

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Anna Carolina Peres Suzano e Silva

Avaliação energética da integração de filmes fotovoltaicos orgânicos a fachadas de edificações brasileiras

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Rodrigo Flora Calili

Rio de Janeiro
Março de 2021



Anna Carolina Peres Suzano e Silva

Avaliação energética da integração de filmes fotovoltaicos orgânicos a fachadas de edificações brasileiras

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Rodrigo Flora Calili

Orientador

Departamento de Metrologia – PUC-Rio

Prof. Daniel Ramos Louzada

Departamento de Metrologia – PUC/Rio

George Alves Soares

Growing Energy

João Queiroz Krause

Eletrobras

Prof. Marcelo Bezerra

Coordenador Acadêmico - DAU/PUC-Rio

Rio de Janeiro, 22 de março de 2021.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a orientação da universidade, da autora ou do orientador.

Anna Carolina Peres Suzano e Silva

Graduou-se em Arquitetura e Urbanismo na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UFRJ em 2018. Participou de diversos congressos nacionais e internacionais e realizou publicações nas áreas de eficiência energética e energia solar, tendo como ênfase os benefícios trazidos pela a integração de sistemas fotovoltaicos em edificações. Atua como consultora no licenciamento ambiental de usinas fotovoltaicas.

Ficha Catalográfica

Silva, Anna Carolina Peres Suzano e

Avaliação energética da integração de filmes fotovoltaicos orgânicos a fachadas de edificações brasileiras / Anna Carolina Peres Suzano e Silva ; orientador: Rodrigo Flora Calili. – 2021.

132 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, 2021.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Engenharia Urbana e Ambiental - Teses. 3. Energia solar. 4. Sistemas fotovoltaicos. 5. Simulação energética. 6. Otimização mono-objetivo. 7. Eficiência energética. I. Calili, Rodrigo Flora. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental. III. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Rodrigo Flora Calili, pelo incentivo e parceria para o desenvolvimento desta dissertação;

À minha família por todo o apoio e confiança, em especial à minha mãe que tornou este mestrado financeiramente possível;

À Tatiane Pilar, pelo incentivo e parceria na área de simulação do desempenho energético de edificações;

Aos meus amigos da PUC-Rio, principalmente Bruno Amâncio por todo o companheirismo e paciência;

À Lady, pela incansável companhia nas madrugadas enquanto eu fazia esta dissertação;

A todos os professores que me incentivaram a seguir o caminho de eficiência energética aplicada à arquitetura;

Ao Bruno Reis, por todo o profissionalismo e assistência ao longo do curso;

Aos demais professores e funcionários que me acompanharam na jornada acadêmica;

Aos membros da Comissão Examinadora.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Silva, Anna Carolina Peres Suzano e; Calili, Rodrigo Flora (Orientador). **Avaliação energética da integração de filmes fotovoltaicos orgânicos a fachadas de edificações brasileiras**. Rio de Janeiro, 2021. 132p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A energia é o principal motor para o desenvolvimento econômico, sendo um elemento chave para o alcance das metas climáticas estipuladas até 2050. Entre as diversas maneiras relacionadas à mitigação dos impactos causados pelo uso ineficiente de energia das edificações, destacam-se a substituição de combustíveis fósseis por fontes de energia limpa e a redução do consumo energético pelo lado da demanda. Neste contexto, sistemas fotovoltaicos integrados a edificações surgem como uma solução arquitetônica promissora por atingir ambos os objetivos em uma só intervenção. Contudo, não há estudos relacionados ao impacto desta tecnologia no desempenho energético de edificações considerando o contexto climático brasileiro, sendo este então o escopo deste trabalho. A metodologia proposta envolve simulações com o *software* Rhinoceros, os *plugins* Ladybug e Honeybee, que realizam análises sob aspectos ambientais, e o Grasshopper, cuja função é realizar otimização mono-objetivo. Para edificações simuladas com apenas uma fachada fotovoltaica sendo implementada, foi possível obter a redução de até 14,39% da demanda energética, considerando a geração adicionada à conservação de energia. Na cidade do Rio de Janeiro, a redução da demanda de energia alcançou a marca de 24,04% com quatro fachadas de fotovoltaica implementada. Apesar de alguns contextos climáticos se mostrarem mais vantajosos, ressalta-se que foram detectadas reduções na demanda energética em todas as cidades investigadas, sendo então a integração de sistemas fotovoltaicos orgânicos a edificações uma medida eficaz de conservação e geração de eletricidade.

Palavras-chave

Energia solar; sistemas fotovoltaicos; simulação energética; otimização mono-objetivo; eficiência energética.

Extended Abstract

Silva, Anna Carolina Peres Suzano e; Calili, Rodrigo Flora (Advisor). **Energy evaluation of building integrated organic photovoltaics in Brazil**. Rio de Janeiro, 2021. 132p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

1.

Introduction

In a global context where climate change has been in evidence, research related to technologies which aim to reduce the damages caused by global warming have been increasing. Since energy is the engine to sustainable economic development, it is considered a key element to reach the goals set by the Paris Climate Agreement.

The strategies to manage energy in a sustainable way can be divided in two fields: using clean energy, rather than fossil fuels like coal; and by reducing the energy demanded by consumers. In Brazil, buildings are responsible for 50.5% of the energy demand (Lira *et al.*, 2019) and when analyzing commercial buildings, it is stated that HVAC systems take up to 40.3% of all the energy consumed (PROCEL, 2008). Such number is expected to increase up to three times until 2050 and is considered one of the blind spots of energy efficiency policies (IEA, 2018). Although Brazil has national energy efficiency policies, such as the Technical Quality Regulation for the Buildings' Energy Efficiency Level – RTQ (acronym for the Portuguese term “Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações”) the use of HVAC systems and its energy demand is not emphasized and newer technologies such as solar energy are considered a bonus. Such gap is because the RTQ was first published in 2010, while the generation of photovoltaic energy was only regulated in 2012.

Photovoltaic energy has a remarkable potential in Brazil, especially in the north and northeast regions due to its high irradiation levels (INPE, 2017). In on-grid systems, it is possible to lend the exceeded energy generated and have its compensation in a 1:1 proportion when needed, which not only reduces system losses, but also is able to increase the number of photovoltaic facilities. Another possibility is the partition of the energy generated by a photovoltaic system between multiple people in the same building which had consequently the incentive of building integrated photovoltaics. Building integrated photovoltaics, also known as BIPV, can be defined as the substitution of an element of the building envelope by another with photovoltaic cells. Recent studies have shown that building integrated photovoltaics are not only capable of generating energy, but due to thermal properties of solar cells compared to regular materials, there is also a reduction in HVAC demand, especially air-conditioning.

Photovoltaic cells are usually integrated in windows, but can also be used in skylights, curtainwalls, shading devices and walls (Eisenschmid, 2008). Such variety is possible due to the development of new technologies, which are lighter and semi-transparent (Lynn, Mohanty and Wittkopf, 2012). One example is organic photovoltaic cells (OPV), which Brazil is one of the leading producers worldwide. Therefore, it is a technology with a considerable potential in the country not only due to its availability but also of skilled labor for installation and maintenance. Organic photovoltaic cells have three main advantages compared to regular silicon technologies: a reasonable proportion between cost and efficiency; the simplicity

of the production process; and flexibility. Although technologies available in the Brazilian market currently have 3.5% efficiency, a power conversion of 10% is expected soon (Anctil, Lee and Lunt, 2020).

Although the topic is constant research, it is possible to detect literature gaps and the aim of this work is to fill the lack of measurement of the optimal impact of building integrated photovoltaics in net energy demand of commercial buildings, considering multiple building envelopes and the Brazilian climate context. Four major contributions are presented in this work. The first is related to the method proposed, by mixing available software to measure indoor environmental quality with genetic algorithms to perform optimizations, resulting in more precise solutions and a lower demand of time. The second is the measurement of net energy demand caused by BIPV, simultaneously investigating the reduction of energy consumed by the HVAC due to the photovoltaic cell's shading properties and the energy those generate. The third point is related to the climate context, since most studies are undertaken in the northern hemisphere and little is known about the net energy reduction which can be achieved in Brazil and therefore its actual potential in the country. The fourth contribution is investigating various building geometries, façade configurations and cities, rather than just one, to measure how those influence net energy demand.

2.

Materials and Methods

2.1.

Building configurations and parameters to be analyzed

Building geometry has a direct impact on building performance (Santos *et al.*, 2018). The Technical Quality Regulations for Commercial Buildings, published by the National Energy Conservation Program of Brazil (PROCEL), exemplifies such influence by using three different building geometries as a case-study: building A (BA), a rectangular floor plan low-rise (80x40x15m); building B (BB), a square floor plan mid-rise (20x20x30m); and building C (BC), a rectangular plan mid-rise (20x5x30m). These geometry variations will be also studied in this work. A variation regarding the façade configuration is also advised, to explore the benefits brought by different building integrated photovoltaic layouts. Six different façade configurations were considered for each of the three geometries analyzed: one façade (1F), which is the largest of the building; two façades, in a L-shape prioritizing the morning (2F_{MO}) or the afternoon sun (2F_{AF}); two façades parallel to each other (2F_p); three façades in a U-shape (3F); and all four façades (4F). Considering that building B has a squared floor plan, 2F_{MO} and 2F_{AF} are the same, resulting in a total of seventeen simulations performed.

For each of the seventeen simulation scenarios, two variables which highly impact the building performance and could be defined in an early design stage are considered. Since solar radiation plays a major role both in energy demand and generation (Amorim, 2015), the first variable considered is the building orientation, also known as the azimuth. The azimuth can range from 0° to 360°, where a 0° or 360° orientation means the façade is facing north. A 90° rotation would result in the surface facing east, as building orientation is measured clockwise. To reduce time demanded to run the simulations, such values were split in a frequency of 5°

intervals. The second variable is the percentage of windows on the façade, also known as the window-to-wall ratio. Windows have a huge influence on heat loss and gain of the building and therefore an impact on the result (Alibaba, 2016), especially this case where the organic photovoltaic cells are integrated on such element. The minimum value established for WWR is 50%, provided by the building simulation baselines in Brazil and the maximum window percentage is 95%. The highest value was not set to 100% since its common that software does not accept such input, considering the remaining 5% to be part of window frames and other elements other than glass. The values for window-to-wall ratio have a 1% interval.

To calculate such the energy savings, the International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP) was followed. This document is a tool that describes common practices to measure, calculate and report savings caused energy efficiency actions (EVO, 2012). The IPMVP can be applied to existent buildings or in early design stages, where the simulation method is recommended. Individual elements of the buildings, such as the cooling load, or the overall consumption of the construction can be the target of the analysis proposed by the IPMVP.

Energy efficiency tools must be demonstrated in an effective and transparent form (EVO, 2012), goal which is achieved by the IPMVP by the comparison of two values. The first is the effective energy demand after the energy efficiency actions were completed. The second is the adjusted baseline, which is how much the building would have consumed in the present if the measures were not undertaken (EVO, 2012). An adjusted baseline is important, since it predicts the energy demand based on independent variables which have a considerable impact on building energy use, rather than assuming the same consumption of the past.

Two parameters of the building performance will be measured, the first being the net energy demand reduction when comparing buildings with and without building integrated photovoltaics and the second the net energy demand in kWh per square meter of organic photovoltaic cells. In both cases, all the settings of the building simulation which could impact the energy performance, such as use routine and HVAC sizing, were maintained the same for the baseline and the building with window-integrated photovoltaics. Building simulation allows the exposition of both scenarios to a typical meteorological year (TMY) of the desired location, meaning that the same climate conditions are applied to the constructions. Since the only difference between the baseline and the building with window-integrated photovoltaics is the material used on the windows, no adjustments based on independent variables are required. Such adjustments are only required if any other variable which could impact the energy performance is applicable, which is not the case in this simulation. Although the energy reduction percentage can give a better insight when comparing different buildings, another parameter which is crucial to understanding the benefits of building integrated photovoltaics when comparing different façades layouts of the same geometry is the net energy reduction per square meter of organic photovoltaic cells. The best façade configuration would present the highest net energy demand per square meter since it would have a more significant decrease in net energy demand by using the same material.

2.2.

Cities to be analyzed

Based on the Brazil's climate zoning and the country's latitude, fourteen state capitals were chosen: Fortaleza, Teresina, Natal, Palmas, Salvador, Brasília, Goiânia, Cuiabá, Belo Horizonte, Campo Grande, Rio de Janeiro, Curitiba, São Paulo and Porto Alegre. From those, Rio de Janeiro will have all six façade configurations analyzed, from which the best will be selected and further simulated for the remaining cities.

2.3.

Method development

Usually, simulation is used to increase indoor environmental quality while simultaneously decreasing the need for natural resources or CO₂ emissions. Some of the most used software for building simulation are WINDOW, RETScreen International and EnergyPlus.

EnergyPlus is consolidated as building energy simulation software which allows the used to model the energy demand by heating, cooling, ventilation, lighting and equipment. Other calculations performed are heat transfer, surface temperature and thermal and optical comfort. Each component of the building envelope has its own material and those can be changed to better represent the actual building, therefore providing a more precise analysis. Just like RETScreen International, it can be used in a global scale, having its own file format called Energy Plus Weather Files (epw) which consists of hourly plots of local climate data. Regarding photovoltaic systems, PVsyst is software which calculates the energy generation of photovoltaic arrays considering its location, tilt angle and orientation.

The regular method to measure the impacts of building integrated photovoltaic in different buildings by using the mentioned software would require the use of three computer programs: one to calculate the energy demand, another to determine the energy generation, and the last to perform the calculation of the equations mentioned in the previous section. Each of the first two programs would require drawing the desired geometry and running all simulation possibilities for building configurations for both the baseline and the building integrated photovoltaic condition, taking twice the time for modeling. Since there is no way to use artificial intelligence to find the best results, it would demand up to 9,720 simulations¹ in each of the seventeen scenarios to establish the optimal building configuration.

The regular method has the advantage of using software more consolidated in the market, but on the other hand it is also time demanding: the window-to-wall ratio and azimuth must be manually inserted to perform each of the energy generation and demand simulations on different computer programs, then manually added to the equations to calculate the energy demand reduction. The use of multiple computer programs also requires geometry to be drawn two times, the first on the energy generation software and the latter on the energy demand one. Therefore, it has shown to be an inefficient work tool.

¹ There are 45 window-to-wall ratio variations and 72 building azimuth possibilities, totaling 3,240 possibilities. Since the regular building simulation method would require this data to be inputted in three different computer programs, 9,720 simulations would be performed.

The proposed method aims to take advantage of the computer program Rhinoceros, which combines a simple-to-use interface with the creation of complex geometries (Nemer and Klein, 2018). The main difference brought by Rhinoceros is the possibility of downloading and using multiple plugins which analyze the same geometry focusing on different aspects. Honeybee can perform the net energy demand simulations, working directly with EnergyPlus (Roudsari and Pak, 2013), while Ladybug runs the energy generation ones based on a local climate analysis and the building integrated photovoltaic façades. Since mathematical equations can be inserted, it is possible to center all functions of the three computer programs mentioned before in a single platform. Another key element is the fact that the same data can be inputted in multiple simulations, meaning that by changing either window-to-wall ratio or orientation, all simulations are re-run and the results regarding the impact on net energy demand are available within seconds. Galapagos, a Grasshopper plugin, was used to perform the optimization. It uses machine-learning and genetic algorithm principles to find the best combination of variables to achieve the best performance, both parameters which are set by the user. Therefore, it requires less simulations to find the optimal result than if all possibilities were simulated.

The proposed method is based on finding a way to optimize design parameters having performance-focused approach by integrating parametric features and simulation tools. It shows to be time effective, requiring less simulations to find the window-to-wall ratio and azimuth configuration which results in the best reduction in net energy demand. It is important to mention that Galapagos is an automatic tool, not requiring the user to manually perform any command during the optimization process. Since the plugins used in the proposed method are based in software and regulations consolidated in the market, it is considered reliable for the task to be performed.

2.4. Building materials

Each material for the building envelope, both for the baseline and the building with window-integrated photovoltaics, needs to have its properties set to perform the simulations. The properties set for the windows of the baseline and the building with window-integrated photovoltaic cells are presented in Tables 1 and 2, respectively.

Table 1 – Material properties inputted to create the custom glass.

Property	Regular glass
Thickness (m)	0.002 (Aguilar-Santana <i>et al.</i> , 2019)
Solar transmittance (0-1)	0.830 (Santos <i>et al.</i> , 2018)
Solar reflectance (0-1)	0.090 (Santos <i>et al.</i> , 2018)
Visible light transmittance (0-1)	0.870 (Santos <i>et al.</i> , 2018)
Visible light reflectance (0-1)	0.090 (Santos <i>et al.</i> , 2018)
Front emissivity (0-1)	0.900-0.950 (Souza, 2010)
Back emissivity (0-1)	0.900-0.950 (Souza, 2010)
Conductivity (W/mK)	1.000 (BRASIL, 2013a)

Source: The author.

Table 2 – Construction properties of the organic photovoltaic layer and the regular glass.

Property	Organic photovoltaic layer	Air gap layer	Regular glass
Thickness (meters)	0.0004 (SUNEW, 2020a)	0.100 mm	0.002 (Aguilar-Santana <i>et al.</i> , 2019)
Solar transmittance (0-1)	0.2830 (Moreno <i>et al.</i> , 2019)	air gap	0.830 (Santos <i>et al.</i> , 2018)
Solar reflectance (0-1)	0.3960 (Moreno <i>et al.</i> , 2019)		0.090 (Santos <i>et al.</i> , 2018)
Visible light transmittance (0-1)	0.2840 (Moreno <i>et al.</i> , 2019)		0.870 (Santos <i>et al.</i> , 2018)
Visible light reflectance (0-1)	0.4010 (Moreno <i>et al.</i> , 2019)		0.090 (Santos <i>et al.</i> , 2018)
Front emissivity (0-1)	0.7740 (Moreno <i>et al.</i> , 2019)		0.900-0.950 (Souza, 2010)
Back emissivity (0-1)	0.7740 (Moreno <i>et al.</i> , 2019)		0.900-0.950 (Souza, 2010)
Conductivity (W/mK)	0.2400 (Moreno <i>et al.</i> , 2019)		1.000 (BRASIL, 2013a)

Source: The author.

3. Results

Window-to-wall ratio and orientation are aspects which need to be balanced to find the optimal building performance, which due to its complexity can be performed with more ease by optimization computer programs. Although bigger openings result in a higher energy generation by the photovoltaic cells, it could also lead to overheating of the building since windows are responsible for a major part of heat gain. The same balance needs to be found regarding the building azimuth, since the orientations which have the higher irradiation levels are beneficial for the photovoltaic cells to generate more energy but can increase building temperature and HVAC demand.

Building A presented a more efficient energy use with higher window-to-wall ratio in all scenarios simulated. Therefore, the recommended window-to-wall ratio for this building geometry is 95%. Building B had less consistent optimal values for window-to-wall ratio, ranging from 85-95%. Building C is a unique case regarding the window-to-wall ratio since it has shown optimal results with lower percentage of openings. The values obtained ranged from 50% up to 56%.

The recommended building orientation varied in different climate contexts as expected but remained constant in the same cities for different geometries. It was clear that orientations on the Equator ought to be oriented east, while the remaining should be facing north/northwest/west. This is a consequence of the chances of the sun path and the direction of the incident irradiance caused by the latitude of a city.

The optimal values of this variables and the highest net energy demand achieved are presented in Tables 3 and 4.

Table 3 – Optimal azimuth, window-to-wall ratio and the net energy reduction achieved by all buildings in all cities but Rio de Janeiro.

Location		Orientation		Net energy demand reduction	
City	Building	Azimuth	Window-to-wall ratio	%	kWh/m ² OPV /year
Fortaleza	A 1F	95-70	95	3.18	96.81
	B 1F	85-80	89	2.94	61.81
	C 1F	90-75	50	3.41	40.48
Teresina	A 1F	280-275	95	3.96	157.69
	B 1F	290-270	85-90	3.92	102.33
	C 1F	295-265	50	4.34	74.02
Natal	A 1F	285-275	95	4.90	158.97
	B 1F	285-275	91-94	4.60	108.05
	C 1F	285-275	50	6.13	80.88
Palmas	A 1F	340-0	95	3.77	96.81
	B 1F	350-0	92-95	3.69	68.02
	C 1F	0	50	4.46	48.39
Salvador	A 1F	290-285	95	4.75	151.33
	B 1F	295-285	91	4.37	100.08
	C 1F	295-285	50	5.39	71.65
Brasília	A 1F	305-295	95	10.29	119.84
	B 1F	305-300	93-95	10.29	98.22
	C 1F	300	50	14.39	79.81
Goiânia	A 1F	315-290	95	8.00	153.84
	B 1F	310-295	90-95	7.58	119.18
	C 1F	310-295	50	10.24	92.71
Cuiabá	A 1F	310-285	95	5.49	173.46
	B 1F	305-290	94-95	5.21	119.12
	C 1F	300	50	6.91	95.03
Belo Horizonte	A 1F	315-310	95	8.91	116.13
	B 1F	315-305	93-95	8.94	92.56
	C 1F	315-310	50	12.25	73.58
Campo Grande	A 1F	315	95	7.74	156.04
	B 1F	315	95	7.62	114.80
	C 1F	315	50	10.48	94.90
Curitiba	E1 1F	325-320	95	5.77	42.31
	E2 1F	325-320	95	7.32	42.14
	E3 1F	325-320	93-95	10.18	26.93
São Paulo	E1 1F	315-300	95	9.2	80.25
	E2 1F	315-305	95	9.62	64.5
	E3 1F	315-306	50-55	13.52	51.73
Porto Alegre	E1 1F	330-320	95	7.98	85.9
	E2 1F	330-320	94-95	7.95	65.57
	E3 1F	330-320	50-56	10.89	55.24

Source: The author

Table 4 – Optimal azimuth, window-to-wall ratio and the net energy reduction achieved by all buildings in Rio de Janeiro.

Building properties			Orientation	Net energy reduction	
Building	Façade	Azimuth	Window-To-Wall-Ratio	kWh/m ² OPV/year	%
A	1F	330	95%	150.30	6.76
	2F _{MO}	315	95%	145.86	9.83
	2F _{AF}	360	95%	148.02	9.98
	2F _P	265-275	95%	108.87	9.78
	3F	335-360	95%	145.21	13.05
	4F	85-95	95%	120.04	16.18
			105-110	95%	
B	1F	320-330	95%	109.27	6.84
	2F _{MO} 2F _{AF}	35-40	95%	110.89	13.88
	2F _P	90	88-92%	74.36	9.37
		95	88-91%		
		265	90%		
		270	90%		
		270	93%		
		275	90-92%		
	3F	350-360	95%	110.53	20.75
	4F	45-55	95%	96.04	24.04
		135-145	95%		
		225-235	95%		
C	1F	320	51-55%	82.00	9.15
		325	50-55%		
		330	50-52%		
		330	55%		
		335	52%		
	2F _{MO}	300-315	95%	78.25	13.33
	2F _{AF}	25	52-55%	81.92	13.96
		30	52-56%		
		35	52-55%		
	2F _P	270	50%	60.20	12.56
	3F	340	54-56%	81.93	18.61
		345	56%		
	4F	265	56%	67.44	23.26
	270	55-57%			

Source: The author

The creation of a parameter using the square meter as a base unit aims to make different envelope layouts of a same building comparable. Therefore, it can only be applicable to Rio de Janeiro where multiple façade configurations were simulated. The increase of photovoltaic cells results in a higher energy generation, but the configuration which has a higher reduction per square meter of organic photovoltaic

cells can be considered more beneficial since it saves more energy by using the same amount of material. This parameter should not be used to compare different buildings, since the floor plan area is not considered for the calculation. Results have shown that building A had a higher impact in net energy demand per square meter of organic photovoltaic cells in all façade configurations. The probable cause of such impact is that this building also has the highest and floor plan area and therefore also the highest overall energy demand. One relevant conclusion is that the addition of more photovoltaic façades resulted in a lower efficiency per square meter since even using optimization plugins it was not possible to maintain both façades facing the optimal orientation. Although in building B it generates a lower amount of energy when compared to $2F_{MO}$ and $2F_{AF}$, amongst all six building envelope configurations considered integrating organic photovoltaic cells in one façade is the most beneficial form on average. The integration on two parallel façades has shown to be a poor design choice, mostly since by choosing this building envelope configuration one photovoltaic façade would be facing east. In Rio de Janeiro's latitude, the solar irradiation does not represent high temperatures or irradiation levels. The same principle can be applied to a building with four photovoltaic façades, being detected a considerable decrease in performance when compared to three façade integrations.

While using the net energy demand reduction per square meter of organic photovoltaic cells can give users an insight on how different façades behave on a same building, the reduction in net energy demand in percentage gives us the perspective to compare between buildings. The addition of photovoltaic façades had a clear reduction on net energy demand. Yet, one key factor is that the increase of the area of photovoltaic cells did not result in a proportional decrease in energy demand. Building B had the best overall energy reduction, reaching 24.04% when integrating photovoltaic systems in the four façades. In Brasilia, one photovoltaic façade could reduce the net energy demand in over 14%. Although a considerable amount of energy reduction was achieved, building integrated organic photovoltaics alone could not be the sole strategy to create nearly Zero Energy Buildings or Zero Energy Buildings considering Rio de Janeiro's local climate. Considering the net energy demand in percent, building C had the best performance in all scenarios, followed by Building B, showing that this energy efficiency strategy is more beneficial in mid-rise buildings. It is important to mention that in all scenarios a reduction was detected, meaning that despite having different impacts, building integrated photovoltaics can be used as an effect tool to save energy in all building typologies.

4. Discussion

This session aims to discuss the results obtained by the simulations performed and to compare them with other publications. Variables and parameters are addressed, with an emphasis on results, and the proposed method for finding such values is also discussed. Such discussion is limited due to the scarce quantity of publications related to the measurement of energy conservation caused by the integration of organic photovoltaic films in facades, highlighting the literary gap to be filled.

Research conducted in Paris (49 ° N) and Barcelona (41 ° N) (Moreno *et al.*, 2019) considered the integration of photovoltaic systems in windows on a facade

facing the south face. The results demonstrate that the most satisfactory option for the Spanish city requires a window percentage of up to 55%, being possible to reduce the energy consumption for cooling and heating by up to 22%. For Paris, larger openings on the facade are preferable, being possible to achieve up to 16% savings in energy demand. A similarity was noticeable in relation to the percentage of windows: Paris presented configurations like all cities for buildings 01 and 02, while Barcelona was like the values considered ideal for building 03. From the perspective of reducing energy demand, the values obtained by Brazilian cities were considerably lower than those of European cities. The city with the closest proximity to the figures obtained was Brasília, with a saving of 14.39% in energy. This difference is due to the 6% efficiency considered by Moreno *et al.* (2019) for organic photovoltaic cells, while in this work the value of 3.5% was used, which is compatible with the material available in the national market.

Anctil, Lee and Lunt (2020) carried out studies with the integration of photovoltaic cells in windows in four American cities: Honolulu, Detroit, Los Angeles and Phoenix. It was possible to obtain a reduction in energy demand between 15-20%, having been considered a percentage of fixed windows in the amount of 67.8%. The results obtained are comparable only to those obtained by the city of Rio de Janeiro, since it was the only scenario where four photovoltaic façades were simulated. It is noticed that the Brazilian city had a more efficient performance for buildings 02 and 03, with building 01 having a performance like those obtained by the studies by Anctil Lee and Lunt (2020).

Some methodological differences were found in relation to the methods found and the proposed one. These were both in the computer programs used in the variables and parameters to be measured. First, studies by Moreno *et al.* (2019) had the window percentage values set at 10% intervals, instead of using optimization. It is also clear that the authors integrated photovoltaic systems in just one facade facing the south face, meaning that the orientation of the building was not considered a variable. Based on the lower number of variables and simulated scenarios, with only five simulations being carried out for Barcelona and eight for Paris, the data collected give a limited perspective when compared to those obtained by the proposed method. The same limitation was detected in the studies carried out by Qiu, Yang and Sun (2019), using four cities and six orientations as variables. The percentage of windows remained constant.

Anctil, Lee and Lunt (2020) performed the calculation of the reduction in energy demand to calculate the return on energy investment and the time of return on energy. These two parameters aim to measure the economic and environmental feasibility of integrated photovoltaic construction, an approach considered more accurate than considering reducing the energy demand per square meter of organic photovoltaic cells. However, it also requires more time, since all emissions and costs related to energy and equipment need to be calculated, considering the parameters for reducing energy demand in percent and per square meter of organic photovoltaic cells suitable for the scope this work.

Abdelhakim, Kandar and Lim (2019) studied the energy performance of a commercial building in Algeria, combining the simulation method with that of measuring and verifying performance through on-site tests. If, on the one hand, this last step is crucial for the validation of the results obtained, on the other hand the methodology proposed by the authors considers a specific building, being able to provide precise design guidelines for intervention in the existing commercial building. However, since the method used by Abdelhakim, Kandar and Lim (2019)

differs from traditional methods only by performing performance measurement and verification, it is considered unfeasible and insufficient for the scope of this work, where multiple simulation scenarios would have to be performed manually.

It was noticeable many articles that consider the orientation of the building as fixed. Based on the recommended values obtained by the optimization, it is advisable that in cases in which it is not possible to apply the proposed method, either by limiting the user's domain computer programs or any other reason, it results in a building with static azimuth, that the orientation used be it from where there is a higher incidence of irradiation. Such values can be extracted directly from the climatic data, with no need for additional simulations.

5. Conclusion

The proposed method achieved the goal of finding the optimal window-to-wall ratio and azimuth of different building envelope configurations. The procedure also has proven to be a time-saving tool for performance-based design by using an optimization plugin and an integrated interface, rather than manually performing each of the simulations on multiple computer programs. By giving the user important building performance data regarding energy consumption and generation with a low time demand, it was clear that the use of genetic algorithms and environmental analysis computer programs such as Galapagos, Ladybug and Honeybee can be a powerful tool to help with decision-making even in early design stages.

Some limitations were found during the process: although the creation of weather files has been increasing, not all cities have that data accessible and due to the available time, only one city was simulated. Although the acquired data is important for the incentive of photovoltaic systems, it represents a restrict climate context. Another restriction was found regarding building geometry since only three scenarios were simulated, giving a brief insight on how the form could affect energy behavior. The building surroundings, which could cause shading and decrease the photovoltaic systems efficiency, was not considered.

Recommended future works tackle the limitations mentioned. The first is a wider research, considering the other eight climate contexts in Brazil, rather than just one. An extrapolation to estimating the net energy demand reduction in a national scale is highly encouraged. Regarding the work undertaken in this article, the calculation of the energy return on investment and the energy payback time is advised.

Keywords

Solar energy; photovoltaic systems; building simulation; optimization; energy efficiency.

Sumário

1. Introdução	19
1.1. Definição do problema de pesquisa	21
1.2. Objetivos: geral e específico	22
1.3. Metodologia	23
1.3.1. Fase exploratória e descritiva	23
1.3.2. Fase aplicada	25
1.3.3. Fase conclusiva	25
1.4. Estrutura da dissertação	25
2. Sistemas fotovoltaicos integrados a edificações	27
2.1. Formas de integração a edificações	28
2.2. Tecnologias disponíveis de células fotovoltaicas a serem integradas a edificações	30
2.3. Demais componentes de sistemas fotovoltaicos	33
2.3.1. Inversor	34
2.3.2. Banco de baterias	35
2.3.3. Controlador de carga	36
2.3.4. Medidor	36
2.4. Benefícios dos sistemas fotovoltaicos integrados a edificações	36
2.4.1. Geração de energia	37
2.4.2. Redução da demanda energética para condicionamento	40
2.4.3. Políticas nacionais para suporte de conservação de energia	43
2.5. Legislações aplicáveis para energia solar e mercado brasileiro	43
2.6. Considerações finais do capítulo	45
3. Materiais e métodos	47
3.1. Escolha dos locais onde serão feitas as simulações	47
3.2. Modelos e configurações de fachada considerados	49
3.3. Estimativa da demanda energética evitada	49
3.3.1. Mensuração dos parâmetros	50
3.3.2. Variáveis definidas para a simulação	52
3.4. Principais métodos e softwares existentes para a simulação	52
3.5. Apresentação e validação do método proposto	57
3.5.1. Rhinoceros e Grasshopper	57
3.5.2. Ladybug Tools	57
3.5.3. Galapagos	59
3.6. Demais dados de entrada necessários	61
3.6.1. Definição dos parâmetros dos materiais das edificações simuladas	61
3.6.2. Arquivos climáticos utilizados	63
3.6.3. Configurações dos sistemas fotovoltaicos	64
3.6.4. Configuração do sistema de condicionamento de ar e da rotina de uso	65
3.7. Considerações finais sobre o capítulo	65

4. Resultados	66
4.1. Apresentação dos resultados	66
4.2. Latitude 0° - Zona bioclimática 08 – Fortaleza	70
4.3. Latitude 5° - Zona bioclimática 07 – Teresina	72
4.4. Latitude 05° - Zona bioclimática 08 – Natal	74
4.5. Latitude 10° - Zona bioclimática 01 – Palmas	76
4.6. Latitude 10° - Zona bioclimática 08 – Salvador	78
4.7. Latitude 15° - Zona bioclimática 04 – Brasília	80
4.8. Latitude 15° - Zona bioclimática 06 – Goiânia	82
4.9. Latitude 15° - Zona bioclimática 07 – Cuiabá	84
4.10. Latitude 20° - Zona bioclimática 03 – Belo Horizonte	86
4.11. Latitude 20° - Zona bioclimática 06 – Campo Grande	88
4.12. Latitude 20° - Zona bioclimática 08 – Rio de Janeiro	90
4.13. Latitude 25° - Zona bioclimática 01 – Curitiba	98
4.14. Latitude 25° - Zona bioclimática 03 – São Paulo	100
4.15. Latitude 30° - Zona bioclimática 03 – Porto Alegre	102
4.16. Comparação dos resultados alcançados	104
4.16.1. Comparação dos resultados das cidades analisadas	104
4.16.2. Comparação dos resultados por latitude	106
4.16.3. Comparação dos resultados por zona bioclimática	108
4.17. Discussão dos resultados	111
5. Conclusão	115
6. Referências bibliográficas	118
Anexo I – Formas de integração de sistemas fotovoltaicos a edificações	131
Anexo II – Tecnologias utilizadas para integração de sistemas fotovoltaicos a edificações	132

1 Introdução

Em um contexto mundial marcado por mudanças climáticas, tecnologias relacionadas à mitigação das consequências do aquecimento global têm ganhado cada vez mais espaço. Visando mesclar o equilíbrio entre os aspectos sociais, ambientais e os econômicos, o conceito de desenvolvimento sustentável surgiu nos anos 1970. Mais recentemente, o Acordo de Paris (UNFCCC, 2015) define os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) e, visto que a energia é o principal motor para o desenvolvimento econômico, se torna um elemento central para que tais objetivos sejam atingidos (Akpan e Akpan, 2012).

Entre as diversas estratégias para alcançar o desenvolvimento sustentável, destacam-se a substituição de combustíveis fósseis por energia limpa (Afghan *et al.*, 2007; Afghan e Carvalho, 2004) e a economia energética pelo lado da demanda (Block, 2005; Lund, 1999). A redução da demanda energética no país já é incentivada por políticas públicas, como o do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações publicado em agosto de 2010 (BRASIL, 2012; BRASIL, 2013a). Este foi elaborado objetivando criar uma referência adequada ao clima brasileiro para promover eficiência energética em edificações (Silva e Ghisi, 2014).

Residências, comércios e edificações públicas consomem em conjunto 50,5% da energia do país (Lira *et al.*, 2019). Já a Pesquisa de Posse de Eletrodomésticos e Hábitos de Consumo (PPH)² indica que o ar-condicionado é responsável por 40,3% da demanda energética total em comércios e 20,0% em residências (PROCEL, 2008). A preocupação com o consumo de tal equipamento é destacada pela Agência Internacional de Energia (IEA), que estima que o consumo por parte de condicionadores de ar se triplique até 2050 caso não sejam tomadas medidas para melhorar sua eficiência (IEA, 2018).

Com ênfase em geração de energia limpa, destaca-se o grande potencial de irradiação do país, podendo tomar proveito de tal modalidade de geração energética em todo seu território, sobretudo nas regiões Norte e Nordeste (INPE, 2017). Outros fatores que contribuem para o aumento da utilização de energia solar são as políticas nacionais que incentivam a instalação de sistemas fotovoltaicos, além dos avanços tecnológicos e redução dos custos dos equipamentos necessários para geração de energia solar.

A principal Resolução Normativa relativa à energia fotovoltaica é a n° 482/2012 (ANEEL, 2012). Nela, são estabelecidas as duas formas de geração da energia solar no país: a Geração Centralizada, também conhecida como Parque Solar ou Fazenda Solar, que é um sistema fotovoltaico de grande porte projetado

² A PPH é uma pesquisa quantitativa realizada em campo sob a coordenação da Eletrobras cujo objetivo é apurar os tipos de equipamentos instalados e sua forma de utilização pelos consumidores

para a geração e fornecimento de energia fotovoltaica para a rede elétrica (Pereira, 2019); e a Geração Distribuída (GD), em que há a produção de energia localizada que fica próxima à unidade de consumo conectada diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador (BRASIL, 2004). É então permitida a instalação de sistemas fotovoltaicos em construções nas cidades e até mesmo integrados às envoltórias (Aristizábal, Paez e Ospina, 2018).

A Resolução Normativa nº 482/2012 (ANEEL, 2012) também estabelece o sistema de compensação, válido para a geração distribuída. Por meio dele, a energia excedente gerada ao longo do dia pode ser cedida a distribuidora local e compensada posteriormente na fatura, na proporção 1:1. As discussões relacionadas à esta Resolução foram trazidas ao público na Audiência Pública nº 01/2019, onde principalmente foram propostas modificações no sistema de compensação para incidência de encargos como a Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) e Tarifa de Energia (TE). Apesar de não ter acarretado modificações no sistema tarifário atual relativo à energia fotovoltaica, é importante a mencionar que as alternativas propostas visavam modificar a proporção de compensação 1:0,72 e 1:0,38 no cenário mais e menos favorável, respectivamente (ANEEL, 2018).

Explorando o contexto favorável para inovação com relação as vertentes de geração de energia limpa e de conservação de energia, os sistemas fotovoltaicos integrados a edificações surgem como uma solução arquitetônica interessante. Esta tecnologia tem como característica a substituição de elementos convencionais da envoltória, como janelas e revestimentos de fachada por materiais fotovoltaicos (Eisenchmid et al., 2008) e como benefícios são a geração de energia limpa e a redução do consumo energético para resfriamento por parte da edificação (Anctil, Lee e Lunt, 2020). A redução da demanda energética causada pelos sistemas fotovoltaicos integrados a edificações é consequência do baixo coeficiente de calor solar e da baixa perda de calor característico dos materiais utilizados para a integração de sistemas fotovoltaicos em edificações (Qiu, Yang e Sun, 2019), resultando em uma demanda menor do sistema de condicionamento de ar.

Estudos que abordam os aspectos simultâneos de redução na demanda energética final e geração energética foram realizados por Anctil, Lee e Lunt (2020) e Paydar (2020). O primeiro visa a integração de sistemas fotovoltaicos em claraboias de edificações localizadas em quatro diferentes cidades americanas, podendo em todos os cenários se observar a redução da demanda energética final. Já o segundo estudo aborda elementos de sombreamento no contexto climático do Irã, registrando entre 12-20% de redução na energia final consumida.

Atrelando o conceito de sistemas fotovoltaicos integrados a edificações (ao de eficiência energética foi possível a identificação de 302 artigos publicados³ com ênfase na temática desejada. Foi percebida uma maior produção acadêmica relacionada a utilização de silício amorfo (a-Si) como matéria prima (Abdelhakim, Kandar e Lim, 2019; Cheng *et al.*, 2019; Qiu, Yang e Sun, 2019; Zhang e Lu, 2019), seguido pelos filmes fotovoltaicos orgânicos (OPV) (Moreno *et al.*, 2019; Anctil, Lee e Lunt, 2020; Stoichkov *et al.*, 2019). Contudo, é necessário ressaltar que o Brasil tem grande representatividade no mercado global em pesquisas relacionadas a esta última tecnologia mencionada: a *startup* mineira SUNEW é uma das

³ A pesquisa foi realizada na base SCOPUS, selecionando artigos com os termos “*building integrated photovoltaics*” e “*energy efficiency*” no resumo, título ou palavras-chave. Dados extraídos no dia 27/01/2021.

empresas líderes deste mercado em escala global (Souza *et al.*, 2020), disponibilizando filmes fotovoltaicos orgânicos que podem ser integrados aos diversos elementos da edificação como fachadas, janelas, claraboias e telhas (SUNEW, 2020b).

Percebe-se também que geralmente apenas a geração energética ou a energia conservada são medidas, ao invés de uma análise multidisciplinar. Tal característica é consequência de metodologias propostas, aonde programa computacional tem uma função. A metodologia proposta neste trabalho é baseada na utilização de uma interface única que facilita abordagens multidisciplinares, sendo mais precisa e demandando menos tempo para execução das tarefas.

A eficiência energética tem como princípio maximizar os benefícios da energia economizada e da demanda evitada (ANEEL, 2017). Aplicando tal princípio ao elevado consumo energético por parte do ar-condicionado, a intenção é identificar como a aplicação de filmes fotovoltaicos orgânicos na fachada pode impactar o balanço energético final de edificações devido as suas propriedades. Espera-se que, simultaneamente, estes elementos gerarão energia limpa e reduzirão a demanda de sistemas artificiais de resfriamento, tornando a edificação mais eficiente energeticamente. Observou-se uma lacuna quando se considera a mensuração deste impacto em escala nacional, visto que os estudos encontrados foram realizados em países do hemisfério norte como China (Zhang e Lu, 2019; Qiu, Yang e Sun, 2019), Estados Unidos (Anctil, Lee e Lunt, 2020) e Reino Unido (Stoichkov *et al.*, 2019), e em cidades cujo clima se difere do encontrado no Brasil.

Apesar de sistemas fotovoltaicos integrados a edificações ainda não serem frequentes no país e não terem sido encontradas medições de seus reais impactos na demanda energética da edificação (geração de energia e conservação de energia), é possível superar tal desafio por meio da utilização de programas computacionais voltados para eficiência energética. Pode-se explorar a influência de parâmetros como forma da edificação, orientação, localização e tamanho das aberturas no seu desempenho, visando encontrar a solução que acarrete a maior redução na demanda energética. Sendo assim, esta dissertação busca contribuir no avanço da pesquisa relacionada à integração de filmes fotovoltaicos orgânicos em fachadas de edificações em escala nacional, investigando seu impacto na demanda energética final para condicionamento, tendo, como contribuição para a comunidade científica, diretrizes para obter-se um maior aproveitamento dos filmes fotovoltaicos integrados a edificações.

Esta dissertação insere-se na linha de pesquisa “Planejamento Urbano e Sustentabilidade” do Mestrado Profissional em Engenharia Urbana e Ambiental da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) e da Universidade Técnica de Braunschweig (TUBS).

1.1.

Definição do problema de pesquisa

Baseando-se nos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (UNFCCC, 2015), o desafio é repensar a arquitetura de forma que haja oferta de energia limpa e acessível para a população e que se criem cidades e comunidades sustentáveis. Considerando tais fatores e o contexto econômico, político e tecnológico nacional, assim como a disponibilidade de programas computacionais e possibilidade de

realização de simulações por meio destes, definiu-se a seguinte questão principal a ser respondida ao longo da pesquisa:

“Em quais cenários integração de filmes fotovoltaicos orgânicos às fachadas das edificações se mostram mais benéficas com relação à redução da demanda energética final da edificação, considerando diferentes contextos climáticos brasileiros?”

1.2.

Objetivos: geral e específicos

Buscando contribuir para a investigação de soluções de integração de elementos de geração de energia integrados às fachadas e que sejam energeticamente eficientes, o objetivo geral da dissertação é mensurar o impacto da integração de sistemas fotovoltaicos a fachadas de edificações, de forma a otimizar o balanço energético em diferentes contextos climáticos brasileiros, utilizando como método o auxílio de programas computacionais e ferramentas desenvolvidos especificamente para tais funções. Assim, serão determinadas as configurações de fachadas e volumetrias que possuam como benefício a maior redução na demanda energética final em diferentes cidades brasileiras, considerando as zonas bioclimáticas existentes no país.

Em termos específicos, a dissertação tem os seguintes objetivos:

- Caracterizar as alternativas para soluções de fachada com sistemas fotovoltaicos integrados a edificações, assim como seus elementos e benefícios;
- Definir a tecnologia a ser aprofundada, bem como os parâmetros relevantes para sua simulação;
- Determinar as configurações de fachada e das cidades a serem simuladas por meio dos softwares especificados;
- Definir o método para a realização de simulações, com base no Protocolo Internacional de Medição e Verificação da Performance (PIMVP);
- Definir os métodos de algoritmos genéticos para otimização e assim encontrar as soluções mais eficientes para a problemática em menos tempo;
- Identificar quais as orientações e porcentagens de abertura da fachada que configuram a opção mais vantajosa para a aplicação de filmes fotovoltaicos integrados a fachadas, levando em consideração os diferentes contextos climáticos do país;
- Estimar a energia gerada e a energia conservada a partir da simulação de filmes fotovoltaicos integrados a fachadas, considerando tipologias de edificações e as zonas bioclimáticas existentes no país;
- Discutir a importância e as possibilidades da utilização de softwares de simulação para a obtenção de soluções arquitetônicas que integrem filmes fotovoltaicos a fachadas das edificações.

1.3. Metodologia

Segundo a taxonomia proposta por Vergara (2002; 2005), a pesquisa pode ser considerada exploratória, aplicada e intervencionista (quanto aos fins). Quanto aos meios de investigação, a metodologia compreende:

- Pesquisa bibliográfica e documental sobre os temas centrais da pesquisa, como indicado na fase exploratória e descritiva da Figura 1.1;
- Delimitação dos parâmetros a serem avaliados, assim como os programas computacionais a serem empregados no processo de simulação;
- Realização de simulações de forma a definir o impacto da integração de filmes fotovoltaicos no balanço energético final de diferentes configurações de edificações nas zonas bioclimáticas brasileiras.

A Figura 1.1 apresenta o desenho da pesquisa separada em três fases principais: (i) exploratória e descritiva; (ii) pesquisa aplicada; e (iii) conclusiva.

Detalham-se, a seguir, o desenvolvimento de cada fase e os resultados esperados em cada bloco da Figura 1.1. Destaca-se que o desdobramento da pesquisa foi elaborado levando em consideração os objetivos enunciados na seção 1.2 deste capítulo.

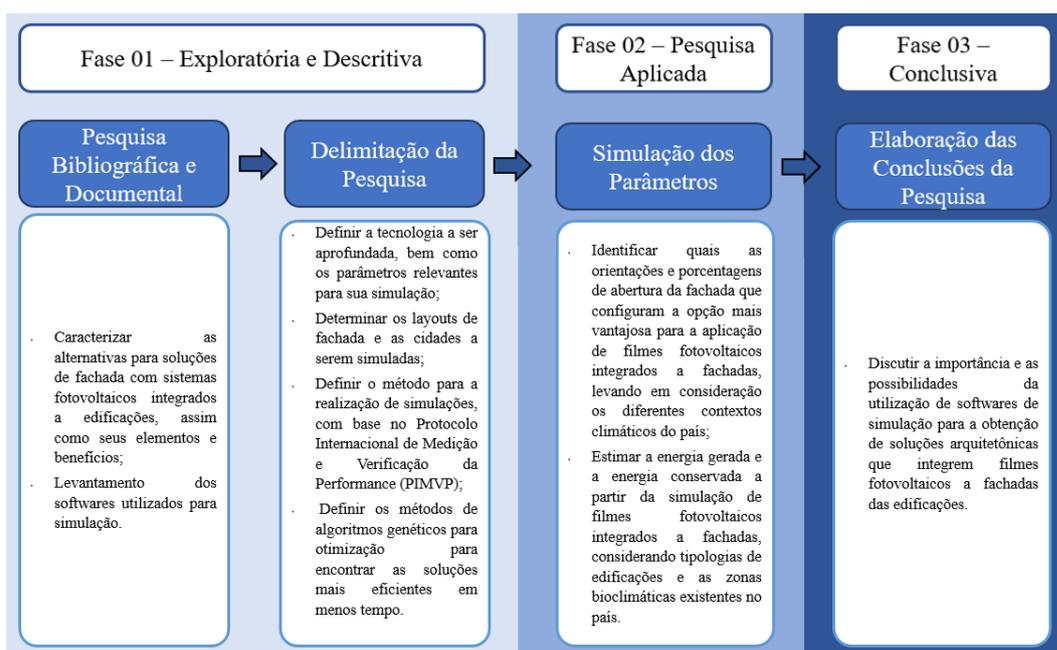


Figura 1.1 - Desenho da pesquisa, seus componentes e métodos.
Fonte: Elaboração própria.

1.3.1. Fase exploratória e descritiva

A fase exploratória e descritiva foi iniciada com pesquisa bibliográfica e documental, com o objetivo de levantar trabalhos conceituais e documentos de referência para delimitação do tema central da pesquisa, assim como a definição das tecnologias e parâmetros a serem adotados. Em seguida, realizou-se uma

revisão na bibliografia existente de forma a identificar estudos relacionados ao tema, investigando desde as integrações mais recorrentes de sistemas fotovoltaicos integrados às edificações até as propriedades térmicas dos materiais, cruciais para serem utilizados como dados de entrada para a realização das simulações. Identificou-se também que os artigos publicados não abordavam uma pluralidade de implantações, orientações e porcentagem de áreas de janelas, sendo possível então a identificação de uma lacuna na literatura sobre tais estudos multidisciplinares.

Para mensuração com acurácia da redução na demanda energética final, deverá ser realizada em porcentagem e seguir o procedimento estipulado pelo Protocolo Internacional de Medição e Verificação (EVO, 2012). Primeiramente será definida a linha de base, condição em que a edificação não terá intervenções na fachada, por meio da simulação da demanda energética para resfriamento. Posteriormente, será simulada a mesma edificação, considerando então a mesma orientação e porcentagem de áreas de janelas, com sistemas fotovoltaicos integrados a fachadas. Neste caso, a demanda energética final é caracterizada pelo consumo relativo ao HVAC menos a geração de energia pelas células fotovoltaicas estipuladas.

