

ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR DESENVOLVIDOS COM MODELAGEM PARAMÉTRICA E ALGORITMOS EVOLUTIVOS

SOLAR SHADING DEVICES DEVELOPED WITH PARAMETRIC MODELING AND EVOLUTIONARY ALGORITHMS

Rafael Prado Cartana ¹

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil
Universidade do Vale do Itajaí, Florianópolis, SC, Brasil, cartana@univali.br

Fernando Oscar Ruttkay Pereira ²

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, ruttkay.pereira@ufsc.br

Resumo

Considerando a importância do controle da radiação solar e admissão da luz natural no desempenho das edificações, os elementos de controle solar, quando corretamente aplicados, podem contribuir significativamente com o conforto e a eficiência energética no ambiente construído. Paralelamente, destaca-se na produção arquitetônica contemporânea o crescente emprego de ferramentas computacionais no suporte às decisões de projeto. Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa é analisar a admissão de radiação solar e o desempenho lumínico de elementos de controle solar desenvolvidos com modelagem paramétrica e algoritmos evolutivos. A metodologia foi organizada em quatro etapas: (1) modelagem paramétrica dos elementos de controle solar; (2) simulações computacionais referentes à admissão de radiação solar e ao desempenho lumínico; (3) otimização através de algoritmos evolutivos; e (4) análises de mascaramentos gerados por simulação computacional. Os aplicativos utilizados foram a suíte de modelagem paramétrica Rhinoceros3D+Grasshopper; o *plug-in* de desempenho ambiental Diva-for-Rhino; a ferramenta de algoritmos evolutivos Galapagos Evolutionary Solver; e as ferramentas de geometria da insolação do *plug-in* Ladybug. Os resultados demonstram que os elementos desenvolvidos foram capazes de controlar seletivamente a admissão de radiação solar, além de melhorar a distribuição da luz natural nos ambientes de análise, destacando-se respectivamente a importância dos componentes direcionais e horizontais. Por fim, os mascaramentos demonstram, complementarmente aos resultados das simulações, que a compreensão da geometria da insolação apresenta-se imprescindível para o desempenho dos elementos de controle solar.

Palavras-chave: Elementos de controle solar. Radiação solar. Iluminação natural. Modelagem paramétrica. Algoritmos evolutivos.

Abstract

Considering the importance of solar radiation control and daylighting admission on buildings performance, the solar control devices when properly used can significantly contribute to the comfort and energy efficiency in the built environment. At the same time can be highlighted in contemporary architectural production the growing influence of digital tools associated to the design process. In this context, this research aims to analyze the solar radiation admission and daylighting performance of solar control devices developed with parametric modeling and evolutionary algorithms. The methodology was organized in four steps: (1) parametric modeling of solar control devices; (2) computational simulations regarding the solar radiation admission and daylighting performance; (3) optimization using evolutionary algorithms and (4) analysis of shading masks generated by computational simulation. The computational tools used were: the parametric modeling suite Rhinoceros3D+Grasshopper, the environmental performance plug-in Diva-for-Rhino, the evolutionary algorithms tool Galapagos Evolutionary Solver and the solar geometry tools of the Ladybug plug-in. The results demonstrate that the developed elements were able to selectively control the solar radiation admission and improve the daylight distribution in the analysis environment; highlighting respectively the importance of directional and horizontal components. Finally, in addition to the results of computational simulations, the shading masks shows that the solar geometry understanding is essential for solar control devices performance.

Keywords: Solar control devices. Solar radiation. Daylighting. Parametric modelling. Evolutionary algorithms.

How to cite this article:

CARTANA, Rafael Prado; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay. Elementos de controle solar desenvolvidos com modelagem paramétrica e algoritmos evolutivos. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 7, n. 3, fev. 2017. ISSN 1980-6809. Disponível em: <<http://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8647516>>. Acesso em: 15 mar. 2017.
doi:<http://dx.doi.org/10.20396/parc.v7i3.8647516>.

Introdução

Os elementos de controle solar desempenham importante papel no comportamento ambiental das edificações, principalmente em situações nas quais se faz necessária a admissão seletiva da radiação solar. Sendo os envelopes construtivos responsáveis pelas trocas térmicas com o meio e pela admissão de luz natural, a eficiência energética dos sistemas de fachadas vem se tornando cada vez mais importante na arquitetura contemporânea, principalmente devido ao aumento da proporção de áreas envidraçadas nos edifícios atuais (CHO; YOO; KIM, 2014; FAJKUS, 2013).

Além dos benefícios térmicos relacionados com o controle da radiação incidente (BADER, 2010), os elementos de controle solar podem melhorar o desempenho lumínico das edificações, contribuindo com a distribuição da luz natural e a redução da probabilidade de desconforto visual por ofuscamento (JAKUBIEC; REINHART, 2012). Importante considerar que, além dos aspectos energéticos, a adequada admissão da luz natural traz benefícios psicofisiológicos aos usuários dos ambientes (REPPERT; WEAVER, 2002).

Estudos relacionados

Avaliando o desempenho de elementos de controle solar para a cidade de Seoul (Coreia do Sul), Cho, Yoo e Kim (2014) identificaram que 33% a 40% do consumo energético com climatização é decorrente dos ganhos de calor por radiação através das aberturas. Bader (2010), em estudo desenvolvido para a cidade de Austin (Texas), identificou a possibilidade de redução da radiação incidente nas fachadas na ordem de 75%, considerando configurações de elementos de controle solar que ainda permitam bom acesso visual aos ambientes externos.

Empregando modelagem paramétrica e algoritmos evolutivos, Glassman e Reinhart (2013) avaliaram a incorporação de elementos de controle solar na adequação de edificações existentes a cenários climáticos futuros para as cidades de Boston (Massachusetts) e Phoenix (Arizona). Além de viabilidade técnica e benefícios térmicos na utilização dos elementos de controle solar, os autores demonstraram a potencialidade das ferramentas computacionais no auxílio às decisões de projeto. Também utilizando modelagem paramétrica e algoritmos evolutivos, Gadelhak (2013) realizou avaliações de desempenho lumínico de elementos de controle solar para a cidade do Cairo (Egito). Em suas conclusões, o autor adverte para a necessidade de controle sobre a quantidade de parâmetros a serem testados pela ferramenta de algoritmos evolutivos, visando evitar aleatoriedade nos resultados obtidos.

Avaliando elementos de controle solar baseados em geometria fractal, Sedrez e Meneghel (2013) observaram que a integração do ambiente paramétrico às ferramentas de análise térmica torna mais ágil a geração de alternativas através de pequenas alterações nos dados dos algoritmos de modelagem.

Ferramentas computacionais no processo de projeto

Paralelamente às questões de sustentabilidade e eficiência energética no ambiente construído, o emprego de ferramentas computacionais aplicadas ao processo de projeto se estabeleceu nas últimas décadas como um dos principais direcionadores de exploração na arquitetura contemporânea (CASTLE, 2013). As tecnologias digitais vêm se tornando importantes não apenas para uma representação gráfica mais ágil e precisa, mas também para o auxílio às decisões de projeto, através do emprego integrado de recursos como modelagem paramétrica, simulação computacional e algoritmos evolutivos.

Inicialmente, o conceito de projeto paramétrico pode ser compreendido como o uso de parâmetros e relações para a definição de uma forma (MONEDERO, 2000), permitindo um controle dinâmico das formas ao longo de todo o processo de projeto. A variabilidade de soluções proporcionada pela modelagem paramétrica facilita que sejam avaliadas diversas alternativas de projeto antes da escolha de uma solução definitiva (KOLAREVIC; MALKAWI, 2005), situação em que a simulação computacional pode ser integrada como importante ferramenta de auxílio a tomadas de decisão.

Complementarmente, o emprego de algoritmos evolutivos proporciona a efetiva utilização das tecnologias digitais como ferramentas exploratórias de projeto (DUNN, 2012). Os algoritmos evolutivos são baseados em processos genéticos de mutação, combinação e seleção, de maneira similar ao que ocorre na natureza, possibilitando a exploração de soluções através da adaptação evolucionária de um projeto ao longo do tempo em busca de um objetivo “*fitness*” determinado pelo projetista (RUTTEN, 2013; TERZIDIS, 2006).

