

# Procedimentos paramétricos para a adequação ambiental da concepção arquitetônica: Proposta metodológica

*Parametric procedures for environmental adequacy of architectural conception: Methodological proposal*

Joana Carla Soares Gonçalves\*, Erika Mitie Umakoshi Kuniochi\*\*, Mônica Pereira Marcondes-Cavaleri\*\*\*, Eduardo Gasparelo Lima\*\*\*\*, Rosa Schiano-Phan\*\*\*\*\*

usjt  
arq.urb

número 32 | set - dez de 2021  
Recebido: 03/08/2021  
Aceito: 25/10/2021  
DOI: [10.37916/arq.urb.vi32.545](https://doi.org/10.37916/arq.urb.vi32.545)



\*Architectural Association School of Architecture, Bartlett School of Architecture, School of Architecture and Cities, University of Westminster, Reino Unido, joana.goncalves@aaschool.ac.uk, j.goncalves@ucl.ac.uk, j.soaresgoncalves1@westminster.ac.uk\*\*Universidade de Brasília, Brasil, eumakoshi@unb.br

\*\*\*Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, Brasil, marcondesmo@gmail.com

\*\*\*\*Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, Brasil, eduardo.gasporelo.lima@usp.br

\*\*\*\*\*School of Architecture and Cities da University of Westminster, Reino Unido, r.schianophan@westminster.ac.uk

## Palavras-chave:

Processo de Projeto;  
Concepção Arquitetônica;  
Desempenho Ambiental;  
Estudos Analíticos.

## Keywords:

Design Process;  
Architectural Conception;  
Environmental Performance;  
Analytical Studies.

## Resumo

Desde a década de 1990, as ferramentas computacionais vêm redefinindo a prática do projeto arquitetônico, com vistas ao desempenho ambiental das edificações. Contudo, a avaliação de desempenho ambiental de projetos de edifícios por meio do uso de simulações computacionais é um processo e, por isso, não garante a realização de projetos adequados ao clima local. Nesse contexto, a abordagem ambiental da arquitetura aqui contemplada é aquela em que a adequação ambiental é resultado da maximização das estratégias passivas, caracterizando a prática arquitetônica conhecida como *Bioclimatismo* e configurando o chamado *Edifício Ambiental*. A aplicação eficiente dos parâmetros de projeto na adequação ambiental da arquitetura passa pelo entendimento das especificidades do clima em questão e do consequente papel de cada parâmetro nas interações entre ambientes externo e interno. O objetivo desse trabalho é a apresentação de uma proposta metodológica de qualificação do processo projetual para a adequação ambiental de edifícios na etapa de concepção, por meio de análises paramétricas de simulação computacional, englobando aspectos do desempenho térmico e da iluminação natural. Exemplos de aplicação de partes do método demonstram o papel informativo de estudos analíticos no processo criativo da arquitetura, oferecendo um leque de soluções projetuais de desempenho adequado.

## Abstract

Computational tools have redefined the architectural design practice, with respects to the environmental performance of buildings, since the decade of 1990. However, the environmental assessment of the design of buildings with the use of computer simulations is a process and, for this reason, do not guarantee the development of building designs adequate to the local climate. For this purpose, the environmental architectural approach, considered here, is the one in which the environmental adequacy is the result of the maximization of passive strategies, characterizing the architectural practice known as *Bioclimatism* and configuring the so-called *Environmental Building*. The efficient application of design parameters in the environmental adequacy of architecture requires the understanding of the specificities of the climatic context and of the consequent role of each design parameter in the interactions between internal and external environments. The objective of this work is a methodological proposal of qualifications of the design process for the environmental adequacy of buildings during the architectural conceptual phase, by means of parametric analysis and computer simulations, encompassing aspects of thermal performance and daylight. Examples of the application of parts of this method demonstrate the informative role of analytical studies in the creative architectural process, offering a range of design solutions of adequate performance.

## Introdução

O uso de técnicas de simulação computacional para a avaliação de desempenho ambiental do projeto de edifícios, incluindo os campos da térmica, iluminação e demanda energética, não é uma prática nova, uma vez que, as primeiras ferramentas simulacionais datam das décadas de 1960 e 1970 (MALKAWI e AUGENBROE, 2004). No entanto, foi na década de 1990 que a inserção de métodos computacionais avançados marcou o aprimoramento projetivo de uma geração de ícones da arquitetura construídos na Europa e nos Estados Unidos, com o aproveitamento da luz e da ventilação natural (GONÇALVES e UMAKOSHI, 2010; GONÇALVES E BODE, 2011).

No exemplo desses ícones, deu-se início à exploração do impacto dos vários aspectos arquitetônicos no desempenho ambiental de edifícios por técnicas avançadas de simulação computacional. Com isso, a eficiência de estratégias projetuais derivadas dos princípios da física e do contexto climático passou a ser quantificada e revisada ao longo das fases de projeto. Porém, deve-se considerar que essa avaliação de desempenho é essencialmente um processo. Neste contexto, o que vai garantir a realização de projetos adequados ao clima local é essencialmente a abordagem ambiental da concepção arquitetônica.

Kowaltowski *et al.* (2006) afirmam que a metodologia de projeto é um procedimento organizado para levar o desenvolvimento de criação a um determinado resultado, por meio da racionalização das atividades criativas apoiadas em problemas cada vez mais complexos. Essas metodologias são desenvolvidas a partir de abstrações e de reduções que permitem compreender o fenômeno do processo projetivo. Assim, ao escolher os parâmetros ambientais a serem utilizados no desenvolvimento de projeto, escolhemos o caminho a seguir. Compreender como utilizar esses parâmetros na geração da forma facilita o entendimento técnico dos procedimentos adotados. Indo mais além, os referidos autores afirmam que, para o alcance de tal entendimento, é fundamental a visualização dos fenômenos físicos através de imagens adequadas ao exercício projetivo para estimular o processo criativo.

Olgay (1963) estabeleceu, originalmente, a relação entre clima e arquitetura, introduzindo a terminologia *Bioclimatic Approach*, que pode ser traduzida para o português como Abordagem Bioclimática, com o intuito de prover espaços confortáveis para o usuário, lançando mão exclusivamente de recursos arquitetônicos, ou seja,

promovendo uma arquitetura conhecida pelo uso de estratégias passivas. Complementando, Romero (2015) explica que, no conceito do Bioclimatismo, o projeto de arquitetura é concebido para que sejam alcançadas condições ambientais naturais nos edifícios, por meio de uma abordagem integrada de qualidades da térmica, da luz natural, do som e das cores.

Seguindo nessa linha, o conceito do edifício de melhor desempenho ambiental aqui contemplado e apresentado por Gonçalves e Bode (2015), que introduziram a terminologia Edifício Ambiental, vai ao encontro dos preceitos da Abordagem Bioclimática e das ideias propostas por Hawkes (2008), em que as qualidades arquitetônica e ambiental são apresentadas como um aspecto único do ambiente, fruto do conhecimento aprofundado das particularidades do clima, da luz natural e da geometria solar.

Sendo assim, a definição do chamado Edifício Ambiental (GONÇALVES e BODE, 2015), é contrária à premissa de dependência aos sistemas prediais de condicionamento de ar e de iluminação artificial, amplamente propagada ao redor do mundo desde meados do Século 20, como exposto em Banham (1984). Ao contrário disso, incorpora-se a interação entre meios e os princípios de diversidade das condições ambientais colocados por Steemers e Steane (2004).

Ao invés de se isolar do clima externo, o então Edifício Ambiental se beneficia da relação com o meio exterior, por meio de estratégias de projeto, em que variáveis ambientais como o acesso ao sol e o aproveitamento da luz natural, a comunicação visual entre interior e exterior e a ventilação natural têm o potencial de agregar qualidade e autenticidade à arquitetura. Para isso, Gonçalves e Duarte (2006) destacam o papel dos seguintes aspectos do projeto: forma, especificação de componentes construtivos, tratamento de fachadas, tipologia de aberturas, *layout* dos espaços internos, dentre outros. Entretanto, referenciando Hawkes (1996), a tendência de lidar com as variáveis climáticas, ao invés de se isolar delas, tampouco é uma abordagem nova, estando presente em exemplos da arquitetura de todos os tempos, lugares e culturas.

Com respeito ao projeto arquitetônico, uma série de estudos e trabalhos realizados na última década, tem demonstrado que estudos analíticos de desempenho ambiental têm um papel central no processo criativo de decisões projetuais (YANNAS, 2011; GONÇALVES, UMAKOSHI-KUNIOCHI e MOURA, 2015). Kolaveric e

Malawaki (2005) apontam que o processo de avaliação computacional do desempenho ambiental de edifícios mediante o uso de ferramentas avançadas de simulação oferece uma aproximação entre a concepção arquitetônica e as condições ambientais associadas às características do projeto até então não vista.

Os recursos computacionais tornaram ágil a análise de parâmetros do projeto arquitetônico denominada por Pisello *et al.* (2012) como Análise Paramétrica de Sensibilidade, qualificada como um importante método de apoio ao processo de projeto e à pesquisa aplicada a estudos de desempenho térmico e luminoso de edifícios, no reconhecimento das estratégias mais efetivas para um determinado problema, já na etapa de concepção arquitetônica. Paralelamente, os benefícios de estudos analíticos para o desempenho ambiental e energético dos edifícios são mais significativos quando feitos nas etapas iniciais de projetos, enquanto que, quando introduzidos apenas nas etapas finais, os efeitos deste tipo de análise se resumem a correções de alcance restrito para o desempenho ambiental dos edifícios (ASHRAE, 2018).