Apresenta-se na Figura 1.2 uma visão geral e esquemática dos resultados desta primeira fase. O referencial teórico foi uma parte chave do desenvolvimento do trabalho, visto que orientou conceitualmente a pesquisa, além de dar um panorama sobre o estado da arte dos filmes fotovoltaicos orgânicos e da integração destes em edificações.

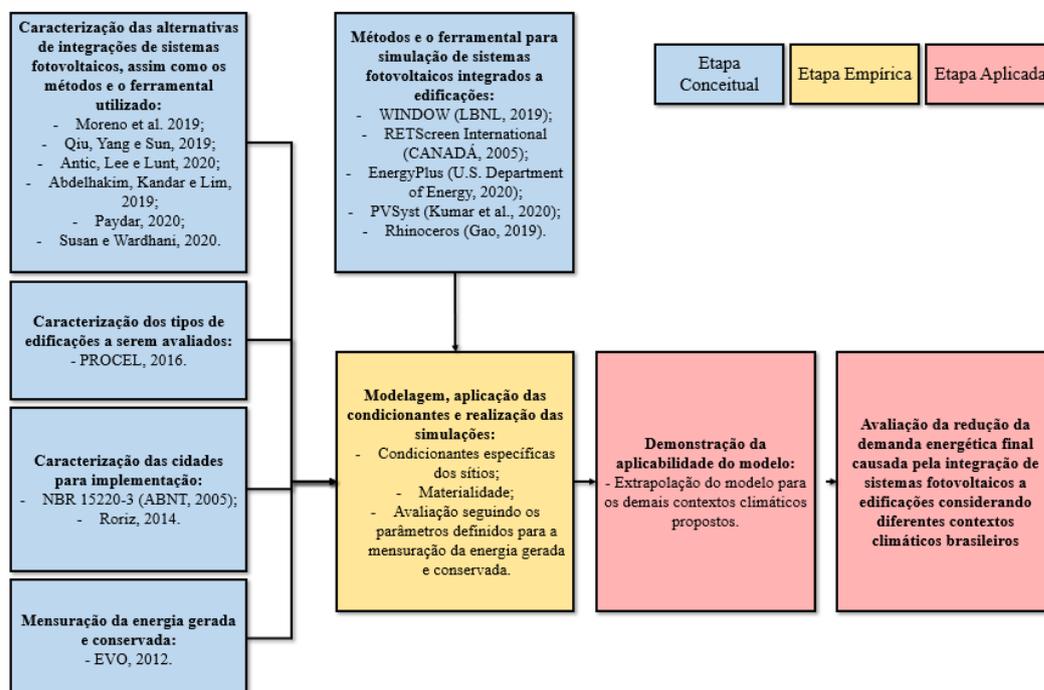


Figura 1.2 - Mapa conceitual da pesquisa
Fonte: Elaboração própria.

1.3.2.

Fase de pesquisa aplicada

A pesquisa aplicada só ocorreu após a coleta de dados e de parâmetros realizada na fase exploratória e descritiva, as quais foram necessárias para definição clara do problema e da lacuna bibliográfica a ser preenchida.

1.3.3.

Fase conclusiva

Na terceira fase, foi elaborada a conclusão geral e específicas considerando os objetivos mencionados na sessão 1.2, tendo como produto a mensuração do impacto de filmes fotovoltaicos orgânicos em diferentes contextos climáticos brasileiros. Também se propõe uma investigação com relação às volumetrias, latitudes e zonas bioclimáticas com maior redução na demanda energética final, resultando em um conjunto de recomendações aos diversos atores interessados na integração de filmes fotovoltaicos orgânicos a edificações.

1.4.

Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos, sendo o primeiro esta introdução.

No capítulo 2, é introduzido o apresentado e aprofundado o conceito de sistemas fotovoltaicos integrados a edificações. São mencionados os elementos necessários para a constituição destes sistemas, as tecnologias disponíveis e as variáveis climáticas que podem impactar positiva ou negativamente o desempenho de geração energética. Apresentam-se os benefícios trazidos pela integração de diferentes sistemas fotovoltaicos, como em elementos de sombreamento e janelas, assim como as legislações aplicáveis no contexto nacional. Por fim, é selecionada a tecnologia de filmes fotovoltaicos orgânicos para investigação.

O capítulo 3 apresenta os programas computacionais e *plugins* existentes no mercado e os utilizados na elaboração deste trabalho: Rhinoceros, Grasshopper, Ladybug e Honeybee. É exposto o zoneamento bioclimático vigente e é realizada a separação do país de acordo com tal separação geográfica, acarretando a seleção das cidades a serem investigadas por meio das simulações. Estipulam-se quais edificações e configurações de fachada serão simuladas por cidade, assim como os parâmetros e sua mensuração por meio da aplicação do Protocolo Internacional de Medição e Verificação da Performance (PIMVP).

No capítulo 4, são apresentados os resultados. Estes são apresentados por cidade, onde também se encontram os níveis de irradiação da mesma de forma a fazer um paralelo com sua influência. Com relação a valores, são apresentadas as reduções da demanda energética entre a linha de base e a intervenção na fachada em percentual para as diferentes configurações de fachada, de forma a facilitar a sua comparação. Tal *layout* é repetido para cada um dos quatorze cenários, com exceção do Rio de Janeiro que apresenta uma análise mais detalhada e engloba mais configurações de fachadas. Os resultados são discutidos, fazendo paralelos e

estipulando as melhores configurações relativas a aberturas de janelas, orientação, cidade, latitude e zona bioclimática.

O capítulo 5 engloba as conclusões do estudo, além de mencionar as limitações do mesmo e as recomendações para investigações futuras.

2

Sistemas fotovoltaicos integrados a edificações

Sistemas fotovoltaicos integrados a edificações são caracterizados pela substituição de elementos convencionais da envoltória por materiais fotovoltaicos, de forma a simultaneamente reduzir o consumo energético para resfriamento da edificação e gerar energia (Zhong *et al.*, 2020). A principal diferença dos sistemas integrados para os aplicados a edificações é que no último as tecnologias fotovoltaicas são alocadas sobre elementos construtivos pré-existentes, como em casos de *retrofit*, e não a concepção do projeto do zero (Hadavina e Singh, 2019).

O termo “sistemas fotovoltaicos integrados a edificações” tem como origem o termo em inglês *Building Integrated Photovoltaics*, cujo acrônimo é BIPV. Nascimento (2013), Santos *et al.* (2012), Zomer (2014) e Lyra e Rola (2020) utilizam tal terminologia na língua portuguesa, porém variantes menos utilizadas foram encontradas na bibliografia, como “geração de energia solar fotovoltaica de forma integrada a edificações” (Rüther e Salamoni, 2011) e “integração de painéis solares fotovoltaicos em edificações” (Santos, 2009). Opta-se pela utilização do termo “sistemas fotovoltaicos integrados a edificações” por ser a mais difundida na bibliografia e estar mais aderente à Norma Técnica Brasileira nº 10.899 (ABNT, 2020) sobre terminologias de energia solar fotovoltaica.

Os primeiros produtos específicos para sistemas fotovoltaicos integrados a edificações se tornaram disponíveis comercialmente na década de 1990 (Eiffert e Kiss, 2000). Seus componentes eram não só os sistemas fotovoltaicos em si, sendo necessária também a instalação de elementos físicos para garantir sua alocação e manutenção no lugar, como cabos e elementos estruturais. Apesar de sua tecnologia rudimentar, assim foram os primeiros experimentos que possibilitaram a criação hoje de elementos construtivos multifuncionais, como paredes, claraboias e afins, que além de sua função original passaram a funcionar como um gerador de energia (Eiffert e Kiss, 2000). Desde a sua disponibilidade comercial, observa-se um crescente número de publicações relacionadas ao tópico. Contudo, destaca-se o crescimento exponencial a partir dos anos 2010, como mostrado na Figura 2.1.

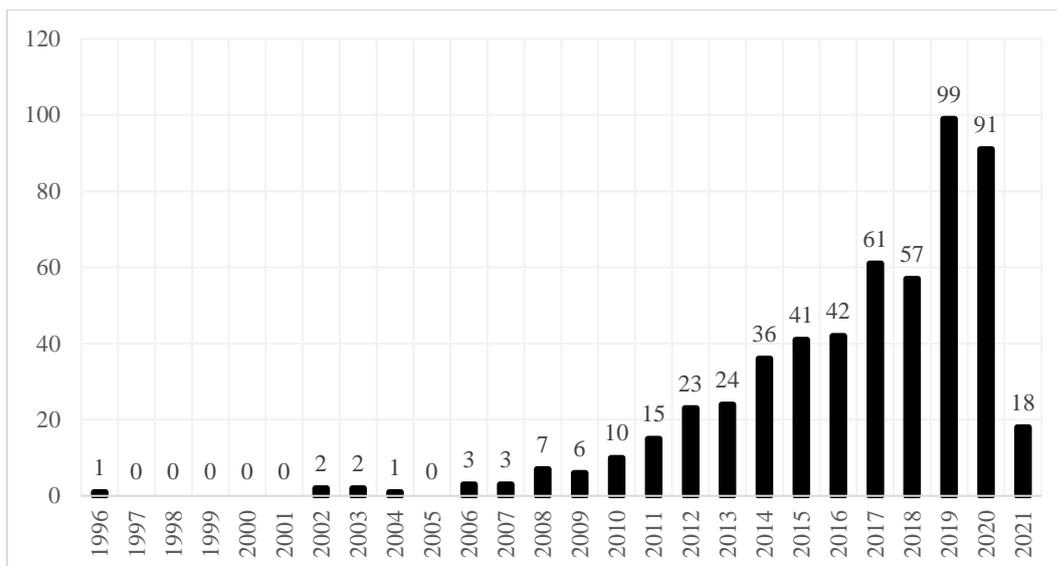


Figura 2.1 – Publicações sobre sistemas fotovoltaicos integrados a edificações na Base SCOPUS, entre os anos de 1994 e 2021⁴.

Fonte: Elaboração própria.

As seções subsequentes visam se aprofundar nos princípios para a integração de sistemas fotovoltaicos em edificações, abordando desde os locais possíveis para sua instalação quanto os elementos necessários para seu funcionamento. São apresentados também os benefícios trazidos por tais sistemas sob as óticas da geração e conservação de energia. Por fim, é apresentada a perspectiva regulatória e mercadológica do mercado nacional fotovoltaico.

2.1. Formas de integração a edificações

Devido às limitações tecnológicas, inicialmente os sistemas fotovoltaicos tinham como objetivo único a geração energética, se limitando a instalação em coberturas. Contudo, a criação de novos produtos teve um papel vital para o ciclo de tecnologia energética e melhorias evolutivas em materiais continuamente contribuem para aumentar a eficiência, confiabilidade e desempenho dos produtos, sendo recorrente o desenvolvimento de novos materiais para renovações nas opções de energia (Hahn, 1994). As tecnologias fotovoltaicas disponíveis atualmente modificam o conceito anterior que desconsiderava questões estéticas, permitindo que tais elementos façam parte da linguagem da envoltória (Freitas e Brito, 2019) e constituem um caminho para atingir edifícios com consumo zero ou quase zero, os *Zero Energy Buildings* (ZEB) ou *Nearly Zero Energy Buildings* (nZEB) (Boccalatte e Fossa, 2020).

A variedade de integrações e aplicações se dá pela utilização tanto de elementos fotovoltaicos mais convencionais, como painéis integrados a fachadas, como pelo emprego de novos materiais mais leves, flexíveis, semitransparentes e customizáveis em tamanho, forma e cor (SUNEW, 2020a). Os sistemas fotovoltaicos podem ser integrados em diferentes locais da edificação, como janelas, claraboias), pergolados, elementos de sombreamento e revestimento de

⁴ Pesquisa realizada em 12/02/2021, relativa a artigos científicos com as palavras-chave *building integrated photovoltaics* ou BIPV no resumo, título ou palavras-chave.

fachada (Eisenchmid *et al.*, 2008). A Figura 2.2. mostra a Opera de Oslo, onde sistemas fotovoltaicos foram integrados nos vidros das fachadas.



Figura 2.2 – Fachada principal da Opera de Oslo.
Fonte: Arquivo pessoal. Foto tirada em 26/09/2016.

Foi realizada uma investigação de todas as publicações relacionadas às formas de integração de sistemas fotovoltaicos mencionadas por Eisenchmid *et al.* (2008) exposto na Figura 2.3, sendo observado um crescimento maior durante a década de 2010. Os locais mais explorados pelas publicações acadêmicas foram as fachadas, alcançando 816 publicações, e as janelas, com 542. As integrações em elementos de sombreamento e em claraboias tiveram números de artigos publicados consideravelmente menores, com 180 e 50 artigos publicados, respectivamente, sendo o local menos explorado os pergolados com apenas três artigos publicados.

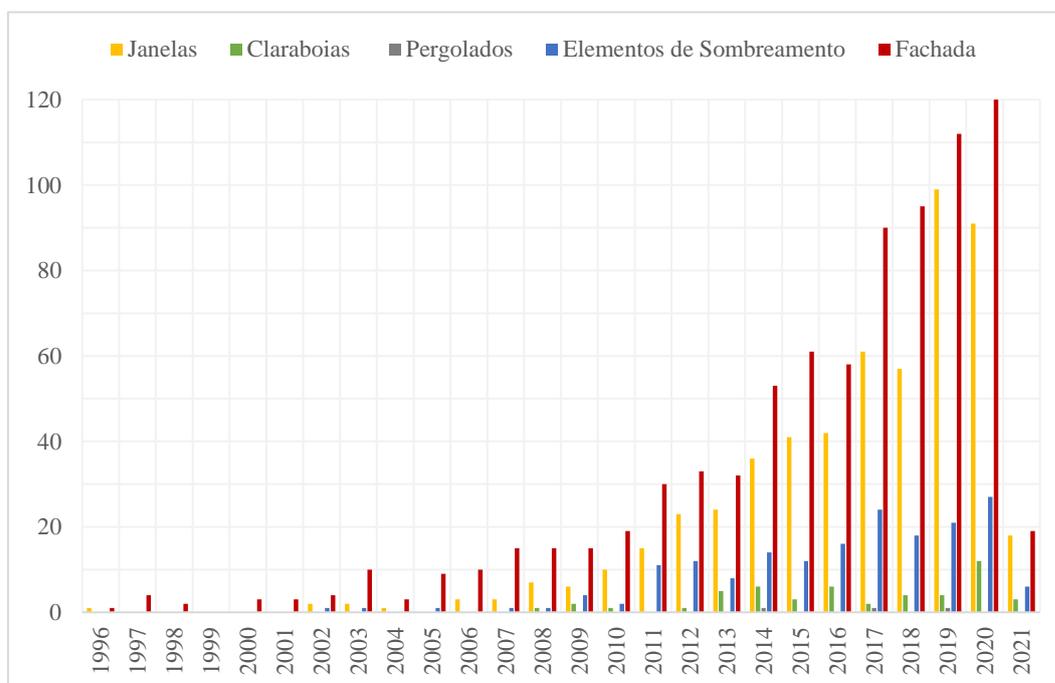


Figura 2.3 – Publicações de sistemas fotovoltaicos integrados a edificações, por ano e local de integração dos filmes.

Fonte: Elaboração própria, detalhada no Anexo I.

2.2.

Tecnologias disponíveis de células fotovoltaicas a serem integradas a edificações

Segundo Suzuki e Rezende (2013), o efeito fotovoltaico acontece em materiais semicondutores que alternam seu comportamento entre condutores e isolantes. A primeira menção de tal efeito realizada por Becquerel (1839), que observou a criação de uma pequena voltagem e corrente após a imersão de duas placas metálicas (de platina ou prata) em determinada solução e a sua exposição à luz (Kazmerski, 1997). O primeiro precursor dos módulos amplamente utilizados hoje, a primeira célula solar com base em silício surgiu por meio de uma patente registrada por Russel S. Ohl (1941) e a eclosão de publicações relacionadas a tecnologias fotovoltaicas em geral ocorreu a partir dos anos 1974 (Kazmerski, 1997).

Pesquisas relacionadas à investigação de novos materiais e tecnologias fotovoltaicas, em especial para integração em edificações, tem registrado um crescimento considerável nos últimos anos, o que aliadas a subsídios governamentais traz uma perspectiva promissora para expansão de tal integração no futuro (Tripathy, Sadhu e Panda, 2016). Tecnologias de silício são as mais antigas, e, portanto, consideradas de primeira geração de sistemas fotovoltaicos. Estas células possuem ampla presença no mercado global, ocupando cerca de 90% do mesmo, e tal fator se dá pela abundância de sua matéria-prima, sua estabilidade e não toxicidade (Sampaio e González, 2017). Painéis de silício da primeira geração podem ser mono ou policristalino, dependendo da pureza da sua matéria prima.

O silício monocristalino possui alto potencial de geração energética devido à sua composição pura, chegando a até 21,9% de eficiência na conversão de energia solar incidente (Frauenhoffer ISE, 2017). Contudo, possui custo mais elevado, maior consumo energético para fabricação e conseqüentemente maior tempo para retorno do investimento e da compensação da sua pegada de carbono (Sampaio e González, 2017). Células fotovoltaicas baseadas em silício policristalino possuem custos mais baixos devido à menor pureza da sua matéria prima, porém alcançam apenas em torno de 15% de eficiência (Wang *et al.*, 2020). Os pontos positivos de tal tecnologia são o fato de seu custo de fabricação e sua pegada de carbono serem menores quando comparados ao silício monocristalino (Sampaio e González, 2017).

Existe uma diversidade de matérias primas para as tecnologias de filme-fino, que fazem parte da segunda geração de sistemas fotovoltaicos (Sinke, 2019). Suas vantagens são a sua facilidade de transporte, flexibilidade, transparência, finura comparada aos módulos de silício convencionais e preços mais acessíveis, possibilitando que futuramente esta seja a tecnologia mais consolidada no mercado nacional e internacional (Tripathy, Sadhu e Panda, 2016). Painéis solares de filme fino que já se encontram disponíveis para comercialização em larga escala internacionalmente fazem parte da segunda geração de tecnologias fotovoltaicas, sendo os principais exemplos o silício amorfo, o telureto de cádmio e o cobre índio gálio selênio (Sinke, 2019). Vale fazer um alerta sobre as tecnologias de filme fino de segunda geração: devido ao seu processo de produção, a emissão de estanho na água é um ponto de atenção do ponto de vista ambiental (Alsema, 1996).

A primeira célula de silício amorfo (a-Si) foi fabricada por em 1976 com 2,4% de eficiência (Lee e Ebon, 2020), e a maior eficiência que se tem conhecimento

foi de 14,6%, obtida por Yang, Banerjee e Guha (1997). O silício amorfo necessita de uma quantidade menor de silício para fabricação, utilizando uma versão não cristalina do material, e é a alternativa menos tóxica entre as opções da segunda geração (Alsema, 1996; Lee e Ebong, 2020). Outra vantagem da tecnologia é a possibilidade de empilhamento das células para aumentar sua eficiência, podendo chegar até mesmo a camadas triplas (Alsema, 1996).

O telureto de cádmio (CdTe) também permite o empilhamento de células, que em conjunto com a perspectiva de redução de custos dos processos de produção tornam seu uso promissor. O CdTe trouxe como revolução seu método de fabricação por meio de impressão, permitindo também que esta seja parcialmente transparente (Lee e Ebong, 2020). Dois fatores limitam sua aplicação em larga escala atualmente: (i) o seu custo alto comparado a sua eficiência, afetando então seu custo-benefício e tempo de *payback*; (ii) os possíveis danos ambientais no descarte ou a saúde humana em caso de acidentes como incêndios (Lee e Ebong, 2020; Alsema, 1996).

O primeiro registro de célula fotovoltaica usando como matéria prima o cobre, o índio, o gálio e o selênio (CIGS) foi realizado por Kazmerski, White e Morgan (1976), obtendo 4,5% de eficiência. O recorde de eficiência foi obtido por Powalla *et al.* (2017), com 22,6%, sendo o recorde mundial de qualquer tecnologia fotovoltaica. O CIGS um processo de produção semelhante ao do telureto de cádmio, permitindo transparência e empilhamento de camadas na célula fotovoltaica. Contudo, é um material com maior energia embutida na sua manufatura⁵ (Alsema, 1996).

A terceira geração de tecnologias fotovoltaicas se diferencia das anteriores pelo maior potencial de geração, pela utilização de materiais abundantes, atóxicos e de baixo custo (Green, 2003). O principal integrante dessa geração são os filmes fotovoltaicos orgânicos, em inglês *Organic Photovoltaics* (OPV), os quais se estimam que possa atingir 20-25% de eficiência em módulos comerciais nos próximos anos (Lee e Ebong, 2020; Yang *et al.*, 2017). Devido ao seu baixo peso, o OPV pode ser integrado a edificações com o uso de fitas especiais e obter então um baixo custo de instalação, cujo valor pode chegar até a 70% do investimento necessário para sistemas fotovoltaicos tradicionais, além de oferecer uma maior pluralidade de aplicações (Sampaio e González, 2017).

Filmes fotovoltaicos orgânicos como conhecidos hoje são produzidos a partir da impressão de semicondutores orgânicos em diversas camadas (Sampaio *et al.*, 2020a). Filmes de etileno tetra fluoroetileno (ETFE) têm se destacado no mercado como base para a impressão, visto que o material tem boa performance arquitetônica e comportamento estrutural quando comparado ao vidro (Hu *et al.* 2017). A forma de impressão mais usada para processamento de filmes fotovoltaicos orgânicos é o *spin coating*, por ter uma formulação dos componentes menos complexa e obter resultados mais homogêneos (Sampaio *et al.*, 2020a). Contudo, tal modelo possui um bom desempenho em somente em laboratório e um desafio futuro para tal técnica é a produção em escala comercial. Com isso, outras técnicas de impressão têm sido exploradas como: gravação direta (*direct engraving*), impressão flexográfica (*flexographic printing*), litografia (*offset lithography*), serigrafia (*screen printing*), impressão por jato de tinta (*inkjet*

⁵ Uma maior energia embutida na manufatura é resultado de uma maior demanda energética para produção de determinado produto, considerando todo seu ciclo desde extração até transporte.

printing), tampografia (*pad printing*) e por aplicação (*casting*) (Sampaio *et al.*, 2020a). Um dos benefícios trazidos pelas técnicas de impressão dos filmes fotovoltaicos orgânicos quando comparado a tecnologias convencionais é a liberdade para o *design*, podendo as células ser impressas de maneira a gerar desenhos ou até mesmo qualquer forma em duas dimensões (Välimäki *et al.*, 2017).

Os materiais impressos para a criação de um filme fotovoltaico orgânico são um polímero tipo P como doador e uma molécula tipo N como receptor (Zheng, Huo e Li, 2020). A exploração de novos materiais é recorrente nas tecnologias fotovoltaicas orgânicas visto que a inclusão ou utilização de novos materiais pode aumentar a eficiência (Luber e Buriak, 2013). Apesar de ainda se encontrar em estágio de desenvolvimento tecnológico, nanoestruturas de carbono são consideradas materiais promissores tanto sob a ótica de disponibilidade quanto de produção em massa, sendo realizados diversos estudos relacionados à sua utilização (Sampaio *et al.*, 2020b).

As três principais vantagens da utilização de filmes fotovoltaicos orgânicos são: uma boa proporção entre o custo e a eficiência; a simplicidade de fabricação e processamento; e a flexibilidade. Destaca-se também que visto que o processo de fabricação dos filmes fotovoltaicos orgânicos ocorre em baixa temperatura, o resultado é uma menor pegada de carbono e um menor custo de processamento do material (Kaka *et al.*, 2020). Há a possibilidade de utilização deste material em grandes áreas, sendo mais leves e flexíveis que tecnologias tradicionais de silício (Zheng, Huo e Li, 2020). Sua instalação é consideravelmente mais simples que as tecnologias convencionais, visto que devido a sua pequena massa não é necessária a utilização de suportes como em painéis fotovoltaicos de silício, podendo ser colados com fitas especiais em superfícies.

De forma a melhor compreender que tecnologias estão sendo utilizadas para a integração em edificações, foi realizado um levantamento das publicações, cujo foco foram as tecnologias das três gerações aqui mencionadas: as de silício, englobando tanto silício mono e policristalino (1^a geração); telureto de cádmio (CdTe), cobre índio gálio selênio (CIGS) e silício amorfo representando a 2^a geração; e por fim filmes fotovoltaicos orgânicos (OPV) equivalente a 3^a geração.

Destacou-se a utilização de silício amorfo (a-Si) como principal matéria-prima para tal integração, totalizando 156 publicações, seguido pelas células cuja matéria prima é o cobre, índio, gálio e selênio (CIGS) com 66 artigos. Posteriormente é encontrado o telureto de cádmio (CdTe) e os filmes fotovoltaicos orgânicos (OPV) com 36 e 23 artigos publicados, respectivamente. As tecnologias menos empregadas foram as de silício mono e policristalino, representando a 1^a geração de células fotovoltaicas. A Figura 2.4 ilustra o exposto.

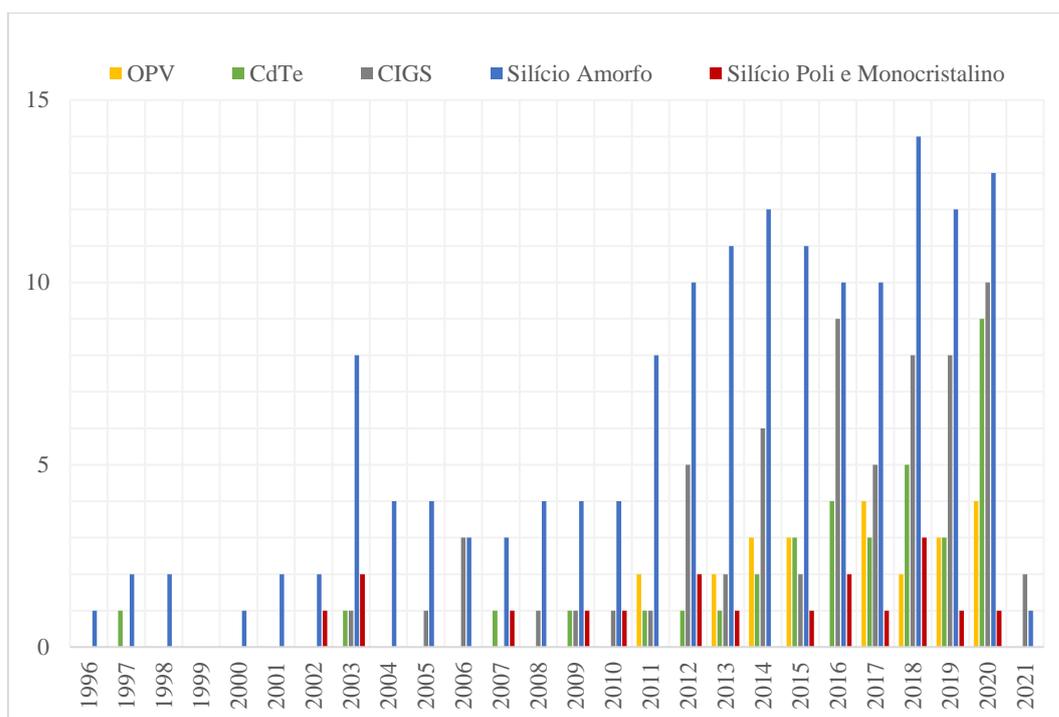


Figura 2.4. – Tecnologias utilizadas para aplicação em sistemas fotovoltaicos integrados a edificações, por ano.

Fonte: Elaboração própria, detalhada no Anexo II.

2.3.

Demais componentes de sistemas fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos são compostos por outros componentes além das células. Os elementos necessários para funcionamento dependem do tipo de geração de energia, que pode ser ligada a matriz energética local (*on-grid*), um sistema isolado (*off-grid*), ou seja, não conectado eletricamente ao Sistema Interligado Nacional (SIN) por razões técnicas ou econômicas (BRASIL, 2010). Em ambos os sistemas é necessária a utilização de inversores. Já em sistemas isolados, a energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos é enviada anteriormente para o controlador de carga, sendo necessário o banco de baterias. Quando há conexão com a rede energética local, após passar diretamente pelo inversor a energia pode ser utilizada ou enviada para um medidor bidirecional para envio a matriz energética. Os elementos necessários para cada um dos sistemas são apresentados nas Figuras 2.5. e 2.6.

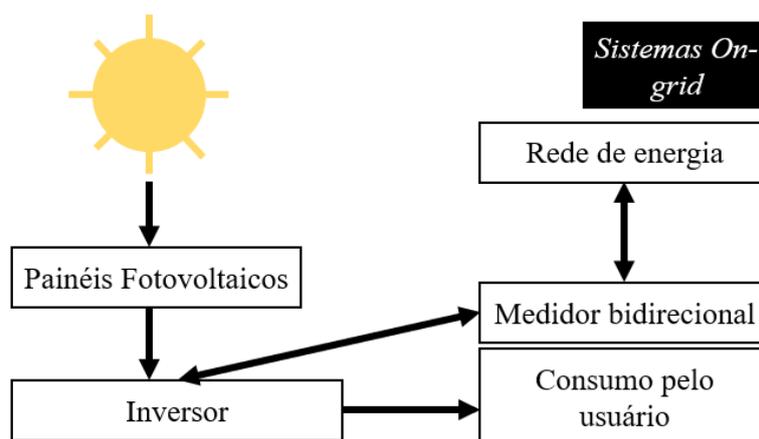


Figura 2.5. – Elementos necessários para funcionamento dos sistemas ligados a rede de energia (*on-grid*).

Fonte: Elaboração própria.

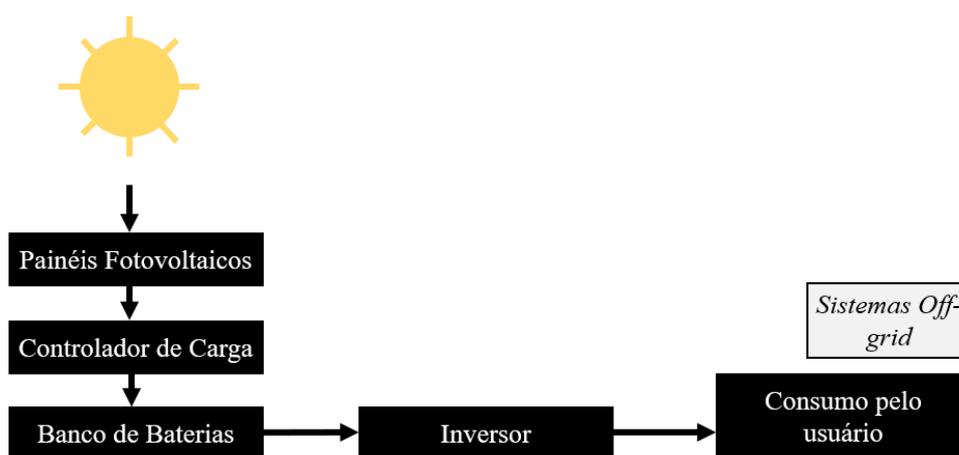


Figura 2.6. – Elementos necessários para funcionamento dos sistemas ligados isolados (*off-grid*).

Fonte: Elaboração própria.

As seguintes subseções visam detalhar cada um dos elementos necessários para o funcionamento de ambos os tipos de sistemas fotovoltaicos. Serão abordados o inversor, o banco de baterias, o controlador de carga e o medidor, dando ênfase no estado-da-arte e nas tecnologias mais comumente conjugadas com sistemas fotovoltaicos integrados a edificações.

2.3.1. Inversor

A função dos inversores é converter a corrente contínua (CC) gerada pelas células fotovoltaicas em corrente alternada (CA) para possibilitar a sua utilização por equipamentos domésticos (Sousa, 2019). Existem três principais tipos de inversores no mercado: os de onda senoidal modificada, que produzem ondas no formato semi-quadradas, sendo recomendados para equipamentos não sensíveis a distorção de tensão como eletrodomésticos (Carvalho, 2013; Villalva e Gazoli, 2012); os de onda senoidal pura que fornecem energia de boa qualidade, sendo recomendados para equipamentos que demandam alimentação sem grandes

distorções (Morais, 2017); e os inversores de onda quadrada, apresentando a pior eficiência e maior irregularidade na carga (Morais, 2017).

Uma forma eficiente de se instalar inversores em sistemas fotovoltaicos, sejam eles integrados na edificação ou instalados no telhado, é o chamado *multi-string topology*. Neste, um primeiro equipamento é instalado a cada fileira ou até mesmo cada módulo, mantendo a corrente do sistema em contínua (CC) (Dorai e Das, 2014). As vantagens deste sistema descentralizado é que torna mais fácil a detecção de erros no sistema, o tornando mais confiável (Liu e Duan, 2012). Posteriormente, todas as cargas provenientes destes conversores são enviadas para um inversor centralizado, que transforma toda a corrente em alternada (Dorai e Das, 2014).

O rastreamento de máxima potência (MPPT – *maximum power point tracking*) é uma tecnologia importante dos inversores, pois garante que a máxima eficiência do sistema de painéis fotovoltaicos (Alves, 2013). Assim, o tempo de retorno financeiro aplicado é menor. Para que o MPPT seja mais vantajoso, recomenda-se a sua utilização em uma quantidade limitada de painéis fotovoltaicos, visto que as chances de estes terem a incidência de irradiação e uma geração de energia instantânea semelhantes é mais alta (Alves, 2013). Recomenda-se então a conjugação de um sistema de *multi-string topology* com o de MPPT para a obtenção de um sistema mais confiável e eficiente.

2.3.2.

Banco de baterias

O banco de baterias é necessário apenas nos sistemas isolados e híbridos, tendo como objetivo o armazenamento de energia para uso em momentos em que não há irradiação por se tratar de uma fonte energética intermitente. O período em que um conjunto (ou banco) de baterias consegue ficar sem ser recarregado é chamado de autonomia (Slimene e Khlifi, 2020). É então um sistema crucial para a utilização plena da energia gerada, em especial em residências onde o horário de uso não coincide com o horário da geração. Contudo, destaca-se a necessidade de sistemas confiáveis, com bom custo-benefício e com baixos impactos ambientais (Slimene e Khlifi, 2020).

Nos sistemas fotovoltaicos se utilizam baterias estacionárias que suportam diversos ciclos de carga e descarga, sendo a tecnologia mais amplamente utilizada no Brasil a de chumbo ácido por possuir a maior vida útil no mercado (Carvalho, 2013; Slimene e Khlifi, 2020). Um dos fatores que contribuem para a redução da vida útil das baterias é a dificuldade a manutenção da temperatura considerada adequada ao longo das mudanças sazonais (Slimene e Khlifi, 2020), principalmente em países quentes como o Brasil. Outro fator que influencia a durabilidade do banco de baterias é a profundidade das descargas das baterias de chumbo-ácido, sendo que se a bateria for descarregada moderadamente ela terá maior durabilidade (Villalva e Gazoli, 2012). As baterias de chumbo ácido também possuem baixo valor quando comparada a outras tecnologias disponíveis no mercado, como íon de lítio, níquel-cádmio e níquel-hidreto (Sousa, 2019).

O gerenciamento ambiental de pilhas e baterias com relação à coleta, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final é regulada pela Resolução nº 401 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2008). Há um tratamento especial para baterias cuja matéria-prima são metais pesados tóxicos como as de chumbo/ácido, devido ao seu sério risco ao meio ambiente. Considerando tal fator, recomenda-se a utilização no futuro de baterias de íon-lítio por representarem riscos ambientais muito menores que os de chumbo/ácido (Bocchi, Ferracin e Biaggio, 2000).

2.3.3.

Controlador de carga

Os controladores de carga têm como função evitar sobrecargas ou descargas excessivas da bateria, aumentando assim sua vida útil e evitando danos (Wanderley e Campos, 2012). Quando as baterias estão completamente carregadas, o controlador de carga se desliga das placas solares, além de cortar o consumo de energia da edificação caso a bateria fique perto de descarregar (Carvalho, 2013). Isto assegura uma vida útil maior para as baterias.

2.3.4.

Medidor

Existem duas formas de se medir o consumo final de edificações com sistemas fotovoltaicos. O primeiro, utilizado no Brasil, é chamado de medição única, que é aplicável em casos em que a concessionária remunera a energia entregue pelo produtor fotovoltaico ao mesmo preço que este compra. Em tal condição, há a instalação de um medidor único e bidirecional, registrando a entrada e a saída energética com o objetivo de computar a diferença entre a energia computada e entregue a rede automaticamente (GEPEA, 2004). A segunda maneira é aplicada quando há variação no valor de venda e de compra da energia, sendo então necessária a utilização de dois medidores unidirecionais para computar a entrada e a saída energética individualmente (GEPEA, 2004). Ultimamente, os medidores bidirecionais são mais amplamente adotados, por se reduzir o custo de investimento e operação, pois necessita de apenas um equipamento e não de dois.

2.4.

Benefícios dos sistemas fotovoltaicos integrados a edificações

Como mencionado, os sistemas fotovoltaicos integrados a edificações têm como característica simultaneamente reduzir o consumo energético para resfriamento da edificação e gerar energia (Zhong *et al.*, 2020). As duas subseções seguintes visam aprofundar cada um dos benefícios individualmente, sendo a primeira dedicada a apresentação dos fatores que os influenciam positiva e negativamente a geração de energia. A segunda apresenta estudos em que os impactos na demanda energética final para condicionamento (resfriamento e/ou aquecimento) foram investigados, tendo sido selecionados estudos em diferentes contextos climáticos.

2.4.1. Geração de energia

Assim como sistemas fotovoltaicos convencionais, os integrados a edificações têm o potencial de geração de energia. Além das próprias variáveis de performance relacionadas às tecnologias fotovoltaicas, o seu desempenho está sujeito a influências externas, em especial as climáticas. Devido a tais especificidades, um mesmo sistema fotovoltaico não gera a mesma energia dependendo da sua localização geográfica. Por meio da investigação das variáveis climáticas consideradas por Pradhan e Panda (2017) e Fouad, Morgan e Shihata (2017), foram selecionados os seguintes fatores para aprofundamento da análise: irradiação e irradiância; temperatura e velocidade do vento; ângulo de inclinação; e sombreamento.

Os principais requisitos para a viabilidade de geração de energia solar são a irradiância, definida como a potência total de energia proveniente do Sol em determinada unidade de área, geralmente medida em W/m^2 (Gomez *et al.*, 2019) e a irradiação, que é a irradiância acumulada em um intervalo de tempo e medida em kWh/m^2 (INPE, 2017). A irradiância e a irradiação podem ser diretas, aonde os feixes solares vêm sem desvios do Sol, ou difusas, provenientes do espalhamento do feixe solar pelos constituintes atmosféricos (ABNT, 2020). A soma da irradiação direta e difusa é chamada de irradiação global ou total, contabilizando então toda a energia vinda do sol.

A energia produzida por um sistema fotovoltaico é diretamente relacionada à disponibilidade de luz solar, sendo então variável para cada localização (Fouad, Morgan e Shihata, 2017). Também se devem considerar as variações na irradiância relativas às condições climáticas, tendo um melhor desempenho em dias claros e sem nuvens do que em dias nublados e/ou chuvosos (Pradhan e Panda, 2017). Os níveis médios de irradiação diários no plano horizontal ao longo do território nacional são apresentados na Figura 2.7., sendo identificada a região Nordeste como aquela com maior potencial de geração de energia (INPE, 2017), cor vermelha mais escura.

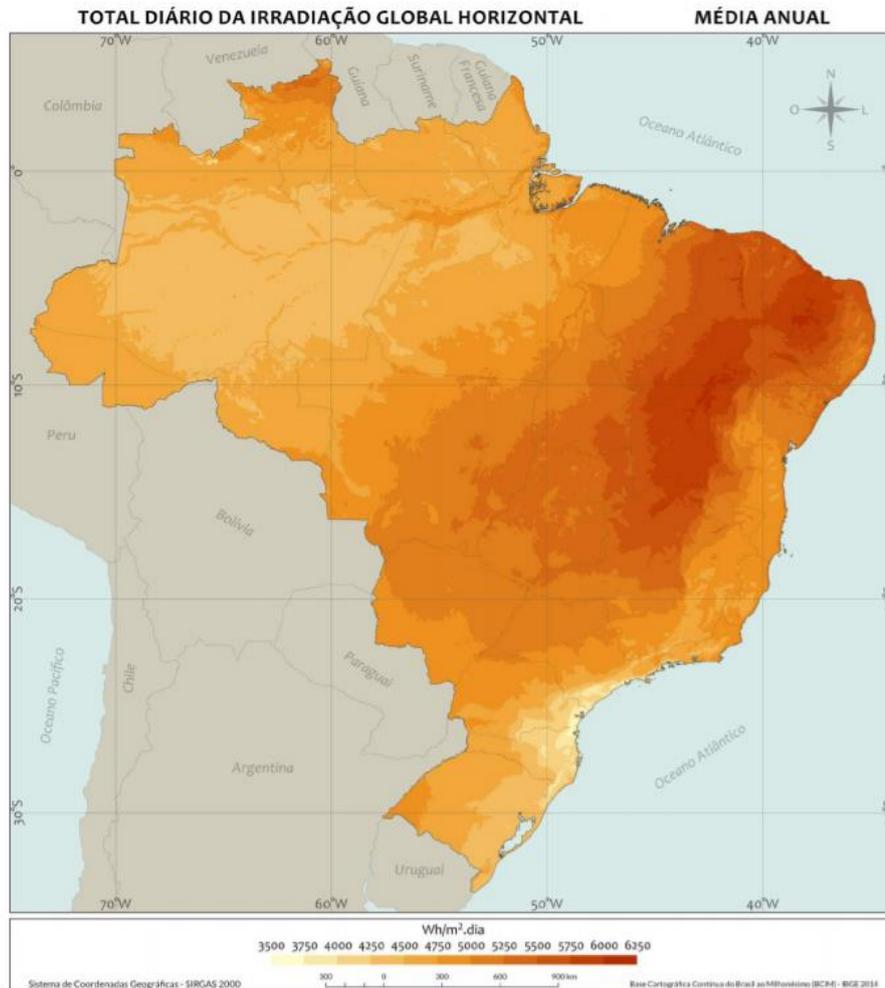


Figura 2.7 – Mapa de irradiação global diária em todo o Brasil, considerando o plano horizontal.
Fonte: INPE, 2017.

A temperatura tem uma relação inversamente proporcional com a grande maioria das tecnologias de geração energética (Pradhan e Panda, 2017), ou seja, seu aumento reduz a eficiência dos módulos. A propriedade que demonstra este impacto é chamada coeficiente de temperatura, que define a porcentagem da redução da energia gerada a cada grau Celsius acima de 20°C. Em média, há uma perda entre 0,38%/°C e 0,45%/°C para painéis de silício monocristalino (Fouad, Morgan e Shihata, 2017), sendo então recomendada a adoção de estratégias para o resfriamento dos módulos (Pradhan e Panda, 2017).

Uma das formas de alcançar tal efeito é por meio da ventilação dos painéis com velocidades moderadas, visto que velocidades demasiadamente elevadas podem causar efeitos adversos e velocidades baixas não impactam de maneira tão significativa (Pradhan e Panda, 2017). A instalação de sistemas fotovoltaicos em coberturas tem uma série de vantagens, como baixos custos de operação, porém tem como desvantagem as altas temperaturas das células devido à baixa área de circulação de ar na face adjacente ao telhado, resultando em também maiores perdas na eficiência: enquanto as temperaturas de operação de sistemas fotovoltaicos em coberturas são em média 35°C e no máximo 75°C, em *layouts* que permitem a ventilação na parte traseira dos painéis fotovoltaicos foram registrados os valores de 27°C e 60°C, respectivamente (Kaldellis *et al.*, 2014).

A orientação correta do azimute e da inclinação de um sistema fotovoltaico também é um fator crucial para obter um maior aproveitamento da irradiação e consequentemente gerar mais energia com o mesmo equipamento (Fouad, Morgan e Shihata, 2017; Oliveira e Gómez-Malagón, 2018). O azimute é medido em graus, em sentido horário a partir do Norte, e indica a localização do sol em um plano horizontal, variando de acordo com a hora, o dia e a localização estudada (Rajendran e Smith, 2016). Já a inclinação é o ângulo da superfície do painel fotovoltaico com relação ao plano horizontal, sendo 0° paralelo a este e 90° perpendicular (Oliveira e Gómez-Malagón, 2018). O azimute e a inclinação de painéis fotovoltaicos são exemplificados na Figura 2.8. A importância da escolha correta do azimute e da inclinação de sistemas fotovoltaicos se dá por que sua orientação inadequada ou imprópria pode acarretar menos geração energética anual e consequentemente um tempo maior para o retorno do investimento (Zsiborács *et al.*, 2020).

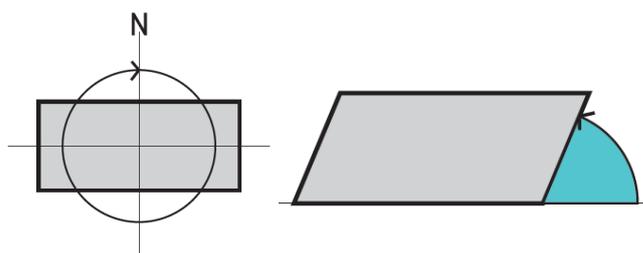


Figura 2.8 – Indicação do azimute (planta baixa, à esquerda) e da inclinação (vista, à direita) de painéis fotovoltaicos.

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 2.9 apresenta a trajetória solar da cidade de Barreiras, na Bahia, onde o ponto amarelo indica a localização do sol às 12:00h do dia 21/12 (esquerda) e do dia 21/06 (direita). As linhas vermelhas são a compilação de todas as horas do ano.

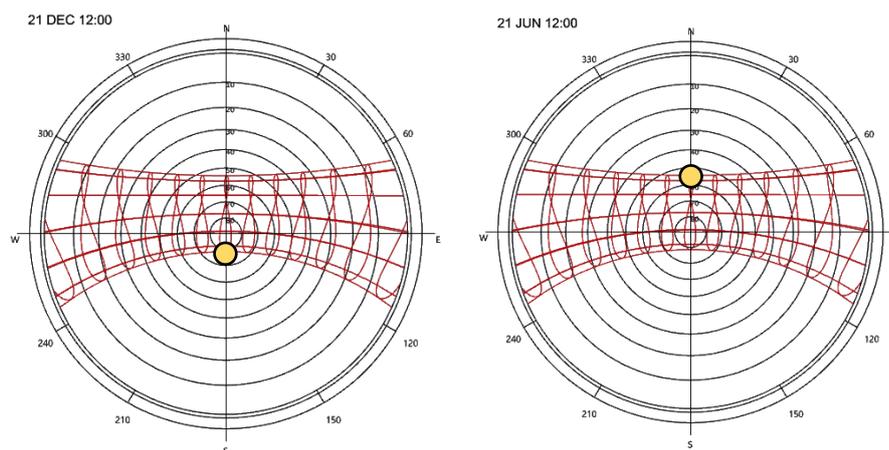


Figura 2.9 – Trajetória solar da cidade de Barreiras, na Bahia

Fonte: Elaboração própria.

A revisão bibliográfica aponta que os sistemas fotovoltaicos são orientados para o norte quando instalados no hemisfério sul e o oposto quando localizados no hemisfério norte para que atinjam maior capacidade de geração. Estudos demonstram que a inclinação tem uma maior influência do desempenho do sistema

do que o azimute (Pradhan e Panda, 2017). A inclinação ideal para sistemas fotovoltaicos fixos é igual à latitude do local onde os mesmos se encontram (Castillo *et al.*, 2020; Oliveira e Gómez-Malagón, 2018; Nóbrega *et al.*, 2018).

A inclinação de sistemas fotovoltaicos integrados a fachadas e janelas de edificações é de 90° com relação ao nível do solo. Com isso, quanto mais próxima da Linha do Equador for a integração destes sistemas, mais longe estará dos valores considerados ideais para a inclinação dos painéis. Em geral, fachadas recebem menos irradiação que telhados (Brito *et al.*, 2017) e, conseqüentemente, sistemas integrados em tal parte da edificação geram menos energia. Contudo, a importância da integração de sistemas fotovoltaicos em fachadas ou elementos verticais se dá pela grande quantidade de área disponível em cidades contemporâneas (Brito *et al.*, 2017), podendo então ter um papel-chave para a geração e conservação de energia da edificação, especialmente em localizações mais afastadas da Linha do Equador.

Uma alternativa aos sistemas fotovoltaicos com inclinação e azimute fixos são os sistemas com rastreamento solar (*tracking*, em inglês), cujo objetivo é manter constantemente o melhor alinhamento entre os elementos fotovoltaicos e os raios solares por meio da modificação da orientação em intervalos horários, diários, mensais ou até mesmo sazonais (Zsiborács *et al.*, 2020; Oliveira e Gómez-Malagón, 2018). Apesar dos sistemas de rastreamento solar serem considerados a maneira mais efetiva de se maximizar a irradiação, por questões econômicas e pela alta necessidade de manutenção não há muito interesse na instalação de tais elementos em sistemas menores (geração distribuída). Contudo, tal tecnologia tem sido cada vez mais difundida em usinas fotovoltaicas de grande porte (Sugirianta, Sunaya e Saputra, 2020). Mas sua aplicação não ocorre em fachadas, objeto desta dissertação.

O sombreamento, geralmente causado em ambientes urbanos por edificações do entorno, suas chaminés, árvores ou outros tipos de obstáculos, também pode causar grandes prejuízos para a geração energética de um sistema fotovoltaico de silício, a tecnologia mais usualmente utilizada. O sombreamento de apenas uma fração de painel fotovoltaico pode causar uma redução de energia gerada em todos os módulos conectados no mesmo circuito (Heinstein, Ballif e Perret-Aebi, 2013; Fouad, Morgan e Shihata, 2017). Em um estudo realizado por Alonso-Garcia, Ruiz e Chenlo (2006), o sombreamento foi mantido constante e foi realizada uma avaliação de como este impactaria um conjunto de painéis de diferentes tecnologias, mostrando uma redução na eficiência entre 59% e 79% e comprovando que a magnitude da perda de geração energética está diretamente relacionada ao material do painel fotovoltaico. Asfour (2018) indica que o melhor local para integração de sistemas fotovoltaicos é no andar superior das edificações, podendo ter até quatro vezes mais irradiação que nos demais pavimentos devido ao auto sombreamento dos elementos projetados pelo autor. Destaca-se então a importância de uma análise com relação às construções e demais barreiras presentes no entorno, de forma a evitar a alocação de sistemas fotovoltaicas em áreas sombreadas.

