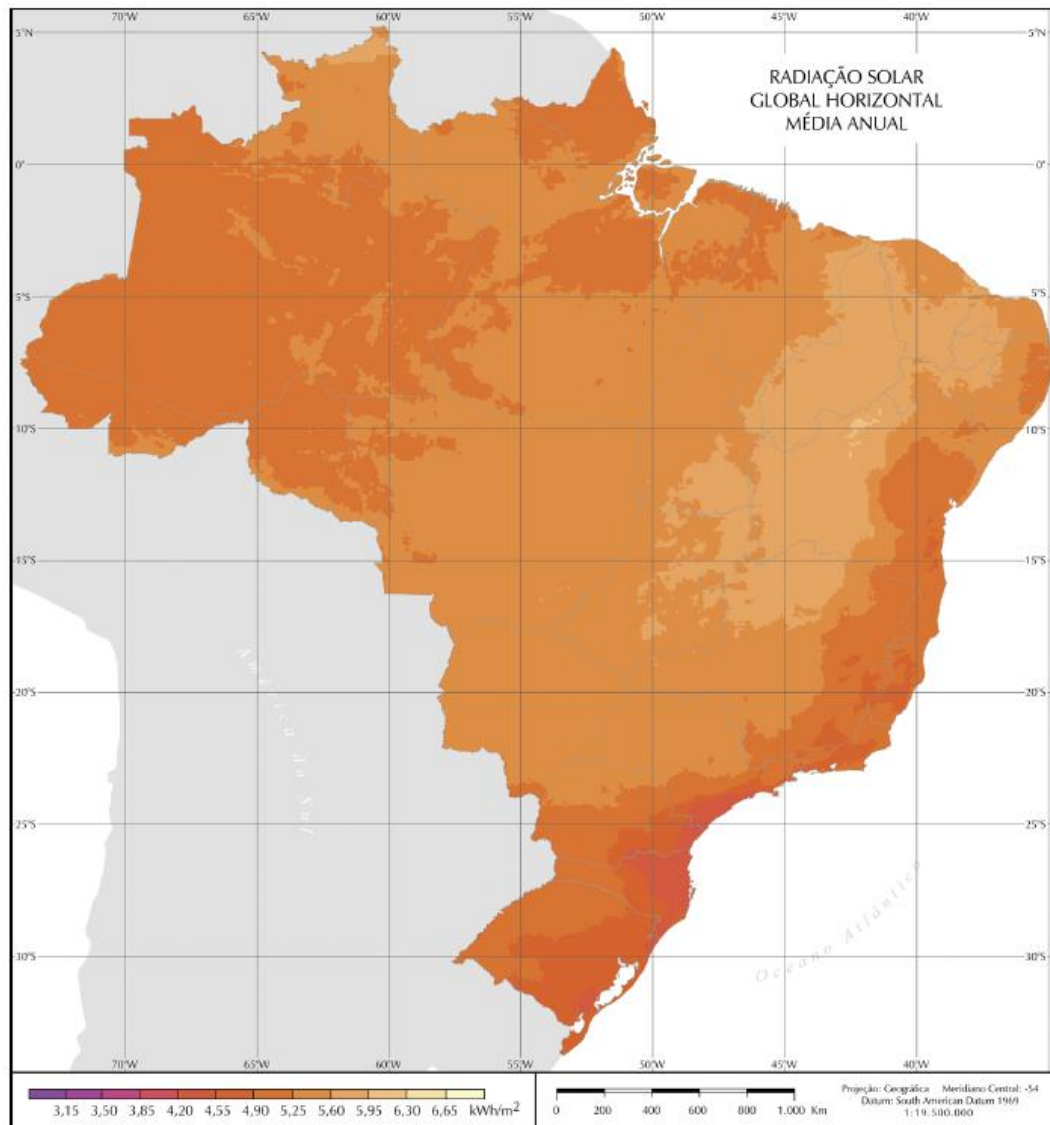
A radiação solar que chega à superfície terrestre e incide sobre uma superfície é constituída por uma componente, que é originária diretamente do sol, e uma

componente difusa, que é originária de todas as direções após sofrer difusão pela abóboda celeste.

### **3.1.2 Radiação solar incidente no Brasil**

Pela sua localização, entre o trópico de capricórnio e o equador, o Brasil possui bons índices de radiação solar; o lugar menos ensolarado no Brasil recebe mais radiação que o lugar mais ensolarado na Alemanha. A figura 15 mostra um mapa com a média anual de radiação global horizontal solar sobre o país inteiro. A região com maior irradiação é o norte do estado da Bahia, com mais de 6,65 kWh/m<sup>2</sup> enquanto a região com menor radiação incidente é o litoral do estado de Santa Catarina, que possui irradiação média entre 3,85 e 4,20 kWh/m<sup>2</sup>.

Figura 15 - Radiação Global Horizontal Média no Brasil (kWh/m<sup>2</sup>).

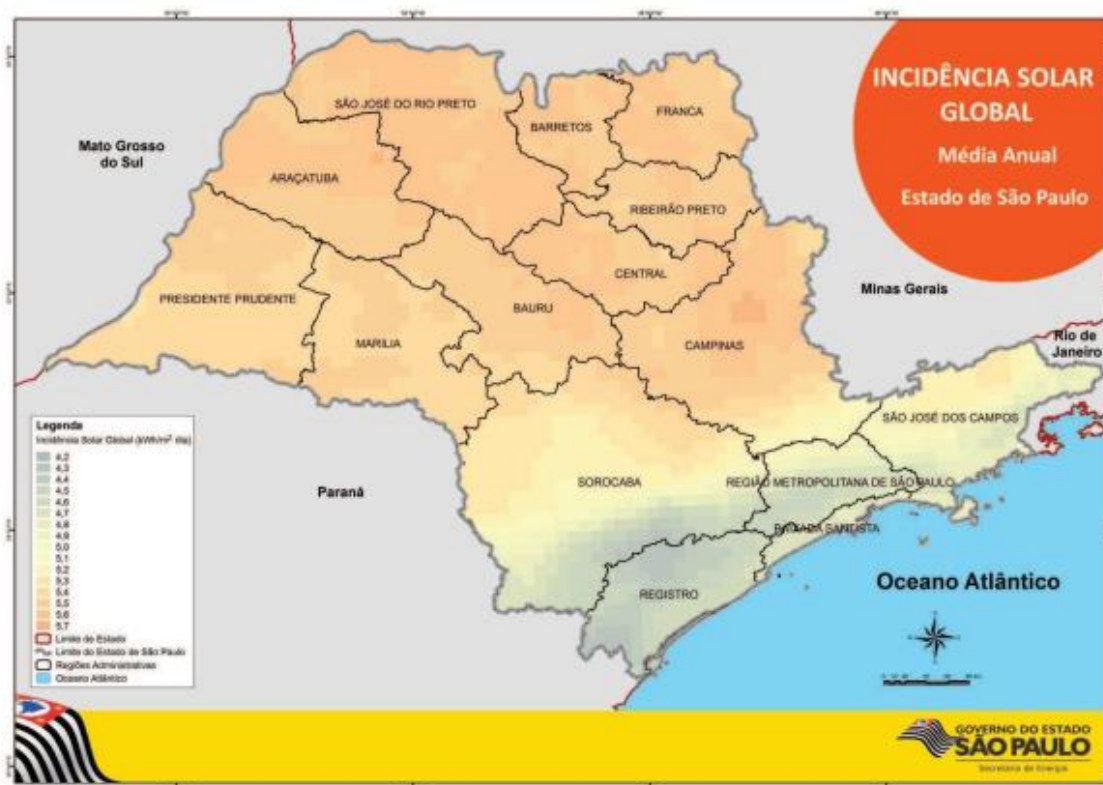


Fonte (PEREIRA et al., 2006)

### 3.1.3 Radiação solar incidente no estado de São Paulo

A partir da base de dados gerada para a elaboração do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006), desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, foi possível determinar o potencial da irradiação solar no estado de São Paulo, para a composição de um atlas publicado em 2013. Os dados, em que foram feitos os mapas, foram obtidos de julho de 1995 a dezembro de 2005, com uma resolução espacial de 10km x 10km (SÃO PAULO, 2013)

Figura 16 - Mapa de Incidência Solar Global no estado de São Paulo.



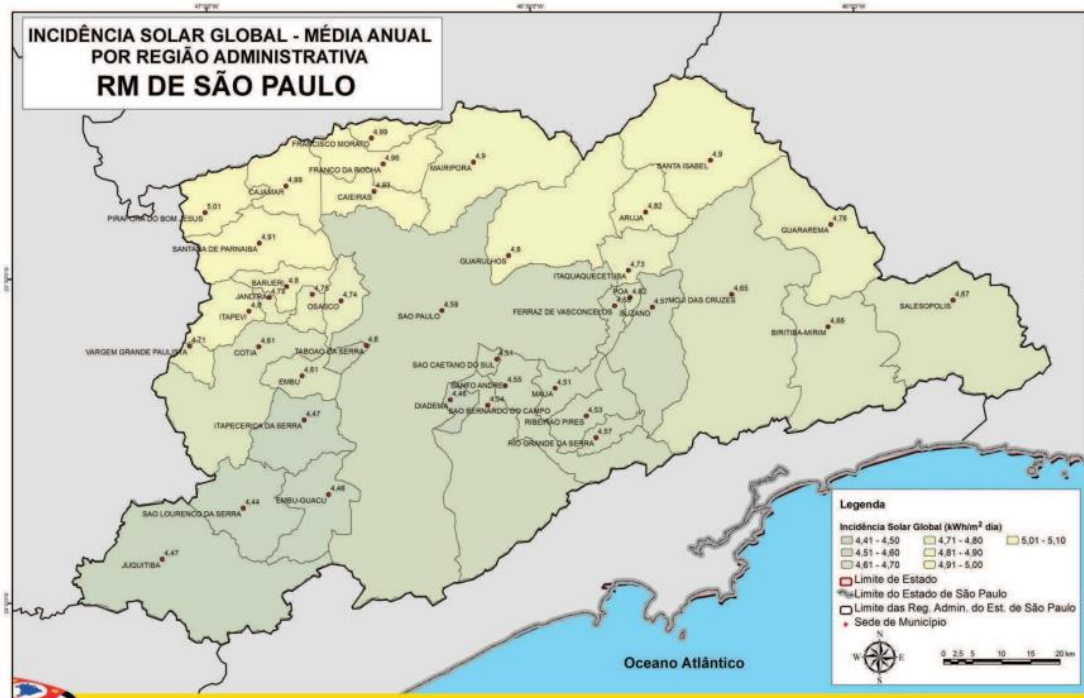
Fonte: São Paulo, 2013

O mapa da figura 16, acima, retirado do Atlas Da Energia Solar Paulista mostra que a região metropolitana de São Paulo está na área de mais baixa incidência solar global do estado, que possui entre 4,2 e 5,0 kWh/m<sup>2</sup> dia. De maneira geral, percebe-se que quando o continente está mais localizado ao norte, maior é a incidência solar, assim, as regiões como Franca e Barretos recebem uma maior irradiação do que regiões mais ao sul como a baixada Santista e Registro. A região de Sorocaba e São José do Rio Preto tem uma radiação intermediária, entre 5,2 até 5,0 kWh/m<sup>2</sup>.

### 3.1.4 Radiação solar incidente na cidade de São Paulo

A figura 17 mostra uma ampliação da irradiação solar incidente na região metropolitana, juntamente com uma média para cada cidade.

Figura 17 - Mapa de Incidência Solar Global na região metropolitana de São Paulo

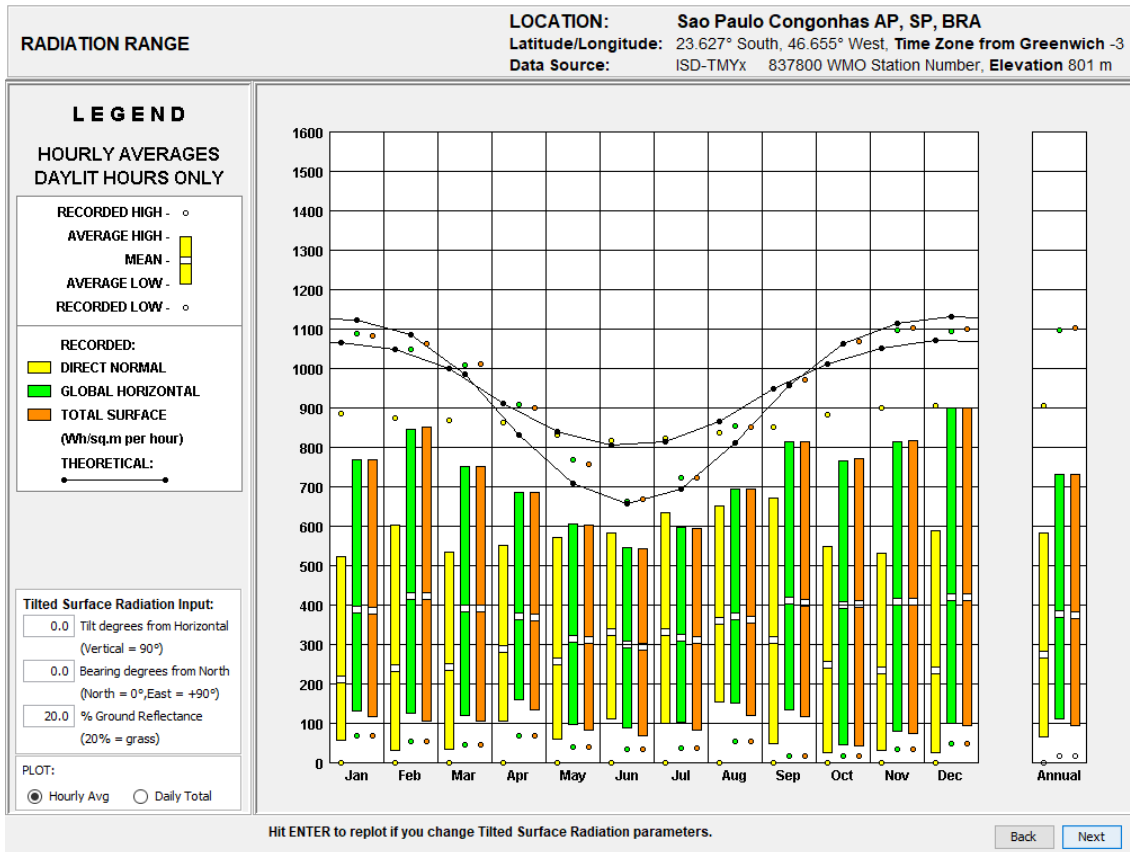


Fonte: São Paulo, 2013

A cidade de São Paulo recebe, uma média anual de 4,6 kWh/ m<sup>2</sup> dia de irradiação solar durante o ano, estando na área de valores mais baixos do estado de São Paulo

Valores correspondentes ao banco de dados climáticos escolhidos pela pesquisa. Usando o software Climate Consultant 6.0 é possível verificar a variação da radiação solar na cidade pelo ano. A variação é ilustrada pela figura 18.

Figura 18 - Gráfico de variação da radiação solar para cidade de São Paulo



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

Observando a imagem tem-se que os menores níveis de radiação solar no mês de Junho com 550 Wh/ m<sup>2</sup>, que é onde começa o período frio da base de dados climáticos; perto do solstício de verão, ou seja, em dezembro, é aonde se tem a maior radiação vindo da atmosfera e do sol, com 900 Wh/ m<sup>2</sup>

### 3.2 FORMA URBANA E RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE.

Nos pontos internos da camada urbana e nos pontos superficiais, se percebe como o fator de visão de céu é reduzido. E esta característica impacta nas quantidades relativas de radiação difusa solar e térmica recebido do céu e de edificações vizinhas e que afetam o balanço da radiação para um determinado ponto. Para quantificar essa obstrução é utilizado o Sky View Factor (fator de visão de céu, SVF), que é uma medida tridimensional que quantifica para um único ponto numa superfície. É definido como a fração de fluxo



radiante que deixa a superfície neste ponto e alcança a atmosfera além da cobertura urbana, isto é, o “céu” (OKE, 2017).

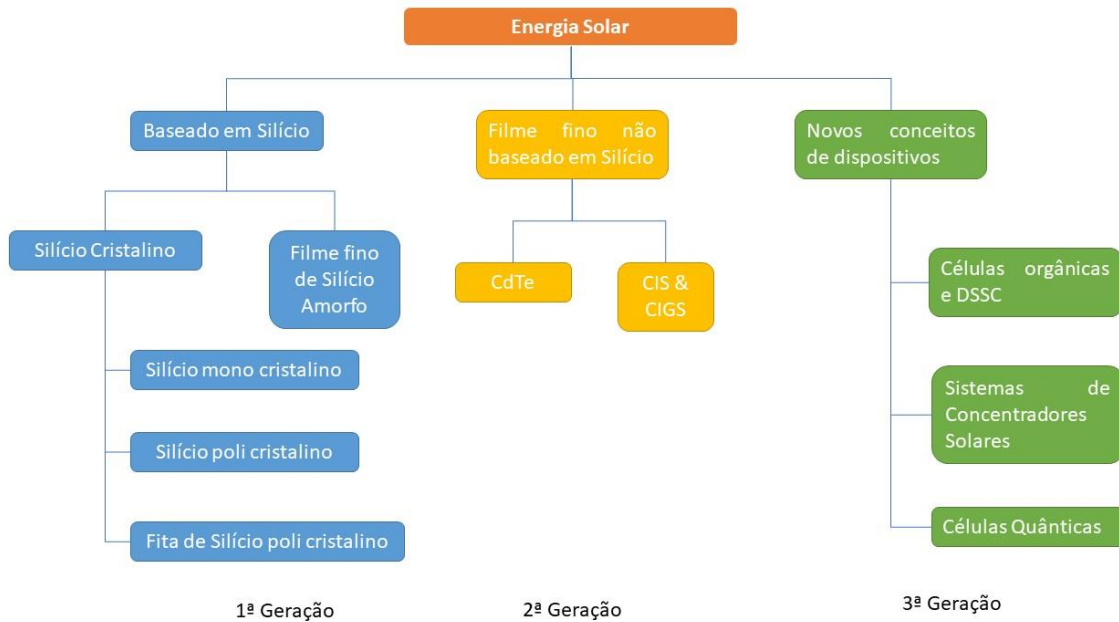
Cheng, em 2006, realizou um estudo com dezoito modelos computacionais que representavam uma variação de formas e densidades construídas, e comparou o desempenho em iluminação natural e potencial solar. Os resultados do trabalho sugerem que, verificando o potencial de geração de energia fotovoltaica, é melhor a implantação de edifícios mais espaçados, criando uma área com baixa cobertura de edificações. Uma área com alta densidade construída e uma alta cobertura de edificações vai gerar sombreamento de um edifício no outro, dificultando a incidência de radiação solar direta nas superfícies. Esta baixa cobertura edificada também gera altos valores de *Sky View Factor* (Cheng, 2006).

Chatzopoulka, et al, (2018) explorou então o quanto do SVF pode ser empregado para a avaliação da radiação solar incidente nas fachadas de cenários urbanos complexos. O estudo analisou 24 formas urbanas de regiões diferentes da cidade de Londres e enxerga uma relação forte (com  $R^2= 0,8$ ) entre a radiação global (que inclui a radiação, direta, difusa e refletida) incidente nas superfícies dos modelos e o *Sky View Factor*.

### 3.3 TIPOS DE PLACAS DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

Atualmente existem três gerações de tecnologia das células fotovoltaicas,(JELLE; BREIVIK; DROLSUM RØKENES, 2012; RAUGEI; FRANKL, 2009). O diagrama da figura 19 mostra quais são os materiais e tecnologias aplicadas em cada geração.

Figura 19 - Gerações de tecnologias de células fotovoltaicas.



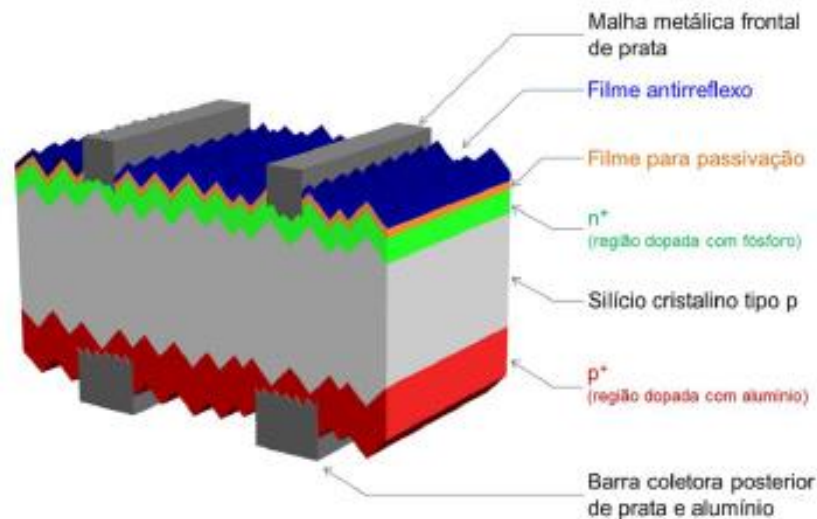
Fonte:Raugei; Frankl, 2009

### 3.3.1 Células mono e poli cristalinas de silício

A primeira geração é composta pela utilização do Silício como matéria prima. O silício é um elemento semi-condutor de energia, obtido através de um processo de purificação de cristais de quartzo. Os blocos de silício purificados são então transformados em lingotes monocristalinos através do método Czochralski. Estes lingotes, por sua vez são transformados em pastilhas (*wafers*). Estas pastilhas ainda precisam passar por mais um processo químico, de adição de Fósforo e Boro para compor as camadas P e N do sistema fotovoltaico; finalmente, com a junção das camadas P e N, obtêm-se a célula fotovoltaica que compõe os módulos dos dispositivos de geração de energia. (GEVORKIAN, 2010; VILLALVA, 2015).

A figura 20, detalha mais um corte de uma célula fotovoltaica policristalina composta por uma camada de silício dopada com boro, uma camada dopada com fósforo e a região p, dopada com alumínio.

Figura 20 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício cristalino



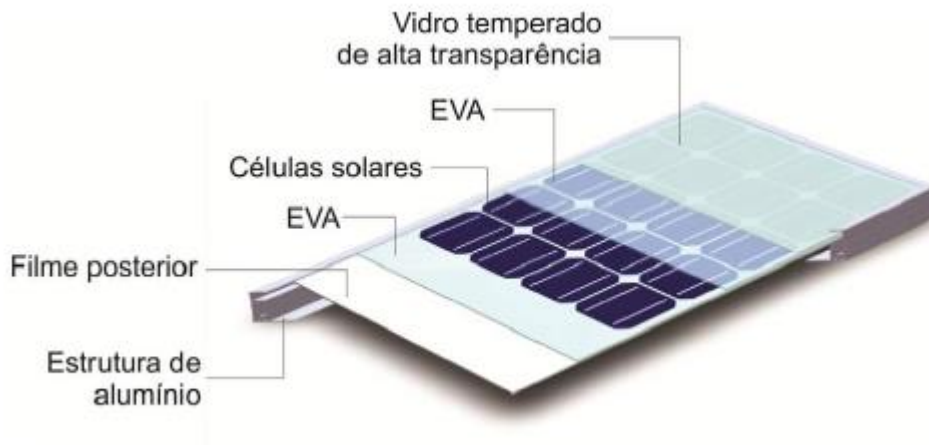
Fonte: Pinho, Galdino, 2014

A diferença do processo entre o sistema monocristalino e o sistema policristalino é principalmente de custo, já que o processo de purificação do silício para a criação do módulo policristalino é mais barata, já que ao produz um lingote de silício composto por vários cristais, enquanto que o lingote monocristalino possui uma estrutura única. Por isso que nas placas fotovoltaicas formadas por um sistema policristalino é possível ver algumas manchas na coloração (VILLALVA, 2015).

Existe uma diferença de eficiência entre essas duas tecnologias, os módulos fotovoltaicos compostos de silício mono cristalino tem eficiências que varia entre 16% a 24% da radiação solar incidente na placa, enquanto que as células policristalinas tem sua eficiência variando entre 14% e 18% (JELLE; BREIVIK; DROLSUM RØKENES, 2012). Porém o sistema mono cristalino é mais frágil estruturalmente, aumentando assim o seu custo de manutenção (VILLALVA, 2015).

A figura 21 mostra um esquema dos componentes de um módulo fotovoltaico tradicional.

Figura 21 - Esquema dos componentes de um módulo fotovoltaico com células de silício cristalino.



Fonte: Pinho; Galdino, 2014

### 3.3.2 Células e módulos fotovoltaicos de filmes finos

Já para a segunda geração existe os chamados filmes amorfos de silício, que são células fotovoltaicas que não são feitas com o lingote purificado de silício, mas com finas camadas de deposição desse material numa base rígida ou flexível. O processo de fabricação imprime uma fina camada de silano (tetra hidreto de silício -  $\text{SiH}_4$ ), composto que custa menos para produzir que os lingotes de silício puro, num substrato flexível como aço inoxidável ou em acrílico. (GEVORKIAN, 2010). Em laboratório, obteve-se módulos de filme fino que possuíam eficiência de até 12% (JELLE; BREIVIK; DRØLSUM RØKENES, 2012).

Ainda é possível fazer uma composição de células solares do tipo convencional com a de filme fino, formando a chamada célula híbrida (VILLALVA, 2015). Ela não possui diminuição de sua eficiência devido ao tempo de uso além de produzir mais energia em temperaturas elevadas. Seu custo de produção é mais baixo que as das células mono e policristalinas.

A segunda geração de tecnologias para as células fotovoltaicas já busca sair da dependência do silício para a sua composição. São células do tipo filme fino que são compostas por telureto de cádmio ( $\text{CdTe}$ ) e as de cobre, índio, gálio e selênio (CIS e CIGS). Tem um processo de fabricação similar ao de filme fino no qual os materiais acima

citados são depositados numa superfície ou num substrato. (GEVORKIAN, 2010). Entretanto, o sistema de fabricação com telureto de cádmio ainda possui dificuldades de produção em larga escala, devido a alta toxicidade do cádmio e da raridade do telúrio na natureza, dificuldades essas que não são encontradas pelos sistemas CIS e CIGS (VILLALVA, 2015). As eficiências desses tipos de células solares variam de 9,4% a 13,8% para o sistema CdTe, enquanto o sistema CIS/CIGS consegue uma eficiência de 13%(JELLE; BREIVIK; DROLSUM RØKENES, 2012).

### **3.3.3 Células orgânicas e corantes**

A terceira geração de produtos fotovoltaicos ainda está em fase de estudos laboratoriais e prototipagem (RAUGEI; FRANKL, 2009). São as células solares orgânicas, as células quânticas e célula solares de corantes sintéticos (Dye-Sensitized Solar Cells - DSSC).

Os corantes são uma classe de elementos fotovoltaicos que não são considerados células fotovoltaicas, por não funcionarem com a junção pn, porém funcionam por um efeito eletroquímico. O corante é composto por um filme condutor transparente em que é aplicada uma camada de óxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) embebido num eletrólito, comumente uma solução salina condutora. Os fótons incidentes na camada de óxido produzem elétrons livres que são recarregados por elétrons do eletrólito. Esse tipo de célula apresenta uma espessura de aproximadamente 1000 vezes menor que um célula de silício, porém obtém eficiências de até 10%, o que inviabiliza comercialmente a tecnologia (PINHO; GALDINO, 2014).

As células solares quânticas e de dispositivos nano estruturas são os dispositivos que teoricamente, podem possuir, teoricamente, as maiores eficiências de conversão solar, podendo chegar a 66% (TVRDY; KAMAT, 2011).

## **3.4 APLICAÇÃO DE ELEMENTOS FOTOVOLTAICOS NA ENVOLTÓRIA DE EDIFICAÇÕES.**

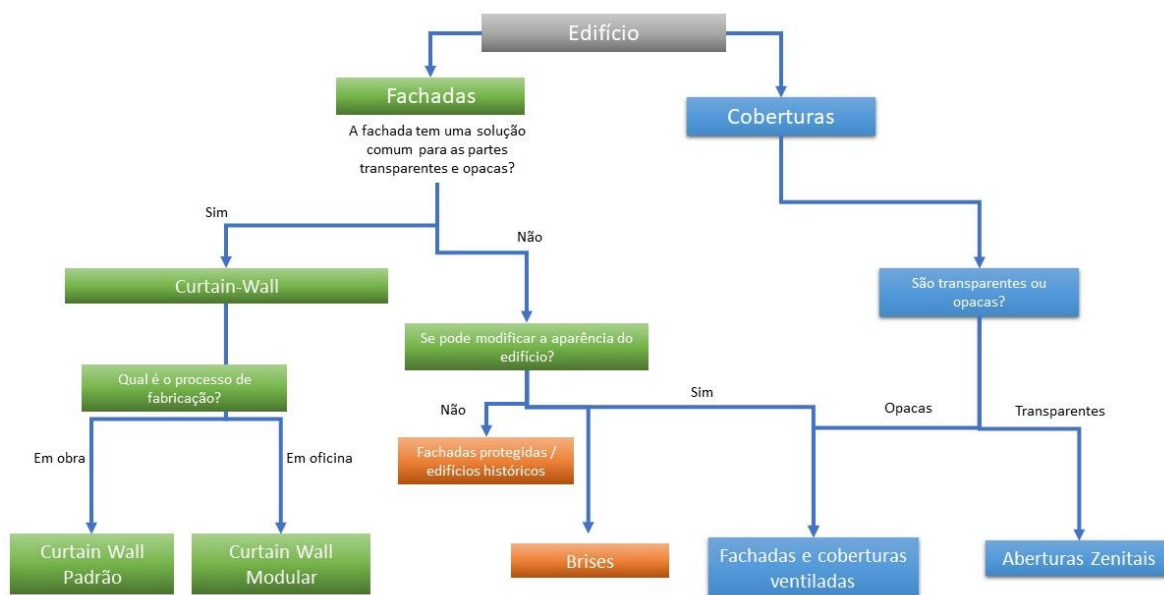
Como visto, os módulos fotovoltaicos são principalmente disponíveis na forma de elementos plásticos ou de vidro laminado e devem ser empregados como os componentes envidraçados. E podem ser colocados em qualquer lugar do envelope. A

princípio, virtualmente qualquer superfície plana pode receber um elemento fotovoltaico, desde que receba radiação solar suficiente. Entretanto, pequenos sombreamentos sobre as células podem levar a uma redução considerável no fornecimento de energia.

Telhados inclinados podem receber elementos fotovoltaicos que substituem elementos de cobertura. Fachadas fornecem superfícies em potencial para gerar eletricidade do sol, embora a quantidade de radiação incidente em superfícies verticais é menor que em superfícies horizontais e inclinadas, fachadas oferecem considerável potencial em geração de energia se alguns componentes são substituídos por módulos fotovoltaicos.

Para o auxílio de decisão de onde se inserir o elemento de geração fotovoltaica, Chivelett e Solla (2007) propõe o seguinte fluxograma de decisão, ilustrado na figura 22.

Figura 22 - Fluxograma de decisão para implementação de elementos fotovoltaicos.



Fonte: CHIVELET; SOLLA, 2007.

### 3.4.1 Fachada ventilada

A folha exterior das fachadas ventiladas representa uma oportunidade muito boa para a inserção dos painéis fotovoltaicos. A tecnologia das fachadas ventiladas já possui todos os elementos necessários para incorporar estes sistemas.

Pode-se classificar dois conjuntos de soluções de fachadas ventiladas com painéis fotovoltaicos: as baseadas em vidro e as baseadas em outros suportes opacos. Na primeira delas, se parte de sistemas existentes de curtain wall sobre fachadas opacas. A integração do módulo fotovoltaico consiste em substituir o vidro temperado ou laminado da folha exterior do vidro laminado, por um painel de vidro laminado com células fotovoltaicas de silício cristalino amorfo. A segunda família se parte de qualquer sistema de fachadas ventiladas a base de painéis leves opacos fixados sobre uma estrutura de perfis verticais em U, bandejas de alumínio pregado, painéis laminados de alta densidade, grés envidraçado etc. Neste caso, a integração passa por aderir sobre o painel opaco um módulo fotovoltaico de células amorfas delgado (CHIVELET; SOLLA, 2007).

A grande vantagem de incorporar painéis fotovoltaicos a este tipo de fachada é a ventilação que ocorre no lado traseiro do painel, o que aumenta sensivelmente o seu rendimento em função da temperatura e do grau de ventilação da câmara.

Um exemplo de uso desse tipo de solução é o edifício do Manchester College of Art and Technology (MANCAT). Uma das paredes possui 482 módulos fotovoltaicos de 80W, formando 720m<sup>2</sup> de área fotovoltaica que gera 43.000 kWh anualmente

Figura 23 - Fachada do Manchester College of Art and Technology



Fonte: WILLIANS, 2022

### **3.4.2 Curtain Wall (Fachada cortina)**

O conceito construtivo que caracteriza o curtain wall é que se trata de um fechamento pendurado a viga superior, e não apoiado na viga inferior, já que os perfis de alumínio em que as folhas de vidro são fixadas não suportam a compressão.

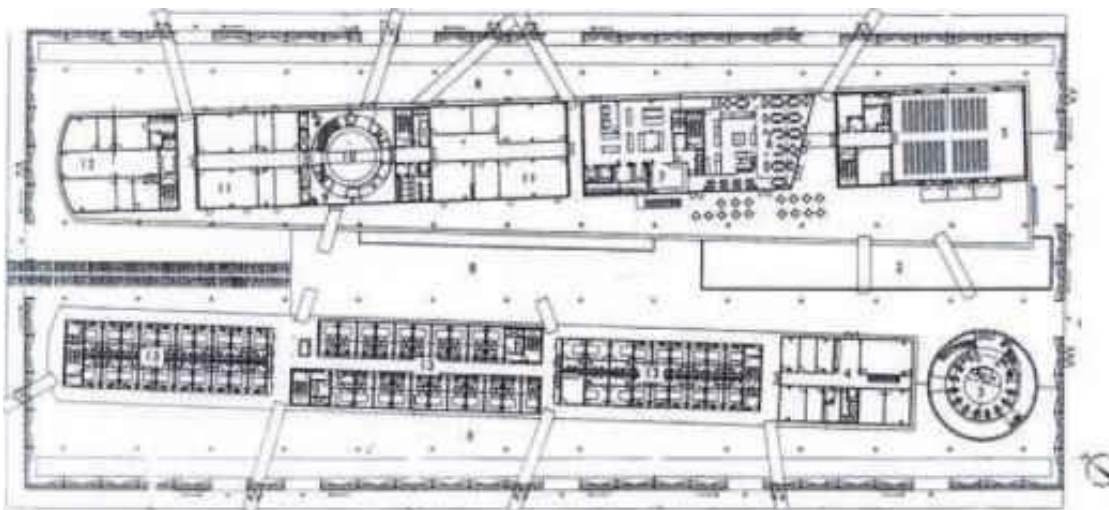
Em um curtain wall composto por montantes e travessões de alumínio os painéis fotovoltaicos podem ser inseridos tanto nos painéis da área de visão quanto nos painéis de vidros opacos. O envidraçamento pode ser simples, laminado ou duplo, desde que o vidro tradicional possa ser substituído por outro que incorpore células fotovoltaicas de algum tipo. Se os módulos fotovoltaicos estão integrados na área da visão de um curtain wall, então as células estarão contidas num vidro laminado que formará a folha exterior de vidro duplo. A transparência dessa janela é obtida espaçando-se mais as placas e as envolvendo em um EVA transparente, já que as células mono ou policristalinas são opacas. Se as células forem de um módulo transparente de silício amorfo, este ocupará a totalidade de uma superfície. Em ambos os casos as células solares atuam como uma capa de controle solar que absorve a radiação e portanto, reduzem o fator solar do vidro (CHIVELET; SOLLA, 2007).



Para resolver problemas de instalação em obra, reduzir tempo de instalação e tornar a construção um processo com maior qualidade, foram desenvolvidos os curtain wall modulares, baseados em montantes e travessões. Todas as características dos curtain wall tradicionais se aplicam aos modulares.

Um exemplo de uso é a academia governamental de Mont Cernis, em Herne (Alemanha), o edifício é composto por uma envoltória de vidro que cobre várias outras edificações que possuem o programa da academia. Diferentemente dos curtain wall tradicionais, os montantes são de madeira ao invés de alumínio. A área com elementos fotovoltaicos é de 20.000 m<sup>2</sup>, que gera uma potência de 1 MW (NOTHERN ARCHITECTURE, 2019).

Figura 24 - Planta da academia de Mont Cernis.



Fonte: NOTHERN ARCHITECTURE, 2019

Figura 25 - Fachada a academia de Mont Cernis.



Fonte: SBP – SCHLAICH BERGEMANN PARTNER

### 3.4.3 Brises soleil

O brise soleil é um elemento desenhado para proteger do sol, e assim podem se converter em um suporte para integrar os módulos fotovoltaicos. Desta maneira, os painéis combinam duas funções em um elemento único: controle solar e produção energética. Os brises podem ser pensados para proteger do sol na linha em cima das janelas e podem ser orientados de modo mais adequado para assegurar uma máxima captação solar. Outra variante é a proteção metálica revestida com painéis solares de lâmina delgada (CHIVELET; SOLLA, 2007).

Um exemplo de aplicação desse tipo de solução é o edifício sede do departamento de transportes da Califórnia (Caltrans). O edifício é envelopado por uma pele mecânica que muda de ângulo de acordo com as condições externas de temperatura e de iluminação. Os brises móveis possuem células fotovoltaicas que geram energia, gerando cerca de 5% da energia consumida nos horários de pico. (SCOGNAMIGLIO; PRIVATO, 2008)

Figura 26 - Edifício sede da Caltrans



Fonte: Scognamiglio; Privato, 2008

#### **3.4.4 Integração fotovoltaica em coberturas e claraboias**

As primeiras soluções de aplicação de módulos fotovoltaicos nas coberturas não podem ser denominadas apropriadamente de integração, sendo classificadas de superposição, com resultados duvidosos do ponto de vista estético. Os fabricantes de módulos fotovoltaicos tentam criar produtos que simulam pequenos elementos de acabamento. Enquanto que as coberturas metálicas se resolvem com placas, e a integração fotovoltaica é mais simples. Com a integração sendo feita através de lâminas delgadas de silício amorfo ou de CIS, já que as lâminas de silício permitem curvaturas.

Em coberturas plana a inserção dos elementos geradores de energia é feita mais em sobreposição dos elementos na cobertura do que integração, sendo a mais habitual na geração fotovoltaica dos edifícios. Se tiver um átrio ou claraboia, pode-se adotar as mesmas soluções que as curtain wall em áreas de visão e áreas opacas de uma cobertura transparente. Utilizando elementos fotovoltaicos em que tenham algum grau de transparência. Se os módulos fotovoltaicos são empregados nas áreas opacas, e se pode empregar um módulo opaco. Um sistema de brises fotovoltaicos montadas sobre uma claraboia pode resolver, ao mesmo tempo, a geração de energia fotovoltaica e o sombreamento (CHIVELET; SOLLA, 2007). Um exemplo de uso do sistema fotovoltaico

como elemento de cobertura pode ser visto no conjunto de edifícios da Sede da Telefónica em Madrid. Os dispositivos de geração de energia fotovoltaica estão sobre a cobertura que interliga os edifícios do complexo. A cobertura possui 390.000 m<sup>2</sup> com células de silício monocristalino que geram 2,9MW pico (ARCHINECT FIRMS, 2022).

Figura 27 - Conjunto da sede da Telefónica em Madri



Fonte: Archinect Firms, 2022

Figura 28 - Cobertura da sede da Telefónica em Madri



Fonte: ARCHINECT FIRMS, 2022.

### 3.5 ESTUDOS ACADÊMICOS

Santos (2015) fez a simulação de um edifício de referência em relação a tipologia atual de edifícios de São Paulo, utilizando um filme amorfo instalado njas janelas do modelou seja um sistema BIPV, sem mudar o WWR (Window Wall Ratio) que possuía uma

potência pico de 40Wp. As simulações determinaram que a aplicação dessa tecnologia pode compensar o consumo total da edificação de referência em 3,8%.

Em sua tese, Didoné (2014), simulou a quantidade de energia elétrica gerada por tecnologia BIPV para edifícios de escritório no contexto urbano das cidades de Fortaleza (CE) e Florianópolis (SC). Os resultados apontam que a influência do sombreamento do entorno e a relação de altura dos edifícios é um fator importante na produção de energia renovável feita por esses módulos.

### 3.6 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA A RESPEITO DA GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL E DISTRIBUÍDA

No Brasil, a possibilidade de criação de mini e micro usinas de geração de energia se iniciou com a norma regulamentadora 482 da ANEEL, que entrou em vigor em 2012 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012) e foi atualizada em 2015 pela norma regulamentadora 685 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015). Elas contêm a definição de micro (potência instalada menor ou igual a 75kW) e miniusinas (com potência instalada entre 75 kW e 3 mW) além de definir o sistema de compensação de energia elétrica, no qual a energia é injetada por unidade consumidora com micro geração ou mini geração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa.

A geração distribuída, tipicamente urbana e integrada em telhados e coberturas de edificações, tem um caráter bastante espalhado por todo o território nacional. A demanda crescente de energia elétrica, representada pelo uso crescente de aparelhos de ar-condicionado, vem alterando o perfil de consumo e demanda no Brasil. Ano a ano os valores máximos de demanda são registrados nos meses de verão e no horário entre 12 e 15hrs, com excelente nos últimos anos, sua adoção por todo o território brasileiro é crescente e atingiu crescimento exponencial a partir do final de 2016. As distribuidoras de energia locais são, portanto, o caminho natural de entrada no Brasil da geração solar fotovoltaica distribuída. (PEREIRA *et al.*, 2006)

## 4 ENERGIA EÓLICA

### 4.1 FORMAÇÃO DO VENTO

O vento pode ser definido como a movimentação das massas de ar causadas tanto pela diferença de pressão, originada pela radiação do sol, quanto pelas forças de Coriolis, que são originadas pela rotação do planeta (PRATA, 2005). Na escala planetária, os ventos são influenciados pelo gradiente de radiação solar que incide sobre a superfície terrestre. Como na região da linha do equador recebe uma maior incidência de radiação que os polos, essa diferença de temperatura faz com que existam grandes correntes de vento entre essas duas regiões, graças ao efeito da convecção do ar atmosférico (FADIGAS, 2011). Outras forças que também influenciam os ventos na escala global é a inércia devido ao movimento circular em larga escala do planeta e o atrito entre a massa de ar e a superfície da terra. (MANWELL, 2009).

A geografia regional também influi na direção da velocidade de ventos. Por exemplo, as brisas litorâneas e terrestres são formadas pela diferença das capacidades de absorção de calor entre o solo e mar. A variação da temperatura entre a água do mar e o solo durante o dia faz com que o sentido do vento mude terra-mar e mar-terra. Ao mesmo tempo, a existência de montanhas e vales também induz a um fenômeno convectivo parecido (FADIGAS, 2011).

Na camada mais baixa da atmosfera, as características físicas do ar como velocidade, temperatura e umidade relativa podem mudar rapidamente e, para os fins de aproveitamento da energia eólica, quantificar e prever essa variação é de grande importância, já que, uma pequena diferença entre o valor esperado de velocidade de vento e a velocidade real pode causar uma grande diferença na quantidade de energia gerada. (MANWELL, 2009; FADIGAS, 2011).

