

Carioca modern facades: expanding passive shading systems through computational methods

Daniel Mateus¹, Gonçalo Castro Henriques², Mara Eskinazi³,
Ronaldo Lee Menna², Taiane Melo Nepomuceno²

¹ CIAUD, Research Centre for Architecture, Urbanism and Design, Lisbon School of Architecture, Universidade de Lisboa, Portugal

dmateus@fa.ulisboa.pt

² Universidade Federal do Rio de Janeiro, LAMO-PROURB, Brazil

gch@fau.ufrj.br; ronaldo.menna@fau.ufrj.br; taiane.nepomuceno@fau.ufrj.br

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro, UrCa-PROURB, Brazil

maraeskinazi@fau.ufrj.br

Abstract. In the 1940s, modern Rio de Janeiro architects developed passive systems to improve buildings performance, without resorting to air conditioning systems. This research studies the performance of a set of eight buildings, from the Carioca School, investigating in a prospective sense how to improve their performance through computational methods. The authors modelled the eight buildings and analysed as a case study the Nova Cintra building performance, regarding insolation and illuminance, using the environmental software Ladybug and Honeybee. Based on the simulation data, they used combinatorial modeling to change the position of each of the three shading type's modules of the north facade of Nova Cintra, to improve their overall performance. Results confirm that is possible to continue to improve the buildings performance, as already accomplished by the modern buildings, using computational methods to improve, reducing also energy consumption through natural systems and diminishing the need for artificial air conditioning systems.

Keywords: Generative design, Shading performance, Insolation and illuminance analysis, Combinatorial modeling, Carioca modern facades

1 Introdução

1.1 A fachada moderna, o contributo carioca e brasileiro

Embora os primeiros ímpetos modernos tenham chegado por importação, bem logo o Brasil achou um caminho próprio. A sua grande contribuição para a arquitetura nova está nas inovações destinadas a evitar o calor e os

reflexos luminosos em superfícies de vidro, por meio de quebra-luzes externos, especiais. Para a América do Norte isto é coisa de leve conhecida. Tendo que receber de chapa o rude sol das tardes de verão, os grandes edifícios, em geral, ficam como um forno, dada a proteção insuficiente de suas janelas de folhas semi-cerradas. As oficinas modestas então têm que escolher uma dentre duas alternativas: ou assar-se ou proteger-se escassamente por meio de toldos ou venezianas, proteção fraca porque nada podem contra os reflexos do sol nas vidraças. E é curioso verificar-se como os brasileiros fizeram face ao importantíssimo problema, cujo estudo foi o que animou a nossa viagem. (Goodwin & Smith, 1943)