2.4.2.

Redução da demanda energética para condicionamento

Esta subseção visa apresentar um referencial teórico de forma a identificar o potencial de conservação de energia da edificação pela integração de sistemas fotovoltaicos na edificação. Foram considerados diferentes contextos climáticos, como China, Estados Unidos e Irã, onde em todos foi demonstrada uma clara redução na demanda energética final causada pelo BIPV. Não foi possível, porém,

encontrar estudos considerando o contexto climático brasileiro, evidenciando a lacuna literária a ser preenchida.

O estudo elaborado por Moreno *et al.* (2019) leva em consideração uma edificação comercial hipotética localizada nos contextos climáticos de Paris e Barcelona. Foram propostas janelas fotovoltaicas por meio da integração de filmes fotovoltaicos orgânicos semitransparentes localizados em uma fachada voltada para o sul. Como base para a impressão do OPV foram selecionadas três variações do material etileno tetra fluoroetileno (ETFE): transparente, com espessura de 150 μm ; transparente, com espessura de 250 μm ; e por último um com 28% de opacidade, com 250 μm de espessura. Os resultados foram obtidos por meio de simulação de um ano meteorológico típico, sendo mensurados os impactos em iluminação e demanda energética. Observou-se uma redução superior a 22% em Barcelona e 16% em Paris na demanda energética para aquecimento e resfriamento, sendo resultado tanto das propriedades térmicas do OPV + ETFE quanto da geração energética do mesmo. Visto que indiretamente as células fotovoltaicas funcionam como elementos de sombreamento, também foi registrada uma melhora nos níveis de homogeneidade da iluminação interna.

Qiu, Yang e Sun (2019) exploram os benefícios do baixo coeficiente de ganho de calor solar e baixa perda de calor, característico dos materiais utilizados em sistemas fotovoltaicos integrados a edificações. Neste artigo, é proposta uma janela fotovoltaica (Silício Amorfo) insulada, a ser testada em diferentes asiáticas com condições climáticas diferentes entre si: Harbin, Pequim, Wuhan, Kunming e Hong Kong. Os resultados foram obtidos por simulação com os programas computacionais EnergyPlus e Berkeley Lab WINDOW, com o intuito de mensurar as propriedades térmicas e óticas de diferentes materiais da janela. Um conceito explorado é o *window-to-wall ratio* (WWR), que é a proporção entre a parede e a janela da fachada. Uma parede cortina, por exemplo, teria WWR perto de 100%. Em todas as cidades, destacando que há uma diferença proposta para o *design* da janela fotovoltaica para melhor adequar-se ao clima, observou-se uma clara redução na demanda energética para resfriamento nos meses mais quentes e para aquecimento nos meses mais frios.

Anctil, Lee e Lunt (2020) exploram a integração de filmes fotovoltaicos orgânicos em janelas e claraboias de quatro cidades americanas: Detroit, Los Angeles, Phoenix e Honolulu. Simulações relacionadas à demanda e geração de energia da edificação assim como a avaliação de ciclo de vida são mensurados para compreender o custo-benefício energético. Foi considerada uma eficiência de 10%, que apesar de ser superior que a disponível atualmente em mercado visa considerar um cenário plausível no futuro. O conceito explorado pelos autores é o de demanda energética final (*net energy balance*), em que são contabilizados em um só parâmetro a geração energética e a redução do consumo para aquecimento e resfriamento. Resultados mostraram uma geração praticamente constante de energia ao longo do ano, e em todas as cidades houve uma redução de consumo energético, bem como da pegada de carbono da edificação.

Abdelhakim, Kandar e Lim (2019) analisaram a performance energética geral e o impacto na iluminação interna de um edifício comercial localizado na Argélia. Células de silício amorfo com 4,5% de eficiência foram integradas nas janelas, ocupando 1,8 m^2 de área de fachada. O estudo usa uma abordagem híbrida, tanto com simulações computacionais realizadas por meio do *software EnergyPlus*,

quando por verificação do modelo com medições no local. A transparência que demonstrou um resultado mais satisfatório no quesito de iluminação foi a de 20%, que apesar de prover menos luz resultou em uma maior homogeneidade ao longo do cômodo. Em condições climáticas extremas, superando os 40 °C, a janela fotovoltaica instalada revelou ter reduzido a necessidade da utilização de ar-condicionado. A geração energética média mensal foi de 3,6 kWh/m² de janela, sendo o maior valor obtido em julho com 4,34 kWh/m².

Paydar (2020) estudou o impacto de elementos de sombreamento fotovoltaicos estáticos e móveis na geração de energia e na demanda energética interna. Ressalta-se a abordagem sazonal, de forma a descobrir o melhor ângulo de inclinação do elemento de sombreamento para cada mês ao invés do ano todo. A edificação analisada é residencial, localizada em Teerã (Irã) e com fachada analisada voltada para o sul. Os resultados mostraram que a modificação da inclinação do painel duas vezes ao ano, recomendado pelo próprio autor, resulta em uma geração de energia apenas 2% superior que nos casos estáticos. Contudo, com a utilização dos sistemas móveis foi registrada uma redução entre 12 e 20% da carga térmica para resfriamento e aquecimento da edificação. Quando somadas a redução no consumo com a geração energética, observa-se um excedente de energia na edificação, tornando-o um edifício *Zero Energy Balance* (ZEB).

Susan e Wardhani (2020) realizaram uma abordagem mais ampla, avaliando o potencial de diferentes utilizações de sistemas fotovoltaicos integrados a uma mesma edificação e seu impacto na carga térmica. Os locais onde houve integração das tecnologias fotovoltaicas foram: em painéis na cobertura e paredes opacas, com colocação de silício monocristalino com eficiência de 18,6%; e em janelas e em elementos de sombreamento, com silício amorfo e eficiência de 19%. A edificação em questão tem uso institucional, sendo sede da Universidade Ciputra Surabaya na Indonésia. Os resultados foram obtidos por meio de simulação computacional, utilizando o *software* Archipak 5.1 para mensurar a quantidade de radiação recebida pelos painéis instalados, que posteriormente foi multiplicada pela eficiência dos painéis para o cálculo da geração de energia. Com tal modelo, considerou-se que os painéis estariam constantemente em 25 °C e com 1000 W/m² de radiação solar, o que não é necessariamente verdade e pode ser considerada uma falha na metodologia por não considerar as variáveis climáticas locais como temperatura externa. Os resultados menos satisfatórios foram obtidos nas coberturas, enquanto os maiores valores foram obtidos nas integrações realizadas em fachadas voltadas para o norte com redução entre 5-7% do consumo de energia dos ambientes internos.

Como evidenciado por Anctil, Lee e Lunt (2020), os sistemas fotovoltaicos integrados a edificações influenciam a demanda energética final tanto pela geração de energia quanto pela redução da carga térmica, e consequentemente o consumo de sistemas artificiais de condicionamento de ar e de aquecimento. Foi detectada, porém, uma variação na metodologia: Moreno *et al.* (2019), Qiu, Yang e Sun (2019) e Susan e Wardhani (2020) focam no impacto da carga térmica; Abdelhakim, Kandar e Lim (2019) focam na geração energética; e Anctil, Lee e Lunt (2020) e Paydar (2020) abordam ambos os aspectos.

2.4.3.

Políticas nacionais para suporte de conservação de energia

O Grupo Técnico para Eficientização de Energia nas Edificações no País em conjunto com o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) foram órgãos-chave para a discussão, definição e criação do processo de obtenção da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE). A partir deste foram desenvolvidos os Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) e o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). O RTQ-C e o RTQ-R apresentam os requisitos necessários para a classificação do nível de eficiência energética de edificações e, posteriormente, a obtenção da etiqueta ENCE. Estes foram elaborados objetivando a criação de uma referência adequada ao clima brasileiro para promover eficiência energética em edificações das tipologias mencionadas (Silva e Ghisi, 2014).

A nota a ser obtida pela ENCE varia de melhor, a classe A, para a pior, a classe E. Atualmente, a versão em vigor dos Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos foi publicada em 2013 (BRASIL, 2013a), enquanto a relativa a edifícios residenciais data de 2012 (BRASIL, 2012). Há em discussão uma nova proposta para RTQ-C e do RTQ-R, a Instrução Normativa para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais e Comerciais, respectivamente INI-R e INI-C (BRASIL, 2018). Contudo, sua publicação ainda não foi oficializada, sendo a regulamentação em vigor para validação da eficiência energética de edificações e obtenção da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia o RTQ-C e o RTQ-R. A utilização de sistemas fotovoltaicos integrados a edificações para redução da demanda energética vai de acordo com ambos os regulamentos vigentes.

A Pesquisa de Posse de Eletrodomésticos e Hábitos de Consumo (PPH), uma pesquisa quantitativa realizada em campo em âmbito nacional cujo objetivo é apurar os tipos de equipamentos instalados e sua forma de utilização pelos consumidores, evidencia o alto consumo para equipamentos de condicionamento de ar: 40,3% de toda energia consumida por comércios (PROCEL, 2008) e 20,0% do consumo de residências (PROCEL, 2007). Como apresentado por Anctil, Lee e Lunt (2020), Moreno *et al.* (2019), Qiu, Yang e Sun (2019), Susan e Wardhani (2020), Abdelhakim, Kandar e Lim (2019) e Paydar (2020), observa-se uma considerável conservação de energia. Tendo em mente o contexto nacional, acredita-se que utilização de sistemas fotovoltaicos integrados a edificações tem um potencial promissor no mercado e impacto na redução do consumo de energia no país. As edificações comerciais, dado o elevado consumo dos equipamentos de condicionamento do ar e a coincidência do horário de maior consumo com a maior geração de energia solar fotovoltaica, podem ter um grande potencial de redução do consumo de energia do sistema.

2.5.

Legislações aplicáveis para energia solar e mercado brasileiro

No ano de 2019 o Brasil alcançou a marca de 83% da matriz energética originada de fontes renováveis (EPE, 2020) e entre o período de 2018 a 2019, a energia fotovoltaica foi a fonte energética com maior crescimento: +92,2% na

geração e +37,6% em capacidade instalada. O aumento é ainda mais visível na mini e microgeração distribuída, crescendo de 562,3MW de capacidade instalada para 1992,1MW, uma variação de +254% (EPE, 2020). Com isso, a energia fotovoltaica se consolida como a mais representativa das fontes renováveis na geração distribuída, com 86% da capacidade instalada e 63% da energia gerada (BRASIL, 2019).

Foi a Resolução Normativa nº 482 (ANEEL, 2012) que potencializou o crescimento da energia solar no Brasil. Esta norma tem como objetivo estabelecer o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição elétrica, assim como o sistema de compensação. Seu texto final atual possui adições e alterações trazidas por outras Resoluções Normativas. É considerada microgeração distribuída toda central geradora de energia elétrica com potência instalada igual ou menor a 75kW e que utilize fontes renováveis de energia, como a solar (ANEEL, 2015). A minigeração é caracterizada então por potência instalada superior a 75kW e menor ou igual a 5MW, novamente utilizando fontes renováveis de energia (ANEEL, 2017). Foi instaurado também o sistema de compensação, onde a energia ativa excedente injetada por uma unidade consumidora é cedida à distribuidora local e posteriormente compensada (ANEEL, 2015).

Um dos artigos da Resolução Normativa nº 482 (ANEEL, 2012) que indiretamente incentiva a utilização de BIPV é o chamado “empreendimento com múltiplas unidades consumidoras”, adicionado pela Resolução Normativa nº 687 (ANEEL, 2015). Na prática, tornou-se possível que a integração de tecnologias fotovoltaicas, por exemplo, ao longo de toda a fachada da edificação e se estendendo por várias unidades, seja dividida entre todos os proprietários. Um empreendimento com múltiplas unidades consumidoras é caracterizado:

“(…) pela utilização da energia elétrica de forma independente, no qual cada fração com uso individualizado constitua uma unidade consumidora e as instalações para atendimento das áreas de uso comum constituam uma unidade consumidora distinta, de responsabilidade do condomínio, da administração ou do proprietário do empreendimento, com microgeração ou minigeração distribuída, e desde que as unidades consumidoras estejam localizadas em uma mesma propriedade ou em propriedades contíguas, sendo vedada a utilização de vias públicas, de passagem aérea ou subterrânea e de propriedades de terceiros não integrantes do empreendimento.” (ANEEL, 2015).

Apesar das tecnologias mais pesquisadas serem as de silício amorfo (a-Si), seguido pelo telureto de cádmio (CdTe) e filmes fotovoltaicos orgânicos (OPV), é importante considerar a viabilidade de utilização de sistemas fotovoltaicos integrados a edificações no Brasil, considerando desde a disponibilidade do material no mercado até a facilidade de instalação. A tecnologia de silício amorfo não está presente no mercado nacional, diferentemente do mercado europeu. O mesmo vale para a tecnologia de telureto de cádmio (CdTe), além das incertezas relacionadas ao seu impacto ambiental (Tripathy, Sadhu e Panda, 2016). Filmes fotovoltaicos orgânicos, por outro lado, possuem um espaço consolidado no mercado brasileiro de tecnologias fotovoltaicas. Isso se dá, em grande parte, pela existência de empresas de fabricação com tecnologia nacional, o que aumenta sua disponibilidade e fornece mão de obra qualificada para sua utilização.

2.6. Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foi apresentado o conceito de sistemas fotovoltaicos integrados a edificações e sua terminologia internacional: *Building Integrated Photovoltaics*. Também foram mencionadas as formas de integração na envoltória das edificações e estudado como variáveis climáticas locais podem influenciar a quantidade de energia gerada. Observou-se que artigos que investigam a utilização de sistemas fotovoltaicos integrados a edificações em diferentes contextos climáticos apontam para uma clara influência no balanço energético, tanto pela redução do consumo energético pelos sistemas de ar-condicionado quanto pela geração de energia pelas tecnologias fotovoltaicas. Tais benefícios são relacionados diretamente com instrumentos regulatórios nacionais, como o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações (RTQ). Com o elevado consumo de ar-condicionado evidenciado pela Pesquisa de Posse de Eletrodomésticos e Hábitos de Consumo (PPH), a integração de sistemas fotovoltaicos pode se mostrar uma medida eficaz para alcançar uma maior eficiência energética nas edificações.

O próximo capítulo visa apresentar o objeto de estudo proposto, em que a tecnologia de filmes fotovoltaicos orgânicos será integrada em fachadas de edificações localizadas em diferentes cidades do país. Apesar de terem sido apresentadas as principais características do material, ainda é necessária a definição de propriedades físicas para realização do método proposto. O objetivo é mensuração da conservação da energia com acurácia e transparência, seguindo protocolos internacionais de medição da performance, de forma a avaliar em que cenários a integração de tal material é mais economicamente vantajosa.

3

Materiais e métodos

Este capítulo tem por objetivo definir as edificações, parâmetros e cidades a serem investigados. A partir da definição destes, opta-se pela utilização de simulações computacionais para obtenção dos dados desejados. São apresentados também os softwares mais comumente utilizados no mercado e proposto um novo método de simulação, tornando o processo mais rápido. Aprofunda-se as funcionalidades do programa computacional utilizado, sendo este o Rhinoceros em conjunto dos *plugins* Grasshopper, Honeybee, Ladybug e Galapagos.

Definiu-se a tecnologia filmes fotovoltaicos orgânicos como escopo deste trabalho, devido ao seu baixo peso comparado a materiais convencionais permite a integração em uma maior variedade de locais. Além disso, a disponibilidade dos filmes fotovoltaicos orgânicos em escala nacional e a mão-de-obra qualificada para a sua instalação e manutenção foram fatores-chave para a escolha deste material ao invés de outras tecnologias sugeridas na literatura internacional (silício amorfo ou telureto de cádmio, por exemplo). A simulação ora definida, estabelece que estes filmes orgânicos serão integrados em janelas das edificações, visto que tal elemento construtivo é responsável pela maior parte do ganho de calor da edificação, o que aumenta a demanda energética de resfriamento (Lou *et al.*, 2016).

3.1.

Escolha dos locais onde serão feitas as simulações

O desempenho térmico e energético de construções tem relação direta com as variantes climáticas locais como temperatura do ar, velocidade e direção do vento, umidade e radiação solar (Amorim, 2015). O conhecimento destas características e sua consideração no projeto são elementos favoráveis para o desempenho ambiental adequado, em especial em um território diverso climaticamente como o brasileiro (Amorim, 2015). Considerando estes fatores, a NBR 15220-3 (ABNT, 2005) separa o país em oito zonas bioclimáticas onde há relativa homogeneidade do clima com base em décadas de apuração de dados meteorológicos (Bagnati, 2013).

A divisão vigente (ABNT,2005) foi formulada a partir da adaptação da Carta Bioclimática sugerida por Givoni (1992). A pesquisa elaborada por este autor tem como característica a busca para relacionar o ser humano, o clima e a arquitetura, investigando as trocas de calores entre estes (Bagnati, 2013).

O zoneamento bioclimático brasileiro vigente é apresentado na Figura 3.1. Nele, percebe-se que a zona bioclimática 8 é a predominante no território nacional, ocupando 53,7% de sua extensão. Destaca-se que o zoneamento bioclimático tem relação direta com o clima e temperatura local, não tendo relação necessariamente com sua localização no país. Isso explica como é possível que, por exemplo, as cidades vizinhas de Rio de Janeiro e Niterói tenham classificações diferentes. A primeira é considerada a zona bioclimática 8, enquanto a segunda se localiza na 5.

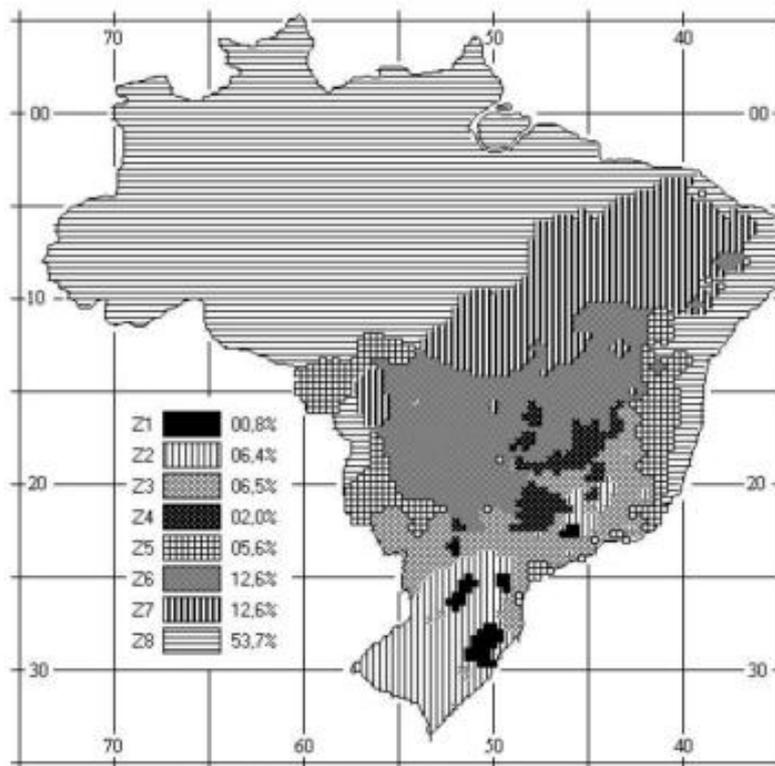


Figura 3.1 – Zoneamento bioclimático brasileiro vigente.

Fonte: ABNT, 2005.

Discussões acerca de um novo zoneamento bioclimático têm sido cada vez mais recorrentes. Roriz (2014) propõe um modelo no qual o país seria dividido em 24 grupos climáticos, onde a classificação de uma cidade dependeria da média anual da temperatura do ar, da diferença entre a maior e menor temperatura média mensal, da média anual da amplitude térmica e da diferença entre a maior e menor amplitude térmica mensal. Apesar das críticas ao zoneamento bioclimático proposto pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005), ainda não foram realizadas modificações na mesma. Opta-se, neste trabalho, então pela utilização da legislação vigente, com oito zonas bioclimáticas.

Como apresentado no capítulo 2, a latitude é um fator de grande influência na trajetória solar e consequentemente também na eficiência de sistemas fotovoltaicos. O Brasil é um país de dimensões continentais, com capitais localizadas entre 2°49’N em Boa Vista - RO, e 30°01’ S em Porto Alegre - RS, julgando-se necessária a divisão do considerando também sua localização.

Equilibrando o zoneamento bioclimático vigente e a amplitude de latitudes do país, se propõe um modelo de investigação que abranja tal diversidade, englobando todas as possíveis combinações de latitudes, agrupadas em intervalos 5°, e de zonas bioclimáticas. Nos casos em que há mais de uma cidade localizada em uma mesma zona bioclimática e intervalo de latitude, será selecionada somente uma destas, sendo adotados os seguintes critérios para a seleção:

- **1° critério – Eliminatório** – Existência de dados climáticos disponíveis para o público em geral, visto estes são cruciais para a realização das simulações. Foi dada a preferência a estações meteorológicas localizadas em aeroportos, visto que estas coletam dados climáticos mais precisos para garantir a segurança dos voos (INFRAERO, 2020).

- **2º critério – Desempate** – O critério considerado para desempate foi a população de acordo com o Censo Demográfico (IBGE, 2010), sendo escolhida a cidade mais populosa.

Considerando tais critérios, as cidades selecionadas para este trabalho estão apresentadas na Quadro 3.1. e na Figura 3.2.

Quadro 3.1 – Locais onde serão feitas as simulações.

Latitude	Zona bioclimática	Cidade
0°	ZB8	Fortaleza
5°	ZB7	Teresina
	ZB8	Natal
10°	ZB1	Palmas
	ZB8	Salvador
15°	ZB4	Brasília
	ZB6	Goiânia
	ZB7	Cuiabá
20°	ZB3	Belo Horizonte
	ZB6	Campo Grande
	ZB8	Rio de Janeiro
25°	ZB1	Curitiba
	ZB3	São Paulo
30°	ZB3	Porto Alegre

Fonte: Elaboração própria.

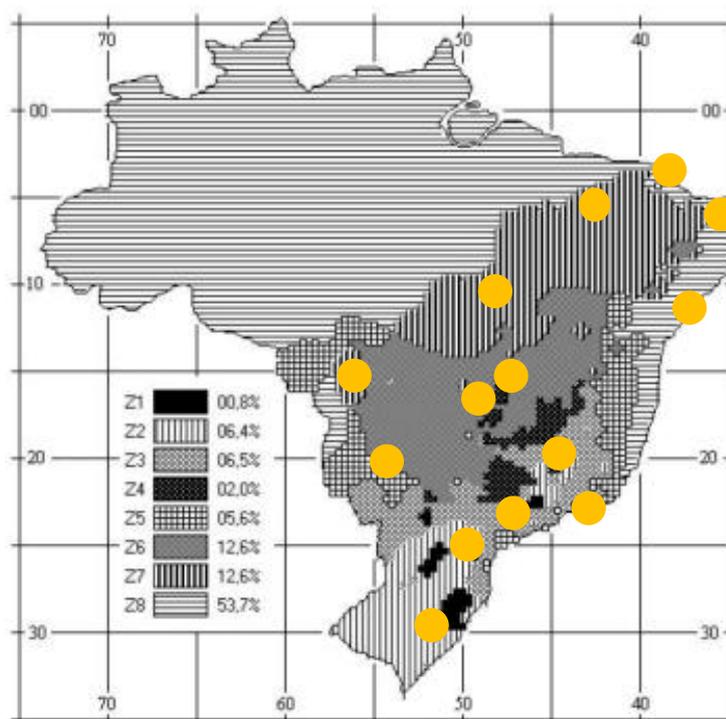


Figura 3.2 – Mapa das cidades selecionadas para a realização das simulações.

Fonte: Adaptado de *Wikimedia Commons*.

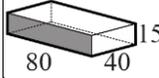
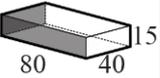
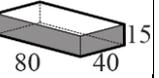
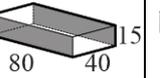
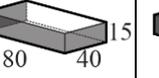
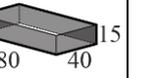
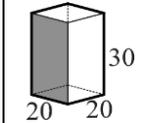
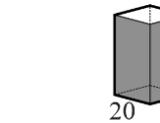
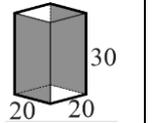
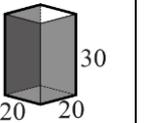
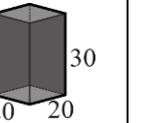
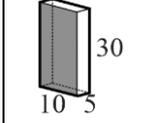
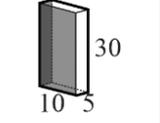
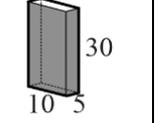
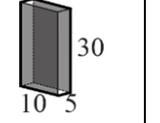
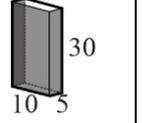
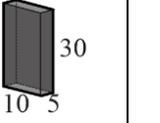
3.2.

Modelos e configurações de fachada considerados

A forma do edifício influencia diretamente seu desempenho e eficiência energética, visto que quanto maior a área de superfície do volume, maior será a transferência de calor entre os meios interno e externo (Lopes, 2010). Visando mensurar o potencial de redução da demanda energética considerando diferentes composições arquitetônicas, opta-se pela simulação de volumetrias distintas. Foram selecionadas três edificações para estudo, sendo estas extraídas do Manual de Aplicação do RTQ-C (PROCEL, 2016). Suas respectivas dimensões (largura x profundidade x altura) são: a edificação 01 (E1), com 80 m x 40 m x 15 m; a edificação 02 (E2), com 20 m x 20 m x 30 m; e a edificação 03 (E3), com 10 m x 5 m x 30 m. Escolheram-se edifícios comerciais, pois nestes há a maior probabilidade de instalação de filmes orgânicos na fachada.

Devido às limitações de tempo, apenas na cidade do Rio de Janeiro foi realizada uma análise mais detalhada, em que para cada uma das três edificações foram investigadas seis configurações de fachada, estas expostas na Figura 3.3. Os *layouts* propostos para envoltória visam trazer uma percepção de como a escolha das fachadas para integração de sistemas fotovoltaicos em edificações pode ser mais benéfica, investigando então cenários onde as células estão dispostas em: uma fachada, sendo escolhida a de maior comprimento da edificação (1F); duas fachadas adjacentes, priorizando a incidência do sol da manhã ($2F_{MA}$); duas fachadas adjacentes, priorizando a incidência do sol da tarde ($2F_{TA}$); duas fachadas paralelas; ($2F_P$); três fachadas adjacentes (3F); e quatro fachadas (4F). Visto que a edificação 02 possui base quadrada, as soluções arquitetônicas ($2F_{MA}$ e $2F_{TA}$) são iguais. A partir da identificação da melhor opção, esta será aplicada em todas as três edificações nas demais cidades do Brasil, apresentadas no Quadro 3.2.

Figura 3.3 – Três volumetrias simuladas e suas variações na fachada.

	1F	$2F_{MA}$	$2F_{TA}$	$2F_P$	3F	4F
E 1						
E 2						
E 3						

Fonte: Elaboração própria.

3.3.

Estimativa da demanda energética evitada

As subseções seguintes dão sequência a definição do problema iniciada pela seleção das cidades e modelos a serem considerados apresentados nos itens 3.1. e

3.2, respectivamente. Primeiramente serão apresentados os conceitos que embasaram como e quais parâmetros de performance da edificação serão mensurados. Posteriormente, serão definidas quais variáveis na forma das edificações que afetam o desempenho energético serão consideradas.

3.3.1. Mensuração dos parâmetros

A utilização de equipamentos para controle de temperatura de edificações de forma a manter o interior da mesma confortável termicamente é frequente. Estipula-se neste trabalho a contabilização da demanda energética do sistema de HVAC (*Heating, Ventilation, Air Conditioning*), sendo este um equipamento que permite aquecer ou refrigerar os ambientes. Com relação ao uso do HVAC, segue-se a recomendação da NBR 15220-3 (ABNT, 2005), que estipula a possível utilização de ar-condicionado em todas as regiões do país. Porém, como a utilização de sistemas de aquecimento é mais restrita, tais equipamentos são considerados somente para as zonas bioclimáticas 1 e 2. Com base nas cidades escolhidas na seção 3.1, foi determinada utilização de aquecimento exclusivamente nas cidades de Palmas e Curitiba, ambas na zona bioclimática 1.

De forma a mensurar de maneira mais precisa os benefícios trazidos pelos sistemas fotovoltaicos integrados a edificações com relação a demanda energética final, se propõe a aplicação do Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (PIMVP) (EVO, 2012). O objetivo de tal protocolo é apresentar conceitos e opções para a determinação de economias de energia após a implementação de medidas de eficiência, podendo ser aplicado em medições de parâmetros isolados, de toda a instalação ou em simulações. O PIMVP se baseia na definição de uma linha de base, na versão em inglês chamada de *baseline*, e em algumas versões em português também chamado de “condição de referência”, que seria o consumo de energia antes da instalação das medidas de eficiência energética. Para casos de novas construções, o PIMVP estipula que:

“(...) as informações do período da linha de base são hipotéticas e normalmente baseadas em normas, regulamentos, prática usual ou desempenho documentado, ou em instalações similares. Em qualquer condição, o modelo para o período da linha de base deve ser capaz de representar as mudanças nas condições e nos parâmetros operacionais, de forma que os “ajustes” possam ser efetuados” (EVO, 2012).

As medidas de medição da eficiência energética devem ser demonstradas de uma maneira efetiva e transparente (ABNT, 2018), objetivo atingido pelo PIMVP pela comparação de dois valores. O primeiro é o consumo de energia após as medidas de eficiência terem disso concluídas (CE_{APOS}). O segundo é a linha de base ajustada, que mede o quanto a edificação teria consumido caso não tivessem sido realizadas as ações de eficiência energética (EVO, 2012). O ajuste da linha de base é crucial visto que realiza ajustes para prever o consumo de energia com base em variáveis independentes (Aju) que tem impacto no padrão energético da edificação, ao invés de assumir o mesmo consumo prévio (E_{PREV}) (EVO, 2012). A diferença entre a linha de base e a linha de base ajustada fica evidente na Figura 3.4., destacando a importância da consideração das variáveis independentes.

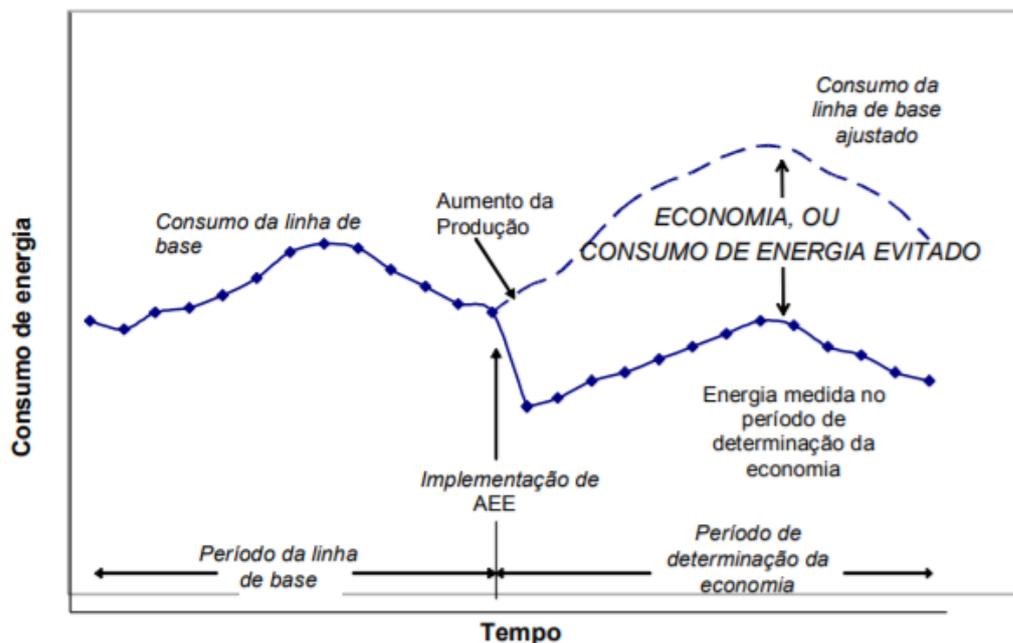


Figura 3.4 – Principais conceitos relacionados à linha de base, como economia, ajuste da linha de base e energia medida no período de determinação da economia.

Fonte: Adaptado de EVO, 2012.

A equação que o PIMVP estabelece para representar a economia energética (EE) é apresentada na equação 1.

$$EE = (E_{PREV} - CE_{APOS}) \pm Aju \quad (1)$$

Onde:

EE = redução na demanda energética final;

E_{PREV} = consumo energético antes das ações de eficiência energética;

CE_{APOS} = demanda energética após a conclusão das ações de eficiência energética;

Aju = ajustes causados pelas variáveis independentes.

Para as simulações a serem realizadas, todas as configurações do edifício que poderiam impactar o desempenho energético, como rotina de uso, tamanho das aberturas e orientação, foram mantidas as mesmas para a linha de base e o edifício com filmes fotovoltaicos orgânicos integrados à janela. A simulação de edifícios permite a exposição de ambos os cenários a um ano meteorológico típico (do acrônimo em língua inglesa TMY, *typical meteorological year*) da localização desejada, ou seja, que as mesmas condições climáticas são aplicadas às construções. Visto que a única diferença entre a linha de base e o edifício com sistemas fotovoltaicos integrados é o material usado nas janelas, nenhum ajuste por parte das variáveis independentes é necessário. Esses ajustes devem ser realizados apenas em casos que alguma variável que poderia impactar o desempenho energético for aplicável, o que não é o caso na simulação constante neste trabalho.

Dois parâmetros do desempenho do edifício serão medidos, sendo o primeiro a redução da demanda energética (R_{DE}) em porcentagem. Para a obtenção de tal

valor, três simulações são necessárias. A primeira, e a única realizada em relação à linha de base, é o seu consumo de energia (E_{CONLB}). A segunda é a demanda de energia de edifícios com sistemas fotovoltaicos integrados ($E_{CONSFVI}$), enquanto a terceira é a energia gerada por tais elementos (E_{GESFVI}). A equação 2 mostra que subtraindo a energia gerada da consumida pelos edifícios com sistemas fotovoltaicos integrados, o consumo de energia deste pode ser medido e comparado com o cenário sem materiais fotovoltaicos. O objetivo é maximizar essa diferença, tornando mais vantajoso o uso de células fotovoltaicas orgânicas integradas em janelas.

$$R_{DE} (\%/ano) = 1 - \{ [(E_{CONSFVI} - E_{GESFVI}) * 100] / E_{CONLB} \} \quad (2)$$

Onde:

R_{DE} = redução da demanda energética, em percentagem ao ano;

E_{CONLB} = consumo energético da linha de base, em kWh;

$E_{CONSFVI}$ = consumo energético da edificação com sistemas fotovoltaicos integrados, em kWh;

E_{GESFVI} = energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos integrados, em kWh.

Embora a redução da demanda energética em porcentagem possa fornecer uma visão melhor ao comparar diferentes edifícios, um segundo parâmetro é crucial para compreender os benefícios da integração de sistemas fotovoltaicos: a redução de energia líquida por metro quadrado de células fotovoltaicas orgânicas ($R_{DEM2OPV}$) é mais adequada para a comparação de diferentes *layouts* de fachada de uma mesma edificação. Pode-se considerar a melhor configuração de fachada aquela que apresenta a maior redução de demanda energética líquida por metro quadrado de células fotovoltaicas, uma vez que teria uma redução mais significativa usando a mesma quantidade do material. Tal parâmetro pode ser calculado pela Equação 3, onde todos os valores são *plotados* em kWh e têm relação direta com a área da fachada (A_{FAC}) e a relação percentagem de janelas da envoltória (WWR).

$$R_{DEM2OPV} (\text{kWh}/\text{m}^2\text{OPV}/\text{ano}) = [E_{CONLB} - (E_{CONSFVI} - E_{GESFVI})] / (A_{FAC} * WWR) \quad (3)$$

Onde:

$R_{DEM2OPV}$ = redução da demanda energética em kWh por m² de células fotovoltaicas orgânicas por ano;

E_{CONLB} = consumo de energia da linha de base, em kWh;

$E_{CONSFVI}$ = consumo energético da edificação com sistemas fotovoltaicos integrados, em kWh;

E_{GESFVI} = energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos integrados, em kWh;

A_{FAC} = área de fachadas, considerando tanto as janelas quanto as paredes, em metros quadrados;

WWR = percentagem de janelas da envoltória.

3.3.2.

Variáveis definidas para a simulação

Foram consideradas duas variáveis que impactam consideravelmente o desempenho da edificação e podem ser definidas em estágios iniciais de projeto (Alibaba, 2016). Visto que a irradiação tem uma influência direta na geração e

consumo de energia (Amorim, 2015), a primeira variável considerada é a orientação da edificação, também chamado de azimute. Este varia entre 0° e 360°, onde ambos representam uma fachada voltada para o norte. Visto que a orientação é medida no sentido horário, uma orientação de 90° representa uma fachada para o leste e 270° para o oeste. Para reduzir o tempo necessário para as simulações, considerou-se que os edifícios rodariam numa frequência em cujo ângulos eram acrescidos de 5°, até que fosse dada uma volta completa da edificação com relação ao seu próprio eixo.

A segunda variável é a percentagem de janelas na fachada, visto que janelas são responsáveis pela maior parte dos ganhos e das perdas térmicas da edificação e tem então um papel crucial no seu desempenho (Alibaba, 2016). Destaca-se que tal valor é relativo à área de vidro, não as aberturas de ventilação. O valor mínimo para percentagem de janelas foi estabelecido em 50%, seguindo as recomendações para simulações estipuladas pela Portaria n° 248 de 10 de julho de 2018 (INMETRO, 2018). O valor máximo foi de 95%, visto que é incomum que os softwares de simulação aceitem 100% como dado de entrada. Geralmente a redução de 5% com relação ao valor máximo é estabelecida para contabilizar outros elementos construtivos que não são o vidro, como caixilhos. Os valores para a percentagem de janelas seguem intervalos de 1% a serem variados durante o processo iterativo de simulação.

A definição das geometrias do edifício e dos parâmetros a serem medidos é uma etapa crucial para decidir quais ferramentas usar. Considerando a variedade de *layouts* de fachadas e tamanhos de edifícios, a simulação energética de edifícios foi o método escolhido por ter se tornado uma ferramenta bastante conhecida para auxiliar na tomada de decisões relacionadas ao projeto e operação da construção (Clarke e Hensen, 2015), sendo possível a utilização de diversos programas de computador reconhecidos pelo mercado.

3.4. Principais métodos e softwares existentes para simulação

O método de simulação pode facilitar a investigação da inter-relação entre fatores como forma, materialidade, sistemas energéticos, variáveis climáticas e comportamento do usuário na performance da construção (Loonen, Klijn-Chevalerias e Hensen, 2019). Aplicações frequentes de simulações são relacionadas ao aumento da qualidade ambiental interna, seja ela térmica, visual, acústica ou do ar, e simultaneamente minimizar os gastos de recursos como energia ou emissões de CO₂ (Loonen, Klijn-Chevalerias e Hensen, 2019). O setor de simulação da demanda energética de edificações possui alguns softwares conceituados, como o WINDOW, RETScreen *International* e principalmente o EnergyPlus.

O WINDOW foi desenvolvido pela Universidade de Berkeley (LBNL, 2019), sendo um programa de computador para o cálculo das propriedades térmicas e ópticas de vidros e janelas, da temperatura superficial dos mesmos e seus impactos no desempenho energético de edificações residenciais em casas e comércios dos Estados Unidos. Um diferencial é a possibilidade de adição de elementos de sombreamento, como venezianas e persianas internas e externas.

O RETScreen *International* é um *software* voltado para a conscientização de energia limpa, além de oferecer o suporte à tomada de decisão por meio da análise da edificação (CANADÁ, 2005). A ferramenta principal é a padronização e integração de projetos de energia renovável (*renewable energy technologies* – RET) que podem ser usados em escala internacional por meio de uma base de dados

climáticos própria, possibilitando a investigação são só sob a ótica da geração de energia como também relacionada à análise do ciclo de vida e emissões de gases do efeito estufa. Sua análise é composta em cinco passos: (i) a definição de um modelo energético; (ii) a apresentação do custo; (iii) a estimativa de emissão dos gases poluentes; (iv) o resumo financeiro; e (v) a análise de riscos. Em paralelo do modelo de geração de energia, há também um modelo para cálculo das cargas térmicas de aquecimento e resfriamento para auxiliar a mensuração da energia demandada pela edificação.

O EnergyPlus (U.S. Department of Energy, 2020) é um *software* para simulação energética consolidado no mercado, que permite a modelagem do consumo de sistemas de aquecimento, resfriamento, ventilação, iluminação e outros equipamentos (Hariyadi, Fukuda e Ma, 2017). Algumas das principais possibilidades trazidas pelo *software* é o cálculo da transferência de calor, da temperatura das superfícies e do conforto térmico. É possível investigação da iluminação, englobando também o conforto lumínico dos ambientes, e a customização de janelas e dos materiais da envoltória para se aproximar ao máximo da construção real da edificação. As análises climáticas são realizadas por arquivos *EnergyPlus Weather File* (.epw), que são plotagens horárias de informações sobre o clima local, estando disponíveis arquivos relativos a diversas cidades espalhadas pelo mundo.

Investigando softwares voltados exclusivamente para a simulação de geração de energia por sistemas fotovoltaicos, o PVSyst auxilia no *design* da configuração do sistema e permite o cálculo da energia gerada com base no seu tamanho e localização geográfica (Kumar et al., 2020). O programa computacional também permite a configuração dos elementos do sistema como orientação e inclinação e eficiência das células e dos inversores (Belmahdi e Bouardi, 2020).

O método convencional para medição da redução da demanda energética final exige a utilização de três programas computacionais: um para dimensionar a geração energética pelos sistemas fotovoltaicos, outro para simulação do consumo de energia e um último para realização dos cálculos para comparar a linha de base da edificação com integração de sistemas fotovoltaicos em sua envoltória. Dentre estes softwares, os dois primeiros requerem que a geometria seja redesenhada e que todas as combinações das variáveis sejam manualmente simuladas tanto para a linha de base quanto para o cenário com fachadas fotovoltaicas. Apesar de ser um método com precisão, dois empecilhos são relevantes: o primeiro é a alta demanda de tempo, visto que o mesmo dado é inserido pelo usuário três vezes⁶ em diferentes interfaces; e o segundo é a necessidade de redesenho das geometrias em cada uma das plataformas utilizadas, o que aumenta a chance de erro.

O método proposto visa a criação de uma interface única para as simulações por meio do *software* de modelagem Rhinoceros em um único ambiente de trabalho (Kabosova, 2020). A principal diferença deste programa computacional é a possibilidade de instalação *plugins* que analisam uma mesma geometria sob diferentes óticas. Propõe-se a utilização do *plugin* Honeybee para as simulações de demanda energética, enquanto o *plugin* Ladybug será responsável pela estimativa de geração de energia dos sistemas fotovoltaicos. O *plugin* Grasshopper permite a inclusão de fórmulas matemáticas, centralizando todas as três funções dos softwares em uma só plataforma. Assim, é possível a inserção de variáveis apenas uma vez e

⁶ Além do cálculo da geração de energia por parte da edificação com integração de sistemas fotovoltaicos, seria necessário o cálculo da sua demanda energética e da linha de base, totalizando três simulações.

que os *plugins* automaticamente calculem todos os valores desejados em questão de segundos.

Outro *plugin* utilizado é o Galapagos, cuja função é a otimização. Usando princípios de algoritmos genéticos, este analisa as combinações entre as variáveis com o objetivo de maximizar o parâmetro selecionado pelo usuário. Como resultado, cada cenário proposto neste trabalho necessitou de aproximadamente 600 simulações para o encontro dos melhores valores, um valor consideravelmente mais baixo que as 9720 requeridas pelo método convencional⁷.

É importante destacar que o sistema de otimização proposto pelo Galapagos é automático, não sendo necessário que o usuário utilize nenhum outro comando enquanto a otimização ocorre. O método proposto integra *design* paramétrico com ferramentas de simulação, buscando os resultados mais adequados sob a ótica da performance. Demonstra ser um método mais rápido, demandando menos simulações para o encontro dos valores desejados. É também uma maneira mais precisa para obtenção de resultados, visto que a mesma geometria é considerada para todos os cálculos, garantindo a comparação entre edificações exatamente iguais salvo os materiais empregados. A visão geral do método proposto é apresentada na Figura. 3.5.

⁷ São 72 possibilidades de orientação e 45 de porcentagem de janelas, totalizando 3240 possibilidades. Visto que tais dados são inseridos em três programas computacionais no método convencional, seriam necessárias então 9720 simulações.

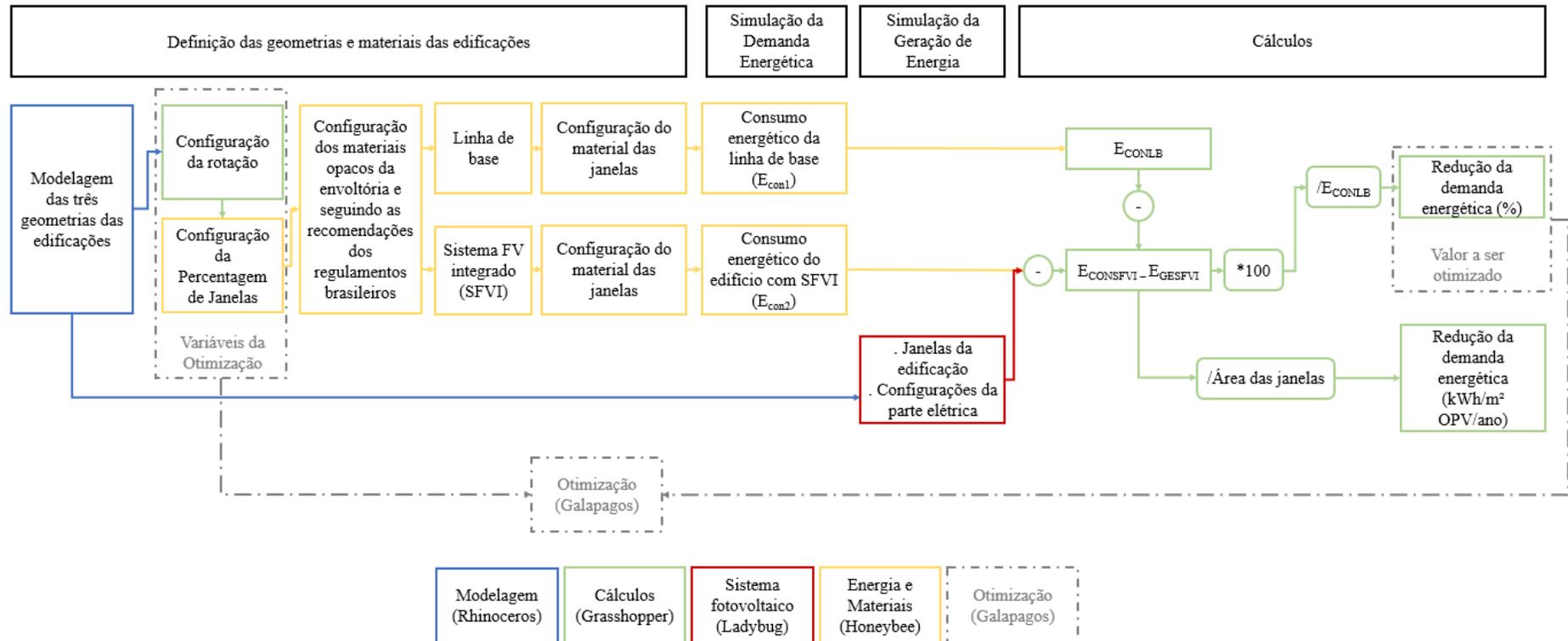


Figura 3.5 – Visão geral do método proposto.

Fonte: Elaboração própria.

3.5. Apresentação e validação do método proposto

3.5.1. Rhinceros e Grasshopper

O Rhinceros é um *software* de modelagem em três dimensões, unindo uma interface simples para criação de geometrias complexas com precisão (Nemer e Klein, 2018). Sua base é o NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*), que diferentemente do CAD (*Computer Aided Design*) permite maior fluidez às formas (Nemer e Klein, 2018). O Rhinceros pode criar, editar, documentar, renderizar e animar geometrias sem limites de complexidade, salvo os do *hardware* do usuário (McNeel, 2020). Neste trabalho, é utilizado para a modelagem das três edificações propostas na seção 3.3.

O Grasshopper é um *plugin* para o Rhinceros com linguagem de programação visual e interação direta com a geometria 3D desenhada (Sulpizio *et al.*, 2020). Diferentemente das demais linguagens de programação, o Grasshopper não requer conhecimentos sobre montagem de *script*, permitindo a criação de algoritmos sem escrever códigos (McNeel, 2020). Em paralelo com outros *plugins*, é frequentemente utilizado para concepções de projetos por arquitetos em estágios iniciais, realizando diversas análises relacionadas ao meio ambiente e sua influência em edificações onde múltiplos aspectos são considerados (Kabosova, 2020). Por aceitar a inserção de fórmulas, o Grasshopper é responsável pelo cálculo dos parâmetros mencionados na seção 3.4. e é a interface na qual o Ladybug Tools é instalado.

3.5.2. Ladybug Tools

O Ladybug Tools é uma coleção de quatro *plugins* para *design* considerando as variáveis climáticas: Ladybug, Honeybee, Butterfly e Dragonfly. Estes não só usam o código base de vários softwares reconhecidos no mercado, como também tem sido amplamente utilizado por escritórios de arquitetura e universidades, como TransSolar KlimaEngineering, Foster+Partners e Harvard (LadybugTools, 2020a). Neste trabalho, apenas o Ladybug e o Honeybee foram utilizados.