Essas variações podem ser sazonais, devido tanto a variação da radiação solar causado pelo movimento de translação do planeta quanto a fenômenos climáticos; as variações também podem ser diárias devido a mudança de quantidade de radiação solar

incidente ao longo do dia; e de curta duração, que são referentes a rajadas de vento e a pequenas flutuações (PRATA, 2005).

## 4.2 RECURSO EÓLICO

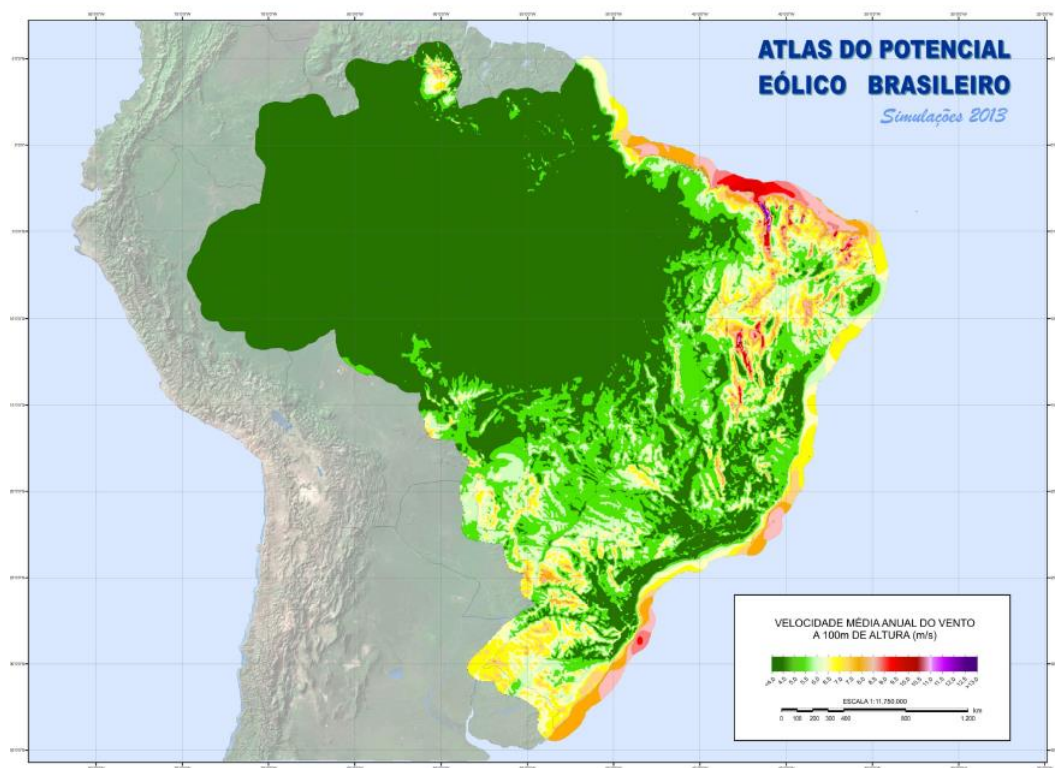
### 4.2.1 Recurso Eólico no Brasil

De acordo com o Atlas do potencial eólico brasileiro, que foi elaborado em 2013, pelo Centro de Pesquisa em Energia Elétrica (Cepel), o Brasil possui a disponibilidade de 143.000 MW de potência eólica para ser explorada em todo o território. O Atlas conclui que o potencial de ventos é mais intenso entre os meses de junho a dezembro (CEPEL, 2013).

Dessa forma, existe uma complementariedade entre os recursos eólicos e hidráulicos em algumas regiões do Brasil. O que é uma grande vantagem para as eólicas ligadas ao sistema interligado elétrico (SIN), já que operam à plena carga quando as hidrelétricas estão no período de seca. (FADIGAS, 2011)

A figura 29, que mostra a velocidade média anual a 100 metros, indica que as regiões nordeste e sul possui as maiores velocidades e, portanto, o maior potencial de geração de energia eólica. Além disso, o país tem um altas velocidades de vento em seu litoral, aproveitando as áreas offshore para implantação de usinas eólicas. (CEPEL, 2013)

Figura 29 - Velocidade Média anual do vento a 100 metros de altura.



Fonte: CEPEL, 2013

#### 4.2.2 Recurso Eólico no Estado de São Paulo

Em 2012 foi feito, por encomenda do governo do Estado de São Paulo, um atlas de energia eólica que é disponível publicamente. Este atlas tem como finalidade básica determinar localidades no estado para implantação de fazendas eólicas, que são unidades de geração de energia de grande porte, ou seja, é um material de interesse da pesquisa para analisar como é a natureza dos ventos no estado.

Com base nesse atlas, o estado apresenta o potencial eólico total de 4.734MW, referentes a um vento com velocidade acima de 6,5 m/s, localizado a 100m acima do solo. Esse potencial é capaz de gerar quase 13.000 GWh de energia elétrica. Se for acrescentado as áreas em que o vento chega a 6,0 m/s, o potencial eólico do estado sobe para 30.891MW, com a estimativa de geração anual de 71.918 GWh. A tabela 08 mostra quais são as áreas no estado de São Paulo que possuem ventos acima de 6,00 m/s e são passíveis de exploração de energia eólica (SÃO PAULO, 2012).

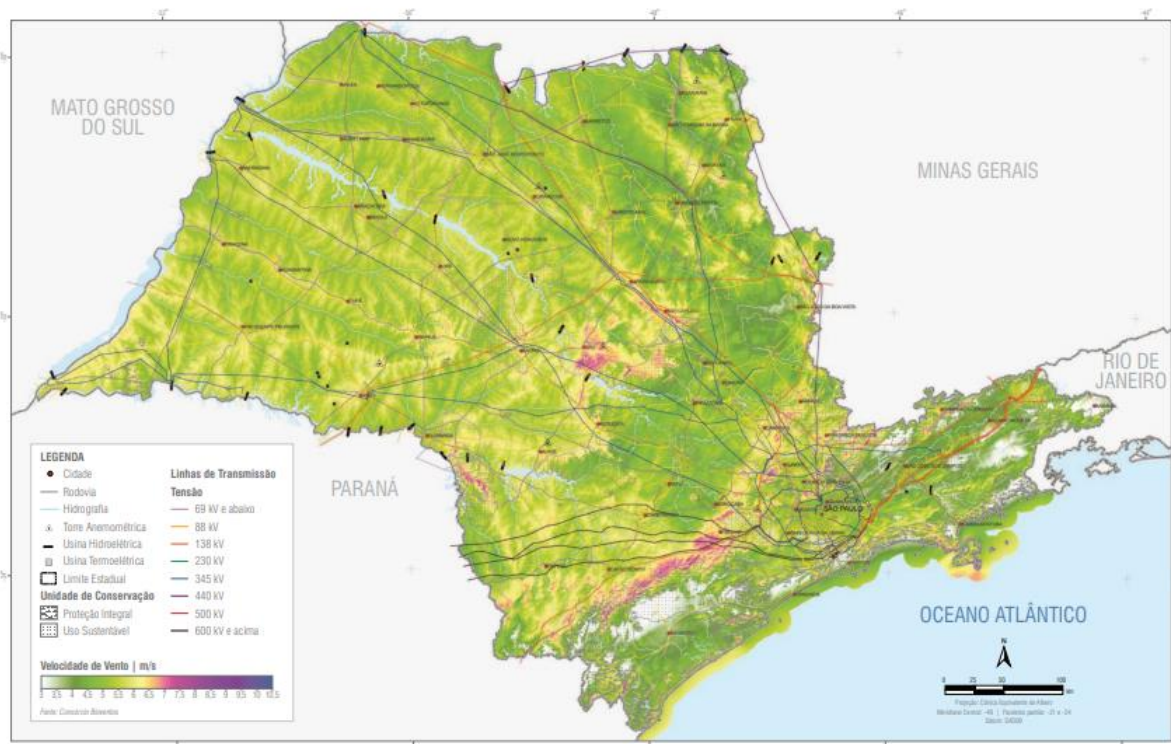


Tabela 8 - Áreas do estado de São Paulo com ventos de velocidade acima de 6 km/h passíveis de exploração. Fonte: SÃO PAULO, 2012

Faixa de velocidade do vento (m/s)	Área (Km <sup>2</sup> )	Potência Instalável (MW)	Energia Anual (GWh)	Fator de capacidade (%)
6,0<V<6,5	6.286	26.157	71.918	26,6
6,5< V <7,0	1.000	4.170	13.000	31,3
7,0<V7,5	129	543	1.753	35,5
V>7,5	5	21	74	40,0

A figura 30 mostra o mapa de velocidades do vento a uma altura de 100 metros observa-se que as áreas que possuem velocidades acima de 7,5m/s se localizam mais ao interior do estado, essas áreas se localizam a sudoeste, próximas às cidades de Capão Bonito e Piedade. Existem também áreas localizadas no noroeste paulista, próximas a Jaú, que o vento também alcança essas velocidades. As regiões com ventos de velocidade entre 7,50 m/s e 6,00 m/s são as que representam morros e elementos de relevo mais alto do território do estado, como por exemplo os limites de bacia. A região noroeste do estado, até a sua divisa com o Mato Grosso do Sul possui muitas áreas com essas velocidades de vento. Entretanto, na região metropolitana, onde se localiza, o objeto de estudo os ventos alcançam até 5,00 m/s, uma velocidade abaixo do que é considerado ideal para a instalação de uma fazenda eólica, porém podem ser exploradas com aerogeradores de menor porte (SÃO PAULO, 2012).

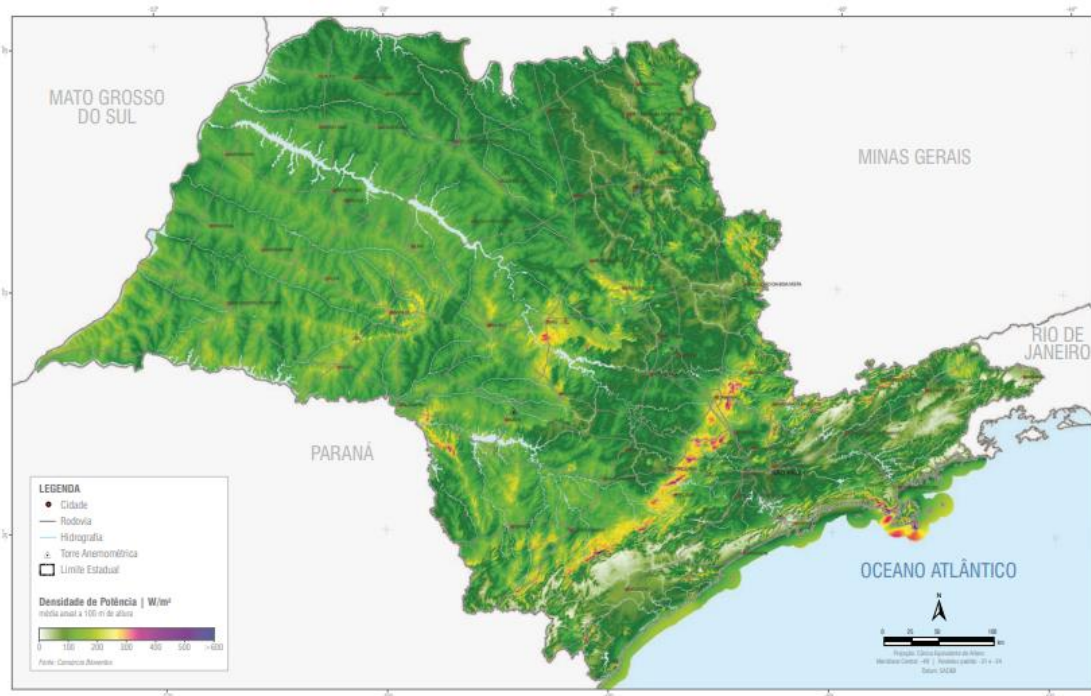
Figura 30 - Mapa de velocidades de vento a uma altura de 100m.



Fonte: GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2012.

O mapa da Densidade de Potência (na figura 31), que considera a média anual de potência por área, complementa as análises feitas a partir do mapa das velocidades. A densidade de potência do estado não alcança valores acima de 400 W/m<sup>2</sup>, as regiões discriminadas no parágrafo anterior alcançam em torno de 350 W/m<sup>2</sup> enquanto a região em que se localiza a metrópole de São Paulo tem apenas 100 W/m<sup>2</sup>.

Figura 31 - Mapa de densidade de potência do Estado de São Paulo.



Fonte: SÃO PAULO, 2012.

### 4.2.3 Recurso Eólico na cidade de São Paulo.

Indo para a escalada da cidade, Hussni (2020) realizou uma série de medições na cidade de São Paulo para calcular o potencial eólico da cidade de São Paulo através da análise de dados obtidos por sensores instalados no topo do edifício da secretaria da Fazenda do Estado de São Paulo, edifício localizado no Bairro da Sé, no centro da cidade.

O período de medição dos dados analisados foi de quatro anos, medindo a uma taxa de 0,5Hz a cada 05 minutos. A altura da coleta dos dados foi feita a 95 metros decompostos em: 85 metros referentes a altura da edificação e mais 10 m da torre onde os equipamentos de medição estão instalados, vale ressaltar que a cidade de São Paulo, está localizada a 769 metros de altura acima do nível do mar. Foram coletados dados referentes a velocidade, direção, temperatura e pressão do vento.

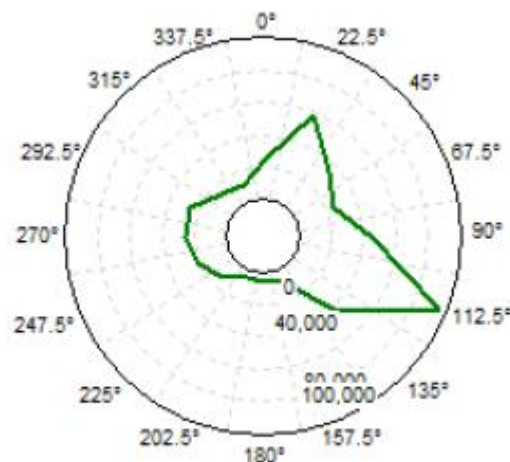
Os resultados das medições constataram que a velocidade média do vento na região, no período analisado, foi de 3,92 m/s. O perfil anual do vento tem seu ponto baixo, com

velocidade mínima de 3,5 m/s, referentes aos meses de maio a julho enquanto que os meses de outubro a novembro apresentaram os valores máximos, de 4,5m/s.

O perfil médio diário de vento, obtido pelas medições indica que o vento na cidade de São Paulo alcança a maior velocidade das 15h00 às 19h00, ou seja, na parte final do período de ocupação de um edifício de tipologia de escritórios para prestação de serviços. A velocidade nesse período pode alcançar até 5,00 m/s. Os períodos de menor velocidade são ainda na madrugada e início da manhã, com velocidade de 3,40 m/s.

Como dito anteriormente, o trabalho de Hussini (2020) também contabilizou, no período de análise, a direção do vento. Os resultados apontam que na maior parte do período de análise, a direção predominante do vento foi sudeste, mais precisamente a 112,5°. O autor comenta que esse resultado é devido à direção em que a costa brasileira está em relação à cidade de São Paulo, já que a atmosfera da cidade é bastante influenciada pelas brisas marítimas da baixada santista. Na rosa dos ventos, retirada da dissertação aparece uma segunda direção predominante, a nordeste (22,5°).

Figura 32 - Ocorrências da direção de vento na cidade de São Paulo.

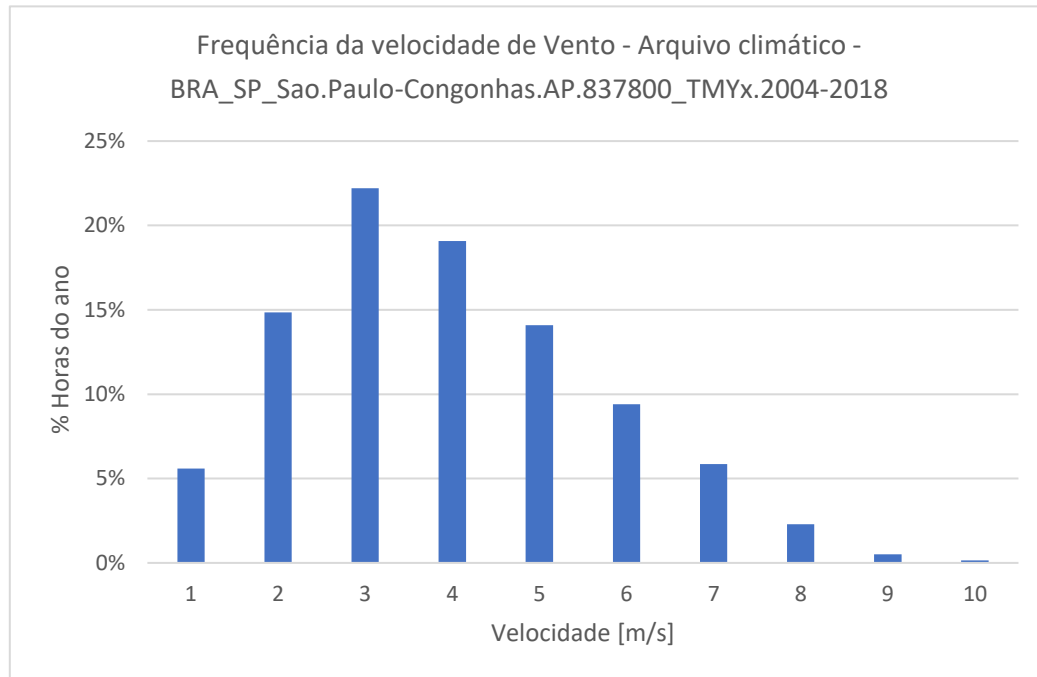


Fonte: Hussni, 2020.

Observando os dados de vento da base de dados climáticos utilizada pela pesquisa, o BRA\_SP\_Sao.Paulo-Congonhas.AP.837800\_TMYx.2004-2018, retirado do sítio eletrônico: <https://climate.onebuilding.org/> que a velocidade de vento mais frequente é de

3m/s, que ocorre em 22% das horas do ano. Já a velocidade de 4 m/s ocorre em 19% do ano, velocidades muito baixas, entre 0 e 1 m/s ocorrem em 6% do ano. O gráfico da figura 33 mostra esse histograma de frequências.

Figura 33 - Frequência de vento de acordo com arquivo climático.



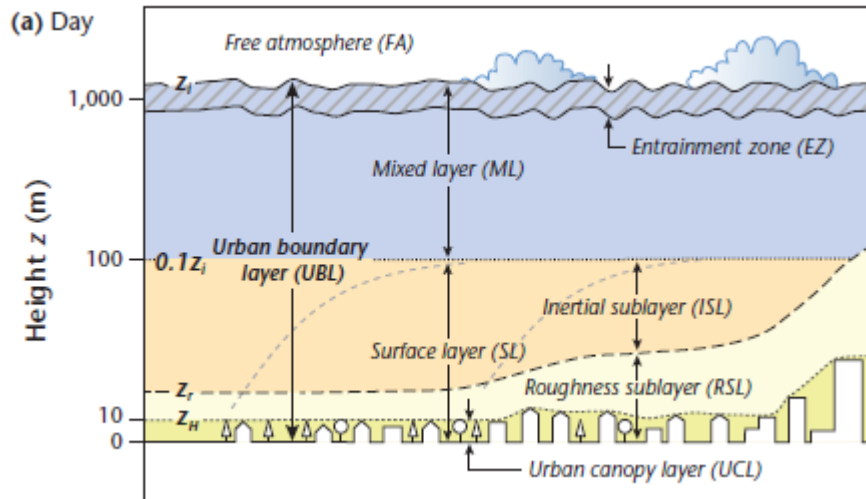
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Dessa forma pode-se afirmar que o vento da cidade de São Paulo está variando entre 3 e 4 m/s durante 41% do ano, ou seja a velocidade de vento é constante nessas velocidades. Esses baixos valores se devem à interação entre o vento e a rugosidade provocada pela malha urbana, como se verá adiante.

#### 4.3 VENTO NA ESCALA URBANA

Quando se analisa a atmosfera na escala urbana, se faz uma divisão em camadas para melhor analisar seus fenômenos. A figura 34, retirada do livro Urban Climates (OKE, et al 2017), mostra quais são as camadas em que a atmosfera que está sobre o ambiente urbano é dividida.

Figura 34 - Divisão da atmosfera urbana em subcamadas.



Fonte: Oke, 2017.

A atmosfera urbana se estrutura nas seguintes camadas

- Urban Canopy Layer (UCL): Camada que se origina no nível do solo até a altura média das edificações ou árvores, consistindo das massas de ar internas e externas aos edifícios. Nessa camada acontece as principais trocas de calor, umidade e poluentes entre a cidade e seus processos e a atmosfera.
- Roughness Sublayer (RSL): Camada que começa logo acima da anterior e possui altura de duas a 5 vezes a UCL. Elementos individuais e a rugosidade do conjunto urbano ainda influenciam no perfil vertical do vento a essa altura.
- Inertial Sublayer (ISL): Começa logo acima do limite da RSL e possui uma altura variável entre 20 e 250 metros. Nessa camada existe pouca variação causada por turbulências, e também onde é possível aplicar uma equação logarítmica para determinar o perfil de velocidades do vento, como num campo aberto.
- Mixed Layer (ML): Se inicia logo acima da ISL, com altura variando entre 250 e 2500 metros.

No caso desta pesquisa será observado o comportamento do vento na UCL, já que é onde o objeto de estudo está localizado. Nessa camada o fluxo é local e fortemente

influenciado pela sua canalização e interação com a rugosidade das superfícies (STATHOPOULOS et al., 2018). A velocidade média do vento dentro desta camada é menor do que em um terreno livre, além disso, devido a grande quantidade de obstáculos, a turbulência nessa região é maior (TOJA-SILVA; COLMENAR-SANTOS; CASTRO-GIL, 2013).

Na UCL, o fluxo de vento é praticamente governado pela geometria e, principalmente a altura, das edificações e sua proximidade e menos influenciadas pelos padrões do fluxo imediato (ISHUGAH et al., 2014). Dependendo da profundidade do cânion urbano, a camada superior (RSL) tem pouca interferência com os fluxos de ar internos ao cânion. A largura do cânion, por sua vez influencia na variação de velocidade, já, de acordo com o trabalho de Georgakis e Santamouris, a velocidade do vento é sempre maior no meio do cânion do que nas fachadas dos edifícios (GEORGAKIS; SANTAMOURIS, 2006).

#### **4.3.1 Caracterização física do escoamento do vento em relação a obstáculos**

A velocidade do vento pode ser descrita vetorialmente, para uma melhor análise de seus fenômenos, assim ele é decomposto nos vetores  $u$ ,  $v$  e  $w$ . Em casos de solo natural e campos abertos, os componentes vetoriais horizontais ( $u$  e  $v$ ) têm maior intensidade do que o componente vertical. Porém, quando o vento flui pelas obstruções do meio urbano a turbulência faz com que o componente vertical tenha variações em sua intensidade. (OKE et al., 2017).

Como o ar é um fluido, a teoria de escoamento vindo da mecânica de fluidos auxilia na compreensão de como a velocidade do vento varia de acordo com a altura, ou seja, como é o perfil de velocidades vertical do vento. Quando o fluido escoar sobre uma superfície a velocidade da camada mais superficial é nula, devido ao atrito da superfície. A partir dessa interação existe a formação de uma região em que a velocidade, em relação à altura, varia do valor nulo até o valor da velocidade do escoamento, a esta região se dá o nome de camada-limite de velocidade. (BERGMAN; LAVINE, 2019).

Assim, a velocidade do escoamento de ar sobre uma superfície qualquer também possui um perfil logarítmico, que pode ser definido através da seguinte equação:

$$u = \frac{u^*}{k} \ln \left( \frac{z - d + z_0}{z_0} \right)$$

Em que:

$u$ : Perfil de fluxo de vento normal ao solo

$k$ : Perfil de energia cinética turbulenta normal ao solo

$d$ : Altura de referência do solo

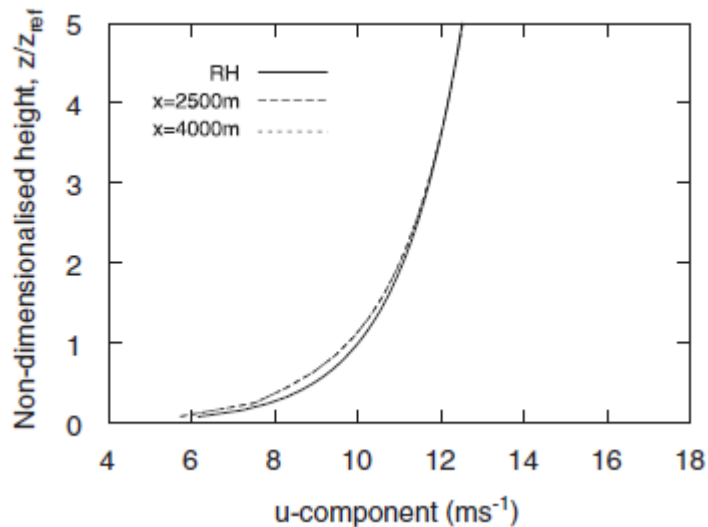
$z_0$ : Rugosidade aerodinâmica

$u^*$ : velocidade de atrito

A curva que representa o perfil logarítmico do vento, obtida através da expressão anterior é mostrada na figura 35.



Figura 35 - Perfil logarítmico de vento.



Fonte: HARGRAVES, WRIGHT, 2007

Entretanto, devido a alta rugosidade do terreno urbano, a velocidade do vento é modificada, com um perfil quase linear quando o vento atravessa por dentro da malha urbana. Quando o vento sai da Boundary Canopy Layer, ele começa a ganhar, novamente o perfil de velocidade logarítmica.

#### 4.3.2 Fluxo Laminar e turbulento, número de Reynolds

Um escoamento de um fluido ao redor de um obstáculo varia em função da geometria do obstáculo e das características do fluido, mais basicamente de sua viscosidade, que determina o quanto de energia será necessário para o desprendimento das camadas de um fluxo laminar para ele se tornar turbulento. (BLESSMANN, 2011).

Para identificar e prever em quais pontos haverá a transformação do fluxo laminar para o fluxo turbulento, é necessário saber a intensidade de forças de inércia relacionadas ao momento do fluido em movimento em razão das forças de coesão, originárias da viscosidade do fluido. A razão das forças de inércia com as forças de viscosidade a um dado ponto do fluxo de um fluido é chamado de número de Reynolds.

$$Re = \rho VL/\mu$$

Em que:

$Re$ : Número de Reynolds

$\rho$ : densidade mássica do fluído

$V$ : Velocidade do fluído

$L$ : largura normal ao fluxo, no caso dos corpos rombudos

$\mu$ : viscosidade dinâmica

O número de Reynolds abaixo de 2000 caracteriza um fluxo laminar, com suas forças de separação entre as camadas dominadas pelas forças de coesão. Número de Reynolds maiores que 300 indicam fluxos turbulentos, dominados pelas forças de inércia. Entre 2000 e 3000, os fluxos são instáveis, em que se alterna entre o estado turbulento e o laminar.

Os números de Reynolds ao redor de uma edificação tendem a ser mais altos, por causa do fator comprimento do corpo (variável  $L$  da fórmula anterior) e a baixa viscosidade do ar. Os padrões de fluxo ao redor de grandes corpos rombudos são relativamente constantes nos casos de velocidade do vento porque a separação do fluxo sempre ocorrerá nas arestas mais externas (BLESSMANN, 2011). Os fenômenos que serão abordados nessa pesquisa são de natureza turbulenta, já que a malha urbana não possui formas aerodinâmicas suficientes para que somente as forças de viscosidade do fluído (nesse caso, o vento) atuem no escoamento (OKE et al., 2017; BLESSMANN, 2011)

### **4.3.3 Turbulência e seus efeitos.**

Como visto acima, a turbulência é um fenômeno determinante no escoamento do vento sobre a superfície urbana. Ela é entendida como a oscilação da velocidade do vento, em função de uma média definida. Essa definição é originada da decomposição de Reynolds, onde analisa as três componentes vetoriais da velocidade do vento em duas parcelas, uma parcela que representa a média da velocidade fixa durante o período de

medição e uma parcela de desvio momentâneo, que descreve uma flutuação turbulenta. (CÓSTOLA, 2006). A turbulência pode ser definida matematicamente através das seguintes fórmulas:

$$u = \bar{u} + u'$$

$$v = \bar{v} + v'$$

$$w = \bar{w} + w'$$

Sendo os valores de  $u$ ,  $v$  e  $w$  em m/s.

Em que a velocidade vetorial do vento é dividida em suas três componentes cartesianas, e cada componente dividida em duas parcelas, uma representando a velocidade média do período e a outra representando a variação momentânea.

Essas variações são causadas pelas tensões internas do escoamento quando o vento flui sobre áreas com uma grande rugosidade e obstruções, o que cria turbilhonamentos que transferem energia cinética e massa para níveis acima ou abaixo em altura, ou seja, mudam os componentes da velocidade do vento. Esses turbilhões são de natureza aleatória, ou seja, não se consegue, através de um modelo matemático, prever o seu comportamento.

Os turbilhões variam em intensidade e direção, transferindo massa e dissipando energia cinética. Quando vai se afastando de sua origem, o turbilhão vai diminuindo de tamanho e a energia vai se transformando em calor, dá-se a esse fenômeno de cascadeamento. (CÓSTOLA, 2006).

Dada a sua natureza aleatória e inconstante o escoamento turbulento deve ser definido matematicamente, utilizando uma modelagem simplificada dessa modelagem. Particularmente, para os casos de modelagem do fluxo de vento é utilizado o modelo de duas equações  $\kappa$ - $\epsilon$ , desenvolvido por Launder, em 1972 (BREDEMODE; EÇA, 2018). O modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  requer a resolução de duas equações, a de energia cinemática  $k$  e a de transporte  $\epsilon$ . Este modelo é o mais popular para cálculos de fluxo turbulento de ar e

amplamente utilizado nas simulações de fluido dinâmica computacional (CFD) (HARGREAVES, WRIGHT, 2006).

#### **4.3.4 Aerodinâmica urbana e das edificações.**

Quando o fluxo de ar passa por um obstáculo, que pode ser uma floresta ou um conjunto de edificações, acontecem basicamente dois fenômenos: o efeito Coanda e o efeito esteira.

O efeito Coanda é o fenômeno referente ao surgimento de uma região de turbilhonamento logo atrás de um obstáculo, para após essa área surgir o recolamento do fluxo. O efeito de esteira ocorre em corpos não aerodinâmicos (corpos rombudos) em que o fluxo apresenta uma grande área de turbulência, na região próxima ao corpo a velocidade do fluxo está muito próxima a zero e apresenta muitos turbilhões, enquanto que nas regiões mais distantes, a velocidade do fluxo aumenta e se apresenta turbilhões distribuídos alternadamente, chamada de estrada de Von-Kármán (BREDERODE; EÇA, 2018).

Blessmann classifica os corpos que são obstáculos num fluxo da seguinte forma:

- Aerodinâmicos;
- Rombudos arredondados;
- Rombudos alongados.

Nos corpos aerodinâmicos, a pressão que o fluxo exerce sobre a superfície do corpo é distribuída de maneira uniforme, sua esteira é muito estreita e a resistência do corpo em relação ao fluxo é dada praticamente pelo atrito entre o corpo e o fluido.

A maioria das edificações no meio urbano pode ser classificada como rombudo, por ter uma forma não aerodinâmica (BLESSMANN, 2011). Os corpos rombudos são definidos por terem um formato que propicia um gradiente de pressão do fluido bastante desigual e de intensidade maior do que o atrito entre o fluido e a superfície do corpo. Devido a esse fato, o fluxo não segue o formato do corpo, mas abre uma esteira. O obstáculo bloqueia o fluxo principal de escoamento e cria uma grande esteira, que forma

uma área turbulenta. Ao mesmo tempo, um fluxo laminar se torna turbulento nos cantos do corpo rombudo. A esteira formada é muito maior e com mais turbilhões que o dos corpos aerodinâmicos.

Os corpos rombudos arredondados, por não possuírem arestas ou cantos vivos, as características da esteira variam de acordo com as características da superfície, do terreno onde o fluxo está ocorrendo ou mesmo do fluxo, entretanto a largura do corpo corresponde à largura da esteira. Pode-se considerar corpos rombudos arredondados prismas com mais de 5 faces, coberturas arredondadas, cilindros etc.

Também segundo Blessmann, é possível caracterizar o obstáculo através de suas proporções e formas. Pode-se caracterizá-lo através de sua altura, largura e profundidade.

O obstáculo alteado é aquele no qual a altura é a dimensão preponderante em relação às outras dimensões. Quanto mais alta for o obstáculo, menos a quantidade de fluido que escoar pelo topo influirá no escoamento global, e dessa maneira, caracterizando um escoamento com turbilhões preponderantemente horizontais. Nestes casos a esteira estará bastante agitada, isto é, a esteira apresentará muitos turbilhões e haverá grande perda de energia do fluxo.

Os obstáculos alargados são aqueles em que a dimensão da largura é preponderante às outras. Neste caso, quando a edificação está colada ao solo, surgem turbilhões alteados nos cantos do obstáculo. Forma-se turbilhões mais lentos na esteira, com um grande turbilhão colado à edificação.

Finalmente, os obstáculos profundos, onde a profundidade é preponderante em relação às outras dimensões. Se o fluxo incidir perpendicularmente ao lado menor, ou seja, paralelo ao lado profundo, o escoamento apresenta característica parecidas aos obstáculos alteados, entretanto o fluxo que sai do topo terá uma influência maior na esteira, o que diminui a movimentação da mesma. Os turbilhões se cruzam no plano médio vertical longitudinal. Quanto mais profundo for o obstáculo, pode-se formar dois turbilhões na estacionários na esteira.

O tamanho dos referidos obstáculos é genérico, podendo serem muito pequenos ou grandes, quando se analisa do fluxo de vento ao redor de edificações, outros fenômenos ocorrem devido a sua forma desses obstáculos e, principalmente pela existência da malha urbana, Prata (2005) elencou esses fenômenos, descritos a seguir:

O efeito de Pilotis ocorre quando as aberturas sob a edificação unem a zona de alta pressão da fachada exposta ao fluxo vento e a zona de baixa pressão da fachada oposta. Quanto maior a abertura, maior o efeito. Já nos edifícios acima de 15m de altura, o vento que incide diretamente sobre a fachada cria uma área turbulenta na base dela, sendo mais intenso quanto maior for a altura do prédio e se próximo uma outra edificação se localizar. A esse efeito do fluxo de vento, se dá o nome de efeito rodaminho.

Deflexão do vento na direção vertical: Edificações altas defletem para baixo parte do vento que incide em sua fachada de barlavento, aumentando a velocidade em zonas próximas ao solo. Edificações mais baixas, situadas nestas zonas, poderão ter as cargas de vento aumentadas por este efeito (ABNT, 1988)

Edifícios com formatos que se assemelham a pirâmides, como por exemplo os chamados edifícios bolo de noiva conseguem dissipar a energia do vento. Grandes quantidades de redemoinhos ocorrem no solo destas edificações. A esse fenômeno, a autora chama de efeito pirâmide.

Além dos efeitos, que ocorrem quando o fluxo de ar passa por um obstáculo isoladamente, existem fenômenos que alteram o vento que ocorrem quando o fluxo passa por um conjunto de edifícios ou obstáculos. Os trabalhos de Prata (2005) e Oke (2017) classificam os fenômenos que ocorrem nos cânions urbanos nos seguintes efeitos:

- Vórtices na seção do cânion ocorre quando o fluxo é perpendicular em relação ao eixo do cânion. Turbilhões de ar recirculante são criados dentro das paredes que delimitam o eixo do cânion urbano. A intensidade desses turbilhões aumenta com a velocidade do vento perpendicular ao eixo da via.
- Quando o fluxo de vento atua na direção do cânion, ou seja, quando ele percorre um corredor, ocorre o efeito de canalização. Dessa forma não há

recirculação de ar em turbilhões. Vale ressaltar que é uma estratégia interessante para cidades localizadas em climas tropicais, já que a canalização da brisa e do vento podem propiciar conforto ao transeunte.

- Além do efeito de canalização, edifícios altos e muito próximos podem causar um efeito de aceleração do vento, também conhecido como efeito Venturi. Esse efeito possui alguns requisitos geométricos em relação aos edifícios que formam o estreitamento, como por exemplo, os edifícios devem ter uma altura maior que 15 metros.
- Espaços abertos, como pátios centrais, praças e bolsões, que são projetados cercados por edificações sofrem o chamado efeito Malha, no qual as edificações evitam que ventos mais intensos incidam nesses espaços. Esse efeito é prejudicial para o conforto do usuário em cidades com climas quentes.
- Finalmente, quando duas massas de ar são unidas através de uma malha urbana ortogonal ocorre o efeito da união dessas zonas de pressão. A interligação dessas duas massas de ar com pressões diferentes faz com que surjam ventos no sentido do maior para o menor fluxo. A altura das edificações influi bastante para a ocorrência desse efeito.

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO DO VENTO PARA AVALIAÇÃO DO RECURSO EÓLICO

É possível calcular a velocidade num dado perfil vertical de vento sabendo valores de rugosidade de um terreno livre de obstáculos, e uma velocidade de referência, para isso utiliza-se a lei logarítmica, em que o perfil vertical do vento é dado por:

$$\frac{V(z)}{V(z_r)} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)}$$

Onde:

$V(z)$ : Velocidade do vento na altura  $z$

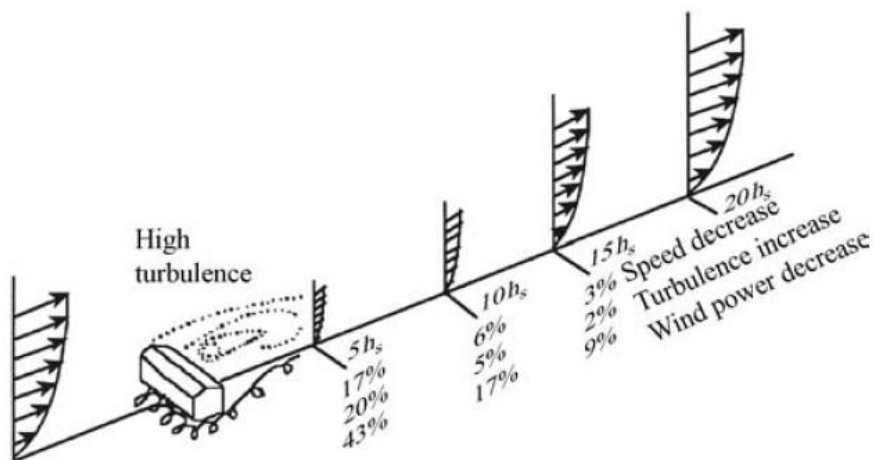
$V(z_r)$ : Velocidade do vento na altura de referência  $r$

$Z_0$ : comprimento de rugosidade, fator que caracteriza a rugosidade do terreno.

Fadigas, comenta em seu livro, que na maioria dos terrenos, a superfície do solo não é uniforme, podendo mudar significativamente de uma localidade para outra. O comprimento de rugosidade acaba se modificando com as mudanças naturais na paisagem. Este valor é tabelado para ser utilizado em cálculos simples de dimensionamento.

Tanto os obstáculos naturais, como árvores, pedras e morros, quanto os construídos pelo homem, como edifícios, silos etc. também modificam o perfil de velocidade dos ventos. Neste caso, o obstáculo cria o efeito de sombreamento, em que é uma região em que tem uma maior intensidade de turbulência, localizada logo a jusante da edificação. A figura 36 mostra o impacto que uma edificação com altura  $h$  tem no perfil vertical de vento que incide perpendicularmente a ele.

Figura 36 - Efeitos no perfil vertical de vento na velocidade, potência e turbulência causados por um edifício.



Fonte: Manwell, 2009.

A figura 36 mostra que o vento que é obstruído por um obstáculo, no caso, uma edificação, volta a ter a sua velocidade e potência originais depois de percorrer uma distância de 20 vezes a altura dessa edificação. Fenômeno semelhante acontece no chamado efeito esteira, que ocorre quando o perfil de vento também sofre desaceleração



e turbulências depois de passar por uma turbina eólica e incide em outra localizada logo atrás.

#### 4.4.1 Medição de vento

Como o vento pode ser afetado de diversas maneiras, o que o torna bastante difícil a caracterização das suas propriedades físicas para fins de exploração energética; é necessário, quando se tem o interesse de criar uma usina em uma determinada localidade, fazer um complexo trabalho de campo afim de medir, em alta resolução os dados de velocidade, direção, umidade, temperatura.

Para esse trabalho, levanta-se os dados através da instalação de várias estações de campanha, em formato de torre, que contém equipamentos que medem as propriedades físicas numa frequência de 10Hz, numa duração mínima de 1 ano. Os dados são catalogados num data logger e auditados por terceiros (COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA, 2007).

Com esses dados, é possível fazer a estimativa do potencial energético do vento através de um cálculo estatístico utilizando uma distribuição de probabilidade, que descreve o comportamento aleatório de um fenômeno. Os modelos de distribuição de probabilidade mais utilizados são os de Weibull e de Rayleigh (FADIGAS, 2011).

A densidade de probabilidade de Weibull pode ser determinada pela seguinte equação:

$$p(v) = \left[ \frac{k}{c} \right] * \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[ - \left( \frac{v}{c} \right)^k \right]$$

Onde:

- $P(v)$ : densidade de probabilidade da velocidade  $v$
- $v$ : velocidade medida
- $k$ : fator forma, valor dado a partir de tabelamento ou da razão entre o desvio padrão e a velocidade média da medição, pela seguinte equação:

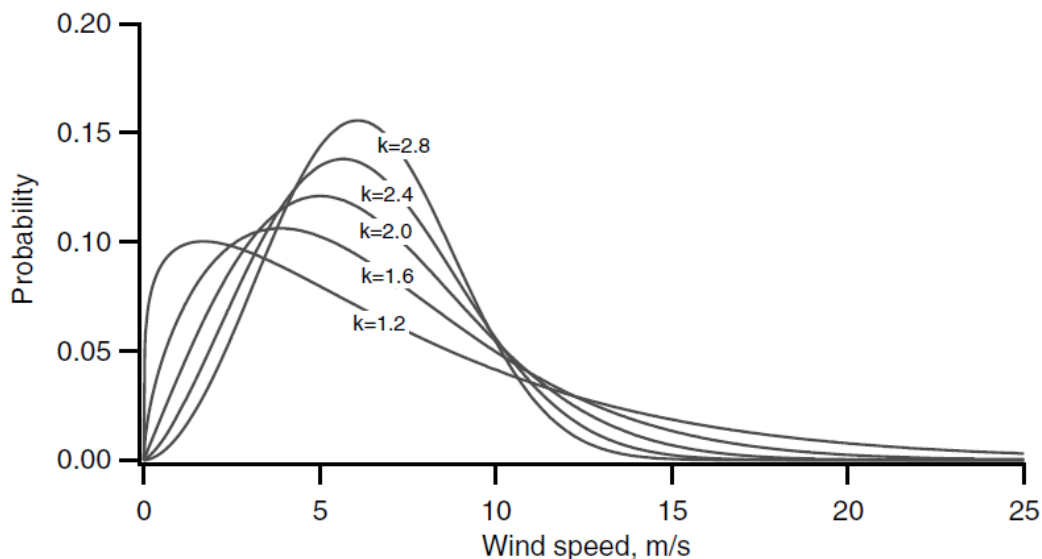
$$k = \left(\frac{\sigma_v}{\bar{V}}\right)^{-1,086}$$

- c: é o fator de escala da distribuição, também tabelado, mas pode ser calculado a partir da velocidade média obtida pela medição, o valor de k e a função gama, pela equação:

$$c = \frac{\bar{V}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}$$

A figura 37, abaixo, mostra as curvas de distribuição de densidade de Weibull para diferentes valores de k.