Medidas de desempenho térmico e lumínico

Uma avaliação integrada do desempenho lumínico de uma edificação deve considerar a disponibilidade anual da luz natural, o conforto visual e as cargas térmicas (REINHART; WIENOLD, 2011). Seguindo essa recomendação, foram empregados neste trabalho medidas e índices relativos ao controle da radiação solar incidente (em W/m^2), à admissão e à distribuição da luz natural.

Nas avaliações de admissão e distribuição da luz natural foram empregadas as medidas dinâmicas Autonomia da Iluminação Natural (DA) e Useful Daylight Illuminances (UDI). As medidas dinâmicas são assim definidas por

utilizar condições realísticas da variação de céu e insolação ao longo do tempo, fornecendo resultados para cada hora do ano em cada ponto considerado no ambiente (NABIL; MARDALJEVIC, 2006).

A Autonomia da Iluminação Natural (Daylight Autonomy) é a porcentagem de horas ocupadas do ano em que um valor mínimo de iluminância, no caso 300 lx, é atingido em determinados pontos no ambiente (REINHART; WIENOLD, 2011). Como limitação, a medida DA não apresenta limite superior, dificultando a identificação da possibilidade de desconforto por admissão excessiva de luz (NABIL; MARDALJEVIC, 2006). Já a medida UDI estabelece limite inferior de 100 lx e superior de 2.000 lx para admissão da iluminação natural (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006). Tanto as medidas de DA quanto as de UDI são expressas em porcentagem das horas do ano para cada ponto analisado.

Objetivos

Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa é analisar a admissão de radiação solar e o desempenho lumínico de elementos de controle solar desenvolvidos com modelagem paramétrica e algoritmos evolutivos. Complementarmente, propõe-se a verificar relações de causa e efeito entre as variações dos parâmetros geométricos e o desempenho dos elementos de controle solar desenvolvidos.

Metodologia

Visando atingir os objetivos propostos, a metodologia foi organizada segundo estas quatro etapas: (1) modelagem paramétrica dos elementos de controle solar; (2) simulações computacionais referentes à admissão de radiação solar e ao desempenho lumínico; (3) otimização através de algoritmos evolutivos; e (4) análises de mascaramentos gerados por simulação computacional.

Modelagem paramétrica dos elementos de controle solar

Empregando a suíte de modelagem paramétrica Rhinoceros3D+Grasshopper, foi desenvolvido um modelo Base de um elemento de controle solar com 20 cm de espaçamento vertical e horizontal entre os eixos de suas aletas. Através de variações dos parâmetros geométricos profundidade (P), espessura (E), direção (D) e inclinação (i) aplicadas ao modelo Base, foram gerados os modelos apresentados na Tabela 1 e na Figura 1.

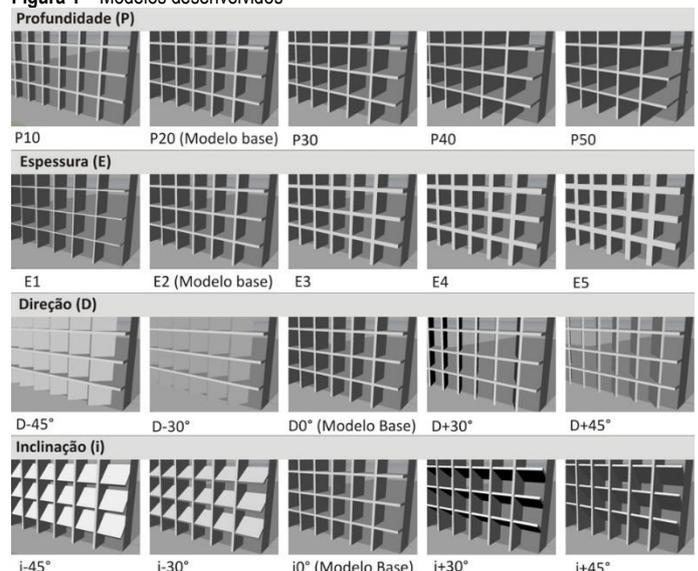
Posteriormente, no item Resultados, a Figura 11 apresenta o algoritmo do Grasshopper desenvolvido para modelagem dos elementos de controle solar avaliados.

Tabela 1 – Modelos e variações dos parâmetros geométricos

Modelos	Prof.(cm)	Esp.(cm)	Dir.	Inc.	Perm.(%)
Base	20	2	0°	0°	80,10
P10	10	2	0°	0°	80,10
P20(Base)	20	2	0°	0°	80,10
P30	30	2	0°	0°	80,10
P40	40	2	0°	0°	80,10
P50	50	2	0°	0°	80,10
E1	20	1	0°	0°	83,55
E2(Base)	20	2	0°	0°	80,10
E3	20	3	0°	0°	66,75
E4	20	4	0°	0°	60,30
E5	20	5	0°	0°	52,65
D-45°	20	2	-45°	0°	22,24
D-30°	20	2	-30°	0°	37,09
D0°(Base)	20	2	0°	0°	80,10
D+30°	20	2	+30°	0°	37,09
D+45°	20	2	+45°	0°	22,24
i-45°	20	2	0°	-45°	22,24
i-30°	20	2	0°	-30°	37,09
i0°(Base)	20	2	0°	0°	80,10
i+30°	20	2	0°	+30°	37,09
i+45°	20	2	0°	+45°	22,24

Fonte: Os autores

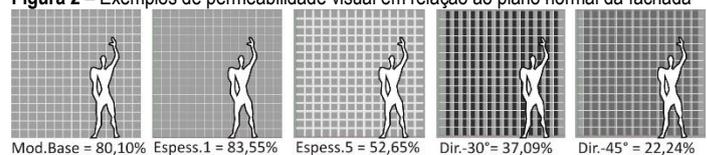
Figura 1 – Modelos desenvolvidos



Fonte: Os autores

Como consequência das variações dos parâmetros geométricos, foi obtida a permeabilidade visual em relação ao plano normal da fachada, apresentada em valores percentuais na Tabela 1 e visualmente exemplificada na Figura 2.

Figura 2 – Exemplos de permeabilidade visual em relação ao plano normal da fachada



Fonte: Os autores

Simulações computacionais referentes à admissão de radiação solar e ao desempenho lumínico

Utilizando o *plug-in* Diva-for-Rhino, foram realizadas simulações relativas à radiação solar e à iluminação natural. Em todos os casos, os elementos de controle solar foram posicionados no alinhamento da fachada de um ambiente de 18 m², com dimensões como demonstrado na Figura 3. A área de fachada (9 m²) foi considerada aberta ao exterior em sua largura e altura, sem a presença de verga ou peitoril.

O estudo foi realizado para a cidade de Florianópolis-SC, (latitude 27° Sul), sendo utilizado o arquivo climático BRA_Florianopolis.838990_SWERA.epw, disponível em: <<https://energyplus.net/weather>>. As orientações solares oeste, norte e leste foram avaliadas.

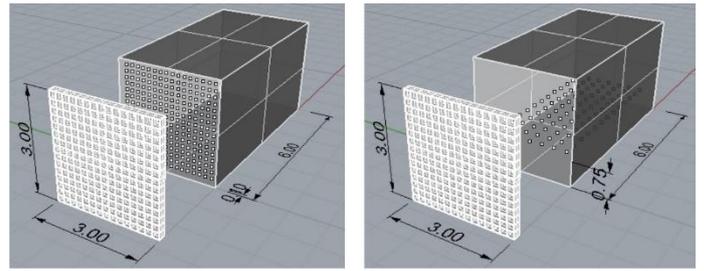
Como parâmetros de simulação no Diva, foram definidas as refletâncias de paredes, pisos, teto e elementos de controle solar em 30%, 20%, 70% e 60%, respectivamente. As simulações foram realizadas com a configuração de 5 *bounces* (valor que define a precisão na análise das reflexões nos modelos). O horário de ocupação do ambiente para as análises de iluminação foi das 8h às 18h.

