MODELAGEM E COMPARAÇÃO DE EFEITOS SIMULTÂNEOS DA FORMA URBANA SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA E O CONFORTO DOS ESPAÇOS EXTERNOS. O CASO DO BELENZINHO, EM SÃO PAULO[1]

MARINS, K. R. C. Universidade de São Paulo, e-mail: karin.marins@usp.br; GIROTTI, C., Universidade de São Paulo, e-mail: cgirotti@usp.br; PACIFICI, M., Universidade de São Paulo, e-mail: martinapacifici@usp.br; CRUZ, R. B. C., Universidade de São Paulo, e-mail:rafaelcastelo@usp.br

ABSTRACT

The urban form is a complex structure, whose combination of elements demands multicriteria assessment, in order to achieve an overall improved performance. The objective is to analyze and discuss the performance of urban planning parameters, applied to the neighborhood of Belenzinho, in São Paulo, with regard to photovoltaic energy generation and environmental comfort of external spaces. The studied area is part of an urban zone under densification and transformation. Two simulations were carried out using Rhinoceros, associated with the Grasshopper and Diva plug-ins (photovoltaic energy assessment) and field climate collections associated with the Rayman application, as well as using Rhinoceros, for external space comfort assessment. The combined results of the simulations indicate that there is a certain intermediate range of verticality and built up density, which may result, in one hand, in certain losses in photovoltaic generation. However, on the other hand the intermediate results would allow regulating, better environmental comfort conditions for external urban spaces as well as inside of buildings.

Keywords: *Urban form. Photovoltaic power generation. Environmental comfort. Built density. Verticalization.*

1 INTRODUÇÃO

Marins, et. al. (2017), Marins e Roméro (2012) e NG (2011) abordam a forma urbana como uma combinação de elementos no espaço urbano, que condicionam sua funcionalidade, qualidade e desempenho, devendo ser encarados de forma abrangente, sistêmica e multicriterial. A regulação da forma urbana ampara-se no Plano Diretor, na lei de Parcelamento, Uso e Ocupação de Solo e no Código de Obra, que estabelecem os parâmetros orientativos para o desenvolvimento e planejamento urbano.

A pergunta de pesquisa é se revisão do Plano Diretor do município de São Paulo, de 2014, e da Lei de Uso e Ocupação de Solo, de 2016, influenciará o potencial de geração de energia fotovoltaica e as condições de conforto ambiental nos espaços abertos na região do Belenzinho.

2 INFLUÊNCIA DOS "PARÂMETROS URBANÍSTICOS" NO DESEMPENHO DA FORMA URBANA

Mauad, Cruz e Marins (2017), Cruz e Marins (2017 e 2016), Willians et. al (2000)

[1] MARINS, K. R. C. et al, Modelagem e comparação de efeitos simultâneos da forma urbana sobre a geração de energia fotovoltaica e o conforto dos espaços externos. O caso do Belenzinho, em São Paulo. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2018.

e Anderson, Kanargoglou e Miller(1996) sugerem que a expansão territorial, assim como o adensamento populacional e construído, são fatores relevantes no desenvolvimento urbano.

O adensamento construído associado a parâmetros urbanísticos, tais como, coeficiente de aproveitamento e taxa de ocupação do solo, condicionam a disponibilidade e o acesso da radiação solar no ambiente urbano (HUI, 2001; MARINS; ROMÉRO, 2012; MARINS; ROMÉRO, 2013; MARTINS, 2014; NG, 2010). Nas latitudes tropicais, valores críticos de temperatura afetam o conforto térmico nos espaços abertos; assim, o sombreamento torna-se um fator mitigador chave (Emmanuel, 1993). A verticalização de lotes proporciona condições de sombreamento. Porém, conforme Costa (2003) e Ribeiro et al. (2010), um sombreamento excessivo entre edifícios leva à exigência de iluminação artificial, e, o aumento de superfícies construídas expostas à radiação solar dificulta a dispersão de energia térmica armazenada.