O Ladybug é um *plugin* para o Grasshopper capaz de realizar simulações que compartilha o código de vários softwares validados no mercado, sendo o mais popular o EnergyPlus (Freitas *et al.*, 2020). Com este *plugin* é possível a análise das geometrias desenhadas no Rhinceros levando em consideração o clima local por meio de arquivos climáticos em formato EnergyPlus Weather File (.epw) (Freitas *et al.*, 2020). A partir da leitura de tais arquivos, são gerados uma série de gráficos 2D e 3D que auxiliam a tomada de decisão durante o projeto, inclusive em estágios iniciais (LadybugTools, 2020b). Possibilidades de utilização deste *plugin* são a mensuração do nível de irradiação solar no nível do pedestre (Moscarelli e Cardoso, 2020; Zielonko-Jung e Janiak, 2019), cálculo de iluminância em ambientes internos (Hariyadi, Fukuda e Ma, 2017; Gao, 2019) e mensuração da geração de energia fotovoltaica gerada (Hariyadi, Fukuda e Ma, 2017; Freitas *et al.*, 2020). Todas as funções que o Ladybug pode realizar são apresentadas na Figura 3.6.

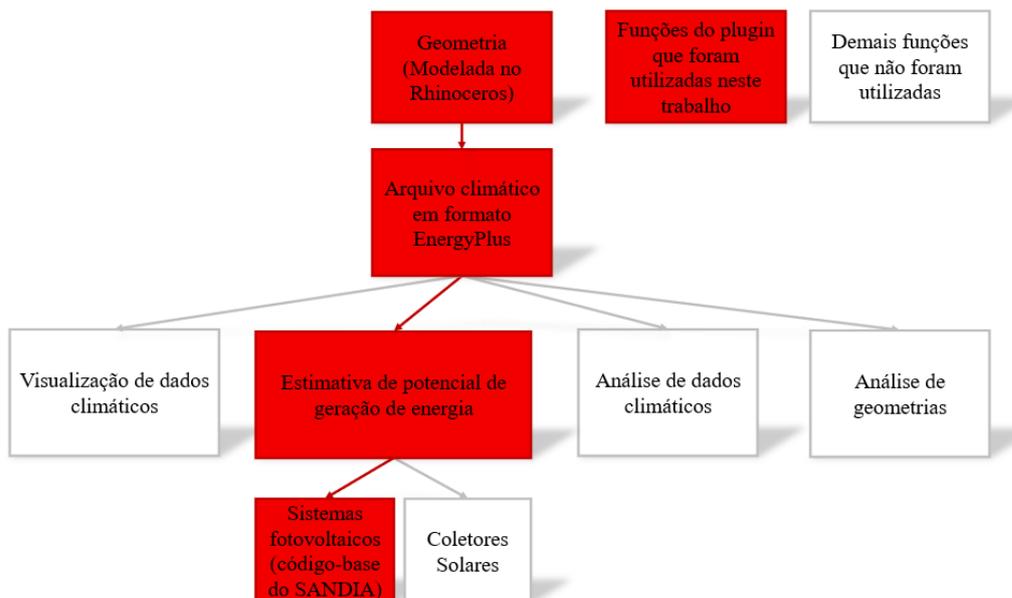


Figura 3.6 – Detalhamento de funções do Ladybug.

Fonte: Elaboração própria.

Neste trabalho, o Ladybug foi utilizado para a visualização dos dados climáticos relativos à irradiação e a mensuração do potencial de geração de energia fotovoltaica. A estimativa deste último é realizada com base no modelo energético SANDIA (SANDIA, 2004), que parte do princípio de que dados relativos à irradiação e as propriedades dos módulos estão disponíveis. Investigando o código-base do programa, o primeiro e mais importante passo é a determinação precisa da corrente de curto-circuito em toda a instalação (I_{sc}), que segue a Equação 4 (SANDIA, 2004). O processo de cálculo automático, podendo ser selecionado como período de análise um determinado dia, mês ou até mesmo um ano inteiro, sendo necessária a apresentação de um arquivo com dados climáticos de um ano meteorológico típico (TMY). Quatro fatores têm influência direta na geração de energia final: a irradiância (I_r), o espectro solar, o ângulo de luz solar de incidência e a temperatura do módulo (T_c).

$$I_{sc} = I_{sc} / \{I_r \cdot [1 + a \cdot I_{sc} \cdot (T_c - T_r)]\} \quad (4)$$

Onde:

I_{sc} = corrente de curto-circuito do sistema;

I_{sc} = corrente de curto-circuito dos módulos (A);

I_r = irradiância;

aT = coeficiente de temperatura;

T_i = temperatura dentro das células fotovoltaicas, em °C;

T_r = temperatura de referência da célula, geralmente 25 °C;

O Honeybee se difere do Ladybug pela possibilidade de análises mais complexas (Roudsari e Pak, 2013). Além da conexão com o Grasshopper, o *plugin* compartilha seu código com quatro softwares de simulação consolidados no mercado: Radiance, Daysim, OpenStudio e, principalmente, EnergyPlus (Hariyadi, Fukuda e Ma, 2017). Assim, é possível a avaliação de consumo energético pela

edificação, conforto térmico e iluminação (Roudsari e Pak, 2013). Suas aplicações variam desde estudos relacionados à iluminação (Soflaei *et al.*, 2020) até o superaquecimento de edificações considerando as mudanças climáticas (Tian e Hrynyszyn, 2020). Todas as funções desenvolvidas pelo Honeybee são especificadas na Figura 3.7, onde aquelas em amarelo são as que foram utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.

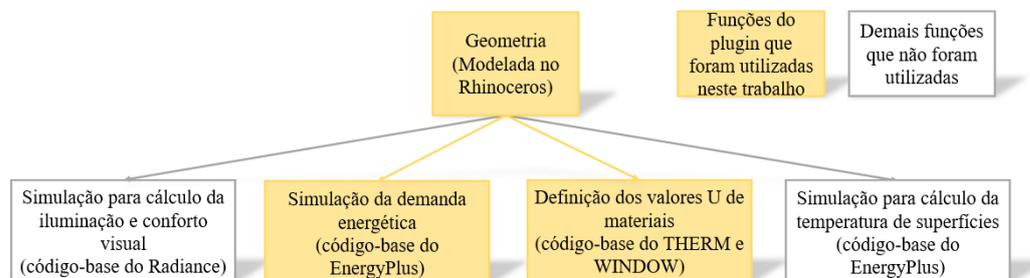


Figura 3.7 – Detalhamento de funções do Honeybee.
Fonte: Elaboração própria.

Para simulações de demanda energética, o Honeybee usa o código-base do EnergyPlus, seguindo os valores estabelecidos na Equação 5 que é validada pela ASHRAE. O primeiro índice, i , é relativo à superfície a ser calculada, enquanto o segundo representa a hora.

$$Q_{sysj} = \sum_{i=1}^{12} A_i \cdot H_{ci} \cdot (T_{sii,j} - T_{aj}) + Q_{ce} + Q_{iv} \quad (5)$$

Onde:

Q_{sysj} = demanda energética para resfriamento, para a hora j ;

A_i = condutividade;

H_{ci} = coeficiente de transmissão de calor;

$T_{sii,j}$ = temperatura da face externa;

T_{aj} = temperatura da zona;

Q_{ce} = fração convectiva das cargas internas;

Q_{iv} = calor sensível devido a infiltração e ventilação.

3.5.3. Galapagos

O Galapagos é um *plugin* para o Grasshopper que usa algoritmos genéticos para otimizar um único parâmetro definido pelo usuário, também conhecido como otimização de monocritério (Ilbeigi, Ghomeishi e Dehghanbanadaki, 2020). O uso do Galapagos combinado com *plugins* relacionados à simulação de edifícios pode garantir um alto desempenho, simultaneamente reduzindo o tempo necessário para obter tais valores e a probabilidade de erros (González e Fiorito, 2015). É possível atribuir ao Galapagos uma tarefa, como maximizar ou minimizar um parâmetro de acordo com as variáveis dadas, e obter facilmente as soluções para aquele caso específico, tornando o processo de tomada de decisão ainda mais consciente (González e Fiorito, 2015).

O Galapagos é baseado em conceitos evolutivos como mutação, seleção e herança, e em topografia de aptidão (*fitness landscape*). A topografia de aptidão pode ser definida como uma forma tridimensional onde os vales representam dados de baixa qualidade e os picos representam as melhores soluções (Rutten, 2013). O objetivo do Galapagos é traçar pontos nesta paisagem, sendo cada conjunto chamado de geração. Depois que a primeira geração é plotada na topografia de aptidão, os pontos cujos resultados são considerados inadequados não são repetidos na próxima geração. Por outro lado, os melhores resultados são escolhidos e explorados na geração seguinte. Esta lógica continua para cada geração até a última, na qual o usuário deverá ser capaz de encontrar o pico da topografia de aptidão e consequente os melhores valores, exigindo menos simulações do que se todos os pontos do terreno fossem analisados, conforme exemplificado na Figura 3.8.

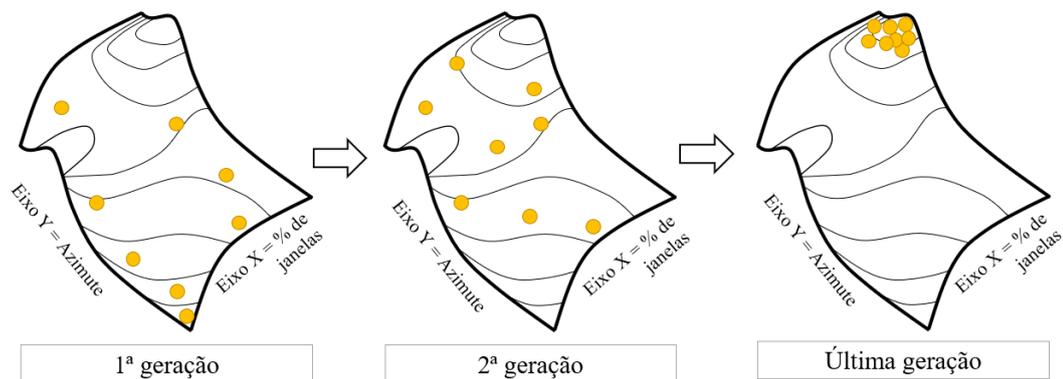


Figura 3.8 – Conceito da evolução para o encontro da melhor solução na topografia de aptidão, como realizado pelo Galapagos.

Fonte: Elaboração própria.

O conceito de topografia de aptidão, quando aplicado ao método proposto, resultaria em várias tentativas de encontrar melhores valores de azimute e porcentagem de janelas por geração, sendo que as melhores soluções são repetidas na próxima geração. O *plugin* então reinicia o processo para cada geração tentando compreender como as variáveis afetam o desempenho do edifício. A exemplificação de como esta evolução é realizada é apresentada na Figura 3.9.

1ª geração		2ª geração		...		Penúltima geração		Última geração	
	Linha de base = 100% ESFI = 98.9%		Linha de base = 100% ESFI = 96.8%		Linha de base = 100% ESFI = 95.9%		Linha de base = 100% ESFI = 94.5%		Linha de base = 100% ESFI = 94.5%
	Linha de base = 100% ESFI = 97.2%		Linha de base = 100% ESFI = 95.9%		Linha de base = 100% ESFI = 94.5%		Linha de base = 100% ESFI = 94.5%		Linha de base = 100% ESFI = 96.7%
	Linha de base = 100% ESFI = 96.8%		Linha de base = 100% ESFI = 96.6%		Linha de base = 100% ESFI = 95.7%		Linha de base = 100% ESFI = 95.7%		Linha de base = 100% ESFI = 93.2%

ESFI = Edificação com Sistemas Fotovoltaicos Integrados.

Figura 3.9 – Exemplo de como a melhor opção das variáveis é encontrada, considerando o método proposto.

Fonte: Elaboração própria.

3.6.

Demais dados de entrada necessários

Esta sessão tem como objetivo aprofundar nos principais dados de entrada necessários para a simulação. Primeiramente, serão abordadas as propriedades adotadas para os materiais translúcidos e opacos da envoltória. Em seguida são apresentados os arquivos climáticos utilizados para representar cada uma das cidades analisadas neste trabalho. Por fim, são apresentadas as configurações dos sistemas fotovoltaicos, do sistema de condicionamento de ar e da rotina de uso da edificação. Destaca-se que a configuração precisa de todas estas etapas é crucial para a garantia da precisão das simulações de geração e consumo de energia.

3.6.1.

Definição dos parâmetros dos materiais das edificações simuladas

O primeiro passo foi a modelagem de cada uma das três geometrias das edificações, o que foi feito usando o Rhinoceros. O Grasshopper permite a rotação das geometrias do Rhinoceros, criando assim a variável do azimute. Posteriormente, cada material para a envoltória do edifício, tanto para a linha de base como para o edifício com fotovoltaicos integrados em janelas, necessita ter as suas propriedades definidas para a realização das simulações. A materialidade estabelecida para linha de base foi a de vidro de 2mm (Aguilar-Santana *et al.*, 2019) em todas as janelas e, embora o Honeybee tenha uma biblioteca de materiais EnergyPlus pré-configurados, não foi encontrado um material semelhante aos disponíveis no mercado brasileiro. Portanto, foi necessária a criação de um material personalizado que simulasse a realidade das edificações brasileiras, cujas propriedades são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades necessárias para as configurações do vidro nas simulações.

Propriedade	Vidro convencional
Espessura (m)	0,002 (Aguilar-Santana <i>et al.</i> , 2019)
Transmitância Solar	0,830 (Santos <i>et al.</i> , 2018)
Refletância Solar	0,090 (Santos <i>et al.</i> , 2018)
Transmitância de Luz Visível	0,870 (Santos <i>et al.</i> , 2018)
Refletância de Luz Visível	0,090 (Santos <i>et al.</i> , 2018)
Emissividade Frontal	0,900-0,950 (Souza, 2010)
Emissividade Traseira	0,900-0,950 (Souza, 2010)
Condutividade Térmica	1,000 W/mK (BRASIL, 2013b)

Fonte: Especificados na tabela.

Para a criação de um material que representasse os filmes fotovoltaicos orgânicos, foi necessária a criação de uma janela com duas camadas: a interna de vidro e a externa com as células fotovoltaicas. Uma das limitações do Honeybee quando é criado um material de janela com múltiplas camadas é a exigência de um espaço de ar entre os painéis, que foi definido para ser o mais fino possível (0,1 mm). Todas as propriedades da janela criada para representar a integração dos sistemas fotovoltaicos estão apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Propriedades da camada composta por filmes fotovoltaicos orgânicos e da camada de vidro da janela.

Propriedade	Filmes fotovoltaicos orgânicos		Vidro Convencional
Espessura (m)	0,0004 (SUNEW, 2020c)		0,002 (Aguilar-Santana <i>et al.</i> , 2019)
Transmitância Solar	0,283 (Moreno <i>et al.</i> , 2019)	C	0,830 (Santos <i>et al.</i> , 2018)
Refletância Solar	0,396 (Moreno <i>et al.</i> , 2019)	M	0,090 (Santos <i>et al.</i> , 2018)
Transmitância de Luz Visível	0,284 (Moreno <i>et al.</i> , 2019)	D	0,870 (Santos <i>et al.</i> , 2018)
Refletância de Luz Visível	0,401 (Moreno <i>et al.</i> , 2019)	A	0,090 (Santos <i>et al.</i> , 2018)
Emissividade Frontal	0,774 (Moreno <i>et al.</i> , 2019)	E	0,900-0,950 (Souza, 2010)
Emissividade Traseira	0,774 (Moreno <i>et al.</i> , 2019)	A	0,900-0,950 (Souza, 2010)
Conductividade Térmica	0,240 W/mK (Moreno <i>et al.</i> , 2019)	R	1,000 W/mK (BRASIL, 2013b)

Fonte: Especificados na tabela.

Os materiais utilizados nas alvenarias externas, na cobertura e nas lajes são os mesmos tanto para a linha de base quanto para a edificação com integração de sistemas fotovoltaicos. Com relação a estes dois últimos, foram utilizadas as configurações padrões do programa por ser considerada adequada ao clima brasileiro: laje em concreto maciço. Tal compatibilidade não foi, porém, encontrada no sistema construtivo das paredes, visto que a biblioteca de opções pré-configuradas do EnergyPlus é baseada na ASHRAE, priorizando materiais mais presentes no mercado norte-americano como o *steel frame* e blocos de concreto maciços.

O Anexo I da Portaria INMETRO N° 248 (BRASIL, 2018) estipula que nestes cenários deve ser utilizado como sistema construtivo das paredes as seguintes camadas: argamassa interna (2,5 cm), bloco cerâmico (9 cm) e argamassa externa (2,5 cm), como apresentado na Figura 3.10. As propriedades físicas e térmicas para a configuração de tal material foram extraídas dos estudos realizados por LABEEE *et al.* (2010) e Nagy e Orosz (2015). Destaca-se que as absorptâncias são relativas às cores dos materiais, sendo adotada as cores branca para as argamassas e terracota para os blocos cerâmicos. Os valores adotados se encontram na Tabela 3.3.

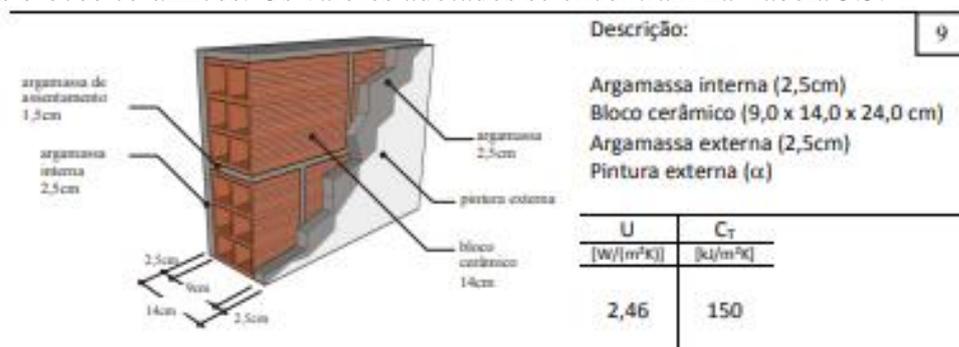


Figura 3.10– Material especificado pelo Anexo I da Portaria INMETRO N° 248 (BRASIL, 2018).

Fonte: BRASIL, 2018.

Tabela 3.3 – Propriedades necessárias para as configurações das argamassas e dos blocos cerâmicos nas simulações.

Propriedade	Argamassa Externa	Bloco Cerâmico	Argamassa Interna
Espessura (m)	0,025 (INMETRO, 2018)	0,09 (INMETRO, 2018)	0,025 (INMETRO, 2018)
Condutividade (W/(m.K))	0,35 (LABEEE, 2010)	0,325 (Vivaldini <i>et al.</i> , 2014)	0,35 (LABEEE, 2010)
Densidade (kg/m ³)	750 (LABEEE, 2010)	1000 (Nagy e Orosz, 2015).	750 (LABEEE, 2010)
Calor Específico (J/(kg.K))	840 (LABEEE, 2010)	920 (LABEEE, 2010)	840 (LABEEE, 2010)
Absortância Térmica	0,158 (BRASIL, 2013b)	0,696 (BRASIL, 2013b)	0,158 (BRASIL, 2013b)
Absortância Solar	0,158 (BRASIL, 2013b)	0,696 (BRASIL, 2013b)	0,158 (BRASIL, 2013b)
Absortância de Luz Visível	0,158 (BRASIL, 2013b)	0,696 (BRASIL, 2013b)	0,158 (BRASIL, 2013b)

Fonte: Especificados na tabela.

3.6.2. Arquivos climáticos utilizados

Um arquivo climático é a compilação de um ano meteorológico típico (*typical meteorological year* – TMY), sendo pré-requisito para a realização de simulações com precisão. Um ano meteorológico típico é constituído pela seleção, ao longo de uma série temporal, do mês mais típico para cada um dos doze meses do ano, preferencialmente baseado em mais de 30 anos de dados climáticos de forma consecutiva (Weide *et al.*, 2012). É um elemento importante por dar uma percepção das variações climáticas ao longo de cada uma das 8760 horas do ano, apresentando medições de parâmetros que afetam a performance de edificações como temperatura, velocidade do vento e irradiância (Amorim, 2015; Pradhan e Panda, 2017; Fouad, Shihata e Morgan, 2017).

A compilação dos dados para formulação do ano meteorológico típico é feita a partir de estações climáticas, como as do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Como resultado, uma mesma cidade pode ter múltiplos arquivos climáticos, sendo necessária a adoção de critérios para a seleção dos mesmos. Foram selecionados os arquivos climáticos realizados com base em um maior intervalo de dados disponíveis, visto que estes são mais representativos das sazonalidades e condições climáticas que os arquivos baseados em intervalos menores. Sendo assim, os arquivos climáticos selecionados estão apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Cidades e arquivos climáticos selecionados para a realização das simulações.

Latitude	Zona bioclimática	Cidade	Arquivo Climático
0°	8	Fortaleza	Aeroporto Internacional de Fortaleza Pinto Martins BRA_CE_Fortaleza_Pinto.Martins.Intl.AP.817580_INMET.epw
5°	7	Teresina	Aeroporto de Teresina Senador Petrônio Portella BRA_PI_Teresina-Portella.AP.825790_TMYx.epw
	8	Natal	Aeroporto Internacional de Natal Gov. Aluizio Alves BRA_RN_Natal.Intl.AP.825990_TMYx.epw
10°	1	Palmas	Estação Meteorológica do INMET em Palmas BRA_TO_Palmas.866070_INMET.epw
	8	Salvador	Estação Meteorológica do INMET em Salvador BRA_BA_Salvador.832290_TMYx.epw
15°	4	Brasília	Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek BRA_DF_Brasilia-Kubitschek.Intl.AP.833780_TMYx.epw
	6	Goiânia	Aeroporto Internacional de Goiânia Santa Genoveva BRA_GO_Goiania-Santa-Genoveva.AP.834230_TMYx.epw
	7	Cuiabá	Aeroporto Internacional de Cuiabá Marechal Rondon BRA_MT_Cuiaba-Rondon.Intl.AP.8333620_TMYx.epw
20°	3	Belo Horizonte	Aeroporto Internacional Tancredo Neves BRA_MG_Belo.Horizonte-Neves-Confins-Intl.AP835870_TMYx.epw
	6	Campo Grande	Aeroporto Internacional de Campo Grande BRA_MS_Campo.Grande.Intl.AP.868100_TMYx.epw
	8	Rio de Janeiro	Aeroporto Internacional Tom Jobim BRA_RJ_Rio.de.Janeiro-Galeão-Jobim.Intl.AP.837460_TMYx.epw
25°	1	Curitiba	Aeroporto Internacional de Curitiba Afonso Pena BRA_PR_Curitiba-Pena.Intl.AP.838400_TMYx.epw
	3	São Paulo	Aeroporto Internacional de Guarulhos BRA_SP_Sao.Paulo-Guarulhos.Intl.AP.830750_TMYx.epw
30°	3	Porto Alegre	Aeroporto Internacional Salgado Filho BRA_RS_Porto.Alegre-Salgado.Filho.Intl.AP.839710_TMYx.epw

Fonte: Elaboração própria.

3.6.3. Configuração dos sistemas fotovoltaicos

As pré-configurações dos *plugins* utilizados são adequadas para casos em que a tecnologia utilizada é a silício monocristalino. Visto que o material empregado na integração das fachadas são os filmes fotovoltaicos orgânicos, foi necessária a configuração manual. Foram utilizados valores compatíveis com o material disponível no mercado nacional, sendo considerada a eficiência de 3.5% (SUNEW, 2020c). O coeficiente de temperatura considerado foi +0.35%, (SUNEW, 2020c) e a área ativa do módulo foi de 67% (Sbampato, 2017).

3.6.4.

Configuração do sistema de condicionamento de ar e da rotina de uso

Apesar de ser possível o detalhamento do sistema de condicionamento de ar, utilizou-se o padrão do programa para edificações de uso comercial com planta livre. O principal fator que influenciou tal decisão é a complexidade de um projeto adequado de ventilação artificial, não sendo este o enfoque do trabalho. Com relação a rotina de uso, essa também foi mantida de acordo com a configuração padrão do programa por ser adequada a rotina de trabalho brasileira (segunda a sexta feira, das 9h até 18h).

3.7.

Considerações finais sobre o capítulo

Neste capítulo apresentaram-se as variáveis relativas à volumetria, com três variações de forma e às fachadas, variando tanto a orientação das edificações quanto da porcentagem de janela. Foram enfatizadas as possibilidades de utilização de softwares para a realização de simulações relacionadas a geração de energia e demanda energética. Apresentou-se o método proposto com o *software* Rhinoceros, em conjunto dos *plugins* Grasshopper, Galapagos, Ladybug e Honeybee, assim como seus principais dados de entrada para funcionamento. Com a seleção de cidades com base no seu zoneamento bioclimático brasileiro e latitude, buscou-se expandir o a análise e estudar como as configurações de fachadas impactam o desempenho de edificações com relação à demanda energética final. Para tal, será necessária a utilização de algoritmos genéticos como o Galapagos de forma a achar as melhores soluções em menos tempo.

Foram adotados dois parâmetros de performance: o primeiro é a redução da demanda energética em porcentagem, permitindo uma comparação entre edificações; e o segundo é a redução da demanda de energia em kWh por metro quadrado de células fotovoltaicas orgânicas, de forma a possibilitar um paralelo entre diferentes configurações de fachadas de uma mesma edificação. Como variáveis, estipulou-se a porcentagem de aberturas na fachada (entre 50-95%) e a orientação das edificações (0-360°), que em conjunto com a diversidade de *layouts* nas geometrias tem como objetivo dar um panorama detalhado sobre a performance da edificação quando exposta a diferentes situações.

O capítulo seguinte visa apresentar os resultados das variáveis e dos parâmetros obtidos após a realização da otimização. Será realizada uma discussão entre os valores obtidos em escala nacional, assim como a comparação com resultados apresentados por outros autores.

4 Resultados

Este capítulo tem por finalidade apresentar os resultados obtidos pelas simulações realizadas, podendo ser separado em quatro etapas. A primeira é integrada pelo subitem 4.1. e tem como objetivo a apresentação dos principais resultados, dando um panorama geral sobre os valores encontrados. A segunda etapa é onde são apresentados todos os resultados para cada uma das cidades investigadas, abrangendo desde a seção 4.2. até a 4.15. Em cada uma destas subseções são seções são mencionadas as configurações de fachadas simuladas, a maior eficiência atingida. Além disso, são apresentados gráficos que demonstram todos os valores relativos ao azimute e percentagem de abertura extraídos do *plugin* de otimização, organizado do mais satisfatório para o menos adequado. A terceira etapa é a comparação dos resultados entre si, contraponto os resultados obtidos por cidade, latitude e zonas bioclimáticas. Por fim, a última seção objetiva discutir os resultados e os compara com outras publicações semelhantes.

4.1. Apresentação dos resultados

A utilização de células fotovoltaicas orgânicas integradas em janelas acarretou em reduções na demanda energética final entre 2,94% para a edificação 2 em Fortaleza até 14,39% para a edificação 3 na cidade de Brasília. Por ser capaz de não só de gerar energia limpa, mas também de reduzir o uso de energia por sistemas de climatização em edifícios em todos as cidades, se confirmou como uma ação eficaz de eficiência energética. Embora seja recomendada a implementação de sistemas fotovoltaicos integrados em todos os tipos de edificações englobadas neste trabalho, os resultados têm mostrado que a edificação 3 obteve a maior conservação energética em todos os cenários estudados. As geometrias simuladas e suas respectivas médias nacionais na redução na demanda energética são apresentadas na Figura 4.1, sendo evidente uma maior efetividade na edificação 3 e uma considerável semelhança entre as edificações 1 e 2.

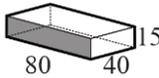
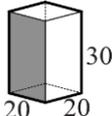
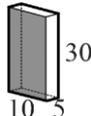
	Edificação 01	Edificação 02	Edificação 03
Geometria			
Média nacional de conservação de energia	6,48%	6,49%	8,70%

Figura 4.1 – Geometrias analisadas e média nacional de conservação de energia.

Fonte: Elaboração própria.

Com base nos resultados preliminares obtidos para a cidade do Rio de Janeiro, sugere-se evitar a instalação de janelas fotovoltaicas orgânicas em fachadas paralelas, uma vez que estas tiveram a menor redução na demanda de energia por metro quadrado de células fotovoltaicas orgânicas em todas as geometrias analisadas. Este parâmetro foi adotado para a comparação de diferentes configurações de fachadas de uma mesma edificação, utilizando o metro quadrado das células fotovoltaicas como unidade básica de forma a identificar a opção com maior impacto na demanda energética final desconsiderando as diferenças de áreas trazidas pelas diferentes configurações de fachada. Os valores obtidos para tal parâmetro considerando o contexto climático do Rio de Janeiro são apresentados na Figura 4.2

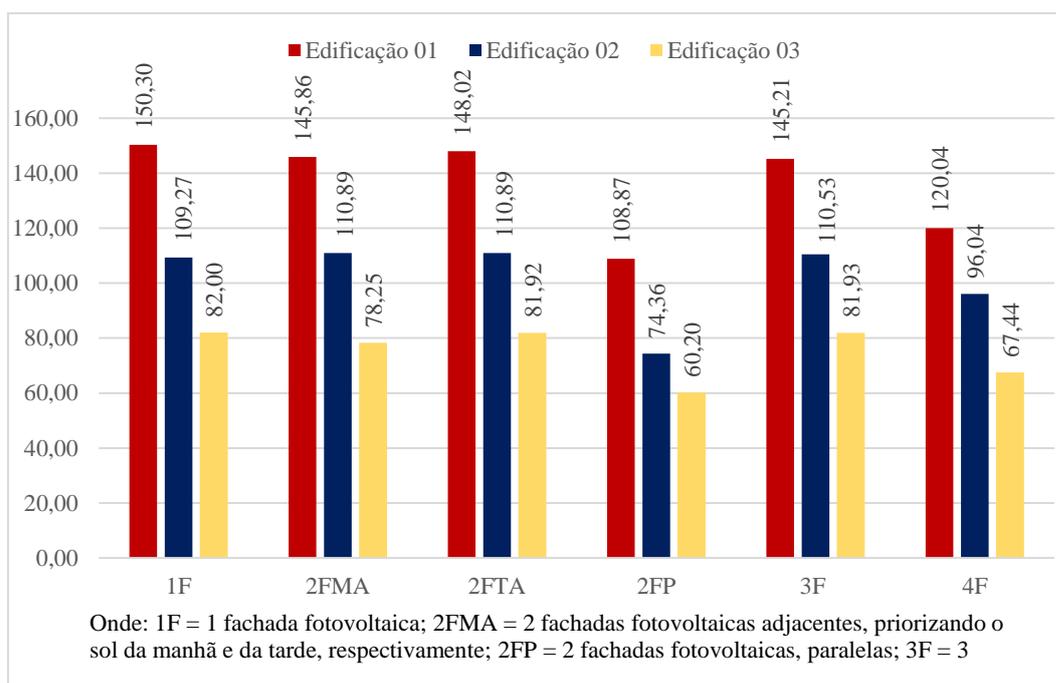


Figura 4.2 – Redução da demanda energética em kWh/m² OPV/ano por edificação e configuração de fachada para a cidade do Rio de Janeiro.

Fonte: Elaboração própria.

Seguindo o mesmo parâmetro, concluiu-se que a integração dos filmes fotovoltaicos orgânicos em apenas uma fachada se mostrou mais benéfica, sendo essa a opção extrapolada para as demais cidades.

É perceptível que o aumento da área das células fotovoltaicas não necessariamente resulta em uma maior eficiência energética, visto que na edificação 3, por exemplo, aberturas menores da fachada foram mais satisfatórias em 13 das 14 cidades simuladas. Desta forma, percebe-se que não só a geração de energia é um fator determinante para a redução na demanda energética, como também a proporção das aberturas que permita a mais adequada troca térmica entre o interior e o exterior. As aberturas recomendadas em todo o país são mostradas na Figura 4.3., podendo ser generalizadas para 95% para a edificação 1, entre 90-95% para a edificação 2 e no intervalo de 50-55% para a edificação 3. A única exceção da edificação 3 foi a cidade de Curitiba, onde aberturas de 93-95% foram recomendadas.

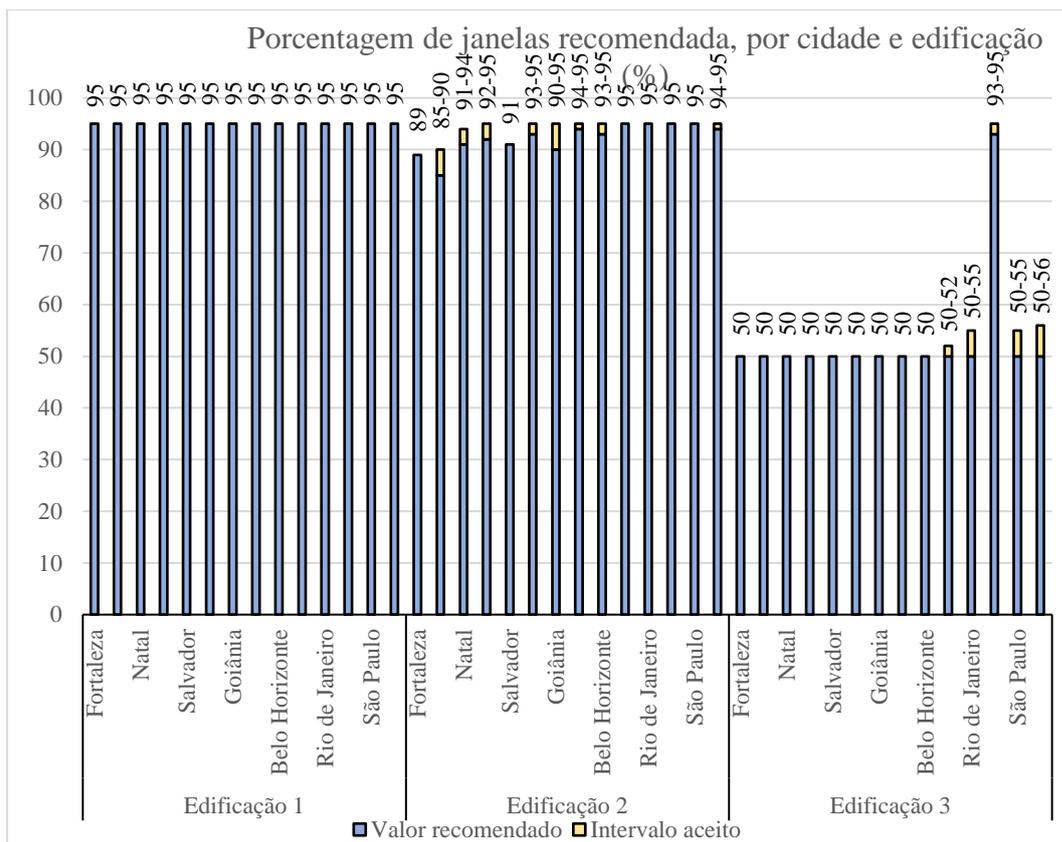


Figura 4.3 – Valores recomendados para a porcentagem de janelas na fachada, por cidade e edificação (%).

Fonte: Elaboração própria.

A orientação recomendada, por sua vez, se manteve consideravelmente constante em uma mesma cidade independente da geometria investigada. A localização foi um elemento chave para a orientação das fachadas devido a sua proximidade com a Linha do Equador e seu efeito na trajetória solar. Os resultados relativos as edificações localizadas nas latitudes 10° a 30° demonstram que estas tendem a ter maiores níveis de irradiação no período da tarde, ou seja, incidente na fachada Noroeste, enquanto na latitude 5° a orientação mais visada foi a Oeste e na 0° foi a Leste.

Em todos os cenários simulados em escala nacional com apenas uma fachada fotovoltaica, percebe-se que esta volta-se para a direção com maior incidência de irradiação no plano da fachada extraídos do arquivo climático utilizado para as simulações de geração e consumo energético. Tal correlação fica clara com os dados apresentados na Tabela 4.1, onde são comparadas a orientação recomendada e com maior irradiação incidente.

Tabela 4.1 – Orientação recomendada para edificações com uma fachada fotovoltaica e orientação com maior incidência de irradiação.

Cidade	Edificação	Orientação da fachada fotovoltaica (°)	Orientação com maior irradiação (°)
Fortaleza	Edificação 1	70-95	80
	Edificação 2	80-85	
	Edificação 3	75-90	
Teresina	Edificação 1	275-280	280
	Edificação 2	270-290	
	Edificação 3	265-295	
Natal	Edificação 1	275-285	280
	Edificação 2	275-285	
	Edificação 3	275-285	
Palmas	Edificação 1	340-0	0
	Edificação 2	350-0	
	Edificação 3	0	
Salvador	Edificação 1	285-290	290
	Edificação 2	285-295	
	Edificação 3	285-295	
Brasília	Edificação 1	295-305	300
	Edificação 2	305-300	
	Edificação 3	300	
Goiânia	Edificação 1	290-315	310
	Edificação 2	295-310	
	Edificação 3	295-310	
Cuiabá	Edificação 1	285-310	300
	Edificação 2	290-305	
	Edificação 3	300	
Belo Horizonte	Edificação 1	310-315	300
	Edificação 2	305-315	
	Edificação 3	310-315	
Campo Grande	Edificação 1	315	320
	Edificação 2	315	
	Edificação 3	315	
Rio de Janeiro	Edificação 1	310-340	320
	Edificação 2	320-330	
	Edificação 3	320-335	
Curitiba	Edificação 1	320-325	320
	Edificação 2	320-325	
	Edificação 3	320-325	
São Paulo	Edificação 1	300-315	320
	Edificação 2	305-315	
	Edificação 3	305-315	
Porto Alegre	Edificação 1	320-330	330
	Edificação 2	320-330	
	Edificação 3	320-330	

Fonte: Elaboração própria.

4.2. Latitude 0° - Zona Bioclimática 08 – Fortaleza

Fortaleza (CE) possui macro clima costeiro tropical chuvoso, sendo tipicamente uma cidade quente e úmida devido a influência marítima (Leite, 2010). A temperatura do ar atinge os níveis mais elevados a partir do início da tarde até o começo da noite, atingindo até 32°C (Leite, 2010). Os meses de setembro, outubro e novembro são os mais secos e apresentam os maiores índices de maior irradiação, enquanto os meses de fevereiro, março e abril são mais nebulosos (Leite, 2010).

A Figura 4.4. apresenta as direções relativas a irradiação solar na cidade, sendo tal dado extraído do arquivo climático de Fortaleza. É evidente a incidência de irradiação com relativa homogeneidade de todas as direções ao longo do ano. Contudo, observa-se uma concentração na direção leste (Azimute 90°) e um eixo de simetria no sentido Leste-Oeste. Atribui-se este à localização de Fortaleza, nas proximidades da Linha do Equador, tornando possível a incidência de irradiação na fachada norte a partir do equinócio de outono e na fachada sul a partir do equinócio de primavera, tendo como resultado que cada uma destas fachadas recebe luz direta do sol por praticamente 6 meses do ano.

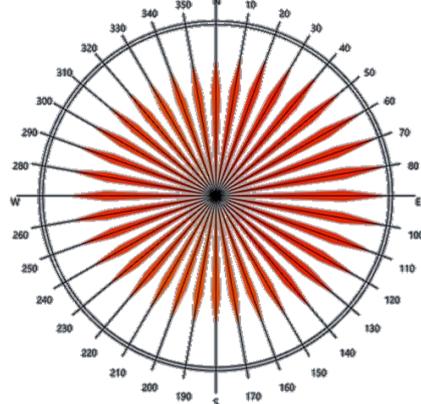


Figura 4.4 – Direções relativas à irradiação para Fortaleza.
Fonte: Arquivo Climático.

A Tabela 4.2. apresenta os valores recomendados de azimute e porcentagem de janelas obtidos pela simulação e otimização da redução na demanda energética final realizada. Fortaleza apresentou o menor potencial de redução na remanda energética final do país, variando entre 2,94% e 3,41%. O fator que teve o maior impacto negativo na edificação foi a baixa geração de energia, consequência da sua localização, visto que investigando a redução no consumo de HVAC individualmente a cidade teria apenas o quarto pior desempenho do país.

Tabela 4.2 – Orientação e porcentagem de janelas obtidas para a otimização da redução da demanda energética final considerando o contexto climático de Fortaleza.

Edificação	Geometria		Impacto no consumo de energia		Redução na demanda energética final	
	Azimute (°)	% Janelas	Redução no consumo de HVAC (kWh/ano)	Geração de energia pelo OPV (kWh/ano)	%	kWh/m ² OPV/ano
E1 F1	70-95	95	97840,00	12527,34	3,18	96,91
E2 F1	80-85	89	27142,00	5867,20	2,94	61,81
E3 F1	75-90	50	4428,50	1642,90	3,41	40,48

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 4.5 apresenta todas as combinações de azimute e percentagem de janelas da fachada realizadas pela otimização, variando da melhor (primeira) para a pior (última). É evidente que em todas as edificações há uma tendência das melhores orientações serem voltadas para leste, representado pela concentração dos ícones azuis nas proximidades do azimute 90° no início de cada um dos gráficos *plotados*. Já as condições consideradas menos satisfatórias são voltadas aquelas nas quais as fachadas fotovoltaicas foram voltadas para o norte nas edificações 1 e 3 e para o oeste na edificação 2.

Percebe-se que a redução da percentagem de janelas teve impacto negativo no desempenho das edificações 1 e 2. Tal fator fica evidente pela análise dos ícones laranjas *plotados* na Figura 4.5 e sua redução acentuada ao passar das gerações. A recomendação é que 95% da fachada seja composta de janelas na edificação 1 e 89% na edificação 2. Já para a edificação 3, recomenda-se as menores aberturas possíveis para a obtenção do melhor desempenho, sendo a geometria mais eficiente aquela com 50% de aberturas.

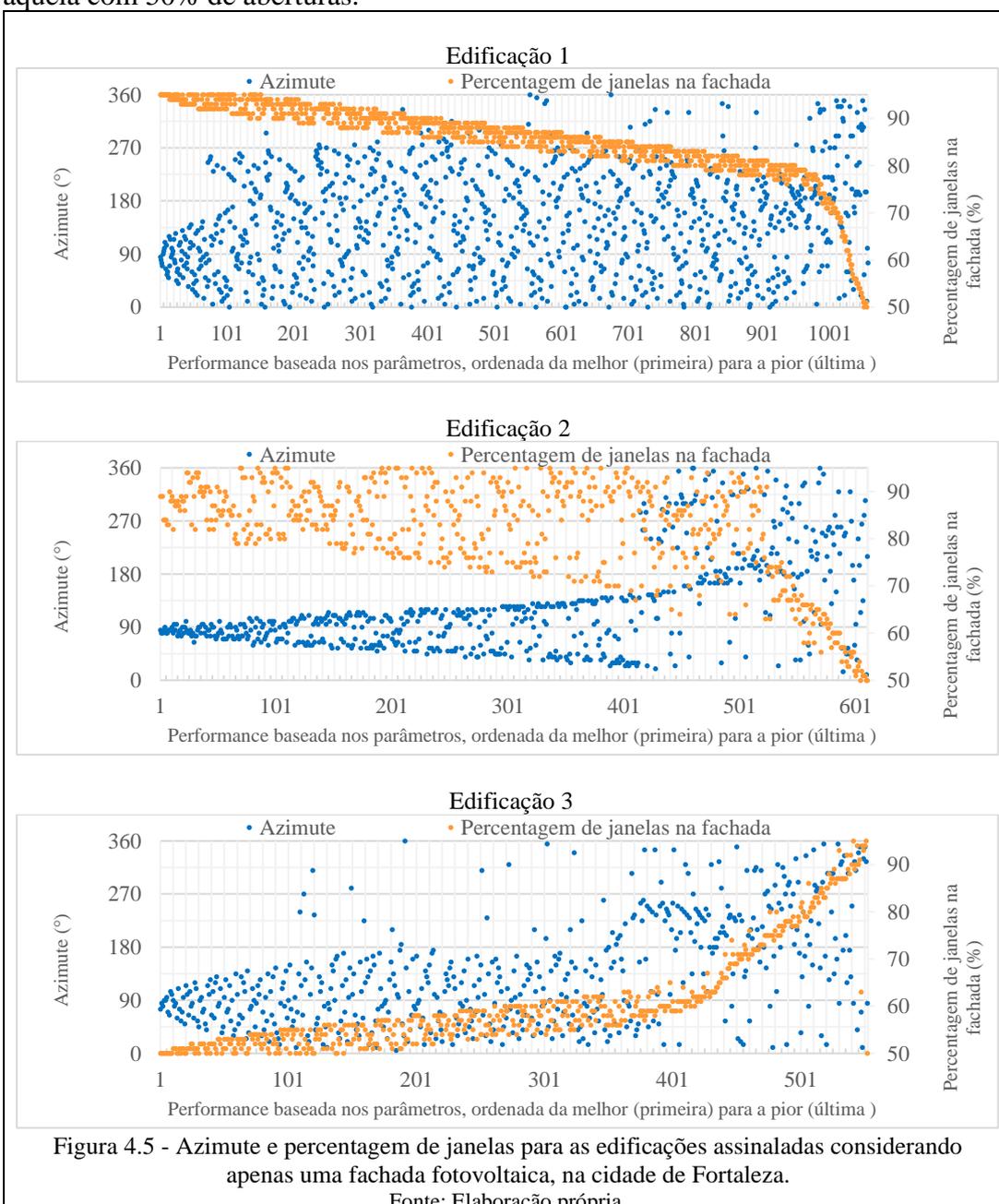


Figura 4.5 - Azimute e percentagem de janelas para as edificações assinaladas considerando apenas uma fachada fotovoltaica, na cidade de Fortaleza.

Fonte: Elaboração própria.

4.3. Latitude 5° - Zona Bioclimática 07 - Teresina

Teresina (PI) é uma cidade localizada no interior do país cujo bioma é caracterizado pela transição entre o cerrado, a caatinga e o clima amazônico, com topografia suave que raramente ultrapassa os 130 m acima do nível do mar (Andrade, 2016). A irradiação solar máxima acontece durante o segundo semestre, mais precisamente entre os meses de julho a outubro (Andrade, 2016). A Figura 4.6. nos permite afirmar que, diferentemente de Fortaleza, não há simetria nos níveis de irradiação no eixo Leste-Oeste, mas sim uma concentração levemente maior na fachada norte em comparação a sul. Dois agentes contribuem para tal fator: o primeiro é a irradiação máxima mencionada por Andrade (2016), que entre julho a setembro é incidente nas fachadas voltadas para o norte; e a localização da cidade, visto que o afastamento da Linha do Equador acarreta na polarização da irradiação na fachada norte para cidades localizadas no hemisfério sul. A direção com maior incidência de irradiação ao longo do ano foi o noroeste (280°).

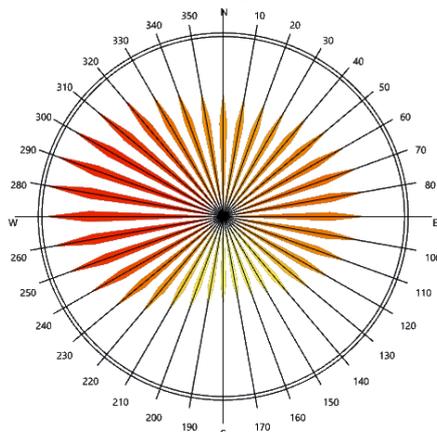


Figura 4.6 – Direções relativas à irradiação para Teresina.
Fonte: Arquivo Climático.

A Tabela 4.3. demonstra as recomendações de azimute e porcentagem de janelas obtidas após a realização das simulações e otimizações considerando o contexto climático de Teresina. Apesar de apresentar geração de energia e redução da demanda de HVAC acima da média nacional, a cidade apresentou o terceiro pior potencial de conservação de energia, variando entre 3,92% e 4,34%. Tal fator é atribuído à alta demanda energética para resfriamento das edificações, que apresentando resultados satisfatórios em kWh/ano tiveram impacto abaixo do esperado em porcentagem.

Tabela 4.3 – Orientação e porcentagem de janelas obtidas para a otimização da redução da demanda energética final considerando o contexto climático de Teresina.

Edificação	Geometria		Impacto no consumo de energia		Redução na demanda energética final	
	Azimute (°)	% Janelas	Redução no consumo de HVAC (kWh/ano)	Geração de energia pelo OPV (kWh/ano)	%	kWh/m ² OPV/ano
E1 F1	275-280	95	160462,00	19307,29	3,96	157,69
E2 F1	270-290	85-90	46234,00	9021,64	3,92	102,33
E3 F1	265-295	50	8606,70	2496,29	4,34	74,02

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 4.7 apresenta todas as combinações de azimute e percentagem de janelas da fachada realizadas pela otimização de edificações com uma fachada fotovoltaica para a cidade de Teresina, variando da melhor (primeira) para a pior (última). Para todas as edificações as orientações recomendadas são voltadas para o noroeste, mais precisamente para o azimute 280° , o que é compatível com a direção com maior incidência de irradiação apresentado pelo arquivo climático. As condições de orientação que demonstraram o pior desempenho foram aquelas em que a edificação foi rotacionada, se aproximando das orientações 180° e 360° .

Com relação a percentagem de janelas, as edificações 1 e 2 tiveram um melhor desempenho energético quando grandes janelas foram projetadas. É aconselhável que as janelas representem 95% da fachada para a edificação 1 e entre 85-90% para a edificação 2. Para a edificação 3, aberturas menores foram preferíveis, sendo indicado que estas representem apenas 50% da fachada. A diferença nos percentuais de janelas na fachada recomendados para cada uma das edificações enfatiza a influência desta no desempenho energético final.