Figura 37 - Curvas de função de distribuição de densidade de Weibull para diferentes valores de k, para um vento de velocidade média 6 m/s.



Fonte: Manwell (2009).

A distribuição de Rayleigh é utilizada para ventos de velocidade moderada (até 3,00 m/s) e é mais utilizada para determinar a velocidade média de uma série de medições. Esta distribuição é um caso especial da distribuição de Weibull, em que o fator forma, k, possui o valor de 2,00 (SUNDERLAND et al., 2013).

As pesquisas em relação ao aproveitamento da energia eólica no meio urbano citam que um dos principais problemas é justamente o fato que a cidade é composta por vários

volumes que podem ser considerados obstáculos e mudanças de tipos de superfícies com uma grande variação de rugosidades, o que interfere ainda mais nas velocidades do vento e cria uma maior intensidade de turbulências. (KC; WHALE; URMEE, 2019; STATHOPOULOS et al., 2018; YANG et al., 2016).

## 4.5 TURBINAS EÓLICAS

A primeira forma de utilização do vento como fonte de energia foi através da transformação da energia cinética do vento em trabalho através dos moinhos de vento. Esse tipo de máquina surgiu na Pérsia, por volta de 200 a.C, embora haja suspeitas de que ela tenha sido desenvolvida há mais de 3000 anos no Egito. (FADIGAS, 2011)

### 4.5.1 Eficiência do rotor

A eficiência do rotor de um aerogerador é a relação entre a potência mecânica da turbina e a potência do vento não perturbado. Ela é dependente da velocidade de vento que entra na turbina ( $V_1$ ) e a velocidade do vento que sai da turbina ( $V_2$ ), e pode ser definida como:

$$C_p = \frac{\left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) * \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right]}{2}$$

A eficiência máxima é alcançada quando a velocidade de saída é igual a um terço da velocidade de entrada, dessa forma:

$$C_p = \frac{16}{27} = 0,59$$

Na prática são conseguidas sempre eficiência inferiores à 59%, já que o efeito esteira das pás, o perfil aerodinâmico delas e outros parâmetros de projeto também influenciam na eficiência total do rotor (FADIGAS, 2011)

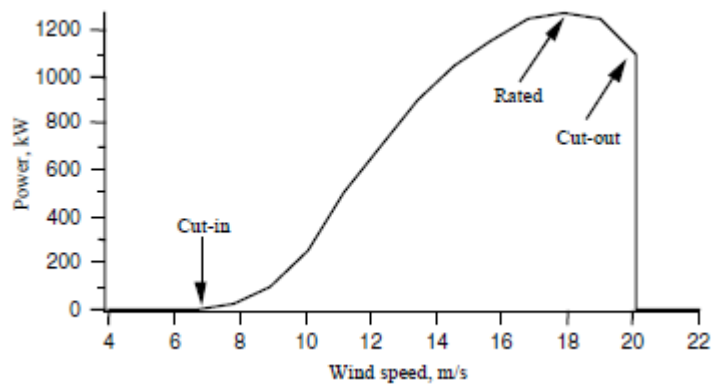
### 4.5.2 Curva de potência

A potência de uma turbina eólica varia com a velocidade do vento incidente nela. Dessa forma, para calcular a geração de energia de uma turbina eólica é usar a curva que

mostra essa variação, chamada de curva de potência. Ela é obtida por meio de testes da turbina em campo. A figura 38 mostra essa curva, mostrando três pontos que são importantes:

- Velocidade de cut-in: A velocidade mínima do vento em que a turbina gera eletricidade;
- Velocidade nominal: velocidade na qual a turbina gera sua potência nominal. Nem sempre é a sua máxima potência.
- Velocidade de cut-out: velocidade do vento a partir da qual o gerador é desligado para manter sua integridade física ou de suas cargas.

Figura 38 - Curva de potência típica de uma turbina eólica



Fonte: Manwell, 2009

As turbinas eólicas modernas podem ser classificadas de acordo com a posição de seu eixo em relação a direção de ataque do vento. As turbinas podem ser: turbinas de eixo horizontal (HAWT, de *horizontal axis wind turbine*) e de eixo vertical (VAWT, de *vertical axis wind turbine*).

#### 4.5.3 Turbinas eólicas de eixo horizontal (HAWT)

A turbina eólica mais utilizada é a HAWT, cujo eixo de rotação é paralelo com o solo, ela pode variar o número de pás, sendo o mais comum encontrar os modelos com três pás, elas são mais eficientes para a geração de energia e são empregadas principalmente em usinas eólicas (também conhecidas como fazendas eólicas).

Figura 39 - Exemplo de turbina de eixo horizontal.



Fonte: Manwell, 2009.

A turbina do tipo HAWT é composta pelos seguintes componentes:

- Rotor, que é formado pelas pás e seu suporte
- Sistema de transmissão mecânico
- Nacele
- Controle da turbina
- Suporte estrutural

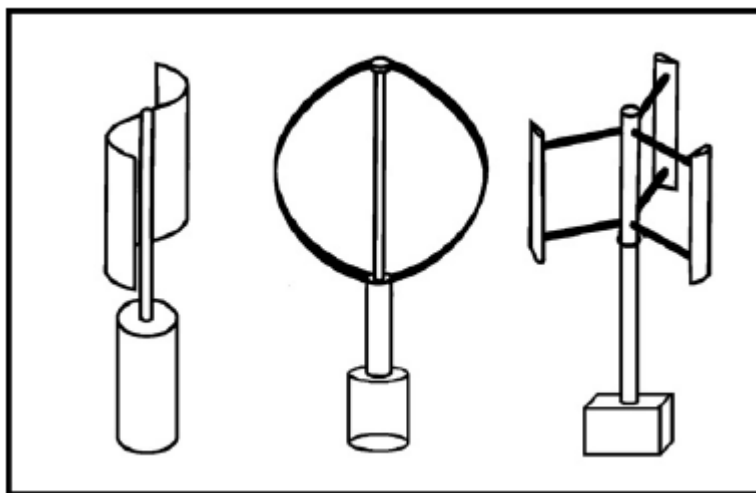
Um problema relacionado às turbinas horizontais (HAWT), é a menor performance em regiões de alta turbulência, sendo assim recomendadas para áreas muito abertas ou edifícios muito isolados. Adicionalmente, a alta variabilidade da direção do vento gerada pelas turbulências no meio urbano e as velocidades mais baixas também são desvantagens no emprego desse tipo de turbina. Em baixas velocidades de vento o tempo para que o rotor comece a girar (*start-up time*) é maior. Dessa maneira, se ainda for necessário instalar uma turbina eólica de eixo horizontal numa área urbana ou de grandes variações do vento da velocidade e direção do vento, o aerogerador tem que ser

instalado em grande altura ou com uma área de varredura maior, para compensar os efeitos da turbulência.

#### 4.5.4 Modelos de Eixo Vertical

As turbinas de eixo vertical (VAWT) são tipicamente desenvolvidas somente para o ambiente urbano. Mudanças na direção do vento tem poucos efeitos negativos neste tipo de turbina porque não precisa ser posicionado na direção do vento. Entretanto a eficiência total destas turbinas na produção elétrica é menor que nas HAWT.

Figura 40 - Modelos de turbinas de eixo vertical (VAWT).



Fonte: Eriksson, 2008

Historicamente, estas turbinas são categorizadas como Savonius ou Darrieus, de acordo com o princípio usado para capturar o fluxo de vento. Para o tipo Savonius, o vento empurra as lâminas, o que implica que a velocidade de rotação é sempre menor que a velocidade do vento. Ao contrário destes, o formato do rotor de tipo Darrieus consegue que o rotor gire mais rápido que a velocidade do vento.

As turbinas de eixo vertical têm vantagens significativas em relação as HAWT quando se fala em aplicações de pequeno porte, menores de 10kW. (RIEGLER, 2003) E aumentam com o ambiente urbano, já que elas conseguem suportar mais as mudanças de velocidade e de direção do vento. As turbinas são omnidirecionais e, portanto, não precisam estar direcionadas numa direção específica de vento. Esse tipo de turbina

também emite um nível baixo de ruído, causado pela baixa frequência de rotação e pela localização do maquinário elétrico, além de serem mais simples para construir (D'ALESSANDRO; MONTELPARE; RICCI; SECCHIAROLI, 2010).

Existem vários experimentos feitos para aumentar a produção de energia de uma turbina vertical. D'Alessandro, Montelpare, Ricci e Secchiaroli (2010) fizeram um experimento em túnel de vento e numéricos com o rotor de tipo Savonius. Comparado com os outros tipos de turbinas, ela possui um menor coeficiente de potência, mas traz outras vantagens como possuir uma baixa velocidade de inicialização e poder ser instalada em qualquer direção.

Sharpe e Proven desenvolveram uma turbina eólica com pás flexíveis as quais aumentam a eficiência e a redução das vibrações, que pode ser instalada tanto na vertical quanto horizontal, sendo que a estrutura funciona como um concentrador de vento. (SHARPE; PROVEN, 2010)

Eriksson apresentou uma análise comparativa entre dois tipos de VAWT (uma turbina Darrieus e um rotor em H) e uma HAWT. a HAWT tem um maior coeficiente de potência (embora os três valores sejam similares), mas há muitos fatores que fazem a tecnologia VAWT ser mais vantajosa. Entre elas está um comportamento melhor sob condições de vento de alta turbulência, a ausência de um mecanismo de controle de direção (já que são turbinas omnidirecionais), as baixas emissões de ruído (causado pela baixa velocidade de rotação e o posicionamento do maquinário elétrico, na base), baixas vibrações transmitidas para a estrutura, o baixo custo de construção e manutenção e maior simplicidade das estruturas. (ERIKSSON; BERNHOFF; LEIJON, 2008).

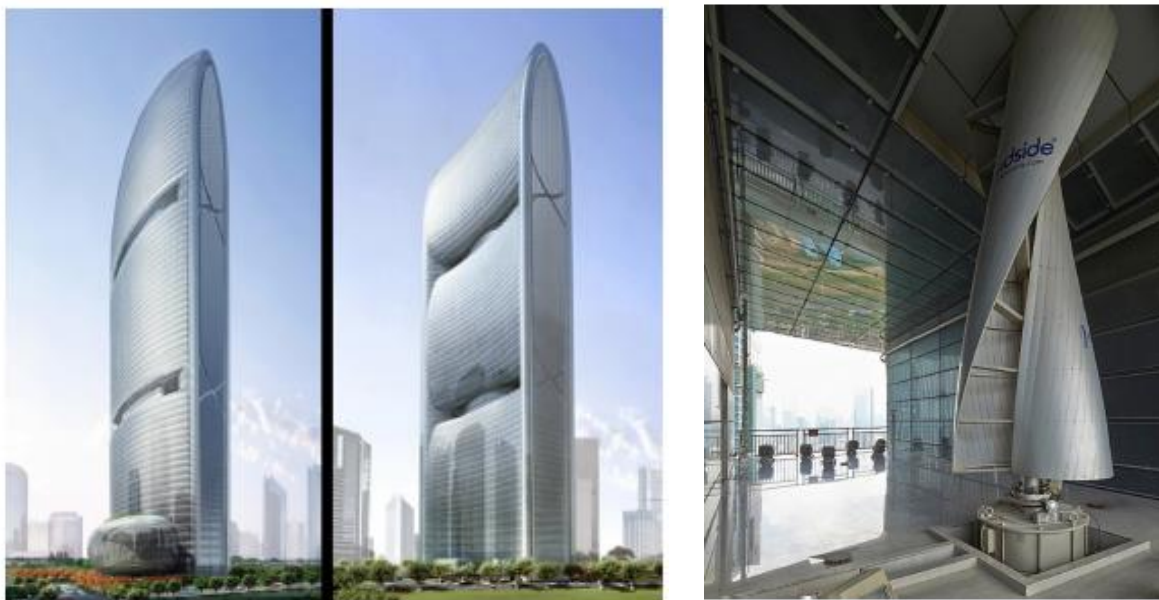
## 4.6 ARQUITETURA E TURBINAS EÓLICAS

É apresentado três exemplos de aplicação de turbinas de grande porte para edifícios que possuem a partir de 150 metros de altura. Devido a sua altura, esses edifícios conseguem aproveitar o vento que não sofre influência pelos obstáculos da malha urbana.

### 4.6.1 Pear River Tower

O edifício Pearl River Tower, projetado pelo escritório SOM, é localizado em Guangzhou, na China. Possui quatro VAWTs em formato de hélice, que foram projetadas para gerar energia com ventos de 2,7 até 40 m/s. A área de varredura dessas turbinas é de 10 metros quadrados. A velocidade do vento, que é amplificada pelo formato aerodinâmico das tomadas de vento, gera entorno de 11 kWh o que corresponde a 15% do consumo de energia da torre (LI; SHU; CHEN, 2016).

Figuras 41 e 42 – Edifício Pearl River Tower (esq.) e sua turbina vertical em formato de hélice (dir.).



Fonte (LI, 2016)



#### 4.6.2 Bahrain WTC twin towers

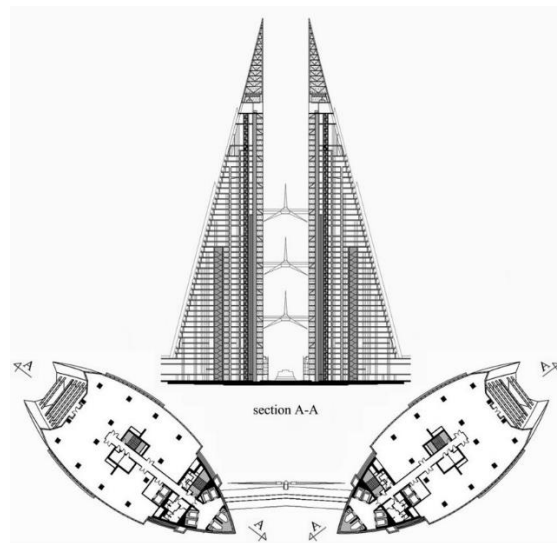
O edifício usa o seu próprio formato de planta para acelerar o vento ao redor das turbinas, através do efeito venturi, já que seu formato afunila o fluxo de ar para aumentar a eficiência do sistema de geração. como mostrado na figura 44. As três turbinas de eixo horizontal (HAWT) possuem 29 metros de diâmetro e fornecem cerca de 8-10% do consumo elétrico da edificação. A edificação possui 240 m de altura e 50 pavimentos.

Figura 43 - Torre do Bharain World Trade Center.



Fonte: STATHOPOULOS; ALRAWASHDEH;  
AL-QURAAAN; BLOCKEN; DILIMULATI;  
PARASCHIVOIU; PILAY, 2018

Figura 44 - Corte e Planta do Bharain WTc



Fonte: SZOLOMICKI, GOLASZ- SZOLOMICKA,  
2019

#### 4.6.3 Strata e1 Tower

O edifício residencial possui no seu topo três turbinas HAWT com nove metros de diâmetro, ele possui 147 metros com 43 pavimentos. As turbinas foram projetadas para gerar 8% das necessidades energéticas. Mas, por problemas de vibração e ruído, nos apartamentos do topo da edificação, as turbinas são raramente vistas girando. (URBAN, 2021)

1. Figura 45 - Imagem do Strata Tower.



1.1.

2. Fonte: Urban, 2021

## 5 ARQUITETURA GENERATIVA

A arquitetura generativa é um método diferenciado de processo de projeto que busca um melhor desempenho do edifício por meio da implementação de ferramentas computacionais capazes de manipular a forma por meio de vários estímulos, inclusive os ambientais, via ferramentas computacionais. O projeto paramétrico, tem ganhado destaque nos últimos anos, devido ao desenvolvimento de sistemas de desenho mais avançados, que são baseados em técnicas de scripts e programação visual. Ela foi desenvolvida por meio de ferramentas computacionais com o objetivo de manipular a geometria da forma em resposta à influência de variáveis de diferentes naturezas, incluindo as ambientais (DE BEAURECUEIL; LEE, 2015).

Em sua dissertação, Natividade (2010) aponta que a entrada dos computadores como uma ferramenta no processo de projeto arquitetônico modificou esse próprio processo. A partir do projeto de Guggenheim de Bilbao, as próprias ferramentas computacionais começam a despontar como o próprio meio de obter a forma da edificação e não mais como uma simples ferramenta de representação. Essa abordagem de projeto foi desenvolvida a partir do emprego das técnicas de representação usadas na indústria automobilística e aeroespacial. Indústrias as quais as técnicas de montagem e de pesquisa formal para aumentar o desempenho do produto (como, por exemplo, avaliação da aerodinâmica da forma para maior sustentação no ar ou alcançar uma maior velocidade) inovaram as técnicas de representação, através do cálculo de superfícies e linhas curvas que não poderiam ser definidas artesanalmente, sem o auxílio de uma ferramenta de cálculo. (KIERAN, TIMBERLAKE, 2004)

Segundo Leone (2017), o projeto paramétrico explora diferentes configurações geométricas através da possibilidade de variações das dimensões, proporções e formas através do uso de regras previamente determinadas, chamadas de algoritmos. A geração geométrica, através desses algoritmos, permite a criação de infinitas possibilidades de formas, euclidianas ou não. Esse processo contribui com soluções formais inesperadas e inovadoras obtidas com a manipulação e combinação dos parâmetros criados.

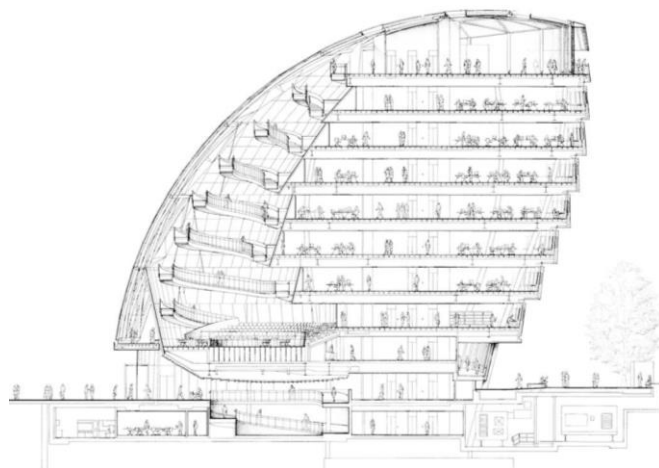
Alguns projetos que usaram essa concepção projetual são a torre de televisão em Cantão e o City Hall em, em que abriga a assembleia de Londres e a prefeitura da cidade. A torre (figura 46) foi proposta para conceber uma forma arquitetônica que fugia das formas angulares e com economia na sua fabricação e montagem. Já o prédio da assembleia londrina (figura 47) foi concebido num processo em que se buscava uma forma eficiente (LEONE, 2017).

Figura 46 - Torre de televisão em Cantão.



Fonte: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Torre\\_de\\_Cantão](https://pt.wikipedia.org/wiki/Torre_de_Cantão)

Figura 47 - Corte do projeto do edifício City Hall, em Londres.



Fonte: FOSTER & PARTNERS, 2016.

## 5.1 PROJETO BASEADO EM DESEMPENHO.

Gero, em seu artigo de 1990, apresenta uma esquematização simbólica da metodologia de projeto tradicional, e mostra as modificações desse esquema quando a solução projetual precisa atender a um determinado desempenho. O esquema resultante é um esquema cíclico em que sempre é testado se a solução proposta atende ao requisito, caso contrário, a solução retorna à fase anterior para correções e melhoramentos (GERO, 1990).

De acordo com Oxman (2006), forças de influência externa podem ser utilizadas para transformar um determinado modelo, ou seja, mudar o seu comportamento. Portanto a forma de um projeto pode ser originada considerando as influências ambientais como pontos de partida para a sua concepção.

O projeto baseado em desempenho segue esse princípio básico e pode ser utilizado para verificar se uma dada forma atende a um critério específico. Anteriormente, se verificava de forma qualitativa se uma determinada forma tinha um bom desempenho em relação a orientação solar do projeto, tanto que se reclamava que os antigos programas de CAD (Computer Aided Design) não conseguiam dar essas respostas ao arquiteto que operava os softwares (GONÇALVES et. al, 2015).

O projeto de edificações baseado em desempenho é um projeto que possui ferramentas para prever que uma edificação futura terá um dado comportamento (incidência da luz natural, transmissão e perda de calor, eficiência energética, condição estrutural, etc.) que responderá a um dado objetivo (normas de acessibilidade, certificações ambientais, demandas do cliente). A principal vantagem de um raciocínio projetual voltado para o desempenho é a objetificação do que se espera de uma edificação ainda não realizada e, portanto, de sua qualidade (HENS, 2012). Estes indicadores de desempenho são baseados em um conjunto de normativas que formam medidas bem definidas para se analisar desempenho da edificação e seus resultados (MALKAWI, AUGENBOE; 2003).

Esse tipo de processo de projeto começou a ganhar uma maior importância devido às demandas dos processos de certificação ambiental, como o LEED ou o AQUA, os quais pedem um desempenho energético, de conforto higro-térmico e de disponibilidade de iluminação natural mínimos para os projetos que pleiteiam os selos.

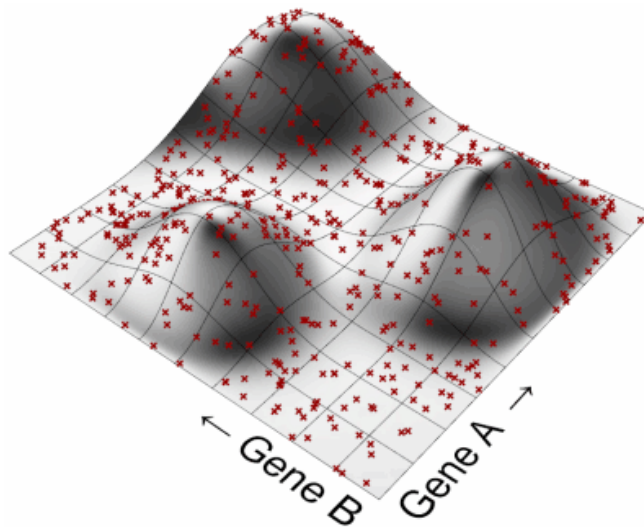
A introdução dos conceitos de indicadores de desempenho não muda radicalmente os fundamentos da análise de projeto, ela apenas o torna mais precisa através de uma especificação formal e a quantificação dos seus elementos (MALKAWI, AUGENBOE; 2003).

## 5.2 OTIMIZAÇÃO

Bentley (2002), em seu livro, propõe o seguinte problema a respeito da relação desempenho e solução: dado uma determinada demanda a ser atendida, existem um conjunto de  $n$  soluções que atendem essa demanda, algumas soluções podem atender de maneira melhor do que outras, portanto, como selecionar a melhor solução final?

É possível analisar o processo de otimização através de um diagrama de picos e vales, em que é possível obter quais soluções atendem ou não o fitness, dependendo da variação da característica que foi feita a otimização (RUTTEN, 2011). A figura 48 ilustra um diagrama desse tipo, também chamado de *fitness landscape*.

Figura 48 - Fitness Landscape entre duas variáveis genéricas de projeto.



Fonte: RUTTEN, 2011.

A figura indica todas as soluções que existem entre as duas variáveis de projeto, aqui identificadas como Gene A e B, os morros e vales da superfície são as soluções que se aproximam mais ou menos de determinados critérios.

Essa solução é encontrada depois de muitos testes (simulações) que determinam o desempenho dessas n soluções, modificando alguns parâmetros entre esses testes para verificar o quanto desse desempenho foi atendido. A esse processo dá-se o nome de Otimização. (BENTLEY, 2002).

Ou seja, otimização é o processo iterativo de se determinar entre várias opções de um objeto aquela que é a melhor possível dentro de certos critérios de escolha e limitações, com os recursos disponíveis (BRASIL, SILVA, 2019).

O processo de projeto tradicional é baseado na análise de diversas soluções e na viabilidade de sua execução. Com uma dada solução é preciso saber se vai aceitá-la como solução final ou refiná-la ainda mais. Dessa forma o aprimoramento do projeto não se dá de uma maneira formal, mas sim através da experiência e da intuição do projetista.

Por um outro lado, o processo de otimização é mais formal. Neste processo, as variáveis de projeto são identificadas primeiramente., o mérito relativo de uma solução é medido em comparação ao que se chama função objeto. As funções restrições de projeto,

dadas pelas limitações existentes, devem ser definidas em função das variáveis de projeto. Definidas essas grandezas, uma metodologia de otimização apropriada pode ser utilizada para aperfeiçoar um projeto inicialmente estimado. O projetista ainda precisa adotar um projeto inicial, mas o aprimoramento do projeto não depende apenas de sua experiência, e sim de um algoritmo de otimização.

### **5.2.1 Elementos de um processo de otimização**

De acordo com Brasil e Silva (2019), o processo de otimização possui basicamente três componentes: As variáveis de projeto, a função objeto ou função custo, e as restrições de projeto. Vierlinger (2013) também coloca um outro componente para otimizações multi-objetivo, chamado de fronteira ou dominância de Pareto.

As variáveis de projeto são um grupo de variáveis em que cada uma expressa o valor de um determinado parâmetro para um dado projeto. Cada variável de projeto é independente das demais, podendo assumir um determinado valor em um domínio contínuo, ou contínuo por partes, ou discreto. A seleção dessas variáveis de projeto é um importante passo, visto que toda a formulação do problema depende de suas definições. Elas devem ser selecionadas de tal forma que o processo de otimização seja implementável e o projeto final seja prático.

A função objetivo, ou função custo, determina o mérito relativo de vários projetos para um determinado sistema. A seleção da função objetivo é uma tarefa importante, pois, pois os projetos são melhorados a partir da minimização ou maximização de seu valor.

Antes de se tentar formular todos os fatores envolvidos num processo de dimensionamento, é importante saber se eles de fato têm influência sobre a solução. Não seria desejável considerar uma função objetivo geral demais, porque o resultado pode ser uma função objetivo plana que não seja sensível a mudanças nas variáveis de projeto e que não resulte numa melhoria do projeto inicialmente adotado.

Às vezes é desejável minimizar ou maximizar várias funções objetivo simultaneamente. Isso é chamado de otimização multicritérios ou otimização com objetivos múltiplos. Esse tipo de problema pode ser definido como: determinar um vetor



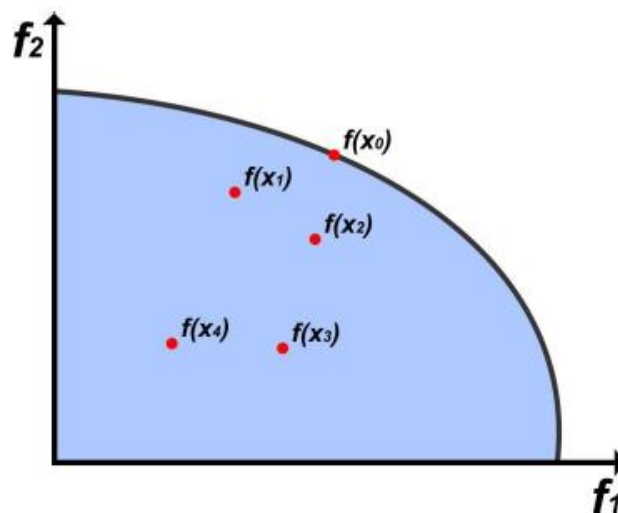
variável de projeto que satisfaz as restrições e otimiza um vetor função cujas componentes são as diversas funções objetivo. As funções objetivo consideradas nesse tipo de problema estão geralmente em conflito umas com as outras.

Os algoritmos atuais de otimização sempre tentam minimizar o valor da função objetivo, sendo que para maximizá-los é necessário que se negative o valor da função objetivo para que o algoritmo maximize seu valor. (ISHIBUCHI; SETOGUCHI; MASUDA; NOJIMA, 2017)

As funções de restrições de projeto são divididas em dois grupos: restrições estáticas e restrições dinâmicas. As restrições dinâmicas são colocadas ao longo de todo o intervalo de tempo no qual o sistema é analisado. Já as restrições estáticas independem do tempo e estão relacionadas a limites geométricos.

A dominância de Pareto é uma maneira de determinar a qualidade de uma solução em relação a uma outra. A otimização de Pareto de uma solução significa uma compensação ótima entre dois ou mais objetivos contraditórios, onde um objetivo não pode ser melhorado sem diminuir o outro. A soma de todas as soluções ótimas de Pareto forma a chamada Fronteira de Pareto, que pode ser representada por uma linha contínua, uma superfície ou uma hiper superfície- dependendo do número de funções objetivo e a dimensionalidade do espaço dos objetivos (VIERLINGER, 2013).

Figura 49 - Exemplo de uma dominância de Pareto.



A figura 49 representa um exemplo da dominância de Pareto, o gráfico representa as soluções entre as funções objeto  $f_1$  e  $f_2$  e todas as suas soluções, nas quais, quanto maior o seu valor, melhor atendem a determinada função, o ponto  $F_{(x_0)}$  está na fronteira de Pareto, na qual, a partir dela as soluções começam a prejudicar um ou outro valor.

### 5.3 ALGORITMOS GENÉTICOS

Um algoritmo basicamente pode ser resumido a uma receita, para fazer algo, e possui como característica essencial ser composto por um conjunto finito de regras ou operações precisas, inequívocas e simples, que ao serem seguidas conseguem conduzir à execução de uma ação. O algoritmo representa e soluciona um problema através de três etapas, os dados de entrada, os procedimentos que serão utilizados para manipular os dados de entrada e alcançar o resultado e os dados de saída. Essa estrutura pode utilizar instruções condicionais e estruturas de controle para tomar decisões e repetir ações até que se obtenha o objetivo. (MARTINO, 2015)

Os algoritmos genéticos (AGs) são métodos de pesquisa probabilísticos inspirados nos princípios de seleção natural e da genética. Foram desenvolvidos por John Holland e pelos seus alunos da universidade de Michigan durante os anos 1960. De acordo com Goldberg, a investigação tinha um duplo objetivo: efetuar um estudo rigoroso dos mecanismos de adaptação existentes na natureza e desenvolver modelos computacionais que retivessem os princípios básicos identificados nos sistemas naturais (PEREIRA, 2013).

Os AG funcionam através da criação de uma população de soluções que atendem, bem ou mal, a um determinado desempenho, chamado de *fitness*, os indivíduos (soluções) que melhor atenderem ao fitness são selecionados e os restantes eliminados. Os indivíduos selecionados passam por um processo de cruzamento entre si e de mutação de características, gerando novos indivíduos que, em teoria, podem atender melhor ao que o fitness demanda. Esse processo é repetido até que chegue num resultado ótimo, ou se obtenha o número máximo de gerações que foi configurado pelo usuário, ou que dado um número de interações, os resultados de aproximação ao atendimento ao fitness não tenham mudado significativamente (MARDLE, 1990).

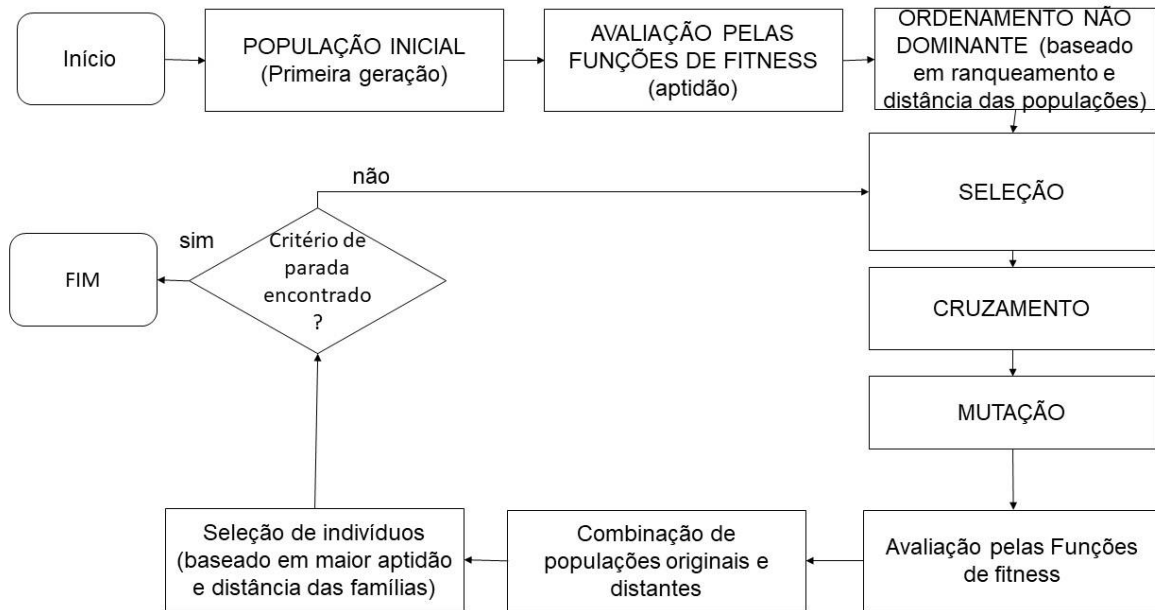
Quando se quer otimizar mais de uma característica da forma, o diagrama utilizado é a Fronteira Pareto, nesse caso é um diagrama tridimensional em que mostra as soluções dominantes (aquelas que resolvem uma característica em função do fitness, em detrimento da outra) e as não dominantes (em que as características que variavam resolvem em conjunto a função fitness).

De acordo com Pereira, os principais componentes de um processo de otimização via AG são a população, as gerações, os cruzamentos e a mutação. A população é a quantidade de potenciais indivíduos que são a solução do problema, e as gerações são as iterações do processo que está sendo otimizado. Para gerar novos indivíduos o algoritmo usa dois operadores, um de cruzamento entre indivíduos e outro de mutação, que é uma mudança aleatória.

Algoritmos genéticos são processos lentos, que podem levar de dias a semanas. Especialmente se é usado para problemas complexos que demandam muitas variáveis, já que necessita a simulação de vários indivíduos e gerações deles, ou seja, várias interações. Além disso a menos que os dados de entrada sejam muito bons, não é garantida que o algoritmo chegará em uma solução ótima, mas é mais garantido que se chegue num conjunto de soluções, que devem ser mais bem desenvolvidos pelo projetista.

O algoritmo usado nesta pesquisa é o chamado NSGA-2 (Non Dominated sorting Genetic Algorithm – Algoritmo Genético ordenador de soluções não dominadas) desenvolvido por Deb (2002), que é o algoritmo evolutivo mais popular para solucionar problemas de otimização multi-criterial (LUKIC *et al.*, 2017), este algoritmo está incluído no plugin do Rhinoceros 7, o Wallacei. A figura 50 mostra o esquema de funcionamento desse algoritmo.

Figura 50 - Diagrama de funcionamento do algoritmo NGS-2.



Fonte: (LUKIC *et al.*, 2017),

Como exemplos de aplicação desses métodos: Jalai et al (2019) utilizaram o método de geometria paramétrica, combinado com simulação de desempenho e processo de otimização para a geração de uma envoltória que tivesse um bom aproveitamento da iluminação natural de Teerã e com menor radiação solar incidente.

Enquanto Wortman (2017), utilizou os mesmos princípios para o controle de ofuscamento. Yeretian, Partamian, Dabaghi e Jabr (2019) já utilizaram os procedimentos para diminuir a insolação em 23% de um edifício localizado em Beirute. Zhang et al (2016) utilizou o procedimento para um contexto contrário ao anterior, uma forma que conseguisse ter uma maior radiação solar incidente numa região de frio severo.

## **6 UM BREVE HISTÓRICO DA EVOLUÇÃO DA TIPOLOGIA DE EDIFÍCIOS COMERCIAIS.**

É importante compreender o desenvolvimento histórico do projeto dos edifícios da tipologia de escritórios de serviços comerciais, tipologia essa que é o objeto de estudo desta pesquisa. Desta forma, o capítulo discutirá a respeito das origens da tipologia do edifício alto, sua evolução histórica no mundo e, mais especificamente na cidade de São Paulo, além de trazer autores que criticam essa tipologia, ou criticam como ela é feita atualmente.

A tipologia dos edifícios altos começou a ser desenvolvida nos Estados Unidos, no final do século XIX, nas cidades de Chicago e Nova York, utilizando ainda ideias de projeto oriundas do Art-Decó e do Art Nouveau. No final do século 19 o industrial Louis Sullivan constrói os primeiros edifícios que possuem mais de 10 andares de altura. A partir do fim da segunda guerra, com o domínio das ideias modernistas, que o edifício alto começa a desenvolver os mesmos paradigmas formais e de projeto que existem até hoje. (GONÇALVES, UMAKOSHI, 2010).

O edifício Seagram, projetado por Mies van der Rohe, em Nova York, no ano de 1958 é um dos primeiros edifícios corporativos com esta estética modernista. A forma da edificação é feita a partir da extrusão de sua planta, com a envoltória composta por vidro e estrutura metálica. Possui uma planta retangular, profunda, no qual em uma das laterais se posiciona o núcleo de serviços e circulação vertical internos. Como diz Montaner em seu livro. “Trata-se, portanto, de sua obra mais clássica e com maiores pretensões de se tornar modélica e universal” (MONTANER, 2001, pág 25).

Pode-se afirmar que o modelo do edifício Seagram foi baseado das premissas de Mies Van der Rohe em projetos não realizados para Berlim. O protótipo que possuía formas orgânicas e livres é transformado, pela evolução tecnológica da construção, em prismas e cristais autônomos quando foram aplicados primeiramente nos Estados Unidos e no Canadá.

O Seagram Building é composto por um paralelepípedo esbelto de trinta e nove andares, deslocado do alinhamento da rua, para dar ao edifício uma maior monumentalidade, a fachada é composta por montantes de aço e folhas de vidro, tendo uma aparência bastante semelhante a alguns edifícios posteriores desta tipologia.

Figura 51 - Torre Seagram.



Fonte: Jules Antonio from New York, NY, USA - Seagram Building, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10143230>

Em 1973 ocorreu o primeiro choque do petróleo, o que provocou um grande impacto no projeto da tipologia comercial de serviços, já que houve o aumento da preocupação do consumo energético das edificações num momento em que o combustível gerador de energia naquela época, o petróleo, tinha aumentado drasticamente de preço. O consumo dos grandes edifícios do setor comercial nos Estados Unidos chegava a consumir 100 kWh/mês, num momento em que a energia não era tão cara. Quando o choque do petróleo aconteceu, diversas ações governamentais e políticas públicas foram tomadas para diminuir esse consumo energético (ROMERO, REIS; 2012).

Esta crise também acabou provocando um êxodo industrial nos países desenvolvidos para países periféricos, nos quais não eram tão dependentes de petróleo para produção de energia. Dessa forma, para conseguir se reestruturar economicamente, estes estados e cidades começaram a investir no setor terciário. Assim, a década seguinte é marcada por uma expansão imobiliária provocada em investimentos do setor terciário.

Uma outra consequência direta dessa crise é o surgimento dos selos de certificação ambiental, como o LEED. Esses fatos permitiram que alguns arquitetos mudassem a forma tradicional de volumetria, da envoltória e dos sistemas de climatização e operação dos edifícios altos. (BENEVOLO, 2007).

Os arquitetos europeus ainda mudaram algumas características do modelo de edifícios comercial alto concebido por Mies, trocando a planta profunda por uma planta mais estreita e uma divisão mais celular dos espaços, os edifícios europeus conseguem aproveitar melhor a ventilação e iluminação naturais, diminuindo a dependência da climatização artificial (GONÇALVES, UMAKOSHI, 2010). Um exemplo clássico, o Commerzbank (1997), projetado pelo arquiteto Norman Foster, sai do modelo tradicional de prisma retangular para um conjunto de volumes alternados com aberturas para intensificar a ventilação natural

## 6.1 A CIDADE DE SÃO PAULO

Não se pode pensar na arquitetura dos edifícios de escritório de São Paulo sem pensar nos fenômenos de saturação e espraiamento que Nadia Somekh cita em seu texto. Os edifícios do setor de serviço são alocados em vetores de verticalização por causa da legislação que cria uma saturação muito rápida da infraestrutura e dos terrenos a venda. O edifício vertical localizado em São Paulo tem pouca área e volume, se comparado aos edifícios de outros países justamente por existir na cidade uma legislação que restringe o potencial construtivo para essa tipologia. Se for comparado com outras cidades do mundo, o coeficiente de aproveitamento médio de São Paulo é um pouco maior ao que era de Paris do século XIX, quando o elevador não era tão popular nas edificações (FIALHO, 2007).

Essa característica das edificações comerciais em São Paulo cria uma sobrecarga da infraestrutura e do sistema viário, e a necessidade de espalhamento dos prédios criam grandes distâncias para serem percorridas entre residência e trabalho diariamente, o espraiamento cria percursos que somente seriam possíveis com o uso de meios de locomoção de massa, que são insuficientes na cidade e com sistemas individuais, como o automóvel (FIALHO, 2007).

E a partir dessa dinâmica surge a necessidade de transferência de localidade do vetor de expansão dos edifícios do setor de serviço em São Paulo, ou seja, por conta do baixo poder construtivo que os terrenos possuem, cria-se uma valorização e saturação dos terrenos, o que faz que o mercado sempre procure por terrenos acessíveis e vazios. Assim aconteceu com a transferência das novas construções do centro para a Avenida Paulista, desta para avenida Brigadeiro Faria Lima e finalmente para a avenida Eng. Luiz Carlos Berrini (FIALHO, 2007).

Em São Paulo, os clusters de edifícios altos construídos para economia global sofrem da falta de qualidade do espaço urbano, agravado pela pobre infraestrutura, especialmente a respeito do transporte público. As pressões do mercado especulativo no processo de transformações urbanas que começaram no final dos anos 1980 viu a formação de clusters de edifícios altos nas áreas distantes do centro da cidade, onde alguma infraestrutura foi instalada durante e depois da construção dos edifícios. O processo inverso descrito levou a impactos sociais, econômicos e ambientais negativos, como o aumento dos problemas de mobilidade na cidade, e poluição. (GONÇALVES, UMAKOSHI, 2010).

### **6.1.1 Classificação histórica dos edifícios de São Paulo.**

É possível classificar, de acordo com Cursino (2015), os edifícios de São Paulo de acordo com características físicas de sua envoltória e processos construtivos, foi levado em conta a classificação já feita por Barghini et al (2014 e 1989). Cursino divide os edifícios em: tradicional, transição e contemporânea.

A tipologia tradicional representa as primeiras torres construídas na cidade de São Paulo nas décadas de 1910 a meados de 1940. Dessas destacam-se o Edifício Guinle,



o Edifício Sampaio Moreira e Edifício Martinelli. As principais características dos edifícios da tipologia tradicional, de acordo com os levantamentos das edificações são: estrutura de concreto armado; vedação externa em alvenaria de tijolos de barro, pé direito de 4 metros sem piso elevado e forro, janelões de vidro com possibilidade de abertura; WWR em torno de 30%; vigas e pilares aparentes; e laje com espessura de 15cm.