3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ENERGIA E CONFORTO FRENTE À MORFOLOGIA URBANA - ESTUDO DE CASO NO BAIRRO DO BELENZINHO, EM SÃO PAULO

O "recorte" urbano estudado, o "bairro do Belenzinho" situa-se no distrito do Belém, com área de 604,5 ha e distante 4km do centro da cidade (Figura 1), marcada, no século passado, por ocupações industriais e vilas operárias, e atualmente forma um tecido urbano misto, com galpões industriais, vilas horizontais e empreendimentos imobiliários. Nas últimas décadas, tem sido objeto de transformações urbanas com adensamento e verticalização, possui diversificadas condicionantes microclimáticas entrelaçadas a espaços abertos.

Primeiramente, foram analisadas as alterações da taxa de ocupação e do coeficiente de aproveitamento máximos, trazidas pelo zoneamento de 2016 em relação ao de 2004 (Figura 2), para toda a Prefeitura Regional da Mooca. Para a taxa de ocupação (TO), os valores seguem uma escala de zero a 0,85. Para o coeficiente de aproveitamento máximo (CA), os valores seguem uma escala de zero a 4.

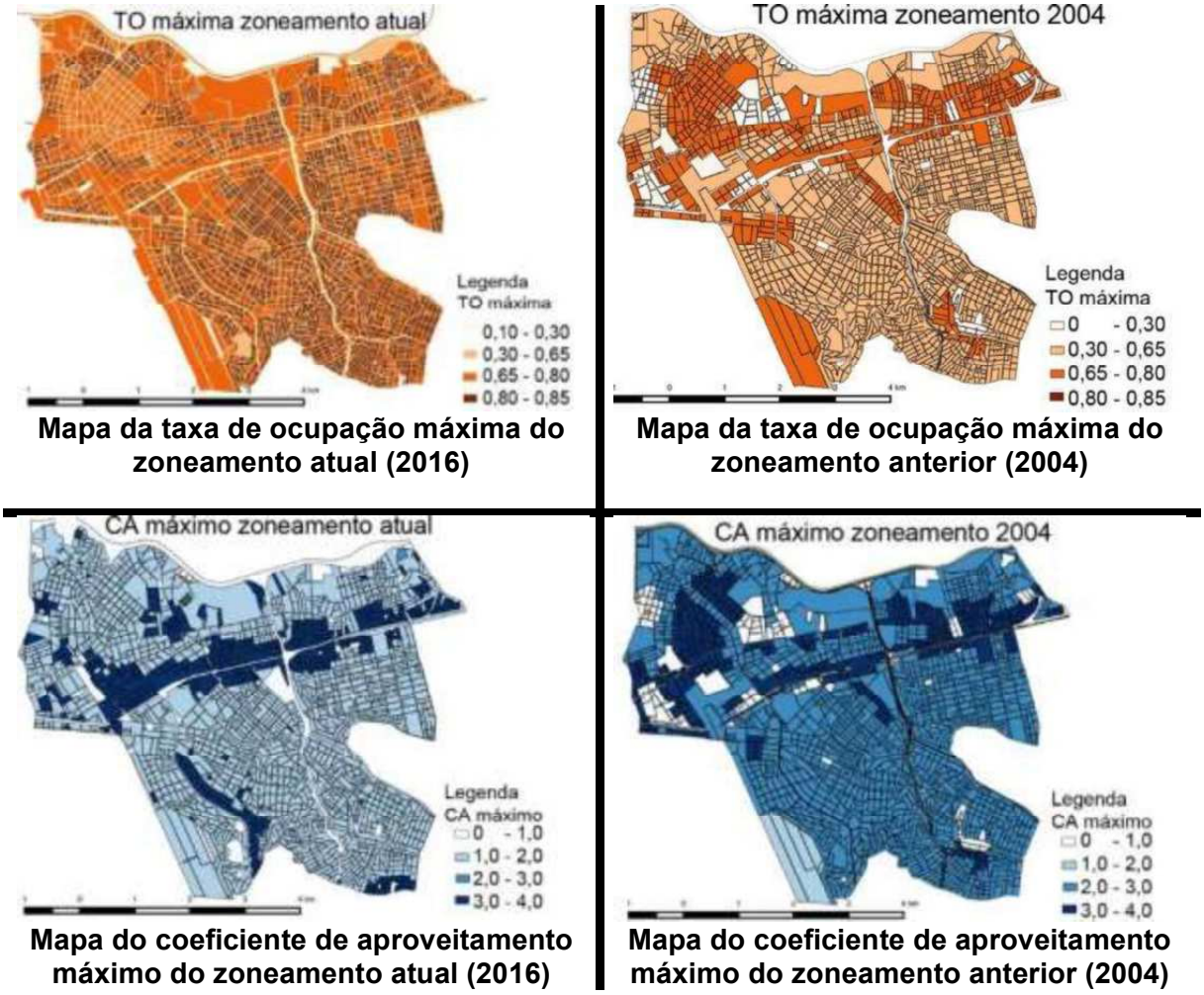
Figura 1- Localização da área de estudo



Fonte: Adaptado de GOOGLE (2018) e INFOCIDADE (2018).