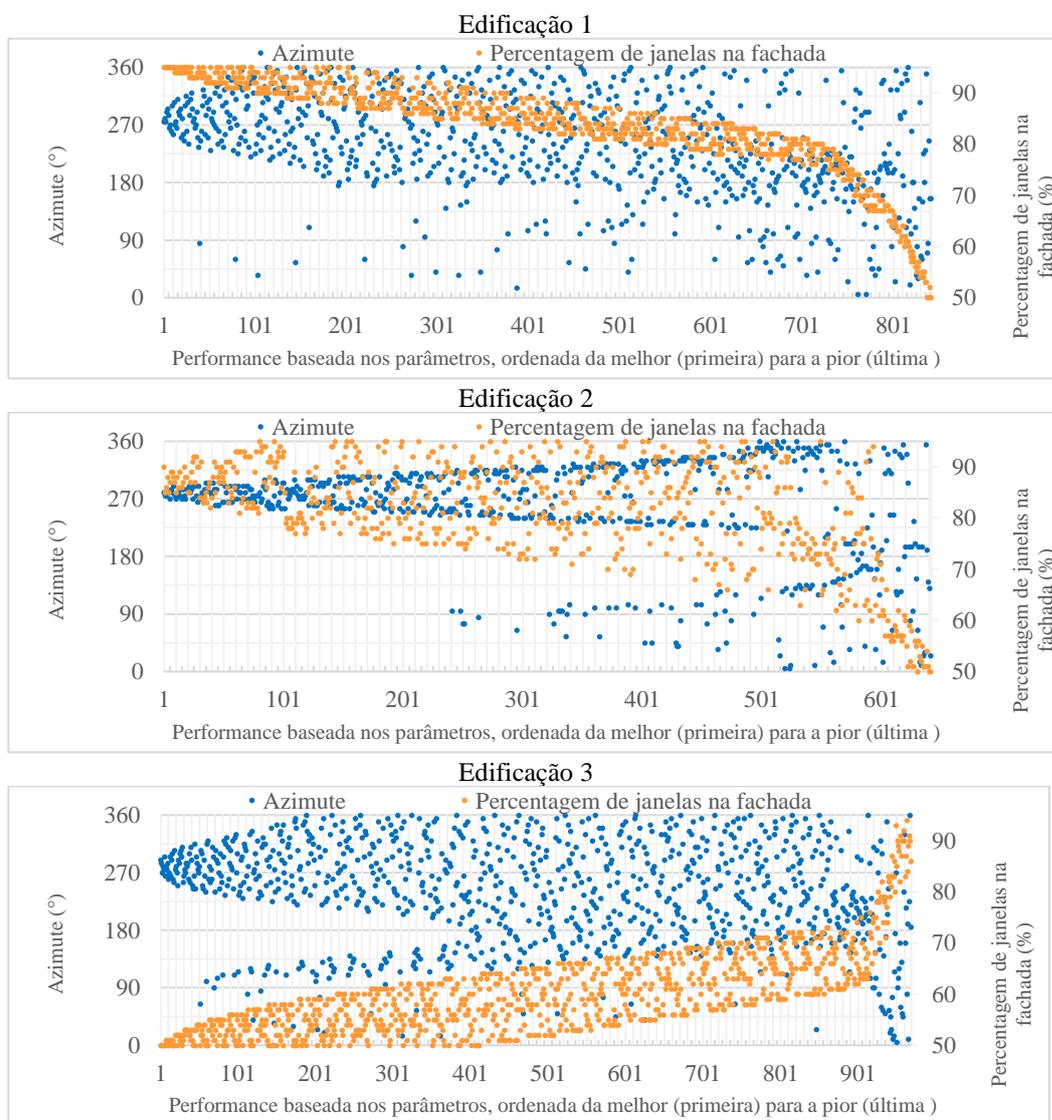


Figura 4.7 - Azimute e percentagem de janelas para as edificações assinaladas considerando apenas uma fachada fotovoltaica, na cidade de Teresina.

Fonte: Elaboração própria.

4.4. Latitude 5° - Zona Bioclimática 08 – Natal

Natal (RN) se encontra em um dos pontos mais orientais da costa brasileira, possuindo clima litorâneo quente e úmido (INPE, 2004). A cidade apresenta uma brisa permanente vinda do oceano a sudeste e pequenas variações de temperatura ao longo do ano, sendo essa em média de 26°C (INPE, 2004).

A Figura 4.8. mostra as direções de irradiação na cidade de Natal. É perceptível uma semelhança com a figura apresentada para Teresina. Apesar de distantes quase 1.200 km, tal característica pode ser atribuída ao fato de ambas se encontrarem na mesma latitude (5°S). A direção com maior incidência de irradiação é a noroeste, com azimute 280°.

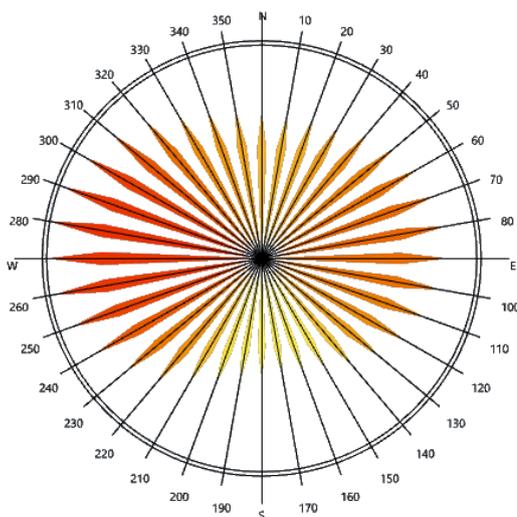


Figura 4.8 – Direções relativas à irradiação para Natal.
Fonte: Arquivo Climático.

A Tabela 4.4. apresenta os valores recomendados de azimute e porcentagem de janelas obtidos pela simulação e otimização da redução na demanda energética final realizada. Apesar das semelhanças com Teresina, Natal apresentou um maior potencial de conservação de energia, este variando de 4,60% até 6,13%. Com tais valores, é a cidade com melhor desempenho na redução da demanda energética final do Nordeste brasileiro. O destaque foi a redução no consumo de HVAC, que atingiu o quarto maior valor do país.

Tabela 4.4 – Orientação e porcentagem de janelas obtidas para a otimização da redução da demanda energética final considerando o contexto climático de Natal.

Edificação	Geometria		Impacto no consumo de energia		Redução na demanda energética final	
	Azimute (°)	% Janelas	Redução no consumo de HVAC (kWh/ano)	Geração de energia pelo OPV (kWh/ano)	%	kWh/m ² OPV/ano
E1 F1	275-285	95	160741,00	20484,56	4,90	158,97
E2 F1	275-285	91-94	49089,00	9908,23	4,60	108,05
E3 F1	275-285	50	9445,65	2687,06	6,13	80,88

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 4.9 exibe os resultados das variáveis obtidas pela otimização de edificações com uma fachada fotovoltaica para a cidade de Natal, variando da melhor (primeira) para a pior (última). Todas as edificações tiveram como orientação recomendada o azimute 280°, e os ícones azuis indica que a rotação das geometrias para o norte (360°) ou sul (180°) afeta seu desempenho negativamente. Tal indicação é novamente compatível com a direção com maior incidência de irradiação apresentada pelo arquivo climático.

Com relação as aberturas, as sugestões são de grandes vão para as edificações 1 e 2. É recomendado que janelas representem 95% e entre 91-94% das fachadas, respectivamente. A utilização de aberturas menores para estas edificações resulta em um desempenho energético menos satisfatório, como indicado pelos ícones em laranja na figura abaixo. A edificação 3 é novamente a exceção, onde aberturas menores – mais precisamente de 50% da fachada – acarretam o melhor desempenho energético da construção.

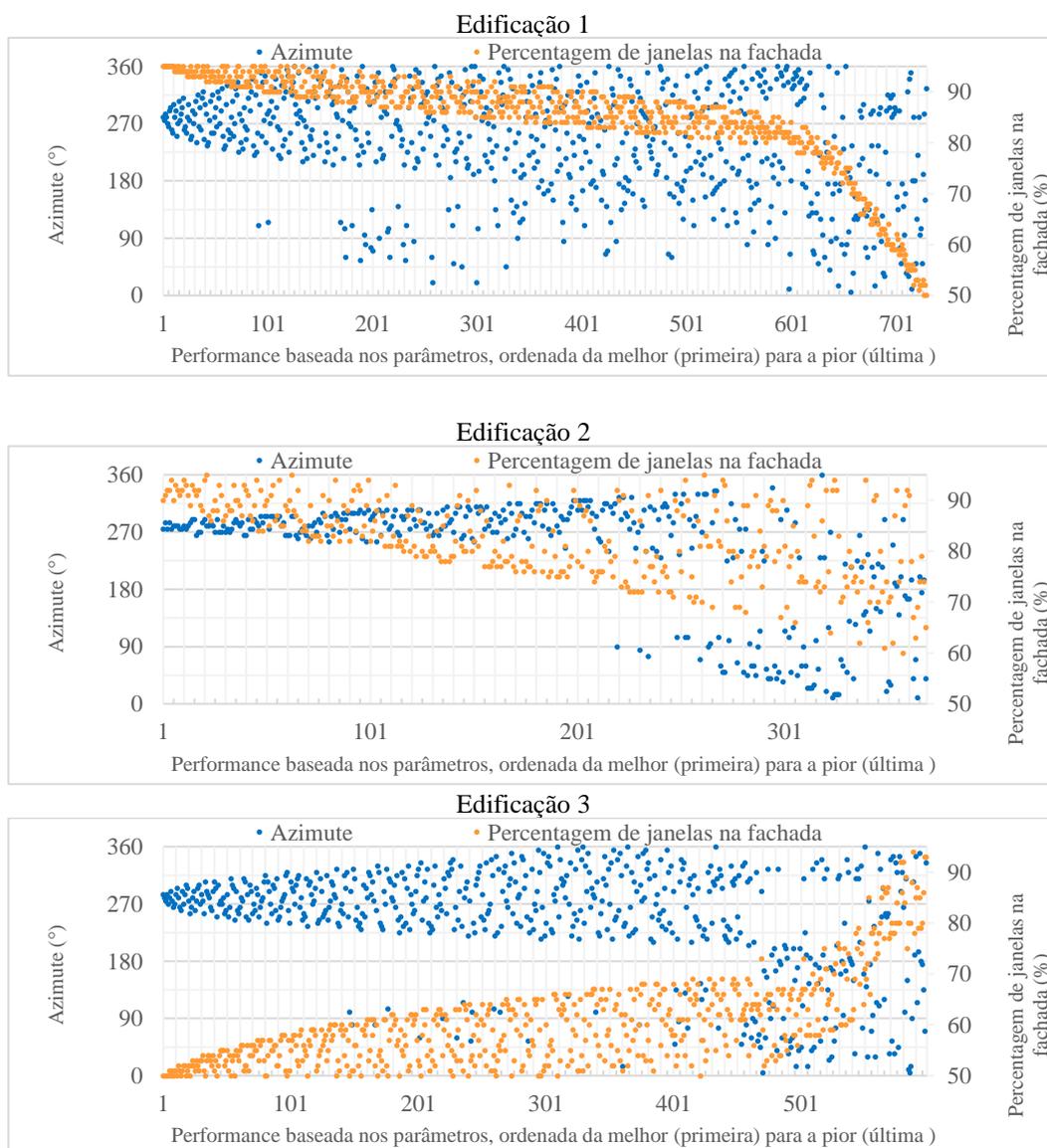


Figura 4.9 - Azimute e porcentagem de janelas para as edificações assinaladas considerando apenas uma fachada fotovoltaica, na cidade de Natal.

Fonte: Elaboração própria.

4.5. Latitude 10° - Zona Bioclimática 01 - Palmas

Palmas (TO) é uma cidade no interior do país com clima úmido/sub-úmido (Silva, 2018). Apesar de apresentar temperaturas médias de 26,7°C ao longo do ano, é detectada uma amplitude térmica de até 16°C entre as estações, sendo uma das suas características a definição das sazonalidades do regime climático (Silva, 2018). Devido em grande parte a sua latitude, a Figura 4.10 consolida a tendência de maior irradiação na direção norte com relação ao sul, característica das cidades localizadas no hemisfério sul. Há uma grande concentração de irradiação originada diretamente do norte (0°), englobando também parte do quadrante noroeste (270°-360°) e nordeste (0°-90°).

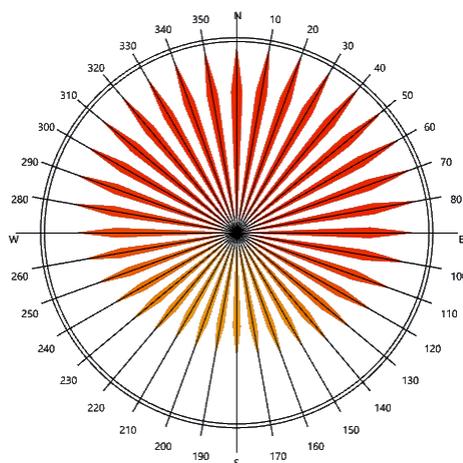


Figura 4.10 – Direções relativas à irradiação para Palmas.
Fonte: Arquivo Climático.

A Tabela 4.5. demonstra os valores obtidos para a porcentagem de janelas e azimute obtidos após as simulações e otimizações realizadas. Palmas apresentou o segundo pior desempenho do país para a edificação 1, atingindo apenas 3,77% de economia. O resultado para as edificações 2 e 3 foi mais satisfatório, atingindo o quinto menor potencial de conservação energética. Foi a única cidade do Norte investigada, não podendo então ser comparada com outras cidades da sua região.

Tabela 4.5 – Orientação e porcentagem de janelas obtidas para a otimização da redução da demanda energética final considerando o contexto climático de Palmas.

Edificação	Geometria		Impacto no consumo de energia		Redução na demanda energética final	
	Azimute (°)	% Janelas	Redução no consumo de HVAC (kWh/ano)	Geração de energia pelo OPV (kWh/ano)	%	kWh/m ² OPV/ano
E1 F1	340-0	95	97840	12527,34	3,77	96,81
E2 F1	350-0	92-95	32030	5519,26	3,69	68,02
E3 F1	0	50	5792	1467,08	4,46	48,39

Fonte: Elaboração própria.

Os valores recomendados para orientação das edificações mostrados na Figura 4.11 apontam como ideal a direção norte/noroeste para as edificações 1 e 2, mais especificamente entre os azimutes 350° - 0° . Já a edificação 3 deve ser orientada diretamente para o norte, com azimute 0° , para um melhor desempenho energético.

Com relação as aberturas, as sugestões são de grandes vão para as edificações 1 e 2. É recomendado que janelas representem 95% e entre 92-95% das fachadas, respectivamente. A utilização de aberturas menores para estas edificações resulta em um desempenho energético menos satisfatório, como indicado pelos ícones em laranja na figura abaixo. A edificação 3 é novamente a exceção, onde aberturas menores – mais precisamente de 50% da fachada – acarretam o melhor desempenho energético da construção.

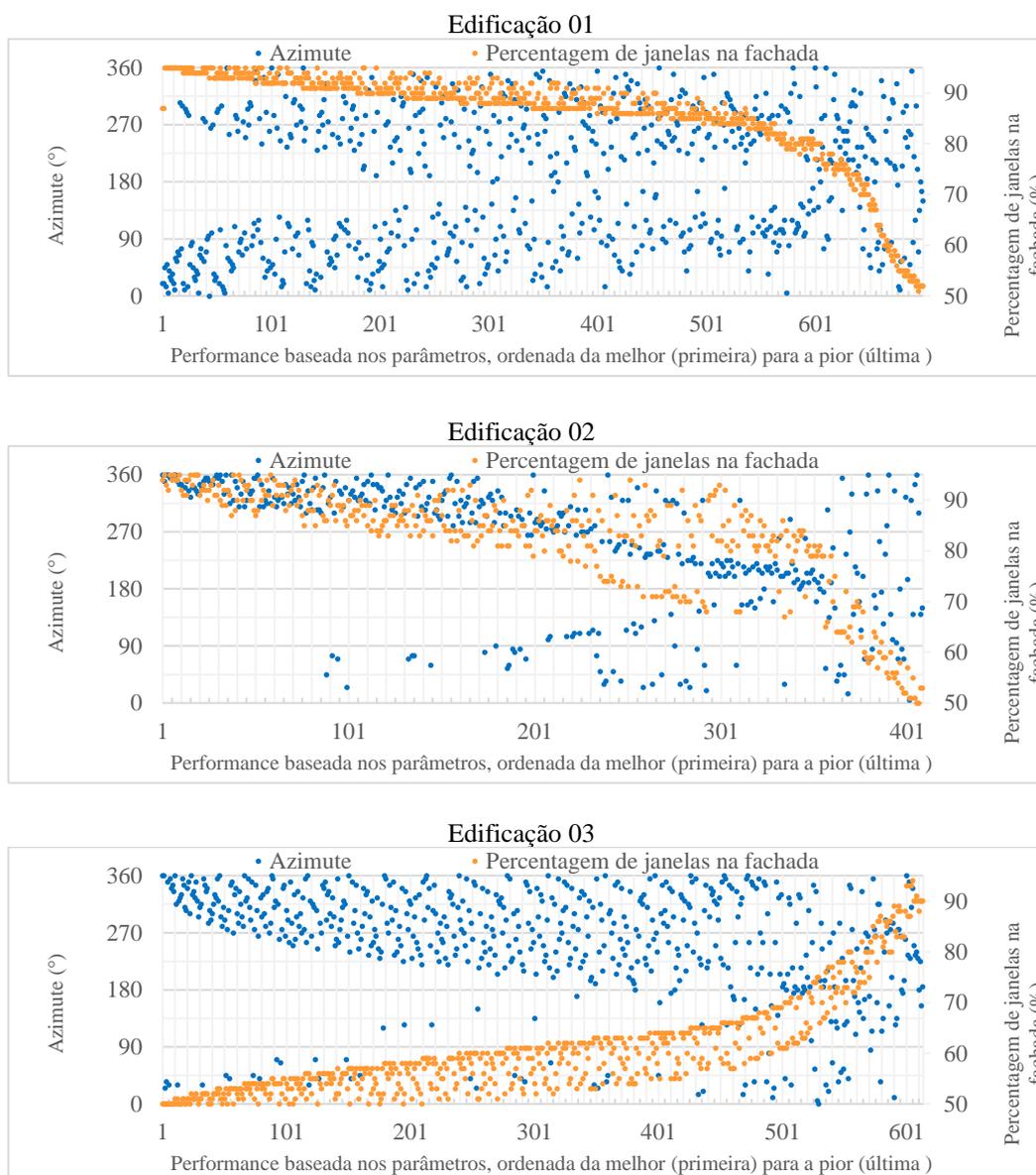


Figura 4.11 - Azimute e percentagem de janelas para as edificações assinaladas considerando apenas uma fachada fotovoltaica, na cidade de Palmas.

Fonte: Elaboração própria.

4.6. Latitude 10° - Zona Bioclimática 08 - Salvador

Salvador (BA) é uma cidade litorânea com clima tropical chuvoso sem estação seca, resultando então em períodos mais nebulosos entre os meses de março a agosto (Andrade e Brandão, 2009). Sua topografia é acidentada, onde a parte central se encontra em uma escarpa de falha na altitude 60-80 m, enquanto o comércio se encontra no nível do mar (Andrade e Brandão, 2009).

A irradiação incidente é levemente menor que nas cidades previamente abordadas, como mostrado pelas tonalidades menos avermelhadas na Figura 4.12. Este fato pode ser atribuído aos períodos chuvosos e nebulosos descritos por Andrade e Brandão (2009). Há uma concentração maior de irradiação no quadrante noroeste, mais especificamente na direção 290°.

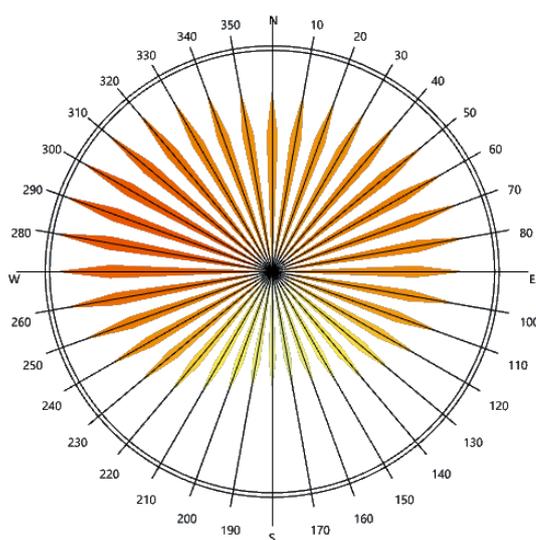


Figura 4.12 – Direções relativas à irradiação para Salvador.
Fonte: Arquivo Climático.

Os valores recomendados de azimute e porcentagem de janelas obtidos pela simulação e otimização da redução na demanda energética final realizada são indicados na Tabela 4.2. Devido aos seus níveis de irradiação mais baixos, Salvador apresenta a quarta menor geração de energia entre as cidades analisadas. Contudo, quando contabilizada a redução no consumo de HVAC, é atingida uma economia energética entre 4,37% e 5,39%, o segundo maior do Nordeste brasileiro.

Tabela 4.6 – Orientação e porcentagem de janelas obtidas para a otimização da redução da demanda energética final considerando o contexto climático de Salvador.

Edificação	Geometria		Impacto no consumo de energia		Redução na demanda energética final	
	Azimute (°)	% Janelas	Redução no consumo de HVAC (kWh/ano)	Geração de energia pelo OPV (kWh/ano)	%	kWh/m ² OPV/ano
E1 F1	285-290	95	153752	18765	4,75	151,33
E2 F1	285-295	91	45657	8987,69	4,37	100,08
E3 F1	285-295	50	8287	2460,68	5,39	71,65

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 4.13 demonstra as tendências de percentagem de janelas e orientação das edificações para Salvador, representadas pelos ícones laranjas e azuis, respectivamente. Os dados *plotados* variam do melhor, apresentados primeiro nos gráficos, para o pior, as últimas simulações apresentadas. O azimute recomendado para todas as edificações é 290°. A rotação da geometria para o norte (360°) ou para o sul (180°) resultou em um desempenho energético menos eficiente da edificação.

A recomendação de aberturas se manteve em 95% da área das fachadas para a edificação 1. A edificação 2, por sua vez, tem como indicação 91%. Com base nos ícones laranjas *plotados* no gráfico da Figura 4.13 relativo à edificação 2, foi possível concluir que caso não seja possível o projeto de janelas com 91% da área da fachada recomenda-se que estas ocupem entre 92-95%, por ter tornado a edificação mais eficiente que aberturas de 90% ou menos. Para a edificação 3, a recomendação é que apenas 50% da área da fachada seja ocupada por janelas.

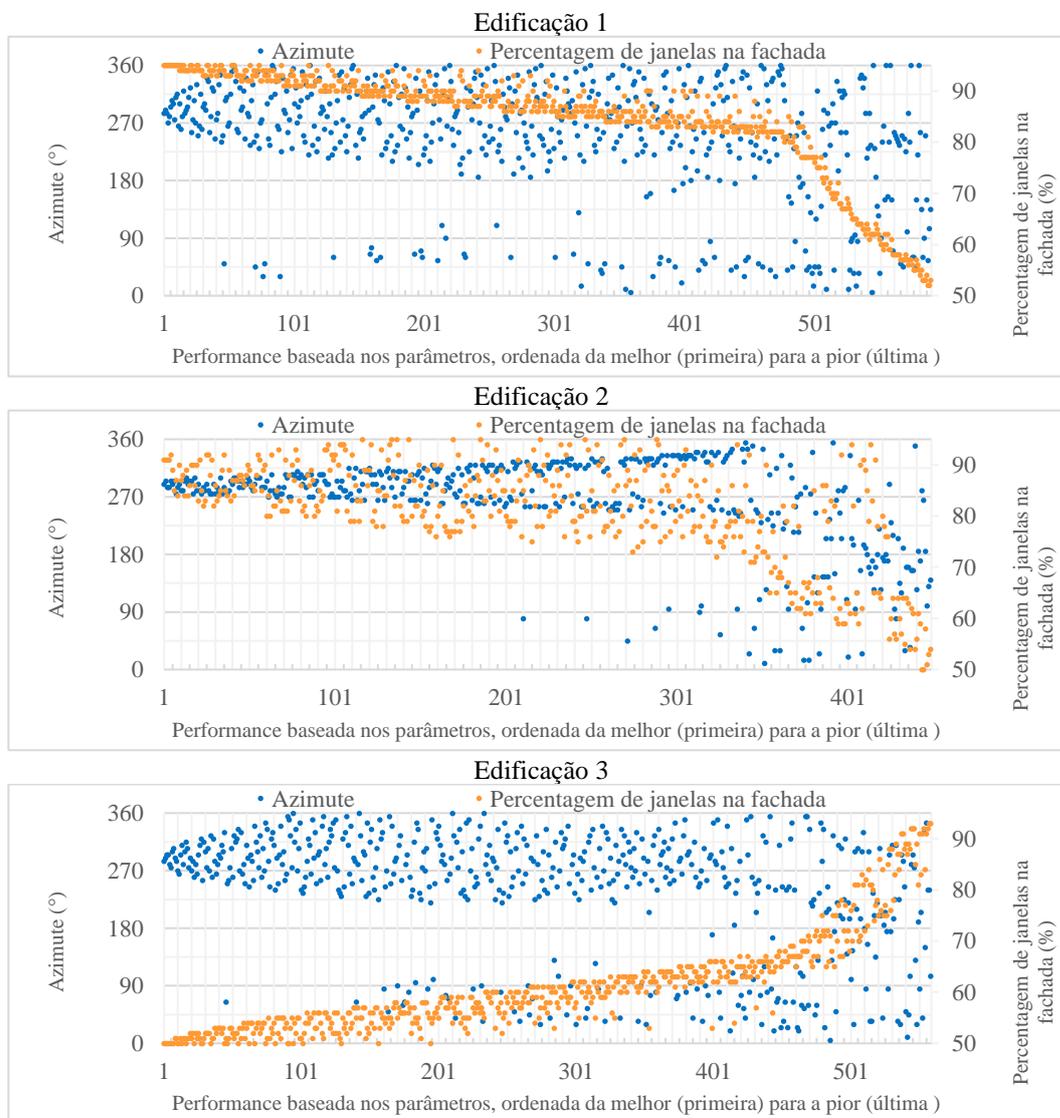


Figura 4.13 - Azimute e percentagem de janelas para as edificações assinaladas considerando apenas uma fachada fotovoltaica, na cidade de Salvador.

Fonte: Elaboração própria.

4.7. Latitude 15° - Zona Bioclimática 04 – Brasília

Localizada no Planalto Central do Brasil, Brasília (DF) possui altitude média de 1100 metros e é caracterizada pelo clima tropical de altitude (Maciel, 2002). A cidade apresenta duas estações nitidamente distintas: uma quente e úmida, de outubro a abril, e outra seca, de maio a setembro (Maciel, 2002).

Com base na Figura 4.14, fica evidente que Brasília apresenta índices de irradiação na fachada sul ainda mais baixos que as cidades das latitudes 0°, 5° e 10°. A latitude, mais especificamente a já mencionada distância com relação a Linha do Equador, é a causa desta característica marcante. A direção com maior intensidade da irradiação é a noroeste, mais especificamente o azimute 300°.

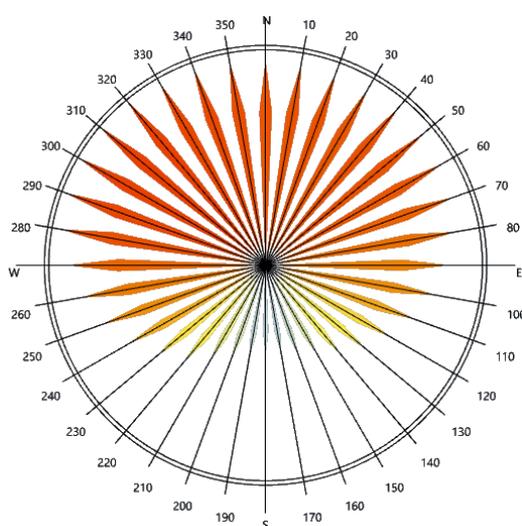


Figura 4.14 – Direções relativas à irradiação para Brasília.
Fonte: Arquivo Climático.

Os dados *plotados* na Tabela 4.7 mostram a conservação de energia alcançada após a integração de sistemas fotovoltaicos a edificação, assim como seus impactos na redução do consumo de HVAC e a energia gerada. Apesar de apresentar desempenho mediano para geração de energia e redução do consumo de HVAC, a redução na demanda energética final em porcentagem apresentou o maior potencial de todo o Brasil, economizando entre 10,29% e 14,39% da energia utilizada.

Tabela 4.7 – Orientação e porcentagem de janelas obtidas para a otimização da redução da demanda energética final considerando o contexto climático de Brasília.

Edificação	Geometria		Impacto no consumo de energia		Redução na demanda energética final	
	Azimute (°)	% Janelas	Redução no consumo de HVAC (kWh/ano)	Geração de energia pelo OPV (kWh/ano)	%	kWh/m ² OPV/ano
E1 F1	295-305	95	115619,00	21003,44	10,29	119,84
E2 F1	300-305	93-95	44509,41	10297,60	10,29	98,22
E3 F1	300-305	50	9203,15	2768,17	14,39	79,81

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 4.15 demonstra as tendências de percentagem de janelas e orientação das edificações para Brasília, representadas pelos ícones laranjas e azuis, respectivamente. Os dados *plotados* variam do melhor, apresentados primeiro nos gráficos, para o pior, as últimas simulações apresentadas. As orientações recomendadas para as edificações são para o noroeste, mais especificamente voltada para os azimutes 295° - 305° para a edificação 1 e 300° - 305° para as edificações 2 e 3. Tal recomendação vai de acordo com a direção com maior incidência de irradiação, 300° , como apontado pelo arquivo climático.

Para as aberturas na fachada, a recomendação é que janelas representem 95% da área das fachadas para a edificação 1 e 90-95% para a edificação 2. Como mostrado pelos ícones em laranja na Figura 4.15, a utilização de aberturas menores acarretou em um pior desempenho energético nestas duas edificações. Já para a edificação 3, o cenário observado é o oposto: a integração de sistemas fotovoltaicos foi mais vantajosa em janelas menores, ocupando 50% da fachada.

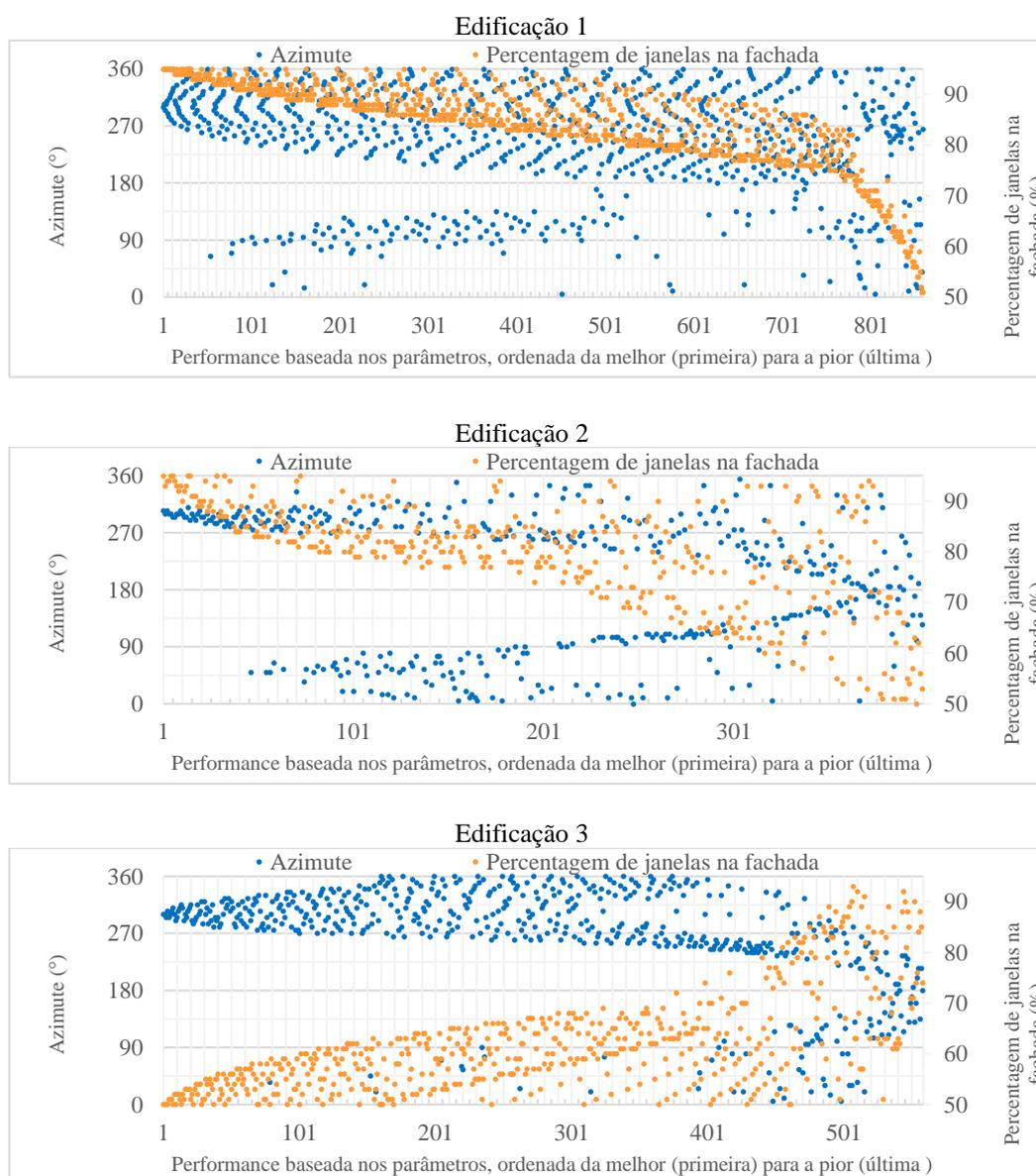


Figura 4.15 - Azimute e percentagem de janelas para as edificações assinaladas considerando apenas uma fachada fotovoltaica, na cidade de Brasília.

Fonte: Elaboração própria.

4.8. Latitude 15° - Zona Bioclimática 06 – Goiânia

O clima de Goiânia (GO) é tropical semiúmido, com grandes semelhanças ao de Brasília. Pode-se atribuir tais semelhanças à curta distância que separa as cidades, sendo um percurso de aproximadamente 200 km de carro. Goiânia possui duas estações nitidamente distintas, sendo de outubro a abril registrado clima quente e úmido, enquanto o restante do ano é tipicamente seco (Júnior *et al.*, 2011). O azimute 300° é a direção com maior incidência de irradiação, característica demonstrada na Figura 4.16.

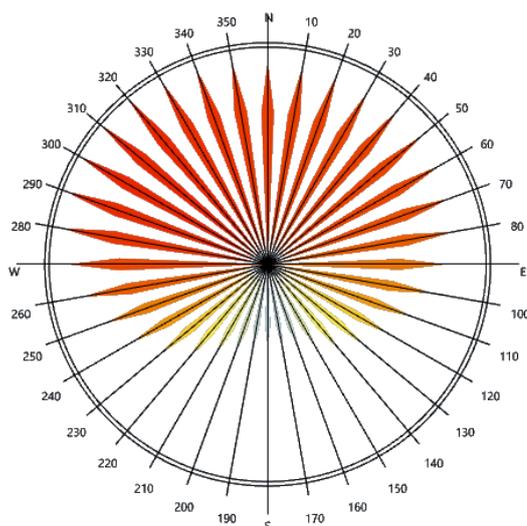


Figura 4.16 – Direções relativas à irradiação para Goiânia.
Fonte: Arquivo Climático.

Apesar das semelhanças com Brasília mencionadas acima, percebe-se que Goiânia apresentou um menor potencial para conservação de energia. No panorama nacional, alcançou a quinta maior redução da demanda energética final para as edificações 2 e 3 e a quarta maior para a edificação 1. Um dos maiores potenciais da cidade é a geração de energia pelos sistemas fotovoltaicos integrados, apresentando os valores mais altos do país para a edificação 1 e o segundo melhor para as edificações 2 e 3.

Tabela 4.8 – Orientação e porcentagem de janelas obtidas para a otimização da redução da demanda energética final considerando o contexto climático de Goiânia.

Edificação	Geometria		Impacto no consumo de energia		Redução na demanda energética final	
	Azimute (°)	% Janelas	Redução no consumo de HVAC (kWh/ano)	Geração de energia pelo OPV (kWh/ano)	%	kWh/m ² OPV/ano
E1 F1	290-315	95	154112,00	21269,71	8,00	153,84
E2 F1	295-310	90-95	53751,50	10603,08	7,58	119,18
E3 F1	295-310	50	11089,70	2816,35	10,24	92,71

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 4.17 apresenta todas as combinações de azimute e percentagem de janelas da fachada realizadas pela otimização de edificações com uma fachada fotovoltaica para a cidade de Goiânia, variando da melhor (primeira) para a pior (última). Os valores destas variáveis recomendados para Goiânia foram semelhantes aos especificados para Brasília, explicitando as semelhanças entre as cidades. É indicado que as fachadas fotovoltaicas sejam orientadas para o intervalo composto pelos azimutes 295 a 310°.

Com relação as aberturas, as sugestões são de grandes vão para as edificações 1 e 2. É recomendado que janelas representem 95% e entre 90-95% das fachadas, respectivamente. A utilização de aberturas menores para estas edificações resulta em um desempenho energético menos satisfatório, como indicado pelos ícones em laranja na figura abaixo. A edificação 3 é novamente a exceção, onde aberturas menores – mais precisamente de 50% da fachada – acarretam o melhor desempenho energético da construção.

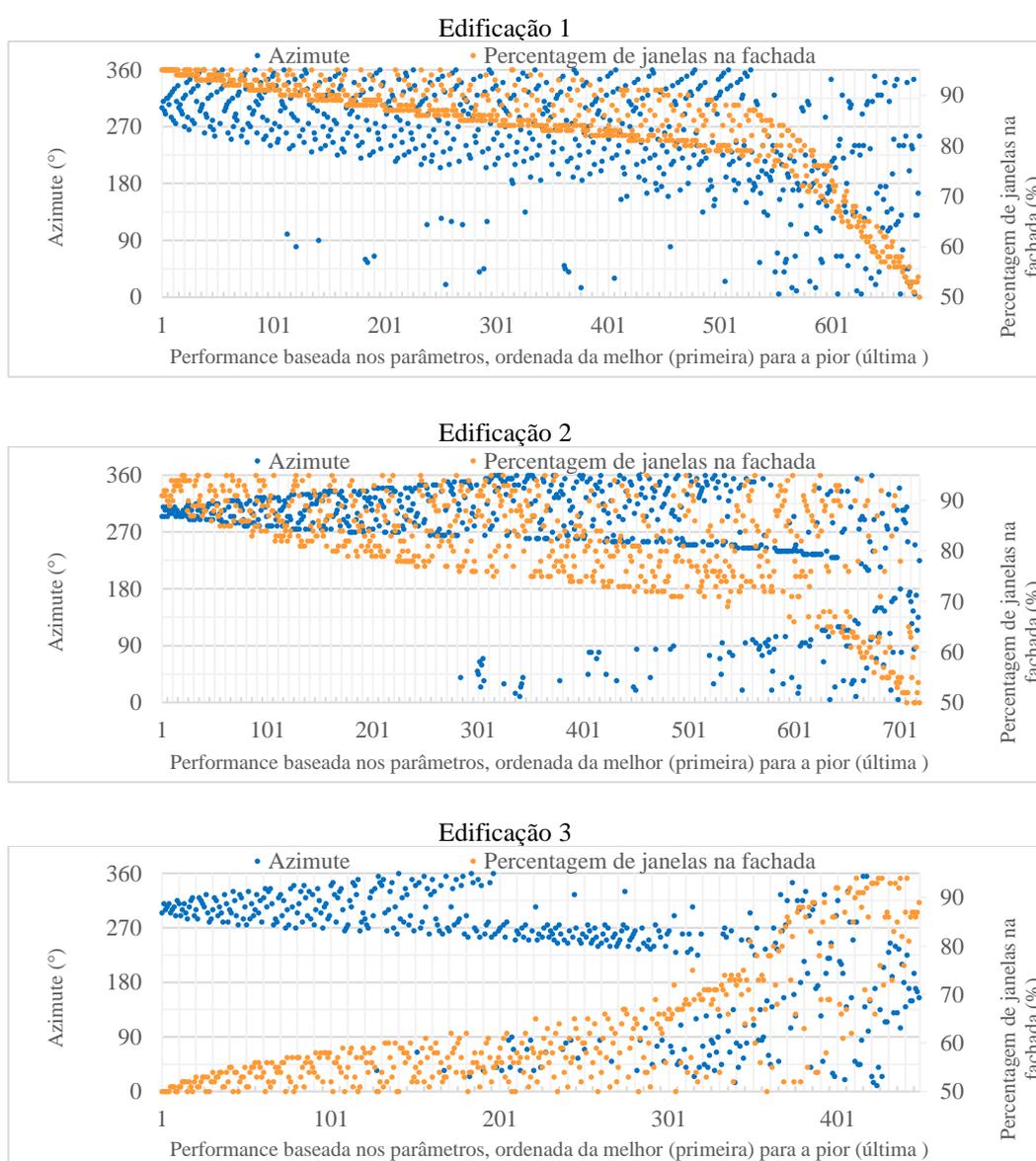


Figura 4.17 - Azimute e percentagem de janelas para as edificações assinaladas considerando apenas uma fachada fotovoltaica, na cidade de Goiânia.

Fonte: Elaboração própria.

4.9. Latitude 15° - Zona Bioclimática 07 - Cuiabá

Localizada no interior do país, Cuiabá (MT) apresenta clima tropical semiúmido, com os meses de maio a setembro sendo os mais quentes e atingindo temperaturas de até 36°C (Santos, 2013). A cidade conta com duas estações do ano bem definidas, uma seca (outono-inverno) e outra chuvosa (primavera-verão) (Santos, 2013). Os níveis de irradiação mostrados na Figura 4.18 seguem os mesmos padrões presentes nas demais cidades da latitude 15°: pouca incidência solar na fachada sul e a detecção dos maiores índices de irradiação sendo originados da direção 290°-300°.

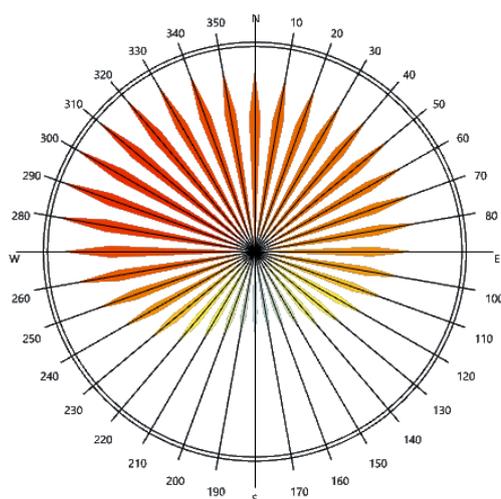


Figura 4.18 – Direções relativas à irradiação para Cuiabá.
Fonte: Arquivo Climático.

A Tabela 4.9. demonstra os valores da redução no consumo de HVAC, da geração de energia e da redução da demanda energética final obtidos após as simulações e otimizações da integração de sistemas fotovoltaicos integrados a edificações em Cuiabá. A cidade se destaca por apresentar a maior redução no consumo de HVAC em todo o país. Contudo, apresenta índices consideravelmente baixos quando analisada a redução da demanda final de energia em porcentagem, fator atribuído à alta demanda do sistema devido ao clima quente apontado por Santos (2013). A redução atingida variou entre 5,21% para a edificação 2 e 6,91% para a edificação 3.

Tabela 4.9 – Orientação e porcentagem de janelas obtidas para a otimização da redução da demanda energética final considerando o contexto climático de Cuiabá.

Edificação	Geometria		Impacto no consumo de energia		Redução na demanda energética final	
	Azimute (°)	% Janelas	Redução no consumo de HVAC (kWh/ano)	Geração de energia pelo OPV (kWh/ano)	%	kWh/m ² OPV/ano
E1 F1	285-310	95	177031,00	20712,77	5,49	173,46
E2 F1	290-305	94-95	56827,00	10356,38	5,21	119,12
E3 F1	300	50	11529,08	2725,36	6,91	95,03

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 4.19 demonstra as tendências de percentagem de janelas e orientação das edificações para Cuiabá, representadas pelos ícones laranjas e azuis, respectivamente. Percebe-se que enquanto as edificações 1 e 2 aceitam um intervalo de orientação de 285-310° e 290-305°, respectivamente, a edificação 3 deve ser orientada para o azimute 300° precisamente. Tais direções são compatíveis com as identificadas como as com irradiação mais favoráveis na cidade.

Com relação as aberturas das janelas, recomenda-se aberturas de grandes proporções para as edificações 1 e 2, na faixa dos 95% e entre 94-95%, respectivamente. A edificação 3 repete a tendência de baixas aberturas, tendo como recomendação de aberturas em apenas 50% da fachada. O aumento das janelas na edificação 3 ou a redução das mesmas nas edificações 1 e 2 acarretaram em construções menos eficientes energeticamente.

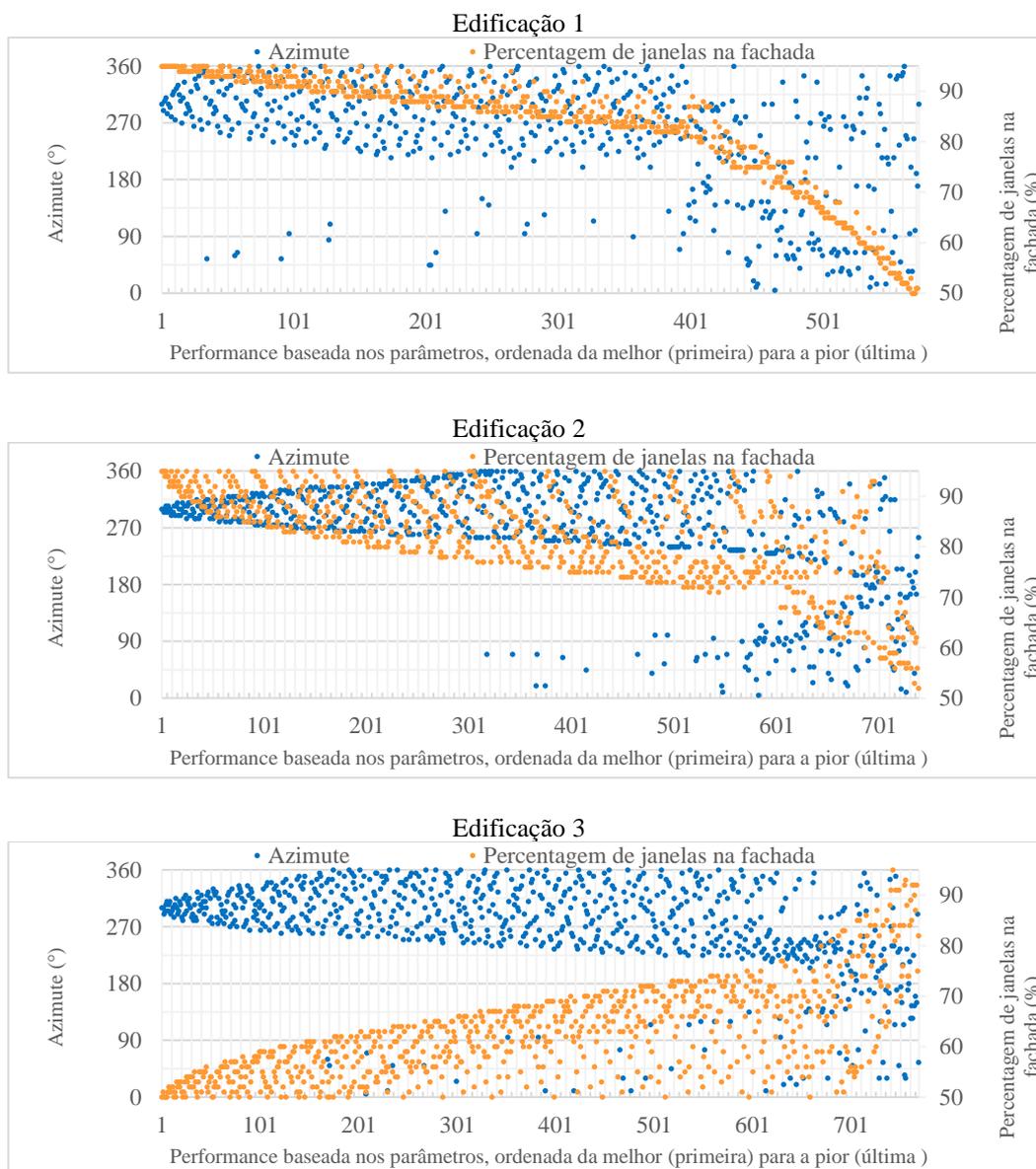


Figura 4.19 - Azimute e percentagem de janelas para as edificações assinaladas considerando apenas uma fachada fotovoltaica, na cidade de Cuiabá.

Fonte: Elaboração própria.

4.10. Latitude 20° - Zona Bioclimática 03 – Belo Horizonte

Belo Horizonte (MG) é uma cidade localizada no interior do país que apresenta clima misto continental, apresentando verões quentes e chuvosos e invernos suaves e secos (Assis, 2005). Sua topografia é acidentada, tendo altitude média de 875m (Vilela, 2007). Os níveis de irradiação extraídos do arquivo climático de Belo Horizonte são indicados na Figura 4.20. Estes dados nos permitem afirmar que, se por um lado a fachada sul é possuí minimamente influência dos raios solares, o quadrante com maior incidência solar é o noroeste, em especial no azimute 310°.

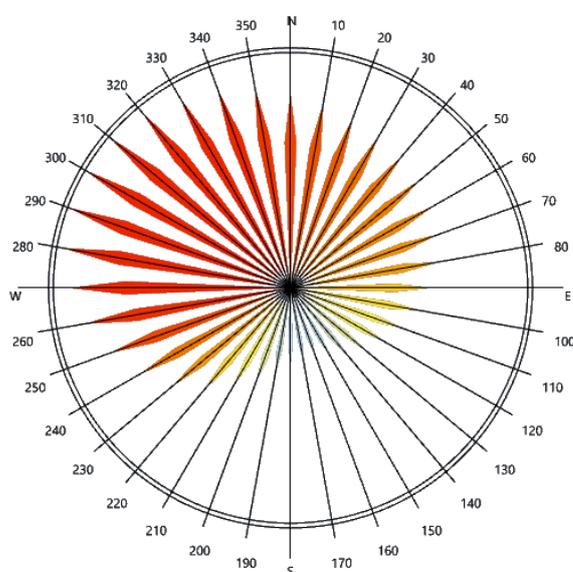


Figura 4.20 – Direções relativas à irradiação para Belo Horizonte.
Fonte: Arquivo Climático.