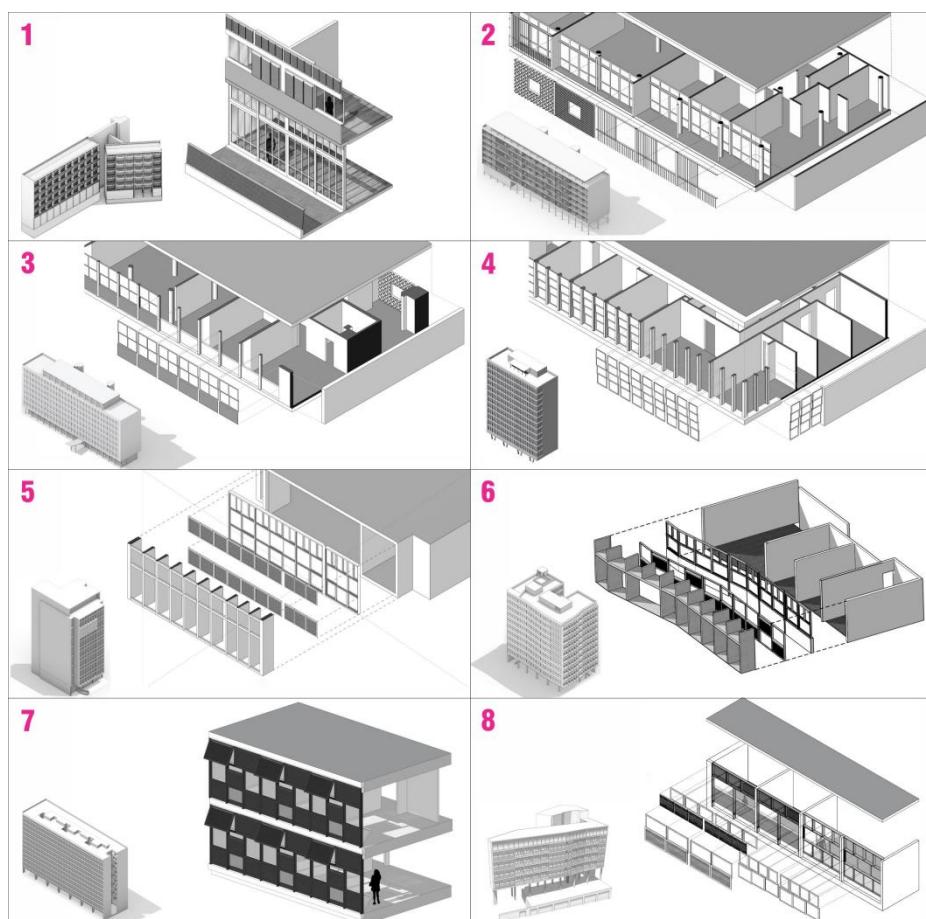


Figura 1. Volumetria e sistema de fachada dos edifícios em estudo. 1- Ed. Barreto, Irmãos Roberto, 1947; 2- Ed. Bristol, Lúcio Costa, 1950; 3- Ed. Nova Cintra, Lúcio Costa, 1948; 4- Ed. Gravatá, Sérgio Bernardes, 1952; 5- Ed. MMM Roberto, Irmãos Roberto, 1945; 6- Ed. D. Fátima, Irmãos Roberto, 1951; 7- Ed. Angel Ramirez, Irmãos Roberto, 1954; 8- Ed. Sambaíba, Irmãos Roberto, 1953. Fonte: Autores, 2022.

No texto acima citado de apresentação do catálogo da exposição *Brazil Builds. Architecture new and old 1652-1942*, Philip Goodwin (1943) justifica a sua visita ao Brasil, nos anos 40. Goodwin pretendia investigar a utilização de sistemas de sombreamento na arquitetura brasileira e carioca, creditando a inovação e a singularidade dos edifícios modernos brasileiros e as soluções desenvolvidas por jovens arquitetos para o problema climático das fachadas dos edifícios. As soluções dessas fachadas adotam diversos tipos de quebra-sol, elementos de proteção solar, ou filtros, singularizados na arquitetura brasileira. Muitas dessas soluções tiveram sua origem no Rio de Janeiro, embora se tenham disseminado por grande parte do país. A adoção, no Brasil, de soluções variadas para a adequação climática das fachadas provocou um efeito de dilatação dos planos de fechamento dos edifícios.

As tramas de cheio e vazio geradas pelas combinações de panos de vidro, varandas espessas e filtros configuram um sistema de camadas, com diferentes graus de permeabilidade, para além da função estrita de vedação das fachadas. A partir desta ideia, selecionamos para investigação um universo de oito edifícios residenciais modernos cariocas (Figura 1). Os edifícios em questão foram agrupados em quatro temas de projeto, de acordo com o projeto das suas fachadas:

- A fachada intermediada por varandas: Ed. Júlio Barros Barreto (Irmãos Roberto, 1947) e Ed. Bristol (Lúcio Costa, 1950) (1,2 Fig.1);
- A fachada intermediada por planos de vidro: Ed. Nova Cintra (Lúcio Costa, 1948), e Ed. Barão Gravatá (Sérgio Bernardes, 1952) (3,4 Fig.1);
- A fachada intermediada por brise-soleil de concreto acoplado: Ed. MMM Roberto e Ed. Dona Fátima e Finúsia (Irmãos Roberto, 1945 e 1951) (5,6 Fig.1);
- A fachada intermediada por filtros, cobogós, venezianas e treliças: Ed. Ramirez e Ed. Sambaíba (Irmãos Roberto, 1954 e 1953) (7,8 Fig.1).

Neste universo de edifícios, selecionamos como objeto de investigação deste artigo o edifício Nova Cintra, que possui mecanismos singulares de adaptação climática passiva, os quais iremos mais à frente descrever.