Notou-se que as taxas de ocupação aumentaram, passando de 0 a 0,65, no zoneamento de 2004, para 0,65 a 0,85, na LPUOS de 2016. Com relação aos coeficientes de aproveitamento, no zoneamento vigente, há um predomínio de 0 a 2, exceto na Zona dos Eixos de Estruturação da Transformação Urbana (EETU), onde estes valores são mais altos (CA=4), e no zoneamento de 2004, quando o predomínio do CA era entre 2 e 4.

Figura 2 – Mapas comparativos da alteração da TO e do CA



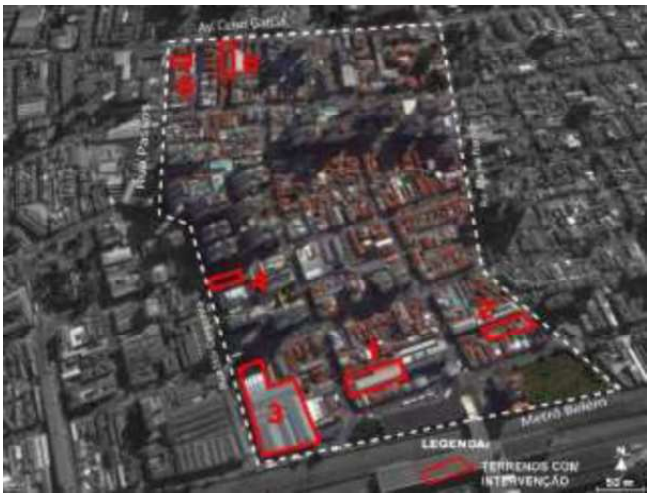
Fonte: Adaptado de Mauad, Cruz e Marins (2017)

3.1 Resultados relativos à geração de energia fotovoltaica

A morfologia urbana e os condicionantes de acesso ao sol foram parametrizados no Rhinoceros, associado aos plug-ins Grasshopper e Diva, devido à aplicabilidade e flexibilidade (ANTON; TĂNASE, 2016).

De forma evolutiva, foram investigados seis terrenos com potencial de transformação urbana, atualmente ocupados por galpões (Figura 3) , aplicando-se uma escala de valores para os parâmetros urbanísticos, apresentandos na tabela 1.

Figura 3 – Localização dos terrenos estudados quanto ao acesso ao sol para geração de energia fotovoltaica



Fonte: Adaptado de (GOOGLE, 2017)

Nas simulações foram aplicados os recuos laterais, frontais e de fundos mínimos de cada terreno (tabela 1), alterando-se o coeficiente de aproveitamento e a taxa de ocupação para verificação dos valores de radiação solar nos terrenos (tabela 2).

Tabela 1 – Parâmetros urbanísticos adotados nos terrenos – energia fotovoltaica

	Zona	C.A. (mínimo)	C.A. (Básico)	C.A. (máximo)	T.O. (máxima)	Recuo (mínimo)
Terreno 1	ZEU [1]	0,5	1	4	0,70	3 m
Terreno 2	ZEU	0,5	1	4	0,70	3m
Terreno 3[2]	ZEU	0,5	1	4	0,70	3m
Terreno 4	ZEU	0,5	1	4	0,70	3m
Terreno 5	ZEUP[3]	0,5	1	2	0,85	[4]
Terreno 6	ZEUP	0,5	1	2	0,70	3m

[1] ZEU- Zona Eixo Estruturação Urbana.

[2] Por possuir uma área elevada, foram planejados dois empreendimentos para o terreno 3, torre A e torre B, as quais foram simulados isoladamente.

[3] ZEUP - Zona Eixo de Estruturação Urbana Prevista.

[4] Não foi aplicado recuos mínimos no terreno 5, pois conforme LPUOS (2016) edificações com até 10 metros de altura não requerem recuos mínimos.