O potencial na redução da demanda energética final após a integração de sistemas fotovoltaicos a edificações é apresentado na Tabela 4.10. Baseado em tais dados, é possível afirmar que Belo Horizonte se destaca no cenário nacional por apresentar o terceiro maior potencial de conservação de energia para todas as edificações, se mostrando menos eficiente apenas que Brasília e São Paulo. A redução de energia registrada variou entre 8,91% para a edificação 1, alcançando até 12,25% para a edificação 3. Destaca-se a pequena diferença de potencial entre as duas primeiras edificações, com uma variação de apenas 0,03%.

Tabela 4.10 – Orientação e porcentagem de janelas obtidas para a otimização da redução da demanda energética final considerando o contexto climático de Belo Horizonte.

Edificação	Geometria		Impacto no consumo de energia		Redução na demanda energética final	
	Azimute (°)	% Janelas	Redução no consumo de HVAC (kWh/ano)	Geração de energia pelo OPV (kWh/ano)	%	kWh/m ² OPV/ano
E1 F1	300-315	95	111653,00	20731,78	8,91	116,13
E2 F1	305-315	93-95	41298,60	10350,71	8,94	92,56
E3 F1	310-315	50	8308,08	2729,18	12,25	73,58

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 4.21 indica as combinações desejáveis das variáveis (azimute, representado pelos ícones azuis, e percentagem de janelas na fachada, em laranja) para obtenção do melhor desempenho energético das edificações. Estes dados estão ordenados da melhor combinação (primeira) para a pior (última). Para todas as edificações, as melhores orientações são voltadas para o noroeste. As orientações recomendadas são no intervalo de $300-315^\circ$ para a edificação 1, de $305-315^\circ$ para a edificação 2 e de $310-315^\circ$ para e edificação 3. Analisando os valores em comum, a diretriz geral de orientação para todas as edificações seria entre $310-315^\circ$.

Sob a ótica da percentagem de janelas, a recomendação é de grandes vãos para as edificações 1 e 2. Estes devem ser de 95% e entre 93-95%, respectivamente, para a maior conservação energética. A utilização de valores abaixo destes especificados acarreta necessariamente em uma performance energética menos satisfatória. A exceção é a edificação 3, onde janelas de 50% são aconselhadas. A especificação de janelas com área maior que tal valor também tem impacto negativo na performance da edificação.

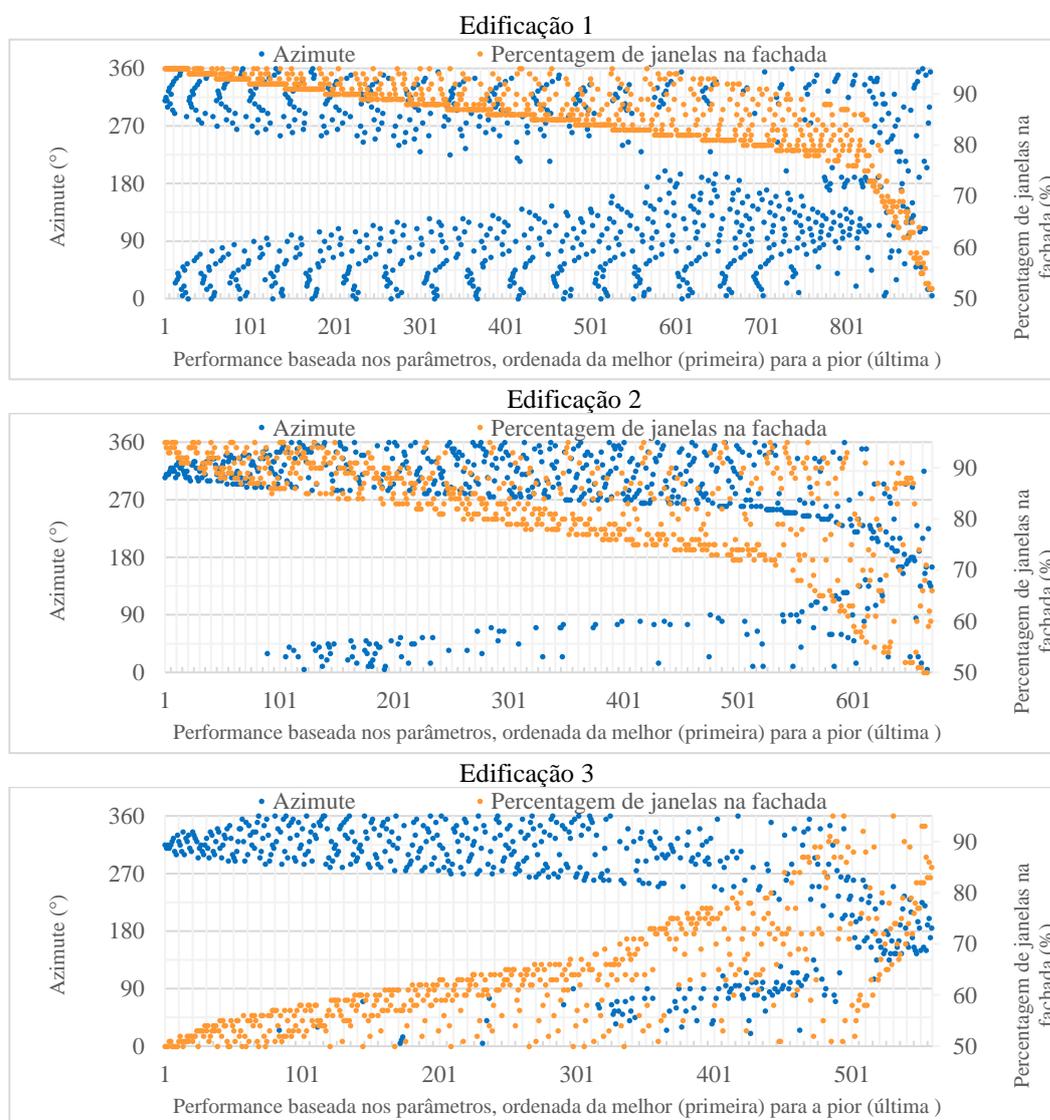


Figura 4.21 - Azimute e percentagem de janelas para as edificações assinaladas considerando apenas uma fachada fotovoltaica, na cidade de Belo Horizonte.

Fonte: Elaboração própria.

4.11.

Latitude 20° - Zona Bioclimática 06 – Campo Grande

Campo Grande (MS) é uma cidade do interior brasileiro que sofre pela presença constante de massas tropicais atlânticas, continentais e equatoriais continentais (Roseghini, 2013). Como consequência, altas temperaturas e chuvas são frequentes nos períodos da primavera e verão (Roseghini, 2013). A Figura 4.22 aponta os níveis de irradiação nas fachadas de Campo Grande, sendo tais dados extraídos do arquivo climático local. Com base nas informações contidas na figura, percebe-se a concentração de irradiação no quadrante noroeste, mas especificamente nas fachadas direcionadas para o azimute 310°-320°.

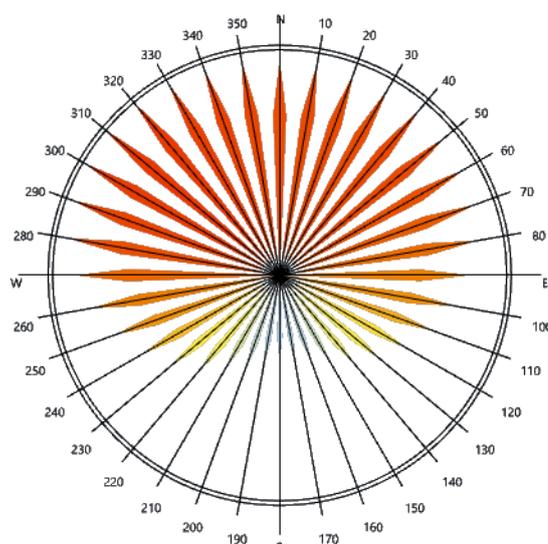


Figura 4.22 – Direções relativas à irradiação para Campo Grande.
Fonte: Arquivo Climático.

O potencial na redução da demanda energética final após a integração de sistemas fotovoltaicos a edificações em Campo Grande é trazido pela Tabela 4.11. Destaca-se que este parâmetro alcançou valores acima da média nacional, sendo capaz de obter uma economia energética entre 7,62% e 10,48%, para as edificações 1 e 3 respectivamente. Tal fator foi diretamente influenciado pela eficiente geração de energia fotovoltaica de todas as edificações, estando entre os quatro melhores valores entre as cidades simuladas.

Tabela 4.11 – Orientação e porcentagem de janelas obtidas para a otimização da redução da demanda energética final considerando o contexto climático de Campo Grande.

Edificação	Geometria		Impacto no consumo de energia		Redução na demanda energética final	
	Azimute (°)	% Janelas	Redução no consumo de HVAC (kWh/ano)	Geração de energia pelo OPV (kWh/ano)	%	kWh/m ² OPV/ano
E1 F1	315	95	157079,00	20802,71	7,74	156,04
E2 F1	315	95	55035,40	10401,35	7,62	114,80
E3 F1	315	50-52	11442,60	2791,94	10,48	94,90

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 4.23 apresenta todas as combinações de azimute e percentagem de janelas da fachada realizadas pela otimização de edificações com uma fachada fotovoltaica para a cidade de Campo Grande, variando da melhor (primeira) para a pior (última). A particularidade da cidade é que a otimização demonstrou um mesmo e único azimute recomendado para todas as edificações, sendo este de 315° . As orientações que se mostraram menos eficientes foram aquelas entre 90° - 270° , ou seja, voltados para as direções com menos incidência de irradiação segundo o arquivo climático.

A tendência de maiores aberturas observada nas edificações 1 e 2 é mantida, sendo em Campo Grande recomendada que as janelas representem 95% da área de fachada para ambas as geometrias. As configurações menos eficientes para estas edificações são aquelas que apresentam menos de 90% de janelas nas fachadas. Já para a edificação 3, a indicação é de aberturas menores. Nesta cidade é aceitável que entre 50%-52% da fachada seja ocupada por janelas com sistemas fotovoltaicos integrados.

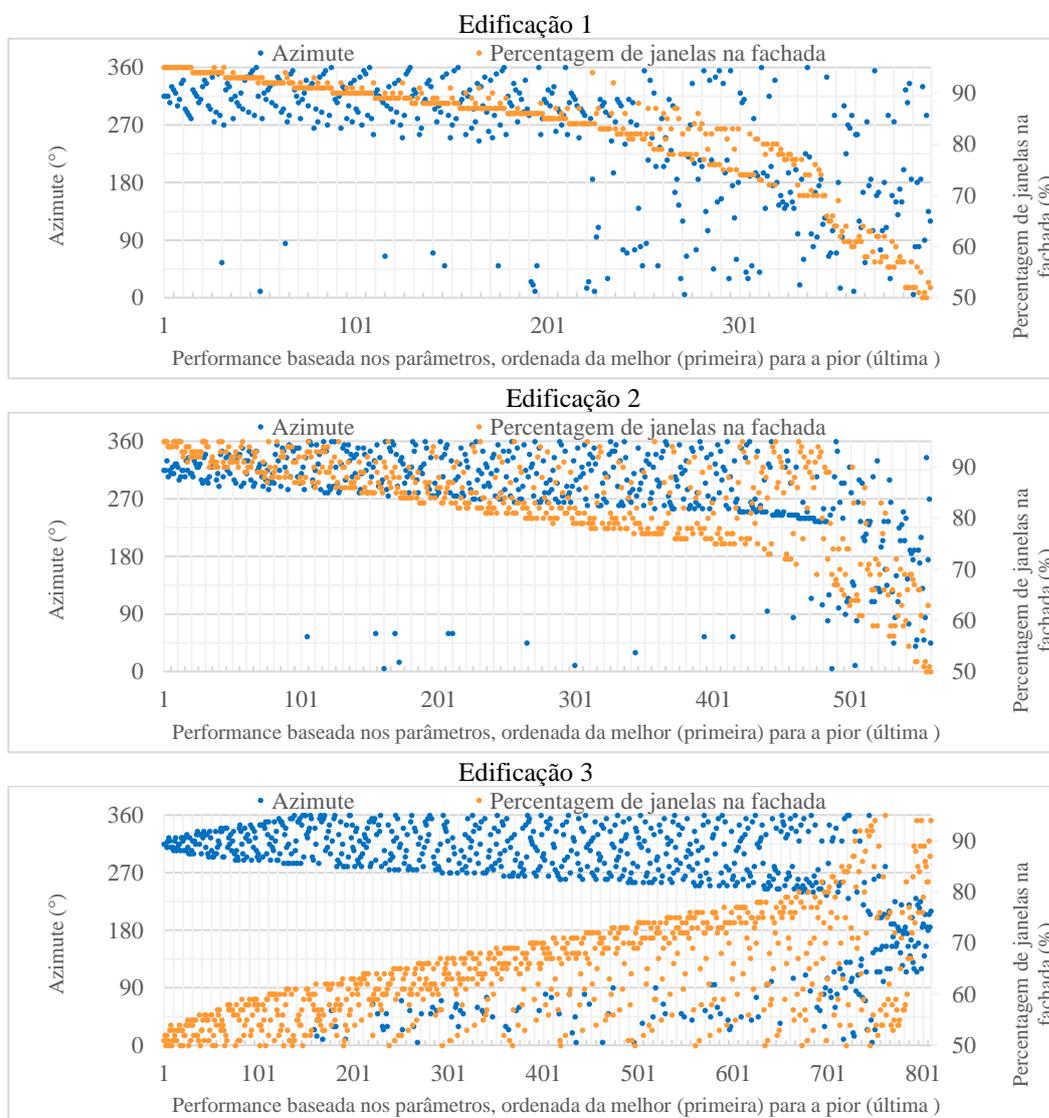


Figura 4.23 - Azimute e percentagem de janelas para as edificações assinaladas considerando apenas uma fachada fotovoltaica, na cidade de Campo Grande.

Fonte: Elaboração própria.

4.12.

Latitude 20° - Zona Bioclimática 08 – Rio de Janeiro

O Rio de Janeiro (RJ) é uma cidade litorânea com clima quente e úmido. Na primavera e verão, são frequentes o avanço de frentes frias vindas de Massas Polares Atlânticas, resultando em períodos mais chuvosos (Armond e Neto, 2017). O período de maio a novembro é o mais seco e julho e agosto apresentam as temperaturas mais amenas do ano (Armond e Neto, 2017).

A Figura 4.24 mostra os níveis de irradiação da cidade, extraídos diretamente do arquivo climático local. São indicados maior incidência de irradiação no período vespertino, quando a trajetória solar se encontra a noroeste.. As direções com maior irradiação são as contidas no intervalo compreendido entre os azimutes 320°-330°.

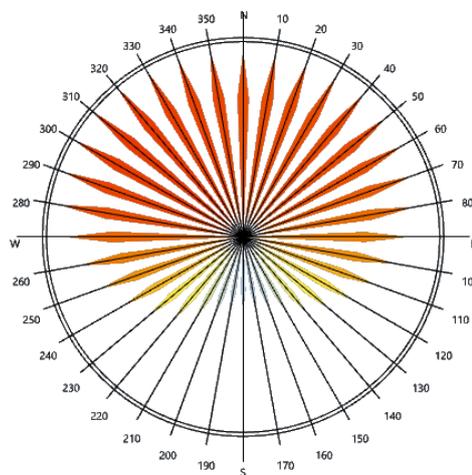


Figura 4.24 – Direções relativas à irradiação para o Rio de Janeiro.
Fonte: Arquivo Climático.

O Rio de Janeiro foi a única cidade em que as seis configurações de fachadas foram simuladas para todas as três edificações, totalizando 18 simulações. O objetivo de tal investigação foi a obtenção de um panorama mais detalhado sobre o desempenho energético da integração de sistemas fotovoltaicos a fachadas, de forma a definir o *layout* da envoltória da edificação a ser extrapolado nas demais cidades.

A edificação 1 apresentou potencial mediano para conservação de energia em edificações com sistemas fotovoltaicos integrados a apenas uma fachada. Quando comparado com o resultado obtido por outras configurações de fachada, foi perceptível que a redução na demanda energética não cresceu diretamente proporcional ao aumento da área de fachada: se tal hipótese fosse confirmada, a edificação 1 com quatro fachadas fotovoltaicas apresentaria uma redução na demanda energética de 20,28%⁸, quando na verdade atingiu apenas 16,18%. O mesmo princípio foi observado para as edificações com duas ou três fachadas fotovoltaicas. Tal fator pode ser justificado pelo fato que, com a adição de fachadas fotovoltaicas na edificação, fica inviável orientar ambas para o azimute ótimo, acarretando na perda da eficiência.

⁸ A área de fachada da edificação com quatro fachadas fotovoltaicas é três vezes maior que a da edificação com apenas uma fachada fotovoltaica. Portanto, se o crescimento da eficiência fosse proporcional, essa apresentaria uma redução na demanda energética final de $3 \times 6,76\% = 20,28\%$.

Tabela 4.12 – Orientação e porcentagem de janelas da edificação 01 com integração de filmes fotovoltaicos orgânicos em diferentes fachadas no Rio de Janeiro para a obtenção da maior redução na demanda energética final.

Edificação	Geometria		Impacto no consumo de energia		Redução na demanda energética final	
	Azimute (°)	% Janelas	Redução no consumo de HVAC (kWh/ano)	Geração de energia pelo OPV (kWh/ano)	%	kWh/m ² OPV/ano
E1 1F	330	95	190117,20	18776,1	6,76	150,30
E1 2F _{MA}	315	95	221813,70	22608,81	9,83	145,86
E1 2F _{TA}	0	95	279450,02	26341,51	9,98	148,02
E1 2F _P	275	95	279738,30	31516,65	9,78	108,82
E1 3F	335	95	365001,18	33927,59	13,05	145,21
E1 4F	85-110	95	454800,20	44252,10	16,18	120,04

Fonte: Elaboração própria.

Como observado na edificação anterior, a edificação 2 não apresentou redução na demanda energética final proporcional ao crescimento da área de fachada. Contudo, os dados apresentados na Tabela 4.13 indicam que esta geometria atingiu a maior conservação de energia para o Rio de Janeiro, alcançando uma redução de 24,04% da demanda energética somente pela integração dos filmes fotovoltaicos nas fachadas da edificação. Por apresentar um pavimento-tipo quadrado e conseqüentemente todas as suas faces apresentarem a mesma área, a edificação 2 também permite uma comparação entre os *layouts* da envoltória com duas fachadas fotovoltaicas: a escolha pela integração das células fotovoltaicas em fachadas paralelas resultou em uma edificação menos eficiente tanto com relação ao consumo de energia pelo HVAC quando na geração de energia fotovoltaica. Desta forma, recomenda-se que a integração de sistemas fotovoltaicos a edificações se dê em duas fachadas adjacentes, e não paralelas.

Tabela 4.13 – Orientação e porcentagem de janelas da edificação 02 com integração de filmes fotovoltaicos orgânicos em diferentes fachadas no Rio de Janeiro para a obtenção da maior redução na demanda energética final.

Edificação	Geometria		Impacto no consumo de energia		Redução na demanda energética final	
	Azimute (°)	% Janelas	Redução no consumo de HVAC (kWh/ano)	Geração de energia pelo OPV (kWh/ano)	%	kWh/m ² OPV/ano
E2 1F	320-330	95	71702,80	9417,47	6,84	109,27
E2 2F _{MA A}	305-310	95	144540,99	18126,35	13,88	110,89
E2 2F _{TA}	35-40	95	144540,99	18126,35	13,88	110,89
2F _P	85-95	90-92	100198,88	15426,57	9,37	74,36
	275-265	90-92	100198,88	15426,57	9,37	74,36
E2 3F	0-10	95	213767,00	24768,54	20,75	110,53
E2 4F	45-55	95	247801,24	28822,28	24,04	96,04
	135-145	95	247801,24	28822,28	24,04	96,04
	225-235	95	247801,24	28822,28	24,04	96,04

Fonte: Elaboração própria.

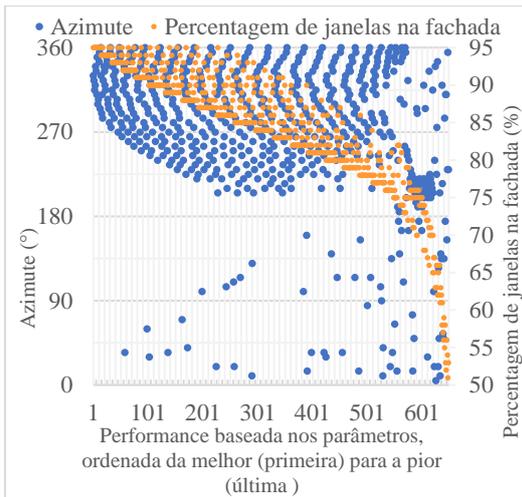
A edificação 3 apresentou o maior potencial de conservação de energia entre todas as cidades onde as simulações foram realizadas. Para o contexto climático do Rio de Janeiro, a edificação se mostrou a mais eficiente para integração de sistemas fotovoltaicos em uma ou duas fachadas. Contudo, não foi a mais eficiente nas composições da envoltória da edificação com três ou quatro fachadas fotovoltaicas. Mesmo assim, ressalta-se o alto desempenho atingido sob a ótica da redução da demanda energética final, sendo possível uma economia de energia que variou entre 9,15% e 23,26% para cenários com uma e quatro fachadas fotovoltaicas, respectivamente.

Tabela 4.14 – Orientação e porcentagem de janelas da edificação 03 com integração de filmes fotovoltaicos orgânicos em diferentes fachadas no Rio de Janeiro para a obtenção da maior redução na demanda energética final.

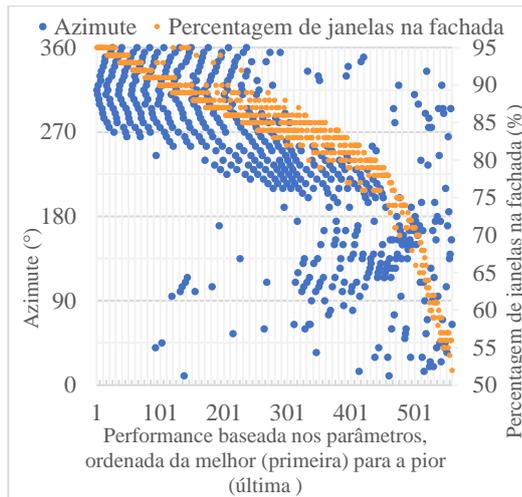
Edificação	Geometria		Impacto no consumo de energia		Redução na demanda energética final	
	Azimute (°)	% Janelas	Redução no consumo de HVAC (kWh/ano)	Geração de energia pelo OPV (kWh/ano)	%	kWh/m ² OPV/ano
E3 1F	320-335	50-55	16253,54	2723,80	9,15	82,00
E3 2F _{MA}	300-315	95	13583,15	3349,22	13,33	78,25
E3 2F _{TA}	25-35	52-55	24546,70	3902,17	13,96	81,92
E3 2F _P	90	50	22206,45	4146,93	12,56	60,20
E3 3F	340-345	54-56	32452,27	4924,15	18,61	81,93
E3 4F	265-270	55-57	41116,80	6518,00	23,26	67,44

Fonte: Elaboração própria.

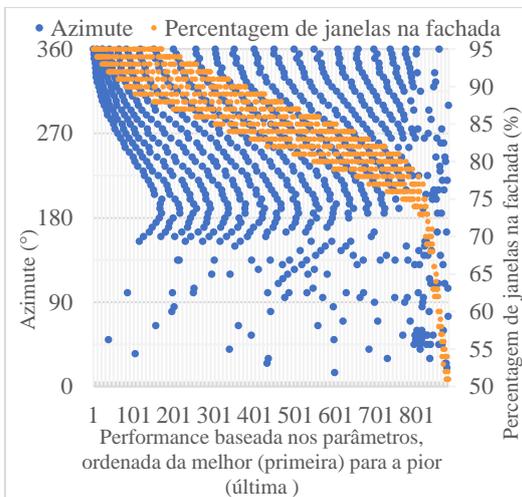
Para o Rio de Janeiro, as orientações recomendadas são variadas dependendo da composição de fachada, como mostrado nas Figuras 4.25-4.27:



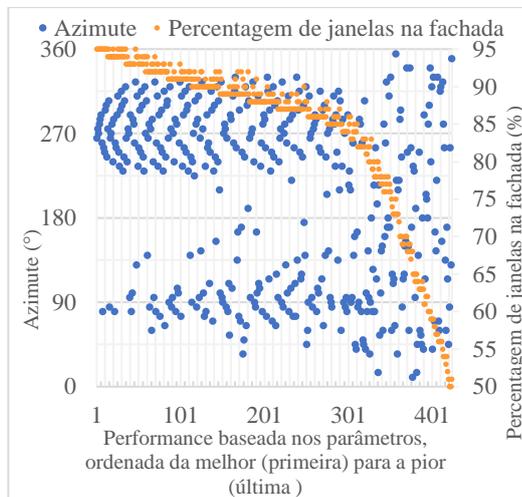
(a) Edifício 01 - 1 fachada fotovoltaica



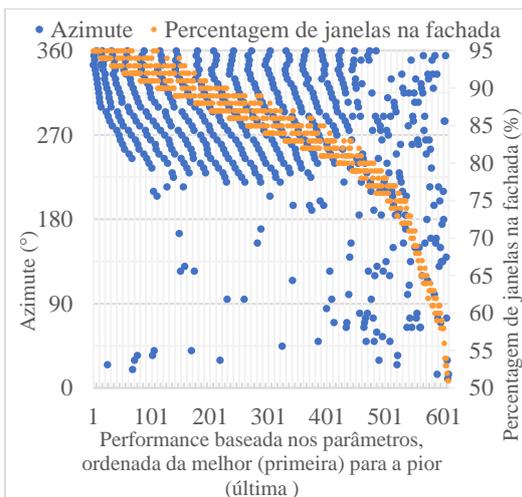
(b) Edifício 01 – 2 fachadas fotovoltaicas adjacentes, priorizando o sol da manhã



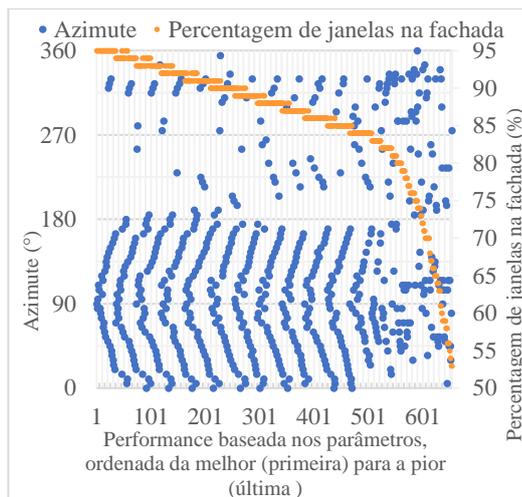
(c) Edifício 01 – 2 fachadas fotovoltaicas adjacentes, priorizando o sol da tarde



(d) Edifício 01 – 2 fachadas fotovoltaicas, paralelas



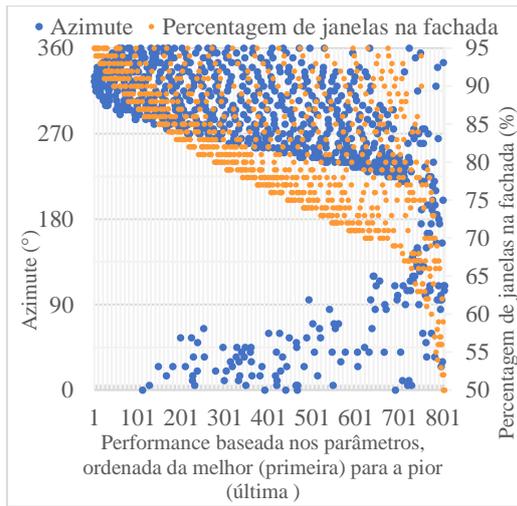
(e) Edifício 01 – 3 fachadas fotovoltaicas



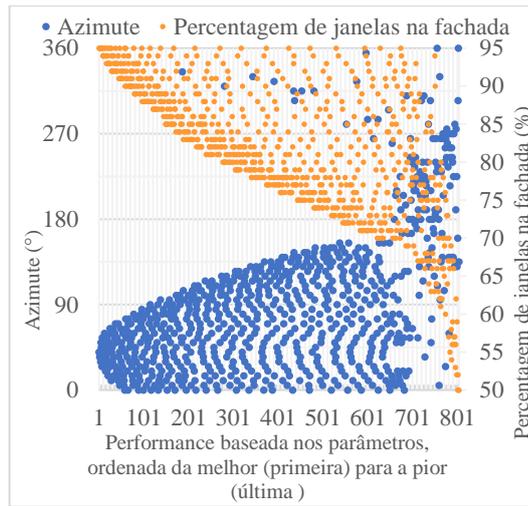
(f) Edifício 01 - 4 fachadas fotovoltaicas

Fig 4.25 - Azimute e percentagem de janelas na fachada obtido nas otimizações realizadas para o Edifício 01.

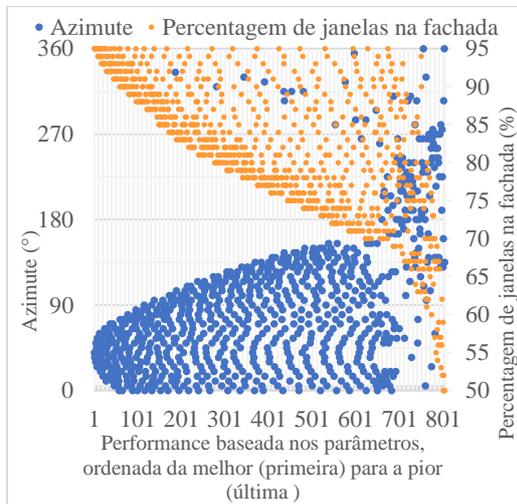
Fonte: Elaboração própria.



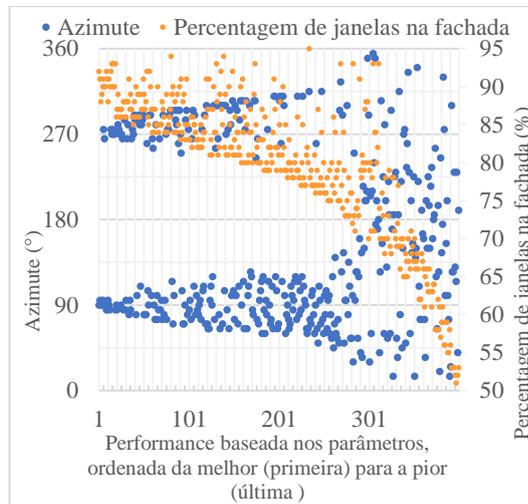
(a) Edifício 02 - 1 fachada fotovoltaica



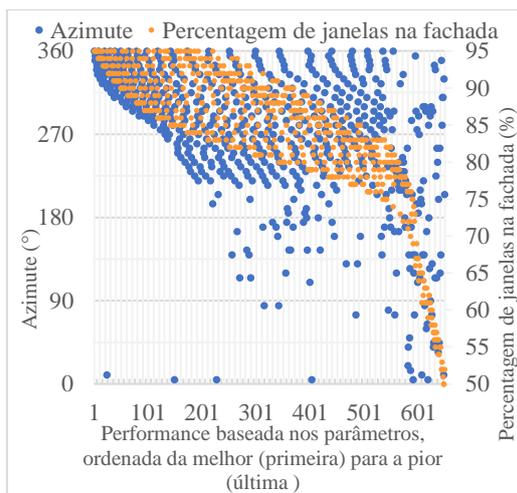
(b) Edifício 02 - 2 fachadas fotovoltaicas adjacentes, priorizando o sol da manhã



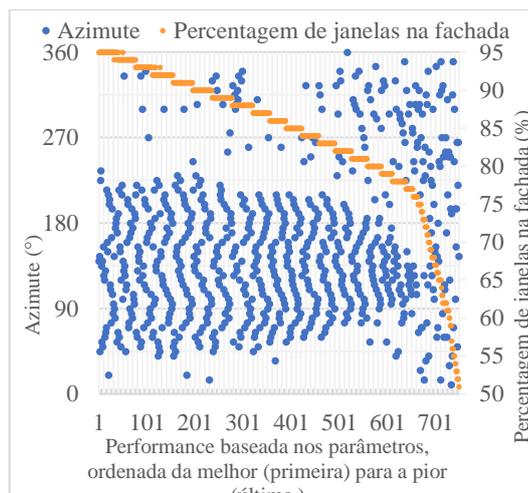
(c) Edifício 02 - 2 fachadas fotovoltaicas adjacentes, priorizando o sol da tarde



(d) Edifício 02 - 2 fachadas fotovoltaicas, paralelas



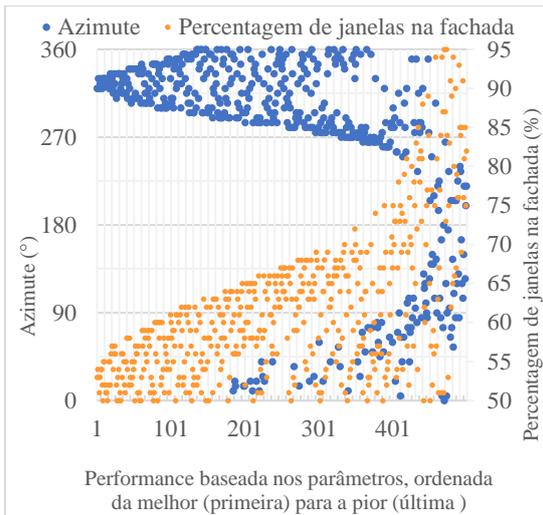
(e) Edifício 02 - 3 fachadas fotovoltaicas



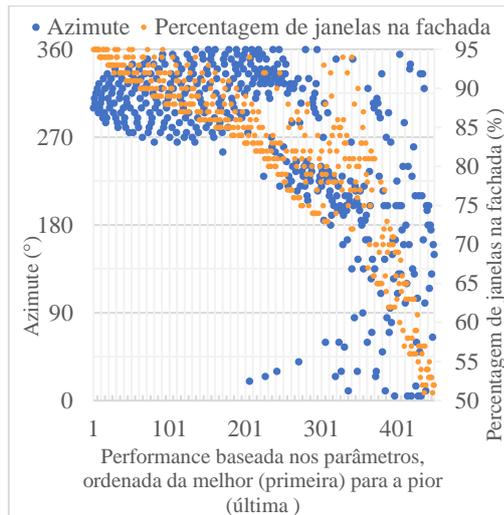
(f) Edifício 02 - 4 fachadas fotovoltaicas

Fig 4.26 - Azimute e percentagem de janelas na fachada obtido nas otimizações realizadas para o Edifício 02.

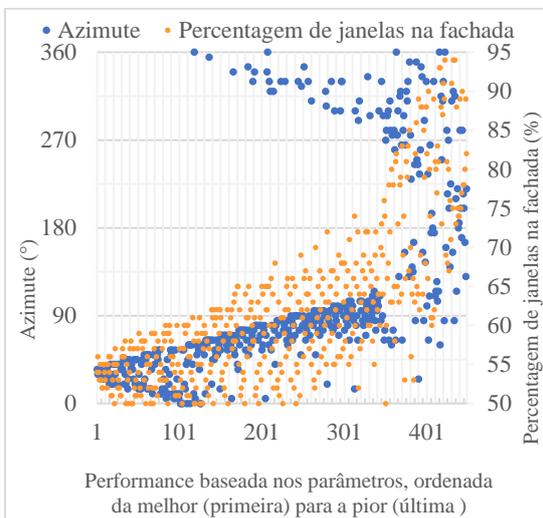
Fonte: Elaboração própria.



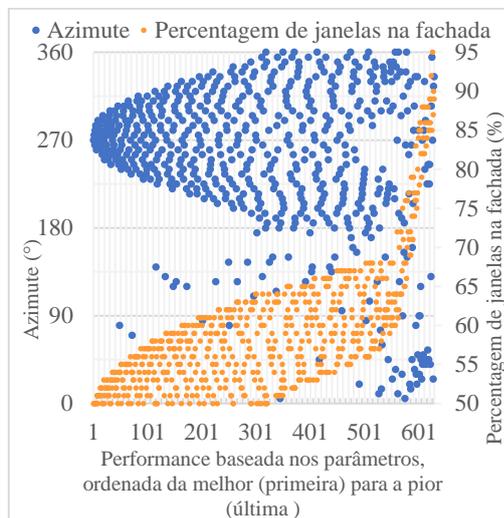
(a) Edifício 03- 1 fachada fotovoltaica



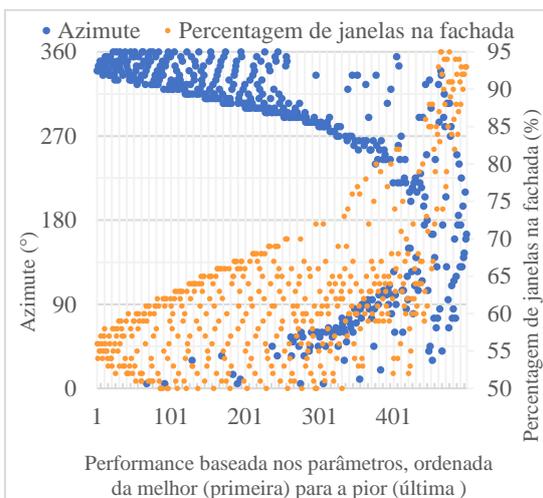
(b) Edifício 03 – 2 fachadas fotovoltaicas adjacentes, priorizando o sol da manhã



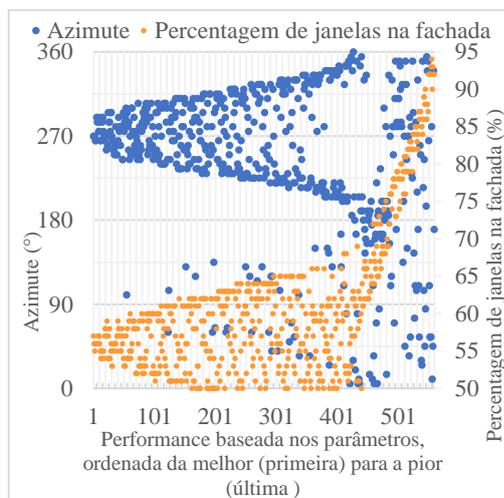
(c) Edifício 03 – 2 fachadas fotovoltaicas adjacentes, priorizando o sol da tarde



(d) Edifício 03 – 2 fachadas fotovoltaicas, paralelas



(e) Edifício 03 – 3 fachadas fotovoltaicas



(a) Edifício 03 - 4 fachadas fotovoltaicas

Fig 4.27- Azimute e percentagem de janelas na fachada obtido nas otimizações realizadas para o Edifício 03.

Fonte: Elaboração própria.

Considerando os dados apresentados, as diretrizes com relação a orientação das edificações para obtenção do melhor desempenho energético são:

- **Integração de sistemas fotovoltaicos em uma fachada (1F)** – deve-se orientar voltado para o azimute 330° , sendo aceitável o intervalo de 320° - 330° para a edificação 2 e 320° - 335° para a edificação 3.

- **Integração de sistemas fotovoltaicos em duas fachadas adjacentes, priorizando o sol da manhã ($2F_{MA}$)** – para a edificação 1, a orientação deve ser voltada para o azimute 315° , enquanto as edificações 2 e 3 devem ser orientadas para os azimutes 305° - 310° e 300° - 315° , respectivamente.

- **Integração de sistemas fotovoltaicos em duas fachadas adjacentes, priorizando o sol da tarde ($2F_{TA}$)** – para a edificação 1, a recomendação é a orientação para o norte absoluto (0°). Para a edificação 2, o intervalo aceitável é entre 35° - 40° , e para a edificação 3 as simulações e otimizações realizadas apontam que a orientação voltada para os azimutes 25° - 35° são as mais eficientes.

- **Integração de sistemas fotovoltaicos em duas fachadas paralelas ($2F_P$)** – a edificação deve ser voltada para a direção 275° , de forma a obter o melhor desempenho energético. A edificação 2 alcança a melhor performance quando orientada para os azimutes 85° - 95° e 265° - 275° , que como apresentados na Figura 4.28 indicam a mesma orientação. Por fim, a edificação 3 deve ser voltada para o leste (90°).

- **Integração de sistemas fotovoltaicos em três fachadas ($3F$)** – O azimute considerado para as edificações com três fachadas fotovoltaicas é o relativo à fachada central (a maior). Com isso, a edificação 1 deve ser voltada para o noroeste, mais especificamente o azimute 335° . Já a edificação 2 deve ser orientada para a direção norte/nordeste, representada pelos azimutes 0° - 10° . A edificação 3 obtêm a melhor performance quando perpendicular a orientação 340° - 345° .

- **Integração de sistemas fotovoltaicos em quatro fachadas ($4F$)** – O azimute considerado para as geometrias com quatro fachadas fotovoltaicas é o de uma das fachadas mais largas da edificação. A edificação 1 obteve o melhor desempenho quando voltada para o azimute 85° - 110° , enquanto a edificação 2 teve melhores resultados quando orientada para as direções 45° - 55° , 135° - 145° e 22° - 235° . Por fim, a edificação 3 deve ser perpendicular aos azimutes 265° - 270° para maior conservação energética.

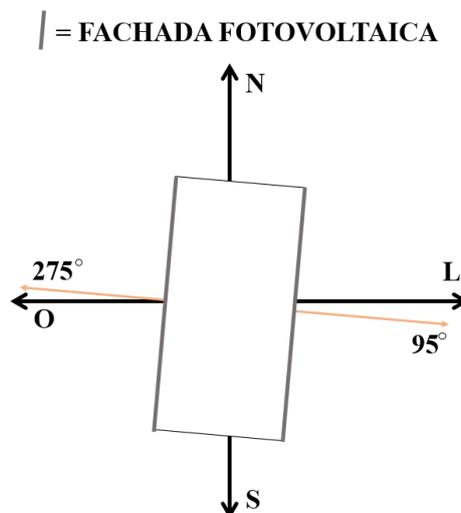


Fig 4.28 – Comparação do azimute 95° e 275° , que na realidade são os mesmos e só dependem do referencial considerado.

Fonte: Elaboração própria.

Observando as configurações de fachadas julgadas ótimas, é importante ressaltar que em todos os *layouts* otimizados pelo menos uma fachada da edificação se encontra voltada para o noroeste, aquela com maior incidência de irradiação de acordo com o arquivo climático.

Com relação ao percentual de aberturas na fachada, as diretrizes gerais são de 95% de aberturas para a edificação 1 em todas as configurações de fachada. Para a edificação, este valor se mantém constante em 95%, sendo recomendadas aberturas de 90-92% somente para edificações com duas fachadas fotovoltaicas paralelas. Com relação a edificação 3, houve uma variação maior da porcentagem de aberturas a depender da configuração de fachada, tendendo para números entre 50-57%. A exceção é o *layout* que prioriza o sol da manhã, que para apresentar o melhor desempenho necessita que 95% das suas vedações verticais sejam compostas por janelas.

4.13. Latitude 25° - Zona Bioclimática 01 – Curitiba

A cidade de Curitiba (PR) está localizada no interior do país, situada nas proximidades do trópico de Capricórnio a aproximadamente 900m de altura com relação ao nível do mar (Mendonça e Castelhana, 2016). Seu clima é considerado tropical de altitude, apresentando temperaturas mais baixas ao longo do ano e chuvas mais concentradas no verão (Mendonça e Castelhana, 2016).

Os dados contidos no arquivo climático e indicados na Figura 4.29 apresentam níveis mais baixos de irradiação quando comparados a maioria das cidades investigadas, evidente pelas tonalidades menos avermelhadas. Contudo, é observada novamente a tendência de concentração de irradiação no quadrante noroeste, sendo os maiores níveis detectados no intervalo compreendido pelos azimutes 320°-330°.

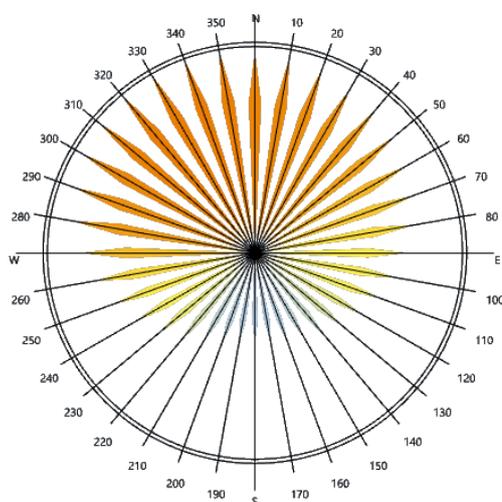


Figura 4.29 – Direções relativas à irradiação para Curitiba.
Fonte: Arquivo Climático.

O potencial na redução da demanda energética final trazido pela integração de sistemas fotovoltaicos a edificações em Curitiba é apresentado na Tabela 4.15. Os resultados demonstram que tanto a redução no consumo de HVAC quanto a geração de energia pelos filmes fotovoltaicos foram medianos quando comparados com as demais cidades investigadas. A exceção é a geração de energia por parte da edificação 3, que apresentou o maior potencial no cenário nacional.

Tabela 4.15 – Orientação e porcentagem de janelas obtidas para a otimização da redução da demanda energética final considerando o contexto climático de Curitiba.

Edificação	Geometria		Impacto no consumo de energia		Redução na demanda energética final	
	Azimute (°)	% Janelas	Redução no consumo de HVAC (kWh/ano)	Geração de energia pelo OPV (kWh/ano)	%	kWh/m ² OPV/ano
E1 F1	320-335	95	63782,00	15547,66	5,77	42,31
E2 F1	320-335	95	31895,00	7873,83	7,32	42,14
E3 F1	320-335	93-55	11612,00	3938,91	10,18	26,93

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 4.30 apresenta todas as combinações de azimute e percentagem de janelas da fachada realizadas pela otimização de edificações com uma fachada fotovoltaica para a cidade de Curitiba, variando da melhor (primeira) para a pior (última). Percebe-se uma semelhança entre as três edificações, tendo estas o mesmo o azimute recomendado (320° - 335°). Outras orientações eficientes são no quadrante noroeste, entre os azimutes 270° - 360° , sendo percebida uma considerável redução na performance da edificação quando voltada para as direções 90° - 270° .

Curitiba foi a única cidade em que para todas as edificações se recomenda grandes aberturas, inclusive a edificação 3. Tal especificidade pode ser atribuído ao seu clima frio e a necessidade de utilização do sistema de aquecimento artificial dos meses mais frios, sendo este contabilizado no consumo energético como estabelecido pela NBR 15220, e também tomando proveito da estratégia projetual de aquecimento solar (aquecimento passivo). As grandes janelas na edificação 3 provavelmente foram o fator que resultou no excelente desempenho com relação a geração de energia quando comparada as outras edificações, não por apresentar uma maior incidência solar mas sim devido a maior área de células disponível.

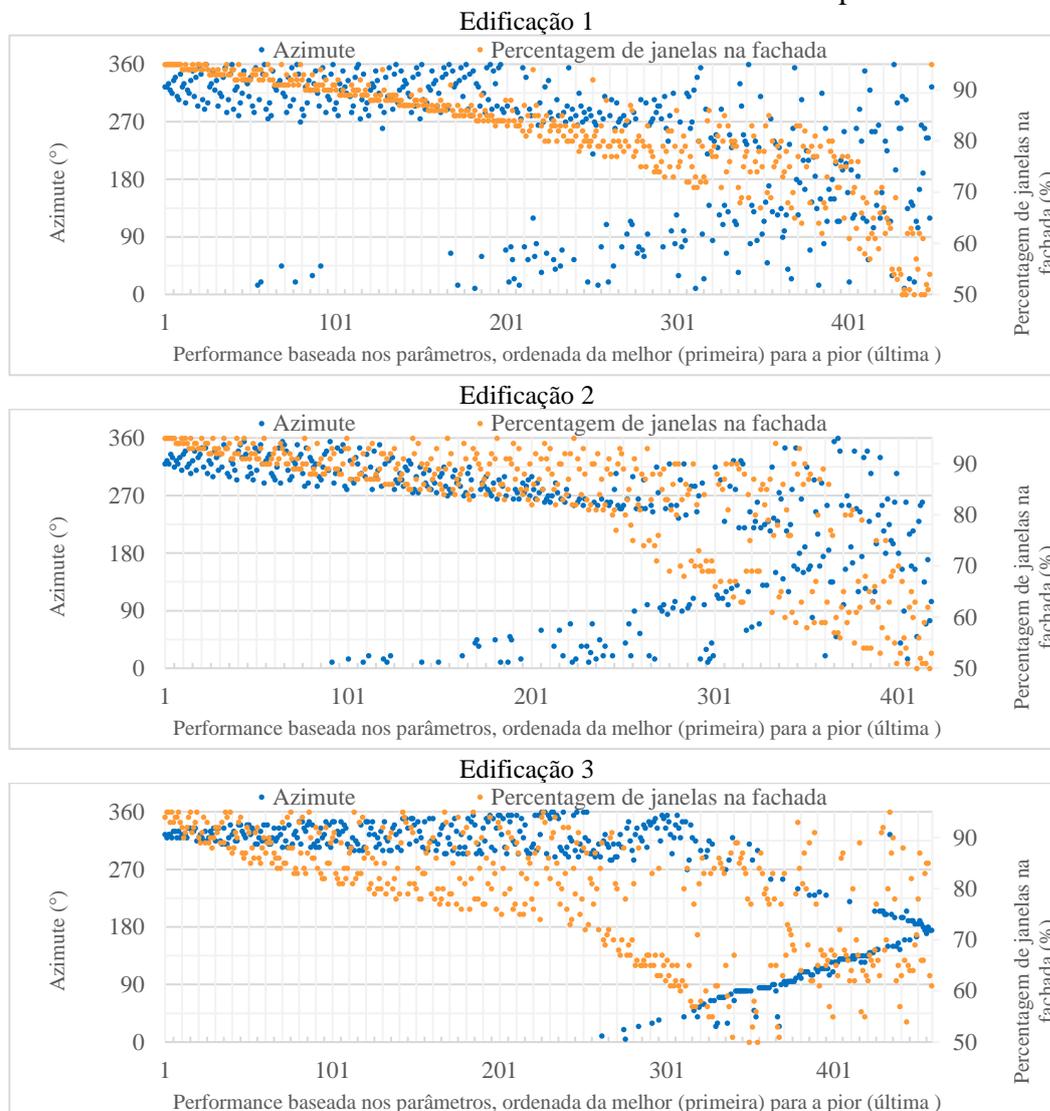


Figura 4.30 - Azimute e percentagem de janelas para as edificações assinaladas considerando apenas uma fachada fotovoltaica, na cidade de Curitiba.