No âmbito do Edifício Ambiental, o objetivo deste trabalho é a apresentação de uma proposta metodológica de qualificação do processo de projeto para a adequação ambiental de edifícios na etapa de concepção arquitetônica por meio do uso de análises paramétricas de simulação computacional, englobando aspectos do desempenho térmico e do aproveitamento da iluminação natural. Essa proposta é fundamentada nos trabalhos propositivos de base metodológica de Umakoshi (2010) e Gonçalves (2014) e baseada no entendimento do impacto de parâmetros do projeto arquitetônico no desempenho ambiental de edifícios, para um determinado contexto climático, e nas possibilidades de procedimentos analíticos computacionais, no que tange ao estudo de cenários alternativos e análises multicriteriosas.

### **Estudos analíticos para a concepção arquitetônica: Proposta metodológica e exemplos de aplicação**

Essa proposta metodológica de inserção de procedimentos analíticos de adequação ambiental na etapa de concepção do projeto arquitetônico, com ênfase em questões de térmica e iluminação natural, é resultado de uma revisão crítica das diretrizes gerais para a análise da resposta ambiental de estudos de concepção arquitetônica inicialmente estabelecidas por Umakoshi (2010) e Gonçalves (2014).

Umakoshi (2010) sugere uma sistematização inicial de parâmetros do projeto a serem contemplados para a elaboração de modelos simplificados de análise do desempenho ambiental da arquitetura, incluindo variáveis da ocupação, orientação, forma, materiais, proteção solar, área envidraçada e entorno. Nesse trabalho, o autor ressalta a importância da utilização de modelos simplificados para a compreensão do papel dos parâmetros básicos da arquitetura, associados a forma e a composição das envoltórias, em um determinado contexto climático.

Complementando, Gonçalves (2014) demonstra por meio de estudos de caso de exercícios de projeto arquitetônico conceitual, o potencial de estudos paramétricos de avaliação de desempenho ambiental (térmico, energético e luminoso), com simulações computacionais e cálculos simplificados, em que o impacto de cada variável do projeto é verificado isoladamente. Como por exemplo: o impacto de proteções solares (em diferentes orientações), isolamento térmico, áreas envidraçadas (em diferentes orientações), área de exposição (área de fachada para área de piso) e outros parâmetros. O autor também elenca diferentes formas de avaliação dos resultados das análises de desempenho de acordo com a abordagem preliminar da arquitetura para a climatização dos ambientes, destacando a importância de se começar as análises pelo cálculo de temperaturas operativas e pelos valores de iluminação ao longo de dias típicos do ano, por exemplo, ao invés da carga térmica de resfriamento ou aquecimento.

A proposta aqui apresentada aprofunda o estudo da concepção arquitetônica, com um detalhamento do conjunto de parâmetros que constam das abordagens metodológicas de Umakoshi (2010) e Gonçalves (2014), que são relacionados com estratégias passivas específicas e objetivos da adequação ambiental, mantendo a ideia da construção de casos-base de avaliação. Também como nos referidos trabalhos, essa proposta é fundamentada no entendimento do impacto dos parâmetros do projeto arquitetônico nas condições térmicas e de iluminação natural dos edifícios, contando com o aporte técnico das possibilidades de procedimentos de avaliação por meio de simulações computacionais.

A então estratégia metodológica é estruturada em três etapas: (1) Análise Climática, em que são estabelecidos os objetivos de adequação ambiental e as consequentes estratégias de projeto a partir da análise do clima local; (2) Construção do Caso-Base, compreendendo a identificação dos parâmetros projetuais a serem aplicados

na construção de casos-base e cenários alternativos; e (3) Análises Paramétricas, configurando a análise paramétrica de soluções conceituais, com a construção e análise de cenários acumulativos e combinatórios de soluções alternativas, concluindo com a formulação de diretrizes para a concepção arquitetônica (Figura 1).



**Figura 1** - Fluxograma das etapas gerais da proposta metodológica de inserção de procedimentos analíticos de adequação ambiental na etapa de concepção arquitetônica. Fonte: Os autores.

No entanto, vale destacar que, apesar da menção de ferramentas de simulação computacional, não faz parte dessa proposta a recomendação dessas para a aplicação dos referidos procedimentos de avaliação de desempenho. Desse modo, não são apresentados aqui ferramentas computacionais de análises de desempenho ambiental. De fato, o foco dessa proposta metodológica está na elaboração de casos-base de recintos e na formulação de estudos paramétricos e analíticos de

cenários alternativos, na etapa de concepção projetual, para o teste de estratégias arquitetônicas de desempenho ambiental. Teste esse que serve para ampliar o domínio das possibilidades e restrições do projeto arquitetônico, atreladas ao clima local. Complementando, o desenvolvimento de uma lógica para a formulação desses casos-base antecede o uso de ferramentas de cálculo e simulação do desempenho ambiental dos mesmos.

O mesmo vale para a discussão sobre critérios de desempenho. A esse respeito, são sugeridos os indicadores a serem extraídos dos estudos técnicos (como Temperatura Operativa, Fator de Luz Natural, Iluminâncias Úteis e outros), mas não se faz referência a metas associadas a tais indicadores, uma vez que as metas de desempenho propriamente ditas vão depender do clima em questão e de variações do projeto, como uso e ocupação, que não fazem parte do escopo da metodologia aqui proposta.

### Análise climática

A análise do clima do lugar de projeto, a *Análise Climática*, constitui a primeira etapa desta proposta metodológica, com três passos subsequentes: Passo 1 – Análise de Variáveis Climáticas; Passo 2 – Definição dos Objetivos de Adequação Ambiental e Passo 3 – Identificação das Estratégias de Projeto (Figura 2). O Passo 1 engloba a leitura de dados de radiação direta e difusa, velocidade e predominância dos ventos, tipos de céu e luminosidade, sempre considerando oscilações diárias, semanais e mensais. Com isso, ficam esclarecidas as limitações e as potencialidades de um determinado clima para a arquitetura.

Vale mencionar que a análise climática aqui proposta não exclui o papel do conhecimento prévio de uma classificação climática, para o entendimento das condições específicas do clima de uma determinada localidade, sendo a classificação de Köppen (PEEL *et al.*, 2007), a mais adotada atualmente, por seu alto grau de detalhamento.

A observação das relações entre essas variáveis é parte integrante da análise climática, incluindo: Amplitude térmica ( $\Delta t$ ) diária (para dias representativos do ano) e mensal (relação entre temperaturas máximas e mínimas), diferença entre máximas e mínimas de temperatura e umidade ao longo dos meses, relação entre dados de temperatura e vento, relação entre dados de temperatura e radiação global e, por



último, relação entre radiação direta e difusa ao longo dos meses. A significância de cada uma dessas relações para o desempenho ambiental da arquitetura varia de acordo com o contexto climático, como explicitado na Figura 2, que apresenta as várias ações que constituem o Passo 1 da etapa de Análise Climática.

O estudo do clima toma como base um banco de dados para as 8.760 horas do ano. São vários os tipos de bancos de climáticos, sendo um destes o Test Meteorological Year (TMY)<sup>1</sup>. Indo além das análises de um ano típico corrente, a adequação ambiental dos edifícios tem a possibilidade de incluir a análise de cenários para condições do clima no futuro, com o estudo dos cenários climáticos propostos pelo órgão *Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC* (2017). Somado a isso, também é possível ajustar os bancos de clima para os efeitos da urbanização nas variáveis climáticas, com explicado por Crawley (2008).

No âmbito das análises climáticas, destaca-se o papel de dias representativos de diferentes condições características do ano. A partir da análise das variáveis climáticas (Passo 1), são estabelecidos os objetivos da adequação ambiental e as consequentes estratégias passivas de projeto (Passos 2 e 3 da Análise Climática).

Do ponto de vista da térmica, os objetivos da adequação dos edifícios envolvem o controle dos ganhos e perdas de calor, tendendo à minimização dos ganhos e a maximização das perdas nos climas mais quentes e ao contrário no caso dos climas mais frios. Complementando, é contemplado o aproveitamento da luz natural em condições de céu claro e encoberto. Em essência, são seis os objetivos aqui propostos, a saber: (1) Minimização dos ganhos de calor solar; (2) Maximização das perdas de calor; (3) Maximização dos ganhos de calor solar; (4) Minimização das perdas de calor; (5) Captação da luz natural em condições de céu claro; e (6) Captação da luz natural em condições de céu encoberto. São associadas, a cada um desses objetivos, um conjunto de estratégias para o projeto arquitetônico.



Figura 2 - Análise das Variáveis Climáticas, incluindo a descrição das suas inter-relações, que constitui o Passo 1 da Etapa 1 de Análise Climática. Fonte: Os autores.

<sup>1</sup>TMY - *Test Meteorological Year*, é um banco anual de dados climáticos para uma determinada localidade, resultante da compilação de dados horários mensais, provenientes de diferentes anos, sem a consideração dos registros de temperaturas extremas, gerando um ano climático hipotético (LABEEE, 2005).