Fonte: Autores (2018), baseados em (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2016)

A simulação mostrou que a variação da taxa de ocupação gerou melhor resposta em relação à radiação solar, quando considerado o kWh/m^2 ano. Porém, a radiação solar total incidente é analisada, a taxa de ocupação se destaca como o pior parâmetro analisado, já que quando se aumenta a taxa de ocupação, a área construída de cobertura da edificação, destinada para aplicação dos painéis fotovoltaicos, diminui consideravelmente. Quando

analisada a radiação solar total incidente, apresentam melhor desempenho as variações com índices urbanísticos máximos permitidos pela legislação (tabela 2).

Tabela 2 – Resultados das simulações de radiação solar na área de estudo

	C.A.	T.O.	Radiação Solar (kWh/m²/ mês)	% *	Área de cobertura (m²)	Radiação solar incidente total (kWh/ano)	%*
Terreno 1 (1.499 m²)							
Máximo Permitido	4	0,7	1.846,00	3%	809,27	1.493.912,42	39,8%
Variação T.O. 0,6	4	0,6	1.870,00	4%	693,66	1.297.144,20	21,4%
Variação T.O. 0,5	4	0,5	1.848,00	3%	578,05	1.068.236,40	0,0%
Variação C.A. 2	2	0,7	1.841,00	2%	809,27	1.489.866,07	39,5%
Variação C.A. 1	1	0,7	1.799,00	0%	809,27	1.455.876,73	36,3%
Terreno 2 (1.240 m²)							
Máximo Permitido	4	0,7	1.874,00	2,1%	539,84	1.011.660,16	41,7%
Variação T.O. 0,6	4	0,6	1.892,00	3,1%	455,01	860.878,92	20,6%
Variação T.O. 0,5	4	0,5	1.851,00	0,8%	385,60	713.745,60	0,0%
Variação C.A. 2	2	0,7	1.866,00	1,6%	539,84	1.007.341,44	41,1%
Variação C.A. 1	1	0,7	1.836,00	0,0%	539,84	991.146,24	38,9%
Terreno 3 (5.128 m²)- Edificação A							
Máximo Permitido	4	0,7	1.819,00	1,5%	519,34	944.679,46	38,4%
Variação T.O. 0,6	4	0,6	1.834,00	2,3%	445,15	816.405,10	19,6%
Variação T.O. 0,5	4	0,5	1.840,00	2,6%	370,96	682.566,40	0,0%
Variação C.A. 2	2	0,7	1.806,00	0,7%	519,34	937.928,04	37,4%
Variação C.A. 1	1	0,7	1.793,00	0,0%	519,34	931.176,62	36,4%
Terreno 3 (5.128 m²) - Edificação B							
Máximo Permitido	4	0,7	1.856,00	1,5%	2.337,35	4.338.121,60	39,8%
Variação T.O. 0,6	4	0,6	1.885,00	3,1%	2.003,44	3.776.484,40	21,7%
Variação T.O. 0,5	4	0,5	1.859,00	1,7%	1.669,54	3.103.674,86	0,0%
Variação C.A. 2	2	0,7	1.828,00	0,0%	2.337,35	4.272.675,80	37,7%
Variação C.A. 1	1	0,7	1.857,00	1,6%	2.337,35	4.340.458,95	39,8%
Terreno 4 (990 m²)							
Máximo Permitido	4	0,7	1.721,00	4,6%	422,26	726.709,46	31,7%
Variação T.O. 0,6	4	0,6	1.772,00	7,7%	361,94	641.357,68	16,2%
Variação T.O. 0,5	4	0,5	1.830,00	11,2%	301,62	551.964,60	0,0%
Variação C.A. 2	2	0,7	1.667,00	1,3%	422,26	703.907,42	27,5%
Variação C.A. 1	1	0,7	1.645,00	0,0%	422,26	694.617,70	25,8%
Terreno 5 (322 m²)							
Máximo Permitido	2	0,85	1.815,00	0,1%	173,81	315.465,15	39,2%
Variação T.O. 0,7	2	0,7	1.831,00	1,0%	143,13	262.071,03	15,7%
Variação T.O. 0,6	2	0,6	1.847,00	1,9%	122,68	226.589,96	0,0%
Variação C.A. 1	1	0,85	1.820,00	0,4%	173,81	316.334,20	39,6%
Variação C.A. 0,5	0,5	0,85	1.813,00	0,0%	173,81	315.117,53	39,1%
Terreno 6 (1.782 m²)							
Máximo Permitido	2	0,7	1.822,00	2,7%	910,48	1.658.894,56	39,8%
Variação T.O. 0,6	2	0,6	1.822,00	2,7%	780,40	1.421.888,80	19,9%
Variação T.O. 0,5	2	0,5	1.824,00	2,8%	650,34	1.186.220,16	0,0%
Variação C.A. 1	1	0,7	1.815,00	2,3%	910,48	1.652.521,20	39,3%
Variação C.A. 0,5	0,5	0,7	1.774,00	0,0%	910,48	1.615.191,52	36,2%
Escala Radiação	Alta	Baixa					
*percentual de incremento dos ganhos de radiação solar em relação ao pior resultado							