1.2 Estratégias de projeto

Os quatro temas, ou estratégias de projeto, que selecionamos estão relacionados com as possibilidades abertas pelo Sistema Dominó de Le Corbusier (1914-1917), que viabilizou um novo horizonte de possibilidades de articulação entre a ossatura independente e as soluções de fachada, com grande influência na arquitetura brasileira deste período. O primeiro fator de relação entre os quatro temas de projeto e o sistema dominó diz respeito à autonomia da fachada e à distinção entre elementos estruturais e não estruturais do edifício, ou entre estrutura e fechamento. Este princípio do sistema dominó é explícito nas fachadas longitudinais do Ed. Nova Cintra. O segundo fator de relação diz respeito ao modo como cada edifício incorpora o recuo dos pilares para o interior, solução que Fanelli e Gargiani (2014) e

Eskinazi e Penter (2019) elegem como princípio construtivo fundamental da teoria dos cinco pontos de Le Corbusier – de onde derivam os demais pontos, principalmente as fachadas em fita e as janelas em fita. Este recurso é explorado para obter grandes vãos e esquadrias com melhores condições de iluminação e ventilação no interior, bem como para potenciar a relação do interior com a paisagem. É um importante recurso para ampliar e dilatar, “espessando” as fachadas. O terceiro e último fator de relação diz respeito aos espaços de intermediação entre o domínio público e privado criados por este espessamento. O desenvolvimento de diferentes padrões de espessamento dos planos de fechamento supera a frontalidade da fachada plana, criando um espaço “in-between” que tanto pertence ao interior quanto ao exterior (Leatherbarrow & Mostafavi, 2002), gerando espaços de transição.

Portanto, o sistema dominó, ao concretizar os 5 pontos de Le Corbusier e ao viabilizar a implementação das quatro estratégias de projeto acima citadas, exerce um papel determinante na potencialização da fachada como elemento de intermediação de relações espaciais entre interior e exterior.

1.3 Adaptação passiva - Edifício Nova Cintra

Estudos recentes abordam a adaptação bioclimática passiva de edifícios modernos no Brasil (Lucas & Bastos, 2021) e no Rio de Janeiro em particular, no Edifício Nova Cintra (Cunha, 2021). A capacidade de adaptação do Nova Cintra é relativa a: **1 - Contexto climático**, o Rio de Janeiro durante grande parte do ano possui clima tropical quente e húmido, com alta temperatura e humidade relativa, com mais chuvas no verão e períodos de seca no inverno. Este clima produz desconforto térmico, e um recurso fundamental para o minorar é a renovação de ar interior, combinada com sombreamento, para reduzir o ganho térmico interior, evitando a luz solar direta em excesso, mas aproveitando a luz natural; **2 - Implantação edifício**, este está posicionado longitudinalmente em relação à rua (66 x 44 m), com desvio de 20° a norte. A posição e o tratamento do envelope a norte, este (fachada cega) e oeste (ventilação banheiros), minimizam a carga térmica; **3 - Permeabilidade ao vento**, esta está relacionada com a orientação do edifício, beneficiando do vento dominante sul/sudeste na região, mas também da posição no terreno em degraus, sobre pilotis, com piso superior recuado, e varanda na fachada norte com sombreamento; **4 - Composição fachada e sombreamento**, é de realçar a estrutura recuada em relação à fachada, com métrica 4m nos dois alçados norte e sul, com paredes internas perpendiculares às fachadas maiores e alinhadas entre si. Na fachada norte há sombreamento com brises e cobogós, seguidos de uma varanda que é dividida dos quartos por uma caixilharia de correr. O sombreamento das varandas e alinhamento das paredes internas favorecem a ventilação natural, em grande parte do ano, e controlam a entrada excessiva de luz solar, favorecendo o conforto passivo do edifício, sem ser necessário o recurso a sistemas de ar condicionado.

2 Metodologia: caso piloto edifício Nova Cintra

2.1 Possibilidades expansão sistema

Os processos computacionais, nesta pesquisa, pretendem ter um papel subversivo como tiveram os edifícios modernos no seu tempo, questionando e refletindo sobre o modo de fazer arquitetura, permitindo descobrir e desenvolver processos combinatórios para sistemas passivos, expandindo a sua utilização. Como recombinar os módulos existentes, para melhorar o sistema passivo de sombreamento? Utilizamos simulação computacional para medir o desempenho atual, pensando como este pode ser melhorado. Pensamos em processos diferentes, de acordo com as especificidades de cada edifício, para melhorar o desempenho de cada fachada:

1 - Recombinar módulos existentes [A, B, C], trocando posições, com nova recombinação, por exemplo [B, C, A];

2 - Utilizar módulos existentes, abrindo e fechando painéis de sombreamento, janelas ou muxarabis [A+, A-, A] > [A-, A+, A-];

3 - Alterar parâmetros dos módulos, por exemplo alterar parâmetros do espaçamento ou ângulo de sombreamento dos brises (otimização matemática).