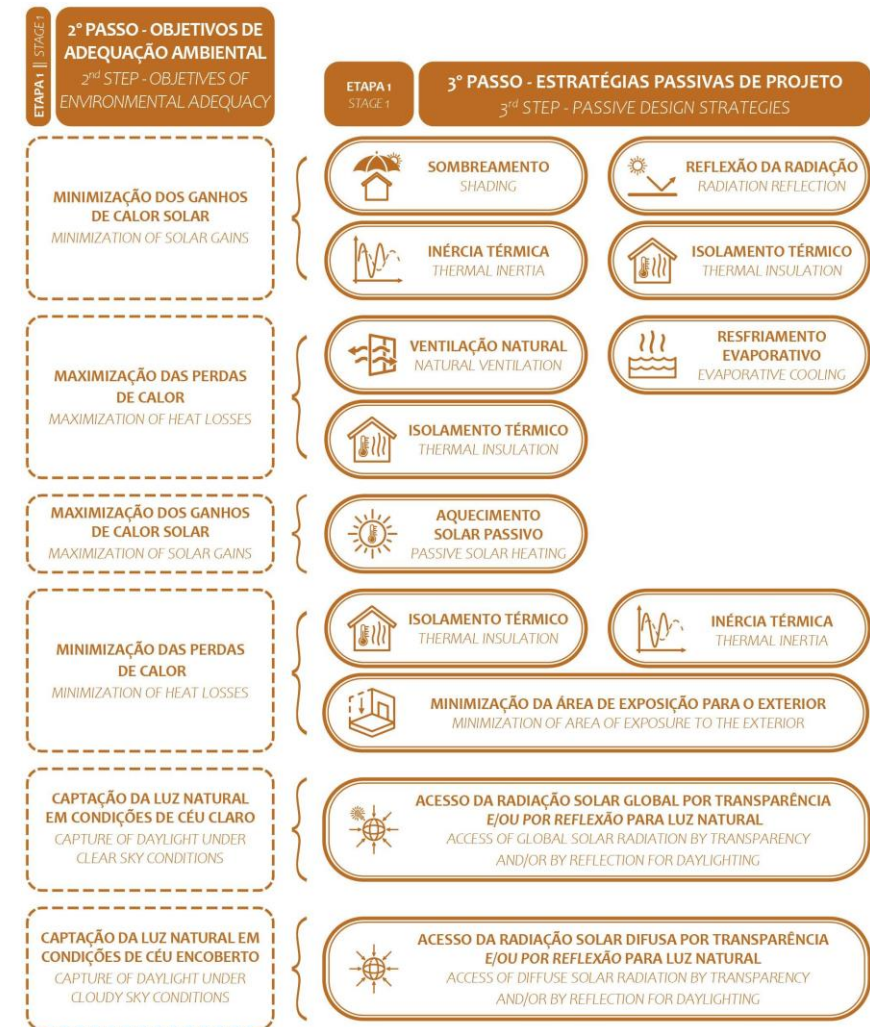
Para o objetivo de Minimização dos ganhos de calor solar, por exemplo, foram relacionadas as seguintes: sombreamento, reflexão da radiação, inércia térmica e isolamento térmico. Já para o objetivo de Captação da luz natural em condições de céu claro e encoberto, destacou o acesso da radiação solar (global ou apenas difusa) proveniente do céu e do entorno, por transmissão direta (transparência) e por reflexão.

A relação completa dos seis objetivos e suas respectivas estratégias estão apresentadas na Figura 3. No total, são propostas dez estratégias passivas para o projeto arquitetônico, sendo oito para o desempenho térmico e duas para o aproveitamento da luz natural, associadas aos diferentes objetivos de adequação ambiental, sendo essas:

- Para o desempenho térmico: 1. sombreamento, 2. reflexão da radiação solar, 3. inércia térmica, 4. isolamento térmico, 5. ventilação natural, 6. resfriamento evaporativo, 7. aquecimento solar passivo e 8. minimização da área de exposição para o exterior.
- Para o aproveitamento da luz natural: 9. acesso da radiação solar (global ou apenas difusa) por transmissão direta e 10. Acesso da radiação solar por meio de reflexão.

Uma mesma estratégia pode ser adotada em objetivos opostos da adequação ambiental, como por exemplo, a inércia térmica, que se aplica tanto à minimização de ganhos de calor solar (para projetos em climas quentes), como na maximização do aproveitamento dos mesmos (para projetos em climas mais frios). Outras, são particulares de um determinado objetivo, como o sombreamento para a minimização dos ganhos de calor solar e o aquecimento solar passivo, para o objetivo de maximização desses ganhos.

Ao final dessa etapa, alcança-se o entendimento preliminar do clima como recurso para a formulação das premissas conceituais de projeto.



**Figura 3** - Conjunto dos Objetivos da Adequação Ambiental e das conseqüentes Estratégias Passivas de Projeto, que constituem os Passos 2 e 3 da Etapa 1 de Análise Climática, respectivamente. Fonte: Os autores.

Givoni (1969), na sua proposta de zoneamento bioclimático, apontou um conjunto de estratégias para a inserção climática do projeto arquitetônico que, contudo, são associadas exclusivamente às condições de temperatura e umidade, sendo elas:

aquecimento passivo, ventilação natural, massa térmica, isolamento térmico e resfriamento evaporativo. Na proposta metodológica aqui apresentada, somam-se o sombreamento, a minimização de área de exposição para o exterior (uma estratégia de forma que trata de quão compacto é o espaço interno) e as estratégias referentes ao aproveitamento da iluminação natural, que não é incluído por Givoni (1969) - que considera o ambiente interno já protegido da radiação global. É importante ressaltar que essa proposta não almeja substituir as recomendações de Givoni (1969), mas sim apoiar-se nas estratégias associadas a este zoneamento, somando uma leitura mais detalhada das condições do clima em questão e das potenciais estratégias de projeto.

### Construção do caso-base e cenários alternativos

Como já referido anteriormente, parâmetros do projeto arquitetônico são definidores da inserção climática de edifícios. Desses parâmetros, destacam-se: forma e sua relação com a orientação solar, composição e tratamento de fachadas (incluindo estratégias de sombreamento), características termofísicas dos componentes construtivos, projeto das aberturas para a captação da iluminação e da ventilação natural. Outros parâmetros associados à especificação da envoltória e a serem considerados nas análises de adequação ambiental da arquitetura são: infiltração de ar e o controle dinâmico tanto de aberturas para a ventilação como de elementos de sombreamento externo e também de isolamento térmico de áreas transparentes (conhecidos em inglês como *night-shutters* e aplicáveis na minimização de perdas de calor por áreas envidraçadas principalmente no período noturno, após o período de captação da radiação solar para o aquecimento solar passivo).

A influência de cada um desses nas condições ambientais internas é explicada pelos fundamentos da física aplicada ao projeto de arquitetura e pelos decorrentes princípios da abordagem bioclimática para a arquitetura, explicados em uma série de referências bibliográficas (FROTA e SHIFFER, 2004; GIVONI, 1994; OLGAY, 1963; SZOKOLAY, 2004).

Aspectos de uso e ocupação também podem caracterizar o caso-base e gerar cenários de avaliação, considerando variações nos ganhos internos de calor e padrões de conforto térmico e luminoso. Contudo, para efeito de simplificação, variações destes aspectos, em particular, não estão contempladas nessa proposta, apesar de serem facilmente incluídas nos estudos analíticos.

As correspondências entre as dez estratégias passivas colocadas da Etapa 1 e os parâmetros mais relevantes de influência das mesmas estão apresentadas na Figura 4. O conjunto destes parâmetros define a construção do aqui chamado caso-base, que compõem o modelo para a criação dos respectivos cenários alternativos de verificação da eficácia das estratégias passivas, no contexto dos objetivos da adequação ambiental para o desempenho térmico e luminoso do projeto.

Assim como no caso das estratégias passivas para com os objetivos da adequação ambiental, alguns dos parâmetros aqui propostos servem a mais de uma estratégia. O parâmetro da forma, por exemplo, é aplicável às estratégias de sombreamento, isolamento térmico, inércia térmica, ventilação natural, aquecimento solar passível e aproveitamento da radiação solar global para a luz natural. Olhando outro exemplo, o fator de U (Coeficiente Global de Transmissão Térmica) se aplica tanto ao isolamento térmico como ao aquecimento solar passivo. Já outros são exclusivos de uma única estratégia, como a capacidade térmica da construção, que se encaixa dentre os parâmetros da inércia térmica.

O valor de casos-base geometricamente simplificados está no fato do foco desses estudos ser na compreensão dos fenômenos da física atrelados a uma determinada estratégia e a um parâmetro de projeto em particular, e não na solução arquitetônica específica.

A definição do caso-base e da variação de seus parâmetros vai depender dos objetivos específicos da adequação ambiental. Por exemplo, a avaliação das vantagens do sombreamento para a minimização dos ganhos de calor começa com a verificação do impacto da radiação solar nas condições térmicas de um espaço interno, que pode ser realizada com o teste de um modelo simplificado de forma retangular, com uma única fachada para o exterior, inicialmente sem elemento de sombreamento, para o qual simulações de desempenho visando à quantificação dos ganhos de calor solar são feitas para cada uma das principais orientações (norte, sul, leste e oeste, podendo incluir as nordeste, noroeste, sudeste e sudoeste).