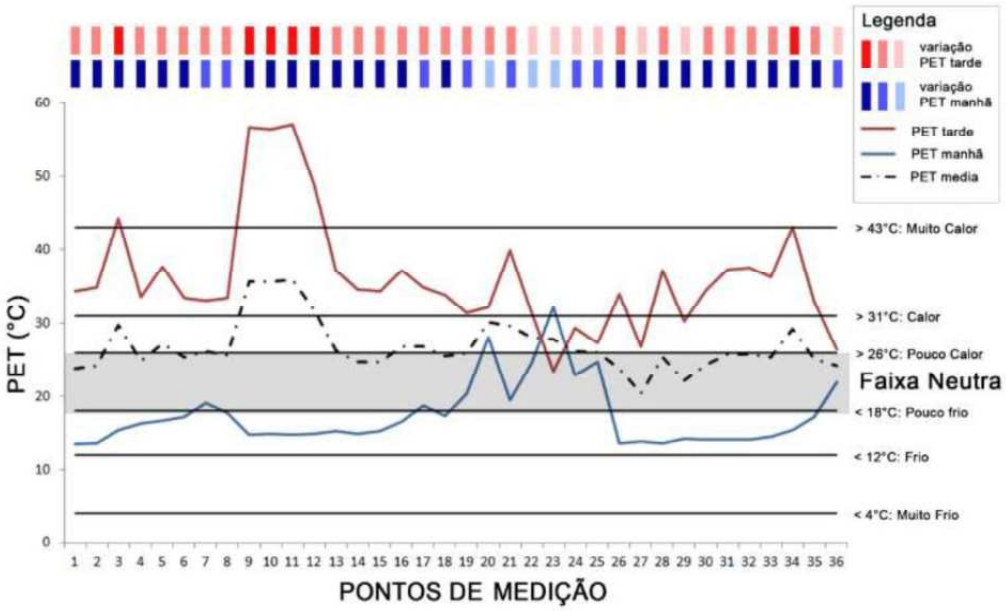
Fonte: Os autores (2018)

3.2 Resultados relativos ao conforto ambiental nos espaços abertos

Pacifici et al. (2017), efetuando 36 coletas climáticas na região, detectaram 3 zonas microclimáticas: *i)* quente, encontrada em vias arborizadas, ao redor de torres *ii)* fria, em vias cercadas por um tecido urbano de baixa altura e arborização escassa e *iii)* de transição, em zonas de estrutura urbana mista. Aprofundado o estudo dos efeitos dessa variabilidade morfológica e microclimática, o índice de conforto térmico PET (Temperatura Fisiológica Equivalente) foi analisado pelo software Rayman, nos 36 pontos. Os valores foram calibrados para São Paulo, de acordo com Monteiro (2008).

Os resultados mostraram que a variabilidade térmica encontrada nas três zonas climáticas, estende-se também ao conforto do pedestre. A curva do PET (Figura 4) atravessa a maioria das sensações térmicas e varia do "pouco frio" ao "muito calor"; poucos pontos caem na faixa neutra de conforto. As paletas coloridas indicam as nuances do PET para cada ponto analisado.