No presente artigo desenvolvemos apenas o processo 1. Pretendemos desenvolver os processos 2 e 3 em futuras etapas da pesquisa.

2.2 Caso piloto, estudo e aplicação

Pretendemos aplicar este estudo aos edifícios referidos, mas escolhemos o edifício Nova Cintra (Figura 2) para um caso piloto devido à sua capacidade de adaptação passiva atrás referida. Escolhemos para análise mais aprofundada a fachada norte, por estar sujeita a condições solares mais extremas e possuir os mecanismos de adaptação atrás referidos, pensando numa recombinação da posição dos atuais módulos de tipos de sombreamento existentes na fachada, de modo a melhorar o desempenho geral da fachada relativamente a critérios que são indicados mais à frente.

2.3 Preparação de modelos digitais

Modelamos parametricamente os oito edifícios em estudo através de dois tipos de algoritmos, um em programação visual e outro em programação textual em Python, ambos no Grasshopper. Traduzimos os dados bidimensionais obtidos através de cortes, fachadas e plantas, para a terceira dimensão. Para ordenar cada edifício por pavimento, ambas as soluções desenvolvidas (visual e textual) têm como entrada do código os elementos de projeto agrupados por materiais e têm como saída estes elementos orientados geograficamente, dispostos de acordo com o piso pretendido.

Assim, a sequência de operações é estruturada em três etapas: transformação das linhas base em objetos 3D, posicionamento de cada objeto no entorno modelado e deslocamento vertical destes de acordo com o andar pretendido. Esta organização dos dados por nível, aplicada a todos os edifícios, permite obter como produto final a volumetria completa dos edifícios, com o entorno do terreno e dos volumes do edificado envolvente, modelados diretamente no software Rhinoceros, numa área de 350 x 350 m. O edifício piloto Nova Cintra foi modelado de acordo com estes princípios.

Preparamos os modelos não para representar os edifícios, mas para permitir analisar o seu desempenho relativamente a dois aspectos: 1 - a insolação (ou irradiação solar), para saber a quantidade de radiação solar, em Wh/m^2 ou kWh/m^2 , que incide ao longo do ano sobre o envelope (cobertura e fachadas, incluindo sombreamentos). Calculamos também neste aspecto a irradiação solar total (IRST), em kWh , que corresponde ao valor total da radiação solar incidente sobre uma superfície, que é obtido multiplicando o valor da insolação pela área da superfície em análise; 2 - a iluminância, que permite analisar a quantidade de radiação que após filtrada pelos sombreamentos, entra no interior do edifício. Torna-se assim possível entender quais espaços interiores têm iluminação natural adequada, entre os 100 e os 3.000 lux. Abaixo de 100 lux há falta de luz e acima de 3.000 lux há excesso. Níveis de iluminância elevados podem provocar aumento de temperatura e o uso de sistemas de ar condicionado para arrefecimento.

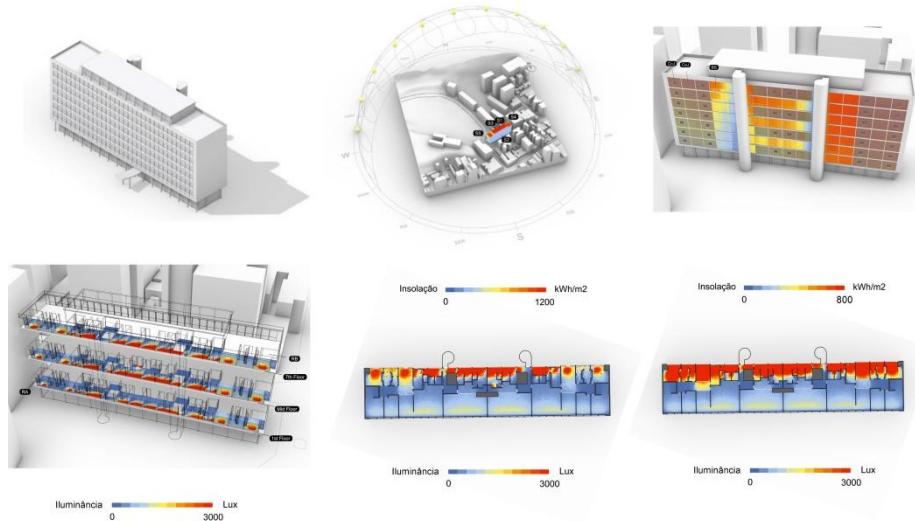


Figura 2. Modelo do edifício Nova Cintra (de cima para baixo, da esquerda para a direita): modelo 3D do edifício; análise da insolação no envelope do edifício; análise da insolação na fachada norte; análise da iluminância no solstício inverno (21 Junho às 12h) do primeiro, quarto e sétimo (último) piso; análise da iluminância do quarto piso, com sombreamento e sem sombreamento. Fonte: Autores, 2022.