A chamada de tipologia de transição equivale historicamente às novas técnicas construtivas e experiências arquitetônicas trazidas ao Brasil pelos arquitetos europeus refugiados no país no período da Segunda Guerra Mundial, que compreende, dessa forma, edifícios construídos entre 1950 e 1980. Essa tipologia é chamada de transição, pois marca a linha de sucessão entre os edifícios tradicionais e os edifícios contemporâneos da fase seguinte. Nessa tipologia dois elementos principais conectam o estilo antigo, ao estilo futuro: a grelha estrutural (antigo) e o uso do vidro nas fachadas (futuro). As principais características dos edifícios da tipologia de transição, de acordo com os levantamentos das edificações são: estrutura de concreto armado; vedação externa em alvenaria de bloco de concreto, pé direito montado de acordo com a estrutura, com cerca de 3 metros, sem piso elevado e forro, maior ocorrência de aberturas envidraçadas, com WWR em torno de 60%; vigas recuadas, pilares recuados ou internos e laje com 20 cm de espessura. (CURSINO, 2015)

Nos edifícios de transição, a ventilação natural utilizada nos edifícios tradicionais para manutenção do conforto térmico deu lugar aos equipamentos de ar-condicionado do tipo janela, que se tornaram comuns nas fachadas, chegando, inclusive, a alterar a estética do edifício como um todo (CURSINO, 2015).

A tipologia contemporânea passou a se tornar comum na cidade de São Paulo a partir do fim da década de 80, com a expansão da construção civil para novos eixos além do centro e da Avenida Paulista. O eixo da Marginal Pinheiros, como é chamado, foi criado principalmente pela atuação do mercado imobiliário, que na década de 1980 recebeu muitos investimentos por representar uma alternativa mais segura frente à instabilidade econômica da época. Nessa fase surgiam os edifícios corporativos, que requerem o emprego de novas tecnologias construtivas para atender aos requisitos dos clientes, como andares maiores, piso elevado e vidros especiais. Nesse novo tipo de construção

o ar-condicionado central passa a ser requisito obrigatório de conforto (GUERREIRO, 2010).

As principais características dos edifícios da tipologia contemporânea, de acordo com os levantamentos das edificações são: estrutura de concreto armado, vedação externa em vidro laminado, pé direito maior para comportar o piso elevado e o forro, pano de vidro total em pelo menos duas fachadas, WWR de 80% ou mais, vigas recuadas, mais estreitas e prolongadas, laje com 20 cm de espessura. (CURSINO, 2015)

Nos edifícios da tipologia contemporânea o uso do ar-condicionado passou a ser fundamental, devido principalmente as maiores densidades de ocupação e cargas de equipamentos elétricos. No entanto, o ar-condicionado de janela deu espaço ao ar-condicionado central, o que transferiu as centenas de pequenos compressores pendurados nas fachadas para um espaço único- normalmente na cobertura ou no subsolo – onde um compressor de grande porte supre toda a demanda interna dos ambientes. Apesar de propiciar uma “limpeza” na fachada, o uso do ar-condicionado central requer a passagem de dutos para circulação de água fria e ar refrigerado, o que forçou o aumento do pé-direito e a instalação do forro (CURSINO, 2015).

### **6.1.2 Avenida Eng Luiz Carlos Berrini**

Até a década de 70, os vetores do centro de São Paulo e da avenida Paulista eram as únicas regiões que possuíam centros de negócio. Nelas se concentravam os grandes edifícios de escritórios e de comércio. Fora dessas duas áreas as atividades comerciais ocorriam nos subcentros ou em vias radiais, sem que elas competissem em importância com o centro e a avenida Paulista. Com a abertura da avenida Faria Lima e a inauguração do Shopping Iguatemi surgiu, nessa época, uma nova área de expansão do mercado imobiliário de escritórios. Sob esse aspecto, a instalação do Iguatemi teve impacto direto sobre a renovação do ambiente construído, ocasionando o adensamento e a mudança de uso de solo na região (NOBRE, 2000).

A partir de meados da década de 70 e 80, a concentração no Centro e na Paulista começa a se modificar com a expansão do mercado imobiliário de escritórios em direção Sul ao longo do eixo do vale do Pinheiros, em terrenos até então alagadiços e

abandonados, em áreas apontadas com potencial de uso industrial. Essa mudança teve como principal motivo o fato de que as áreas consolidadas apresentavam alto preço do terreno, que estaria ocasionando a inviabilidade dos empreendimentos imobiliários nessas regiões. (NOBRE, 2000)

De fato, no ciclo de valorização do capital imobiliário, a terra como matéria prima básica não reproduzível, já que ao término da obra é necessário um outro terreno para reiniciar outro ciclo de produção. Assim sendo, o lucro obtido no empreendimento é inversamente proporcional ao preço da terra. A concentração espacial de atividades econômicas na porção central da metrópole teria como consequência “níveis elevadíssimos de valorização da terra urbana, a intensificação crescente do uso do solo e a segregação espacial pronunciada das populações e atividades de maior capacidade econômica. (NOBRE, 2000)

Foi a partir desse conteúdo que os promotores imobiliários começaram a procurar novas áreas que apresentassem condições necessárias para o desenvolvimento de novas regiões de escritório – proximidade a bairros de renda elevada, facilidade de acesso e, sobretudo, disponibilidade de terrenos vagos, grandes e baratos, escolhendo a região do vale do rio Pinheiros. (NOBRE, 2000)

A partir dos anos 1970, a influência da arquitetura norte americana, casada com o rápido desenvolvimento do mercado de real estate e o crescimento da economia nacional, resultaram em mudanças na abordagem de projeto para a arquitetura comercial local. Tais mudanças resultaram em perdas no diálogo arquitetônico com o ambiente local e uma noção completamente diferente da imagem arquitetônica. Neste contexto, a era dos edifícios inteligentes em São Paulo nasceu com o edifício Citicorp na Avenida Paulista em 1988, projetado pelo escritório Aflalo & Gasperini, caracterizado pela automação dos sistemas da edificação (GONÇALVES, UMAKOSHI, 2010).

A parte do bairro do Brooklin referente à avenida Eng. Luiz Carlos Berrini era uma área residencial, com sobrados geminados e casas. Porém nos anos 60 foi aberta a via a avenida, que modificou as características residenciais da área e abriu espaços para a vinda de edifícios comerciais de escritórios. Nos lotes vizinhos à avenida, muitos terrenos

de casas foram incorporados e unidos para gerar espaço para novos empreendimentos comerciais, com cerca de 900 m<sup>2</sup>. (PIRRÓ, 2005)

Nesta região em específico existem vários projetos construídos do arquiteto Carlos Bratke que usava fachadas em vidro fumê e concreto aparente, além de estrutura em concreto aparente. Foram executados edifícios em concreto das mais variadas formas e volumes, mantendo ainda a definição das linhas ortogonais. Já para os anos 90 os edifícios começam a incorporar os vidros espelhados em suas fachadas e sistema central de ar-condicionado, o que elimina as antigas protuberâncias dos aparelhos de ar-condicionado de janela na envoltória. Começa a ter um aumento dos volumes já que se aumenta a área construída dos pavimentos e andares. (PIRRÓ, 2005)

Há uma diferença de altura entre os edifícios com frente voltados para a marginal do rio Pinheiros (Avenida das Nações Unidas) que possuem em torno de 30 pavimentos enquanto os edifícios vizinhos à avenida Luiz Carlos Berrini são mais baixos. A maioria dos edifícios mais altos na cidade, construídos nos últimos 10 anos ao longo da avenida Nações Unidas, não são tão altos quanto os edifícios vistos nos EUA, Europa, Ásia e, mais recentemente, no Oriente Médio. (PIRRÓ, 2005)

Já no final da década de 90, principalmente nas glebas vizinhas à marginal Pinheiros houve uma junção de lotes em torno de 14.000 a 33.000 m<sup>2</sup>, que foram valorizados graças a possibilidade de acesso às avenidas de caráter local e expresso, já que a Marginal Pinheiros se tornara uma grande via de acesso para a metrópole. Os edifícios que aí vieram possuem grandes dimensões precisando de lotes 15 a 30 vezes maiores que na década de 80. Os edifícios também desenvolveram grande altura superando os edifícios existentes até a década de 80 na região. Um deles é o World Trade Center, que é um complexo de uso misto, já que possui torre de escritórios, shopping e hotel. (PIRRÓ, 2005)

### **6.1.3 Edifícios comerciais contemporâneos**

A busca por mão de obra cada vez mais qualificada faz com que haja uma tentativa de atração através de uma imagem marcante da cidade, como shopping centers, teatros, hotéis, ou seja uma imagem de uma cidade de alta tecnologia para o habitante. Busca-

se fazer com que esta mão de obra, que exige um nível internacional de conforto conviva nesse bairro. (PIRRÓ, 2005)

Entretanto, se começar a citar a qualidade dessas edificações, a grande parte das fachadas não são eficientes para incidência de luz natural ou para ventilação natural, criando assim condições ambientais pobres de qualidade do ar interna, sendo totalmente dependente do sistema de ar-condicionado para controlar a temperatura e a renovação do ar interior. As fachadas não são adequadamente protegidas contra o excesso de radiação solar e não são projetadas para permitir a ventilação natural, isto quando janelas foram projetadas.

Atualmente os edifícios comerciais em São Paulo estão na geração de edifícios ditos “verde”, em que seus últimos exemplos têm reforçado o controle das condições ambientais de maneira artificial e automatizada, se tornando bastante similar com as torres norte americanas em termos de forma arquitetônica.

Demandas do mercado internacional tem promovido a procura da certificação norte americana, Leed, forçando mudanças no projeto de arquitetura e de engenharia dos edifícios altos de São Paulo para ajustar as economias do consumo de energia. A esse respeito, as principais mudanças são nas fachadas e nos sistemas prediais. Por exemplo, a curtain wall de edifícios altos convencionais foi substituída por fachadas com WWR de aproximadamente 50 por cento, seguindo as recomendações de projeto encontradas nas certificações a respeito do desempenho energético da fachada.

No início do século XXI, as certificações verdes tenham entram nos contextos do mercado de São Paulo e sua aplicação serviu para alguns empreendimentos icônicos. Entretanto, apesar da abordagem compreensível do sistema de avaliação norte americano, a grande questão de se aplicar qualquer sistema de avaliação internacional para certificação é a falta de critérios de desempenho locais, o qual leva para a adoção de critérios internacionais. (GONÇALVES, UMAKOSHI, 2010).

Apesar dos interesses do mercado nas certificações, existem ainda barreiras para a realização de projetos arquitetônicos que trazem boas respostas para as condições

climáticas locais, a lógica do processo de projeto que não permite o orçamento e o tempo para uma análise ambiental e cumprir com os objetivos contemporâneos de economia de energia. A introdução das novas tecnologias e novos valores pelo projeto de edifícios altos foram acompanhados pela maior perda da cultura modernista local com características a respeito da arquitetura bioclimática como a orientação, materiais e proteção à radiação solar e o layout do espaço interno, principalmente nas torres de escritório. Pesquisas em edifícios de escritório em São Paulo do final dos anos 90 demonstraram que nos últimos 30 anos, a cidade testemunhou grandes mudanças no projeto arquitetônico e no uso, com um grande crescimento do consumo energético da edificação. Primeiro, houve uma mudança na configuração do pavimento típico, saindo de pavimentos pequenos e retangulares, com divisão em salas que favoreciam a iluminação e ventilação naturais, para plantas quadradas e maiores com um layout de planta livre, dependente do ar-condicionado durante todo o período de ocupação. Em adição, proteções solares externas, as quais foram aplicadas largamente entre os anos 30 e 60, é raramente vistas na arquitetura comercial depois desse período, deixando as fachadas mais expostas aos efeitos da radiação solar. Em comum com o resto do mundo, o aumento de ganho de calor no ambiente de trabalho com o passar do tempo tem atuado em favor dos sistemas de ar-condicionado. Como em muitas cidades comerciais no mundo, a maioria dos edifícios altos em São Paulo são destinados para o mercado especulativo, mais do que para os edifícios que possuem um único dono. O resultado imediato é a distância entre os interesses e custos dos investidores e as vantagens ambientais e até econômicas para os ocupantes, quando lidam com estratégias para edifícios com uma melhor eficiência energética, caracterizados pela visão de mercado simular aqueles praticados na América do Norte. (GONÇALVES, UMAKOSHI, 2010).

## 7 EDIFÍCIO DE REFERÊNCIA.

Um dos objetivos da pesquisa visa a criação de um edifício de referência da tipologia de edifícios do setor de serviços da cidade de São Paulo. Este edifício é criado para comparar o consumo de energia elétrica anual com a geração de energia feita por sistemas de energia renovável implantados em sua envoltória e com sua forma otimizada.

### 7.1 BASES DE DADOS PARA CARACTERIZAÇÃO GERAL DO EDIFÍCIO DE REFERÊNCIA

O edifício de referência proposto para o trabalho representa o padrão de uso elétrico e de construção dos edifícios comerciais do setor de serviços típico para a cidade de São Paulo. O banco de dados utilizado para a sua composição é originário das teses de doutoramento de Cursino (2015), Pirró (2005) e Pereira (2017), além do relatório de *Benchmarking de escritórios corporativos e recomendações para certificação DEO no Brasil*, feito pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável, CBCS (2016).

A base de dados do relatório “*Benchmarking de escritórios corporativos e recomendações para certificação DEO no Brasil*” é de 249 edificações, sendo que destes 75%, ou seja, 186 edifícios, são localizados no eixo São Paulo e Rio de Janeiro. Do total de 249 edifícios, 157 enviaram dados de consumo total e 95 fizeram a diferenciação entre consumo das áreas privativas e das áreas comuns. O projeto foi iniciado em 2013, com a coleta de dados voluntária por integrantes e convidados do Comitê Temático de Energia do CBCS (CBCS, 2016).

A pesquisa para o doutorado de Arthur Cursino, que ocorreu em 2015, levou em conta uma base de dados disponibilizada na época através dos relatórios setoriais de Barghini et al (1989 e 2014) que divide a amostra de edificações comerciais do setor de serviços em três tipologias: tradicional, transição e contemporânea, com as suas características descritas segundo tabela 09.

Tabela 9 - Características construtivas de diferentes tipologias de edifício comercial do setor de serviços.  
Fonte: CURSINO, 2015.

Tipologia	Período histórico	Principais Características	Materiais	Materiais construtivos
Tradicional	1910-1940	Estrutura de concreto armado Pé direito de 4,5m WWR de 30%	Pisos e lajes de concreto, vedação em tijolo de barro maciço	Paredes externas: Transmitância (U): 1,863/ absortância solar: 0,50 Cobertura: U:0,895/ $\alpha$ : 0,70 Vidro: U 5,855 – Transparência (T): 0,898 – Fator Solar (FS): 0,862
Transição	1940-1980	Estrutura de concreto armado Pé direito de 3,5 m (com piso elevado e forro). WWR de 50%.	Pisos e lajes de concreto, vedação em bloco de concreto, paredes internas de gesso (drywall) vidro comum (6mm).	Paredes externas: U:2,374 – $\alpha$ : 0,50 Cobertura U: 1,298 – $\alpha$ :0,70 Vidro: U: 5,778- T: 0,881 – FS: 0,819
Contemporânea	1980 – Até hoje	Estrutura de concreto armado. Pé direito de 3,5m (com piso elevado e forro). WWR de 80%.	Pisos e lajes de concreto, vedação em bloco de concreto, paredes internas de gesso (drywall). Vidro laminado verde (8mm).	Paredes externas: U:2,374 – $\alpha$ : 0,50 Cobertura: U: 1,298 – $\alpha$ : 0,70 Vidro: U: 5,703 – T: 0,749 – FS: 0,624
Contemporânea com vidro refletivo	2000 – Até hoje	Estrutura de concreto armado. Pé direito de 3,5m (com piso elevado e forro). WWR de 80%.	Pisos e lajes de concreto, vedação em bloco de concreto, paredes internas de gesso (drywall). Vidro refletivo (8mm).	Paredes externas: U:2,374 – $\alpha$ : 0,50 Cobertura: U: 1,298 – $\alpha$ : 0,70 Vidro: U: 5,733 – T: 0,130 – FS: 0,308



Contemporânea com vidro hoje insulado	2000 – Até	Estrutura de concreto armado. Pé direito de 3,5m (com piso elevado e forro). WWR de 80%.	Pisos e lajes de concreto, vedação em bloco de concreto, paredes internas de gesso (drywall). Vidro insulado duplo (8mm + 8 mm de ar + 6mm)	Paredes externas: U:2,374 – $\alpha$ : 0,50 Cobertura: U: 1,298 – $\alpha$ : 0,70 Vidro: U: 2,635 – T: 0,20 – FS: 0,304
---------------------------------------	------------	--	---	---

A tese de doutorado de Pirró (2005) fez uma análise das edificações do bairro Berrini analisando as características da envoltória destas edificações. Diferentemente de Santos, a pesquisadora separa os edifícios construídos em seis agrupamentos diferentes, as características desses agrupamentos são mostradas na tabela 10.

Tabela 10- Características construtivas de diferentes grupos de edifícios comerciais do setor de serviços e localizados no Bairro Berrini. Fonte: PIRRO, 2015

Grupo	Características
1	Edifícios construídos na década de 80, com WWR médio de 28%, altura média de 15 pavimentos e com os seguintes materiais de revestimento: vidro com filme escuro, aparelhos de ar-condicionado do tipo “janela”, protegidos por veneziana, com envoltória exterior na cor preta e cinza. Nenhum edifício deste grupo possui proteções solares exteriores.
2	Edifícios construídos na década de 80, com WWR médio de 35%, altura média de 14 pavimentos e com os seguintes materiais de revestimento: vidro com filme escuro, com envoltória exterior na cor preta e cinza. Nenhum edifício deste grupo possui proteções solares exteriores.
3	Edifícios construídos na década de 80, com WWR médio de 55%, altura média de 5 pavimentos e com diversos tipos de materiais de revestimento. Alguns edifícios deste grupo possuem proteções solares exteriores
4	Edifícios construídos nas décadas de 90 e 00, com WWR médio de 36%, altura média de 16 pavimentos e com os seguintes materiais de revestimento: vidro refletivos, massa raspada, pastilhas, lajotas e alumínio. Nenhum edifício deste grupo possui proteções solares exteriores.
5	Edifícios construídos nas décadas de 90 e 00, com WWR médio de 48%, altura média de 17 pavimentos e com os seguintes materiais de revestimento: vidro refletivo, massa

- raspada, pedras, pastilhas, lajotas e alumínio, possuindo plantas com maior área que os do grupo 04. Nenhum edifício deste grupo possui proteções solares exteriores.
- 6 Edifícios construídos nas décadas de 90 e 00, com WWR médio de 84%, altura média de 20 pavimentos e com os seguintes materiais de revestimento: vidro refletivo, pedra e alumínio, possuindo plantas com maior área que os do grupo 4. Nenhum edifício deste grupo possui proteções solares exteriores.
- 

A pesquisa mais recente, de Pereira (2017), analisa a produção de edifícios comerciais do setor de serviços produzidos entre os anos 2000 e 2016 em edifícios que possuem certificação ambiental LEED ou AQUA para a verificação do desempenho desta tipologia.

O levantamento foi feito através dos sites das instituições certificadoras responsáveis (GBC -Green Building Council Brazil e a Fundação Vanzolini). Foram levantados 38 edifícios de escritórios certificados na cidade de São Paulo pelo Leed na categoria Core & Shell (envoltória e Estrutura Principal). Em relação à certificação AQUA foram levantados 6 edifícios de escritório. Desta forma, totalizando 43 edifícios.

Deste total de 43 edifícios levantados foi selecionada uma amostragem de 70%, no caso 28 edificações, para aprofundamento da coleta de dados. Estas 28 edificações foram selecionadas considerando uma maior facilidade de acesso aos dados construtivos e considerando o projeto e obra realizados por diferentes arquitetos e construtoras. Para esta amostragem, a pesquisadora fez uma pesquisa mais aprofundada sobre as principais características construtivas delas. Os dados obtidos que serviram para montar um modelo base para as simulações são:

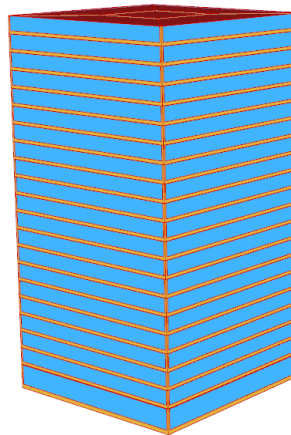
- Formato da planta
- Proteção solar: se existe proteção externa (brises ou proteção interna (persianas, telas solares etc.) e se esta proteção solar tem algum tipo de automação
- Verificação se há ou não núcleo central (core)
- Profundidade da Planta
- Tipo de vidro utilizado com dados de transmissão luminosa (TL) e fator solar do vidro (FS)

- WWR (window wall ratio) das fachadas
- Pé direito do ambiente.

## 7.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E FÍSICAS DA ENVOLTÓRIA

O edifício de referência foi modelado dentro do software *Honeybee*, plugin do *Rhinceros 7*. A edificação possui 21 andares, sendo 1 pavimento térreo e 20 pavimentos tipo, com uma planta de tamanho 40m x 40m que foi dividida em cinco zonas térmicas, sendo quatro periféricas e uma central. O gabarito do edifício ficou em 75 metros com pé direito de 5,00 m para o pavimento térreo e 3,50 m para o pavimento tipo. O a proporção entre pano de vidro e fachada opaca (WWR- *Window Wall Ratio*) da edificação é de 80%. O edifício de referência está ilustrado na figura 52.

Figura 52 - Edifício de referência



Fonte: Elaborado pelo autor.

A envoltória do edifício de referência é caracterizada por ser uma curtain wall com uma WWR (Window Wall Ratio) de 80% nas áreas livre e possuir uma área envidraçada de fundo opaca (normalmente denominada de shadowbox) que esconde vigas e parapeitos.

A composição e transmitância dos materiais da envoltória estão descritos nas tabelas 11,12 e 13, abaixo. A transmitância mostrada nas tabelas foi calculada através da metodologia da NBR 15220-2 2005, entretanto sabe-se que o Energy Plus utiliza uma

outra metodologia, o CFT para calcular a transmitância dos componentes da envoltória (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2021).

Tabela 11 - Características físicas dos componentes da cobertura externa. Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Componente Cobertura Externa						
Material	Espessura [m]	Condutividade [W/(m*K)]	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	Calor específico [kJ/(Kg*K)]	Absortância	Transmitância do componente
Asfalto	0,009	0,17	1000	1460	0,98	1,015
Argamassa	0,005	1,15	2100	1000	0,8	
Poliestireno	0,01	0,04	35	1420	0,3	
Laje de concreto	0,2	1,75	2400	1000	0,8	
Camada de ar	0,2	Resistência do ar	0,21			
Forro de gesso	0,05	0,35	1000	840	0,2	

Tabela 12 - Características físicas dos componentes da parede externa. Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Componente Parede Externa						
Material	Espessura [m]	Condutividade [W/(m*K)]	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	Calor específico [kJ/(Kg*K)]	Absortância	Transmitância do componente
Vidro refletivo	0,008	0,8	2200	100		2,36
Camada de ar	0,05	Resistência da camada de ar	0,16			
Bloco de concreto	0,09	1,75	2400	1000	0,8	
Argamassa	0,025	1,15	2100	1000	0,8	

gesso	0,005	0,5	1300	840	0,2
-------	-------	-----	------	-----	-----

Tabela 13 -Características físicas dos componentes da divisória interna. Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Divisória Interna						
Componente	Material	Espessura [m]	Condutividade [W/(m*K)]	Densidade [kg/m³]	Calor específico [kJ/(Kg*K)]	Absortância
	Gesso acartonado	0,01	0,35	1000	840	0,2
	Poliestireno	0,05	0,04	2100	1000	0,3
	Gesso acartonado	0,01	0,35	1000	840	0,2

O elemento envidraçado que foi empregado na simulação do modelo de referência foi o da marca Sain Gobain, de modelo Cool-lite – SKN\_054II. O vidro escolhido possui as características descritas na tabela 14:

Tabela 14 - Características físicas do vidro usado na envoltória. Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

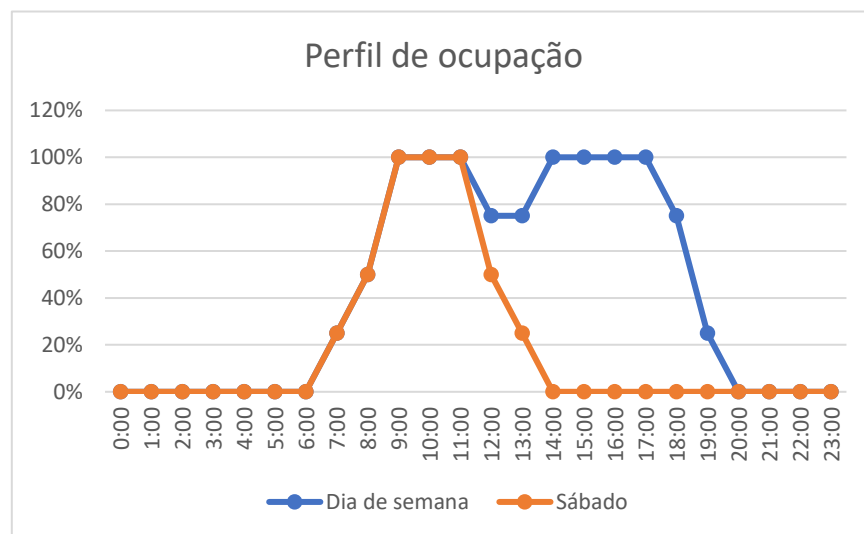
Característica	Valor
Espessura [m]	0,008
Transmitância solar na Incidência normal	0,26
Refletância Solar frontal na incidência Normal	0,46
Refletância Solar traseira na incidência normal	0,467
Transmitância visível na incidência normal	0,5
Refletância visível frontal na incidência Normal	0,23
Refletância visível traseira na incidência Normal	0,25
Emissividade hemisférica infravermelha frontal e traseira	0,84

Os dados foram obtidos através do Software Window, produzido pelo laboratório de Berkley (LBL). Os dados médios espectrais foram inseridos no objeto do EnergyPlus *WindowMaterial: Glazing*.

### 7.3 PADRÕES DE USO DA EDIFICAÇÃO

Os perfis de operação do edifício são originários de diferentes perfis de uso e operação de acordo com o que é visto no relatório do CBCS (2016) e na tese de Cursino (2015). O perfil de ocupação é apresentado na figura 53.

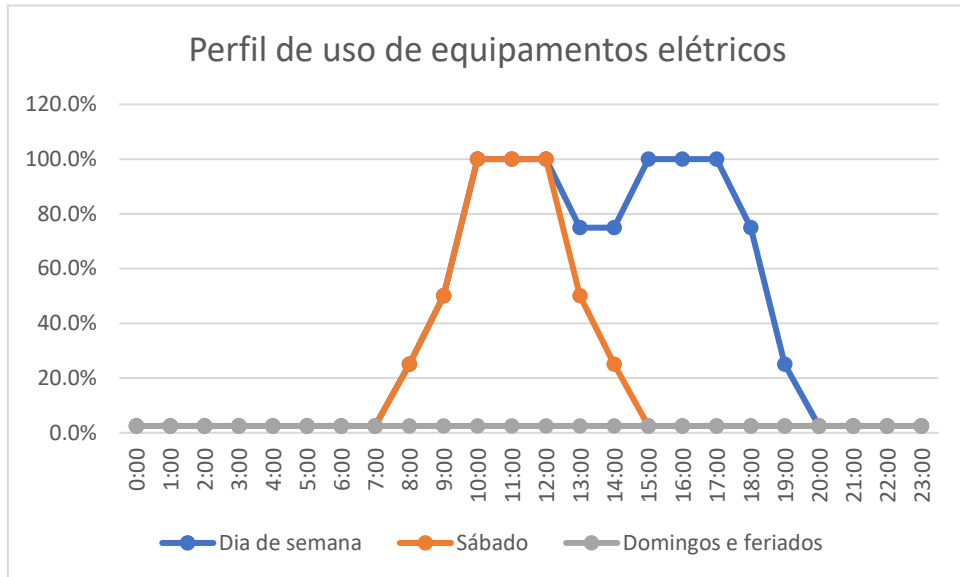
Figura 53 - Perfil de ocupação do edifício de referência



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Segundo o perfil de ocupação mostrado, o edifício fica vazio durante a manhã dos dias de semana e sábados até às 07h00 e depois sobe para 50% às 08h00 e para 100% das 09h00 até o meio-dia. Neste ponto os perfis de ocupação de sábado e de dia de semana se divergem, para o sábado a quantidade de pessoas cai para 50% às 12h00 e o edifício se esvazia às 14h00. Para os dias de semana é previsto um intervalo entre às 12h00 e às 14h00 para o almoço dos ocupantes, no qual o nível de ocupação cai para 75%; depois das 14h00 o edifício volta a ter 100% de ocupação até às 17h00, quando os ocupantes começam a ir embora, até às 20h00, quando o prédio se esvazia.

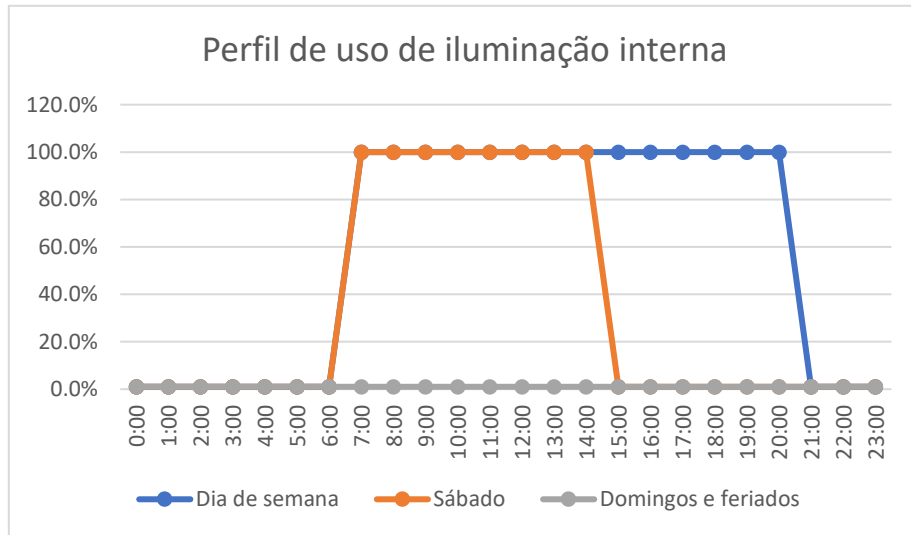
Figura 54 - Perfil de uso dos equipamentos elétricos do edifício de referência



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Os equipamentos eletrônicos são ligados às 07h00, quando o edifício começa a ser ocupado. A carga máxima acontece às 9h00 e se mantém até as 12h00, onde nos dias de semana, os ocupantes vão para o almoço ou, nos fins de semana, os ocupantes saem da edificação. Nos dias de semana há novamente um pico a partir das 15h00, que se mantém até as 18h00. Nos domingos e feriados, a carga é mantida a 2,5%, representando os equipamentos em stand-by.

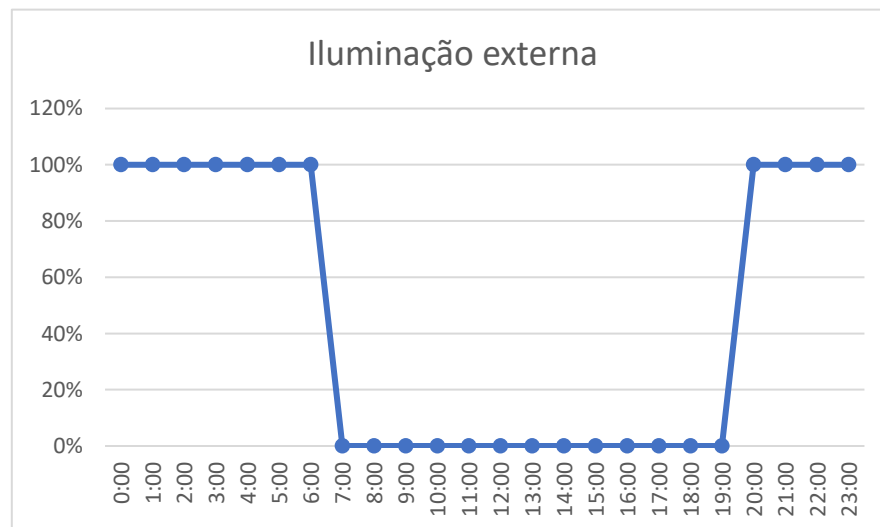
Figura 55 - Perfil de uso de iluminação interna do edifício de referência



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O perfil de iluminação interna começa em 1% da carga durante a madrugada até o momento em que o edifício começa a ser ocupado, 07h00. Durante os dias de semana, o edifício fica iluminado, com 100% do consumo das 07h00 até as 21h00, enquanto aos sábados, o edifício fica iluminado 100% das 07h00 até as 15h00. Aos domingos e feriados, a iluminação fica em 1% da carga durante o dia inteiro

Figura 56 - Perfil de uso da iluminação externa do edifício de referência

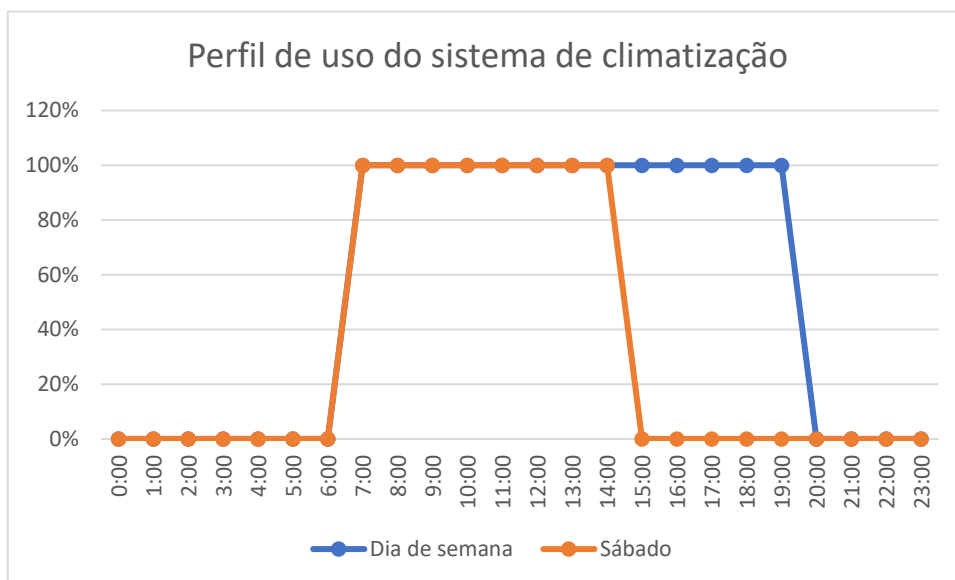


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.



O perfil de uso de iluminação externa usa 100% da carga durante à noite. Da meia noite até às 7h00 da manhã, a partir desse horário a iluminação externa é desligada até às 19h00, quando novamente é ligada em sua totalidade até as 07h00 da manhã do dia seguinte.

Figura 57 - Perfil de uso do sistema de climatização do edifício de referência



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O sistema de ar-condicionado se mantém desligado até as 06 da manhã, quando é ligado para a entrada dos ocupantes, se mantendo acionado até às 20h00, nos dias de semana e até às 15h00 no sábado.

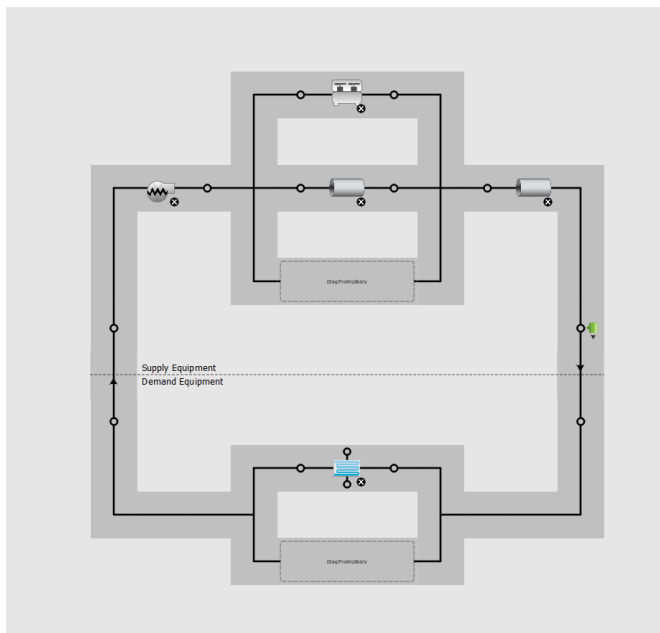
#### 7.4 SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR

De acordo com o DEO, a grande maioria dos edifícios possuem um sistema de ar-condicionado de expansão indireta, sendo o sistema central de água gelada (CAG) o mais projetado para essas edificações. (CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 2016).

O sistema de condicionamento de ar do edifício de referência é baseado no sistema feito por Cursino, que consiste num sistema de fan-coils, um em cada zona térmica que, fornece ar gelado à 12,8°C a ser misturado com o ar do ambiente. As figuras

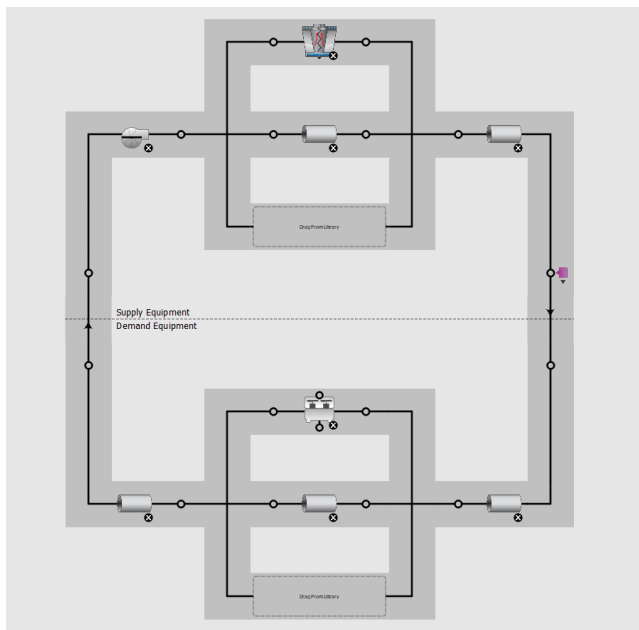
58 e 59 mostram a composição genérica desse sistema, feito no programa de simulação de desempenho energético Open Studio.

Figura 58 - Sistema de ar-condicionado do edifício de referência- lado da demanda



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 59 - Sistema de ar-condicionado do edifício de referência- loop de condensação



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

O sistema de ar-condicionado é um sistema de expansão indireta com chiller centrífugo e resfriamento de água. A potência dos equipamentos foi calculada através das opções de auto dimensionamento do Energy Plus e as informações sobre a taxa de renovação de ar e eficiência dos equipamentos foram obtidos no Anexo G da norma ASHRAE 90.1. 2010.

Tabela 15 - Características do sistema de ar-condicionado do edifício de referência. Fonte: CURSINO (2015).

Características	Valores
Sistema	Expansão direta (Central de Água Gelada – CAG)
Taxa de infiltração	07 trocas de ar por hora (ac/h)
Taxa de renovação de ar por pessoa	0,009440 m <sup>3</sup> / pessoa
Modelo do chiller	Centrífugo
Coefficiente de Performance (COP) do Chiller	5,50 W/W
Curvas de carga do Chiller	Banco de dados do EnergyPlus: DOE-2 Centrifugal/ 5,50 CCOP
Temperatura da água fria	6,67 °C
Temperatura do fluido de condensação	29,4 °C
Temperatura de resfriamento nas áreas privativas	24 °C
Bombas de Água Gelada Primárias (BAGP)	Vazão fixa
Bombas de Água Gelada Secundárias (BAGS)	Vazão variável (com variador de frequência)
Bombas de Água de Condensação (BAC)	Vazão fixa

Torres de resfriamento	Velocidade fixa
Fan Coils	Pressão de operação:350 Pa
Distribuição do ar resfriado	Um por zona térmica Variable Air Volume (VAV)

## 7.5 INTENSIDADE DE USO ENERGÉTICO EUI

O edifício de referência foi simulado quatro vezes para obter seu consumo energético para cada um dos seguintes cenários: sem entorno, entorno da Região 01, entorno da Região 02 e entorno da Região 03.

Os resultados dos consumos simulados foram divididos nos principais componentes de consumo energético: Iluminação interna e externa, equipamentos internos (incluindo elevadores), ventiladores, bombas do sistema de água gelada, torre de resfriamento e sistema de resfriamento. O consumo anual de cada categoria foi dividido pela área total de piso da edificação para determinar seu EUI (Energy Use Intensity), ou seja, quanto é o consumo por área climatizada do edifício. Foram também simulados os consumos mensais e de solstícios de inverno e de verão.

## 8 SIMULAÇÕES E VARIAÇÕES PARAMÉTRICAS

Neste capítulo serão mostrados os resultados obtidos das simulações feitas pelas pesquisas e análises comparativas entre eles.

### 8.1 DETERMINAÇÃO DA GEOMETRIA

Para a composição do modelo tridimensional da área de estudo, foram utilizadas as bases de dados indicadas no capítulo de metodologia, usando os softwares lá indicados. A figura 60 mostra o resultado da modelagem tridimensional.

Figura 60 - Modelo tridimensional da área de estudo.

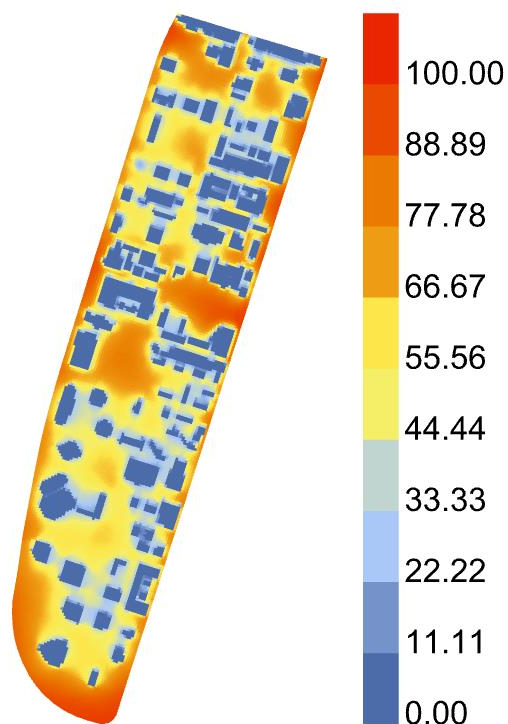


Elaborado pelo autor, 2022

### 8.2 ANÁLISE DA RADIAÇÃO SOLAR

Como dito no capítulo a respeito de energia fotovoltaica, um indicador importante que sumariza a obstrução do entorno a radiação oriunda do céu aberto é o *Sky View Factor* (SVF), dessa forma foi feita uma análise desse indicador aplicado ao piso, utilizando as ferramentas do plugin *Honeybee*. A figura 61 mostra o resultado dessa simulação.