Fonte: Elaboração própria

4.14. Latitude 25° - Zona Bioclimática 03 – São Paulo

São Paulo (SP) é uma cidade no interior do país localizada a 760 m acima do nível do mar. Seu clima é caracterizado por temperaturas mais elevadas e chuvas mais intensas nos meses de novembro a fevereiro, enquanto o período entre os meses de junho e agosto é mais seco e com temperaturas amenas (Filho *et al.*, 2007). Os dados relativos aos níveis e direções da irradiação contidos no arquivo climático estão indicados na Figura 4.31. É evidente uma maior concentração de incidência solar no quadrante noroeste, sendo os maiores níveis detectados no azimute 320°, consideravelmente a Curitiba (320°-330°) que também se encontra na latitude 25° .

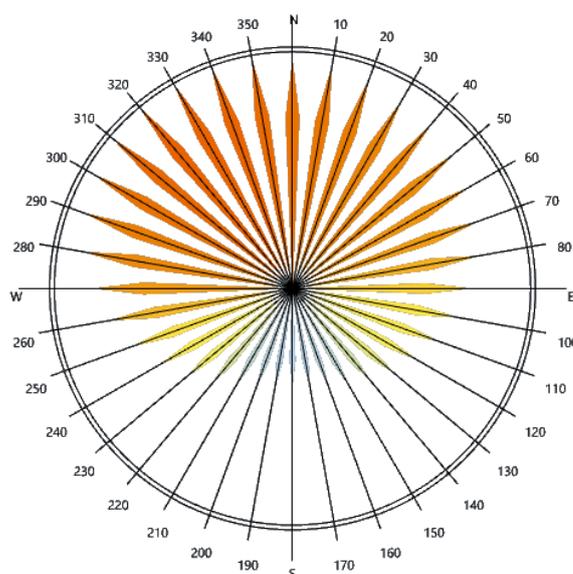


Figura 4.31 – Direções relativas à irradiação para São Paulo.
Fonte: Arquivo Climático.

Os dados apresentados na Tabela 4.16 permitem concluir que São Paulo apresenta o maior potencial de redução na demanda energética final da região sudeste e o segundo maior do país. A efetividade de São Paulo é de suma relevância por se tratar da cidade mais populosa do país, permitindo a integração de sistemas fotovoltaicos a edificações em larga escala. A redução na demanda energética final variou entre 9,20% e 13,52% para a edificação 1 e 3, respectivamente.

Tabela 4.16 – Orientação e porcentagem de janelas obtidas para a otimização da redução da demanda energética final considerando o contexto climático de São Paulo.

Edificação	Geometria		Impacto no consumo de energia		Redução na demanda energética final	
	Azimute (°)	% Janelas	Redução no consumo de HVAC (kWh/ano)	Geração de energia pelo OPV (kWh/ano)	%	kWh/m ² OPV/ano
E1 F1	300-315	95	72347,80	19134,13	9,20	80,25
E2 F1	305-315	95	27199,10	9567,06	9,62	64,60
E3 F1	305-315	50-55	5241,12	2517,65	13,52	51,73

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 4.32 apresenta todas as combinações de azimute e percentagem de janelas da fachada realizadas pela otimização de edificações com uma fachada fotovoltaica para a cidade de São Paulo, variando da melhor (primeira) para a pior (última). Para obtenção do melhor desempenho energético, a orientação recomendada para as edificações 2 e 3 é entre o intervalo de azimutes 305° - 315° . A edificação 1 permite uma lacuna ainda maior, entre as orientação 300° - 315° . Já os cenários com pior desempenho energético foram aqueles os quais as fachadas fotovoltaicas foram voltadas para orientações entre 0° - 270° .

Com relação a percentagem de janelas, as edificações 1 e 2 tiveram um melhor desempenho energético quando grandes janelas foram projetadas, sendo aconselhável que estas representem 95% da fachada. Para a edificação 3, aberturas menores foram preferíveis, sendo indicado que estas representem apenas 50-55% da fachada.

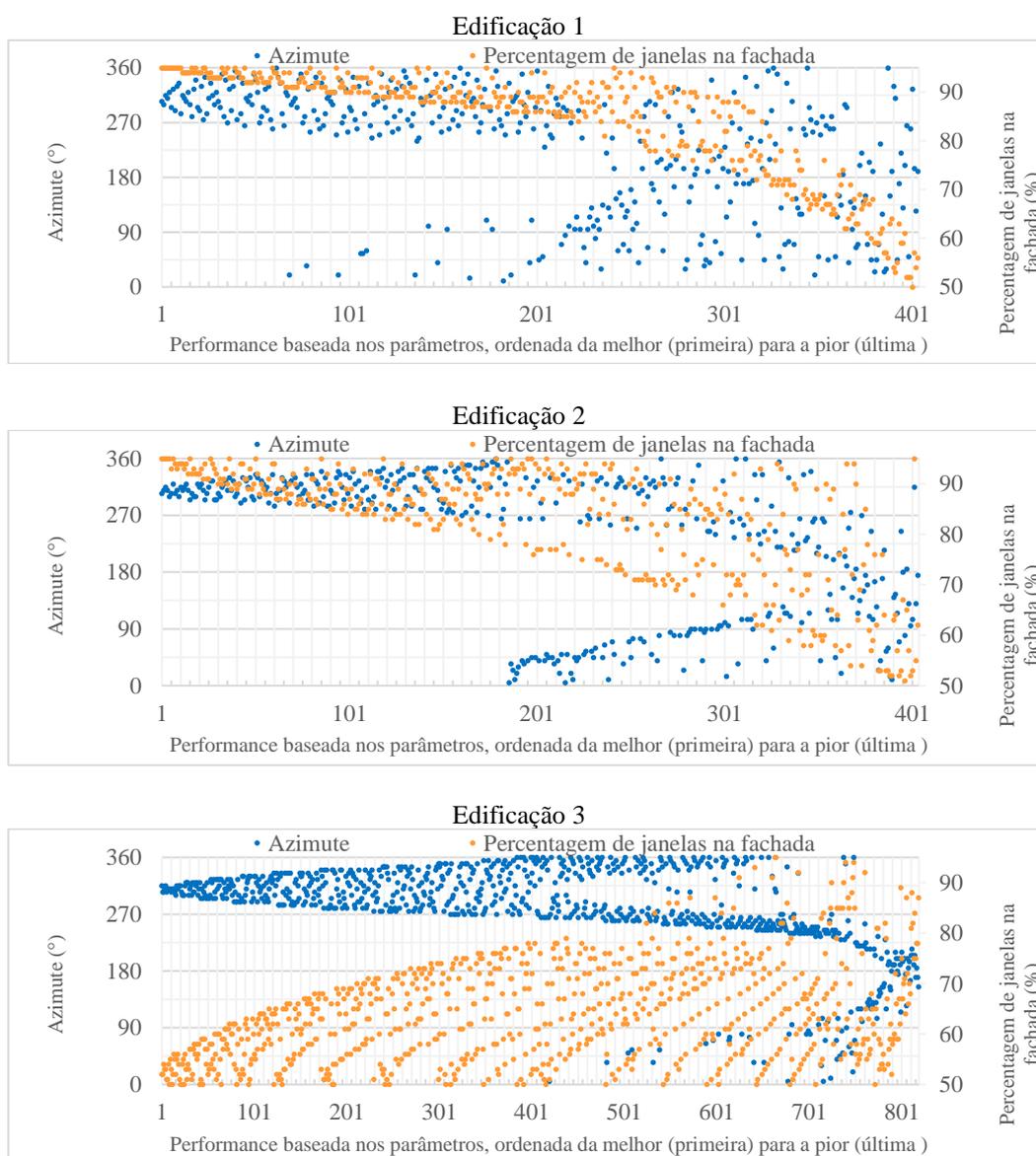


Figura 4.32 - Azimute e percentagem de janelas para as edificações assinaladas considerando apenas uma fachada fotovoltaica, na cidade de São Paulo.

Fonte: Elaboração própria.

4.15.

Latitude 30° - Zona Bioclimática 03 – Porto Alegre

Porto Alegre (RS) é uma cidade localizada no litoral brasileiro com clima úmido, e verão quente a moderadamente quente (Kuinchtner e Buriol, 2001). Entre as cidades investigadas, é aquela localizada mais ao sul do país. Os níveis de irradiação extraídos do arquivo climático de Porto Alegre são indicados na Figura 4.34, permitindo afirmar que o quadrante com maior incidência solar é o noroeste. Mais precisamente, o azimute com maiores níveis de irradiação é o 330°.

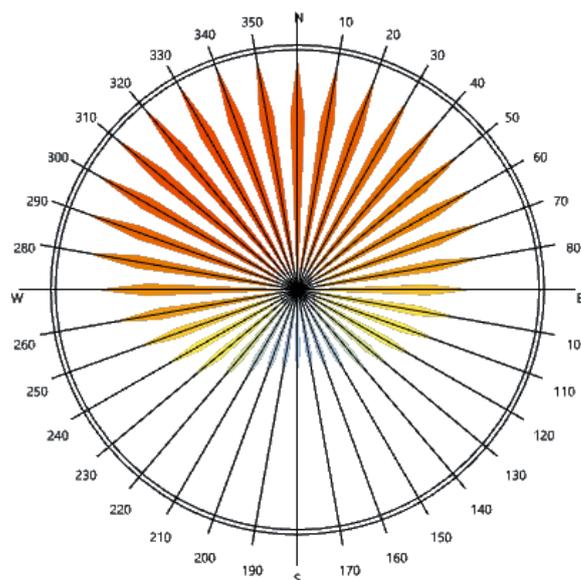


Figura 4.34 – Direções relativas à irradiação para Porto Alegre.
Fonte: Arquivo Climático.

O potencial na redução da demanda energética final após a integração de sistemas fotovoltaicos a edificações em Porto Alegre é trazido pela Tabela 4.17, tendo sido alcançados valores acima da média nacional. A cidade também obteve o maior potencial de redução na demanda energética final para a região sul do país, fator atribuído à alta geração de energia fotovoltaica. Os níveis de conservação de energia obtidos pela cidade de Porto Alegre variaram de 7,95%, alcançado pela edificação 2, até 10,89%, relativo à edificação 3.

Tabela 4.17 – Orientação e porcentagem de janelas obtidas para a otimização da redução da demanda energética final considerando o contexto climático de Porto Alegre.

Edificação	Geometria		Impacto no consumo de energia		Redução na demanda energética final	
	Azimute (°)	% Janelas	Redução no consumo de HVAC (kWh/ano)	Geração de energia pelo OPV (kWh/ano)	%	kWh/m ² OPV/ano
E1 F1	320-330	95	76450,00	21471,00	7,98	85,90
E2 F1	320-330	94-95	26332,80	10647,83	7,95	65,57
E3 F1	320-330	50-56	5113,98	3171,69	10,89	55,24

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 4.35 apresenta todas as combinações de azimute e percentagem de janelas da fachada realizadas pela otimização de edificações com uma fachada fotovoltaica para a cidade de Porto Alegre, variando da melhor (primeira) para a pior (última). Para todas as edificações as orientações recomendadas são voltadas para o noroeste, mais precisamente para o azimute 320-330°. Já o pior desempenho foi obtido nos cenários onde a orientação adotada foi entre 90° e 270°.

Com relação a percentagem de janelas, as edificações 1 e 2 tiveram um melhor desempenho energético quando grandes janelas foram projetadas. A recomendação é de vão de 95% para a edificação 1 e entre 94 e 95% para a edificação 2. Para a edificação 3, aberturas menores foram preferíveis, sendo indicado que estas representem apenas 50-55% da fachada.

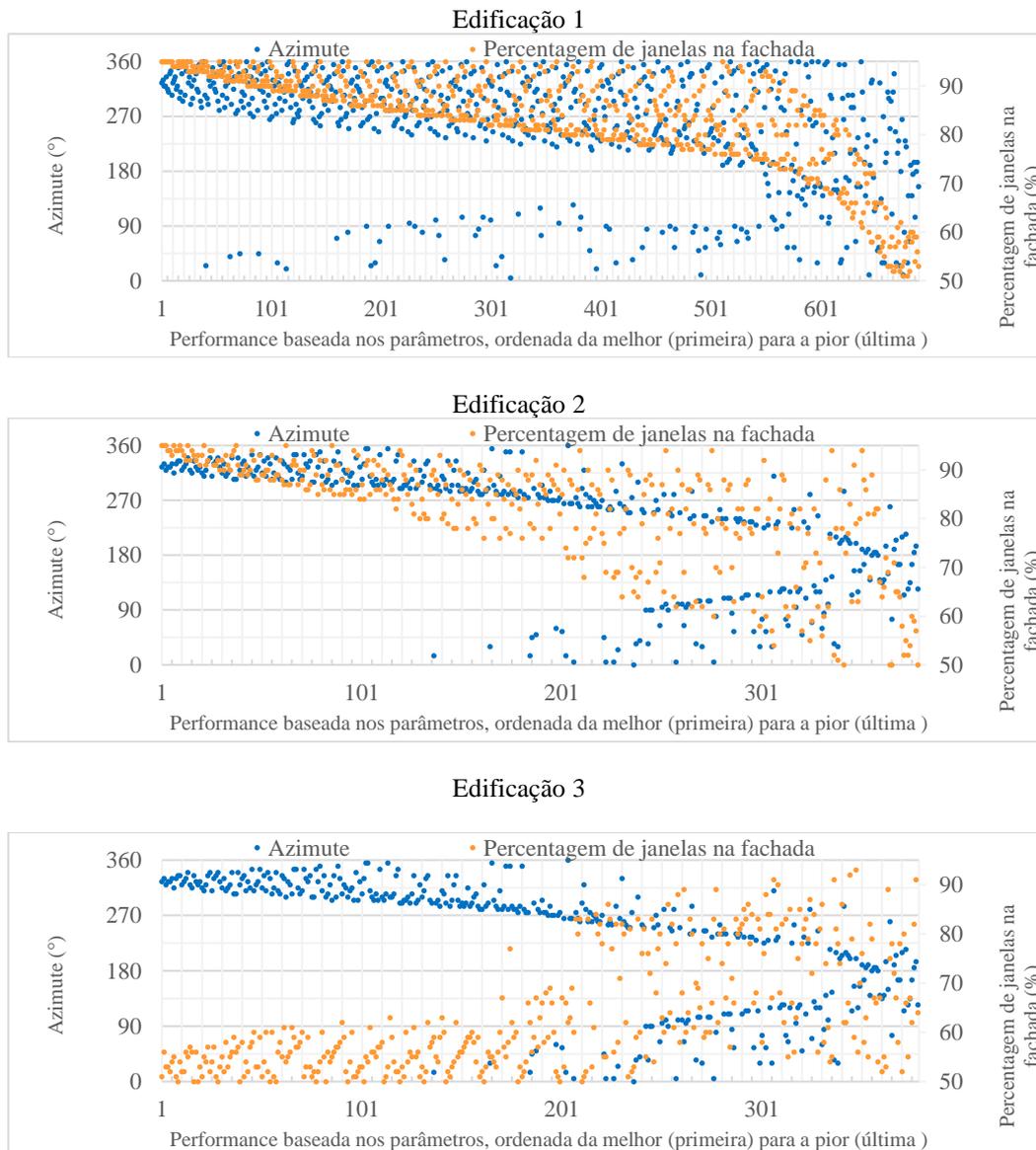


Figura 4.35 - Azimute e percentagem de janelas para as edificações assinaladas considerando apenas uma fachada fotovoltaica, na cidade de Porto Alegre.

Fonte: Elaboração própria.

4.16. Comparação dos resultados alcançados

Esta subseção visa apresentar e comparar os resultados obtidos por meio de uma abordagem que divide os resultados alcançados sob a ótica das cidade, latitudes e zona bioclimáticas. Cada subseção a seguir tem um enfoque diferente, sendo apresentado os seguintes dados: a redução da demanda do HVAC (kWh/ano), a geração de energia fotovoltaica (kWh/ano) e a redução da demanda energética final (%/ano).

4.16.1. Comparação dos resultados das cidades analisadas

Investigando isoladamente a redução da demanda de energia pelo sistema de HVAC, percebe-se que os maiores valores foram obtidos nas cidades de Cuiabá e Rio de Janeiro. Visto que as edificações possuem diferentes áreas de piso e consumos de energia, a edificação 1 apresentou a maior redução em valores absolutos (kWh/ano) como demonstrado na Figura 4.36, seguido pelas edificações 2 e 3, respectivamente. Contudo, fica evidente que as cidades de Palmas e Curitiba, as quais foi contabilizado o consumo pelo sistema de aquecimento, não tiveram desempenho abaixo de cidades onde tal fator apenas a refrigeração foi considerada, sinalizando que a integração de filmes fotovoltaicos orgânicos é benéfica inclusive nas cidades onde tanto sistemas de aquecimento quanto de resfriamento são utilizados.

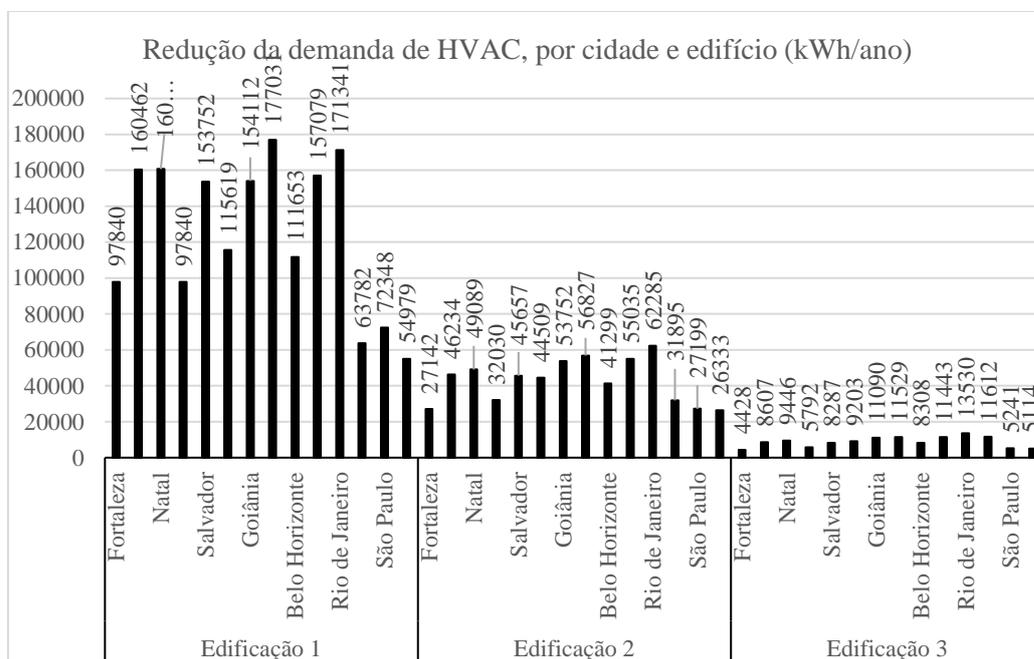


Figura 4.36 – Redução da demanda de energia pelo HVAC, por cidade e edifício em kWh/ano.
Fonte: Elaboração própria.

Com relação a geração de energia pelos sistemas fotovoltaicos integrados a fachada, percebe-se que seus valores (kWh) são consideravelmente menores que a redução no consumo de sistema de HVAC, como mostrado na Figura 4.37. Contudo, destaca-se que proporcionalmente a geração de energia teve um papel mais importante na redução final do consumo de energia nas edificações com

menos área de piso, sendo responsável por até 3/8 da economia energética na cidade de Porto Alegre. É importante ressaltar que em um cenário futuro onde a eficiência das células fotovoltaicas orgânicas aumente, podendo chegar até 10% em um cenário futuro (Anctil, Lee e Lunt, 2020), a geração de energia pode apresentar um papel crucial na conservação energética até mesmo nas edificações maiores, como a 1.

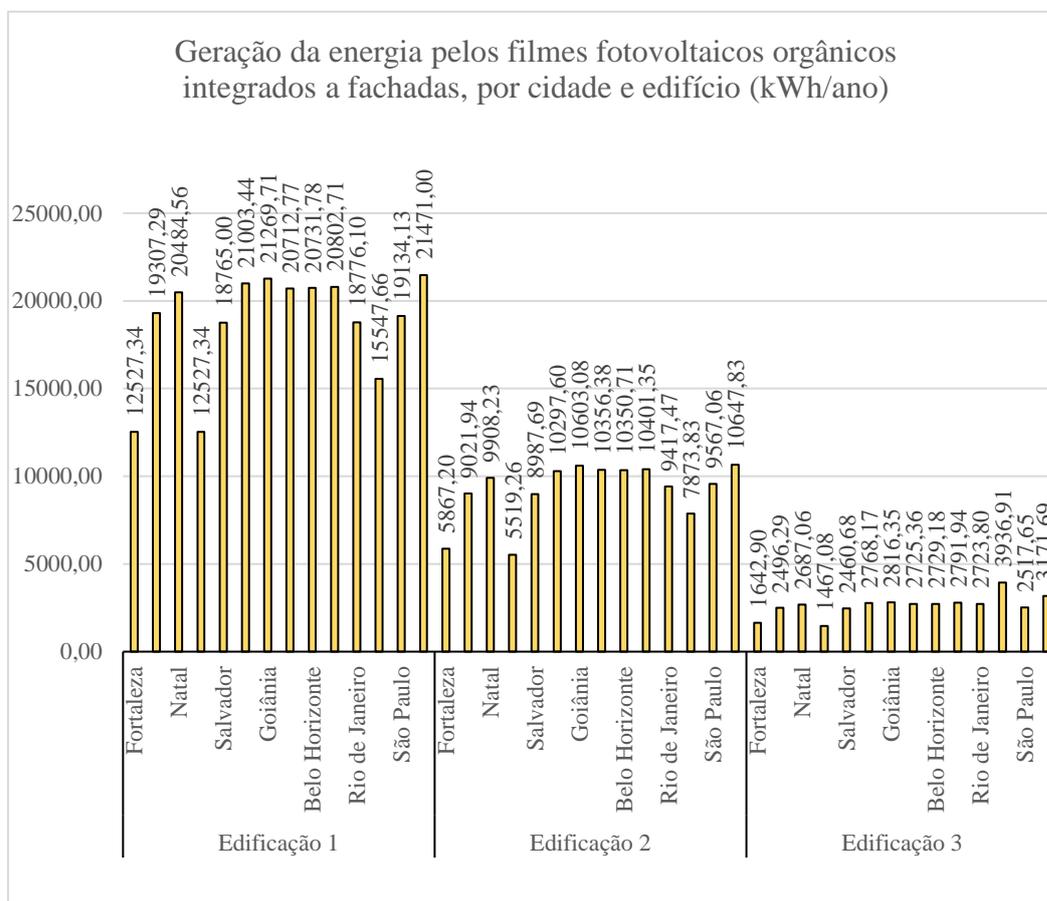


Figura 4.37 – Geração da energia pelos filmes fotovoltaicos orgânicos integrados a fachadas, por cidade e edifício em kWh/ano.

Fonte: Elaboração própria.

Apesar da redução da demanda de energia pelo HVAC e da geração de energia serem parâmetros de suma importância, destaca-se que a performance está sendo medida com base na otimização da conservação final de energia, sendo este o principal critério. Tendo isto em mente, a edificação 1 apresenta a menor redução do consumo energético, como mostrado na Figura 4.38. Fica evidente que, apesar da recomendação da integração de sistemas fotovoltaicos em todas as cidades, geometrias e configurações de fachadas, esta traz uma maior redução no consumo de energia final da edificação 3. As cidades de Brasília, Belo Horizonte e São Paulo se destacaram como as com maior potencial de economia.

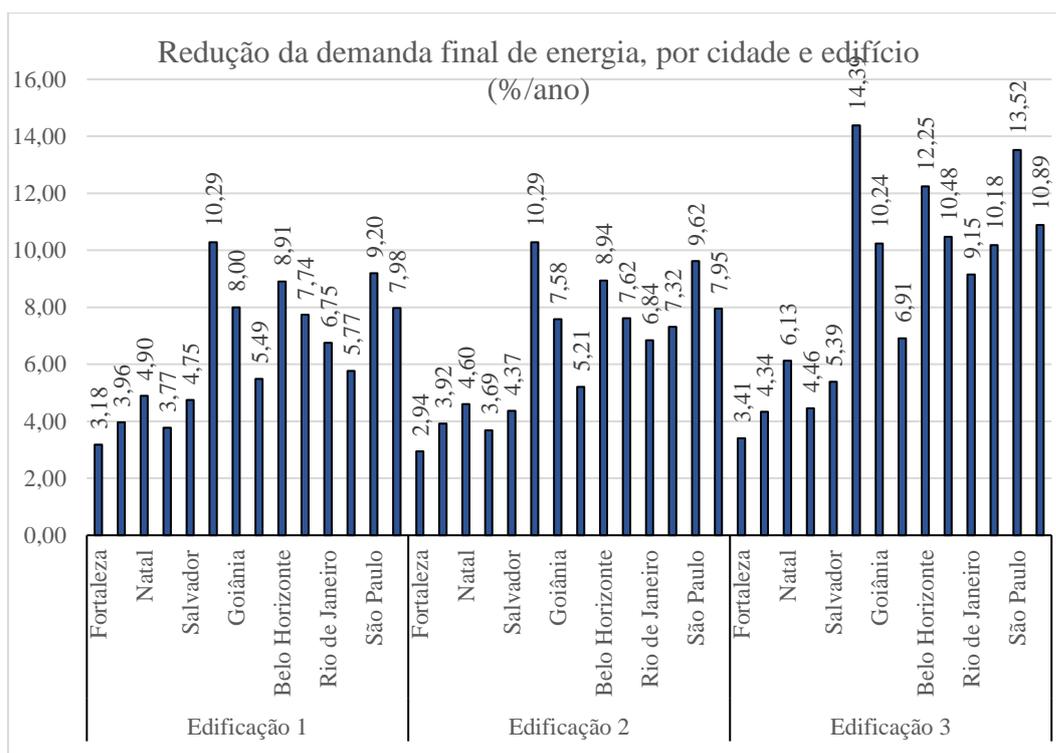


Figura 4.38 – Redução da demanda final de energia, por cidade e edifício (%/ano).

Fonte: Elaboração própria.

4.16.2. Comparação dos resultados por latitude

Sob a ótica das latitudes, percebe-se que a redução da demanda de HVAC foi maior nas regiões centrais do país, enquanto as localizações na Linha do Equador e entre as latitudes 25°-30° tiveram o pior desempenho, como mostrado pela Figura 4.39. Já os resultados obtidos para a geração da energia pelos filmes fotovoltaicos orgânicos, *plotados* na Figura 4.40, vão parcialmente de acordo com a revisão bibliográfica, aonde era esperado que as integrações na Linha do Equador gerassem menos energia devido a trajetória solar da localização. Apesar disso, é importante frisar que apesar dos sistemas fotovoltaicos integrados em edificações localizadas em latitudes mais distantes da Linha do Equador não geraram necessariamente mais energia, como previsto pela revisão bibliográfica. Considerando o contexto nacional, pouca é a diferença para sistemas localizados em regiões centrais do país como 15°-20° para aquele localizado a 30°, significando que a latitude não é o principal fator para a definição do potencial da geração energética.

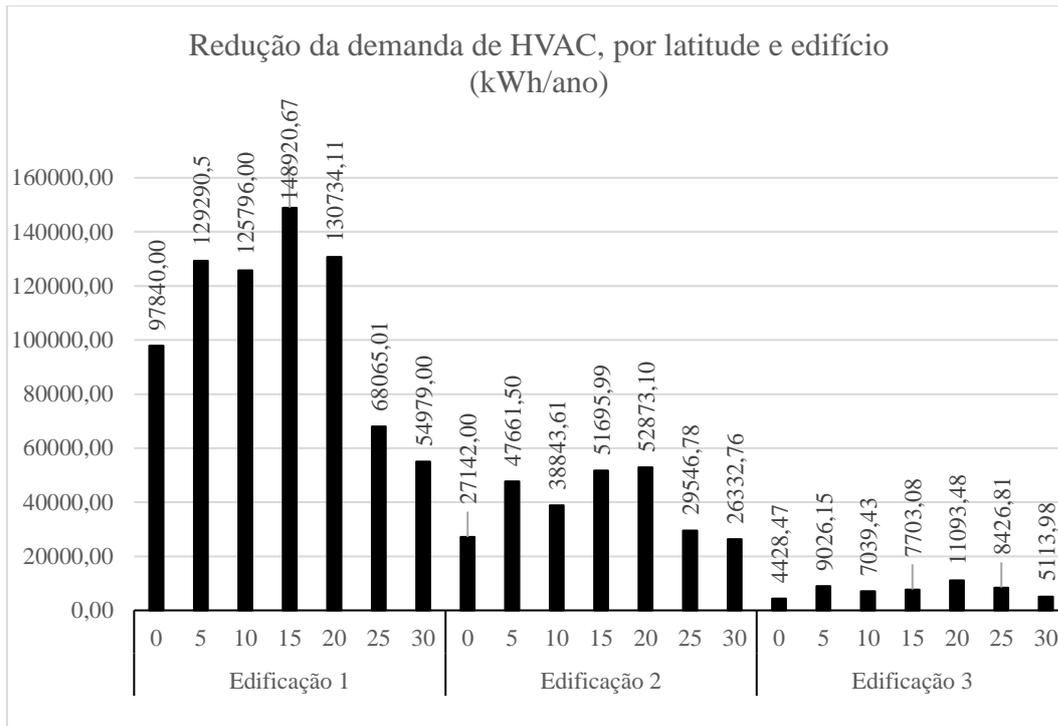


Figura 4.39 – Redução da demanda de energia pelo HVAC, por latitude e edifício em kWh/ano.
Fonte: Elaboração própria.

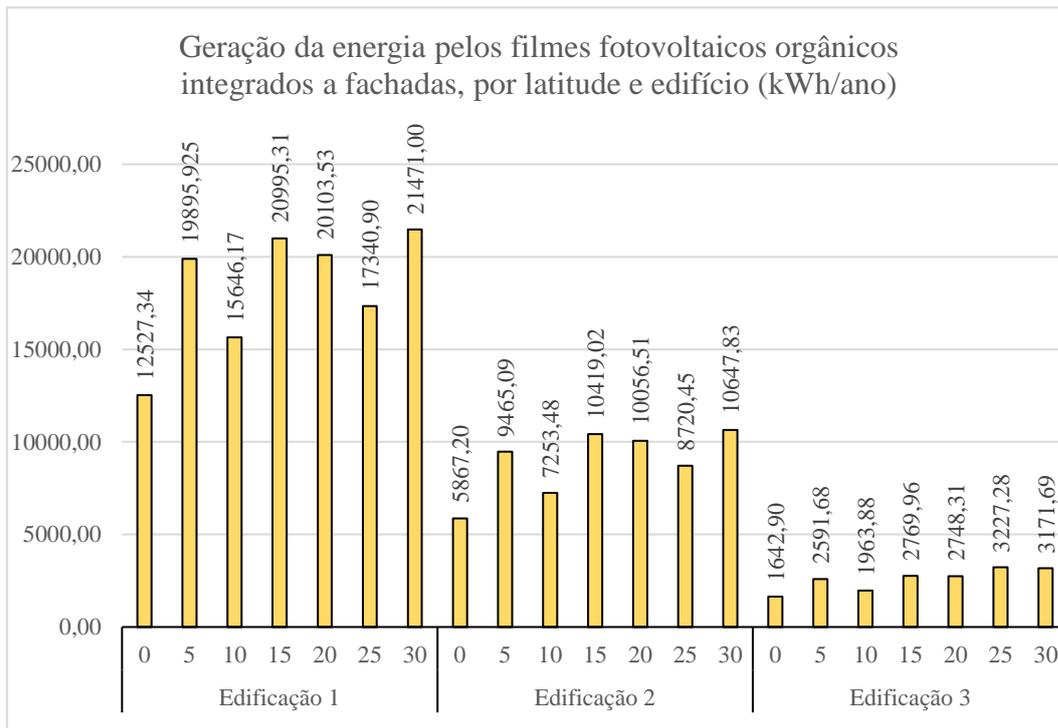


Figura 4.40 – Geração da energia pelos filmes fotovoltaicos orgânicos integrados a fachadas, por latitude e edifício em kWh/ano.
Fonte: Elaboração própria.

Diferentemente da análise individual da geração de energia e da redução da demanda de energia pelo HVAC, a Figura 4.41 segue a ênfase da conservação final de energia. Nesta, fica evidente a divisão do país em dois grandes blocos: as cidades entre a Linha do Equador e a latitude 10°, onde uma redução menor do consumo de

energia foi observada, oscilando entre 2,94% para a edificação 2 na latitude 0° e 5,24° para a edificação 3 na latitude 5°; e as cidades entre as latitudes 15° e 30°, onde a integração de sistemas fotovoltaicas se mostrou mais benéfica, alcançando entre 7,49% de economia para a edificação 1 e 11,85% para a edificação 3 quando localizada na latitude 25°.

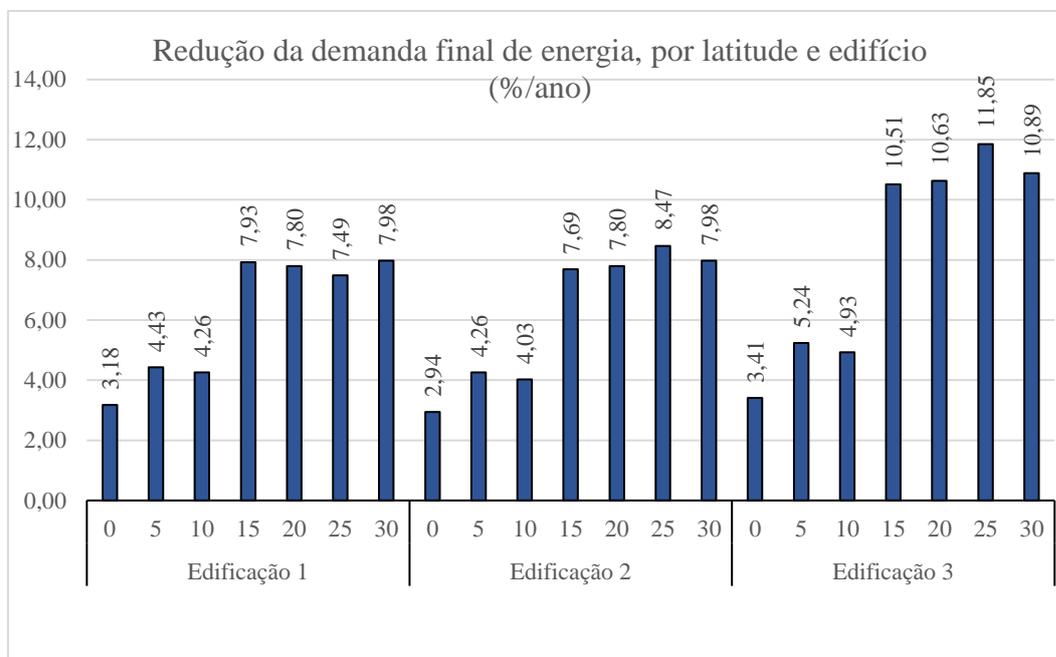


Figura 4.41 – Redução da demanda final de energia, por latitude e edifício (%/ano).

Fonte: Elaboração própria.

4.16.3.

Comparação dos resultados por zona bioclimática

O potencial de redução do consumo de HVAC se mostrou consideravelmente maior nas zonas bioclimáticas ZB6, ZB7 e ZB8. Tal fator vai de acordo com o esperado, visto que estas zonas são compostas por temperaturas mais elevadas e apresentam uma maior demanda de sistemas artificiais de resfriamento para manter os ambientes internos confortáveis. A zona bioclimática 1, onde consumo pelo aquecimento foi contabilizado, não apresentou níveis acima da média devido a contabilização do uso deste equipamento.

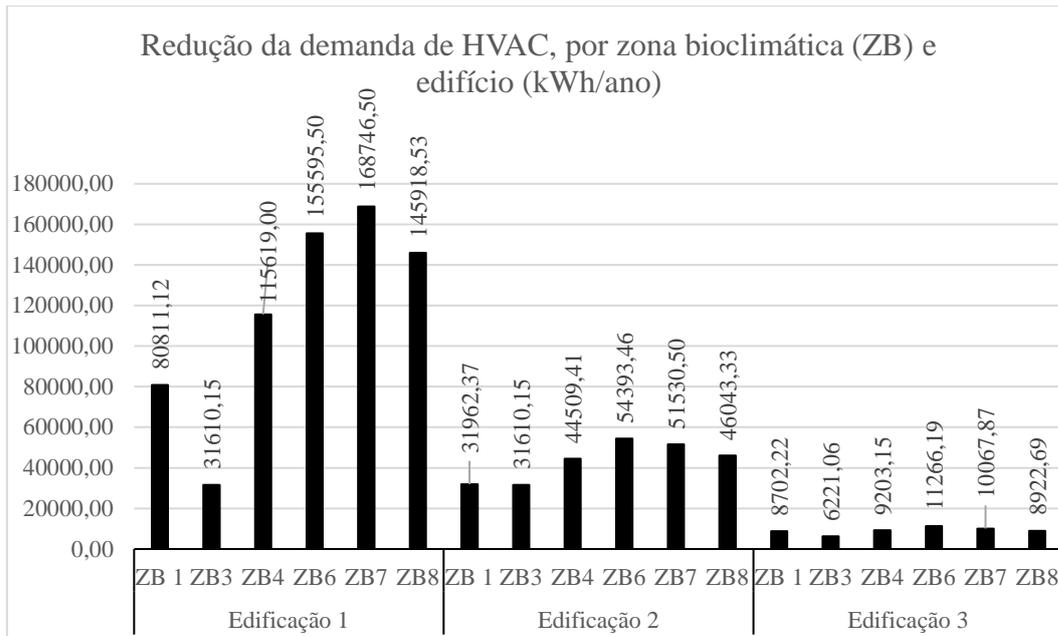


Figura 4.42 – Redução da demanda de energia pelo HVAC, por zona bioclimática e edifício em kWh/ano.

Fonte: Elaboração própria.

O potencial de geração de energia variou consideravelmente entre a edificação 1 e as edificações 2 e 3, como apontado pela Figura 4.43: enquanto para a primeira as zonas bioclimáticas com maior potencial são a ZB6 e ZB1, para as demais a integração de sistemas fotovoltaicos a edificações se mostrou mais benéfica na ZB8 e ZB6. Devido à alta eficiência obtida pelas células fotovoltaicas tanto em climas frios (ZB1) quanto em locais com temperaturas mais elevadas (ZB6 e ZB8), pode-se afirmar que não há aparente relação entre a temperatura local – critério adotado para o zoneamento climático vigente regimentado pela NBR 15220 (ABNT, 2005) – e a quantidade de energia gerada.

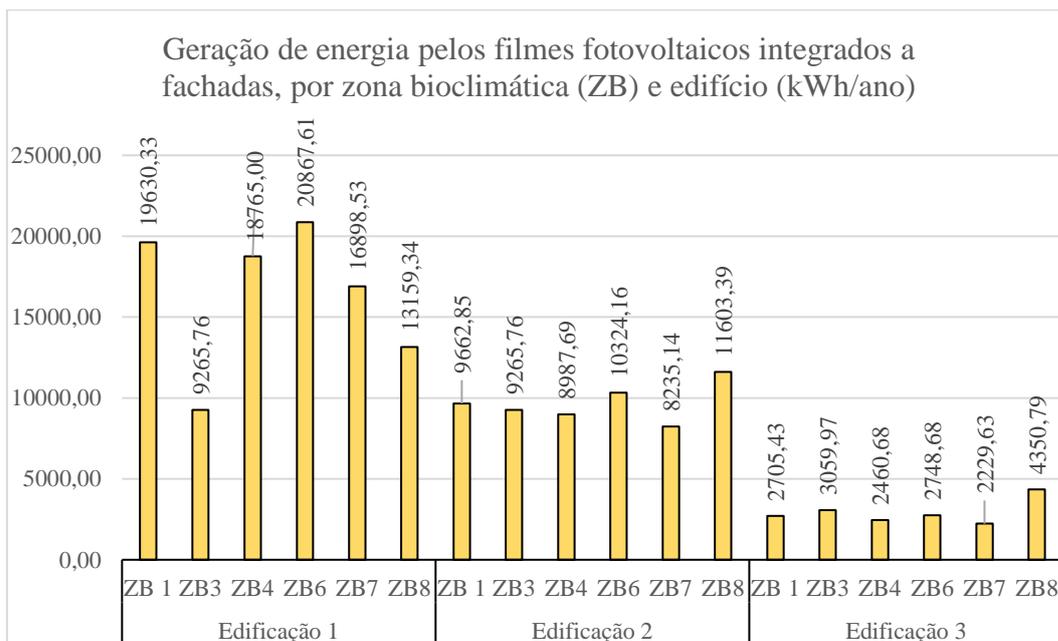


Figura 4.43 – Geração de energia pelos filmes fotovoltaicos orgânicos integrados a fachadas, por zona bioclimática e edifício em kWh/ano.

Fonte: Elaboração própria.

Analisando a redução na demanda final de energia apresentada pela Figura 4.44, percebe-se que as zonas bioclimáticas com melhor desempenho são a ZB4 e a ZB6, composta pelas cidades de Brasília (ZB4) Goiânia e Campo Grande (ZB6).

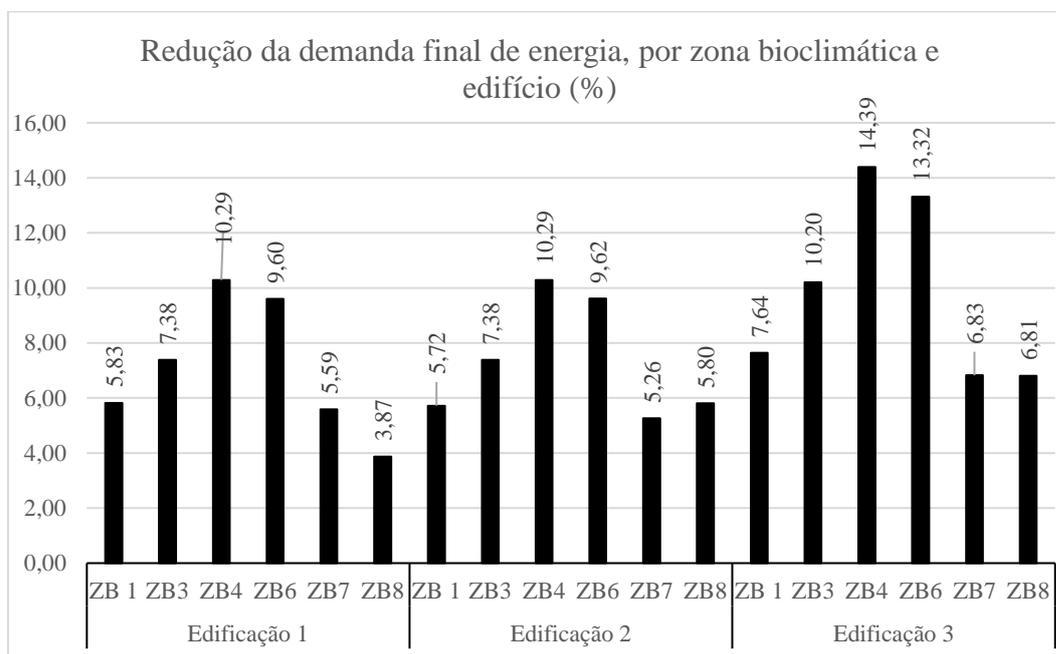


Figura 4.44 – Redução da demanda final de energia, por zona bioclimática e edifício (%).
Fonte: Elaboração própria.

Contudo, tais zonas bioclimáticas apresentam a particularidade de que a maioria do seu território fica entre as latitudes 15°-20°S como mostrado na Figura 4.45, enquanto as demais se encontram mais espalhadas no território nacional: a ZB1 é composta pelas cidades de Palmas (5°S) e Curitiba (25°S); a ZB3 é formada pelas cidades de Belo Horizonte (20°S), São Paulo e Porto Alegre (30°S); a ZB 7 é integrada pelas cidades de Teresina (5°S) e Cuiabá (15°S); e a ZB8, constituída pelas cidades de Fortaleza (0°S), Natal (5°S), Salvador (10°S) e Rio de Janeiro (20°S). Com base nisto, não é possível concluir se o melhor desempenho destas zonas se dá pelo zoneamento bioclimático ou pela concentração em latitudes consideradas vantajosas pelo item 4.16.2.

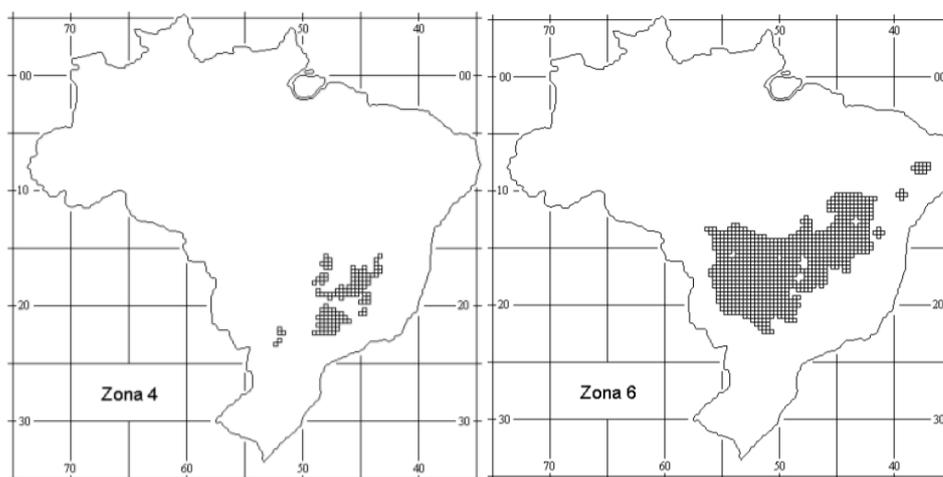


Figura 4.45– Áreas ocupadas pela zona bioclimática 4 (esquerda) e zona bioclimática 6 (direita).
Fonte: ABNT, 2005.

Diferentemente do esperado, a integração de sistemas fotovoltaicos a edificações localizadas a uma maior distância da Linha do Equador não apresentou melhor desempenho. Foi percebida uma eficiência menor entre as latitudes 0°-10°S, sendo essa de no máximo 4,43%. Já a partir da latitude 15° até 30° é perceptível um grande salto com relação as latitudes mais próximas da Linha do Equador. Contudo, é visível um *plateau* com relação a conservação de energia, oscilando entre 7,49% e 7,98%. Apesar de recomendada a integração de sistemas fotovoltaicos em todas as cidades, percebe-se um maior potencial de redução atrelado as cidades com latitudes 15°S ou maiores.

Já com relação ao zoneamento bioclimático, não foi possível concluir se as zonas que apresentam melhor o desempenho tem tal característica devido ao seu clima ou se tal fator é atribuído à localização em latitudes consideradas ideais, na faixa de 15°-20°. Não há uma aparente relação entre a temperatura – critério adotado para o zoneamento bioclimático – e a geração dos sistemas fotovoltaicos integrados a edificações.

4.17. Discussão dos resultados

Esta sessão visa discutir os resultados obtidos pelas simulações realizadas e compará-los com outras publicações. São abordados as variáveis e os parâmetros, tendo ênfase nos resultados, sendo também discutido o método proposto para encontro de tais valores. Tal discussão é limitada devido a escassa quantidade de publicações relativas à mensuração da conservação de energia causada pela integração de filmes fotovoltaicos orgânicos em fachadas, evidenciando a lacuna evidenciando a lacuna existente na literatura.

Pesquisas realizadas em Paris (49°N) e Barcelona (41°N) (Moreno *et al.*, 2019) consideraram a integração de sistemas fotovoltaicos em janelas de uma fachada voltada para a face sul. Os resultados demonstram que a opção mais satisfatória para a cidade espanhola requer uma percentagem de janelas de até 55%, sendo possível reduzir o consumo de energia para resfriamento e aquecimento em até 22%. Já para Paris, maiores aberturas na fachada são preferíveis, sendo possível atingir até 16% economia da demanda energética. Uma semelhança foi perceptível com relação a percentagem de janelas: Paris apresentou configurações semelhantes a todas as cidades para as edificações 1 e 2, enquanto Barcelona se assemelhou aos valores considerados ideais para edificação 3. Sob a ótica da redução da demanda de energia, os valores obtidos pelas cidades brasileiras foram consideravelmente mais baixos que os das europeias. A cidade com maior proximidade dos valores obtidos foi Brasília, com economia de 14,39% de energia. Tal diferença se dá pela eficiência de 6% considerada por Moreno *et al.* (2019) para as células fotovoltaicas orgânicas, enquanto neste trabalho foi utilizado o valor de 3,5% que é compatível com o material disponível no mercado nacional.

Anctil, Lee e Lunt (2020) realizaram estudos com a integração de células fotovoltaicas em janelas de quatro cidades americanas: Honolulu, Detroit, Los Angeles e Phoenix. Foi possível obter uma redução da demanda energética entre 15-20%, tendo sido considerada uma percentagem de janelas fixa no valor de 67,8%. Os resultados obtidos são comparáveis apenas aos obtidos pela cidade do Rio de Janeiro, visto que foi o único cenário onde foram simuladas quatro fachadas fotovoltaicas. Percebe-se que a cidade brasileira teve um desempenho mais

eficiente para as edificações 2 e 3, tendo a edificação 1 uma performance semelhante as obtidas pelos estudos de Anctil Lee e Lunt (2020).