Em relação à radiação solar, foram realizadas simulações para janeiro e julho, escolhidos assim por corresponderem, respectivamente, aos meses de maior e menor radiação incidente. Para as análises, foi utilizada uma medida comparativa percentual de admissão da radiação solar incidente antes e depois do emprego dos elementos de controle solar, denominada neste trabalho de coeficiente de admissão da radiação solar incidente (CARS), expresso em porcentagem. Visando rejeitar qualquer valor diário atípico, foram utilizados valores mensais cumulativos em Wh/m². Foi considerada como critério de eficiência nas análises realizadas a capacidade seletiva dos elementos em admitir menos radiação percentualmente nos períodos de verão do que nos períodos de inverno.

Para as simulações de iluminação natural, foram empregadas as medidas Autonomia da Iluminação Natural (DA300) e Useful Daylight Illuminances (UDI100-2000). As simulações foram realizadas para o período do ano inteiro, aproveitando a capacidade das medidas dinâmicas em caracterizar o comportamento da luz natural ao longo do tempo.

Para as simulações de radiação, foi criado um plano vertical de análise afastado internamente 10 cm do alinhamento da fachada, com sensores espaçados em 20 x 20 cm. Para as simulações de admissão da luz natural, foi criado um plano horizontal de análise a 75 cm de altura, com sensores espaçados em 50 x 50 cm, como demonstrado na Figura 3.

Figura 3 – Dimensões gerais dos elementos de controle solar, planos e ambiente de análise



Fonte: Os autores

Otimização através de algoritmos evolutivos

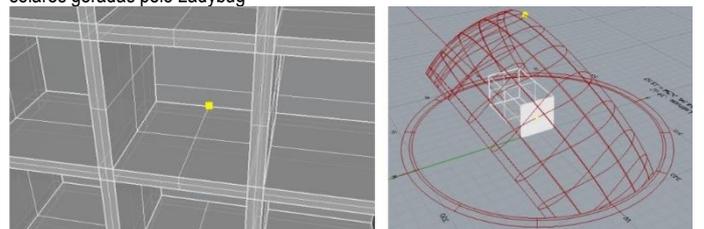
Empregando o *plug-in* Galapagos Evolutionary Solver associado à ferramenta de simulação Diva-for-Rhino, procedeu-se à otimização dos modelos para cada uma das orientações solares avaliadas, variando seus parâmetros geométricos dentro dos limites estabelecidos na Tabela 1.

Como medida de desempenho (*fitness*), foi utilizado o UDI100-2000 espacial no ambiente de análise, assim escolhido por permitir uma avaliação simultânea de suficiência, distribuição e admissão excessiva de luz natural e, conseqüentemente, radiação solar. As simulações foram realizadas sobre o plano de análise empregado nas simulações de iluminação natural, contendo 60 sensores uniformemente distribuídos. Para a otimização, o Galapagos foi programado para buscar configurações que proporcionassem um UDI acima de 85% das horas do ano na maior parte possível dos 60 pontos do ambiente.

Análises de mascaramentos gerados por simulação computacional

Visando demonstrar as relações entre a geometria da insolação e os resultados de desempenho apresentados nas etapas anteriores, foi utilizado nesta etapa o *plug-in* Ladybug, possibilitando a visualização das trajetórias solares ao longo do ano, o mapeamento da radiação solar nas diferentes porções de céu visível e a geração de máscaras de sombra a partir de um ponto específico. Os pontos para geração das máscaras foram sempre posicionados alinhados à face inferior e centralizados verticalmente em relação aos vãos dos elementos de controle solar analisados, como demonstrado na Figura 4.

Figura 4 – Posicionamento do ponto para geração do mascaramento e trajetórias solares geradas pelo Ladybug



Fonte: Os autores

Resultados

Neste item são apresentados e discutidos os resultados das etapas apresentadas na metodologia: (2) simulações computacionais referentes à admissão de radiação solar e ao desempenho lumínico; (3) otimização através de algoritmos evolutivos; e (4) análises de mascaramentos gerados por simulação computacional.

Simulações computacionais referentes à admissão de radiação solar e ao desempenho lumínico

As Tabelas 2, 3 e 4, juntamente às Figuras 5, 7 e 8, apresentam os resultados das simulações de radiação solar, possibilitando observar o efeito das variações paramétricas para os diferentes modelos e épocas do ano para as orientações oeste, leste e norte, respectivamente.

Para todas as orientações, são apresentados inicialmente os resultados das simulações para a situação de fachada desobstruída e posteriormente para as variações paramétricas, apresentadas na Tabela 1.

Tabela 2 – Oeste: radiação solar incidente, CARS e razão jan./jul.

Modelos	Rad. jan. (Kwh/m ²)	Rad. jul. (Kwh/m ²)	CARS jan.(%)	CARS jul.(%)	Razão jan./jul.
Desob.	71,15	38,77	100,00	100,00	1,00
Base	20,80	9,50	29,23	24,50	1,19
P10	34,78	16,99	48,88	43,82	1,12
P20(Base)	20,80	9,50	29,23	24,50	1,19
P30	12,01	5,18	16,88	13,36	1,26
P40	7,37	3,11	10,36	8,02	1,29
P50	4,88	2,14	6,86	5,52	1,24
E1	24,33	11,19	34,20	28,86	1,18
E2(Base)	20,80	9,50	29,23	24,50	1,19
E3	17,59	7,96	24,72	20,53	1,20
E4	14,63	6,58	20,56	16,97	1,21
E5	11,94	5,36	16,78	13,83	1,21
D-45°	10,46	11,44	14,70	29,51	0,50
D-30°	14,41	12,67	20,25	32,68	0,62
D0°(Base)	20,80	9,50	29,23	24,50	1,19
D+30°	17,37	5,85	24,41	15,09	1,62
D+45°	12,57	4,50	17,67	11,61	1,52
i-45°	6,01	3,36	8,45	8,67	0,97
i-30°	9,13	4,99	12,83	12,87	1,00
i0°(Base)	20,80	9,50	29,23	24,50	1,19
i+30°	28,68	10,04	40,31	25,90	1,56
I+45°	25,79	7,96	36,25	20,53	1,77

Fonte: Os autores

Os valores de CARSs apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4 demonstram que o modelo P10 (profundidade 10 cm) foi o que mais admitiu radiação, já o P50 (profundidade 50 cm) foi o que menos admitiu, demonstrando a importância desse parâmetro no controle da radiação.

Para quantificar a capacidade seletiva dos elementos em admitir menor quantidade de radiação no verão e maior no inverno, foi criada a “Razão jan./jul.”, em que os valores dos CARSs de janeiro foram divididos pelos de julho. Como resultado, quanto menores os valores obtidos, melhor a capacidade seletiva do elemento.

Tabela 3 – Leste: radiação solar incidente, CARS e razão jan./jul.

Modelos	Rad. jan. (Kwh/m ²)	Rad. jul. (Kwh/m ²)	CARS jan.(%)	CARS jul.(%)	Razão jan./jul.
Desob.	80,40	37,26	100,00	100,00	1,00
Base	22,43	8,88	27,90	23,83	1,17
P10	38,62	15,92	48,03	42,73	1,12
P20(Base)	22,43	8,88	27,90	23,83	1,17
P30	12,91	4,91	16,06	13,18	1,22
P40	7,85	3,00	9,76	8,05	1,21
P50	5,22	2,06	6,49	5,53	1,17
E1	26,21	10,43	32,60	27,99	1,16
E2(Base)	22,43	8,88	27,90	23,83	1,17
E3	18,84	7,52	23,43	20,18	1,16
E4	15,66	6,19	19,48	16,61	1,17
E5	12,80	5,04	15,92	13,53	1,18
D-45°	13,71	4,43	17,05	11,89	1,43
D-30°	18,98	5,68	23,61	15,24	1,55
D0°(Base)	22,43	8,88	27,90	23,83	1,17
D+30°	15,45	11,23	19,22	30,14	0,64
D+45°	11,18	9,86	13,91	26,46	0,53
i-45°	6,61	3,14	8,22	8,43	0,98
i-30°	10,03	4,65	12,48	12,48	1,00
i0°(Base)	22,43	8,88	27,90	23,83	1,17
i+30°	31,78	9,74	39,53	26,14	1,51
I+45°	30,08	7,90	37,41	21,20	1,76

Fonte: Os autores

Tabela 4 – Norte: radiação solar incidente, CARS e razão jan./jul.