Figura 61 - Análise de SVF da área de estudo.

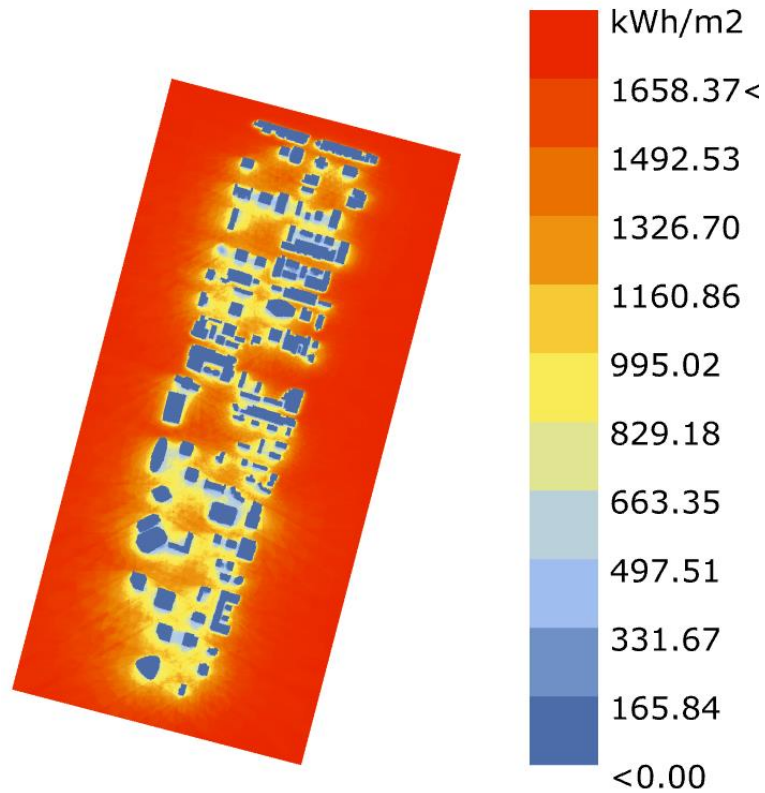


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O resultado dessa análise mostra que existe três faixas quase distintas de SVF, a Região Norte possui um SVF entre 100% e 88%, enquanto a região central possui um SVF entre 80% e 66,67% e na região sul é onde a diferença do SVF se destaca onde existe uma região com valores variando entre 55,56% e 44,44% do indicador.

Para complementar essa análise, foi feita uma simulação de radiação solar cumulativa incidente no piso, que está representada na figura 62. Na imagem, é possível ver que a região mais ao norte recebe níveis de radiação acima de 1600 kWh/ m<sup>2</sup> /ano, enquanto a região central da figura recebe um valor aproximado entre 1422 kWh/ m<sup>2</sup>/ano e 1244,44 kWh/m<sup>2</sup>/ano. A região mais ao sul possui uma radiação incidente entre 1066,67 kWh/m<sup>2</sup>/ano e 888,89 kWh/m<sup>2</sup>/ano.

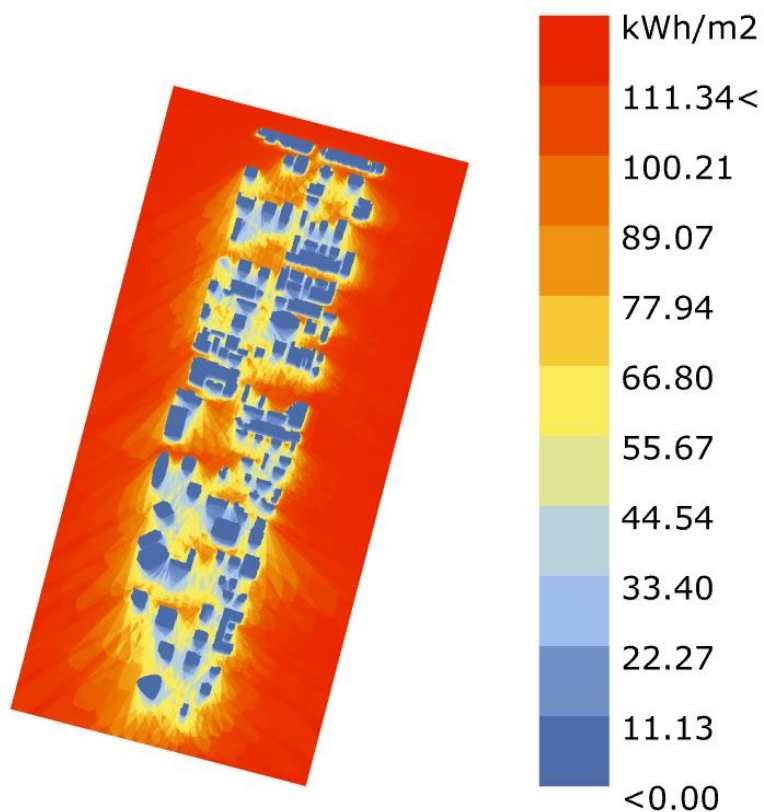
Figura 62 - Radiação cumulativa incidente no piso da área de estudo durante o ano.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Durante o mês de junho, representado na figura 63, a radiação cumulativa incidente cai abruptamente mostrando área próximas a 33,40 kWh/m²/ano. Na imagem é possível ver que a região mais ao norte recebe níveis de radiação acima de 44,54 kWh/m²/ano, enquanto a região central da figura recebe um valor aproximado entre 33,40 kWh/m²/ano. A região mais ao sul possui uma radiação incidente entre 22,27 kWh/m²/ano.

Figura 63 - Radiação cumulativa incidente no piso da área de estudo durante o mês de junho.

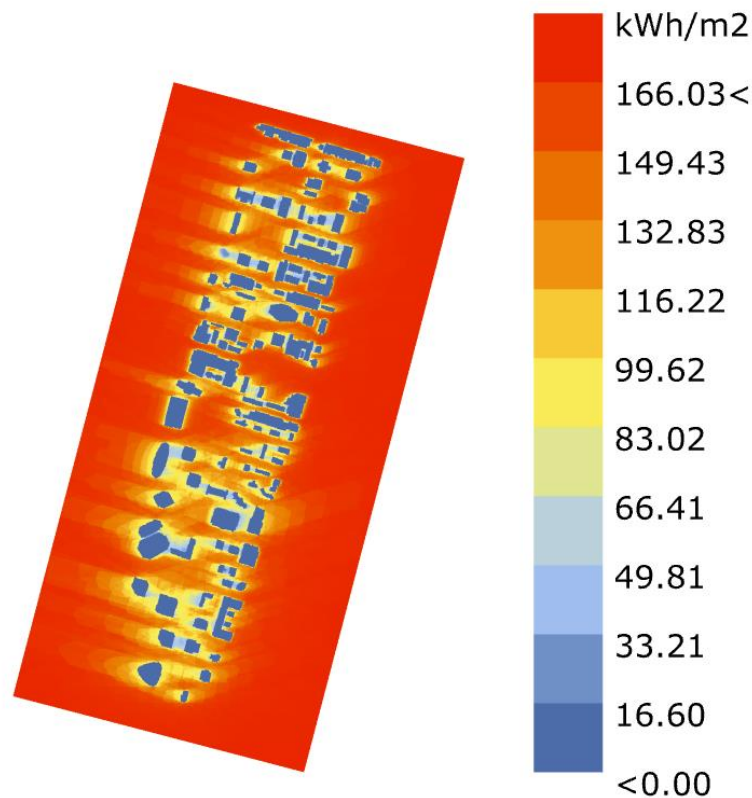


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

A figura 64 mostra a radiação incidente no piso para o mês de dezembro na área de estudo, onde a radiação alcança níveis acima de 149,43 kWh/m<sup>2</sup>/ano. Na imagem é possível ver que a região mais ao norte recebe níveis de radiação acima de 132,83 kWh/m<sup>2</sup>/ano, enquanto a região central da figura recebe um valor aproximado entre 116,22 kWh/m<sup>2</sup>/ano e 99,62 kWh/m<sup>2</sup>/ano. A região mais ao sul possui uma radiação incidente entre 66,41 kWh/m<sup>2</sup>/ano e 49,81 kWh/m<sup>2</sup>/ano.



Figura 64 - Radiação cumulativa incidente no piso da área de estudo durante o mês de dezembro.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Dessa forma, a pesquisa divide a área de estudo em três regiões na qual os valores de SVF e radiação cumulativa do piso são mais constantes. As três regiões são definidas na tabela 01, que já foi mostrada no capítulo de metodologia.

### 8.2.1 Análise por regiões

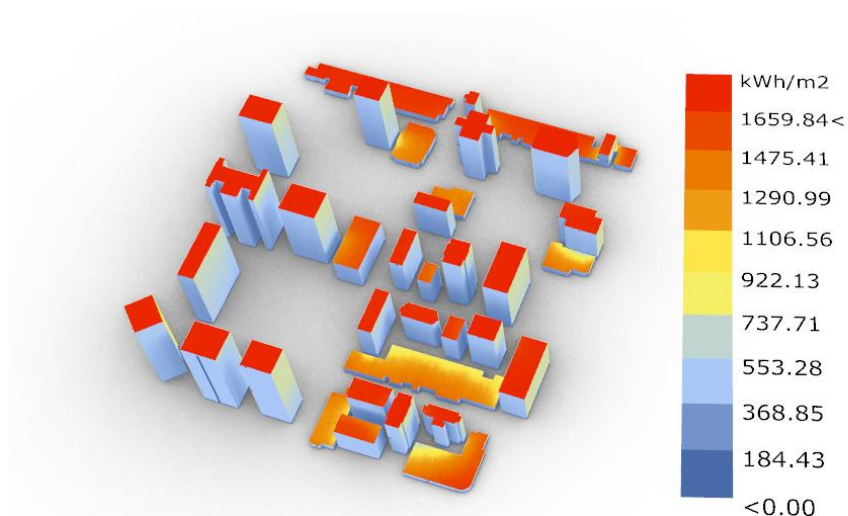
É importante também verificar como a radiação solar incide sobre as construções para entender como o entorno pode colaborar com a geração de energia solar.

#### 8.2.1.1 Região 01

A figura 65 mostra a radiação cumulativa incidente anual nas envoltórias da região 01, nela é possível ver que as coberturas dos volumes mais altos possuem uma incidência de radiação maior que das superfícies verticais, exceto em edificações baixas,

já que suas coberturas são obstruídas pelos edifícios mais altos. É possível encontrar valores de radiação acima de 1659 kWh/ m<sup>2</sup>/ ano.

Figura 65 - Radiação cumulativa incidente nas envoltórias das edificações da Região 01, durante o ano.

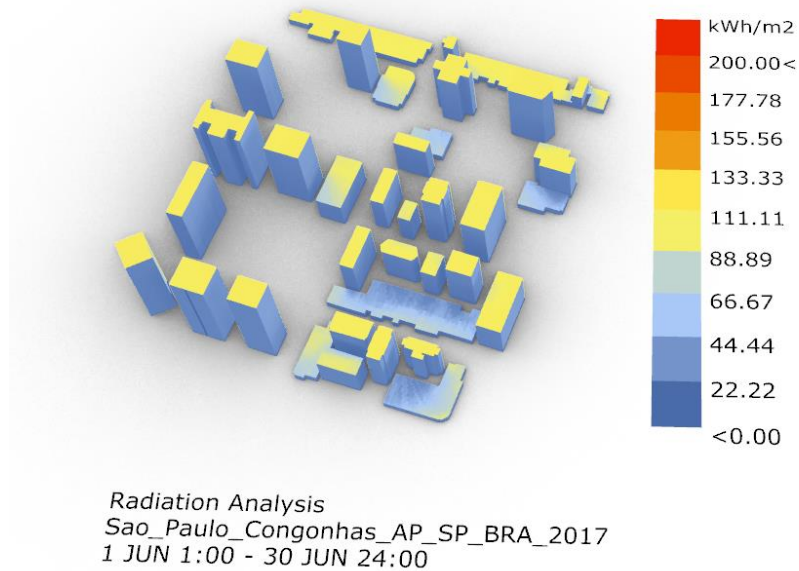


Radiation Analysis  
Sao\_Paulo\_Congonhas\_AP\_SP\_BRA\_2017  
1 JAN 1:00 - 31 DEC 24:00

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Já a figura 66 mostra a radiação cumulativa para um mês de inverno, que mostra os baixos níveis que chegam na cobertura e nas envoltórias das edificações. Nos edifícios mais baixos, os níveis de radiação chegam a 66,67 kWh/m<sup>2</sup>, enquanto os maiores níveis de radiação chegam a 133,33 kWh/m<sup>2</sup>.

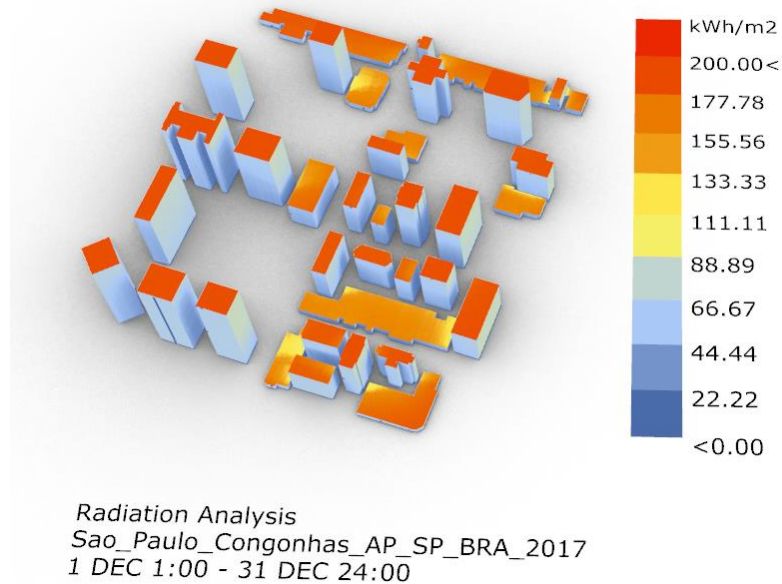
Figura 66 - Radiação cumulativa incidente nas envoltórias das edificações da Região 01, durante o mês de junho.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

A figura 67 mostra a radiação incidente nas envoltórias das edificações para o mês de verão. Nos edifícios mais baixos, os níveis de radiação chegam a 155,56 kWh/m<sup>2</sup>, enquanto os maiores níveis de radiação chegam a 200,00 kWh/m<sup>2</sup>.

Figura 67 - Radiação cumulativa incidente nas envoltórias das edificações da Região 01, durante o mês de dezembro.

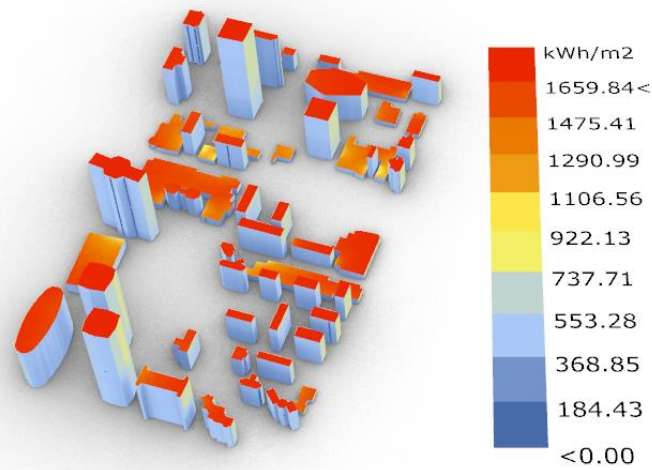


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

### 8.2.1.2 Região 02

A figura 68 mostra a radiação cumulativa incidente anual nas envoltórias da região 01, nela é possível ver que as coberturas dos volumes mais altos possuem uma incidência de radiação maior que das superfícies verticais, exceto em edificações baixas, já que suas coberturas são obstruídas pelos edifícios mais altos. A radiação incidente nas paredes é menor porque elas não estão voltadas para o norte, enquanto existem algumas paredes a leste que obtém níveis de radiação medianos, por volta de 922,13 kWh/m<sup>2</sup>. É possível encontrar valores de radiação acima de 1659 kWh/ m<sup>2</sup>/ ano.

Figura 68 - Radiação cumulativa incidente nas envoltórias das edificações da Região 02, durante o ano.

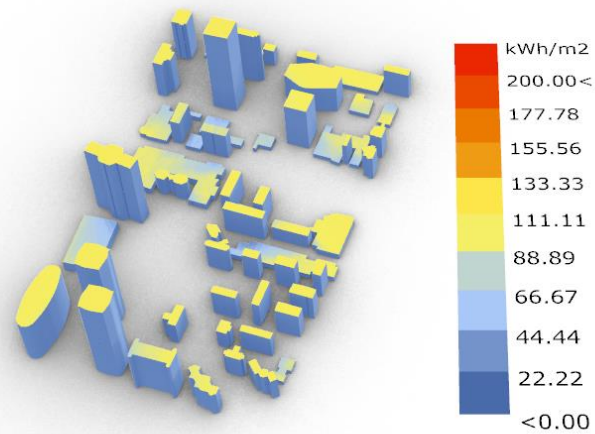


Radiation Analysis  
Sao\_Paulo\_Congonhas\_AP\_SP\_BRA\_2017  
1 JAN 1:00 - 31 DEC 24:00

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Já a figura 69 mostra a radiação cumulativa para um mês de inverno, que mostra os baixos níveis que chegam na cobertura das edificações. Nos edifícios mais baixos, os níveis de radiação chegam a 66,67 kWh/m<sup>2</sup>, enquanto os maiores níveis de radiação chegam a 111,11 kWh/m<sup>2</sup>.

Figura 69 - Radiação cumulativa incidente nas envoltórias das edificações da Região 02, durante o mês de junho.

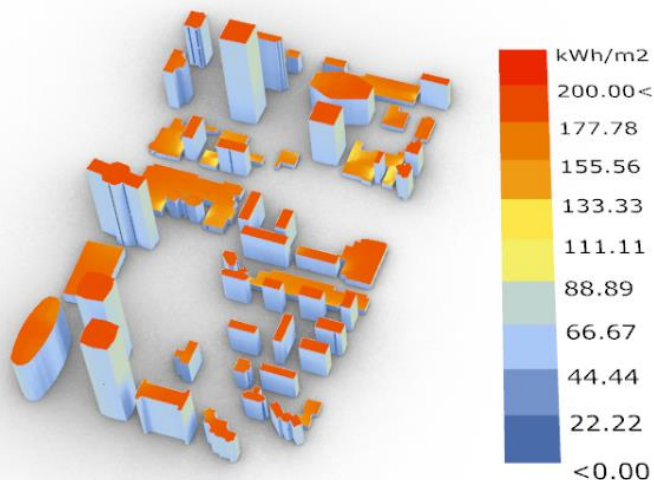


Radiation Analysis  
Sao\_Paulo\_Congonhas\_AP\_SP\_BRA\_2017  
1 JUN 1:00 - 30 JUN 24:00

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

A figura 70 mostra a radiação incidente nas envoltórias das edificações para o mês de verão. Nos edifícios mais baixos, os níveis de radiação chegam a 133,33 kWh/m<sup>2</sup>, enquanto os maiores níveis de radiação chegam a 200,00 kWh/m.

Figura 70 - Radiação cumulativa incidente nas envoltórias das edificações da Região 02

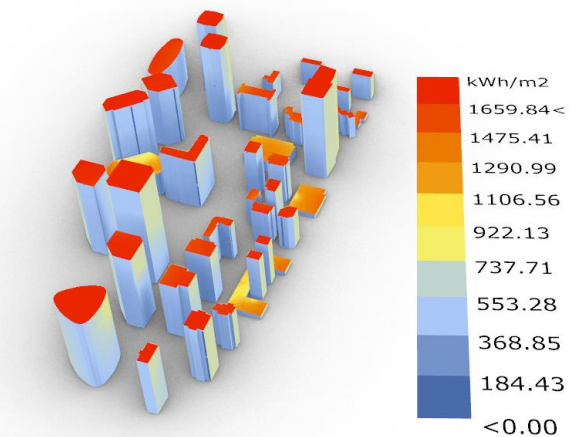


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

### 8.2.1.3 Região 03

A figura 71 mostra a radiação cumulativa incidente anual nas envoltórias da região 01, nela é possível ver que as coberturas dos volumes mais altos possuem uma incidência de radiação maior que das superfícies verticais, exceto em edificações baixas, já que suas coberturas são obstruídas pelos edifícios mais altos. É possível encontrar valores de radiação acima de 1659 kWh/ m<sup>2</sup>/ ano.

Figura 71 - Radiação cumulativa incidente nas envoltórias das edificações da Região 02, durante o ano.

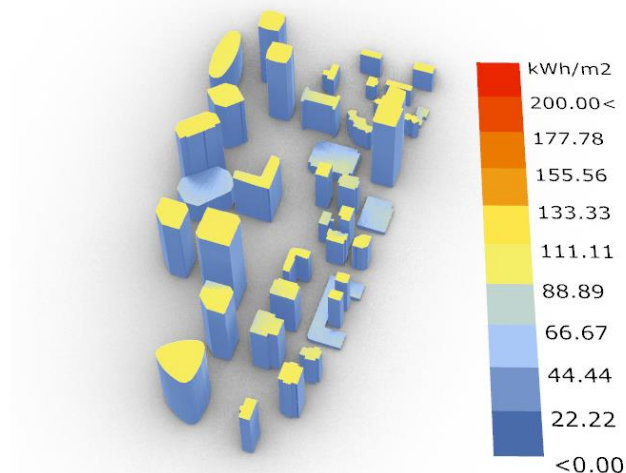


*Radiation Analysis*  
*Sao\_Paulo\_Congonhas\_AP\_SP\_BRA\_2017*  
*1 JAN 1:00 - 31 DEC 24:00*

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Já a figura 72 mostra a radiação cumulativa para um mês de inverno, que mostra os baixos níveis que chegam na cobertura das edificações. Nesse cenário é possível ver até mesmo coberturas com baixas incidência solar devido ao alto grau de obstrução. Nos edifícios mais baixos, os níveis de radiação chegam a 66,67 kWh/m<sup>2</sup>, enquanto os maiores níveis de radiação chegam a 133,33 kWh/m<sup>2</sup>.

Figura 72 - Radiação cumulativa incidente nas envoltórias das edificações da Região 0, durante o mês de junho



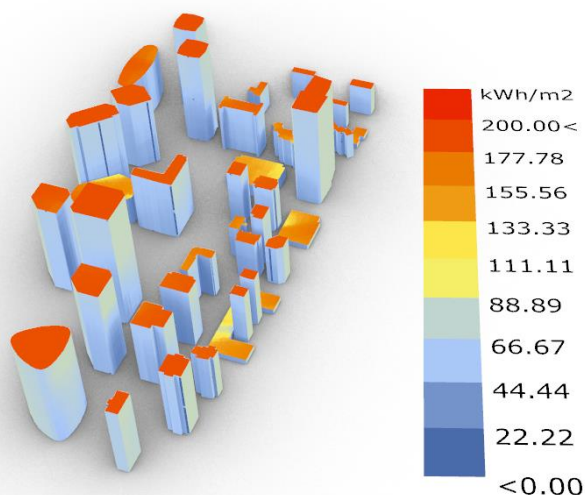
Radiation Analysis  
Sao\_Paulo\_Congonhas\_AP\_SP\_BRA\_2017  
1 JUN 1:00 - 30 JUN 24:00

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

A figura 73 mostra a radiação incidente nas envoltórias das edificações para o mês de verão. Nos edifícios mais baixos, os níveis de radiação chegam a 88,89 kWh/m<sup>2</sup>, devido a grande quantidade de sombreamento existente. Os maiores níveis de radiação chegam a 200,00 kWh/m.



Figura 73 - Radiação cumulativa incidente nas envoltórias das edificações da Região 02, durante o mês de dezembro.



*Radiation Analysis*  
*Sao\_Paulo\_Congonhas\_AP\_SP\_BRA\_2017*  
*1 DEC 1:00 - 31 DEC 24:00*

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

### 8.3 EDIFÍCIO DE REFERÊNCIA

O edifício de referência, definido no capítulo de metodologia, foi simulado para a estimativa de seu consumo anual em quatro cenários distintos para comparação: o cenário 01 é referente a um edifício sem entorno, os cenários 02,03 e 04 representam a implantação do edifício de referência nas regiões 01,02 e 03, respectivamente.

Foram obtidos os consumos referentes aos usos finais de eletricidade de uma edificação da tipologia de serviços, sendo eles: resfriamento, iluminação interna, iluminação externa, equipamentos internos, ventiladores, bombas e torres de resfriamento.

### 8.3.1 Consumo anual

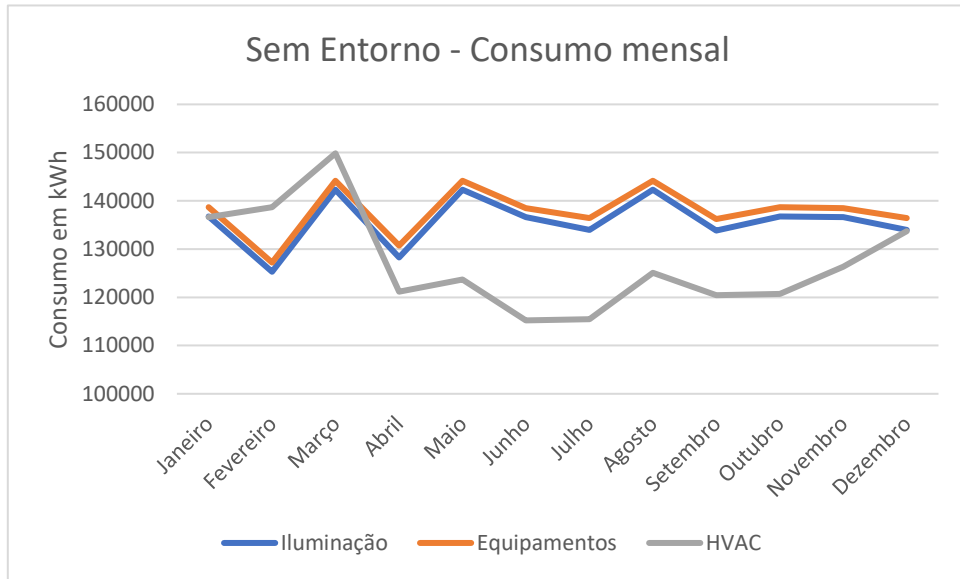
#### 8.3.1.1 Sem entorno

A tabela 16 mostra o consumo total apurado da simulação do edifício de referência. O consumo da torre de resfriamento e da iluminação externa são pequenos se comparados com os restantes dos usos finais. Os usos de equipamentos e de iluminação artificial interna somam 68% do consumo geral da edificação e são consumos, para esta simulação, independentes do clima externo. A parte de resfriamento (serpentina e *chillers*) consomem cerca de 18% do total de energia, enquanto os sistemas auxiliares do resfriamento (ventiladores e bombas) correspondem a cerca de 12% do consumo total.

Tabela 16 - Consumo anual de eletricidade do edifício de referência no cenário sem entorno. Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Uso Final	Consumo De Eletricidade (kWh)	Porcentagem (%)	EUI (kWh/m <sup>2</sup> /ano)
Resfriamento	896.286,76	18,56	26,68
Iluminação Interna	1.633.588,99	33,82	48,62
Iluminação Externa	4.388,17	0,09	0,13
Equipamentos	1.658.482,56	34,34	49,36
Ventiladores	363.573,23	7,53	10,82
Bombas	237.249,04	4,91	7,06
Torres de resfriamento	36.266,56	0,75	1,08
Total	4.829.835,31		143,75

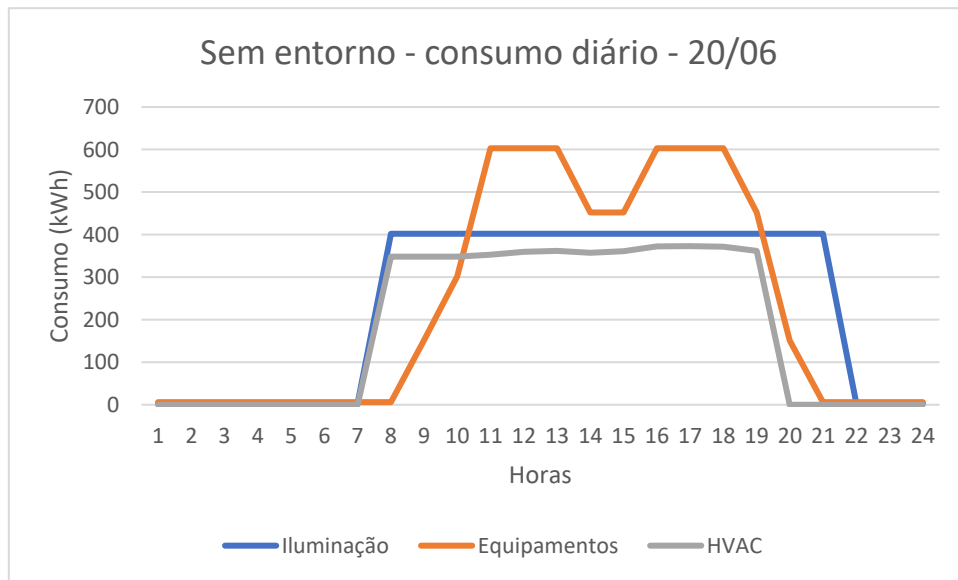
Figura 74 - Consumo energético mensal do edifício de referência, cenário sem entorno.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

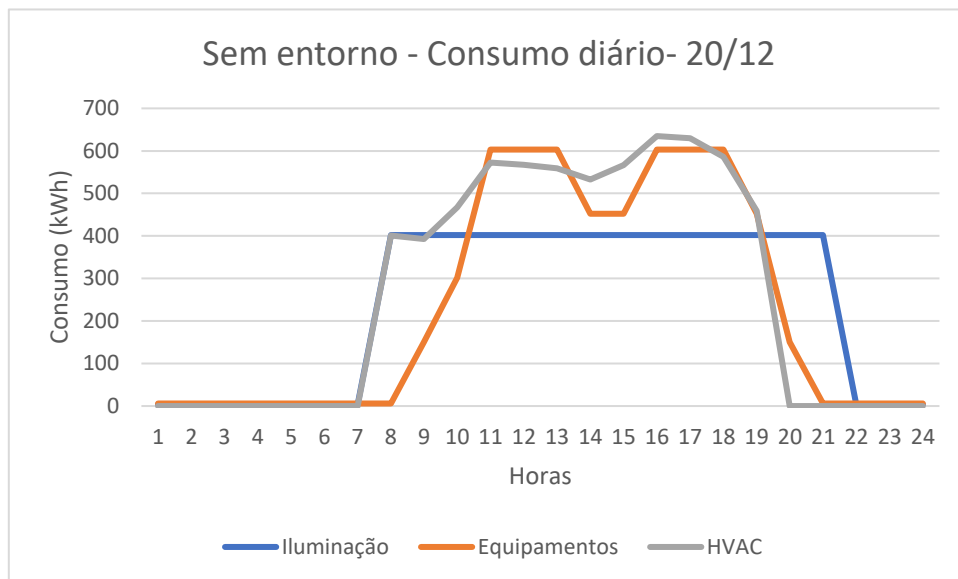
O consumo mensal tem um pico no mês de fevereiro, devido à alta demanda do sistema de ar-condicionado proporcionado pela estação quente, já o mês de julho possui o menor consumo, fato ocorrido pelo baixo consumo do sistema de ar-condicionado nos meses da estação fria.

Figura 75 - Consumo energético para dias frios do edifício de referência, cenário sem entorno.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 76 - Consumo energético para dias quentes do edifício de referência, cenário sem entorno.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Observando o comportamento do consumo em dois dias específicos do ano, um no mês frio e outro no mês de verão se percebe a flutuação do consumo energético no uso do sistema de ar-condicionado, o qual é ligado nos dois dias, mas tem um consumo intensificado no dia de verão. O consumo de equipamentos e de iluminação é regido pelo padrão de uso. Dessa forma, esse consumo não é afetado pela sazonalidade do clima.

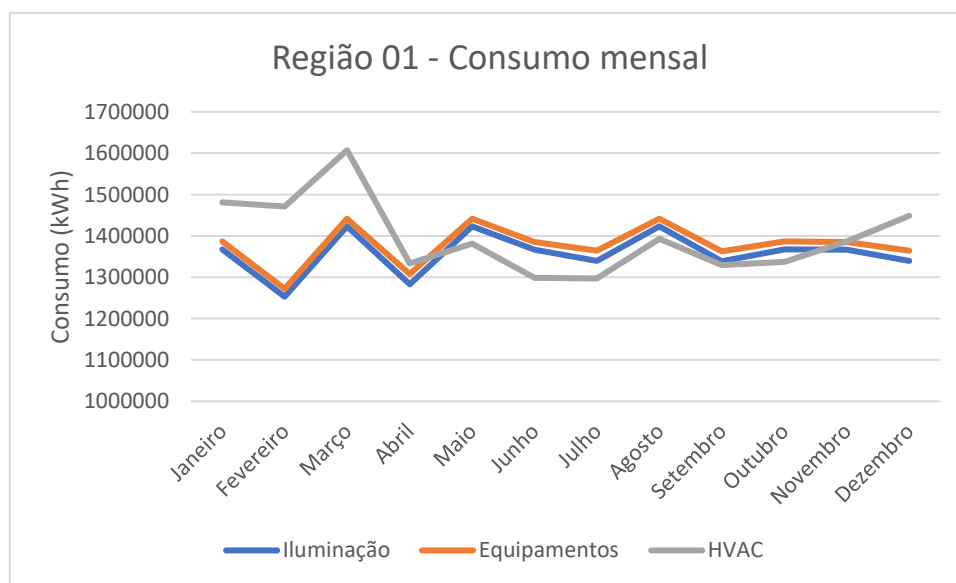
### 8.3.1.2 Entorno da Região 01

A tabela 17 mostra o consumo total apurado da simulação do edifício de referência implantado na região 01. Os usos de equipamentos e de iluminação artificial interna somam 66% do consumo geral da edificação e são consumos, para esta simulação, independentes do clima externo. A parte de resfriamento (serpentina e *chillers*) consomem cerca de 19% do total de energia, e os sistemas auxiliares do resfriamento (ventiladores e bombas) correspondem a cerca de 13% do consumo total.

Tabela 17 - Consumo anual de eletricidade do edifício de referência na Região 01. Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Uso Final	Consumo De Eletricidade (kWh)	Porcentagem (%)	EUI (kWh/m <sup>2</sup> /ano)
Resfriamento	948.199,08	19,05	28,22
Iluminação Interna	1.633.588,99	32,82	48,62
Iluminação Externa	4.388,17	0,09	0,13
Equipamentos	1.658.482,56	33,32	49,36
Ventiladores	430.583,18	8,65	12,81
Bombas	264.809,65	5,32	7,88
Torres de resfriamento	37.616,81	0,76	1,12
<b>Total</b>	<b>4.977.668,44</b>		<b>148,14</b>

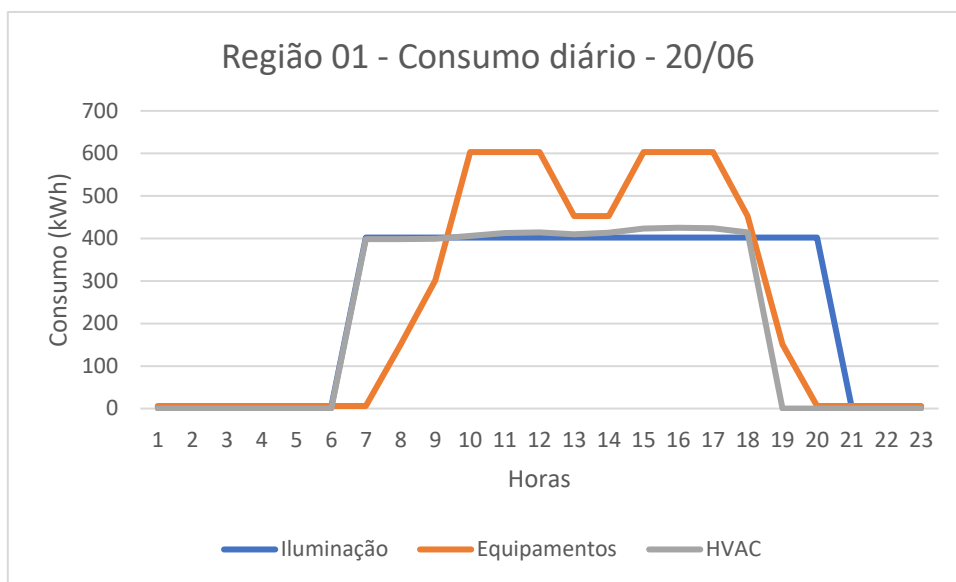
Figura 77 - Consumo energético mensal do edifício de referência implantado na região 01.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

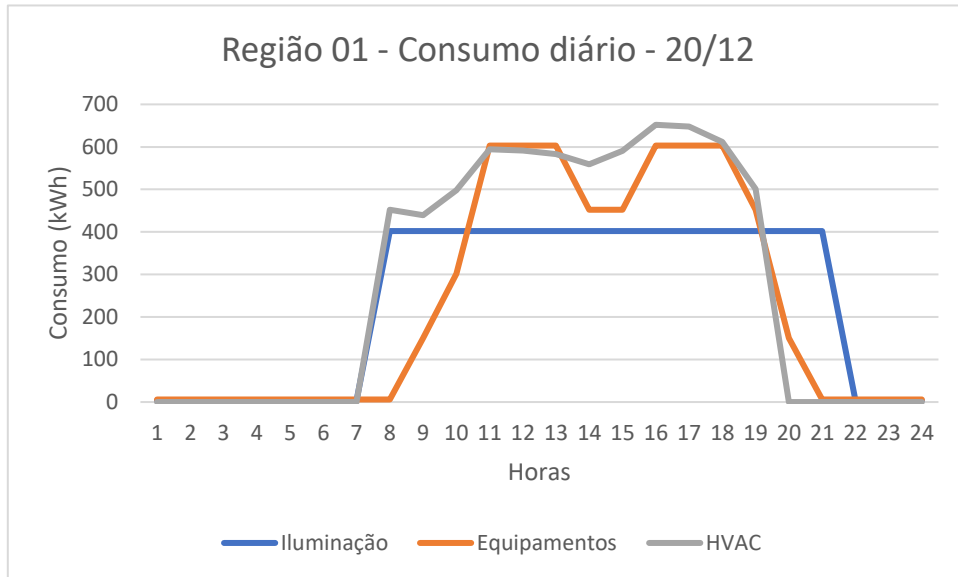
O consumo mensal é maior no mês de fevereiro, devido à alta demanda do sistema de ar-condicionado proporcionado pela estação quente, já o mês de julho e junho possuem o menor consumo, fato ocorrido pelo baixo consumo do sistema de ar-condicionado nos meses da estação fria. É importante salientar que a região 01 possui um consumo maior de refrigeração no inverno do que se comparado ao cenário sem entorno.

Figura 78 - Consumo energético para dias frios do edifício de referência, implantado na região 01.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 79 - Consumo energético para dias quentes do edifício de referência, implantado na Região 01.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Observando o comportamento do consumo em dois dias específicos do ano, um no mês frio e outro no mês de verão se percebe a flutuação do consumo energético no uso do sistema de ar-condicionado, o qual é ligado nos dois dias, mas tem um consumo intensificado no dia de verão, que chega num consumo de 650 kWh.

### 8.3.1.3 Entorno da Região 02

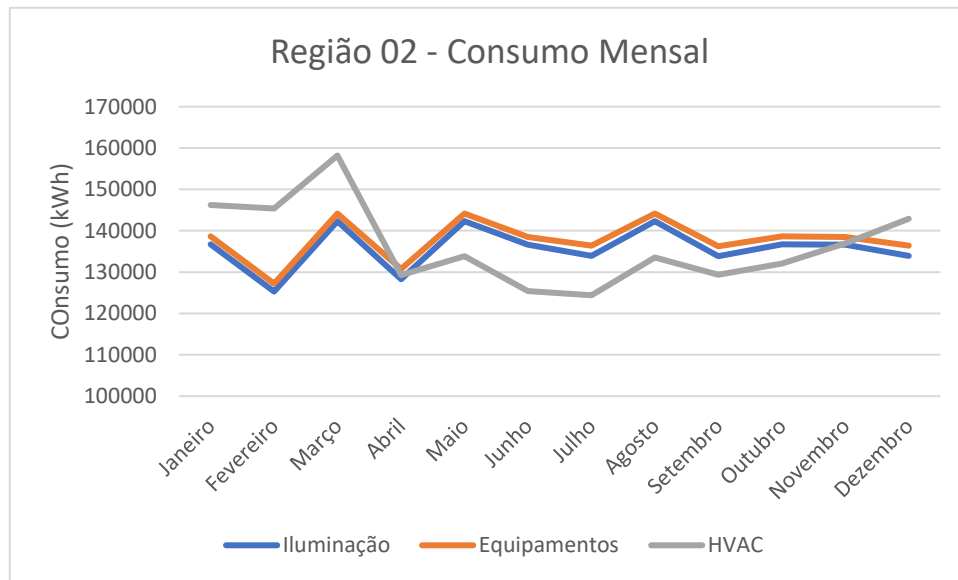
A tabela 18 mostra o consumo total apurado da simulação do edifício de referência implantado na região 02. Os usos de equipamentos e de iluminação artificial interna somam 66% do consumo geral da edificação e são consumos, para esta simulação, independentes do clima externo. A parte de resfriamento (serpentina e *chillers*) consomem cerca de 19% do total de energia, e os sistemas auxiliares do resfriamento (ventiladores e bombas) correspondem a cerca de 14% do consumo total.

Tabela 18 - Consumo anual de eletricidade do edifício de referência na Região 02. Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Uso Final	Consumo De Eletricidade (kWh)	Porcentagem (%)	EUI (kWh/m <sup>2</sup> /ano)
Resfriamento	923.749,84	19,70	27,49
Iluminação Interna	1.633.588,99	33,08	48,62
Iluminação Externa	4.388,17	0,09	0,13
Equipamentos	1.658.482,56	33,58	49,36
Ventiladores	419.780,67	8,50	12,49
Bombas	262.319,11	5,31	7,81
Torres de resfriamento	36.275,12	0,73	1,08
Total	4.938.584,45		146,98



Figura 80 - Consumo energético mensal do edifício de referência implantado na região 02.