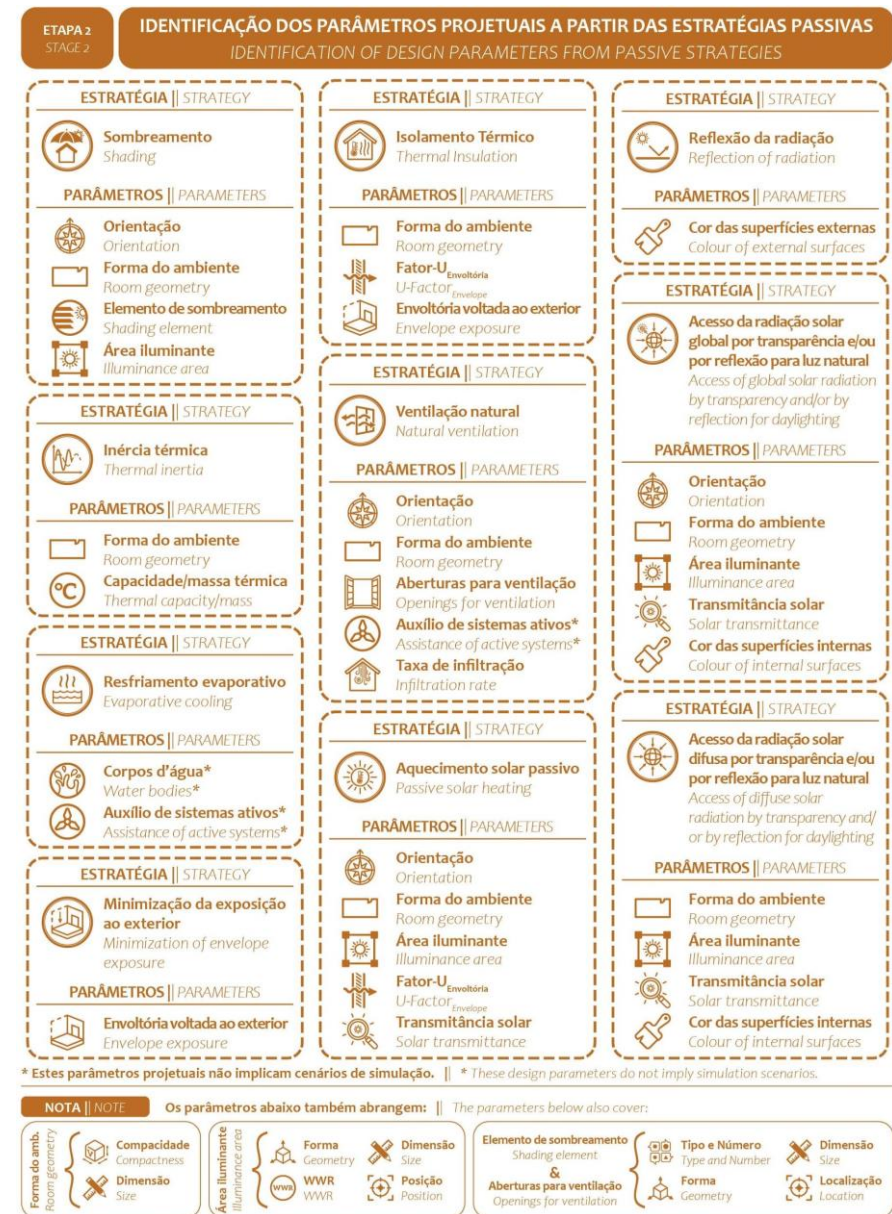
Em uma segunda rodada de simulações, o modelo de teste é simulado com a inserção de elementos de sombreamento. Os resultados das duas rodadas de simulação são então comparados. Outras simulações podem ser feitas para a verificação de variações da área iluminante nos ganhos de calor solar.



Tem-se ainda a situação de casos-base com mais de uma face de exposição ao exterior, como recintos modelados para a ventilação cruzada e para a captação bilateral de luz natural, ou ainda, com aberturas no plano de cobertura. Uma opção para a definição das dimensões de casos-base, recomendável para o desempenho arquitetônico de modelos com mais de uma face de exposição, é seguir as diretrizes de projeto conhecidas como *regras práticas de desempenho*, incluindo o luminoso e/ou de eficiência da ventilação (CIBSE, 2005). Essas diretrizes estabelecem proporções entre profundidade e pé-direito do espaço interno. Assim, o caso-base parte de condições favoráveis ao aproveitamento da iluminação e ventilação natural.

Para os problemas de projeto em que a iluminação constitui uma das prioridades dentre as exigências de desempenho, a definição do caso-base para os estudos analíticos de térmica deve considerar *a priori* as recomendações das regras práticas de projeto para o aproveitamento da luz natural. Por outro lado, a ventilação natural também tem as suas próprias regras práticas para o ponto de partida do projeto. Como regra geral, pensando no desempenho ambiental global (térmico e luminoso), a formulação do caso-base para os estudos analíticos deve priorizar as regras e diretrizes mais restritivas.

Em suma, os estudos analíticos de casos-base são uma extensão do entendimento do potencial e das limitações do clima para o desempenho ambiental da arquitetura, bem como de possíveis situações de implantação, com a possibilidade de incorporação dos efeitos da orientação e de obstruções do entorno, independentemente de qualquer pré-concepção arquitetônica. É importante ressaltar que tais estudos não se referem à verificação de soluções finais de projeto, mas sim ao entendimento do papel de cada parâmetro no processo de adequação ambiental da arquitetura. Mais uma vez, vale dizer que a relação aqui proposta entre os objetivos gerais da adequação ambiental, as estratégias passivas e os parâmetros arquitetônicos a serem explorados no caso-base se apoia nos fundamentos da física aplicada ao desempenho ambiental da arquitetura.



**Figura 4** - Etapa 2: Construção do Caso Base, incluindo a Identificação dos Parâmetros Projetuais, a Construção dos Casos Base propriamente ditos e a Construção dos Cenários, a partir da seleção das estratégias passivas feitas na etapa anterior. Fonte: Os autores.



## Estudos analíticos de desempenho: análises de sensibilidade, cenários combinatórios e soluções acumulativas

Sobre a inserção dos parâmetros arquitetônicos no processo de projeto, todos os aqui listados (da forma do edifício ao tamanho de aberturas) são passíveis de parametrização, ou seja, podem ter suas características fundamentais reguladas por intervalos de valores, a fim de se testar e otimizar o seu impacto na resposta de uma ou mais questões do desempenho ambiental do projeto.

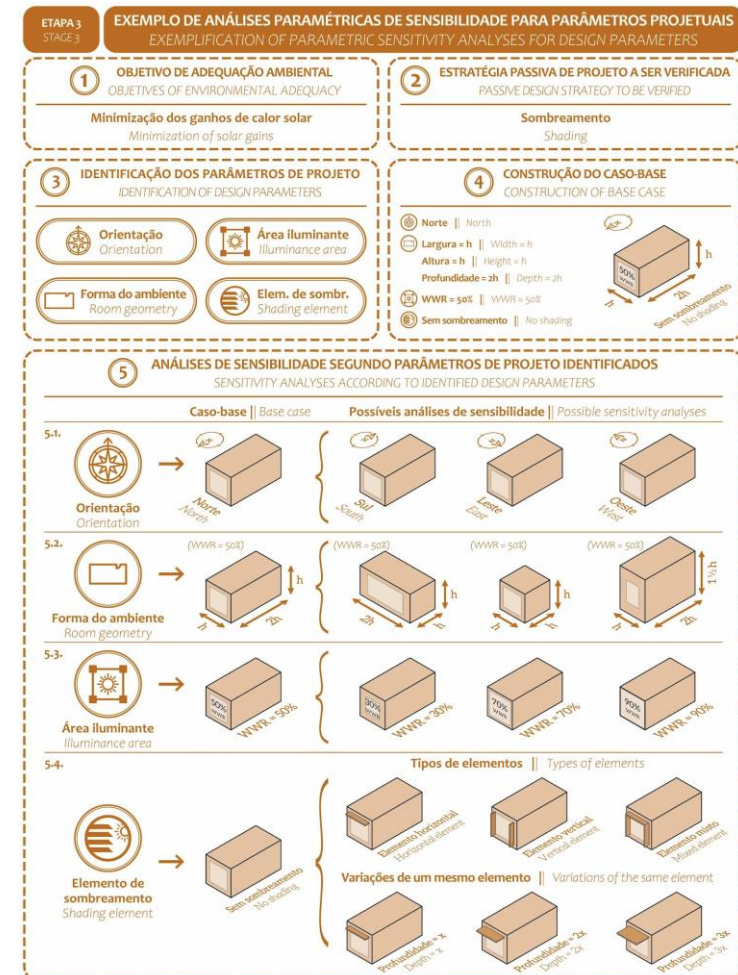
Nessa etapa, os cenários do caso-base são testados inicialmente por análises de sensibilidade, sendo essas o processo em que o desempenho de cada parâmetro e de suas possíveis variações é avaliado individualmente, podendo estar relacionadas a dimensões, especificações, ou ainda, à forma, enquanto são mantidos iguais todos os demais parâmetros do modelo de estudo. Na sequência das análises de sensibilidade, a elaboração de diretrizes projetuais para um melhor desempenho ambiental implica a verificação do efeito conjunto de parâmetros do projeto.

Em muitos casos, a adequação ambiental de um edifício está associada à otimização multicriteriosa de cada fator do projeto arquitetônico. Olhando para o projeto de elementos de sombreamento, por exemplo, a solução mais apropriada será aquela que controla o impacto indesejado da radiação global para um determinado contexto, mas que, ainda sim, mantém a iluminação natural adequada.