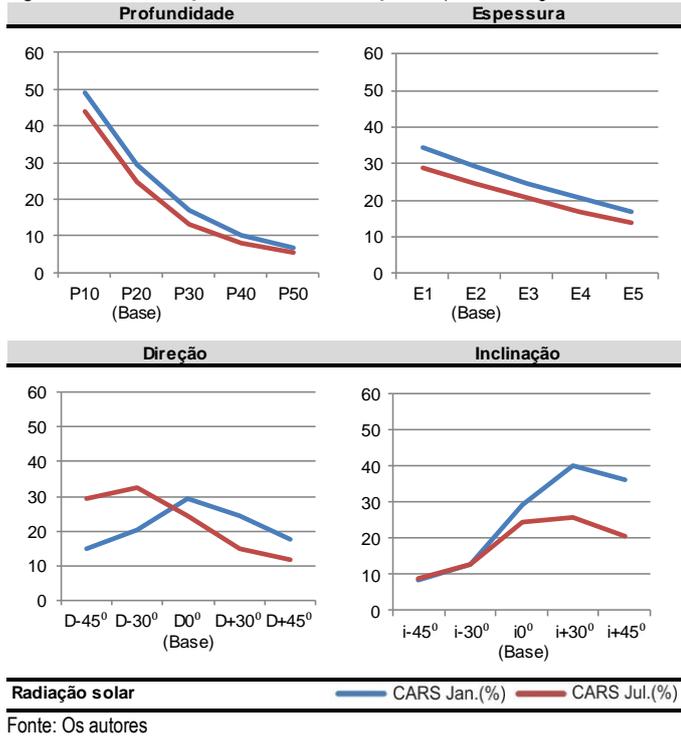
Modelos	Rad. jan. (Kwh/m ²)	Rad. jul. (Kwh/m ²)	CARS jan.(%)	CARS jul.(%)	Razão jan./jul.
Desob.	35,07	95,73	100,00	100,00	1,00
Base	8,93	20,80	25,46	21,73	1,17
P10	15,30	42,90	43,63	44,81	0,97
P20(Base)	8,93	20,80	25,46	21,73	1,17
P30	5,39	10,44	15,37	10,91	1,41
P40	3,48	6,03	9,92	6,30	1,58
P50	2,48	3,86	7,07	4,03	1,75
E1	10,44	24,60	29,77	25,70	1,16
E2(Base)	8,93	20,80	25,46	21,73	1,17
E3	7,62	17,31	21,73	18,08	1,20
E4	6,36	14,27	18,14	14,91	1,22
E5	5,25	11,56	14,97	12,08	1,24
D-45°	6,24	15,07	17,79	15,74	1,13
D-30°	7,67	18,23	21,87	19,04	1,15
D0°(Base)	8,93	20,80	25,46	21,73	1,17
D+30°	7,68	19,02	21,90	19,87	1,10
D+45°	6,23	16,19	17,76	16,91	1,05
i-45°	2,97	7,21	8,47	7,53	1,12
i-30°	4,41	10,10	12,57	10,55	1,19
i0°(Base)	8,93	20,80	25,46	21,73	1,17
i+30°	10,67	33,17	30,42	34,65	0,88
I+45°	9,33	32,98	26,60	34,45	0,77

Fonte: Os autores

Os gráficos apresentados na Figura 5, coerentemente, demonstram redução na admissão da radiação em relação ao aumento da profundidade e da espessura dos elementos de controle solar avaliados.

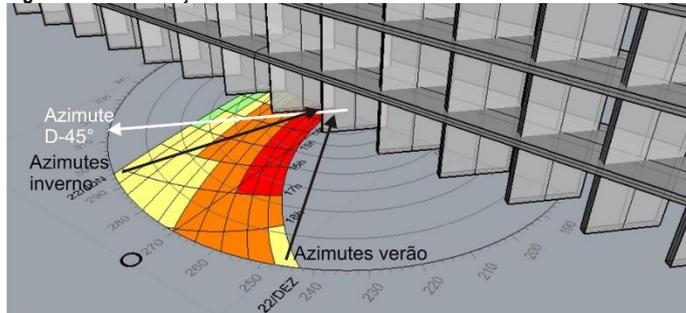
Ainda sobre a Figura 5, observa-se que a profundidade se apresenta mais significativa que a espessura na redução da radiação incidente para as variações paramétricas adotadas. Essa tendência se confirmou para a variação desses parâmetros nas demais orientações avaliadas.

Figura 5 – Oeste: variação dos CARSs em relação aos parâmetros geométricos



Quanto à seletividade na admissão de radiação entre inverno e verão, destacam-se nas Tabelas 2 e 3 os valores da razão jan./jul. encontrados nos pares de modelos D-45°, D-30° e D+30°, D+45° para as fachadas oeste e leste, respectivamente. Isso demonstra a importância do parâmetro direção para o desempenho de elementos de controle solar para essas orientações. Esses modelos, direcionados para os azimutes das trajetórias solares de inverno, favorecem uma maior admissão de radiação nessa época do ano em relação a uma menor admissão durante o verão, como pode ser visualizado na análise de insolação apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Oeste: relação entre modelo D-45° e azimutes de inverno e verão

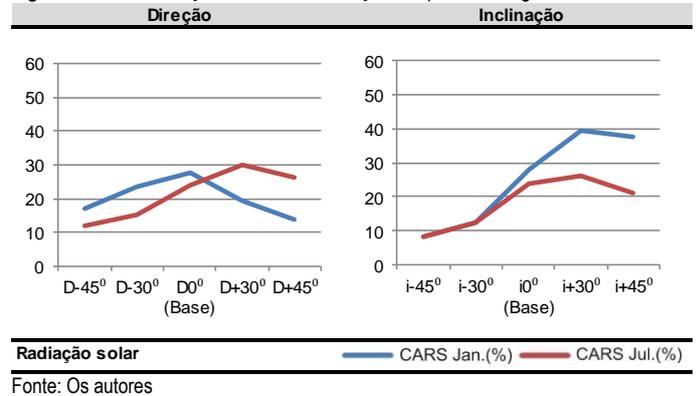


Fonte: Os autores

Complementarmente, os gráficos apresentados nas Figuras 5 e 7 reforçam a influência do parâmetro direção na admissão da radiação solar nas diferentes épocas do ano para as orientações oeste e leste. Esse comportamento não se repete para a orientação norte, em que as variações na direção dos modelos não influenciam na admissão seletiva

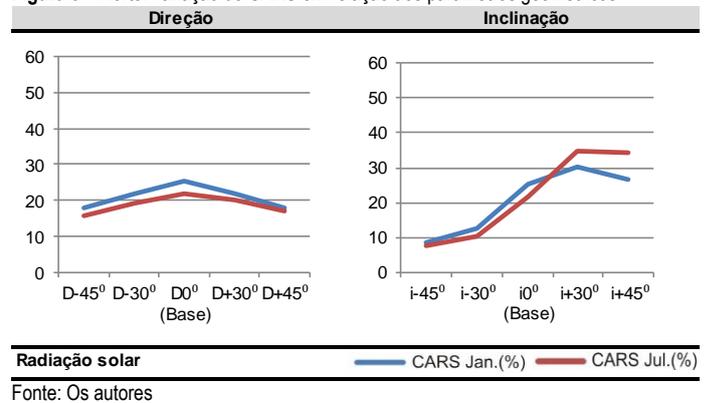
de radiação entre inverno e verão, como pode ser observado no gráfico relativo à direção apresentado na Figura 8.