2.4 Análise numérica e gráfica do edifício

Após a modelagem paramétrica, utilizamos o Ladybug e Honeybee para analisar o envelope do edifício. Determinamos que superfícies obtêm maior e menor insolação ao longo do ano (Figura 2). A superfície da cobertura é a que tem maior insolação, 1.241 kWh/m², seguida da fachada norte que tem 587 kWh/m². A cobertura recebe também o maior valor de irradiação solar total (IRST), 1.698.142 kWh (42,8% de todo o envelope), seguindo-se a fachada norte, com 972.971 kWh (24,5 %). Na fachada norte o sistema de sombreamento Cobogó com Janela regista o maior valor de insolação, 696 kWh/m², seguido do Cobogó sem Janela, com 651 kWh/m², e Brise-Soleil, com 495 kWh/m². No entanto, relativamente à IRST, é o Brise-Soleil que recebe mais insolação, 339.656 kWh (75,2% de todos os sombreamentos), devido a ter maior área total, 682 m², segue-se o Cobogó com Janela, com 68.924 kWh (15,3%) e 101 m², e o Cobogó sem Janela, com 43.057 kWh (9,5%) e 66 m².

Analisamos depois o desempenho dos compartimentos interiores do primeiro, quarto e sétimo e último piso, junto da fachada norte do edifício, relativamente à iluminância. Para os restantes pisos interpolamos valores para diminuir o tempo de cálculo das análises. Analisamos no solstício de inverno (21 Junho às 12h), altura em que o sol atinge a posição mais baixa, solstício de verão (21 Dezembro às 12h), posição mais alta do sol, e equinócio de outono (20 de Março às 12h), com o sol numa posição intermédia, relativamente à trajetória anual. Para o solstício de inverno, a média da iluminância dos pisos analisados é de 4.152 lux. O valor desce para 1.528 lux no equinócio de outono, atingindo 640 lux no solstício de verão. Como tal, no solstício de verão e no equinócio de outono a iluminância está dentro de intervalo adequado, entre 100 e 3.000 lux. Para o solstício de inverno, o valor médio excede 3.000 lux, o que pode provocar sobreaquecimento e uso de ar condicionado. Assim, embora os sombreamentos não sejam eficientes durante todo o ano, podemos visualizar a sua capacidade de bloqueio dos raios solares na Figura 2, que mostra a iluminância para o piso intermédio, comparando na fachada norte a solução com aplicação de sombreamentos e a solução sem esta aplicação, para o período do solstício de inverno (21 Junho às 12h). A solução com sombreamentos diminui consideravelmente a iluminância. Nos compartimentos junto à fachada norte, localizados na parte superior das plantas, podemos notar a extensão da cor vermelha, onde a iluminância é mais elevada e aumenta na planta sem sombreamento.

2.5 Critérios utilizados

Após analisada a fachada norte do edifício, desenvolvemos soluções alternativas para melhorar o seu desempenho energético. Serviram como referência as investigações de Henriques (2012), Kirimtak (2016), Vazquez

(2020), Venâncio (2020) e Mateus (2021), que abordam sistemas de projeto generativo tais como modelação paramétrica e gramáticas da forma, para gerar soluções formais para envelopes e sombreamentos de edifícios, com bom desempenho energético relativamente à iluminância e à insolação.

Esta investigação está situada na mesma temática dos autores acima referidos, desenvolvendo um método de modelação combinatória, a partir dos módulos de tipos de sombreamento existentes no edifício Nova Cintra: o Cobogó com Janela (**Letra A**), o Cobogó sem Janela (**Letra B**) e o Brise-Soleil (**Letra C**). Realizamos análises mais detalhadas de insolação e iluminância para estes três tipos de sombreamento, ocupando cada tipo de sombreamento as 98 posições possíveis, na fachada norte do edifício. Realizamos as seguintes análises: 1) insolação na face superior do sombreamento, em Wh/m²; 2) insolação no plano posterior do sombreamento, contabilizando o sombreamento, em Wh/m²; 3) insolação no plano posterior ao sombreamento, sem contabilizar o sombreamento, em Wh/m²; 4) iluminância média nos compartimentos junto à fachada norte, em lux; 5) número de pontos, nos compartimentos junto à fachada norte, com iluminância entre 300 e 750 lux.