A título de ilustração, a Figura 5 propõe cenários para a análise de sensibilidade do impacto de quatro parâmetros de projeto nas condições térmicas de um caso-base: orientação, forma, área iluminante e elementos de sombreamento. Neste momento, as análises visam à quantificação das vantagens de recursos de projeto para o exercício da estratégia de sombreamento, como um dos meios para a minimização dos ganhos de calor, exclusivamente. Também são apresentados na mesma figura, os parâmetros adotados para a construção do case base. Para os primeiros três parâmetros (orientação, forma e área iluminante) são sugeridas três variações em relação ao caso-base, enquanto que para o parâmetro de elementos externos de sombreamento, são sugeridas seis, sendo três para o tipo horizontal e outras três para o vertical.

De forma similar, cenários para análises paramétricas de sensibilidade, associadas aos seis objetivos aqui propostos para a adequação ambiental do projeto de

arquitetura em etapa de concepção, estão colocados nas Figuras de 6a a 6f, contemplando o conjunto completo de parâmetros relacionados às estratégias passivas particulares a cada objetivo.



**Figura 5 -** Exemplificação da Etapa 3: Análises Paramétricas de Sensibilidade para Parâmetros Projetuais, com sugestão de cenários para as análises paramétricas sensíveis de quatro parâmetros do projeto: orientação, forma, área iluminante e elementos de sombreamento, com vistas ao cumprimento da estratégia de sombreamento, como um dos recursos para o objetivo específico de Minimização dos Ganhos de Calor Solar. Fonte: Os autores.

**MINIMIZAÇÃO DOS GANHOS DE CALOR SOLAR: POSSÍVEIS CENÁRIOS PARA OS PARÂMETROS ENVOLVIDOS**  
 MINIMIZATION OF SOLAR HEAT GAINS: POSSIBLE SCENARIOS FOR RELATED PARAMETERS

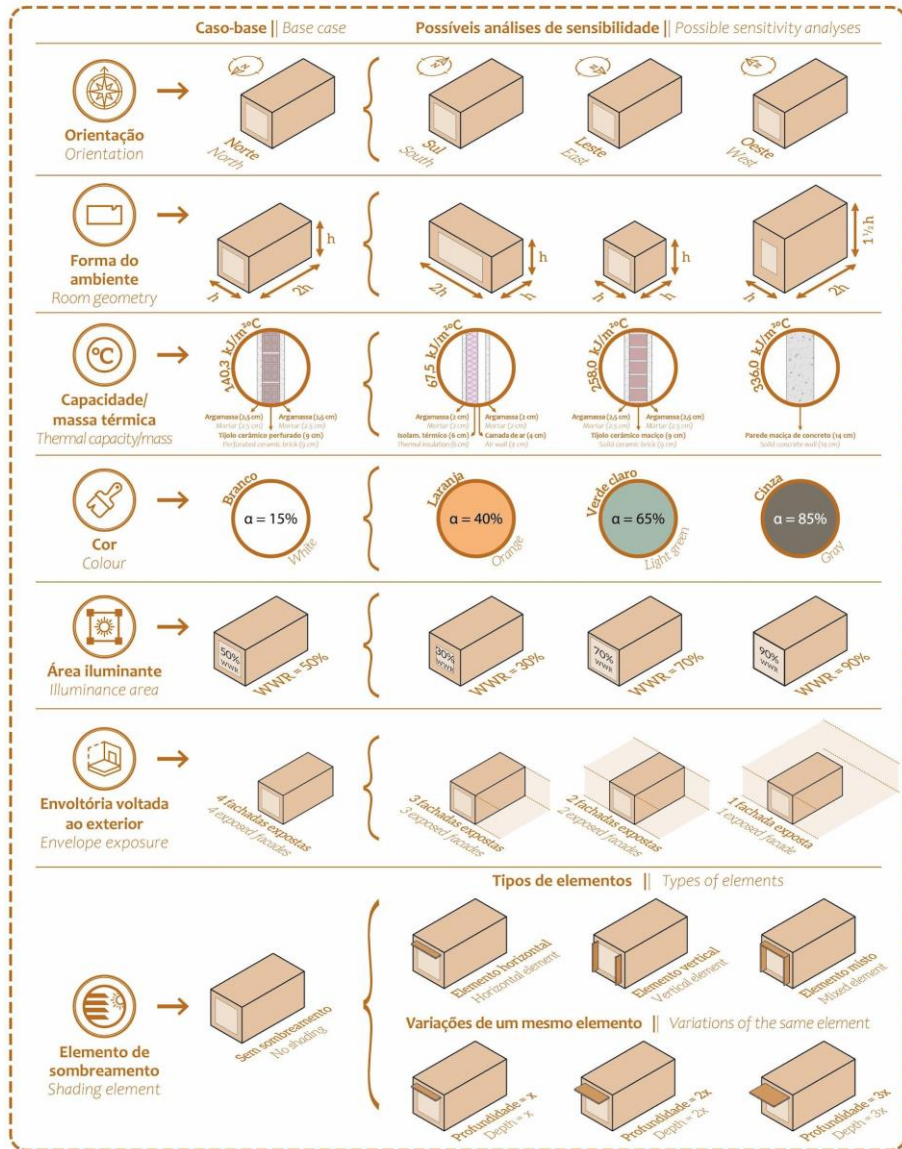


Figura 6a - Cenários de Análises Paramétricas de Sensibilidade para Parâmetros Projetuais, para o objetivo de Minimização dos Ganhos de Calor Solar. Fonte: Os autores.

**MAXIMIZAÇÃO DAS PERDAS DE CALOR: POSSÍVEIS CENÁRIOS PARA OS PARÂMETROS ENVOLVIDOS**  
 MAXIMIZATION OF HEAT LOSSES: POSSIBLE SCENARIOS FOR RELATED PARAMETERS

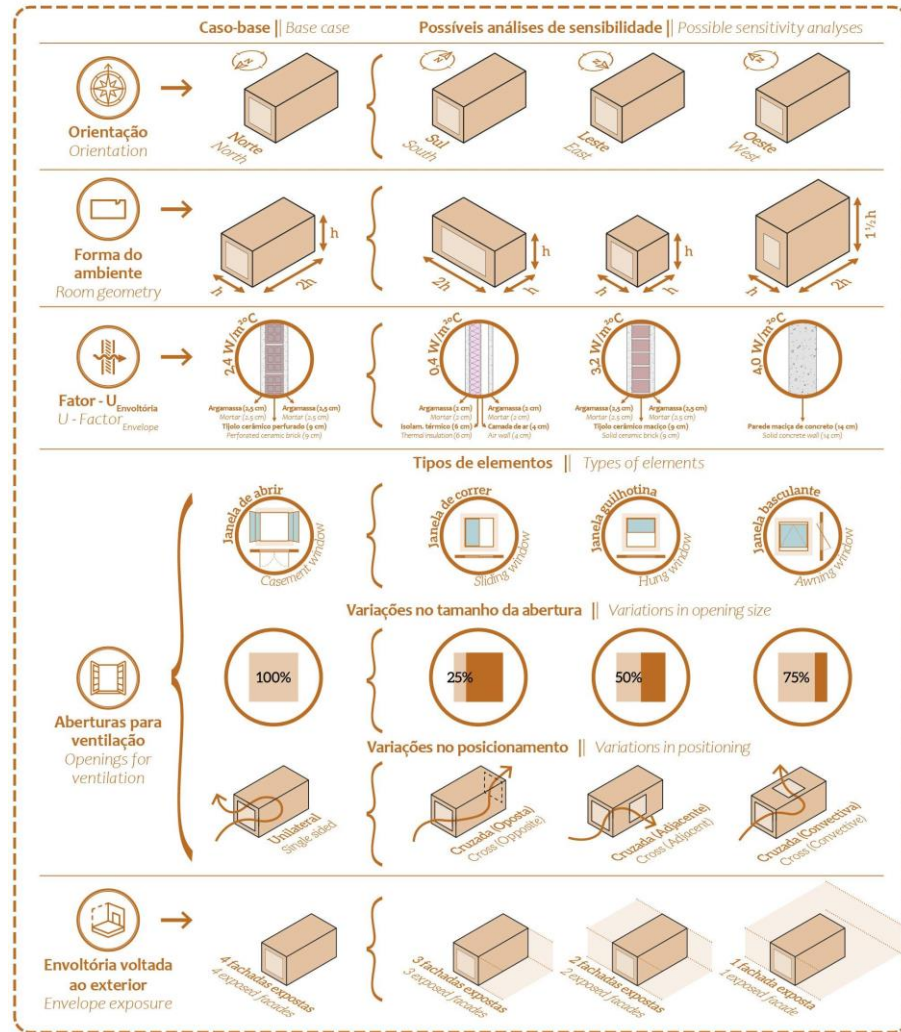
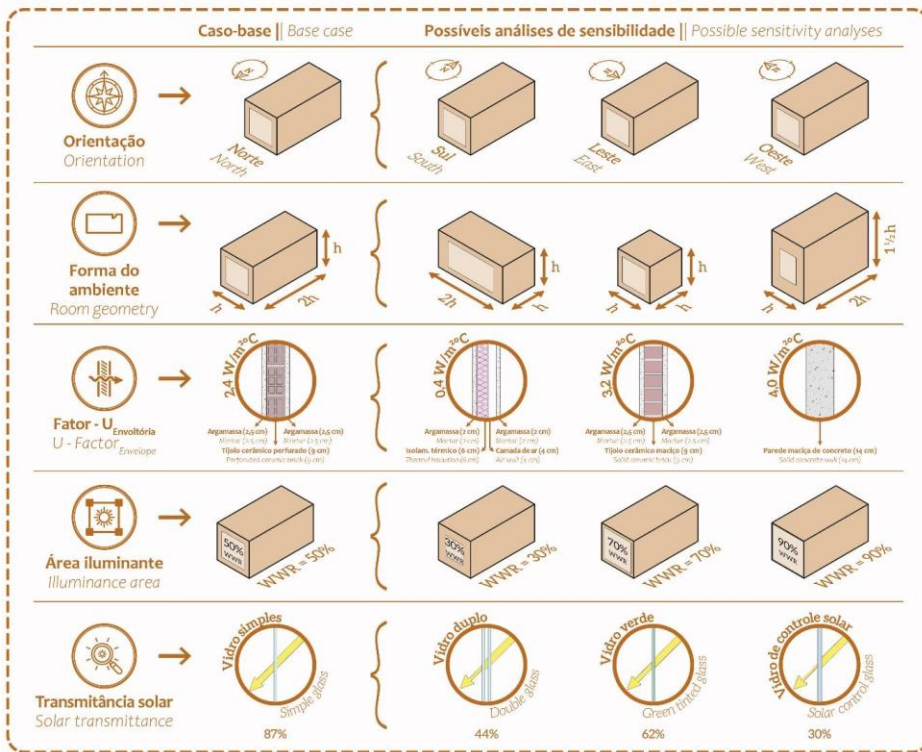