Figura 7 – Leste: variação do CARS em relação aos parâmetros geométricos



Para a fachada norte, a Figura 8 e a Tabela 4 demonstram que a admissão seletiva de radiação está relacionada à seleção das diferentes alturas solares entre inverno e verão em vez de diferentes azimutes, como para as fachadas oeste e leste. Portanto, os modelos i+30° e i+45° (em destaque na Tabela 4), mais alinhados às alturas solares de inverno, são o que apresentam os menores valores nas razões jan./jul.

Figura 8 – Norte: variação do CARS em relação aos parâmetros geométricos



Em relação ao desempenho lumínico, a Tabela 5 apresenta os resultados das simulações de DA e UDI de todas as variações paramétricas para as três orientações solares avaliadas. Complementarmente, a Figura 9 apresenta as distribuições espaciais dos valores de DA e UDI sobre os planos de análise para o ambiente desobstruído e também para alguns modelos em destaque orientados para oeste. Por fim, a Figura 10 apresenta os resultados de DA e UDI em relação às variações paramétricas avaliadas para a fachada oeste.

Tabela 5 – Autonomia da Iluminação Natural Média (DA₃₀₀) e Useful Daylight Illuminances Médio (UDI₁₀₀₋₂₀₀₀)

Modelos	Oeste		Norte		Leste	
	DA ₃₀₀ (%)	UDI ₁₀₀₋₂₀₀₀ (%)	DA ₃₀₀ (%)	UDI ₁₀₀₋₂₀₀₀ (%)	DA ₃₀₀ (%)	UDI ₁₀₀₋₂₀₀₀ (%)
Desob.	97,08	55,64	98,18	52,78	97,53	58,65
Base	76,15	88,30	83,19	92,04	73,73	91,05
P10	89,79	76,19	93,54	75,13	89,96	79,56
P20(Base)	76,15	88,30	83,19	92,04	73,73	91,05
P30	49,10	91,05	59,67	95,29	47,01	92,93
P40	27,93	81,87	28,98	87,38	23,36	78,70
P50	13,56	59,45	8,51	67,89	9,85	50,03
E1	82,69	84,99	88,66	89,24	82,51	88,53
E2(Base)	76,15	88,30	83,19	92,04	73,73	91,05
E3	65,08	90,11	75,68	93,73	63,27	92,52
E4	55,75	90,79	65,15	94,40	52,41	92,00
E5	45,48	89,29	53,74	93,64	40,74	89,00
D-45°	50,04	82,69	53,90	88,85	39,48	82,11
D-30°	62,96	86,97	69,71	92,40	55,53	91,73
D0°(Base)	76,15	88,30	83,19	92,04	73,73	91,05
D+30°	58,20	89,77	67,67	91,22	60,60	88,35
D+45°	42,93	83,93	55,62	88,80	47,11	81,08
i-45°	20,67	59,85	23,70	69,99	18,14	56,51
i-30°	35,89	81,33	41,41	87,47	31,60	78,03
i0°(Base)	76,15	88,30	83,19	92,04	73,73	91,05
i+30°	78,51	80,15	84,35	81,24	76,60	83,53
i+45°	50,04	82,69	72,64	79,69	64,25	78,75

Fonte: Os autores

Inicialmente, pode-se observar nos primeiros resultados da Tabela 5 e nas imagens da Figura 9 que os ambientes de análise sem a presença dos elementos de controle solar apresentaram elevados níveis de DA médios, indicando que, além de suficiente, a admissão de luz natural pode ser excessiva. Os baixos valores de UDI médios comprovam esse excesso de admissão, principalmente na região próxima à fachada, acarretando desuniformidade na distribuição da luz para os ambientes de análise desobstruídos.

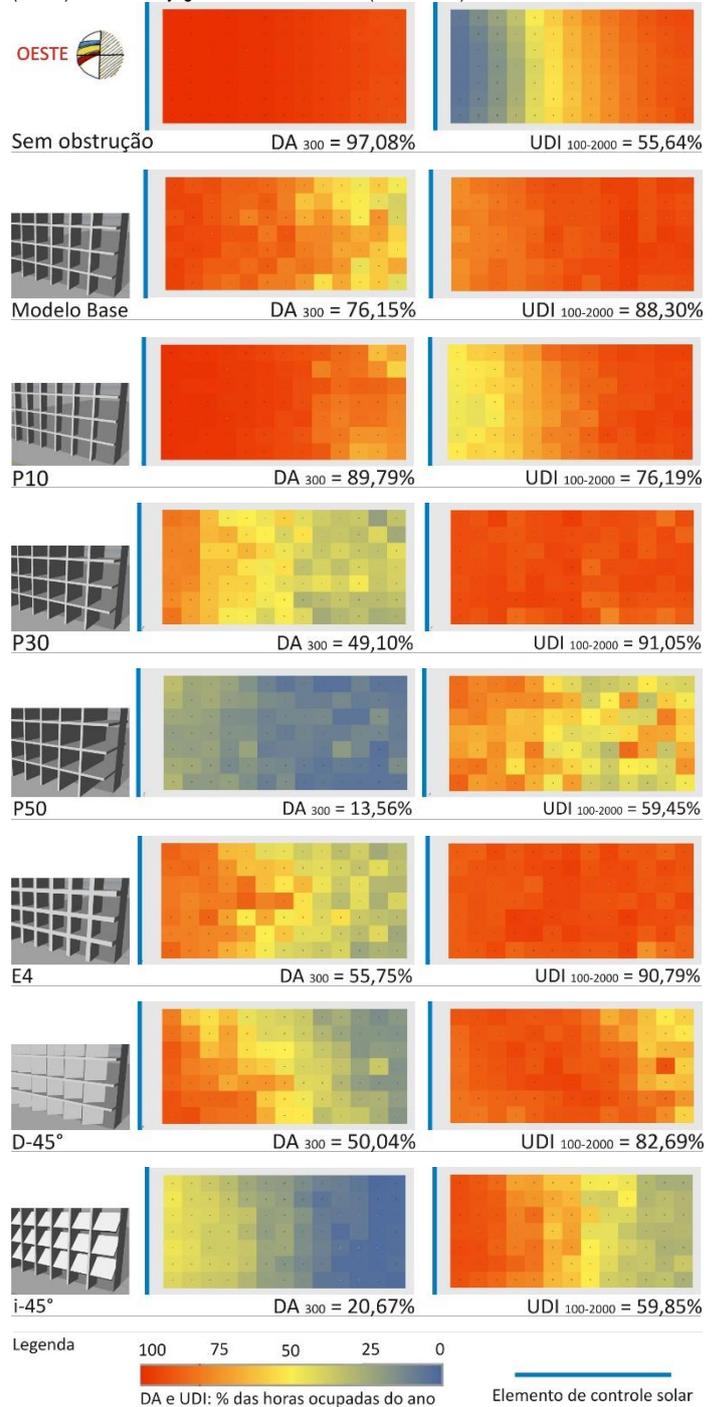
Em todos os casos avaliados, a presença dos elementos de controle solar proporcionou a redução dos valores de DA e uma distribuição espacial mais homogênea dos valores de UDI, com exceção dos modelos P50 e i-45 orientados para leste, que, juntamente aos P50 e i-45 das demais orientações, apresentaram pouca admissão de luz natural.

Relativamente à uniformidade na distribuição da luz, destaca-se a importância do parâmetro profundidade nos elementos de controle solar. Pode-se observar na Figura 10 e na Tabela 5 que os melhores resultados de UDI médios foram encontrados nos modelos P30, demonstrando a ação desses elementos como “prateleiras de luz”, reduzindo a admissão excessiva próximo à fachada e conduzindo a luz para a região mais profunda do ambiente.