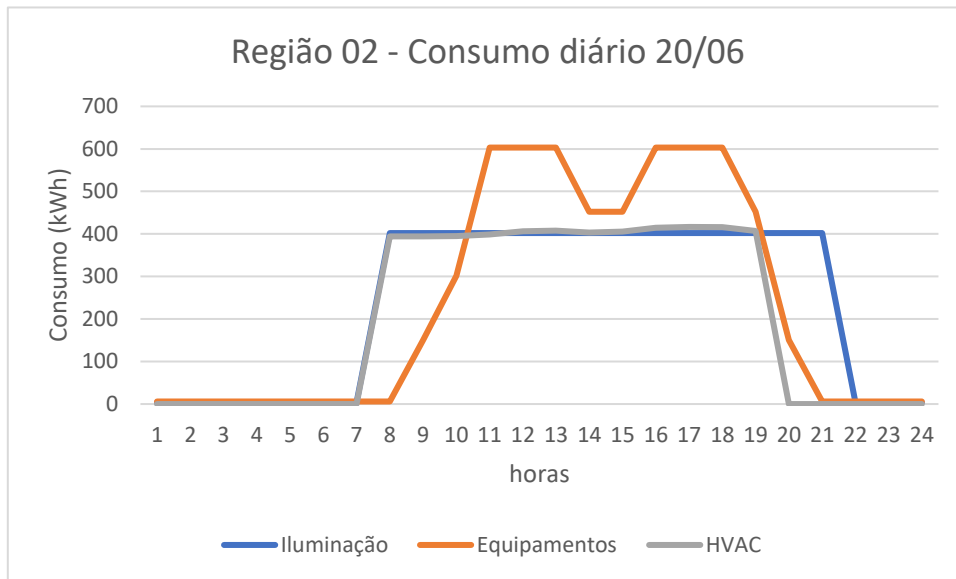


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

O consumo mensal é maior no mês de fevereiro, devido à alta demanda do sistema de ar-condicionado proporcionado pela estação quente, já o mês de junho possuem o menor consumo, fato ocorrido pelo baixo consumo do sistema de ar-condicionado nos meses da estação fria. É importante salientar que a região 02 possui um consumo maior de refrigeração no inverno do que se comparado ao cenário sem entorno.

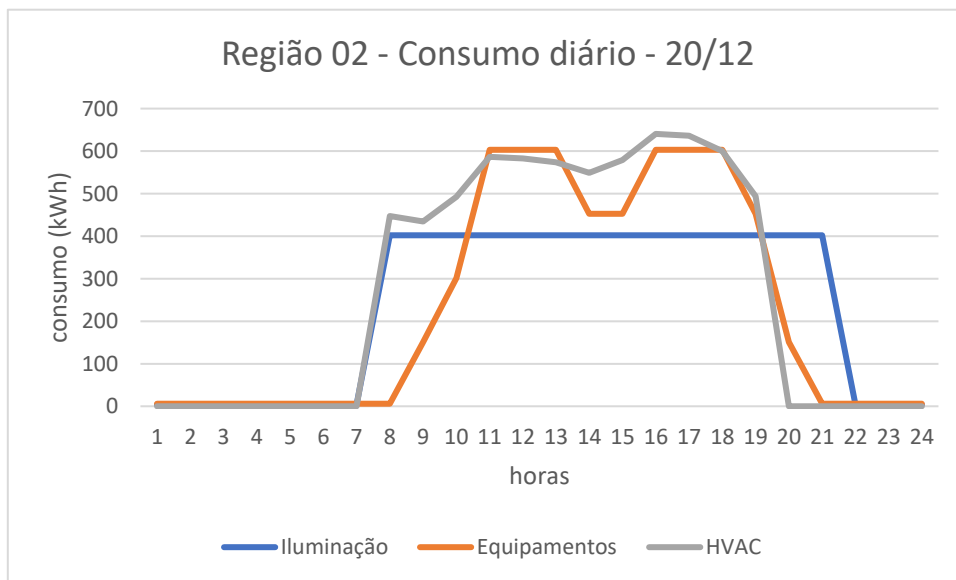
Observando o comportamento do consumo em dois dias específicos do ano, um no mês frio e outro no mês de verão se percebe a flutuação do consumo energético no uso do sistema de ar-condicionado, o qual é ligado nos dois dias, mas tem um consumo intensificado no dia de verão, que chega num consumo de 650 kWh.

Figura 81 - Consumo energético para dias frios do edifício de referência, implantado na região 02.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 82 - Consumo energético para dias quentes do edifício de referência, implantado na Região 02.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

#### 8.3.1.4 Entorno da Região 03

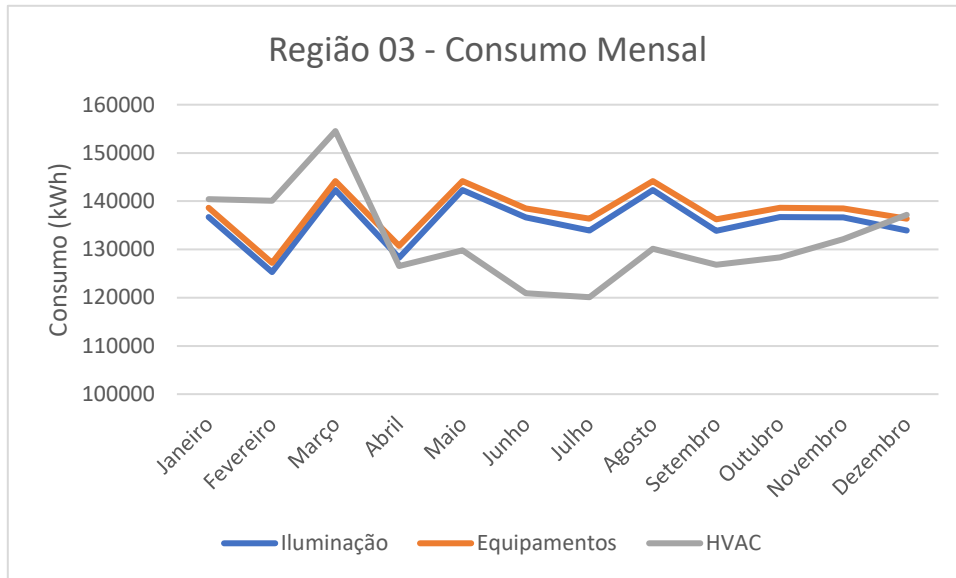
A tabela 19 mostra o consumo total apurado da simulação do edifício de referência implantado na região 01. Os usos de equipamentos e de iluminação artificial interna somam 67% do consumo geral da edificação e são consumos, para esta simulação,

independentes do clima externo. A parte de resfriamento (serpentinhas e *chillers*) consomem cerca de 18% do total de energia, e os sistemas auxiliares do resfriamento (ventiladores e bombas) correspondem a cerca de 13% do consumo total.

Tabela 19 - Consumo anual de eletricidade do edifício de referência na Região 03. Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Uso Final	Consumo De Eletricidade (kWh)	Porcentagem (%)	EUI (kWh/m <sup>2</sup> /ano)
Resfriamento	897.774,07	18,37	26,72
Iluminação Interna	1.633.588,99	33,42	48,62
Iluminação Externa	4.388,17	0,09	0,13
Equipamentos	1.658.482,56	33,93	49,36
Ventiladores	400.191,64	8,19	11,91
Bombas	258.611,04	5,29	7,70
Torres de resfriamento	34.880,21	0,71	1,04
Total	4.887.916,67		145,47

Figura 83 - Consumo energético mensal do edifício de referência implantado na região 02.

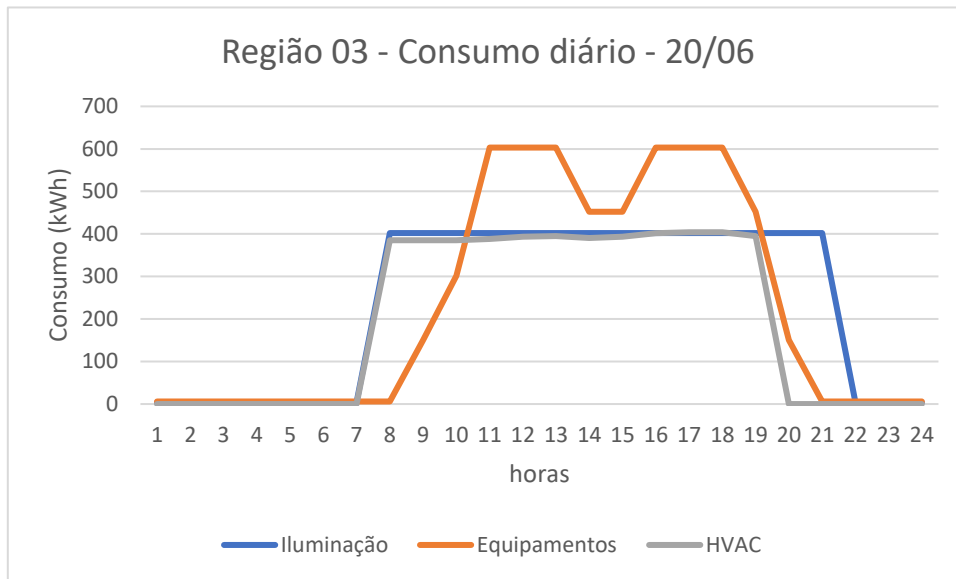


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

O consumo mensal é maior no mês de fevereiro, devido à alta demanda do sistema de ar-condicionado proporcionado pela estação quente, já o mês e junho possuem o menor consumo, fato ocorrido pelo baixo consumo do sistema de ar-condicionado nos meses da estação fria. É importante salientar que a região 03 possui um consumo de refrigeração menor que as outras duas regiões anteriores no inverno, devido ao fato de haver uma maior obstrução dos edifícios do entorno, do que nas outras regiões.

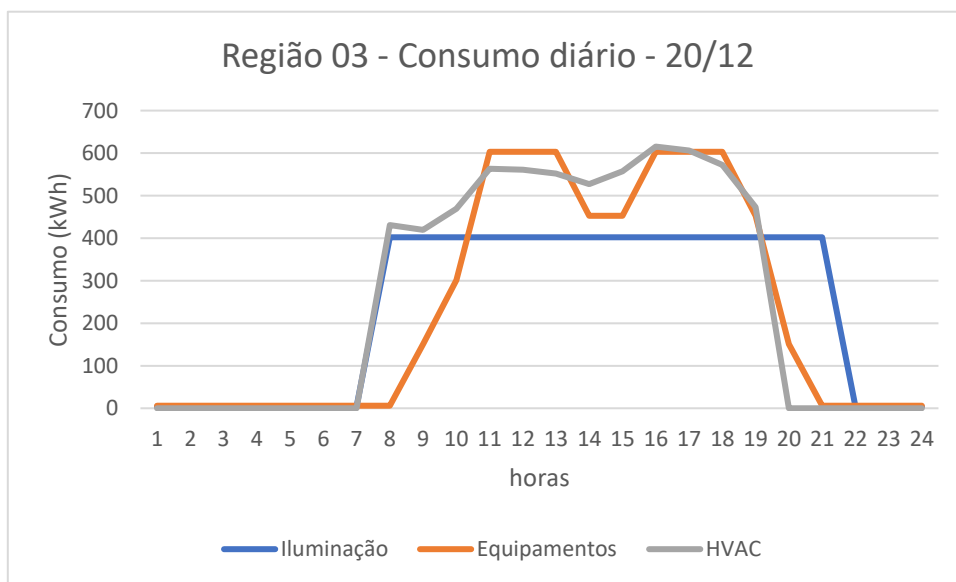
Observando o comportamento do consumo em dois dias específicos do ano, um no mês frio e outro no mês de verão se percebe a flutuação do consumo energético no uso do sistema de ar-condicionado, o qual é ligado nos dois dias, mas tem um consumo intensificado no dia de verão, que chega num consumo de 650 kWh.

Figura 84 - Consumo energético para dias frios do edifício de referência, implantado na região 03.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 85 - Consumo energético para dias quentes do edifício de referência, implantado na Região 03.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

### 8.3.1.5 Validação do modelo de referência

Os resultados de Intensidade de uso energético por área são comparados, na tabela 20, com os resultados obtidos na aplicação da equação de Benchmark, presente no relatório DEO, feito pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS,

2015). Os resultados mostram que os consumos dos edifícios simulados são próximos ao que o relatório considera típico, o que corrobora o uso desse modelo para as posteriores comparações.

Tabela 20 - Comparação com os valores obtidos do edifício de referência e dos Benchmark. Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

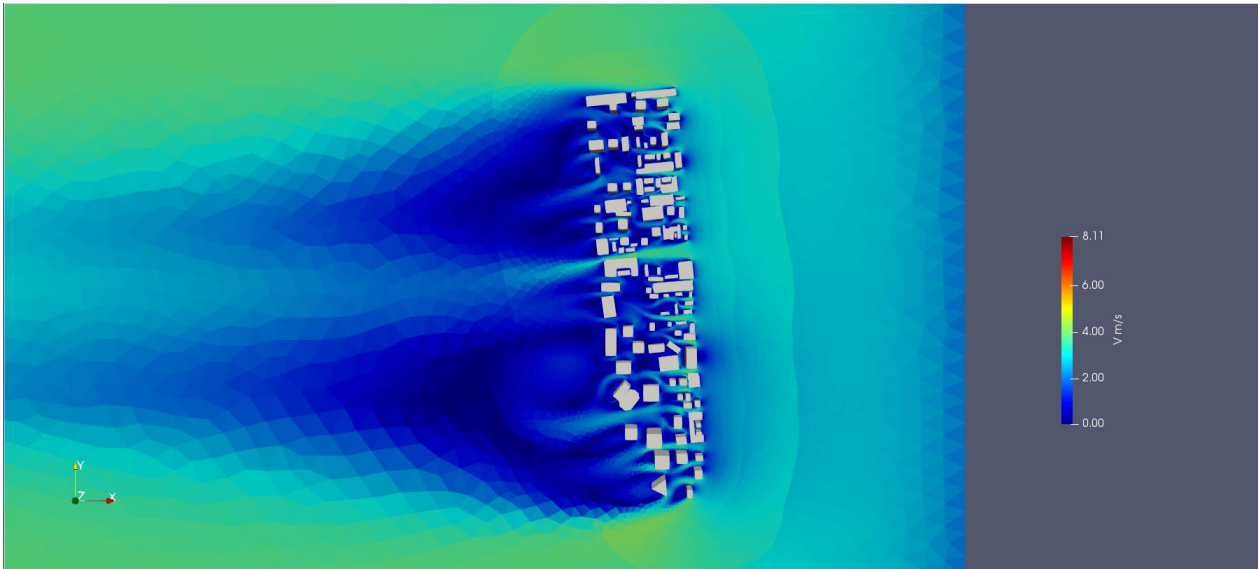
EUI Edifício de Referência	Valor (kWh/ano/m <sup>2</sup> )
Sem entorno	143,75
Região 01	148,14
Região 02	146,98
Região 03	145,47
Benchmark Típico	150,33
Benchmark de Boas Práticas	116.49

#### 8.4 ANÁLISE DA DINÂMICA DO RECURSO EÓLICO DA REGIÃO DE ESTUDO

##### 8.4.1 Geral

Na figura 86, as velocidades de vento a 5 metros de altura mostram que as edificações bloqueiam a passagem de vento, diminuindo a sua velocidade da original de 3,92 m/s para menos de 1 m/s, porém existem áreas em que existe um afinilamento das construções que, em algumas localidades, acelera o vento para velocidades de até 3m/s.

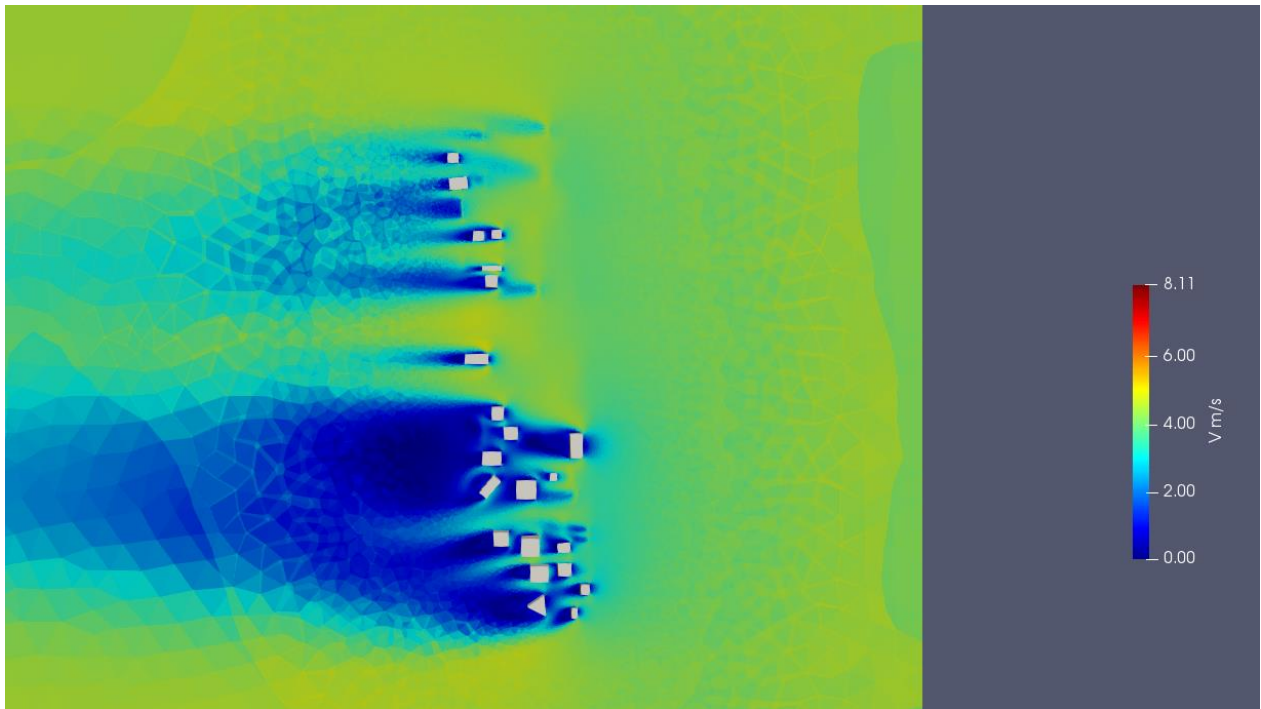
Figura 86 - Fluxo de vento na área de estudo a 5 metros de altura.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Já para uma altura de 75 metros, representado na figura 87, as velocidades de vento variam de acordo com a altura das edificações, é possível ver que na maior parte da área as velocidades ficam ente 3 e 4 m/s, já quando há alguma obstrução, mais para a região voltada para a marginal, a velocidade do vento é menor, chegando a 1 m/s. é possível observar que a região sul, que contém edifícios mais altos, mantém velocidades de vento abaixo de 3 m/s, devido ao efeito esteira dessas edificações altas.

Figura 87 - Fluxo de vento na área de estudo a 75 metros de altura.

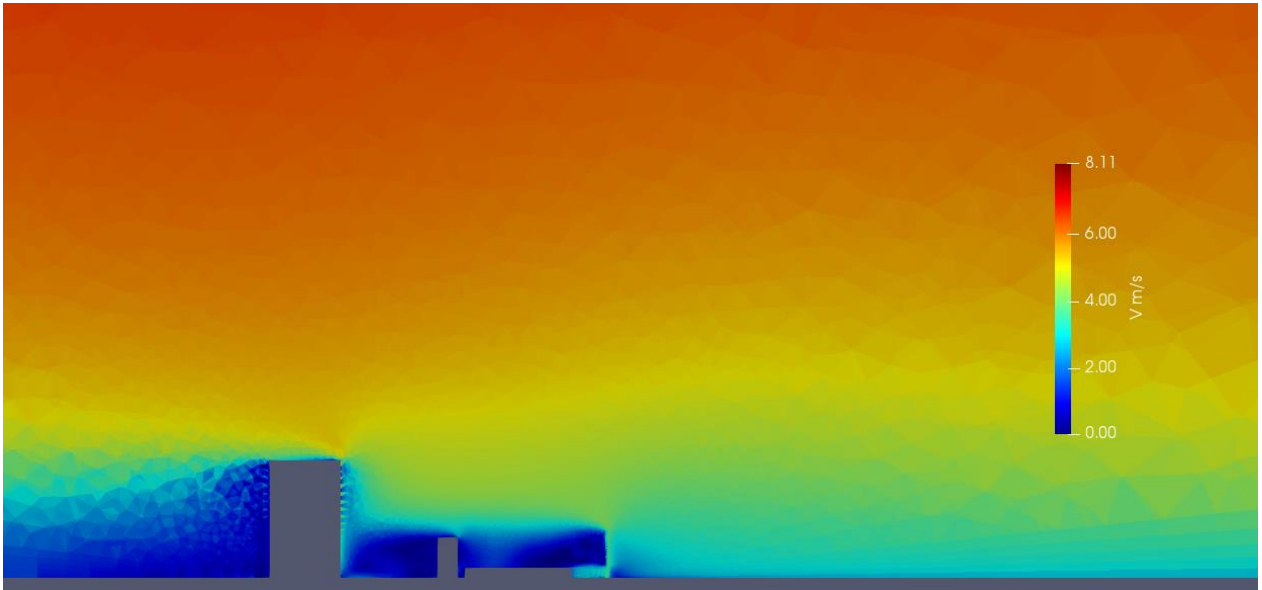


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O corte da região, representado na figura 88, mostra o efeito esteira das edificações, que cria uma “sombra” de vento com velocidades muito baixas, é possível ver que esse efeito de sombreamento é independente da altura, já que edifícios de pequeno e grande porte o produzem. No canto da cobertura das edificações tem uma aceleração do vento, causado pelo efeito de canto.



Figura 88 - Corte da área de estudo, mostrando o fluxo de vento.



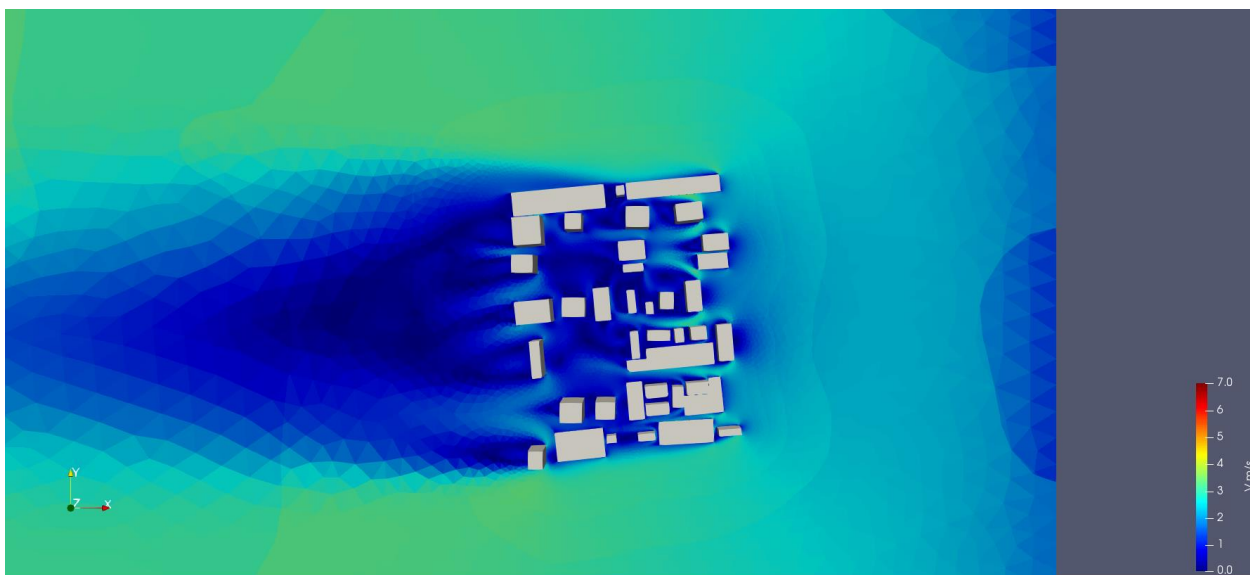
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

## 8.4.2 Análise por regiões

### 8.4.2.1 Região 01

Na figura 89, as velocidades de vento a 5 metros de altura mostram um grande bloqueio do fluxo de vento, não permitindo um fluxo que cruza o bairro completamente. Existem alguns pontos de aceleração do vento para mais de 2,00 m/s, porém são interrompidos por outros edifícios.

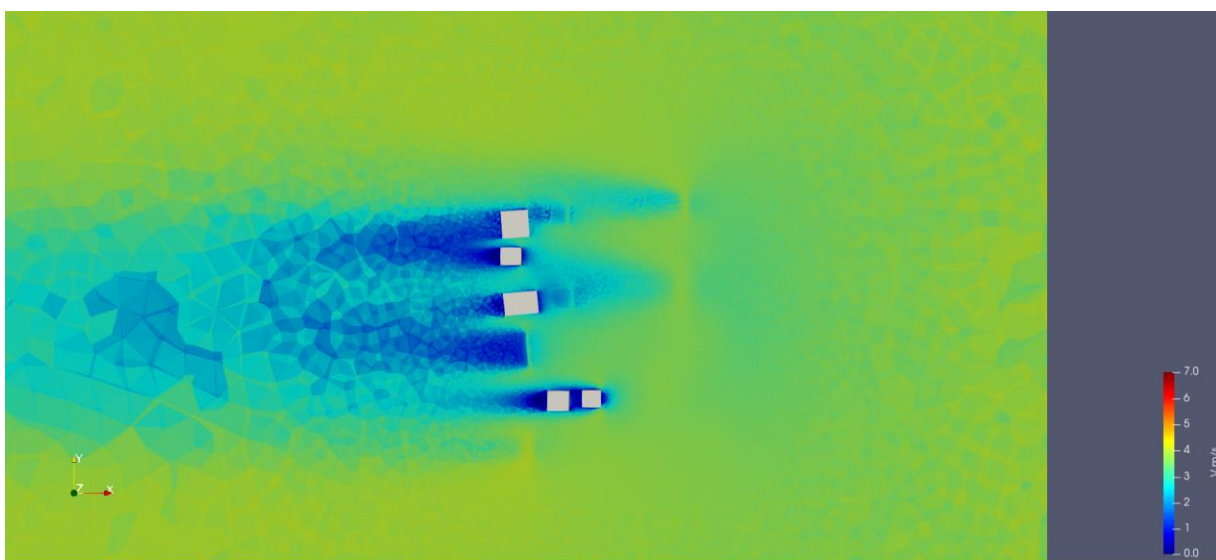
Figura 89 - Fluxo de vento na Região 01 a 5 metros de altura.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Já para uma altura de 75 metros, representado na figura 90, as velocidades de vento variam de acordo com a altura das edificações, é possível ver que na maior parte da área as velocidades ficam ente 3 e 4 m/s, já quando há alguma obstrução, mais para a região voltada para a marginal, a velocidade do vento é menor provocado pelo bloqueio das edificações altas, deixando o vento com velocidade de 1 m/s.

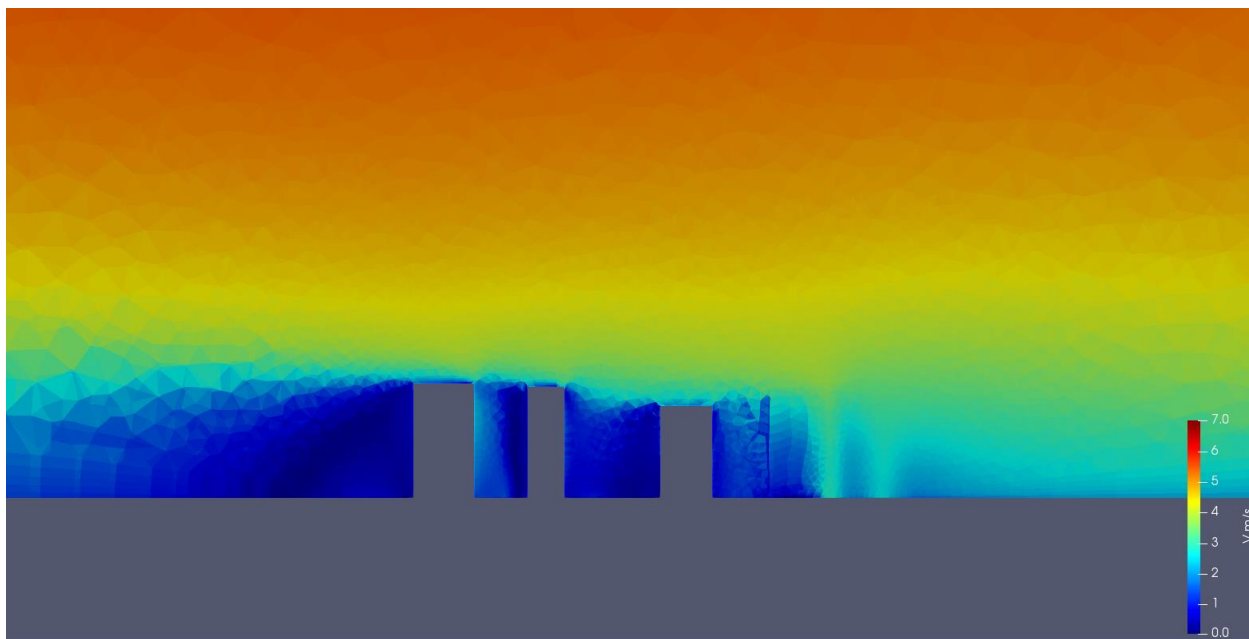
Figura 90 - Fluxo de vento na Região 01 a 75 metros de altura.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O corte da região, representado na figura 91, mostra o efeito esteira das edificações, que cria uma “sombra” de vento com velocidades muito baixas, enquanto o canto da cobertura das edificações tem uma aceleração, causado pelo efeito de canto.

Figura 91 - Corte da região 01, mostrando o fluxo de vento.

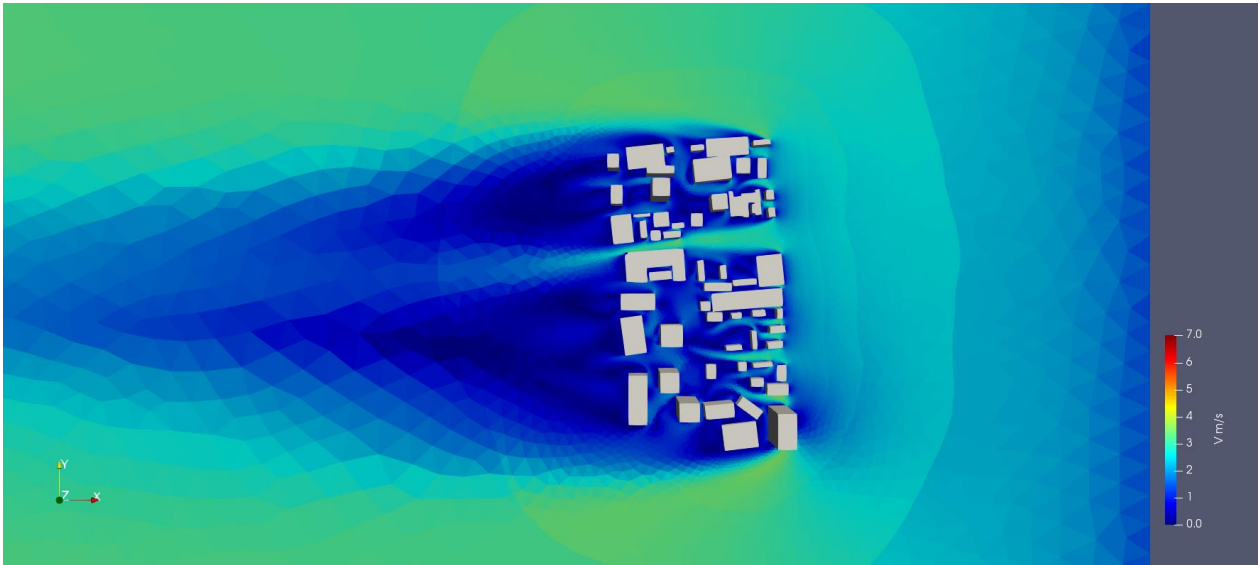


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

#### 8.4.2.2 Região 02

Na figura 92, as velocidades de vento a 5 metros de altura mostram que as edificações bloqueiam a passagem de vento, diminuindo a sua velocidade da original de 3,92 m/s para menos de 1 m/s, porém. Pode-se ver a esta altura o afinilamento provocado pelas edificações que, em algumas localidades acelera o vento para velocidades de até 3m/s.

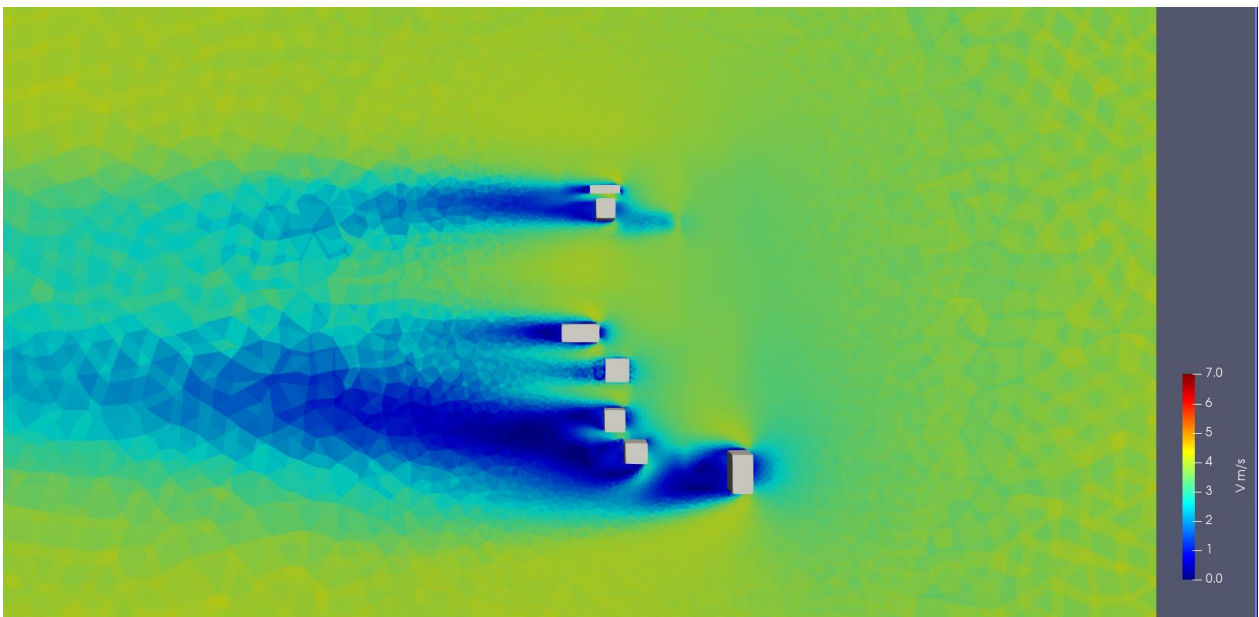
Figura 92 - Fluxo de vento na Região 02 a 5 metros de altura.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Já para uma altura de 75 metros, representado na figura 93, as velocidades de vento variam de acordo com a altura das edificações, é possível ver que na maior parte da área as velocidades ficam ente 3 e 4 m/s, já quando há alguma obstrução, mais para a região voltada para a marginal, a velocidade do vento é menor, chegando a 1 m/s.

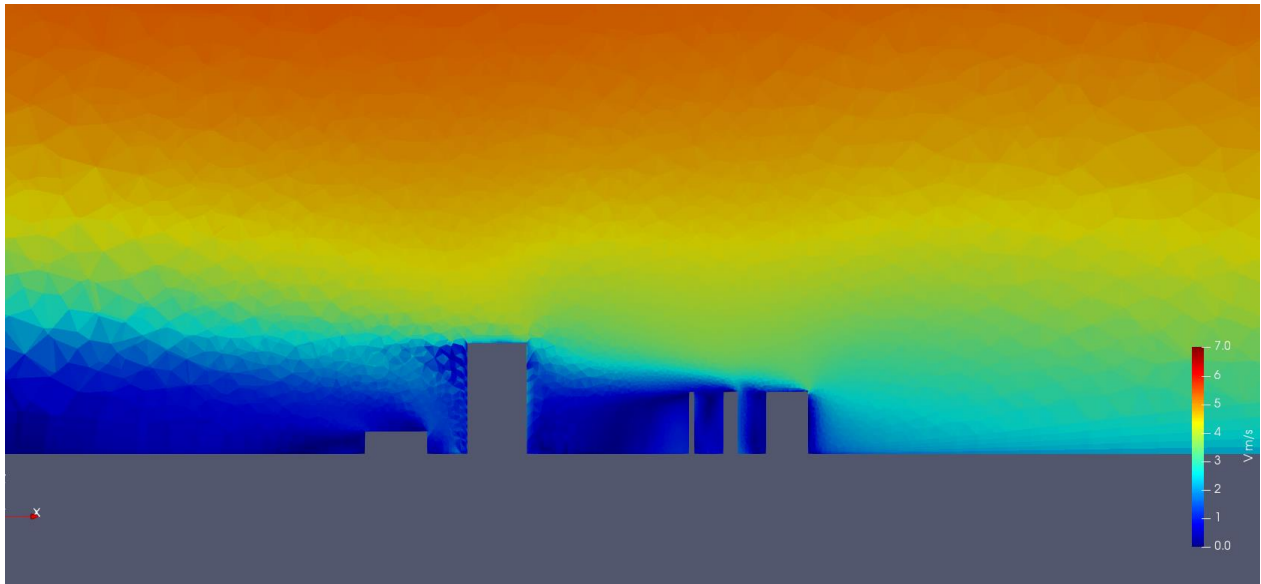
Figura 93 - Fluxo de vento na Região 02 a 75 metros de altura.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O corte da região, representado na figura 94, mostra o efeito esteira das edificações, que cria uma “sombra” de vento com velocidades muito baixas, enquanto o canto da cobertura das edificações tem uma aceleração, causado pelo efeito de canto.

Figura 94 - Corte da região 02, mostrando o fluxo de vento.

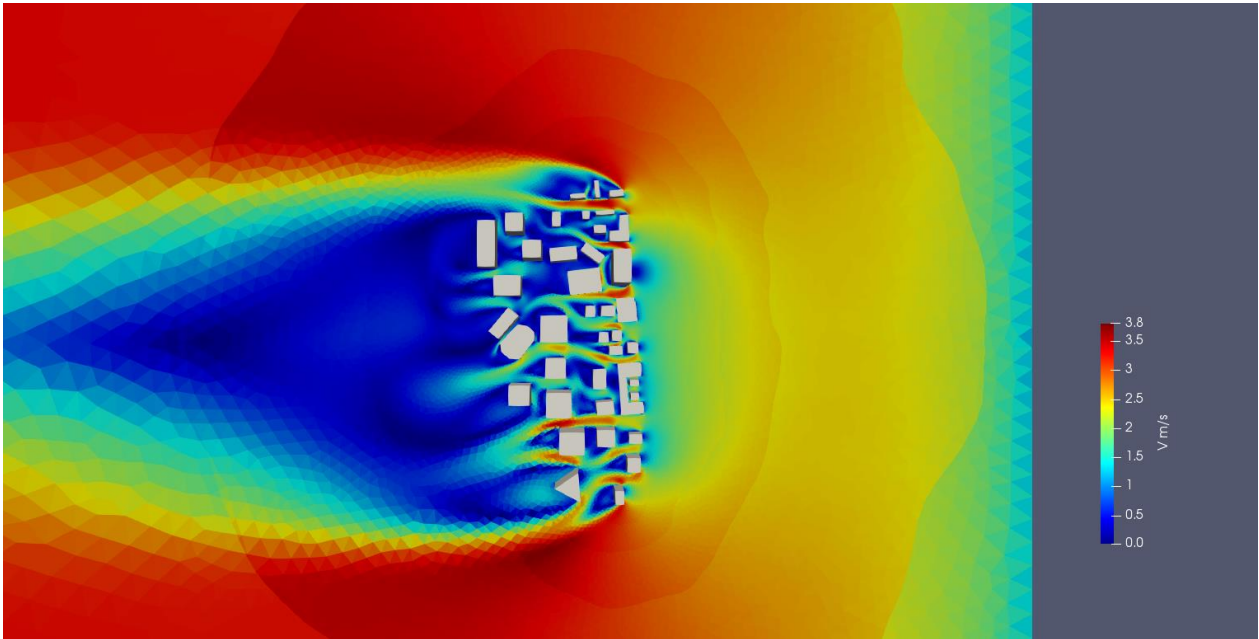


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

#### 8.4.2.3 Região 03

Na figura 95, as velocidades de vento a 5 metros de altura mostram que as edificações bloqueiam a passagem de vento, diminuindo a sua velocidade da original de 3,92 m/s para menos de 1 m/s, porém. Pode-se ver a esta altura, o afunilamento provocado pelas edificações que, em algumas localidades acelera o vento para velocidades de até 3m/s. O bloqueio do fluxo de vento é causado pelas proporções dos volumes das edificações que criam enormes esteiras no sentido da avenida Nações Unidas.

Figura 95 - Fluxo de vento na Região 03 a 5 metros de altura.

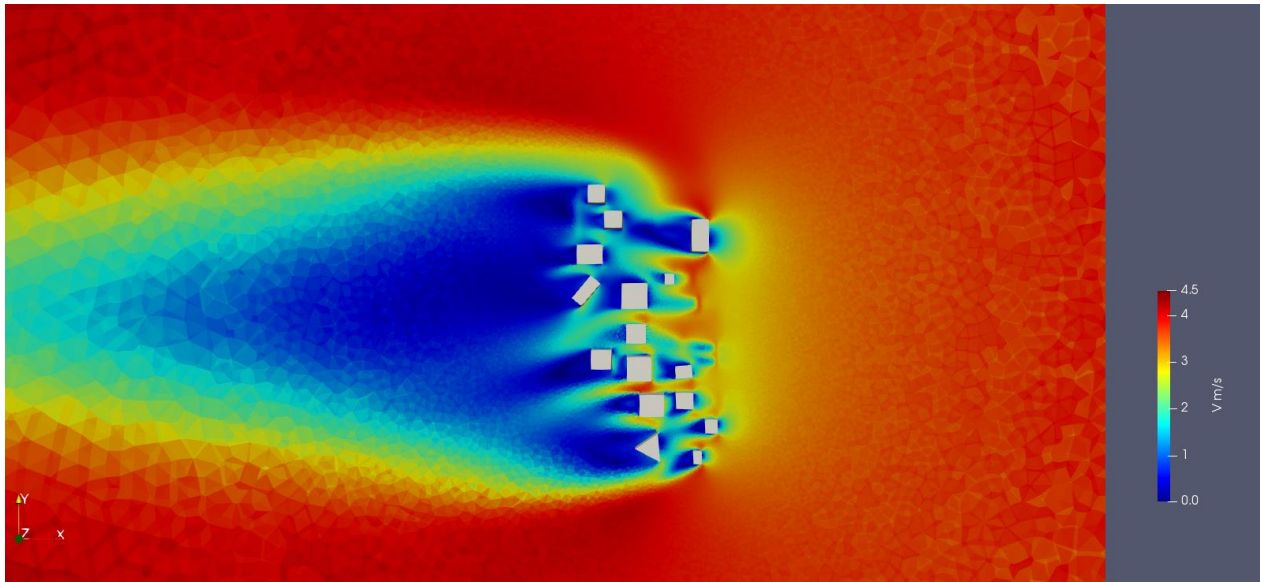


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Já para uma altura de 75 metros, representado na figura 96, as velocidades de vento variam de acordo com a altura das edificações, é possível ver que na maior parte da área as velocidades ficam ente 3 e 4 m/s, já quando há alguma obstrução, mais para a região voltada para a marginal, a velocidade do vento é menor, chegando a 1 m/s. AS

áreas de vento com velocidade 4m/s são devidas à baixa estatura dos edifícios voltados para a avenida Eng. Luiz Carlos Berrini.