Figura 6b - Cenários de Análises Paramétricas de Sensibilidade para Parâmetros Projetuais, para a Maximização das Perdas de Calor. Fonte: Os autores.



**MAXIMIZAÇÃO DOS GANHOS DE CALOR SOLAR: POSSÍVEIS CENÁRIOS PARA OS PARÂMETROS ENVOLVIDOS**  
 MAXIMIZATION OF SOLAR HEAT GAINS: POSSIBLE SCENARIOS FOR RELATED PARAMETERS



**MINIMIZAÇÃO DAS PERDAS DE CALOR: POSSÍVEIS CENÁRIOS PARA OS PARÂMETROS ENVOLVIDOS**  
 MINIMIZATION OF HEAT LOSSES: POSSIBLE SCENARIOS FOR RELATED PARAMETERS

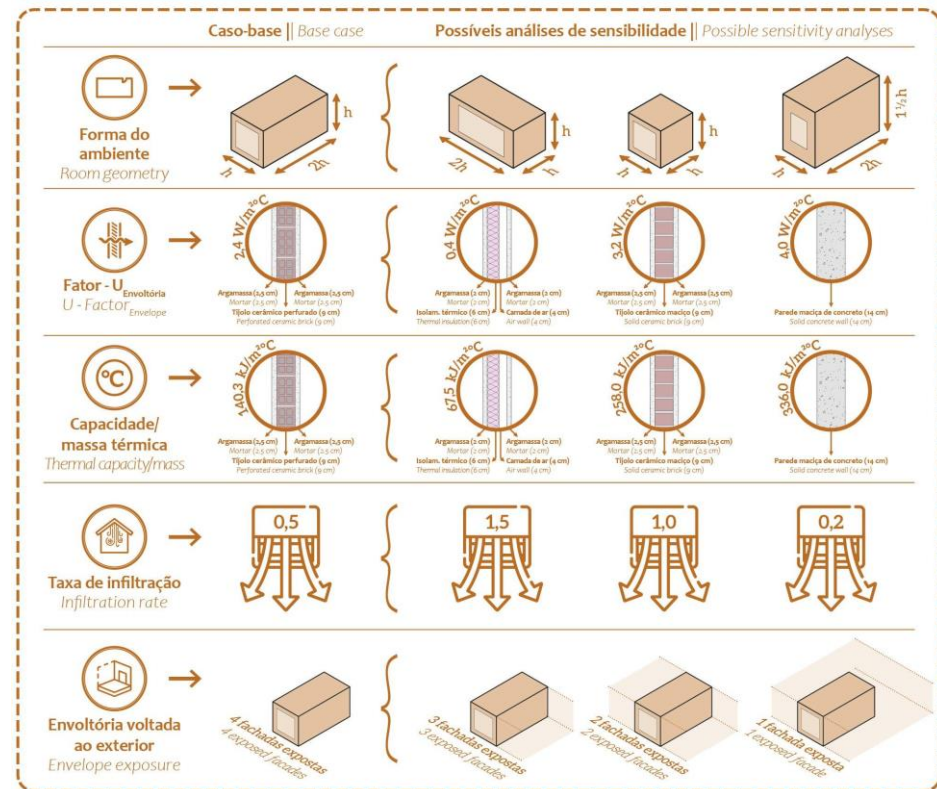


Figura 6c - Cenários de Análises Paramétricas de Sensibilidade para Parâmetros Projetuais, para a Maximização dos Ganhos de Calor Solar. Fonte: Os autores.

Figura 6d - Cenários de Análises Paramétricas de Sensibilidade para Parâmetros Projetuais, para a Minimização das Perdas de Calor. Fonte: Os autores.

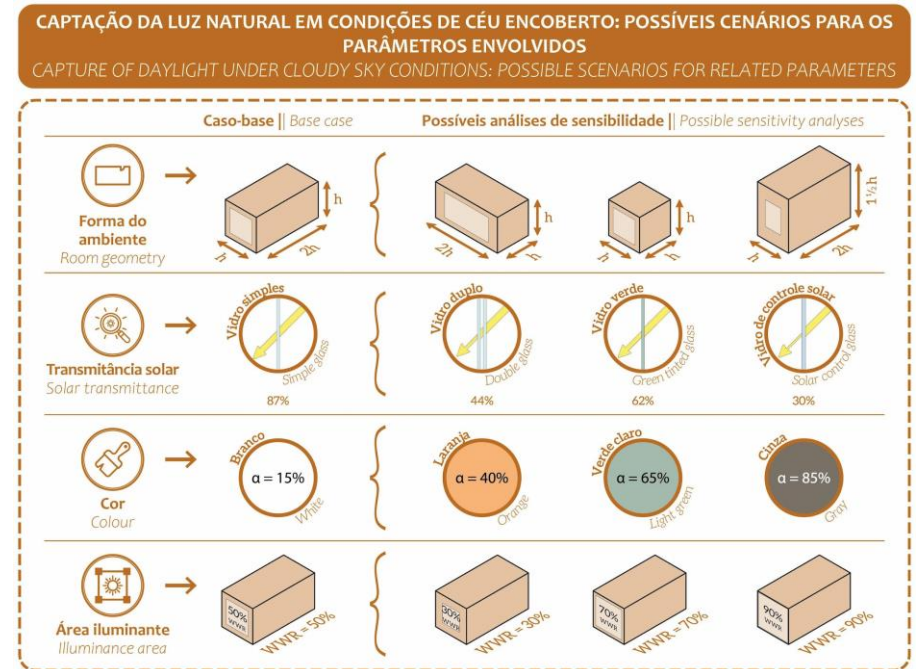
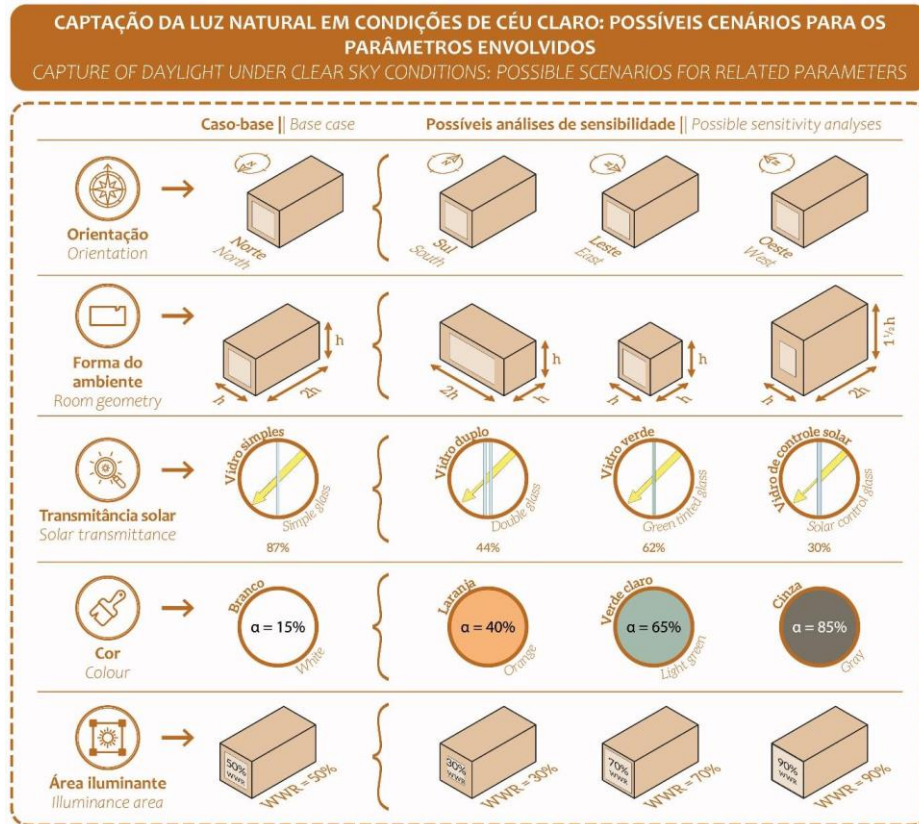


Figura 6e - Cenários de Análises Paramétricas de Sensibilidade para Parâmetros Projetuais, para a Captação da Luz Natural para Condições de Céu Claro. Fonte: Os autores.