As variações dos valores de DA e UDI apresentados na Figura 10 demonstram que, assim como nas análises de radiação, a espessura não se apresentou tão significativa no desempenho dos elementos de controle solar quanto a profundidade, acarretando mais influência na redução da

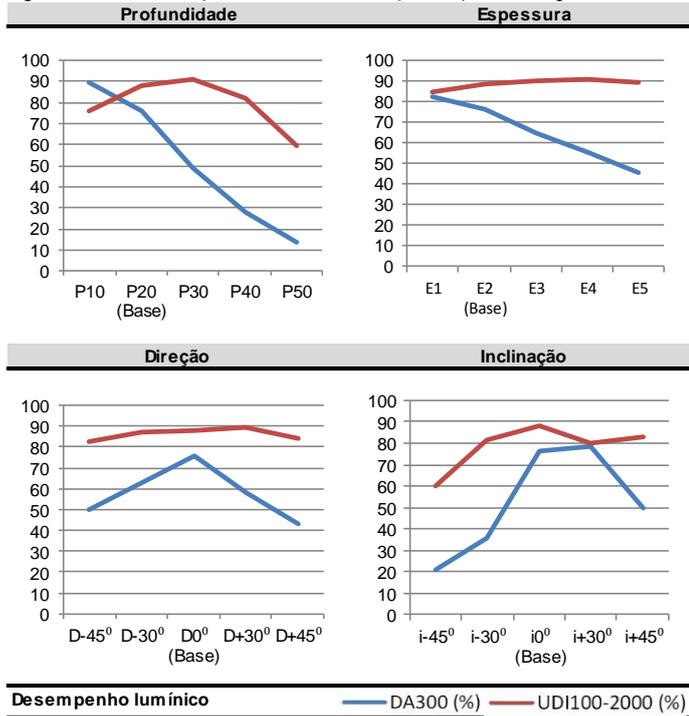
permeabilidade visual normal à fachada, exemplificada na Figura 2, do que propriamente na iluminação natural do ambiente de análise.

Figura 9 – Distribuição espacial dos valores de Autonomia da Iluminação Natural Média (DA₃₀₀) e Useful Daylight Illuminances Médio (UDI₁₀₀₋₂₀₀₀)



Fonte: Os autores

Figura 10 – Oeste: variação de DA e UDI em relação aos parâmetros geométricos



Fonte: Os autores

O parâmetro direção, que anteriormente se apresentou importante para o controle seletivo da radiação solar, não acarretou variações significativas nos valores de UDI para as orientações avaliadas. Entretanto, observa-se que quanto mais perpendiculares ao plano da fachada estiverem os componentes dos elementos de controle solar (direção 0°), maior a admissão de luz (valores de DA) e mais simétrica sua distribuição no ambiente de análise, cabendo destacar na Figura 9 a assimetria na distribuição da luz gerada pelo modelo D-45° em função de sua geometria.

Por fim, as variações no parâmetro geométrico inclinação resultaram em baixos valores de DA para os modelos i-45° e i-30° porque esses proporcionam pouco acesso do ambiente de análise à iluminação vinda diretamente da componente celeste. Observa-se que o direcionamento para o topo do céu dos modelos i+45° também acarreta uma redução na admissão da luz natural, sendo apenas recomendável para orientação norte, em que os elementos com essa inclinação possuem a capacidade de admitir seletivamente a radiação entre inverno e verão.

Otimização através de algoritmos evolutivos

Este item apresenta os resultados da otimização da geometria dos elementos de controle solar através do emprego do *plug-in* de algoritmos evolutivos Galapagos Evolutionary Solver.

Inicialmente, faz-se interessante descrever que um algoritmo do Grasshopper pode ser organizado com “Componentes” (responsáveis por realizar comandos a partir de parâmetros de entrada), “Sliders” (que controlam numericamente as variações paramétricas dos Componentes) e “Painéis” (que especificam parâmetros de entrada e demonstram resultados).

A Figura 11 apresenta o algoritmo desenvolvido para a modelagem dos elementos de controle solar e sua avaliação integrada aos *plug-ins* Diva e Galapagos. Resumidamente, esse algoritmo é composto de três partes identificadas por cores de acordo com a sua função: em azul, a modelagem dos elementos de controle solar; em verde, o plano e o ambiente de análise; e, em vermelho, a simulação integrada Diva+Galapagos.

No processo de otimização o Galapagos teve acesso às *sliders* que controlam as variações paramétricas dos elementos de controle solar, podendo variá-las aleatoriamente. Para cada combinação paramétrica realizada pelo Galapagos, foi automaticamente executada no Diva uma simulação de UDI espacial no ambiente de análise. O resultado do UDI de cada simulação, para cada um dos 60 sensores, foi registrado no painel de valor do UDI, em destaque na Figura 12. Através de uma função condicional, foi verificado se os valores de UDI estavam acima de 85%, sendo esse resultado apresentado no painel de verificação condicional do UDI para cada sensor.

Utilizando um computador com processador Core(TM) i7 de 2,6 GHz e 16 GB de memória RAM, o processo de otimização durou cerca de 160h para cada uma das orientações, tendo como critério de parada o número de 10 gerações. Para as orientações oeste e norte, o Galapagos atingiu o *fitness* de 60 pontos para orientação leste, o melhor resultado foi 59.

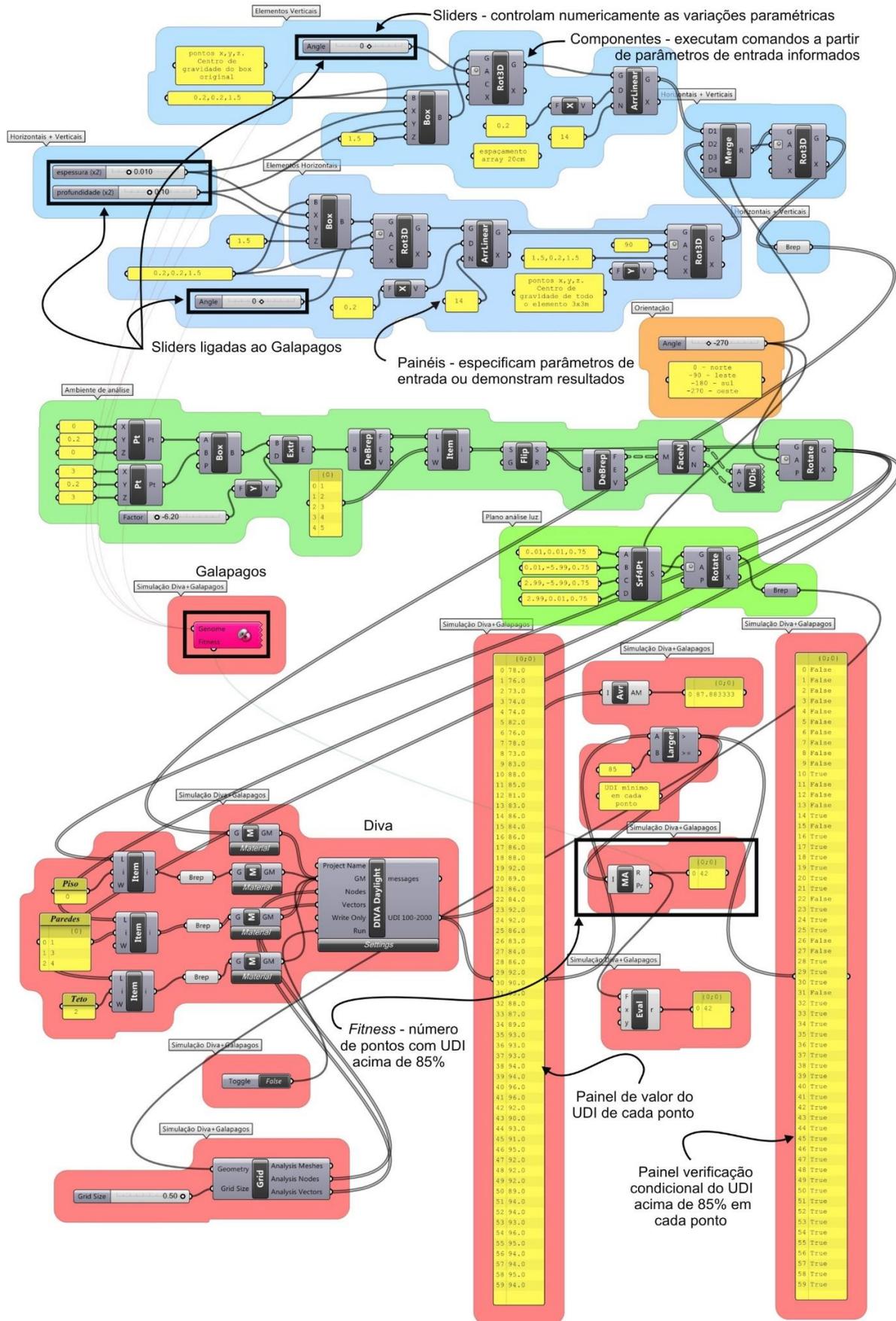
A Tabela 6 apresenta os resultados da otimização dos parâmetros geométricos após 10 gerações (160h) de simulação no Galapagos. Inicialmente, observa-se que coerentemente os valores de profundidade encontrados se assemelham aos valores de profundidade dos modelos com melhores UDI médios, apresentados na Tabela 5 (modelos P30). Como demonstrado na Figura 10, os demais parâmetros, espessura, direção e inclinação, apresentaram menor influência sobre os valores de UDI simulados.