As análises foram realizadas para os solstícios de inverno (21 Junho) e verão (21 Dezembro) às 10, 12 e 16 horas, com céu CIE, de modo a percebermos o desempenho dos sombreamentos nas situações extremas ao longo do ano. Com os resultados obtidos, elaboramos um processo para encontrar diferentes combinações de tipos de sombreamento na fachada norte do edifício, de modo a melhorarmos o seu desempenho nos seguintes critérios: 1) **minimizar insolação** após o sombreamento, em Wh/m²; 2) **maximizar número de pontos** no interior dos compartimentos, com iluminância entre 300 e 750 lux, faixa de valores prescrita pela ABNT (2013) que compreende limite inferior e superior de iluminância de entorno imediato; 3) **maximizar iluminância média** (lux) no interior dos compartimentos.

Definimos estes três critérios para as cinco análises acima descritas, procurando conciliar os objetivos de sombreamento, minimizando a passagem de radiação solar para o interior do edifício (critério 1), maximizando o número de pontos no interior dos compartimentos com iluminância adequada (critério 2) e maximizando a iluminância média (critério 3), para assegurar uma iluminação natural adequada no interior dos compartimentos. Automatizamos a coleta de dados das análises com programação visual e textual em Python, criando um código alfanumérico para cada simulação do tipo "*CintraWkwmCIE21jun10:00_LetraA*". Foram realizadas 1x2x1x2x3x3=36 simulações. As análises consideraram o envelope do edifício no contexto urbano, dados climáticos e materiais, além dos 3 critérios acima destacados. Para melhor entendimento dos resultados construímos representações gráficas para interpretar os padrões emergentes, através de meshes com graduação cromática, o que também permitiu identificar eventuais anomalias nos modelos.

2.6 Modelação combinatória e otimização multicritério

Após normalizarmos as diferentes escalas de valores dos resultados das análises, para valores na escala 0-1, testamos diferentes processos para encontrar, para cada um dos cenários (Jun e Dez, às 10,12 e 16h), um melhor valor de desempenho para cada um dos 98 módulos do edifício, organizados numa matriz de 14 x 7 módulos. Inicialmente realizamos testes procurando combinações aleatórias de tipos de letras (A, B, C) e algoritmos genéticos, procurando maximizar a soma de valores de desempenho. Após alguns testes iniciais, chegamos à conclusão que sendo analisado o desempenho de cada módulo, em cada um dos cenários, relativamente aos 3 critérios, que escrevendo um código de ordenamento, com condicionais, permite determinar os melhores valores para cada célula de maneira mais expedita: cada solução corresponde a uma frase numa lista de Letras A, B e C com 98 elementos. A ideia desde o início foi implementar uma análise multicritério por haver critérios divergentes, como a insolação solar e a quantidade de iluminância. Começamos por utilizar primeiro o software *Octopus*, para variar de maneira mais dinâmica o peso de cada um dos 3 critérios. No entanto, entendemos ser mais expedito utilizar um algoritmo para comparar diretamente os resultados de cada critério, considerando pesos fixos aos critérios, para termos uma primeira ideia do universo de soluções, do seu desempenho, e de como se inter-relacionam. Descrevemos de maneira sintética os resultados da seleção multicritério na próxima seção.

3 Resultados

Relativamente aos resultados, os sem ponderação (três primeiras colunas da Tabela 1: A, B, C), que consideram igualmente as pontuações de insolação, pontos de iluminância e iluminância média (ins 1, iluPt 1, iluM 1), tanto em Junho (Jun) como Dezembro (Dez) prevalece a Letra B, às 10:00 e 12:00, enquanto às 16:00 (Jun e Dez) a Letra C é a melhor solução. Considerando mais o critério dos pontos com a iluminância ideal (ins 0.2, iluPt 0.6, iluM 0.2) e pontuando menos os restantes critérios, verificamos que a solução B continua a prevalecer nas mesmas situações do que os critérios sem ponderação, à exceção das 12:00 de Dez em que prevalece a solução C. A letra C prevalece também em Jun 16:00, enquanto que em Dez 16:00 prevalece a letra A. Finalmente, se favorecemos o critério de iluminância média (ins 0.2, iluPt 0.2, iluM 0.6), temos uma igualdade de escolhas tendo três soluções com a Letra C (Jun 12:00 e 16:00, Dez 16:00), sendo a Letra B melhor em outras três situações (Jun 10:00, Dez 10:00 e 12:00). Em resumo, a Letra B, Cobogó sem janela, é a melhor solução em termos globais. Especialmente no critério de minimizar a insolação, mas permitindo também bons desempenhos relativamente à faixa de pontos de iluminância nos valores ideais e à iluminância média.