Figura 6f - Cenários de Análises Paramétricas de Sensibilidade para Parâmetros Projetuais, para a Captação da Luz Natural para Condições de Céu Encoberto. Fonte: Os autores.

Os indicadores de desempenho recomendados para as análises de sensibilidade dos seis objetivos de adequação ambiental que definem essa proposta metodológica podem tratar de dados horários, mensais e anuais. Para os objetivos relacionados com o desempenho térmico do projeto, fazem parte os dados de temperatura, percentual anual de horas de conforto e desconforto por frio e por calor, como também totais diários, mensais e anuais de carga residual de resfriamento e/ou aquecimento, dependendo do contexto climático e do consequente objetivo de adequação ambiental. Paralelamente, valores horários de radiação solar incidente na envoltória e/ou no ambiente interno ao longo de um dia e totais mensais ou anual, assim como a diferença entre temperaturas máximas do ambiente interno e exterior e taxas de renovação do ar (indicativa da ventilação natural), são dados quantitativos que auxiliam na interpretação e no entendimento geral dos indicadores principais de desempenho.



O cálculo da Temperatura Interna Máxima do Ar Seco ou da Temperatura Operativa<sup>2</sup> (TO) e outras variáveis associadas, como a taxa de renovação e valores incidentes de radiação solar, é passível de ser obtido por meio de cálculos simplificados (FROTA, 2005). Para o restante dos indicadores, é necessário o uso de ferramentas de simulação computacional de termodinâmica.

Para o estudo de ambientes projetados exclusivamente para serem ventilados naturalmente, as análises de desempenho dispensam o cálculo das cargas de resfriamento e/ou aquecimento, restringindo-se às temperaturas e aos percentuais de hora de conforto.

Da mesma forma, para os objetivos de captação da luz natural, os indicadores aqui sugeridos referem-se a dados horários e percentuais mensais e anual. O indicador de dados horários é expressado por valores de iluminâncias calculadas para dias típicos e/ou representativos do ano e do tipo de céu do local de estudo. Para os valores percentuais, pode-se adotar o chamado Fator de Luz Natural – FLN (*Daylight Factor* - DF) (IES, 2018; MOON e SPENCER, 1942) e/ou de Autonomia da Luz Natural (*Daylight Autonomy* – DA) (REINHART et al., 2006) e de Iluminâncias Úteis (*Useful Daylight Illuminance* - UDI) (NABIL e MARDALJEVIC, 2005). Enquanto o cálculo de iluminâncias e de FLN são mais simplificado, o cálculo de DA e UDI requer o uso de métodos de simulação anual de iluminação natural dinâmica (chamado em inglês de *Climate Based Daylight Modelling* - CBDM) (REINHART e HERKEL, 2000).

No caso particular das análises de iluminação natural, o cálculo do UDI pode substituir os de FLN e de DA. Por outro lado, o cálculo do FLN fornece um entendimento imediato da tendência do desempenho do ambiente de estudo, ou seja, se a proposta de concepção arquitetônica tende a um ambiente mais ou menos bem iluminado, dispensando uma análise mais minuciosa nessa etapa de projeto. Ao mesmo tempo, cálculo das iluminâncias ao longo do dia revelam um aspecto de qualidade à qual está exposto o ocupante e que não é igualmente expressada pelos indicadores

percentuais. O conjunto completo de indicadores e suas unidades para a etapa das análises de sensibilidade estão apresentados na Tabela 1, no quadro de indicadores.

Vale mencionar que a sugestão de indicadores térmico e luminoso a serem extraídos dos estudos técnicos (como Temperatura Operativa, Fator de Luz Natural, Iluminâncias Úteis e outros) não é acompanhada de referências a metas de desempenho, uma vez que essas vão depender do clima em questão e de variáveis do projeto, como uso e ocupação.

Como estes estudos não se referem a uma solução arquitetônica final, mas sim a especulações projetuais para a concepção, a importância da quantificação do desempenho das soluções nesta etapa inicial de projeto e de análise recai nas diferenças comparativas entre cenários e não nos resultados absolutos.

Um exemplo de análise paramétrica de sensibilidade é visto nos estudos de Bhatla e Gonçalves (2012), em que foram comparadas as reduções na carga térmica de resfriamento de um modelo simplificado de uma unidade residencial, orientada a Norte-Sul, na cidade indiana de Madras (Lat. 13°N), de clima quente e úmido, em decorrência da prolongação de uma proteção horizontal externa. Variando de 1 a 3 metros de profundidade, constatou-se que o primeiro metro de sombreamento exerce um efeito significativo na redução da carga térmica interna, porém esse impacto é menos relevante a cada metro adicionado de sombreamento (Figura 7).

Na sequência, o trabalho compara o benefício do sombreamento *versus* o do isolamento térmico das vedações e constatou que o sombreamento resulta em cerca de 32% de redução da carga térmica de resfriamento, quando comparada ao caso base sem proteção solar, contra 37% alcançados com a introdução de isolamento, no referido contexto climático. Passando para a etapa de verificação do efeito acumulativo das duas estratégias (sombreamento e isolamento térmico), as simulações de termodinâmica indicaram um potencial de quase 50% de redução da carga térmica do case-base.

<sup>2</sup>Temperatura Operativa (TO), também conhecida como temperatura resultante, pode ser definida como a média da temperatura radiante média das superfícies internas e a temperatura do ar, ponderadas pelos respectivos coeficientes de transferência de calor (ASHRAE, 2017).

Tabela 1. Quadro de indicadores de desempenho da adequação ambiental para as análises paramétricas de sensibilidade. Fonte: Os autores.

OBJETIVOS GOALS	INDICADORES DE DESEMPENHO PARA A ADEQUAÇÃO AMBIENTAL PERFORMANCE INDICATORS FOR ENVIRONMENTAL COMPLIANCE	
<p>Minimização dos ganhos de calor solar (1) e Maximização das perdas de calor (2) Minimizing solar heat gains (1) and Maximizing heat losses (2)</p>	<p>- Para uma determinada condição de conforto: <b>Horas anuais de conforto e de desconforto por calor</b>, em %;</p> <p>- Para uma determinada condição de conforto: <b>Carga residual de resfriamento</b>, em kWh/m<sup>2</sup> por dia, mês e/ou ano;</p> <p>- <b>Radiação incidente na envoltória e/ou no ambiente interno</b>, em kWh/m<sup>2</sup> por dia, mês e/ou ano; e</p> <p>- Para os meses mais quentes do ano: <b>Temperatura interna máxima (TO) e o Δt correspondente entre temperatura interna e externa</b>, em °C.</p> <p>- Para uma ou mais semanas típicas e, ou representativas das condições climáticas do lugar: <b>Perfil horário de Temperatura do Ar e temperatura Operativa e valores de Umidade Relativa</b>.</p> <p><b>NOTA 1:</b> Os indicadores de horas anuais de conforto e carga residual de resfriamento substituem um ao outro. A escolha do indicador mais apropriado vai depender do objetivo da análise de desempenho.</p> <p><b>NOTA 2:</b> Para os casos das perdas de calor por efeito da ventilação natural, cabe destacar a importância da Taxa de renovação do ar (N), como mais um indicador de desempenho.</p> <p><b>NOTA 3:</b> Para os climas do tipo quente-úmido, vale verificar os valores horários de Umidade relativa (UR) e Umida absoluta, em especial nos horários de temperaturas máximas. A mesma consideração se aplica para a velocidade do ar (m/s).</p>	<p>- For a given comfort condition: <b>Annual hours of comfort and discomfort due to heat</b>, in %;</p> <p>- For a given comfort condition: <b>Residual cooling load</b>, in kWh/m<sup>2</sup> per day, month and/or year;</p> <p>- <b>Solar radiation on the envelope and/or indoors</b>, in kWh/m<sup>2</sup> per day, month and/or year; and</p> <p>- For the hottest months of the year: <b>Maximum internal temperature (TO) and the corresponding Δt between internal and external temperature</b>, in °C.</p> <p>- For one or more typical and/or representative week of the local climatic conditions: <b>Hourly profile of Air Temperatures, Operative Temperatures and Relative Humidity values</b>.</p> <p><b>NOTE 1:</b> the hourly and annual indicators of thermal comfort and residual loads replace each other. The most appropriate indicator will depend on the objective of the performance assessment.</p> <p><b>NOTE 2:</b> For the case of heat loss through natural ventilation, it is worth mentioning the importance of Air-Change rates as another performance indicator.</p> <p><b>NOTE 3:</b> For warm and humid climates, it is worth verifying typical daily the values of relative and absolute humidity, specially during the hours of peak temperature. The same consideration is applicable to air speed (m/s).</p>
	<p>Maximização dos ganhos de calor solar (3) e Minimização das perdas de calor (4) Maximizing solar heat gains (3) and Minimizing heat losses (4)</p>	<p>- Para uma determinada condição de conforto: <b>Horas anuais de conforto e de desconforto por calor</b>, em %;</p> <p>- Para uma determinada condição de conforto: <b>Carga residual de aquecimento</b>, em kWh/m<sup>2</sup> por dia, mês e/ou ano;</p> <p>- <b>Radiação incidente na envoltória e/ou no ambiente interno</b>, em kWh/m<sup>2</sup> por dia, mês e/ou ano; e</p> <p>- Para os meses mais frios do ano: <b>Temperatura interna máxima (TO) e o Δt correspondente entre temperatura interna e externa</b>, em °C.</p> <p>- Para uma ou mais semanas típicas e, ou representativas das condições climáticas do lugar: <b>Perfil horário de Temperatura do Ar e Temperatura Operativa e valores de Umidade Relativa</b>.</p> <p><b>NOTA:</b> Os indicadores de Horas anuais de conforto e Carga residual de aquecimento substituem um ao outro. A escolha do indicador mais apropriado vai depender do objetivo da análise de desempenho.</p>