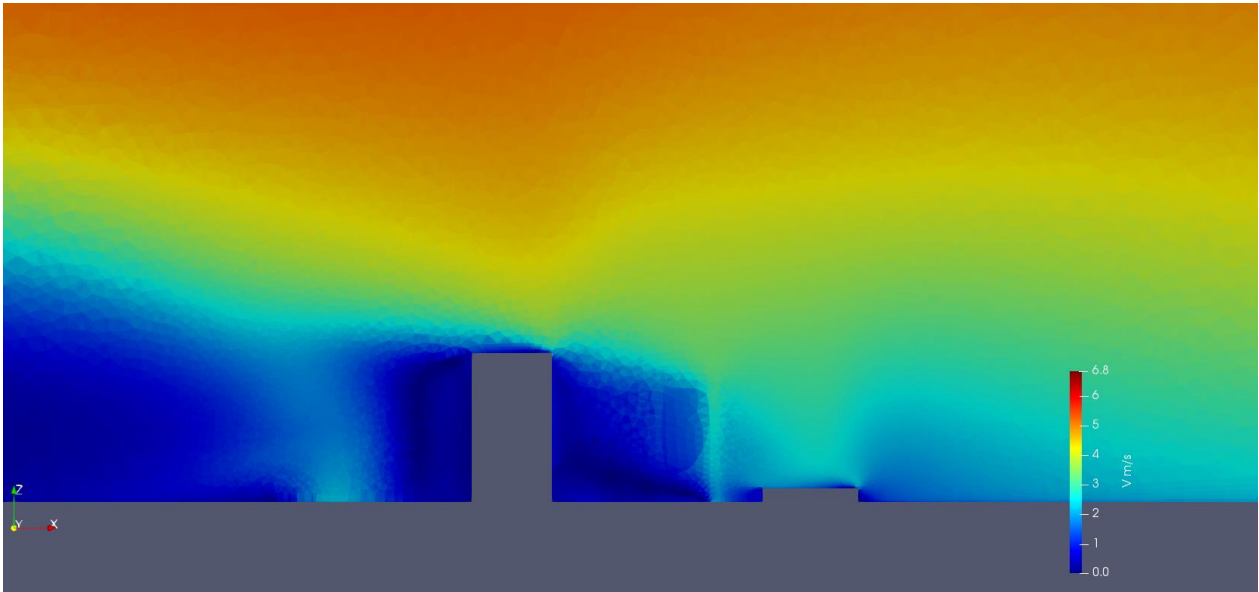
Figura 96 - Fluxo de vento na Região 02 a 75 metros de altura.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O corte da região, representado na figura 97, mostra o efeito esteira das edificações, que cria uma “sombra” de vento com velocidades muito baixas, já o canto da cobertura das edificações tem uma aceleração, causado pelo efeito de canto. No corte é possível ver a influência de outras edificações que não estão cortadas pelo plano de corte, mas que influenciam verticalmente na distribuição de velocidades.

Figura 97 - Corte da região 02, mostrando o fluxo de vento



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

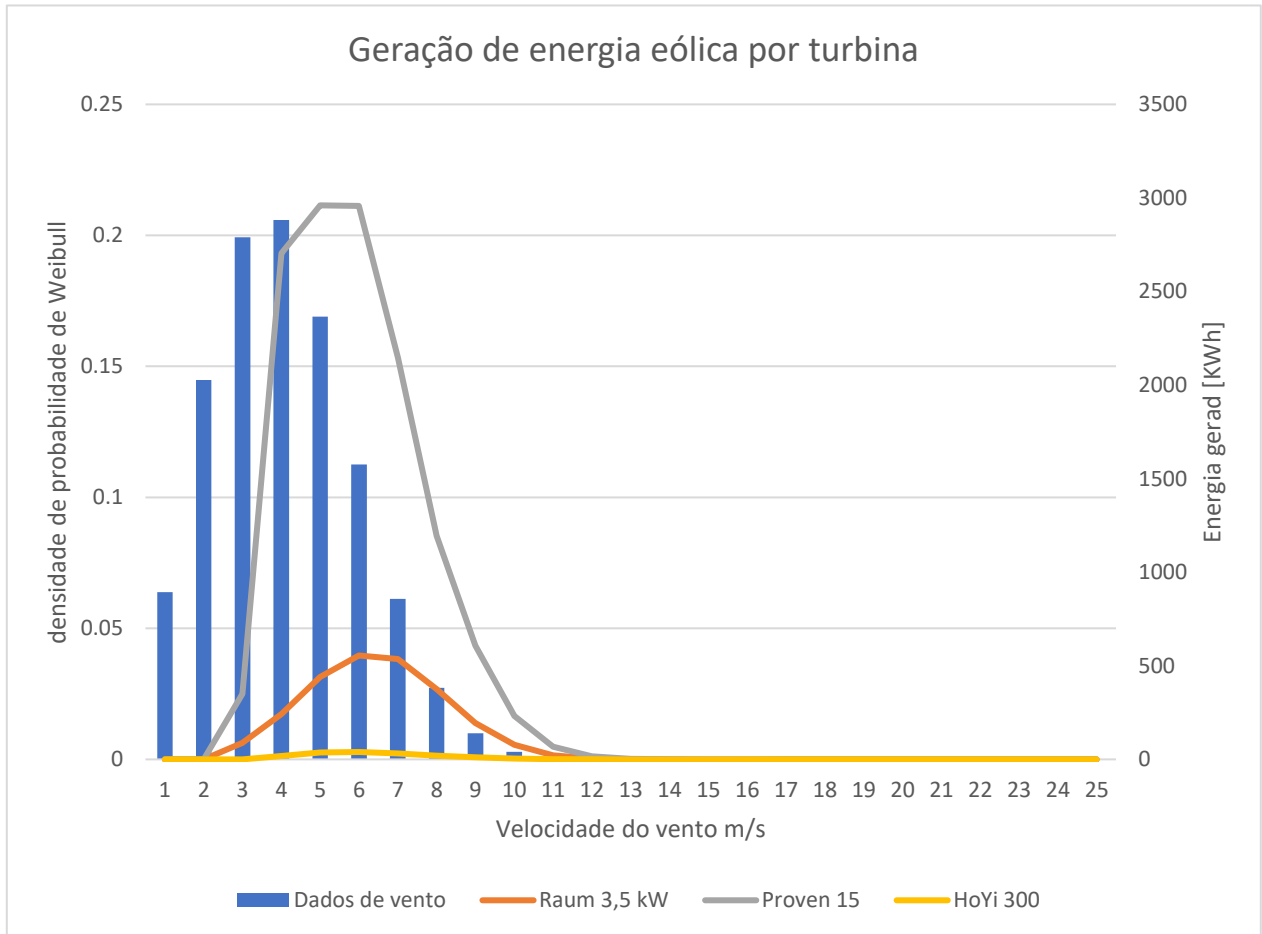
### **8.4.3 Geração de energia eólica**

#### **8.4.3.1 Cálculo do potencial via densidade de probabilidade de Weibull**

Para auxiliar a análise da quantidade de energia gerada pela ação do vento que ocorre na área de estudo, a pesquisa vai utilizar de um cálculo simplificado do potencial de energia eólica através do uso da densidade de probabilidade de Weibull.



Figura 98 - Geração de energia eólica por densidade de probabilidade.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Os resultados do cálculo prescritivo podem ser vistos na tabela 21, vê-se que a geração de energia das turbinas chega a suprir 0,265 %do consumo dos edifícios de referências simulados, assim mesmo o menor uso energético do edifício, as torres de resfriamento, conseguem ser supridas, já que elas representam 0,75% do consumo total.

Tabela 21 - Geração de energia anual de acordo com os cálculos de densidade de probabilidade. Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

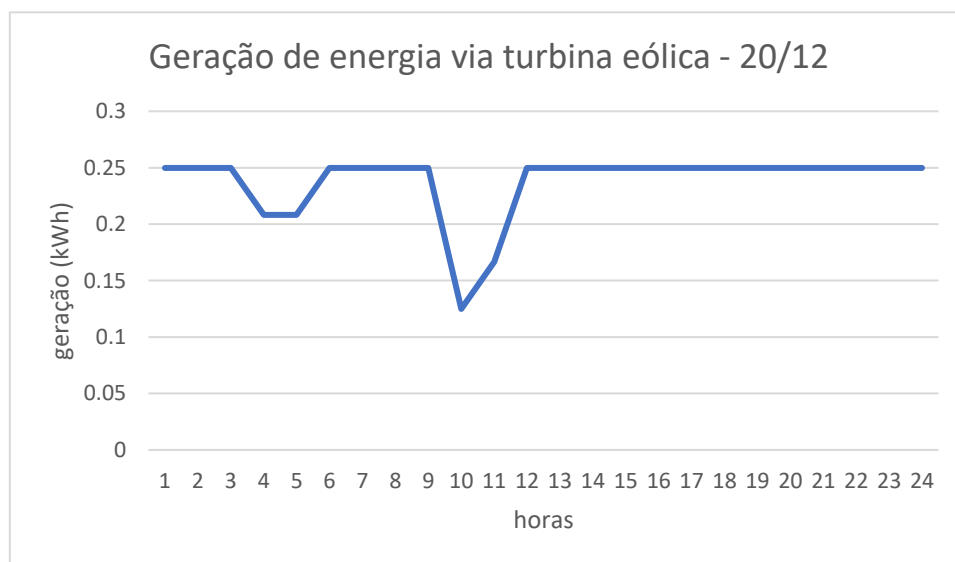
Modelo turbina	Geração de energia total anual
HoYi 300	162,15 kWh/ ano
Raum 3,5 kW	2.536,02 kWh/ ano

#### 8.4.3.2 Simulação no EnergyPlus

As simulações de geração de energia eólica usaram da metodologia descrita no capítulo 02, obtendo os seguintes resultados para cada turbina:

Para a turbina HoYi 300 a geração anual de energia é de 173,91 kWh, com a curva de geração de energia que indica que na maior parte do tempo a turbina gera o máximo de energia, o que indica que a turbina em si não é capaz de gerar grandes quantidades de energia para suprir a edificação.

Figura 99 - Geração de energia eólica diária da turbina HoYi 300 segundo simulação no EnergyPlus.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Para a turbina Raum 3,5 a geração anual de energia é de 2.838,60 kWh, com a curva de geração de energia indicando um pico às 18h00, quando o edifício de referência começa a fechar.

Figura 100 - Geração de energia eólica diária da turbina Raum 3,5 kW segundo simulação no EnergyPlus.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Para a turbina Proven 15 a geração anual de energia é de 13.708,58 kWh, com a curva de geração de energia também indicando um pico às 18h00, quando o edifício de referência começa a fechar.

Figura 101 - Geração de energia eólica diária da turbina Proven 15 segundo simulação no EnergyPlus.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Nota-se que a energia gerada é tão baixa, que não é possível implementar alguma otimização para compensar algum gasto energético da edificação de referência. Assim não é aplicado nenhum processo com algoritmo genético para otimizar uma envoltória para essa área de estudo.

#### 8.4.3.3 Verificação de resultados

Os resultados podem ser verificados se forem consultados outros trabalhos que também estudaram as possibilidades de uso de energia eólica no meio urbano. O primeiro deles, Hussni (2020) estudou com os dados retirados de um edifício central de São Paulo e fez uma análise de *payback* em relação a energia gerada pelas turbinas que foram testadas, e nenhuma delas se mostrou viável, dado o baixo nível de geração de energia que as turbinas tinham.

Um segundo trabalho, o de Valença (2010), referente a cidade de Olinda, mostra que turbinas entre 5kW de potência conseguem gerar até 9.423,00 kWh/ ano, o que é equivalente ao valor que apareceu para a turbina de 15 kW para a cidade de São Paulo. Dessa forma, observando os dois resultados, verifica-se que os valores obtidos pela pesquisa são comparáveis a outros trabalhos.

### 8.5 GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

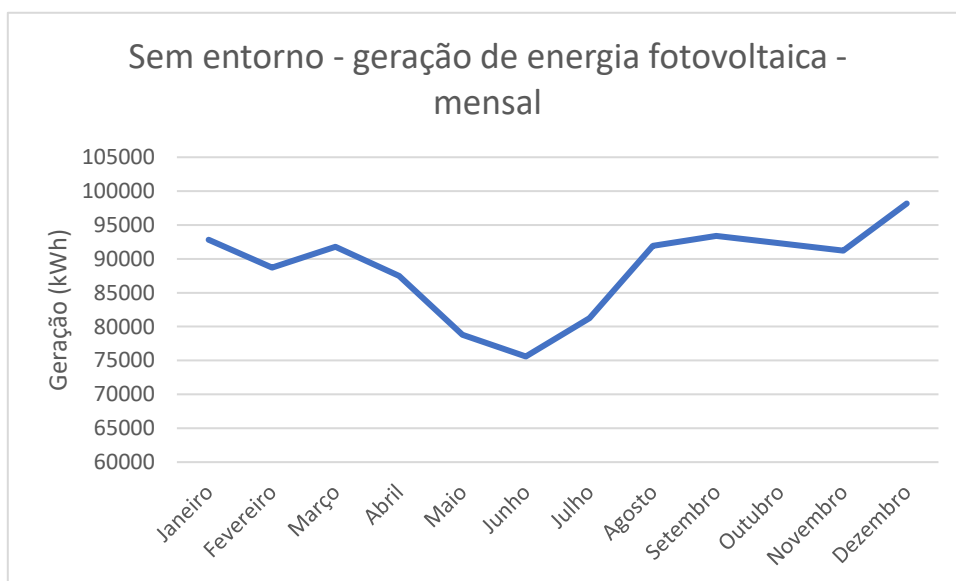
O edifício de referência foi simulado para verificar o quanto de energia sua envoltória é capaz de gerar energia fotovoltaica, as condições às quais a envoltória foi simulada foram explicadas na seção referente no capítulo de metodologia.

#### 8.5.1 Sem entorno

Quando a edificação está sem entorno, ela gera um total de 1.066.415,31 kWh/ ano de energia fotovoltaica, o que corresponde a um total de 22,07% do consumo total do edifício de referência típico, o que compensa o uso final de resfriamento da edificação (ou seja, serpentina e *chillers*) somado ao uso de bombas para a circulação de água gelada. A geração de energia também supre em 64% as necessidades energéticas para os usos de iluminação e de equipamentos.

A figura 102 mostra a geração mensal de energia fotovoltaica, no qual apresenta a variação de geração durante o ano. Comparando com a curva de consumo mensal, a geração segue a demanda energética do sistema de ar-condicionado, porém ainda não cobrindo concomitantemente. A geração de energia tem um pico no mês de dezembro e um vale nos meses de inverno.

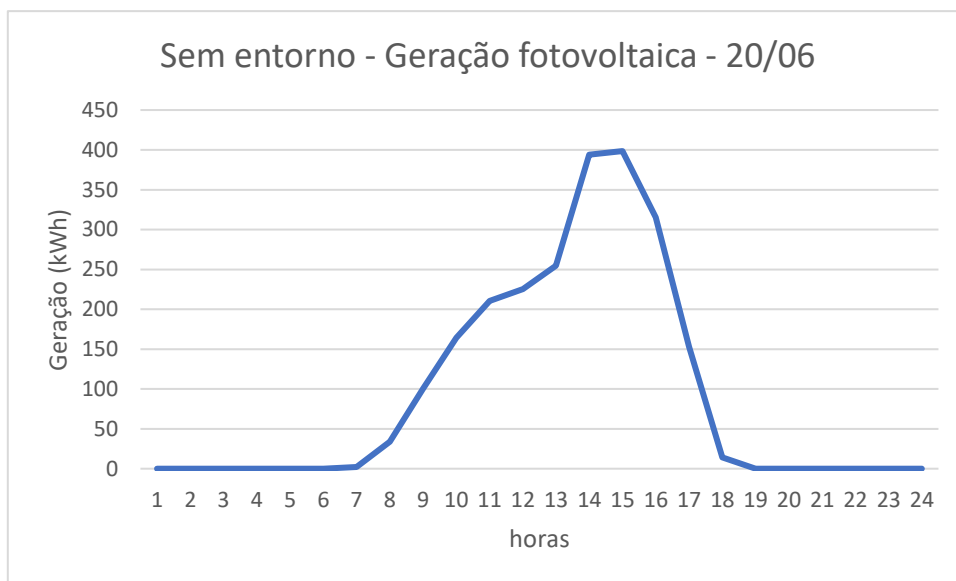
Figura 102 - Geração de energia mensal da envoltória do edifício de referência sem entorno.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

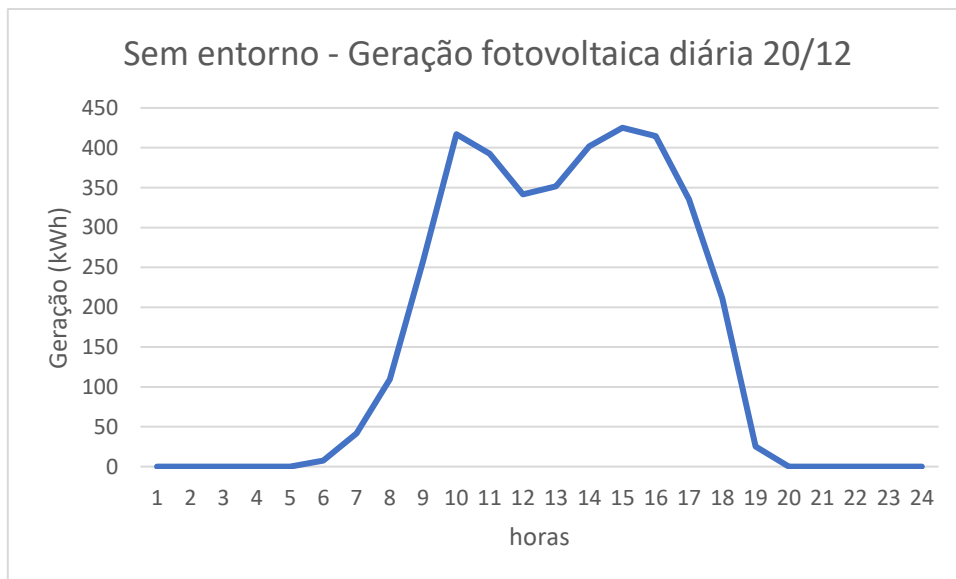
As figuras 103 e 104 mostram os picos de geração horária para os dias de inverno e de verão. Para inverno, a curva apresenta um pico de geração entre as 14h00 e 15h00, o que coincide com o pico de consumo energético a tarde dos sistemas de iluminação e de equipamentos. Já para o verão, a curva de geração apresenta dois picos de 400 kWh gerados que são concomitantes aos dois picos de uso do sistema de ar-condicionado do edifício de referência sem entorno.

Figura 103 - Geração de energia diária para os dias de inverno da envoltória do edifício de referência sem entorno.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 104 - Geração de energia diária para os dias de verão da envoltória do edifício de referência sem entorno.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

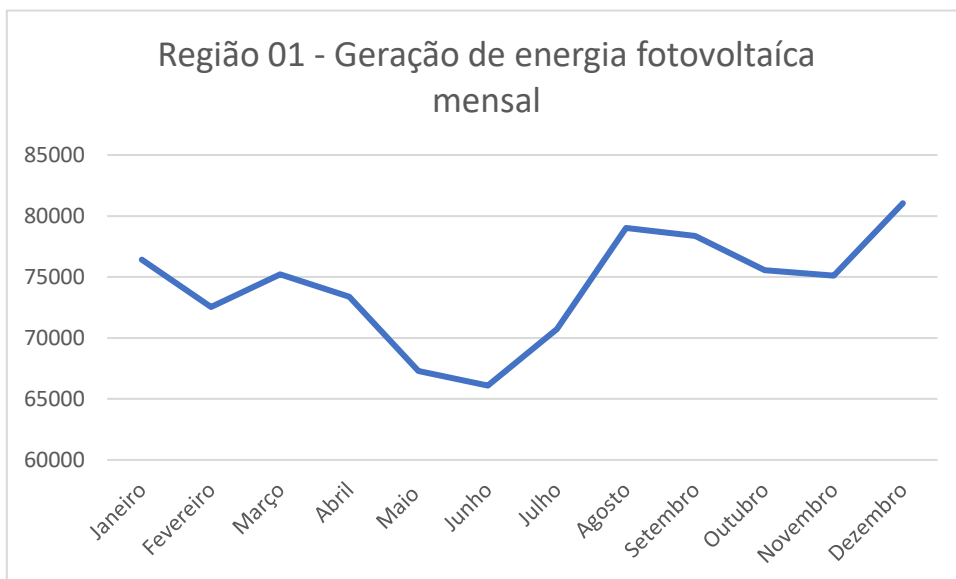
### 8.5.2 Região 01

Quando a edificação está sem entorno, ela gera um total de 803.911,46 kWh/ ano de energia fotovoltaica, o que corresponde a um total de 16,08% do consumo total do edifício

de referência típico, o que compensa o uso final de resfriamento da edificação (ou seja, serpentina e *chillers*). A geração de energia também supre em 42% as necessidades energéticas para os usos de iluminação e de equipamentos.

A figura 105 mostra a geração mensal de energia fotovoltaica, no qual apresenta a variação de geração durante o ano. A geração de energia tem um pico no mês de dezembro e um vale nos meses de inverno. Comparando com a curva de consumo mensal, a geração segue a demanda energética do sistema de ar-condicionado, porém ainda não cobrindo concomitantemente. Há uma menor geração de energia total, mas existe uma queda maior de produção nos meses de inverno.

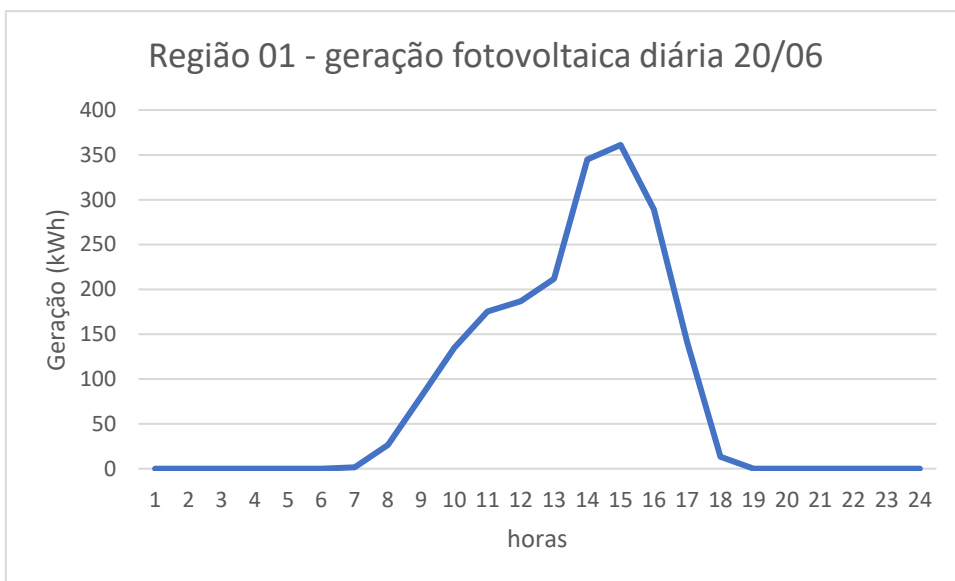
Figura 105 - Geração de energia mensal da envoltória do edifício de referência implantado na Região 01.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

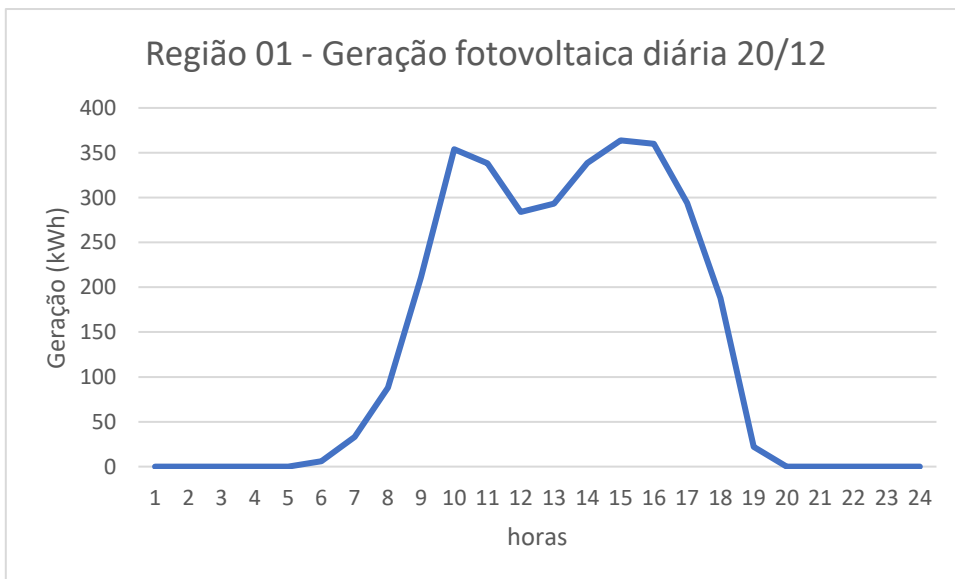
As figuras 106 e 107 mostram os picos de geração horária para os dias de inverno e de verão. Para inverno, a curva apresenta um pico de geração entre as 14h00 e 15h00, o que coincide com o pico de consumo energético a tarde dos sistemas de iluminação e de equipamentos. Já para o verão, a curva de geração apresenta dois picos de 360 kWh gerados que são concomitantes aos dois picos de uso do sistema de ar-condicionado do edifício de referência.

Figura 106 - Geração de energia diária para os dias de inverno da envoltória do edifício de referência implantado na Região 01.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 107 - Geração de energia diária para os dias de verão da envoltória do edifício de referência implantado na Região 01.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

### 8.5.3 Região 02

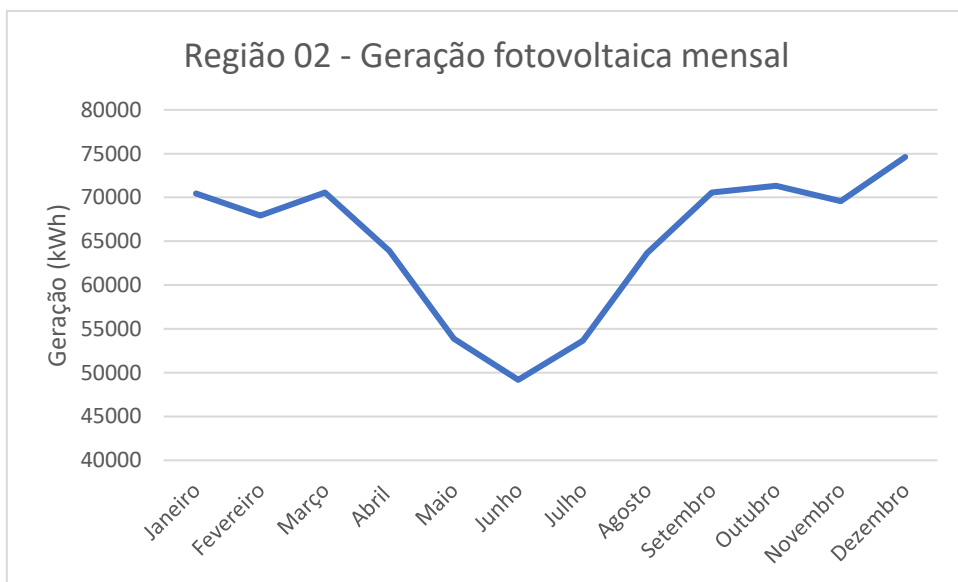
Quando a edificação está sem entorno, ela gera um total de 703.380,50 kWh/ ano de energia fotovoltaica, o que corresponde a um total de 14,24% do consumo total do edifício



de referência típico, o que compensa o uso final de resfriamento da edificação (ou seja, serpentina e *chillers*). A geração de energia também supre em 42% as necessidades energéticas para os usos de iluminação e de equipamentos.

A figura 108 mostra a geração mensal de energia fotovoltaica, no qual apresenta a variação de geração durante o ano. A geração de energia tem um pico no mês de dezembro, menor que os picos das regiões anteriores, e um vale nos meses de inverno, comparando com a curva de consumo mensal, a geração segue a demanda energética do sistema de ar-condicionado, porém ainda não cobrindo concomitantemente. Há uma menor geração de energia no total, mas existe uma queda maior de produção nos meses de inverno. A demanda de resfriamento em fevereiro não é coberta pela quantidade de energia gerada pelo sistema fotovoltaico em fevereiro.

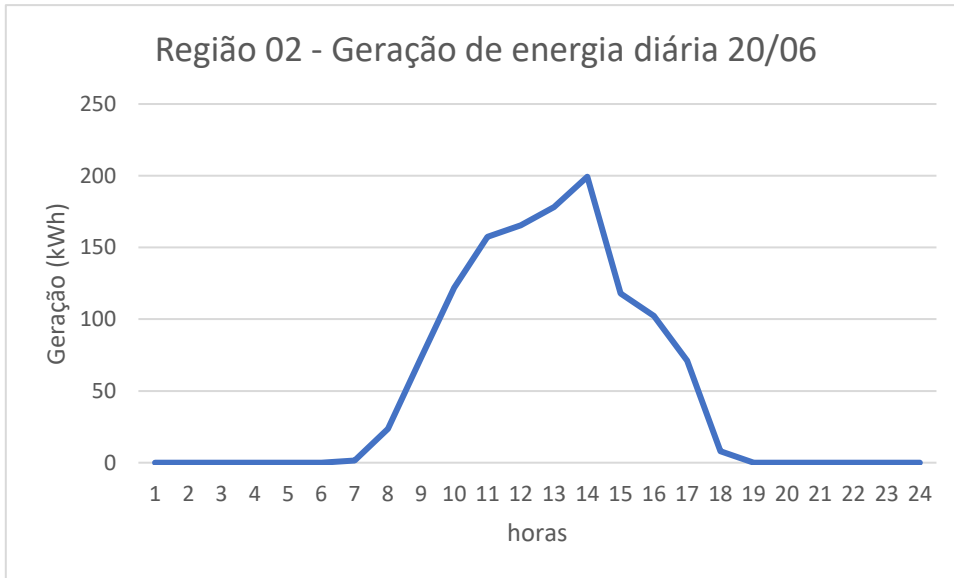
Figura 108 - Geração de energia mensal da envoltória do edifício de referência implantado na Região 02.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

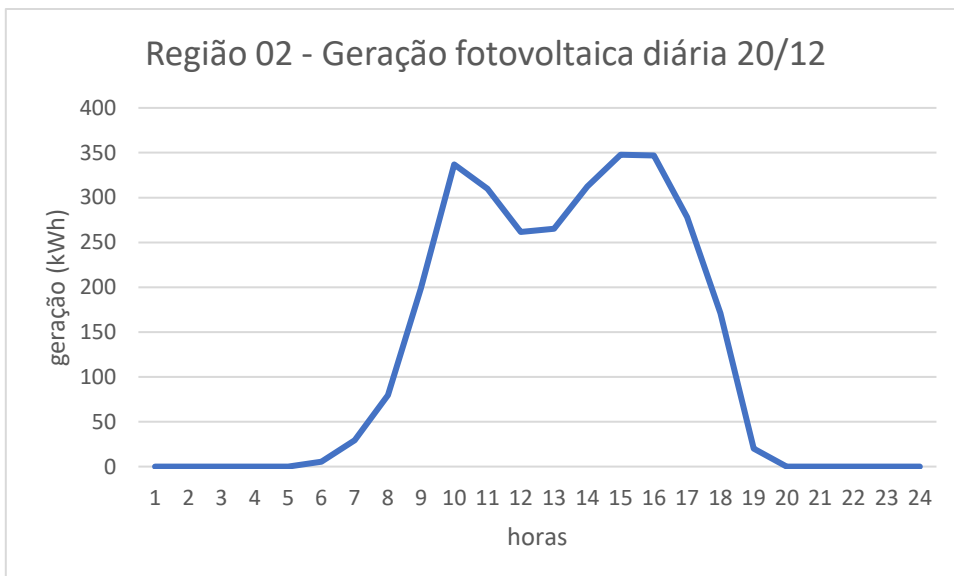
As figuras 109 e 110 mostram os picos de geração horária para os dias de inverno e de verão. Para inverno, a curva apresenta um pico de geração entre as 14h00 e 15h00 gerando cerca de 200 kWh, o que coincide com o pico de consumo energético a tarde dos sistemas de iluminação e de equipamentos. Já para o verão, a curva de geração apresenta dois picos de 350 kWh gerados que são concomitantes aos dois picos de uso do sistema de ar-condicionado do edifício de referência.

Figura 109 - Geração de energia diária para os dias de inverno da envoltória do edifício de referência implantado na Região 02.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 110 - Geração de energia diária para os dias de verão da envoltória do edifício de referência implantado na Região 02.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

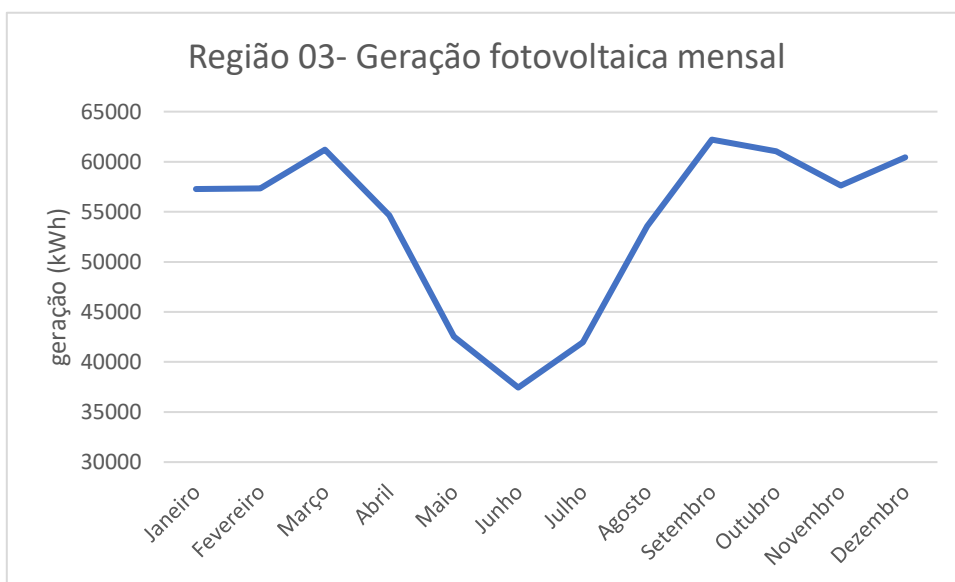
#### 8.5.4 Região 03

- Geração total de energia. 649.118,76 kWh

Quando a edificação está sem entorno, ela gera um total de 649.118,76 kWh/ ano de energia fotovoltaica, o que corresponde a um total de 13,28% do consumo total do edifício de referência típico, o que compensa o uso final de bombas de circulação de água e ventiladores. A geração de energia também supre em 39% as necessidades energéticas para os usos de iluminação e de equipamentos.

A figura 111 mostra a geração mensal de energia fotovoltaica, no qual apresenta a variação de geração durante o ano. Comparando com a curva de consumo mensal, a geração segue a demanda energética do sistema de ar-condicionado, porém ainda não cobrindo concomitantemente. A geração de energia tem um pico no mês de setembro e março e um vale nos meses de inverno em que gera somente 37.500 kWh.

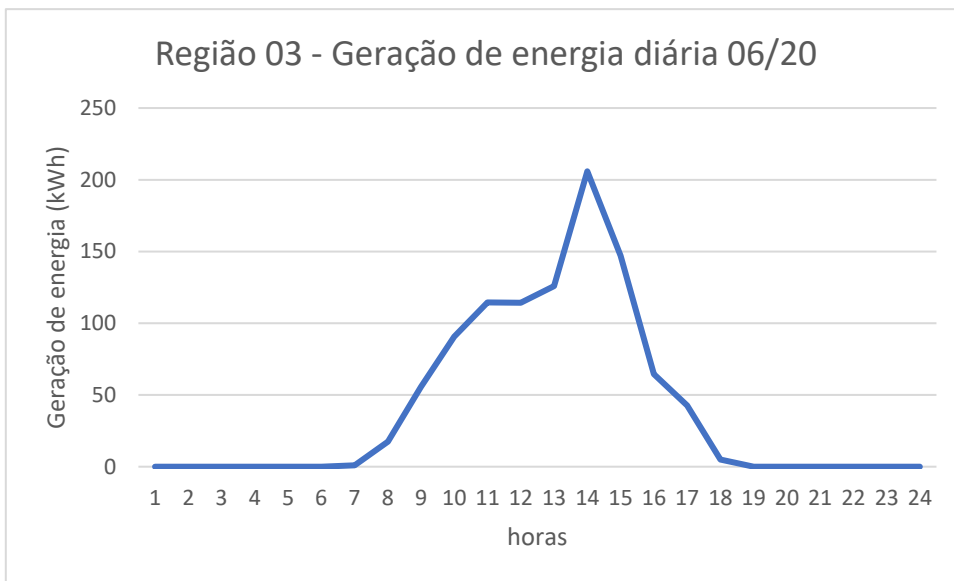
Figura 111 - Geração de energia mensal da envoltória do edifício de referência implantado na Região 03.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

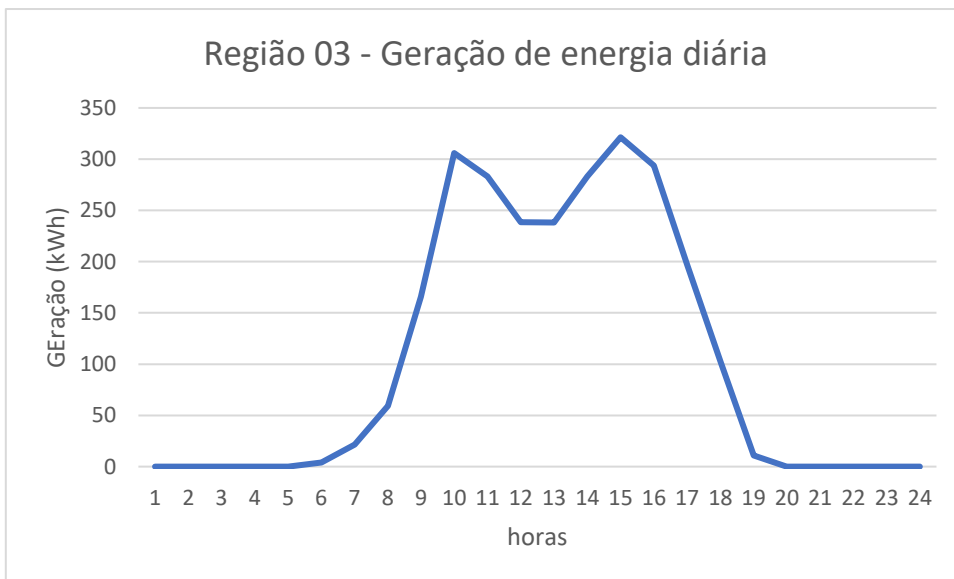
As figuras 112 e 113 mostram os picos de geração horária para os dias de inverno e de verão. Para inverno, a curva apresenta um pico de geração entre as 14h00 e 15h00 gerando cerca de 200 kWh, o que coincide com o pico de consumo energético a tarde dos sistemas de iluminação e de equipamentos. Já para o verão, a curva de geração apresenta dois picos de 320 kWh gerados que são concomitantes aos dois picos de uso do sistema de ar-condicionado do edifício de referência.

Figura 112 - Geração de energia diária para os dias de inverno da envoltória do edifício de referência implantado na Região 02.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 113 - Geração de energia diária para os dias de verão da envoltória do edifício de referência implantado na Região 03.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

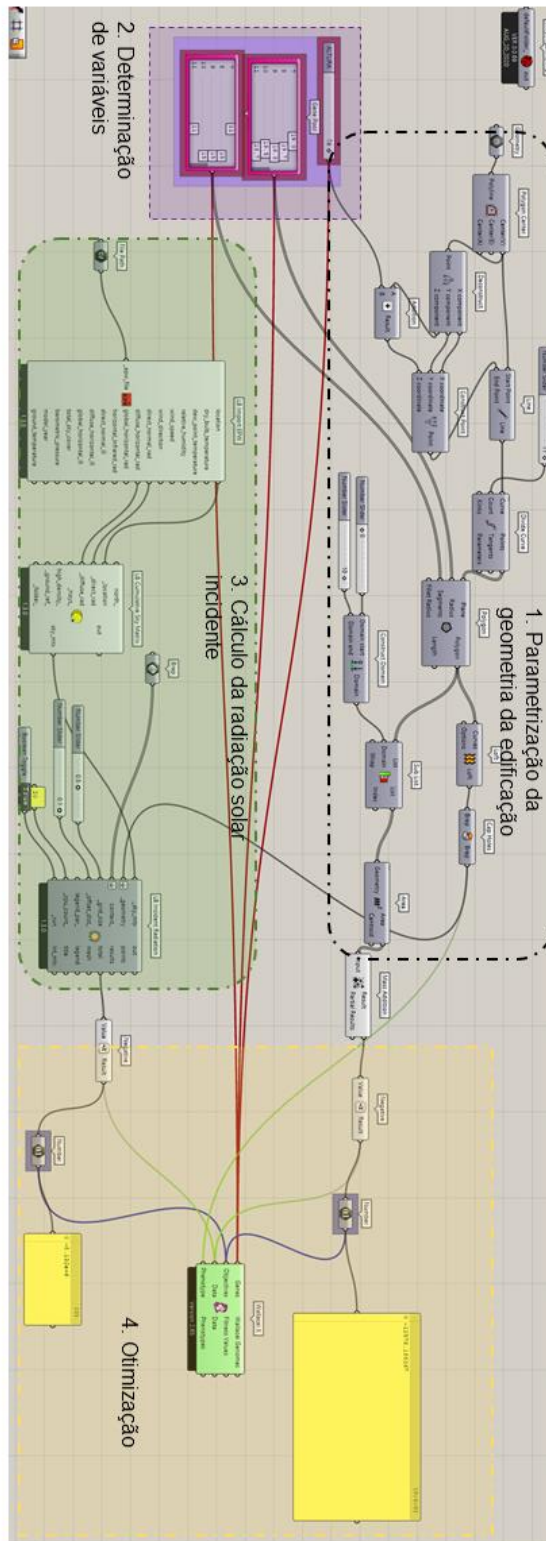
## 8.6 ENVOLTÓRIA OTIMIZADA

### 8.6.1 Algoritmo de otimização

O algoritmo usado para a otimização da envoltória do modelo de referência está representado na figura 114. Ele foi estruturado em quatro partes.

- a) Parte 01: Parametrização da geometria da edificação – Aqui é a definição da geometria da forma da edificação, é utilizado formas geométricas básicas em planta e, depois de extrudal-las, é feito uma operação de criação de uma superfície que leva em conta o números de lados das plantas (*loft*);
- b) Parte 02: Determinação das variáveis – Foram selecionadas três tipos de variáveis como genes da população a ser simulada, a altura da edificação, o número de lados de uma planta de pavimento (variando de 3 a 20) e o raio da circunferência inscrita no polígono que representa (variando de 15 m a 20 m). A área total de todos os vinte e um pavimentos é somada e negativada, como dito no capítulo 05, para que a otimização a maximize.
- c) Parte 03 Cálculo da radiação solar incidente – a radiação incidente na geometria é calculada pelo plugin Ladybug. Que considera o entorno da edificação para o cálculo. O valor total da radiação incidente é negativada para que o processo de orimização a maximize.
- d) Parte 04:Otimização – onde se localiza o plugin Wallacei X, que fará o processo de otimização e os dados de saída para cada indivíduo testado pelo algoritmo NGSa – II.