Tabela 1. Análise multicritério dos tipos de sombreamento (A, B, C) com ponderação da insolação, número de pontos com iluminância 300-750 lux e iluminância média.

LETROS	A	B	C	A	B	C	A	B	C
MULTI	1 ins	1 iluPt	1 iluM	0.2 ins	0.6 iluPt	0.2 iluM	0.2 ins	0.2 iluPt	0.6 iluM
Jun 10:00	0	88	10	6	72	20	4	53	41
Jun 12:00	0	97	1	0	97	1	0	12	86
Jun 16:00	1	30	67	12	30	56	1	30	67
Dez 10:00	0	95	3	0	95	3	0	95	3
Dez 12:00	29	47	22	36	25	37	29	47	22
Dez 16:00	36	20	42	58	2	38	36	20	42
SOMA	66	377	145	112	321	155	68	257	257
MED	1	68	16	9	51	29	3	39	42

Fonte: Autores, 2022.

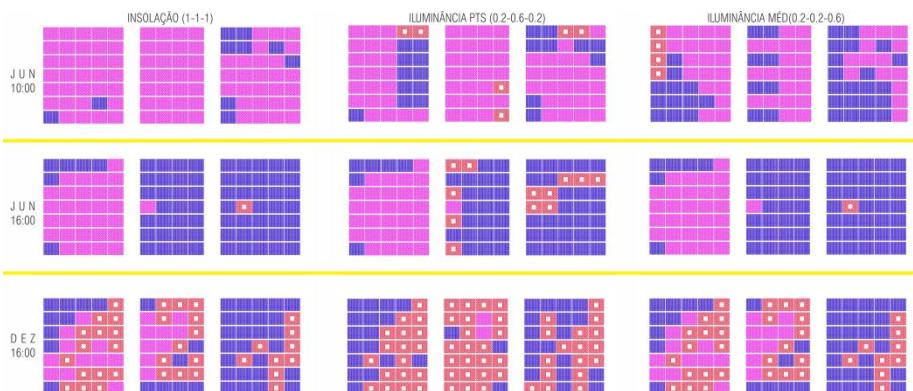


Figura 3. Resultados gráficos da otimização combinatória dos tipos de sombreamento Letra A (vermelho), B (lilás) e C (azul), resultando em uma frase (ACCBAB...) otimizada de acordo com os critérios e a ponderação indicados nas colunas. Fonte: Autores, 2022.

A Letra C é a segunda melhor solução, havendo menos situações em que a Letra A domine. Embora estas conclusões possam ser lidas na Tabela 1, as correlações são mais complexas de analisar. Para melhorar a leitura recorremos à representação gráfica traduzindo as letras em módulos, como sintetizado na Figura 3. Observamos que em Dez, considerando as diferentes ponderações, aparece com frequência a Letra A, o que leva a pensar que falta iluminância, eventualmente devido à posição alta do sol. No fim de tarde é frequente dominar a Letra C, o Brise-soleil, com maior ênfase em Jun 16:00.

4 Discussão de resultados

O modelo computacional desenvolvido simulou o comportamento dos três tipos de sombreamento (A, B, C) e determinou o seu desempenho isoladamente. Através de análise combinatória selecionamos as melhores combinações, relativamente ao desempenho de três fatores, propondo novos padrões combinatórios de fachada, resumidos na Tabela 1 e na Figura 3.

A avaliação multicritério procura que os resultados sejam bons relativamente aos diferentes critérios, sendo que a ponderação dos seus pesos permite compreender como melhorar a solução final. A ponderação com melhor resultado valorizou mais o critério dos pontos com a iluminância ideal (ins 0.2, iluPt 0.6, iluM 0.2), permitindo uma melhoria total no desempenho em Jun às 10:00, 12:00, 16:00 de 50%, 48% e 39%, e em Dez às 10:00, 12:00, 16:00, de 43%, 16% e 11%, o que representa em média uma melhoria de 41,4%. Considerando os três critérios com igual ponderação (ins 1, iluPt 1, iluM 1) ou valorizando mais a iluminância média (ins 0.2, iluPt 0.2, iluM 0.6) a melhoria conseguida é inferior, sendo em média de 31,7% e 28,9%. Foi desenvolvido um algoritmo textual em Python para recolher os resultados de simulação relativamente a cada fator, e a cada letra, depois foi utilizada a modelagem combinatória para procurar a melhor combinação de letras ou tipos de fachada em cada célula, utilizamos finalmente a análise multicritério para testar a sensibilidade do sistema, e escolher a melhor combinação considerando a ponderação dos diferentes critérios. Numa etapa futura, pretendemos aprofundar também a otimização multicritério no software *Octopus*, e comparar com os resultados obtidos utilizando programação textual em Python.