Tabela 6 – Parâmetros geométricos definidos pelo Galapagos

Modelos	Prof.(cm)	Esp.(cm)	Dir.	Inc.
Oeste	34	1	6°	8°
Norte	26	2	4°	-3°
Leste	22	2,8	-18°	2°

Fonte: Os autores

Figura 11 – Algoritmo do Grasshopper para modelagem dos elementos de controle solar e avaliação integrada aos *plug-ins* Diva e Galapagos



Fonte: Os autores

A Tabela 7 e a Figura 12 apresentam os resultados de desempenho lumínico para os três modelos otimizados. Para as orientações oeste e leste, os valores de UDI médios encontrados (91,35% e 93,43%) foram superiores aos valores dos modelos P30 (Tabela 5) para as mesmas orientações (oeste: 91,05% e leste: 92,93%). Já o valor de UDI médio do modelo otimizado para a orientação norte (94,92%) ficou abaixo do valor do modelo P30 para a mesma orientação (95,29%).

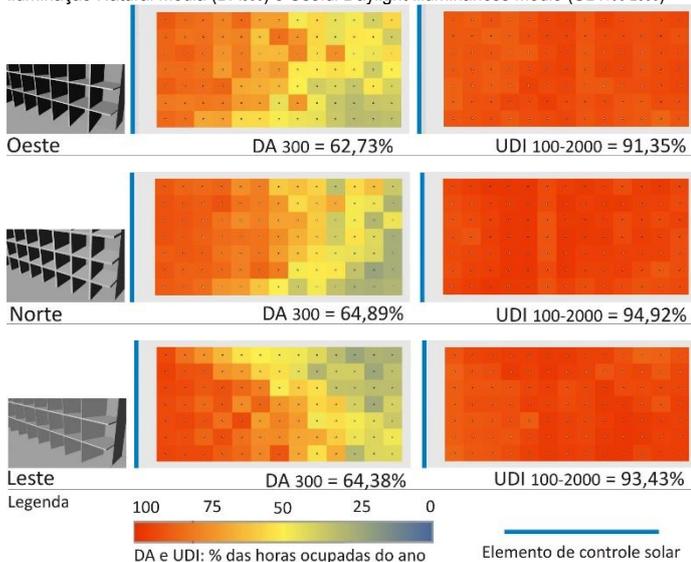
Tabela 7 – Modelos otimizados: Autonomia da Iluminação Natural Média (DA₃₀₀) e Useful Daylight Illuminances Médio (UDI₁₀₀₋₂₀₀₀)

Modelos	DA ₃₀₀ (%)	UDI ₁₀₀₋₂₀₀₀ (%)
Oeste	62,73	91,35
Norte	61,89	94,92
Leste	64,38	93,43

Fonte: Os autores

Mesmo com a proximidade dos valores de UDI médios entre os modelos otimizados (Tabela 7) e os modelos P30 (Tabela 5), observam-se nos valores de DA médios e nas imagens da Figura 12 uma maior admissão de luz natural e uma distribuição mais homogênea nos modelos otimizados.

Figura 12 – Modelos otimizados: distribuição espacial dos valores de Autonomia da Iluminação Natural Média (DA₃₀₀) e Useful Daylight Illuminances Médio (UDI₁₀₀₋₂₀₀₀)



Fonte: Os autores

Essa melhor distribuição está relacionada aos critérios de definição do *fitness*, em que o estabelecimento de um valor mínimo de UDI para cada ponto resulta em uma distribuição mais homogênea da luz no ambiente.

Complementarmente, a escolha do UDI espacial para definição do *fitness* permite avaliar, além de suficiência, o excesso na admissão de luz natural e conseqüentemente na radiação solar. Apesar do satisfatório desempenho lumínico dos modelos otimizados, a configuração do

algoritmo utilizado não favoreceu a admissão seletiva de radiação entre inverno e verão, como observado nos valores das razões jan./jul. apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Modelos otimizados: radiação solar incidente, CARS e razão jan./jul.

Modelos	Rad. jan. (Kwh/m ²)	Rad. jul. (Kwh/m ²)	CARS jan.(%)	CARS jul.(%)	Razão jan./jul.
Oeste	16,74	5,28	23,53	13,62	1,73
Norte	6,1	12,49	17,39	13,05	1,33
Leste	22,29	6,06	27,72	16,26	1,7

Fonte: Os autores

A direção resultante das aletas verticais dos modelos oeste (6°) e leste (-18°) acabou favorecendo a admissão de radiação no verão em detrimento do inverno. Percebe-se que o Galapagos priorizou a direção e a inclinação das aletas para orientações com maior possibilidade de admissão de luz e acabou controlando o excesso através da profundidade dos elementos, fazendo com que esses funcionassem como “prateleiras de luz”, capazes de tornar mais homogênea a distribuição da iluminação natural nos ambientes.

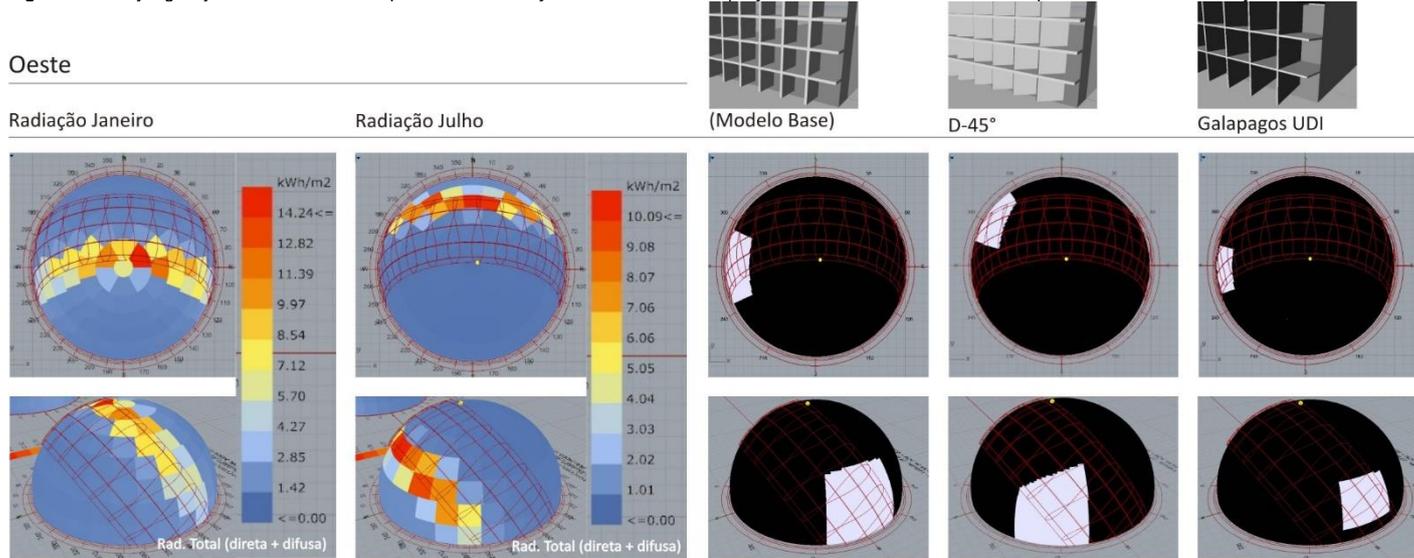
Análises de mascaramentos gerados por simulação computacional