Estudos realizados por Hoseinzadeh *et al.* (2021) para uma edificação semelhante à edificação 3 corroboram os valores encontrados neste artigo. Segundo os autores, a recomendação para a maior conservação de energia por parte de sistemas fotovoltaicos integrados a fachada é, para esta tipologia, de baixas percentagens de janelas. O estudo foi realizado em Teerã, capital do Irã, que mesmo em uma latitude diferente das investigadas no estudo (35°N) vai de acordo com os valores obtidos para em todos os climas investigados. Tal resultado sugere que a forma da edificação tem um fator crucial na recomendação de aberturas de janelas de forma a obter um melhor desempenho térmico.

O estudo publicado por Morgado e Brasileiro (2019) analisou a influência do percentual de abertura nas fachadas em edifícios de uso comercial no Rio de Janeiro. É adotado como instrumento de medição de performance o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) (BRASIL, 2013a), este que varia desde A, a melhor nota, até E, a pior. Os resultados demonstram que mesmo com a utilização de vidros eficientes, edifícios com áreas de piso maiores que 500m² necessitam ter menos que 24% da área de fachada ocupada por vidro para obter a melhor nota segundo o RTQ-C. Desta forma, o Edifício 1 não só estaria inviabilizado de obter a nota A, como com a percentagem de abertura de 95% obteria a pior classificação do regulamento. Para edifícios com áreas de piso menores que 500m², é necessário até 31% de área de vidro para a classificação A. Segundo os ensaios realizados pelos autores, a Edificação 2 também obteria a pior nota do RTQ-C, enquanto o Edifício 3 obteria a nota C.

Os resultados deste trabalho, onde uma percentagem de janelas maior que os detectados por Morgado e Brasileiro (2019) como os necessários para a obtenção da melhor nota realizada pelo RTQ para o nível de eficiência energética de edificações comerciais, de serviços e públicos evidenciam a necessidade de reconsideração da avaliação do método em casos em que há integração de sistemas fotovoltaicos. Destaca-se que já há um sistema de bonificação para casos em que os painéis fotovoltaicos acarretam uma economia energética de no mínimo 10%, porém tal só seria capaz de elevar a nota das edificações em um grau na escala proposta pelo RTQ-C.

Ainda sobre regulações, destaca-se que apesar da NBR 15220-3 separar o país em oito zonas bioclimáticas, as zonas 2 e 5 não foram investigadas visto que não apresentaram exemplares em capitais. Os dados apresentados na Figura 4.59 representam as médias de cada edificação por zona bioclimática, demonstrando que as melhores zonas bioclimáticas foram: a ZB 4, composta por Brasília, cidade com melhor desempenho; ZB 3, que engloba Belo Horizonte, São Paulo e Porto Alegre; e ZB 6, integrada por Campo Grande e Goiânia. A zona bioclimática com resultado menos satisfatório foi a ZB7, compreendendo as cidades de Teresina e Cuiabá.

Percebe-se que não é possível fazer um paralelo entre o azimute recomendado para sistemas fotovoltaicos instalados em coberturas e os integrados a edificações. Considerando os mesmos dados climáticos, o ângulo ótimo para orientação de sistemas fotovoltaicos em coberturas é de 349° para Porto Alegre e 352° para o Rio de Janeiro e Brasília (Almeida, Peres e Morgado, 2020; Peres, Almeida e Morgado, 2020). Já para sistemas integrados em uma fachada de edificações, o azimute recomendado foi 320-330° para Porto Alegre, 330° para o Rio de Janeiro e 295-305° para Brasília. Tal diferença pode ser atribuída a diferença de inclinação entre

os sistemas, sendo o integrado instalado na vertical e os de cobertura com tendência a ser horizontal. Evidencia também a necessidade de realização de estudos voltados para sistemas fotovoltaicos integrados, devido a sua especificidade com relação aos instalados em coberturas.

Considerando as cidades analisadas, é interessante sob o aspecto da popularização da integração de filmes fotovoltaicos orgânicos que edificações cuja característica volumétrica seja a verticalização, como é o caso das 2 e 3, tenham um melhor desempenho em cidades mais adensadas como São Paulo e Brasília, como mostrado na Figura 4.57. Tais edificações são mais presentes nestes tecidos urbanos, e mesmo havendo a limitação do cálculo do sombreamento do entorno nas fachadas, tais volumetrias são menos sucessíveis a influências como árvores e construções vizinhas que construções mais baixas, como a edificação 1. Também foi possível perceber que latitudes mais elevadas proporcionam uma maior conservação de energia, como evidenciado pela Figura 4.58. Um fator crítico para tal característica é a incidência de irradiação nas fachadas, que fica mais acentuada à medida que a edificação se afasta da Linha do Equador.

Algumas diferenças metodológicas foram encontradas com relação aos métodos encontrados e o proposto, evidenciando a contribuição do trabalho. Estas foram tanto nos programas computacionais utilizados como nas variáveis e parâmetros a serem mensurados. Primeiramente, estudos realizados por Moreno *et al.* (2019) tiveram os valores de percentagem de janelas estabelecidos em intervalos de 10%, ao invés da utilização de otimização. Também se percebe que os autores integraram sistemas fotovoltaicos em apenas uma fachada voltada para a face sul, significando que a orientação da edificação não foi considerada uma variável. Com base no número inferior de variáveis e de cenários simulados, sendo realizadas apenas cinco simulações para Barcelona e oito para Paris, os dados coletados dão uma perspectiva limitada quando comparada aos obtidos pelo método proposto. A mesma limitação foi detectada nos estudos realizados por Qiu, Yang e Sun (2019), adotando como variáveis quatro cidades e seis orientações. A percentagem de janelas se manteve constante.

Já Anctil, Lee e Lunt (2020) realizaram o cálculo da redução da demanda energética com o intuito de calcular o retorno do investimento de energia e o tempo de retorno da energia. Estes dois parâmetros visam medir a viabilidade econômica e ambiental da construção fotovoltaica integrada, uma abordagem considerada mais precisa do que considerar a redução da demanda de energia por metro quadrado de células fotovoltaicas orgânicas. No entanto, também exige mais tempo, uma vez que todas as emissões e custos relacionados à energia e ao equipamento precisam ser calculados, sendo considerados os parâmetros de redução da demanda de energia em percentagem e por metro quadrado de células fotovoltaicas orgânicas adequado para o escopo deste trabalho.

Abdelhakim, Kandar e Lim (2019) estudaram a performance energética de um edifício comercial na Argélia, combinando o método de simulação com o de medição e verificação da performance por meio de ensaios no local. Se por um lado esta última etapa é crucial para a validação dos resultados obtidos, por outro a metodologia proposta pelos autores considera uma edificação em específico, sendo capaz de fornecer diretrizes projetuais precisas para intervenção no edifício comercial já existente. Contudo, visto que o método utilizado por Abdelhakim, Kandar e Lim (2019) se diferencia dos métodos tradicionais apenas pela realização de medição e verificação da performance, este é considerado inviável e insuficiente

para o escopo deste trabalho, onde os múltiplos cenários de simulação teriam que ser realizados.

Apesar de abordar elementos de sombreamento, Hwang, Kang e Kim (2012) realizam um dos poucos estudos encontrados sobre a otimização de sistemas fotovoltaicos integrados a edificações. Porém, novamente percebe-se que tal otimização parte do método tradicional de simulação manual de todos os cenários propostos pelos autores, estabelecendo uma menor quantidade de variáveis e dando uma perspectiva limitada sobre os resultados quando comparado ao método proposto.

Hoseinzadeh *et al.* (2021) utilizam como plataforma o *software* sugerido, Rhinoceros, em conjunto com os também mencionados *plugins* Grasshopper, Ladybug e Honeybee, para medição da performance de sistemas fotovoltaicos integrados a fachada. Foi perceptível que a utilização de uma interface única permitiu a extração de múltiplos dados da geometria, sendo mensurados os parâmetros das horas de sol na fachada da edificação, a geração de energia pelos painéis (em corrente contínua e alternada), a temperatura das células e a demanda energética. Percebe-se também uma maior quantidade de variáveis quando comparadas ao método tradicional, sendo investigada a melhor fachada para a integração e a melhor percentagem de janelas para o desempenho energético da edificação. É realizada otimização, porém como os autores não fazem menção a nenhum *plugin* para realização de tal tarefa, acredita-se que tais dados foram obtidos a partir da simulação manual das variáveis. Conclui-se então que a utilização de uma interface única é capaz de aumentar o universo de análise, dando uma perspectiva mais detalhada sobre o cenário investigado. Porém, fica evidente que somente com o processo automático de otimização por meio do *plugin* Galapagos é possível investigar todas as possibilidades e combinações das variáveis.

Foi perceptível uma grande quantidade de artigos que consideram como a orientação da edificação como fixa, em especial tomando como base os quatro pontos cardinais. Com base nos valores ótimos obtidos, é aconselhável que nos casos em que não seja possível a aplicação do método proposto e seja proposta uma edificação estática, que a orientação utilizada seja aquela de onde há uma maior incidência de irradiação. Tais valores podem ser extraídos diretamente dos dados climáticos locais, não sendo necessária a realização de simulações adicionais.

5 Conclusão

Este trabalho teve como objetivo definir os cenários nos quais a integração de filmes fotovoltaicos orgânicos às fachadas das edificações se mostra mais benéfica com relação à redução da demanda energética final da edificação, considerando diferentes contextos climáticos brasileiros. Buscou-se realizar uma contribuição para a investigação de soluções de envoltória da edificação com sistemas integrados, de forma a favorecer a conservação de energia da edificação. A proposta está alinhada com as políticas públicas nacionais de incentivo de eficiência energética, como o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações (RTQ) e o Programa de Avaliação da Conformidade de Eficiência Energética de Edificações objetivando a concessão da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE. Também está alinhado com os ideais apresentados pelos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas, mais especificamente os de Energia Acessível e Limpa (ODS número 7), de Cidades e Comunidades Sustentáveis (ODS número 11) e de Combate às Alterações Climáticas (ODS número 13).

Os principais benefícios de sistemas fotovoltaicos integrados a edificações são a geração de energia e a redução da demanda energética da edificação para condicionamento (aquecimento e resfriamento). Tais benefícios vão de acordo com instrumentos para conservação de energia, como o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações (RTQ) e o Programa de Avaliação da Conformidade de Eficiência Energética de Edificações para a concessão da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE. Considerando seu espaço consolidado no mercado brasileiro, além da disponibilidade de mão de obra qualificada, optou-se pela seleção da tecnologia de filmes fotovoltaicos orgânicos (OPV). Com relação ao uso, estipulou-se o comercial, por ser o setor com maior consumo de energia para condicionamento dos ambientes segundo a Pesquisa de Posse de Eletrodomésticos e Hábitos de Consumo (PPH).

O trabalho analisou três geometrias em quatorze cidades diferentes, estas selecionadas com base no zoneamento bioclimático vigente no país e na sua latitude. Seis configurações de fachada foram investigadas considerando o contexto climático do Rio de Janeiro com o intuito de selecionar o *layout* mais vantajoso sob a ótica da conservação de energia por metro quadrado de células fotovoltaicas integradas na fachada. Somente esta configuração de fachada foi extrapolada para as demais treze cidades, sendo realizadas no total 57 simulações⁹.

Se propôs um novo método para a mensuração do impacto da integração de sistemas fotovoltaicos em edificações. Este inova com relação ao estado-da-arte por

⁹ Para o Rio de Janeiro, foram consideradas seis configurações de fachada para as três edificações, resultando em 18 possibilidades. Foram realizadas mais uma simulação por edificação para cada uma das outras treze cidades, totalizando 57 simulações.

utilizar uma interface única para todas as simulações, sendo utilizado o *software* Rhinoceros. Paralelamente, foram utilizados quatro *plugins*: Honeybee para as simulações de demanda energética; Ladybug para estimativa de geração de energia dos sistemas fotovoltaicos; Grasshopper para inclusão de fórmulas matemáticas; e Galapagos, que utiliza algoritmos genéticos para realização de análises das combinações entre as variáveis com o objetivo de maximizar o parâmetro selecionado pelo usuário, neste caso a conservação da energia. Os cálculos para a mensuração da redução na demanda energética seguiram as diretrizes estipuladas pelo Protocolo Internacional de Medição e Verificação da Performance, que em conjunto com a utilização de programas computacionais validados pelo mercado torna o método proposto confiável.

Os resultados mostraram uma economia de energia de até 24,04%, resultado obtido pela cidade do Rio de Janeiro considerando a integração de filmes fotovoltaicos orgânicos em quatro fachadas. Em construções com apenas uma fachada fotovoltaica, Brasília teve o resultado mais satisfatório atingindo 14,39% de redução na demanda de energia. Foi perceptível que as edificações mais verticalizadas apresentaram uma maior conservação de energia, sendo esta característica vantajosa em especial para grandes centros urbanos.

Foi possível concluir que a geração de energia e a redução na demanda de HVAC agiram de maneiras diferentes nas edificações, significando que a edificação com maior potencial fotovoltaico não necessariamente apresenta a maior redução no consumo dos equipamentos. Sendo assim, destaca-se a necessidade da abordagem que ponderou ambos os fatores de forma a obter a maior redução da demanda energética final.

A orientação recomendada das edificações variou de acordo com as cidades, sendo compatível com a direção dos maiores níveis de irradiação extraídos do arquivo climático. Os resultados foram compatíveis com a revisão bibliográfica, confirmando que maiores latitudes favoreceram a redução na demanda energética, podendo-se atribuir tal fator a maior incidência de irradiação nas fachadas à medida que a edificação se afasta da Linha do Equador.

Os objetivos propostos neste trabalho foram atingidos, sendo possível identificar os contextos climáticos mais favoráveis para a integração de sistemas fotovoltaicos a fachadas. Destaca-se que em todos os cenários simulados, foi percebida uma redução na demanda de energia das edificações, consolidando então o BIPV como uma medida eficaz de conservação de energia que deve ser incentivada em escala nacional. O método proposto também atingiu sua função, permitindo a simulação de vários cenários com uma redução de tempo considerável comparada ao método convencional. Também permitiu a consideração de mais variáveis, tornando o trabalho mais abrangente e preciso.

Com relação aos objetivos específicos estipulados, foi alcançada diferentes caracterizações soluções de fachada com sistemas fotovoltaicos integrados a edificações. Tais alternativas foram apresentadas tanto com a variação da geometria em todas as cidades investigadas, quanto o estudo de diferentes *layouts* da envoltória das edificações na cidade de Rio de Janeiro. Foi possível a definição da tecnologia a ser aprofundada, sendo levado em consideração fatores nacionais relacionados à sua disponibilidade e aplicabilidade, sendo os filmes fotovoltaicos orgânicos julgados como os mais viáveis no contexto atual brasileiro. O método proposto levou em consideração os desafios relacionados à realização das simulações, em especial a grande quantidade de variáveis envolvida. Com base em conceitos de algoritmos genéticos e otimização, este se mostrou como uma solução

que alia a mesma precisão do Protocolo Internacional de Medição e Verificação da Performance (PIMVP) com uma menor demanda de tempo.

Os resultados obtidos permitiram dar um panorama nacional sobre as melhores orientações e porcentagens de abertura da fachada para o melhor benefício dos sistemas fotovoltaicos orgânicos, sendo estimada a energia gerada e conservada em cada cenário proposto. Foi demonstrado com exemplos práticos que a utilização de programas computacionais para simulação podem ser de suma importância para a análise da viabilidade de sistemas fotovoltaicos integrados a edificações, em especial em casos onde o *design* da edificação visa a melhor performance energética. Como apenas algumas das funções dos *plugins* propostos foram utilizadas, é importante ressaltar a possibilidade de outras análises trazida pela plataforma integrada apresentada no método proposto.

Uma das limitações do trabalho é a dependência de arquivos climáticos em arquivos Energy Plus Weather File, reduzindo as cidades passíveis de serem analisadas. A amplitude territorial do Brasil levou a seleção de quatorze cidades para análise neste trabalho, porém destaca-se que apesar dos critérios de seleção adotados estas representam apenas uma pequena parcela das mais de 5.000 cidades que existem no país. Outra limitação do trabalho foi que foram escolhidas para as simulações apenas três geometrias de edificação, embora tenham sido definidas a partir da análise documental realizada, pois estas foram as simuladas no âmbito do PBE Edifica (RTQ-C e RAC-C). Além disso, os estudos realizados foram feitos com apenas uma tecnologia de fotovoltaica integrada a fachada, o OPV, e somente para edifícios comerciais.

A principal recomendação de estudos futuros é a realização da investigação dos custos relacionados a integração de sistemas fotovoltaicos em edificações, de forma a identificar a sua viabilidade econômica. Também recomenda-se a exploração de um universo mais amplo de cidades, pelo menos abrangendo as demais capitais brasileiras, sendo recomendada a expansão do modelo proposto para o Rio de Janeiro, onde seis *layouts* de fachadas foram considerados, para outras localidades. A consideração de outras tipologias de uso, como a residencial, também é altamente aconselhável, especialmente que com a crise da COVID-19, muitas pessoas estão trabalhando em casa e devem continuar trabalhando pós-pandemia. Além disso, caso haja modificações com relação ao zoneamento bioclimático, que hoje são oito, é recomendado que esta divisão seja revista em um trabalho futuro e por meio da comparação dos resultados obtidos, se discutir os impactos desta modificação. Também deve ser realizado um acompanhamento relativo às tecnologias de filmes fotovoltaicos orgânicos no país, visto que o aumento da eficiência das mesmas teria um impacto positivo considerável na conservação de energia das edificações simuladas.

Por fim, recomenda-se mensurar os impactos positivos da integração de sistemas fotovoltaicos às fachadas das edificações no Brasil para uma definição mais assertiva de políticas públicas com relação aos seguintes parâmetros: a eficiência energética; o conforto térmico; a geração de energia; a redução de emissões de gases de efeito estufa; dentre outros. Também se propõe uma investigação sobre os custos necessários para a instalação dos sistemas fotovoltaicos integrados propostos.

6 Referências Bibliográficas

ABDELHAKIM, M.; KANDAR, M. Z.; LIM, Y-W. Experimental Investigation of Overall Energy Performance in Algerian Office Building Integrated Photovoltaic Window under Semi-Arid Climate. **Journal of Daylighting**, v. 6, p. 21-41, 2019.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **Desempenho Térmico de Edificações, Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes construtivas para habitações uni familiares de interesse social**. NBR 15220. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **Energia Solar Fotovoltaica – Terminologia**. NBR 10899. Rio de Janeiro, 2020.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **Energy management systems, Requirements with guidance for use**. NBR ISO 50001. Rio de Janeiro, 2018.

AFGHAN, N. H. *et al.* Multi-criteria evaluation of hydrogen system options. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 32, n. 15, p. 3183-3193, 2007.

AFGHAN, N. H.; CARVALHO, M. G. Sustainability assessment of hydrogen energy systems. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 29, p. 1327-1342, 2004.

AGUILAR-SANTANA, J. L. *et al.* Review on Window-Glazing Technologies and Future Prospects. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 15, n. 1, p. 112-120, 2019.

AKPAN, U. F.; AKPAN, G.E. The Contribution of Energy Consumption to Climate Change: A Feasible Policy Direction. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 2, n.1, p. 21-33, 2012.

ALIBABA, H. Determination of Optimum Window to External Wall Ratio for Offices in a Hot and Humid Climate. **Sustainability**, n. 8, v. 187.

ALMEIDA, T.; PERES, A. C.; MORGADO, C. Análise da otimização de painéis fotovoltaicos para o Rio de Janeiro. **Anais...** XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2020.

ALONSO-GARCIA, M. C.; RUIZ, J.M.; CHENLO, F. Experimental study of mismatch and shading effects in the I-V characteristic of a photovoltaic module. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 90, n. 3, p. 329-340, 2006.

ALSEMA, E. A. Environmental Aspects of Solar Cell Modules. **Summary Report**, n. 96074, 1996. ISBN 90-73958-17-2.

ALVES, M. G. **Mini-inversores para aproveitamento de energia fotovoltaica com técnicas de MPPT, sincronismo e conexão com a rede de CA em BT, proteção de ilhamento, gerenciamento da energia e da operação**. Ilha Solteira, 2013. 169f. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia. Universidade Estadual Paulista.

AMORIM, A. C. **Análise de métodos de determinação do zoneamento bioclimático brasileiro a partir do estudo de caso de Colatina-ES**. Viçosa, 2015. 163p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Viçosa.

ANCTIL; A.; LEE, E.; LUNT, R. R. Net energy and cost benefit of transparent organic solar cells in building-integrated applications. **Applied Energy**, v. 261, n. 114429, 2020.

ANDRADE, A. B.; BRANDÃO, P. R. B. **Geografia de Salvador**. ISBN 978-85-232-0564-5.

ANDRADE, C. S. P. Teresina e Clima: Indissociabilidades no Estudo da Cidade. **Equador: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Piauí**, v. 5, n. 3, p. 398-420, 2016.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Nota Técnica n° 0062/2018**. Brasília, 2018.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Resolução Normativa n° 482**. Brasília, 2012.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Resolução Normativa n° 687**. Brasília, 2015.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Resolução Normativa n° 786**. Brasília, 2017.

ARISTIZÁBAL, A.J.; PAEZ, C.A.; OSPINA, D.H. **Building-Integrated Photovoltaic Systems (BIPVS): Performance and Modeling under Outdoor Conditions**. Springer, 2018.

ARMOND, N. B.; NETO, J. L. S. Entre Eventos e Episódios: Ritmo climático e excepcionalidades para uma abordagem geográfica do clima no município do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 20, p. 5-28, 2017.

ASFOUR, O. S. Solar and Shading Potential of Different Configurations of Building Integrated Photovoltaics Used as Shading Devices Considering Hot Climatic Conditions. **Sustainability**, v. 10, 2018.

ASSIS, E. S.A abordagem do clima urbano e aplicações no planejamento da cidade: reflexões sobre uma trajetória. **Anais... ENCAC-ELACAC 2005 (Maceio, Alagoas)**, p. 92-101, 2005.

BAGNATI, M. M. **Zoneamento Bioclimático e Arquitetura Brasileira: Qualidade do ambiente construído**. Porto Alegre, 2013. 132p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BECQUEREL, A. E. Memoire sur les Effects d'Electriques Produits Sous l'Influence des Rayons Solaires. **Comptes Rendus de l'Academie des Sciences**, v. 9, p. 561-567, 1839.

BELMAHDI, B.; BOUARDI, A. E. Solar Potential Assessment using PVSyst Software in the Northern Zone of Morocco. **Anais...** 13th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, v.46, p.738-745, 2020.

BLOCK, K. Enhanced policies for the improvement of electricity efficiencies. **Energy Policy**, v. 33, n.12, p. 1635-41, 2005.

BRASIL. **Decreto n° 5.163, de 30 de julho de 2004**. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Proposta de Instrução Normativa INMETRO para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. Brasília, 2018.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME) e EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029**. Brasília, 2019.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Portaria n° 50, de 01 de fevereiro de 2013 – Anexo V**. Brasília, 2013c.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Portaria n° 248, de 10 de julho de 2018**. Brasília, 2018.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Regulamento Técnico da Qualidade do Nível da Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas**. Brasília, 2013a.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Regulamento Técnico da Qualidade do Nível da Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. Brasília, 2012.

BRASIL. Casa Civil. **Decreto n° 7.246, de 28 de julho de 2010**. Brasília, 2010.

BRITO, M. C. *et al.* The importance of facades for the solar PV potential of a Mediterranean city using LiDAR data. **Renewable Energy**, v. 111, p. 85-94, 2017.

BOCCALATTE, A.; FOSSA, M. Best arrangement of BIPV surfaces for future NZEB districts while considering urban heat island effects and the reduction of reflected radiation from solar façades. **Renewable Energy**, v. 160, 2020.

BOCCHI, N.; FERRACIN, L. C.; BIAGGIO, S. R. Pilhas e Baterias: Funcionamento e impacto Ambiental. **Química e Sociedade**, v. 11, 2000.

CANADÁ. Ministério de Recursos Naturais. **RETScreen Software Online User Manual**. Varennes, 2005.

CARVALHO, C. R. F. **Sistema fotovoltaico isolado: uma aplicação prática no Projeto Xapuri**. Lavras, 2013. 45f. Monografia (Formas Alternativas de Energia) – Universidade Federal de Lavras.

CASTILLO, G. J. *et al.* Impacts of Array Orientation and Tilt Angles for Photovoltaic Self-Sufficiency and Self-Consumption Indices in Olive Mills in Spain. **Electronics**, v.9, n. 348, 2020.

CHENG, X. *et al.* Exploring the optimization potential of thermal and power performance for a low-energy high-rise building. **Energy Procedia**, v.158, p. 2469-2474, 2019.

CLARKE, J. A.; HENSEN, J. L. M. Integrated Building Performance Simulation: Progress, Prospects and Requirements. **Building and Environment**, v.91, p. 294-306, 2015.

CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). **Resolução n.º 401, de 04 de novembro de 2008**. Brasília, 2008.

DORAI, B. Y.; DAS, S. P. Dual multi-string PV topology fed three level grid connected inverter. **Anais... 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition – APEC 2014**, 2014.

EIFFERT, P.; KISS, G. J. **Building Integrated Photovoltaic Designs for Commercial and Institutional Structures: A Source Book for Architect**. ISBN 978-1-4289-1804-7.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2020: Ano base 2019**. Rio de Janeiro, 2020.

EISENCHMID, I. *et al.* **BIPV Technical Solutions and Best Practices**. 1. ed. PURE Promotion of Building Integrated Photovoltaics, 2008.

EVO (Efficiency Valuation Organization). **Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance**. Publicado em janeiro de 2012. Disponível em: http://www.abesco.com.br/wp-content/uploads/2015/07/PIMVP_2012-PTBR.pdf. Acesso em: 24 nov 2020.

FILHO, A. J. P. *et al.* Impactos Antrópicos no clima da Região Metropolitana de São Paulo. **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 48-56, 2007.

FOUAD, M. M.; SHIHATA, L.A.; MORGAN, E. I. An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 1499-1511, 2017.

FRAUENHOFFER ISE (Institute for Solar Energy systems). **Multicrystalline Silicon Solar Cell with 21.9 Percent Efficiency: Fraunhofer ISE Again Holds World Record**. Comunicado de Imprensa de 20 de fevereiro de 2017. Disponível em: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/press-releases/2017/0617_ISE_e_PR_Weltrekord%20multi%20Si%20Solarzelle_final.pdf

FREITAS, S.; BRITO, M. C. Solar façades for future cities. **Renewable Energy Focus**, v. 31, p. 73-79, 2019.

FREITAS, J. S. *et al.* Modeling and assessing BIPV envelopes using parametric Rhinoceros plugins Grasshopper and Ladybug. **Renewable Energy**, v. 160, p. 1468-1479, 2020.

GEPEA (Grupo de Energia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo). **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica**. 2014. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/56337/mod_resource/content/2/Apostila_solar.pdf. Acesso em: 17 dez 2020.

GIVONI, B. Comfort Climate Analysis and Building Design Guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, n. 1, p. 11-23, 1992.

GOMEZ, J. M. R. *et al.* A irradiância solar: conceitos básicos. **Revista Brasileira do Ensino de Física**, v. 40, n. 3, 2019.

GONZÁLEZ, J.; FIORITO, F. *Daylight Design of Office Building: Optimization of External Solar Shading by Using Combined Simulation Methods*. **Buildings**, v. 5, p. 560-580, 2015.

GREEN, M. A. **Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion**. 1.ed. Berlin: Springer, 2003. 160 p.

HADAVINA, H.; SINGH, H. Modelling and experimental analysis of low concentrating solar panels for use in building integrated and applied photovoltaic (BIPV/BAPV) systems. **Renewable Energy**, v. 139, p. 815-829, 2019.

HAHN, S. Os papéis da ciência dos materiais e da engenharia para uma sociedade sustentável. **Estudos Avançados**, v. 8, n. 20, p. 36-42, 1994.

HARIYADI, A.; FUKUDA, H.; MA, Q. The effectiveness of the parametric design 'sudare' blind as external shading for energy efficiency and visibility quality in Jakarta. **Architectural Engineering and Design Management**, v. 13, n.5, p. 384-403, 2017.

HEINSTEN, P.; BALLIF, C.; PERRET-AEBI, L. Building Integrated Photovoltaics (BIPV): Review, Potentials, Barriers and Myths. **Green**, v. 3, n. 2, p. 125-156, 2013.

HOSEINZADEH, P. *et al.* Energy performance of building integrated photovoltaic high-rise building: case study, Tehran, Iran. **Energy and Buildings**, v. 235, 110707, 2021.

HU, J. *et al.* Buildings with ETFE foils: a review on material properties, architectural performance and structural behavior. **Construction and Building Materials**, v. 131, p.411-422, 2017.

HWANG, T.; KANG, S.; KIM, J. T. Optimization of building integrated photovoltaic system in office building – focus on the orientation, inclined angle and installed area. **Energy and Buildings**, v. 46, p. 92-104, 2012.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Sinótese do Censo Demográfico 2010**. Brasília, 2010. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php>. Acesso em; 25 dez. 2020.

IEA (International Energy Agency). **The Future of Cooling**. Publicado em maio 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>. Acesso em: 02 set 2020.

ILBEIGI, M.; GHOMEISHI, M.; DEGHANBANADAKI, A. *Prediction and optimization of energy consumption in an Office building using artificial neural network in a genetic algorithm*. **Sustainable Cities and Society**, v. 61, n.102325, 2020.

INFRAERO. **Meteorologia Aeronáutica**. Disponível em: <https://www4.infraero.gov.br/meteorologia-aeronautica/>. Acesso em: 13 dez 2020.

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: 2017. 79 p. Disponível em: <https://repositorio.unifesp.br/handle/11600/58353>

JÚNIOR, J. L. R. S. *et al.* Efeito da sazonalidade climática na ocorrência de sintomas respiratórios em uma cidade de clima tropical. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 37, n. 6, p. 759-767, 2011.

KABOSOVA, L. Analysis of wind-adaptive architecture. **Anais... IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 867, n. 012014, 2020.

KAKA, F. *et al.* Modeling process-structure-property relationship in organic Photovoltaics using a robust diffuse interface approach. **AIP Advances**, v. 10, n. 065304, 2020.

KALDELLIS, J. *et al.* Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations: experience obtained from outdoor measurements in Greece. **Renewable Energy**, v. 66, p. 612-624, 2014.

KAZMERSKI, L. L. Photovoltaics: A review of cell and module technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 1, n. 1-2, p. 71-170, 1997.

KAZMERSKI, L. L.; WHITE, F. R.; MORGAN, G. K. Thin-film CuInSe₂/CdS heterojunction solar cells. **Applied Physics Letters**, v. 29, n. 4, p. 268-270, 1976.

KUINCHTNER, A.; BURIOL, G. A. Clima do estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Koppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia**, v. 2, n.1, p. 171-182, 2001.

KUMAR, R. *et al.* Design and simulation of standalone solar PV system using PVsyst software: a case study. **Materials Today: Anais**, 2020.

LABEEE (Laboratório de Eficiência Energética em Edificações). **Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes e Coberturas**. 4a ed. Florianópolis, 2010.

LADYBUGTOOLS. **Tools**. Disponível em: <https://www.ladybug.tools/index.html#intro>. Acesso em: 15 dez. 2020a.

LADYBUGTOOLS. **Ladybug**. Disponível em: <https://www.ladybug.tools/ladybug.html>. Acesso em: 15 dez. 2020b.

LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory). **WINDOW 7 User Manual**. 2019. Disponível em: <https://windows.lbl.gov/sites/default/files/software/WINDOW/WINDOW7UserManual.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2020.

LEE, T. D.; EBONG, A. U. A review of thin film solar cell technologies and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 1286-1297, 2020.

LEITE, R. C. V. **Fortaleza: Terra do Vento**. São Paulo, 2010. 296p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Arquitetura, Universidade de São Paulo.

LIRA, M. A. T. *et al.* Contribuição dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica para a Redução de CO² no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 3, p. 389-397, 2019.

LIU, B.; DUAN, S. Energy Efficiency evaluation of Building Integrated Photovoltaic systems with different power configurations. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 29, p. 93-108, 2012.

LOONEN, R. C. G. M.; KLINJ-CHEVALERIAS, M. L.; HENSEN, J. L. M. Opportunities and pitfalls of using building performance simulation in explorative R&D contexts. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 12, n. 3, p. 272-288, 2019.

LOPES, R. M. F. **Otimização do desempenho energético de um edifício residencial em Portugal**. Florianópolis, 2010. 150p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

LOU, S. *et al.* Estimation of obstructed vertical solar irradiation under the 15 CIE Standard Skies. **Building and Environment**, v. 103, p. 123-133, 2016.

LUBER, E.J.; BURIK, J. M. Reporting Performance in Organic Photovoltaic Devices. **American Chemical Society**, v. 7, n. 6, p. 4708-4714, 2013.

LUND, H. Implementation of energy-conservation policies: the case of electric heating conversion in Denmark. **Applied Energy**, v. 64, p. 117-127, 1999.

LYRA, G. G. B.; ROLA, S. M. Revisão sobre ambiente de trabalho BIM aplicado a sistemas fotovoltaicos integrados a edifícios. **Anais...** V Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2020.

MACIEL, A. A. **Projeto Bioclimático em Brasília: Estudo de Caso em Edifício de Escritórios**. Florianópolis, 2002. 138f. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

MCNEEL. **Características do software**. Disponível em: <https://www.rhino3d.com/features/>. Acesso em: 15 dez. 2020.

MENDONÇA, F. A.; CASTELHANO, F. J. O Clima entre a poluição do ar por PTS em Curitiba-PR. **Revista do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo**, v. especial, p. 133-144, 2016.

MORAIS, J. C. S. **Desenvolvimento de um microinversor conectado à rede baseado na integração do conversor cuk com uma estrutura de indutores chaveados**. Curitiba, 2017. 163p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnologia do Paraná.

MORENO, A. *et al.* Energy and Luminous Performance Investigation of an OPV/ETFE Glazing Element for Building Integration. **Energies**, v. 12, n. 1870, 2019.

MORGADO, C. O.; BRASILEIRO, A. Fachadas de vidro em edifícios corporativos no Rio de Janeiro. **Anais... III Encuentro Latinoamericano y Europeo sobre Edificaciones y Comunidades Sostenibles (EURO ELECS 2019)**, p 112-120, 2019.

MOSCARELLI, F. CARDOSO, G. T. Urban Rules and Morphology Analysis as support to solar performance in Passo Fundo/RS, Brazil. **Anais... IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 503, n. 012034, 2020.

MOTTA, A. G. **O Clima de Natal**. Ministério da Ciência e Tecnologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). INPE-11475-RPQ-776.

NAGY, B.; OROSZ, M. Optimized Thermal Performance Design of Filled Ceramic Masonry. **Applied Mechanics and Materials**, v. 797, p.174-181, 2015.

NASCIMENTO, L. R. **A avaliação de longo prazo de um sistema fotovoltaico integrado à edificação urbana e conectado à rede elétrica pública**. Florianópolis, 2013. 103p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

NEMER, L.; KLEIN, I. Spatial analysis and 3D modeling: drawing the cathedral of Brasília in different software. **Anais... 18th International Conference on Geometry and Graphics (ICGG)**, v. 809, p. 2223-2226, 2018.

NÓBREGA, B. S. *et al.* Desempenho de um Sistema solar fotovoltaico com diferentes inclinações e orientações azimutais em cidades da Paraíba. **Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, n. 43, p. 175-188, 2018.

OHL, R. S. **Light-sensitive electric device**. Depositante: Russel S. Ohl. US2402662A. Depósito: 27 de maio de 1941. Concessão: 25 de junho de 1946.

OLIVEIRA, F. T. V.; GÓMEZ-MALAGÓN, L. A. Otimização de ângulo de inclinação e orientação de painéis solares para a cidade de Petrolina. **Anais... VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, 2018.

ONG, B. Q.; TABLADA, A. Investigating Optimal BIPV Energy Yield in consideration of Daylight and Thermal Performance in Residential Buildings. **Anais... PLEA 2017 Edinburgh: Design to Thrive**, 2017.

PAYDAR, K. M. Optimum design of building integrated PV module as a movable shading device. **Sustainable Cities and Society**, v. 62, n. 102368, 2020.

PEREIRA, N. X. **Desafios e perspectivas da energia solar fotovoltaica no Brasil: Geração Distribuída e Geração Centralizada**. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2019.

PERES, A. C.; ALMEIDA, T.; MORGADO, C. Otimização de painéis fotovoltaicos fixos e comparação com sistemas de rastreamento solar para três cidades brasileiras. **Anais...** XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2020.

POWALLA, M. *et al.* Advances in Cost-Efficient Thin-Film Photovoltaics Based on Cu(In, Ga)Se². **Engineering**, v. 3, p. 445-451, 2017.

PRADHAN, A.; PANDA, B. Analysis of Ten External Factors Affecting the Performance of PV System. **Anais...** International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS-2017), p. 3093-3098, 2017.

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Manual para Aplicação do RTQ-C**. 4 ed. Rio de Janeiro, 2016.

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso Ano Base 2005, Relatório Comercial – Estudo Completo**. Rio de Janeiro, 2008.

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso Ano Base 2005, Classe Residencial - Relatório Brasil**. Rio de Janeiro, 2007.

QUASCHNING, V.; HANITSCH, R. Numerical simulation of current-voltage characteristics of photovoltaic systems with shaded solar cells. **Solar Energy**, v. 56, n. 6, p. 513-520, 1996.

QIU, C.; YANG, H; SUN, H. Investigation on the thermal performance of a novel vacuum PV glazing in different climates. **Energy Procedia**, v. 159, p. 706-711, 2019.

RAJENDRAN, P.; SMITH, H. Modelling of solar irradiance and daylight duration for solar-powered UAV sizing. **Energy Exploration and Exploitation**, v. 34, n.2, p. 235-243, 2016.

RORIZ, M. **Classificação de Climas do Brasil – Versão 3**. ANTAC: São Carlos, 2014. 5 p. Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/Climas_v3.pdf. Acesso em: 13 dez 2020.

ROSEGHINI, W. F. F. **Clima urbano e dengue no centro-sudoeste do Brasil**. Curitiba, 2013. 151f. Tese de Doutorado – Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná.

ROUDSARI, M. S.; PAK, M. Ladybug: a parametric environmental plugin for Grasshopper to help designers create an environmentally conscious design. **Anais...** 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, p. 3128-3135, 2013.

RUTTEN, D. *Galapagos: On the Logic and Limitations of Generic Solvers*. **Architectural Design**, v. 83, n.2, p. 132-135, 2013.

RÜTHER, R.; SALAMONI, I. O potencial de setores urbanos brasileiros para a geração de energia solar fotovoltaica de forma integrada às edificações. **Mudanças Climáticas e o Impacto nas Cidades**, v. 4, n.1,p. 84-94, 2011.

SAFE, M. *et al.* On Stopping Criteria for Genetic Algorithms. **Anais... Lecture Notes in Computer Science (LNCS)**, v. 3171, 2004.

SAMPAIO, P. G. V.; GONZÁLEZ, M. O. A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 590-601, 2017.

SAMPAIO, P. G. V. *et al.* Overview of printing and coating techniques in the production of organic photovoltaic cells. **Energy Research**, v. 44, p. 9912-9931, 2020a.

SAMPAIO, P. G. V. *et al.* Prospecting technologies for photovoltaic solar energy: overview of its technical-commercial viability. **Energy Research**, v. 44, p. 651-667, 2020b.

SANDIA. Photovoltaic Array Performance Model. 2004.

SANTOS, I. P. **Integração de Painéis Solares Fotovoltaicos em Edificações Residenciais e sua contribuição em um alimentador de energia de Zona Urbana Mista**. Florianópolis, 2009. 95f. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

SANTOS, I. P. *et al.* Ábacos para análise simplificada de orientação e inclinação de sistemas solares fotovoltaicos integrados a edificações. **Anais... IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES**, 2012.

SANTOS, J. C. P. *et al.* Comportamento ótico de vidros e policarbonatos translúcidos frente à radiação solar. **Matéria**, v. 23, n. 3, 2018.

SBAMPATO, B. A. **Comparative analysis between mono-si and OPV photovoltaic devices: accelerated aging experiments applied to LCA and LCOE**. Belo Horizonte, 2017. 107f. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.

SILVA, A. S.; GHISI, E. Análise comparativa dos resultados do desempenho térmico da envoltória de uma edificação residencial pelos métodos de simulação do RTQ-R e da NBR 15575-1. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 1, p. 213-230, 2014.

SILVA, L. F. G. S. **Percepção Climática e Conforto Térmico: contribuição ao estudo interdisciplinar dos aspectos objetivos e subjetivos do clima em Palmas, TO – Volume I**. Palmas, 2018. 550f. Tese de Doutorado – Departamento de Ciências do Ambiente, Universidade Federal do Tocantins.

SINKE, W. C. Development of photovoltaic technologies for global impact. **Renewable Energy**, v. 138, 911-914, 2019.

SLIMENE, M. B.; KHLIFI, M. A. Modelling and study of energy storage devices for photovoltaic lighting. **Energy Exploration and Exploitation**, v. 38, n. 5, p. 1932-1945, 2020.

SOFLAEI, S. *et al.* A simulation-based model for courtyard housing design based on adaptive thermal comfort. **Journal of Building Engineering**, v. 31, n. 101335, 2020.

SOUSA, W. F. **Estudo econômico de painéis solares em residencial multifamiliar no município de Barra do Garças – MT**. Barra do Garças, 2019. 56f. Trabalho Final de Graduação – Departamento de Engenharia, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso.

SOUZA, B. A. *et al.* Estudo de viabilidade técnica e econômica para a aplicação de organic photovoltaics (OPV) em um edifício residencial. **Brazilian Journal of Development**, v.6, n.7, p. 52952-52970, 2020.

SOUZA, G. T. **Utilização de Imagens em Infravermelho para Análise Térmica de Componentes Construtivos**. Florianópolis, 2010. 27. Relatório de Iniciação Científica (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

STOICHKOV. *et al.* Studying the outdoor performance of organic building-integrated photovoltaics laminated to the cladding of a building prototype. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 191, p. 356-364, 2019.

SUGIRIANTA, I. B. K.; SUNAYA, I. G. A. M.; SAPUTRA, I. G. N. A. D. Optimization of tilt angle on-grid 300Wp PV plant model at Bukit Jimbaran Bali. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1450, n. 012135, 2020.

SULPIZIO, C. *et al.* Optimal design criteria for form-finding of double-curved surfaces. **Anais...** 1st International Conference on Optimization-Driven Architecture Design, v. 44, p. 28-35, 2020.

SUNEW. **Greenest Energy Everywhere**. 2020. Página Inicial. Disponível em: <https://sunew.com.br/>. Acesso em: 02 out. 2020a.

SUNEW. **Cases de tecnologia sustentável e inovadora**. Disponível em: < <https://sunew.com.br/cases/categorias/smart-buildings/> > . Acesso em: 15 set. 2020b.

SUNEW. **Catálogo de Especificações SUNEW FLEX**. Disponível em: <https://sunew.com.br/downloads/>. Acesso em: 02 out. 2020c.

SUSAN, S.; WARDHANI, D. Building Integrated Photovoltaic as GREENSHIP'S on site renewable energy tool. **Results in Engineering**, v. 07, n. 100153, 2020.

SUZUKI, E. V.; REZENDE, F. D. **Estudo da Utilização da Geração Fotovoltaica para auxiliar a suprir a demanda crescente de energia elétrica no Brasil**. Curitiba, 2013. 59p. Monografia (Especialização em Eficiência Energética) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

TIAN, Z.; HRYNYSZYN, B. D. Overheating risk of a typical Norwegian residential building retrofitted to higher energy standards under future climate conditions. **E3S Web of Conferences**, v. 172, n. 02007, 2020.

TRIPATHY, M.; SADHU, P.K.; PANDA, S.K. A critical review of integrated photovoltaic products and their applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 61, p. 451-465, 2016.

UNFCCC – Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas. **Acordo de Paris**. 2015. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf . Acesso em: 20 abr. 2020.

U. S. Department of Energy. **EnergyPlus Essentials: Energy Plus Version 9.4.0 Documentation**. 2020. Disponível em: https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel_custom/pdfs/pdfs_v9.4.0/EnergyPlusEssentials.pdf. Acesso em: 17 dez. 2020.

VÄLIMÄKI, M. *et al.* Custom-shaped Organic Photovoltaic Modules – Freedom of Design by Printing. **Nanoscale Research Letters**, v.12, n. 117, 2017.

VILELA, J. A. **Variáveis do Clima Urbano: Análise da situação atual e prognósticos para a região do bairro Belvedere III, Belo Horizonte, MG**. Belo Horizonte, 2007. 213f. Dissertação de Mestrado – Departamento de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 1. Ed. São Paulo: Érica, 2012.

VIVALDINI, D. O. *et al.* Revisão: Fundamentos e materiais para o projeto da microestrutura de isolantes térmicos refratários de alto desempenho. **Cerâmica**, v. 60, p. 297-309, 2014.

WANDERLEY, A. C. F.; CAMPOS, A. L. P. S. **Perspectivas de Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na geração de energia elétrica no Rio Grande do Norte**. 1. Ed. Minas Gerais, 2012.

WANG, Y. *et al.* Photovoltaic efficiency enhancement of polycrystalline silicon solar cells by a highly stable luminescent film. **Science China Materials**, v.63 , p. 544-551, 2020.

YANG, C. *et al.* Boost Voc of pure sulfide kesterite solar cell via a double CZTS layer stacks. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 160, p. 7-11, 2017.

WEIDE, L. E. *et al.* Determinação de um ano meteorológico típico para Florianópolis-SC. **Anais...** Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES, 2012.

YANG, J.; BANERJEE, A.; GUHA, S. An Amorphous Silicon Alloy Triple-Junction Solar Cell with 14.6% Initial and 13.0% Stable Efficiencies. **Anais...** MRS, v. 467, p. 467-693, 1997. doi:10.1557/PROC-467-693

ZHANG, W.; LU, L. Evaluation of potential benefits of solar photovoltaic shadings in Hong Kong. **Energy**, v. 137, p. 1152-1158, 2017.

ZHANG, W.; LU, L. Overall energy assessment of semi-transparent photovoltaic insulated glass units for building integration under different climate conditions. **Renewable Energy**, v. 134, p. 818-827, 2019.

ZHENG, B.; HUO, L; LI, Y. Benzodithiophenedione-based polymers: recent advances in organic photovoltaics. **NPG Asia Materials**, v. 12, 2020.

ZHONG, B. *et al.* Technology Frontiers of Building-integrated Photovoltaics (BIPV): A patent co-citation analysis. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 12, n. 2, p. 241-252, 2020.

ZIELONKO-JUNG, K.; JANIÁK, J. Tree as a shading system for streets on the east-west axis: computer simulations for the selected geometrical proportions of building selected geometrical proportions of building developments in humid continental climate. **Sustainability**, v. 8, n. 1278, 2020.

ZOMER, C. D. **Método de estimativa da influência do sombreamento parcial na geração energética de sistemas solares fotovoltaicos integrados em edificações**. Florianópolis, 2014. 258p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

ZSIBORÁCS, H. *et al.* The Impacts of Tracking System Inaccuracy on CPV Module Power. **Processes**, v. 8, n. 1278, 2020.

Anexo I.**Formas de integração de sistemas fotovoltaicos a edificações**

Pesquisa realizada na Base SCOPUS em 12/02/2021, englobando artigos científicos que combinassem as palavras *building integrated photovoltaics* ou BIPV com *window*, *skylight*, *pergola*, *shading device* ou *façade* no resumo, título ou palavras-chave. Foram encontradas as seguintes publicações por tópico e ano:

Ano	<i>window</i> (janela)	<i>skylight</i> (claraboia)	<i>pergola</i> (pergolado)	<i>shading device</i> (elemento de sombreamento)	<i>façade</i> (fachada)
1996	1	0	0	0	1
1997	0	0	0	0	4
1998	0	0	0	0	2
1999	0	0	0	0	0
2000	0	0	0	0	3
2001	0	0	0	0	3
2002	2	0	0	1	4
2003	2	0	0	1	10
2004	1	0	0	0	3
2005	0	0	0	1	9
2006	3	0	0	0	10
2007	3	0	0	1	15
2008	7	1	0	1	15
2009	6	2	0	4	15
2010	10	1	0	2	19
2011	15	0	0	11	30
2012	23	1	0	12	33
2013	24	5	0	8	32
2014	36	6	1	14	53
2015	41	3	0	12	61
2016	42	6	0	16	58
2017	61	2	1	24	90
2018	57	4	0	18	95
2019	99	4	1	21	112
2020	91	12	0	27	120
2021	18	3	0	6	19

Anexo II. Tecnologias utilizadas para integração de sistemas fotovoltaicos a edificações

Pesquisa realizada na Base SCOPUS em 12/02/2021, englobando artigos científicos que combinassem as palavras-chave *building integrated photovoltaics* ou BIPV e o nome de cada uma das tecnologias em inglês. Foram encontradas as seguintes publicações por tópico e ano:

Ano	OPV	CdTe	CIGS	Silício Amorfo	Silício Poli e Monocristalino
1996	0	0	0	1	0
1997	0	1	0	2	0
1998	0	0	0	2	0
1999	0	0	0	0	0
2000	0	0	0	1	0
2001	0	0	0	2	0
2002	0	0	0	2	1
2003	0	1	1	8	2
2004	0	0	0	4	0
2005	0	0	1	4	0
2006	0	0	3	3	0
2007	0	1	0	3	1
2008	0	0	1	4	0
2009	0	1	1	4	1
2010	0	0	1	4	1
2011	2	1	1	8	0
2012	0	1	5	10	2
2013	2	1	2	11	1
2014	3	2	6	12	0
2015	3	3	2	11	1
2016	0	4	9	10	2
2017	4	3	5	10	1
2018	2	5	8	14	3
2019	3	3	8	12	1
2020	4	9	10	13	1
2021	0	0	2	1	0