Figura 3 – PET na área de estudo

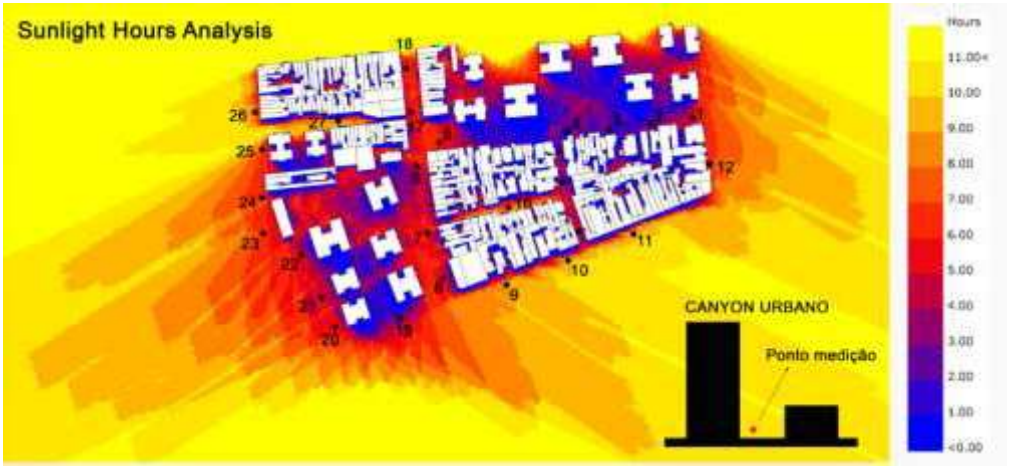


Fonte: Os autores (2018)

Para 27 pontos analisados, um mapa da distribuição da radiação solar também foi simulado (Figura 4). No mapa, cada pixel está associado com um valor entre 0 e 11 horas solares disponibilizadas pela configuração espacial atual do bairro. As simulações foram efetuadas no software Rhinoceros, no dia 26 de Maio, em acordo com a data das coletas climáticas mencionada.

Um alto número de horas de luz solar direta está associado com uma carga maior de energia radiante recebida e com um consequente aquecimento dos espaços abertos e internos às habitações. Esta correlação foi mostrada, para esta mesma área urbana, por Pacifici e Marins (2017), relacionando a tendência de temperatura do ar e superficial com a das horas solares. A este respeito, temperatura superficial da via com horas solares retornaram a correlação mais alta (rs = 0,741302).

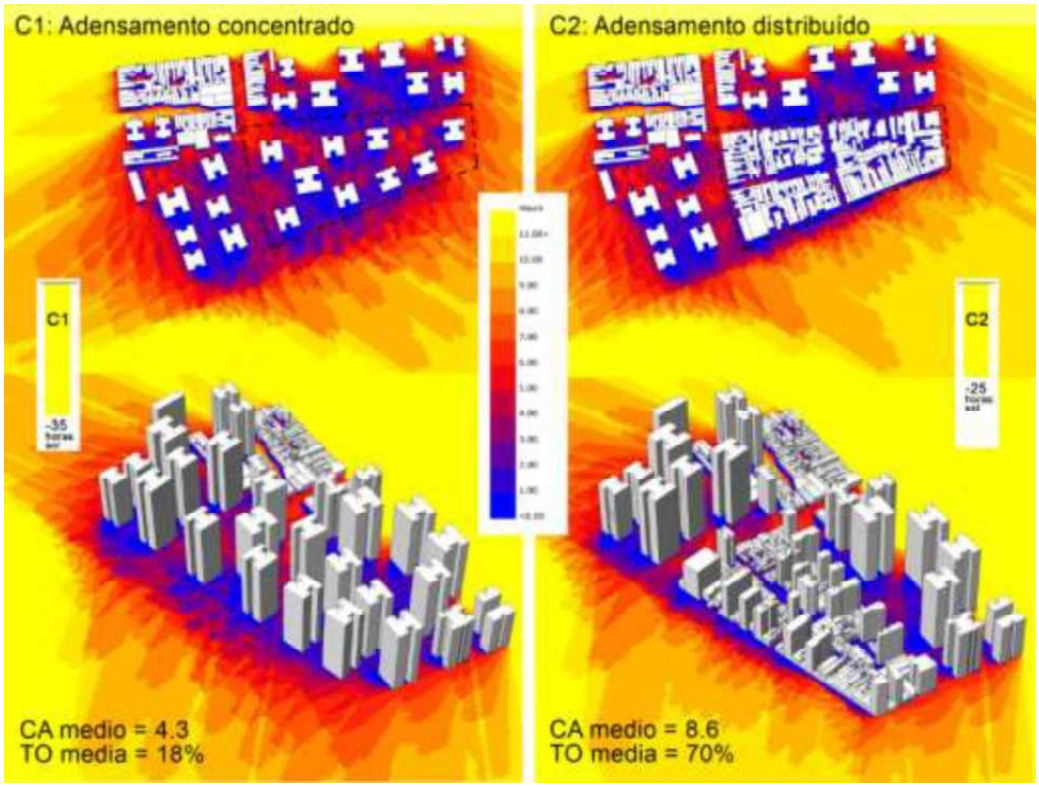
Figura 4 – Horas de sol na condição existente, na área de estudo