Empregando o *plug-in* Ladybug, a Figura 13 apresenta máscaras de sombra para três modelos em destaque com orientação oeste: modelo Base, modelo D-45° e modelo otimizado pelo Galapagos. Além das máscaras, são apresentados mapeamentos da radiação solar total (direta e difusa) sobreposta às trajetórias solares para os meses de janeiro e julho, facilitando a compreensão do comportamento dos elementos de controle solar em função de sua geometria e conseqüente acesso a diferentes porções de céu visível.

Observa-se que o modelo Base, que possui o mascaramento mais aberto, apresenta o maior DA (76,15%) do grupo em destaque. Apesar de possuir um mascaramento mais fechado, o modelo do Galapagos apresenta um DA (62,73%) superior ao modelo D-45° (50,04%), o que acontece devido ao modelo do Galapagos estar direcionado para uma porção de céu com maior disponibilidade de luz e radiação. Porém, à medida que esse direcionamento conferiu ao modelo distribuição de luz mais homogênea entre os demais (UDI 91,35%), acabou comprometendo sua capacidade de admissão seletiva de radiação entre inverno e verão (razão jan./jul. de 1,73).

Ao observar o mascaramento do modelo D-45°, comparativamente ao mapeamento da radiação solar do mês de julho, facilmente se compreende por que apresenta a melhor admissão seletiva de radiação (razão jan./jul. de 0,5).

Figura 13 – Ladybug: trajetórias solares com mapeamento da radiação solar nas diferentes porções de céu e máscaras de sombra para modelos com orientação oeste



Fonte: Os autores

Conclusões

Observa-se nos ambientes sem a presença de elementos de controle solar admissão excessiva de luz e radiação, principalmente na região próxima à fachada, acarretando desuniformidade na sua distribuição. Em sua maioria, os elementos analisados proporcionaram controle da radiação solar incidente, redução dos valores de DA e distribuição espacial mais homogênea dos valores de UDI.

Quanto à capacidade seletiva de admissão de radiação entre inverno e verão, destaca-se a importância da direção nos elementos orientados para oeste e leste, e da inclinação nos elementos orientados para norte. Em relação à admissão e à distribuição da luz natural, destaca-se a

importância da profundidade dos elementos, possibilitando sua ação como “prateleiras de luz”.

A otimização dos modelos utilizando o Galapagos Solver resultou nas melhores relações entre UDI e DA do grupo avaliado, demonstrando a potencialidade da ferramenta em efetivamente auxiliar decisões de projeto. Observa-se que o algoritmo empregado poderia ser aprimorado, visando à obtenção de geometrias com melhor capacidade de admissão seletiva de radiação.

Por fim, os resultados dos mascaramentos reforçam a contribuição deste estudo, demonstrando que, juntamente às tecnologias computacionais de projeto e às simulações disponíveis, a compreensão da geometria da insolação apresenta-se imprescindível para a obtenção de maior desempenho dos elementos de controle solar.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC), pelos recursos financeiros aplicados no desenvolvimento e na divulgação deste trabalho, assim como à UFSC e à UNIVALI, pelos recursos disponibilizados.

Referências

- BADER, S. **High-Performance Facades for Commercial Buildings**. Austin, Texas: The University of Texas at Austin, 2010.
- CASTLE, H. Editorial – Computation Works: The Building of Algorithmic Thought. **Architectural Design**, v. 83, n. 2, p. 5, 2013.
- CHO, J.; YOO, C.; KIM, Y. Viability of Exterior Shading Devices for High-Rise Residential Buildings: Case Study for Cooling Energy Saving and Economic Feasibility Analysis. **Energy & Buildings**, v. 82, p. 771-785, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.092>
- DUNN, N. **Digital Fabrication in Architecture**. London: Laurence King Publishing, 2012. 192 p.

- FAJKUS, M. Superficial Skins? Super Skins? Shading Structures and Thermal Impact Analysis. In: **ADVANCED BUILDING SKINS – ENERGY FORUM**, 2013, Bressanone, Italy. **Proceedings...** Bressanone: 2013. pp. 187-193.
- GADELHAK, M. Integrating Computational and Building Performance Simulation Techniques for Optimized Facade Designs. In: **INTERNATIONAL ECAADE CONFERENCE – EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE**, 31., 2013, Delft, Holanda. **Anais...** Delft: eCAADe, 2013. pp. 261 – 270.
- GLASSMAN, E.; REINHART, C. Facade Optimization using Parametric Design and Future Climate Scenarios. In: **CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION**, 13., 2013, Chambéry, France. **Anais...** Chambéry: 2013. pp. 1585 – 1592.
- JAKUBIEC, J.; REINHART, C. The “Adaptive Zone”: A Concept for Assessing Discomfort Glare throughout Daylit Spaces. **Lighting Research and Technology**, v. 44, n. 2, p. 149-170, 2012.
- KOLAREVIC, B.; MALKAWI, A. **Performative Architecture beyond Instrumentality**. New York: Spoon Press, 2005.
- MONEDERO, J. Parametric Design: A Review and some Experiences. **Automation in Construction**, v. 9, n. 4, p. 369-377, 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0926-5805\(99\)00020-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0926-5805(99)00020-5)
- NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful Daylight Illuminances: A Replacement for Daylight Factors. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 7, p. 905-913, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.013>
- REINHART, C. F.; WIENOLD, J. The Daylighting Dashboard – A Simulation-Based Design Analysis for Daylit Spaces. **Building and Environment**, v. 46, n. 2, p. 386-396, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.08.001>
- REINHART, F. C.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. **Leukos**, v. 3, n. 1, p. 7-31, 2006.
- REPPERT, S. M.; WEAVER, D. R. Coordination of Circadian Timing in Mammals. **Nature**, v. 418, n. 6.901, p. 935-941, 2002. <https://doi.org/10.1038/nature00965>
- RUTTEN, D. Galapagos: On the Logic and Limitations of Generic Solvers. **Architectural Design**, v. 83, n. 2, p. 132-135, 2013.
- SEDREZ, Maycon; MENEGHEL, Rafael de Moraes. Projeto paramétrico com fractais no detalhamento de uma fachada. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 4, n. 2, p. 22-29, dez. 2013. ISSN 1980-6809. [doi:http://dx.doi.org/10.20396/parc.v4i2.8634548](http://dx.doi.org/10.20396/parc.v4i2.8634548).
- TERZIDIS, K. **Algorithmic Architecture**. Burlington: Architectural Press, 2006.

¹ **Rafael Prado Cartana 1**

Arquiteto e Urbanista. Doutorando pela Universidade Federal de Santa Catarina. Professor da Universidade do Vale do Itajaí. Endereço postal: UNIVALI, Rodovia SC 401, nº 5025, Florianópolis, SC, Brasil, 88032-005

² **Fernando Oscar Ruttkay Pereira 2**

Engenheiro Civil. Doutor pela University of Sheffield, Inglaterra. Pós-Doutor pela University of Loughborough, Inglaterra. Professor da Universidade Federal de Santa Catarina. Endereço postal: Departamento de Arquitetura e Urbanismo, CTC – UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 88040-900