Figura 114 - Algoritmo de otimização da forma.



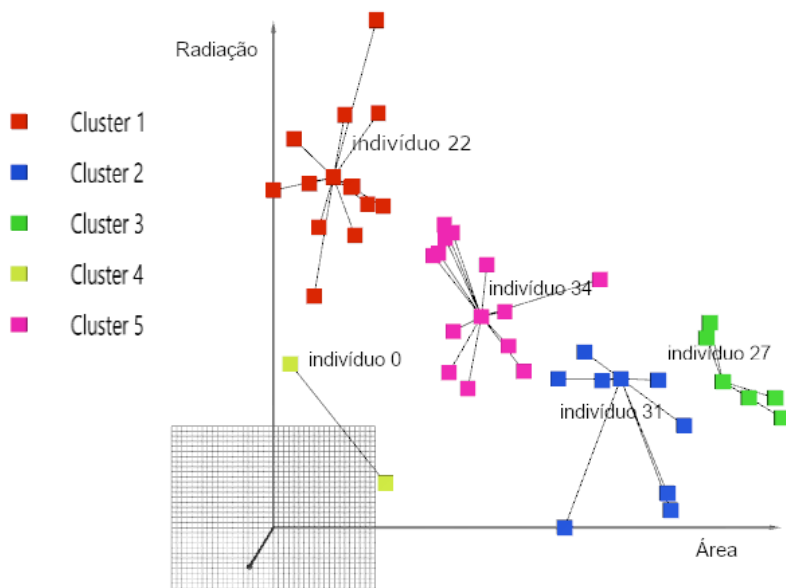
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Para a simulação das formas de envoltórias otimizadas, foram geradas 1250 envoltórias para cada uma das três regiões analisadas, separados em 50 gerações de 25 fenótipos cada. Calculou-se a geração de energia solar da 50ª geração, a mais próxima da fronteira de Pareto. Foi utilizado um filme fino, do tipo CIGS, de mesma eficiência do edifício de referência

### 8.6.2 Região 01

O algoritmo *K-means* separou o grupo de 50 indivíduos, da última geração projetada pelo algoritmo evolutivo, em 5 grupos nos quais seus centros são destacados na figura 115, abaixo. Agrupamento do indivíduo 27 possui uma menor área (lembrando que o valor do gráfico é multiplicado por -1 para maximização dos valores), enquanto o agrupamento do indivíduo 22 é o que possui menor radiação incidente.

Figura 115 - Divisão entre grupos de indivíduos da última geração simulada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A tabela 22 mostra os resultados para os indivíduos centrais dos agrupamentos selecionados pelo algoritmo k-means, para a região 01. Em média a geração de energia obtida para esses indivíduos ficou em 670.000 kWh/ano, excetuando o indivíduo 22, no qual houve um problema com a geometria gerada que não contabilizou a geração de

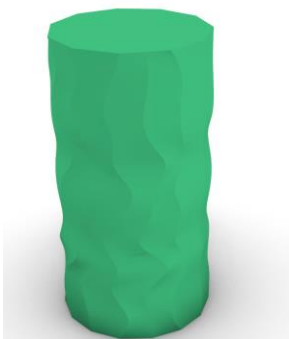
parte da envoltória. A área de piso resultante ficou em torno de 25.000 m<sup>2</sup> para as cinco opções.

Tabela 22 - Resultados de geração de energia fotovoltaica e área dos indivíduos centrais do cluster para região 01. Fonte: Elaborado pelo autor

---

Cluster: 4 – Indivíduo 0

---



Geração de energia: 699.679,70 kWh/ano

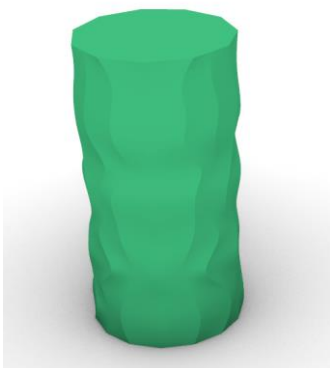
Radiação incidente 13.662 kWh/m<sup>2</sup>/ano

Área de piso: 25.218,00m<sup>2</sup>

---

Cluster 1 – Indivíduo 22

---



Geração de energia: 494.757,20 kWh/ano

Radiação incidente: 10.814,24 kWh/m<sup>2</sup>/ano

Área de piso: 25.242 m<sup>2</sup>

---

Cluster 3 Indivíduo 27

---

Geração de energia: 673.122,6 kWh/ano

Radiação incidente: 13.489,16 kWh/m<sup>2</sup>/ano





Área de piso: 24.956 m<sup>2</sup>

---

#### Cluster 2 - Indivíduo 31

---



Geração de energia: 680.326,70 kWh/ano

Radiação incidente: 13.647,98 kWh/m<sup>2</sup>/ano

Área de piso: 25.238 m<sup>2</sup>

---

#### Cluster 5 - Indivíduo 34

---



Geração de energia: 692.193,30 kWh/ano

Radiação incidente: 13.674,39 kWh/m<sup>2</sup>/ano

Área de piso: 25.152 m<sup>2</sup>

---

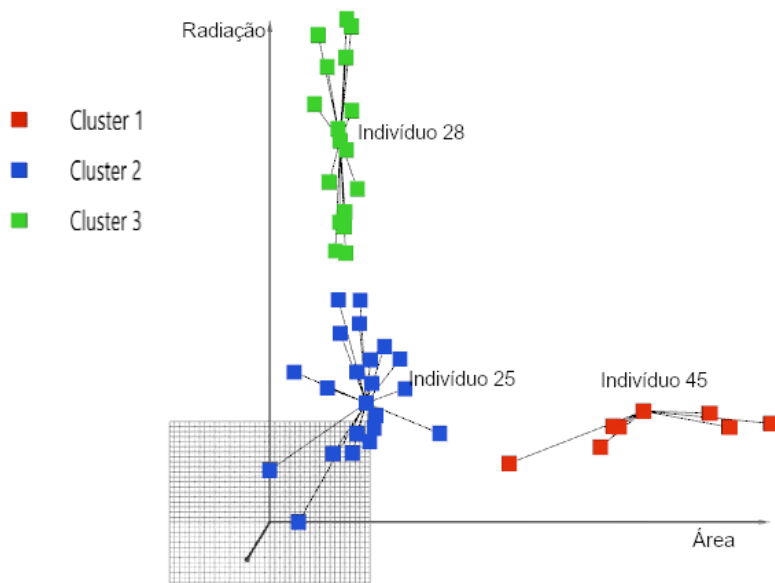
A geração de energia renovável das envoltórias otimizadas supre em média 14% do consumo anual do edifício de referência implantado na região 01, o que corresponde a quase o consumo somente do sistema de resfriamento deste edifício, sem contar

ventiladores, bombas e torres de resfriamento. A envoltória não consegue suprir um sistema de iluminação típica de um edifício de escritórios, a menos que sejam empregadas outras técnicas para redução de consumo desse uso final, como, por exemplo, a dimerização. A energia gerada pela envoltória otimizada supre 48% do consumo elétrico de equipamentos.

### 8.6.3 Região 02

O algoritmo *K-means* separou o grupo de 50 indivíduos, da última geração projetada pelo algoritmo evolutivo, em 3 grupos nos quais seus centros são destacados na figura 116, abaixo. Agrupamento do indivíduo 45 possui uma menor área (lembrando que o valor do gráfico é multiplicado por -1 para maximização dos valores), enquanto o agrupamento do indivíduo 28 é o que possui menor radiação incidente.

Figura 116 - Divisão entre grupos de indivíduos da última geração simulada.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A tabela 23 mostra os resultados para os indivíduos centrais dos agrupamentos selecionados pelo algoritmo k-means, para a região 01. Em média a geração de energia

obtida para esses indivíduos ficou em 600.000 kWh/ano. A área de piso resultante ficou em torno de 25.500 m<sup>2</sup> para as cinco opções

Tabela 23 - Resultados de geração de energia fotovoltaica e área dos indivíduos centrais do cluster para região 02. Fonte: Elaborado pelo autor

---

Cluster: 2 Indivíduo: 25

---



Geração de energia: 600.144,80 kWh/ ano

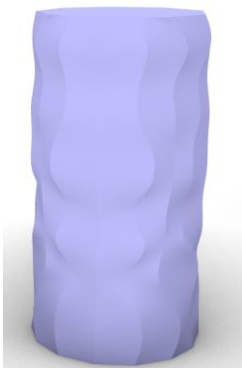
Radiação incidente: 13.652,87 kWh/m<sup>2</sup>/ano

Área de piso: 25.827,06 m<sup>2</sup>

---

Cluster: 03 Indivíduo: 28

---



Geração de energia: 599.498,70 kWh/ ano

Radiação incidente: 13.586,45 kWh/m<sup>2</sup>/ano

Área de piso: 25.860,86 m<sup>2</sup>

---

Cluster: 01 Indivíduo: 45

---

Geração de energia: 581.416,60 kWh/ ano

Radiação incidente: 13.602,56 kWh/m<sup>2</sup>/ano



Área de piso: 25.565,34 m<sup>2</sup>

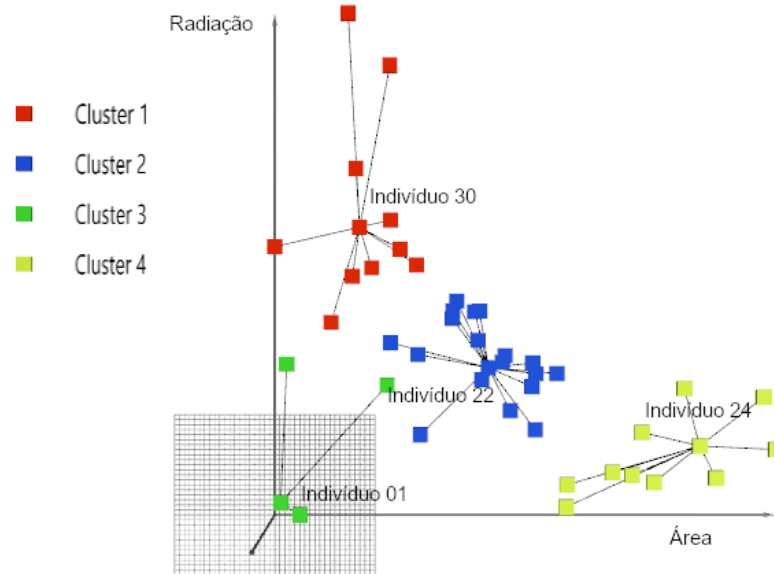
---

A geração de energia renovável das envoltórias otimizadas supre em média 12% do consumo anual do edifício de referência implantado na região 02, o que corresponde a quase o consumo somente do sistema de resfriamento deste edifício, sem contar ventiladores, bombas e torres de resfriamento. A envoltória não consegue suprir um sistema de iluminação típica de um edifício de escritórios, a menos que sejam empregadas outras estratégias para redução de consumo desse uso final. A energia gerada pela envoltória otimizada supre 36% do consumo elétrico de equipamentos.

#### **8.6.4 Região 03**

O algoritmo *K-means* separou o grupo de 50 indivíduos, da última geração projetada pelo algoritmo evolutivo, em 4 grupos nos quais seus centros são destacados na figura 117, abaixo. Agrupamento do indivíduo 24 possui uma menor área enquanto o agrupamento do indivíduo 30 é o que possui menor radiação incidente.

Figura 117 - Divisão entre grupos de indivíduos da última geração simulada.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A tabela 24 mostra os resultados para os indivíduos centrais dos agrupamentos selecionados pelo algoritmo k-means, para a região 01. Em média a geração de energia obtida para esses indivíduos ficou em 730.000 kWh/ano. A área de piso resultante ficou acima de 25.200 m<sup>2</sup> para as cinco opções

Tabela 24 - Resultados de geração de energia fotovoltaica e área dos indivíduos centrais do cluster para região 03. Fonte: Elaborado pelo autor

---

#### Cluster 03 – Indivíduo: 01

---



Geração de energia: 736.494,60 kWh/ano

Radiação incidente: 13.756,10 kWh/m<sup>2</sup>/ano

Área de piso: 25.637,42 m<sup>2</sup>

---

---

Cluster: 02 Individuo: 22

---



Geração de energia: 716.577,70 kWh/ano

Radiação incidente: 13.667,02 kWh/m<sup>2</sup>/ano

Área de piso: 25.460,94 m<sup>2</sup>

---

Cluster: 04 Individuo: 24

---



Geração de energia: 724.531,50 kWh/ano

Radiação incidente: 14.027 kWh/m<sup>2</sup>/ano

Área de piso: 25.263,42 m<sup>2</sup>

---

Cluster 01 Individuo 30

---



Geração de energia: 738.622,40 kWh/ano

Radiação incidente: 13.663,23 kWh/m<sup>2</sup>/ano

Área de piso: 25.577,20 m<sup>2</sup>

---

A geração de energia renovável das envoltórias otimizadas supre em média 15% do consumo anual do edifício de referência implantado na região 03, o que corresponde

ao consumo das bombas, ventiladores e a rejeição de calor do sistema de ar-condicionado. A envoltória não consegue suprir um sistema de iluminação típica de um edifício de escritórios, a menos que sejam empregadas outras estratégias para redução de consumo desse uso final. A energia gerada pela envoltória otimizada supre 44% do consumo elétrico de equipamentos internos.

## 9 CONCLUSÕES

Os sistemas de geração de energia renovável podem ser implantados em arquiteturas não só residenciais, mas também comerciais e institucionais, para gerar energia que compense os consumos energéticos finais das edificações que estão acopladas.

A implantação de um sistema de geração eólico se mostra mais complexa, já que demanda vários estudos técnicos para sua correta implantação e dimensionamento, e como se viu no trabalho, não é em toda a malha urbana que sua aplicação é viável, pois o tecido urbano desacelera o vento e torna o fluxo bastante turbulento. Já para o caso dos sistemas de geração fotovoltaica existem sistemas de dimensionamento simplificados que auxiliam num dimensionamento rápido na carga que o sistema irá suprir, além disso a eficiência dos elementos geradores está mais avançada, garantindo uma maior quantidade de energia produzida que os sistemas eólicos.

A dissertação avaliou a região da avenida Engenheiro Luiz Carlos Berrini, um dos atuais vetores de expansão da tipologia de escritórios de serviços na cidade de São Paulo sob a ótica da geração de energia renovável em um edifício padrão da tipologia na cidade. Num segundo momento, a envoltória da edificação recebe um processo de otimização, que tenta projetar um volume em que possa receber a maior quantidade de radiação possível para essa geração.

Foi necessária a divisão do bairro inteiro em três regiões, com diferentes níveis de obstrução do entorno para o céu. O critério usado para essa divisão foi o SVF (Sky View Factor). A região mais ao sul (região 03) apresentou o menor valor médio, já que possui a maioria dos prédios altos da região. Já a região mais ao norte (região 01) possui menor grau de obstrução do entorno.

Um edifício de referência, baseado em pesquisa bibliográfica, foi simulado dentro das três regiões e seu consumo comparado. A região 01 apresentou o maior consumo, devido o entorno não possuir obstruções. Dessa forma, a demanda do sistema de ar-condicionado é maior, já que existe uma quantidade de carga térmica vinda do exterior maior que nas outras duas regiões.



O fluxo de vento do bairro e das três regiões foi estudado por meio de uma simulação em Fluido Dinâmica Computacional (CFD) e se concluiu que, na altura do edifício de referência, o vento é desacelerado pelos outros edifícios construídos, diminuindo a utilização de turbinas eólicas na envoltória da edificação. Este fato é corroborado com as simulações de geradores eólicos via o software EnergyPlus e cálculos de estimativa da curva de probabilidade de Weibull, os cálculos indicam uma geração total de 1% do consumo anual da edificação de referência nas três regiões, valor de geração energética que inviabiliza a continuidade de exploração do sistema eólico.

Para a geração de energia solar foi simulado um caso de referência, no qual se aplica um filme fino fotovoltaico de tecnologia CiGS, com uma eficiência de 13,5%; esse modelo levou como contexto externo as três regiões definidas anteriormente. A melhor situação de geração de energia é na Região 01, devido ao baixo nível de obstrução, e a pior é na Região 03. A energia gerada pelos filmes fotovoltaicos cobre de 13% a 16% do consumo energético do edifício de referência em sua respectiva implantação.

É importante ressaltar que o mesmo sombreamento que diminuiu o consumo do sistema de ar-condicionado da região 03 também afetou a geração de energia fotovoltaica e a reduziu em 3%, se comparado à região 01.

Em seguida, foi feito um processo de otimização que utilizou o algoritmo evolutivo NSGA II para tentar aumentar a geração de energia fotovoltaica da envoltória de referência, os resultados mostraram que houve aumento de 14% na quantidade de energia produzida pela envoltória otimizada na região 03, utilizando um filme fino de mesma eficiência que o edifício de referência. Nas outras duas regiões restantes o processo gerou um decréscimo de 15% na produção de energia.

Vale ressaltar que o processo de otimização termina apresentando uma grande quantidade de opções em que não há uma mudança significativa no desempenho entre as opções, assim cabendo ao projetista escolher entre uma delas para dar continuidade ao projeto.

Mesmo não gerando energia suficiente para se manter, é importante ressaltar que o sistema de geração de energia renovável integrado à rede elétrica libera a energia gerada na rede, aliviando-a em momentos de alta demanda energética, aumentando assim a sua capacidade de diminuir as quedas de energia. Dessa forma o sistema de geração de energia renovável contribui com a resiliência do sistema elétrico da cidade de São Paulo.

## 9.1 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Devido às restrições provocadas pela pandemia de Sars-Covid 19, que se iniciou em 2020, a pesquisa não pôde utilizar de métodos de prospecção de campo na área de estudo, sendo totalmente baseada em modelagem computacional das geometrias, das edificações e dos fenômenos físicos que comandam a geração de energia eólica e solar.

O modelo de referência simulado não leva em conta estratégias de climatização passivas para diminuição do consumo energético como, por exemplo, dimerização da iluminação artificial interna ou operação em modo misto. Já se sabe que o clima da cidade de São Paulo é propício para a operação em modo misto das edificações, ou seja, com acionamento da ventilação natural para condicionamento do clima interno da edificação. Porém o edifício de referência foi tratado sendo totalmente climatizado artificialmente durante o período de operação inteiro.

O trabalho não levou em conta as trocas de calor que ocorrem entre a materialidade da envoltória e a parte traseira dos dispositivos de geração de energia fotovoltaica, essas trocas de calor podem levar a altas temperaturas nos geradores e diminuir sua eficiência.

Apesar das limitações impostas, o trabalho resultou em grandes contribuições a respeito da comparação entre o consumo de um edifício comercial do setor de serviços típico e a geração de energia renovável que sua envoltória pode gerar. A pesquisa conseguiu verificar quais são os limites em que a energia gerada pela envoltória possui em relação ao consumo e a geometria do edifício e de seu entorno. O trabalho também trouxe considerações importantes a respeito de um método de otimização meta heurístico para o projeto da envoltória e se ela contribuía para o aumento da geração de energia renovável pela envoltória.

## 9.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta seção são apresentadas sugestões de trabalhos futuros que podem partir dessa dissertação para complementar os estudos já iniciados.

No bairro analisado, o fluxo de vento resultante da simulação de CFD apresentou-se insuficiente para gerar uma quantidade de energia viável para um sistema de geração de energia, numa altura até o tamanho da envoltória da edificação de referência (75m). Então, é provável existir alguma altura em que se deva colocar a turbina (através de um edifício de maior altura ou instalada por torres) para gerar uma quantidade de energia viável para implementar esse sistema.

Dada a indicação do parágrafo anterior, o estudo em que trata de opções de projeto com o volume otimizado para geração de energia eólica, agregando a simulação em CFD e algoritmos evolutivos seria importante para verificar quais são as características que a envoltória poderia ter para uma geração de energia eólica viável para ser aplicada.

Como dito na seção anterior, nem o edifício de referência, nem os volumes otimizados levaram em conta estratégias passivas em sua modelagem, e seria de grande interesse verificar a existência de possíveis conflitos como, por exemplo, investigar qual é a relação ótima entre área de envidraçado operável para o conforto térmico dos ocupantes, manter a qualidade do ar e área de produção de energia renovável fotovoltaica.

Viu-se que ao usar a casca do volume como um elemento gerador de energia não cobriu o consumo de energia de uma edificação típica da tipologia de escritórios de serviços em São Paulo. Seria de grande interesse verificar se existe uma proporção ótima entre área de envoltória geradora e o consumo interno por área de piso da edificação em que a envoltória consiga gerar energia suficiente para cobrir o consumo da edificação, e torná-la um ZEB (Zero Energy Building).

Ainda é de importante interesse o entendimento da viabilidade de layout das volumetrias que foram projetadas pelo processo de otimização e seu desempenho da iluminação natural.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, Max Lira Veras Xavier de. **Projeto performativo na prática arquitetônica: estrutura conceitual**. 2010. 472 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

ARCHINECT FIRMS. **Telefónica's Distrito C, the largest European corporate project**. Disponível em: [https://archinect.com/rafaeldelahoz\\_arquitectos/project/telefonica-s-distrito-c-the-largest-european-corporate-project](https://archinect.com/rafaeldelahoz_arquitectos/project/telefonica-s-distrito-c-the-largest-european-corporate-project). Acesso em: 08 fev. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988. 66 p.

BEAURECUEIL, Anne Save de; LEE, Franklin. **Arquitetura generativa High-low: princípios e aplicações**. In: GONÇALVES, Joana Carla Soares et al (org.). **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. Cap. 12. p. 313-328.

BENITO, Tomás Perales. **Práticas de Energia Solar Fotovoltaica**. Porto: Publindústria, 2011. 110 p.

BENTLEY, Peter J.; CORNE, David W. **Creative Evolutionary Solutions**. San Diego: Academic Press, 2002.

BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S. **Incropera: fundamentos de transferência de calor e de massa**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2019. 631 p.

BLESSMANN, Joaquim. **Aerodinâmica das construções**. Porto Alegre: Ufrgs Editora, 2011. 264 p

BRASIL, Reyolando M. L. R. F.; SILVA, Marcelo Araújo da. **Otimização de projetos de engenharia**. São Paulo: Blucher, 2019. 174 p.

BREDERODE, Vasco de; EÇA, Luís da Cunha. **Aerodinâmica Incompressível: fundamentos**. Lisboa: Ist Press, 2018. Ensino da Ciência e da Tecnologia.

BRÍGITTE, Giovanna Tomczinski Novellini. **Integração de desempenho na avaliação de projeto**: modelo de informação e simulação computacional na etapa de concepção. 2013. 235 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

CARPENTIERI, Matteo; ROBINS, Alan G. Influence of urban morphology on air flow over building arrays. **Journal Of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics**, [S.L.], v. 145, p. 61-74, out. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2015.06.001>.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA - CEPEL. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**: simulações 2013. Rio de Janeiro: Cepel, 2013

CERÓN, Isabel; CAAMAÑO-MARTÍN, E.; NEILA, F. Javier. 'State-of-the-art' of building integrated photovoltaic products. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 58, p. 127-133, out. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.02.013>.

CHATZIPOULKA, Christina; COMPAGNON, Raphaël; KAEMPF, Jérôme; NIKOLOPOULOU, Marialena. Sky view factor as predictor of solar availability on building façades. **Solar Energy**, [S.L.], v. 170, p. 1026-1038, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.028>.

CHENG, Vicky et al. Urban Form, Density and Solar Potential. In: **Conference On Passive And Low Energy Architecture**, 23., 2006, Genova. Proceedings [...] . Genova: Plea, 2006. p. 1-6.

CHIVLET, Nuria Martin; SOLLA, Ignacio Fernández. **La envolvente Fotovoltaica en la arquitectura**: criterios de diseño y aplicaciones. Barcelona: Editorial Reverté, 2007. 187 p. (Estudios Universitarios de Arquitectura).

COELHO, Caio A. S. et al. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, [S.L.], v. 46, n. 11-12, p. 3737-3752, 15 ago. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-015-2800-1>

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (Paraná). Manual de Avaliação Técnico Econômica de Empreendimento Eólico-Elétricos. Curitiba: Copel, 200.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. Relatório Final: benchmarking de escritórios corporativos e recomendações para certificação deo no brasil. São Paulo: Cbcs, 2016. 110 p.

CÓSTOLA, Daniel. **Ventilação por ação do vento no Edifício**: procedimentos para quantificação. 2006. 214 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Tecnologia da Arquitetura, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006

CRONEMBERGER, Joara; CAAMAÑO-MARTÍN, Estefanía; SÁNCHEZ, Sergio Vega. Assessing the solar irradiation potential for solar photovoltaic applications in buildings at low latitudes – Making the case for Brazil. *Energy And Buildings*, [S.L.], v. 55, p. 264-272, dez. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.044>.

D’ALESSANDRO, V.; MONTELPARE, S.; RICCI, R.; SECCHIAROLI, A.. Unsteady Aerodynamics of a Savonius wind rotor: a new computational approach for the simulation of energy performance. *Energy*, [S.L.], v. 35, n. 8, p. 3349-3363, ago. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.04.021>.

DEB, Kalyanmoy. **Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms**. Berkley: Wiley & Sons, 2001.

DEVLIN, Collette. **Wellingtonians taking part in 'virtual' solar and battery power plant trial**. 2017. Disponível em: <https://www.stuff.co.nz/business/94018297/wellingtonians-taking-part-in-virtual-solar-and-battery-power-plant-trial>. Acesso em: 25 nov. 2020.

DIDONÉ, Evelise Leite. Parametric Study for net zero energy building strategies in Brazil considering semi-transparent PV windows. 2014. 230 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Karlsruhe Institute Of Technology, Karlsruhe, 2014.

ERIKSSON, S; BERNHOFF, H; LEIJON, M. Evaluation of different turbine concepts for wind power. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, [S.L.], v. 12, n. 5, p. 1419-1434, jun. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.017>

FADIGAS, Eliane A. Faria Amaral. **Energia eólica**. Barueri: Manole, 2011. 286 p. (Série Sustentabilidade).

FIALHO, Roberto Novelli. Edifícios de Escritórios na cidade de São Paulo. 2007. 385 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GASPAR-CUNHA, Antônio; TAKAHASHI, Ricardo; ANTUNES, Carlos Henggeler (org.). **Manual de Computação Evolutiva e Meta-Heurística**. Belo Horizonte: Editora Ufmg, 2013. 453 p.

GEORGAKIS, C.; SANTAMOURIS, M. Experimental investigation of air flow and temperature distribution in deep urban canyons for natural ventilation purposes. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 4, p. 367–376, 2006.

GERO, John S.. Design Prototypes: a knowledge representation schema for design. **Ai Magazine**, California, v. 11, n. 4, p. 27-36, dez. 1990.

GEVORKIAN, Peter. **Alternative Energy Systems** in Building Design. Nova York: McGrawhill, 2010.

GONÇALVES, Joana Carla Soares et al. Projeto integrado e o papel da simulação computacional (exemplos de projeto). In: GONÇALVES, Joana Carla Soares; BODE, Klaus (org.). **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. Cap. 9. p. 237-284.

GONÇALVES, Joana Carla Soares; UMAKOSHI, Érica Mitie. The Environmental performance of Tall Buildings. Londres: Earthscan, 2010.

GROAT, Linda; WANG, David. **Architectural Research Methods**. 2. ed. New Jersey: Wiley & Sons, 2013.

GUERREIRO, Isadora de Andrade. Arquitetura-capital: a funcionalidade dos edifícios corporativos paulistas. 2010. 256 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

HARGREAVES, D.M.; WRIGHT, N.G.. On the use of the k– model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer. **Journal Of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics**, [S.L.], v. 95, n. 5, p. 355-369, maio 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2006.08.002>.

HEGGER, Manfred *et al.* **Energy Manual**: sustainable architecture. Basel: Birkhauser, 2008. 276 p.

HOLLAND, John. **Adaptation in natural and artificial systems**: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. 5. ed. Massachusetts: Mit Press, 1998.

HUSSNI, Leonardo Alberto. **Avaliação do potencial eólico em ambiente urbano para aplicação de micro e minigeração distribuída**: estudo de caso em edifício no centro da cidade de São Paulo. 2020. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós- Graduação em Energia, Instituto de Energia e Ambiente, São Paulo, 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (França). **The Future of Cooling**: opportunities for energy-efficient air conditioning. Paris: Iea Publications, 2018. 92 p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Tracking Building 2020**. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/tracking-buildings-2020>. Acesso em: 22 nov. 2020.

INVIDIATA, Andrea; GHISI, Enedir. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 130, p. 20-32, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.067>.

ISHUGAH, T. F. et al. Advances in wind energy resource exploitation in urban environment: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 37, p. 613–626, 2014.

ISHIBUCHI, Hisao; SETOGUCHI, Yu; MASUDA, Hiroyuki; NOJIMA, Yusuke. Performance of Decomposition-Based Many-Objective Algorithms Strongly Depends on Pareto Front Shapes. **Ieee Transactions On Evolutionary Computation**, [S.L.], v. 21,



n. 2, p. 169-190, abr. 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tevc.2016.2587749>

JALALI, Zahra; NOORZAI, Esmatullah; HEIDARI, Shahin. Design and optimization of form and facade of an office building using the genetic algorithm. **Science And Technology For The Built Environment**, [S.L.], v. 26, n. 2, p. 128-140, 15 jul. 2019. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/23744731.2019.1624095>

JELLE, Bjørn Petter; BREIVIK, Christer; RØKENES, Hilde Drolsum. Building integrated photovoltaic products: a state-of-the-art review and future research opportunities. *Solar Energy Materials And Solar Cells*, [S.L.], v. 100, p. 69-96, maio 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.12.016>.

KAMAT, Prashant V. Quantum Dot Solar Cells. The Next Big Thing in Photovoltaics. *The Journal Of Physical Chemistry Letters*, [S.L.], v. 4, n. 6, p. 908-918, 6 mar. 2013. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/jz400052e>.

KC, A.; WHALE, J.; URMEE, T. Urban wind conditions and small wind turbines in the built environment: A review. **Renewable Energy**, v. 131, p. 268–283, 2019.

LEONE, Camila. **Modelagem Paramétrica**: concepção de torres torcidas e proteções solares para análise de iluminação natural e radiação solar em edifícios comercial na cidade de São Paulo. 2017. 256 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2017.

LI, Q.s.; SHU, Z.R.; CHEN, F.B.. Performance assessment of tall building-integrated wind turbines for power generation. **Applied Energy**, [S.L.], v. 165, p. 777-788, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.114>.

LUKIC, Natasa; BOZIN-DAKIC, Marija; GRAHOVAC, Jovana; DODIC, Jelena; JOKIC, Aleksandar. Multi-objective optimization of microfiltration of baker's yeast using genetic algorithm. **Acta Periodica Technologica**, [S.L.], n. 48, p. 211-220, 2017. National Library of Serbia. <http://dx.doi.org/10.2298/apt1748211l>.

MAKKI, M., SHOWKATBAKHS, M. e SONG, Y. (2019) '**Wallacei Primer 2.0**', [Online]. Disponível em <https://www.wallacei.com/>.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained: theory, design, and application**. 2. ed. West Sussex: Wiley & Sons, 2009. 705 p.

MARDLE, Simon; PASCOE, Sean. An overview of genetic algorithms for the solution of optimization problems. **Computers In Higher Education Economics Review**, Bristol, v. 13, n. 1, p. 1-9, fev. 1999.

MARTINO, Jarryer Andrade de. **Algoritmos evolutivos como método para desenvolvimento de projetos de arquitetura**. 2015. 313 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015

MARTINO, Jarryer Andrade de; CELANI, Gabriela. Sistema Generativo Evolutivo como Método no Processo Criativo. In: XVIII CONFERENCE OF THE IBEROAMERICAN SOCIETY OF DIGITAL GRAPHICS - SIGRADI: DESIGN IN FREEDOM, 17., 2014, São Paulo. **Proceedings of the XVIII Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics - SIGraDi: Design in Freedom**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2014. p. 380-383.

MEEROW, S.; NEWELL, J. P.; STULTS, M. Defining urban resilience: A review. **Landscape and Urban Planning**, v. 147, p. 38–49, 2016.

MOREIRA, José Roberto Simões (org.). **Energias Renováveis, Geração distribuída e Eficiência Energética**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2021. 490 p.

MORGANTI, Michele; SALVATI, Agnese; COCH, Helena; CECERE, Carlo. Urban morphology indicators for solar energy analysis. *Energy Procedia*, [S.L.], v. 134, p. 807-814, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.533>.

MUN, Sun-Hye; KANG, Jeonga; KWAK, Younghoon; JEONG, Young-Sun; LEE, Sang-Moon; HUH, Jung-Ho. Limitations of Energy Plus in analyzing energy performance of semi-transparent photovoltaic modules. **Case Studies In Thermal Engineering**, [S.L.], v. 22, p. 100765, Dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csite.2020.100765>

NATIVIDADE, Verônica Gomes. **Fraturas Metodológicas nas Arquiteturas Digitais**. 2010. 302 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

NOBRE, Eduardo Alberto Cuce. **Reestruturação Econômica e Território: expansão recente do terciário na marginal do rio pinheiros**. 2000. 288 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

NOTHERN ARCHITECTURE. **Government Training Centre Germany**. 2019. Disponível em: <https://www.northernarchitecture.us/renewable-energy/government-training-centre-germany.html>. Acesso em: 07 fev. 2022.

OKE, Timothy R. et al. **Urban Climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 542 p.

O'KEEFE, Phil; O'BRIEN, Geoff; PEARSALL, Nicola. **The Future of Energy Use**. 2. ed. Londres: Earthscan, 2010.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (Austrália). **Urban Observatories: a comparative review**. Melbourne: Universidade de Melbourne, 2021. 60 p

OTTO, Friederike E. L. et al. Factors Other Than Climate Change, Main Drivers of 2014/15 Water Shortage in Southeast Brazil. **Bulletin Of The American Meteorological Society**, [S.L.], v. 96, n. 12, p. 35-40, dez. 2015. American Meteorological Society. [http://dx.doi.org/10.1175/bams-eee\\_2014\\_ch8.1](http://dx.doi.org/10.1175/bams-eee_2014_ch8.1).

OXMAN, Rivka. Theory and design in the first digital age. **Design Studies**, [S.L.], v. 27, n. 3, p. 229-265, maio 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.002>

PEREIRA, Daniela Cardoso Laudares. **Iluminação natural em Edifícios de Escritório: metodologia para avaliação do desempenho luminoso**. 2017. 264 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017

PEREIRA, Enio Bueno *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: Inpe, 2006. 60 p.

PEREIRA, Francisco J. B. Algoritmos Genéticos. In: GASPAR-CUNHA, António *et al* (org.). **Manual de Computação Evolutiva e Meta-Heurística**. Belo Horizonte: Editora Ufmg, 2013. p. 25-48.

PETERSEN, Steffen; SVENDSEN, Svend. Method and simulation program informed decisions in the early stages of building design. *Energy And Buildings*, [S.L.], v. 42, n. 7, p. 1113-1119, jul. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.002>.

PICCO, Marco; LOLLINI, Roberto; MARENGO, Marco. Towards energy performance evaluation in early stage building design: a simplification methodology for commercial building models. *Energy And Buildings*, [S.L.], v. 76, p. 497-505, jun. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.016>.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio (org.). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cepel, 2014. 530 p.

PIRRÓ, Lúcia. **O Impacto das envoltentes verticais no desempenho energético de edifícios de escritórios**. 2005. 430 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PRATA, Alessandra Rodrigues. **Impacto da altura de edifícios nas condições de ventilação natural do meio urbano**. 2005. 271 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PROVEN ENERGY. **Proven Energy Folder**. Stewarton: Proven Energy, 2020

RAUGEI, Marco; FRANKL, Paolo. Life cycle impacts and costs of photovoltaic systems: current state of the art and future outlooks. **Energy**, [S.L.], v. 34, n. 3, p. 392-399, mar. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2009.01.001>

RAUM ENERGY. **3,5 kW Wind Turbine System Specification Sheet**. Saskatoon: Raum Energy, 2020

RIEGLER, Hannes. HAWT versus VAWT: small VAWTs find a clear niche. **Re-Focus**, [S.L.], v. 4, n. 4, p. 44-46, Não é um mês válido! 2003.

ROMÉRO, Marcelo de Andrade; BRUNA, Gilda Collet. **Metrópoles e o Desafio Urbano: frente ao meio ambiente**. São Paulo: Blucher, 2010. 119 p. (Série Sustentabilidade).

ROMÉRO, Marcelo de Andrade; REIS, Lineu Belico dos. **Eficiência energética em edifícios**. Barueri: Manole, 2012. 195 p. (Sustentabilidade).

RUTTEN, David. **Evolutionary Principles applied to Problem Solving**. 2011. Disponível em: <https://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2011/03/04/epatps01/>. Acesso em: 26 jan. 2021.

SANTOS, Arthur Henrique Cursino dos. **Avaliação Técnica e Financeira da Geração fotovoltaica Integrada à Fachada de Edifícios de Escritório Corporativos na Cidade de São Paulo**. 2015. 187 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós Graduação em Energia, Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

SANTOS, Mayra Simone. **Arquitetura pela Torre: avenida paulista 1960 - 80 e marginal do rio pinheiros 1980 - 90**. 2010. 289 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SÃO PAULO. Governo do Estado de São Paulo. **Energia Solar Paulista: levantamento do potencial**. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 2013.

SÃO PAULO. Governo do Estado de São Paulo. Secretaria de Energia (org.). **Atlas Eólico do Estado de São Paulo**. São Paulo, 2012

SÃO PAULO. Lei Nº 16.402, de 22 de março de 2016. **Disciplina o parcelamento, o uso e a ocupação do solo no Município de São Paulo**. Disponível em: [https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/desenvolvimento\\_urbano/texto%20de%20lei%20pdf.pdf](https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/desenvolvimento_urbano/texto%20de%20lei%20pdf.pdf)

SARRALDE, Juan José; QUINN, David James; WIESMANN, Daniel; STEEMERS, Koen. Solar energy and urban morphology: scenarios for increasing the renewable energy potential of neighbourhoods in london. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 73, p. 10-17, jan. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.06.028>.

SHARIFI, A.; YAMAGATA, Y. A Conceptual Framework for Assessment of Urban Energy Resilience. **Energy Procedia**, v. 75, p. 2904–2909, 2015.

SHARIFI, A.; YAMAGATA, Y. Principles and criteria for assessing urban energy resilience: A literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 1654–1677, 2016.

SCOGNAMIGLIO, Alessandra; PRIVATO, Carlo. Starting Points for a new cultural vision of BIPV. In: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE, 23., 2008, Valencia. **Proceedings [...]**. Valencia: Universidade de Valencia, 2008. p. 3222-3233.

SHARPE, Tim; PROVEN, Gordon. Crossflex: concept and early development of a true building integrated wind turbine. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 42, n. 12, p. 2365-2375, dez. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.032>.

SILVEIRA, Daniel, ALVARENGA, Darlan, GERBELLI, Luiz. Conta de luz está cada vez mais cara – entenda por que ela sobe e quais os problemas dessa escalada de preços.

**G1.** 27 de ago. de 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/noticia/2021/08/27/conta-de-luz-esta-cada-vez-mais-cara-entenda-por-que-ela-sobe-e-quais-os-problemas-dessa-escalada-de-precos.ghtml>.

Acesso em: 02 de fev de 2022.

SOUZA, C. Com crise hídrica, Aneel mantém em setembro bandeira vermelha 2, a mais cara. **CNN Brasil.** 27 de ago. de 2021 Disponível em:

<https://www.cnnbrasil.com.br/business/com-crise-hidrica-aneel-mantem-em-setembro-bandeira-vermelha-2-a-mais-cara/>. Acesso em: 02 de fev. de 2022.

STATHOPOULOS, T. et al. Urban wind energy: Some views on potential and challenges. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 179, n. May, p. 146–157, 2018.

STATHOPOULOS, Ted; ALRAWASHDEH, Hatem; AL-QURAAN, Ayman; BLOCKEN, Bert; DILIMULATI, Aierken; PARASCHIVOIU, Marius; PILAY, Pragasen. Urban wind energy: some views on potential and challenges. **Journal Of Wind Engineering And**

**Industrial Aerodynamics**, [S.L.], v. 179, p. 146-157, ago. 2018. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2018.05.018>

SUNDERLAND, K. et al. Small wind turbines in turbulent (urban) environments: A consideration of normal and Weibull distributions for power prediction. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 121, p. 70–81, 2013.

SZOLOMICKI, Jerzy; GOLASZ-SZOLOMICKA, Hanna. Technological Advances and Trends in Modern High-Rise Buildings. **Buildings**, [S.L.], v. 9, n. 9, p. 193, 26 ago. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/buildings9090193>

TORCELLINI, P. et al. Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition. **ACEEE Summer Study Pacific Grove**, p. 15, 2006.

TOJA-SILVA, F.; COLMENAR-SANTOS, A.; CASTRO-GIL, M. Urban wind energy exploitation systems: Behaviour under multidirectional flow conditions - Opportunities and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 24, p. 364–378, 2013.

UMAKOSHI, Erica Mitie. **Uma visão crítica do edifício alto sob a ótica da sustentabilidade**. 2008. 270 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Tecnologia da Arquitetura, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

URBAN, Mike. **The totally pointless, rarely spinning turbines of the Strata Tower in south London**. 2021. Disponível em: <https://www.brixtonbuzz.com/2021/02/the-totally-pointless-non-spinning-turbines-of-the-strata-tower-in-south-london/>. Acesso em: 06 fev. 2022.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Departamento de Energia. **EnergyPlus: Engineering Reference**. Illinois: University of Illinois, 2021.

V-AIR WIND TECHNOLOGIES. **Hoyi! Brochure**. Bordeaux: V-Air Wind Technologies, 2020

VERSAGE, Roberto *et al.* **Graus-horas de resfriamento**: publicadas para 413 municípios no Brasil, para uso em cálculos de correção climática. São Paulo: Cbcs, 2015.

VIERLINGER, Robert. **Multi Objective Design Interface**. 2013. 89 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade Técnica de Viena, Viena, 2013.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia Solar Fotovoltaica**: conceitos e aplicações. 2. ed. São Paulo: Érica, 2015.

WALKER, Linus; HOFER, Johannes; SCHLUETER, Arno. High-resolution, parametric BIPV and electrical systems modeling and design. **Applied Energy**, [S.L.], v. 238, p. 164-179, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.088>

WELLINGTON CITY COUNCIL. Wellington Resilience Strategy. **100 Resilient Cities**, n. March, p. 114, 2017.

WILLIAMS, Brian. **Manchester College of Art and Technology**. 2022. Disponível em: <https://www.briangwilliams.us/low-energy-strategies/manchester-college-of-art-and-technology.html>. Acesso em: 08 fev. 2022.

WINEUR. Wind Energy Integration In The Urban Environment. Urban Wind Turbines: guidelines for small wind turbines in the built environment. Bruxelas: Intelligence Energy Europe, 2007.

WORTMANN, Thomas. Model-based Optimization for Architectural Design: optimizing daylight and glare in grasshopper. **Technology|Architecture + Design**, [S.L.], v. 1, n. 2, p. 176-185, nov. 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/24751448.2017.1354615>.

YANG, A. S. et al. Estimation of wind power generation in dense urban area. **Applied Energy**, v. 171, p. 213–230, 2016.