Fonte: Os autores (2018)

No intuito de analisar os efeitos do adensamento construído e da verticalização no conforto dos espaços abertos, elaboraram-se dois cenários evolutivos, ambos com incremento de cerca de 300.000m² de área construída na área selecionada. O Cenário 1 proporciona um adensamento condensado em nove torres de 24 pavimentos (CA=4,3, TO=18%). O Cenário 2 proporciona um adensamento distribuído, possibilitando um acréscimo de 10 andares para 21 edifícios de baixa-altura (CA=8,6, TO=70%=inalterada), (Figura 5).

Figura 5 - Cenários de adensamento concentrado (1) e distribuído (2)



Fonte: Os autores (2018)

Nos 27 pontos analisados, o Cenário *1* proporcionou a maior obstrução de

acesso solar, aumentando em 35 horas a obstrução solar desempenhada pela configuração urbana existente; o Cenário *1* reduziu o acesso solar de 25% a respeito da morfologia urbana atual. O Cenário *2* reduziu o acesso solar em 18%, mostrando-se mais apropriado à otimização do acesso solar nos espaços abertos. Com relação ao PET, nesse último cenário, a diminuição da temperatura é suposta ocorrer de forma atenuada; porém, um índice PET mais diversificado é esperado. Contrariamente, o cenário condensado é suposto proporcionar temperaturas mais frescas; entretanto, com pouca diversidade de ambientes térmicos, causando o achatamento da curva do PET.

5 CONCLUSÕES

A área foi avaliada, em duas porções, segundo condições de desempenho quanto ao conforto ambiental, relativamente a aspectos térmicos do ambiente externo, e também quanto ao potencial de geração de energia fotovoltaica, no que tange à incidência de radiação solar.

O estudo mostra a relevância de uma análise morfológica integrada à avaliação do desempenho climático em áreas urbanas em que se pretenda desenvolver e adensar de acordo com critérios de sustentabilidade.

Os resultados mostraram que há maior aproveitamento fotovoltaico em um cenário que incremente a área de cobertura das edificações e a exponha à máxima incidência solar, ou seja, aplicação de valores máximos para CA e TO, sem se considerar, em um primeiro momento, a variação do gabarito de altura.

Entretanto, os resultados também mostraram que incrementos construtivos proporcionados por esses valores máximos, além da não variância do padrão de verticalidade no tecido urbano, acarretam em prejuízos para o conforto ambiental, reduzindo-se o número de horas de luz solar direta nos espaços abertos em volta dos prédios, assim como nas fachadas das edificações. Esse acesso solar reduzido, levando a menores temperaturas superficiais e do ar, afetaria o conforto do pedestre, também podendo aumentar o consumo energético em edificações.

Portanto, os resultados combinados das simulações indicam que há, possivelmente, certo intervalo intermediário de verticalidade e adensamento construído, bem como algumas possibilidades de variância da verticalidade, que podem resultar em certas perdas na geração fotovoltaica, mas que permitirão regular, do ponto do conforto ambiental, melhores condições de acesso ao sol e uso dos espaços urbanos externos e internos às edificações.

AGRADECIMENTOS

A CAPES, pelas bolsas de mestrado e doutorado.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, W. P., KANARGOGLOU, P. S., MILLER, E. Urban Form, Energy and the Environment: A Review of Issues, Evidence and Policy. **Urban Studies**, v. 33, n. 1., 17-35, 1996.

ANTON, I.; TĂNASE, D. Informed Geometries. Parametric Modelling and Energy Analysis in Early Stages of Design. **Energy Procedia**, v. 85, p. 9–16, 2016.