5 Conclusões

Esta pesquisa parte de sistemas modernos de sombreamento, devido à sua originalidade e capacidade para mitigar o clima tropical. Utilizamos métodos computacionais para expandir a utilização deste tipo de sistemas passivos para minorar o uso de sistemas artificiais de climatização (ar condicionado). Selecionei oito edifícios da escola carioca para modelar através de programação visual e textual. Definimos um primeiro caso de estudo piloto, o edifício Nova Cintra, para analisar a sua insolação e iluminância, no envelope e em detalhe na fachada norte. Utilizamos o modelo computacional para simular e comparar o desempenho de diferentes tipos de sombreamento existentes na fachada norte, aplicando modelação combinatória para estabelecer combinações dos diferentes tipos de sombreamento na fachada relativamente a três critérios de desempenho: insolação, número de pontos com iluminância ideal e iluminância média. Os resultados obtidos confirmam que é possível aplicar métodos computacionais

para melhorar o desempenho de sistemas de sombreamento tradicionais, inovando a partir dos mesmos. Esta metodologia pode ser utilizada também em outros tipos de análise, para procurar melhores combinações computacionais, em outros sistemas de sombreamento, mas também em outros tipos de sistemas tais como de ventilação, acústica, entre outros.

Referências

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). NBR ISO/CIE 8995-1: Iluminação de ambientes de trabalho - Parte 1: Interior.
- Cunha, V. S. (2021). Avaliação Bioclimática de Edifício Moderno: o caso do Edifício Nova Cintra, Parque Guinle, Rio de Janeiro. *Brazilian Journal of Development*, 7(5), 47793-47809. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n5-265>
- Eskinazi, M. O., & Penter, P. E. (2019). A fachada como interface, de Lucio Costa a irmãos Roberto: Repertório de projeto. 13º Seminário DOCOMOMO Brasil, Salvador. <https://docomomobrasil.com/wp-content/uploads/2020/04/110533.pdf>
- Fanelli, G., & Gargiani, R. (2014). *Histoire de l'architecture moderne. Structure et revêtement*. Presses Polytechniques Romandes.
- Goodwin, P. L., & Smith, K. (1943). Brazil Builds. Architecture new and old 1652-1942. The Museum of Modern Art, New York. <https://www.moma.org/calendar/exhibitions/2304>
- Henriques, G. C., Duarte, J. P., & Leal, V. (2012). Strategies to control daylight in a responsive skylight system. *Automation in Construction*, Elsevier, 28, 91–105. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.06.002>
- Kirimtak, A., Koyunbaba, B. K., Chatzikonstantinou, I., Sariyildiz, S., & Suganthan, P. N. (2016). Multi-objective optimization for shading devices in buildings by using evolutionary algorithms. In 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2016 (pp. 3917-3924). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CEC.2016.7744286>
- Leatherbarrow, D., & Mostafavi, M. (2002). *Surface Architecture*. MIT Press.
- Lucas, C., & Bastos, P. (2021, Abril). O valor bioclimático na arquitetura moderna tropical. *Arquitextos*, 251.05. *Vitruvius*. <https://vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/21.251/8048>
- Mateus, D., Duarte, J.P., & Romão, L. (2021). Energy-Based Design: A Digital Design System for the Design of Energy-Harvesting Building Envelopes. In P. Gomez & F. Braida (Eds.), SIGraDi 2021, XXV International Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics (pp. 831-842). Blucher Design Proceedings.
- Vazquez, E., Duarte, J., & Poerschke, U. (2020). Masonry screen walls: a digital framework for design generation and environmental performance optimization. *Architectural Science Review*, 64(3), 262-274. <https://doi.org/10.1080/00038628.2020.1749552>
- Venâncio, R. (2020). Sombreamento com iluminação: desenvolvimento e teste de modelo paramétrico para facilitar o projeto de proteções solares. *Ambiente Construído*, 20(4), 59-77. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000400460>