COSTA, A. D. L. **Análise bioclimática e investigação do conforto térmico em ambientes externos: Uma experiência no bairro de Petrópolis em Natal/RN**. 2003. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo Universidade Federal do Rio Grande do Norte, p.179, 2003.

CRUZ, R. B. C.; MARINS, K. R.C. C. Avaliação do Indice de Compacidade nas subprefeituras do municipio de São Paulo. REEC - **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [S.l.], v. 13, n. 2, ago. 2017.

EMMANUEL, R. A hypothetical "shadow umbrella" for thermal comfort enhancement in the equatorial urban outdoors. **Architectural Science Review**, v. 36, n. 4, p. 25–36, 1993.

GOOGLE. **Google Earth: versão 7.3.0.3832**, 2017.

HUI, S. C. M. Low energy building design in high density urban cities. **Renewable Energy**, v. 24, n. 3–4, p. 627–640, 2001.

INFOCIDADE. **Plataforma Digital de Informações Sócio Econômicas e Territoriais do Munícipio de São Paulo** Disponível em: <http://infocidade.prefeitura.sp.gov.br/>. Acesso em 14.03. 2018.

MARINS, K. R. DE C. C.; ROMÉRO, M. DE A. Integração de condicionantes de morfologia urbana no desenvolvimento de metodologia para planejamento energético urbano. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 4, p. 117–137, 2012.

MARINS, K. R. de C. C. Análise comparativa multicriterial de estratégias em sustentabilidade urbana aplicada aos bairros de Cidade Pedra Branca (Palhoça, SC) e Vauban (Freiburg, Alemanha). **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 4, p. 393-408, out./dez. 2016.

MARINS, K. R. C. C. ; CATTO, V. M. ; PACIFICI, M. ; CRUZ, R. C. B. ; LAMOUR, Q. ; TIERNO, R. . Estudo multicriterial da forma urbana em área de adensamento urbano, em São Paulo. In: Euro Elecs 2017 - Encontro Latino-Americano e Europeu sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 2017, São Leopoldo. **Anais...**,São Leopoldo: Unisinos, 2017. v. 1. p. 1965-1975.

MARTINS, T. A. DE L. **De condicionantes solares à oportunidades de desenho urbano: otimização de tipo-morfologias urbanas em contexto de clima tropical**. Tese (Doutorado em Arquitetura),Rio de Janeiro: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro, p. 393, 2014.

MAUAD, S.V.S, CRUZ, R.B.C & Marins, K.R.C.(2017). Diagnóstico da Participação

Popular na Revisão da Legislação Urbanística em São Paulo: Estudo de Caso na Subprefeitura da Mooca. In: In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GESTÃO E ENGENHARIA URBANA, 1., 2017, São Carlos.**Anais**...São Carlos: UFSCar, 2017, p.602-615.

MONTEIRO, L. M. **Modelos preditivos de conforto térmico: quantificação de relações entre variáveis microclimáticas e de sensação térmica para avaliação e projeto de espaços abertos**. Tese (Doutorado em Arquitetura), São Paulo:Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo,p. 378, 2008.

NG, E. **DESIGNING HIGH-DENSITY CITIES: For Social & Environmental Sustainability**. 1ª ed. London: Earthscan, 2010.

PACIFICI, M.; MARINS, K. R. C. Análise da disponibilidade solar e cenários evolutivos em áreas urbanas sujeitas à verticalização e ao adensamento. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GESTÃO E ENGENHARIA URBANA, 1., 2017, São Carlos. **Anais**...São Carlos: UFSCar, 2017, p.3002-3014.

PACIFICI, M.; MARINS, K. R. de C.; CATTO, V. de M.; RAMA, F.; LAMOUR, Q. Morphological and Climate Balance: Proposal for a Method to Analyze Neighborhood Urban Forms by Way of Densification. **Sustainable Cities and Society**, v. 35, p. 145–156, nov. 2017.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Lei de parcelamento, uso e ocupação do solo**. Brasil, 2016.

RIBEIRO, C. A. D. M.; DE CARVALHO, H. J. M.; DOS SANTOS, M. A. Metodologia para análise do sombreamento em centros urbanos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 3., 2010, Recife. **Anais**...Recife: UFPE, 2010, p. 1–9.

WILLIANS, K., BURTON, E., JENKS, M. **Achieving Sustainable Urban Form**. Londres. E & FN. 2000. 408p.