Os resultados das análises de sensibilidade dão subsídios para a construção de cenários subsequentes, em que é vista a contribuição conjunta dos parâmetros de projeto. No estudo analítico desses cenários, é estratégica a verificação da contribuição passo a passo dos múltiplos parâmetros (já otimizados ou aprimorados na etapa anterior), partindo daquele de maior para o de menor impacto. Apesar da ordem dos fatores não alterar o resultado final de desempenho do modelo, tem-se com essa abordagem metodológica a aferição da importância relativa e otimizada de cada parâmetro para o desempenho do modelo. Tal hierarquização é informada pelos resultados das análises de sensibilidade. Por último, a elaboração de diretrizes de projeto para a adequação ambiental implica a verificação do efeito acumulativo do conjunto de estratégias.

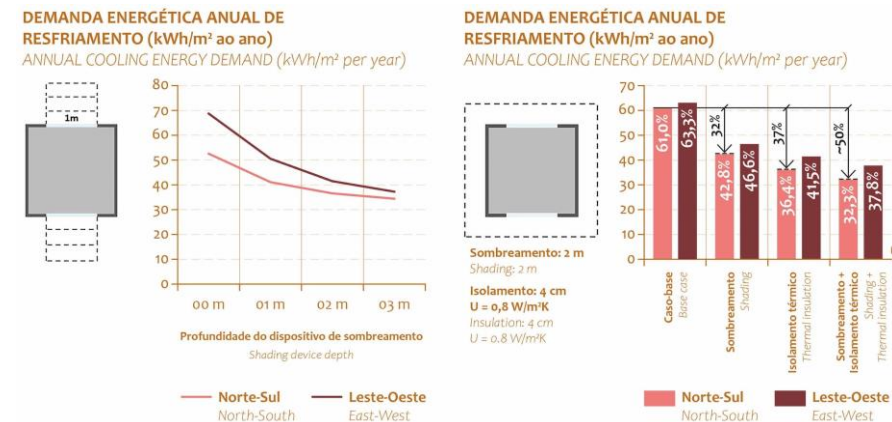
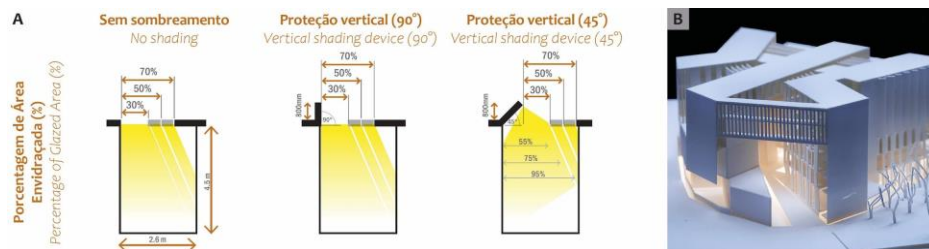


Figura 7 - À esquerda, análise paramétrica de sensibilidade do impacto de proteções solares de diferentes profundidades na carga térmica de resfriamento da unidade residencial na cidade de Madras, na Índia. À direita, cálculo do impacto de diferentes graus de sombreamento versus a inserção de isolamento térmico, na carga térmica de resfriamento da unidade residencial, comparados ao efeito acumulativo do sombreamento e isolamento térmico. Fonte: Bhatla e Gonçalves (2012).

No processo de avaliação das questões de térmica e de iluminação de casos-base, a combinação de múltiplas alternativas para diferentes parâmetros de projeto abre um leque de possibilidades arquitetônicas distintas, das quais pode-se tirar um conjunto delas com desempenho similar e potencialmente apropriado para uma mesma

situação. Um exemplo de aplicação dessa abordagem analítica é o que foi feito no processo de projeto da sede da instituição francesa de ensino e pesquisa *Toulouse School of Economics - TSE*, na cidade de Toulouse, que teve estudos paramétricos de cenários combinatórios de soluções de fachada na etapa de concepção arquitetônica, incluindo a verificação do impacto dos parâmetros de área envidraçada e elementos de sombreamento (BODE, 2015).

Tendo em vista as características do clima subtropical temperado e úmido da cidade de Toulouse, o projeto do edifício da TSE foi direcionado para soluções contra os impactos da radiação solar nos períodos quentes do ano, sem prejudicar a iluminação natural. Estudos analíticos de verificação da carga térmica de climatização e do aproveitamento da iluminação natural examinaram o efeito de alternativas para o projeto das fachadas compostas por três variações de área de vidro *Window-to-Wall Ratio - WWR*: 30%, 50%, 70%, e duas tipologias de proteção solar: uma com aletas verticais perpendiculares e outra com as mesmas aletas verticais inclinadas a 45° (aumentando a eficiência do sombreamento sem acrescer o dispositivo vertical), somadas a opção de ausência de sombreamento, totalizando nove cenários de avaliação (Figura 8).



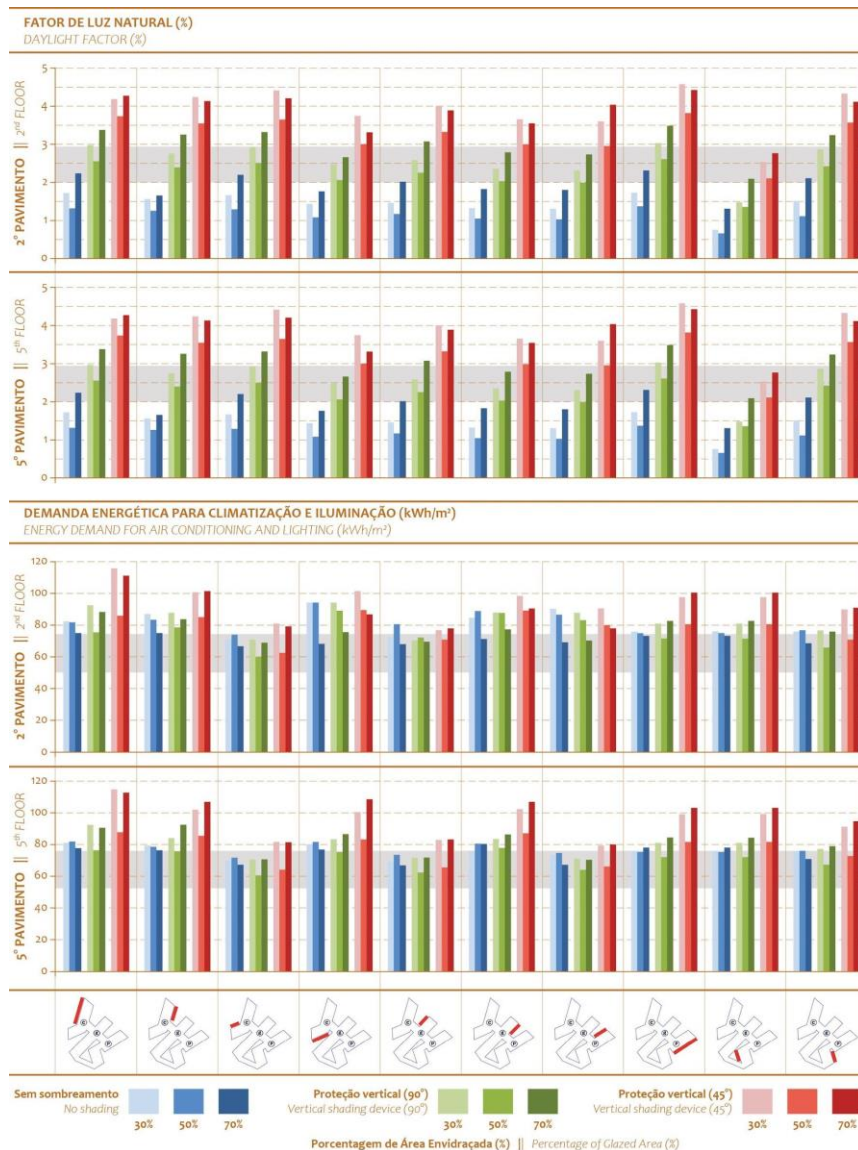
**Figura 8 -** (A) Combinações de tamanho de janela (WWR de 30%, 50% e 70%) e tipos de sombreamento, para o projeto do edifício da TSE. (B) Modelo digital do projeto do edifício. Fonte: Imagens cedidas pelo escritório inglês de engenharia de sistemas e consultoria ambiental BDS Partnership. Edição dos autores.

O tipo vertical da proteção solar externa aplicado a todas as orientações foi previamente definido pelas intenções arquitetônicas e as ideias para a expressão formal geral do partido de projeto. Metodologicamente, as alternativas de teste para a configuração das fachadas foram compostas por análises combinatórias das opções

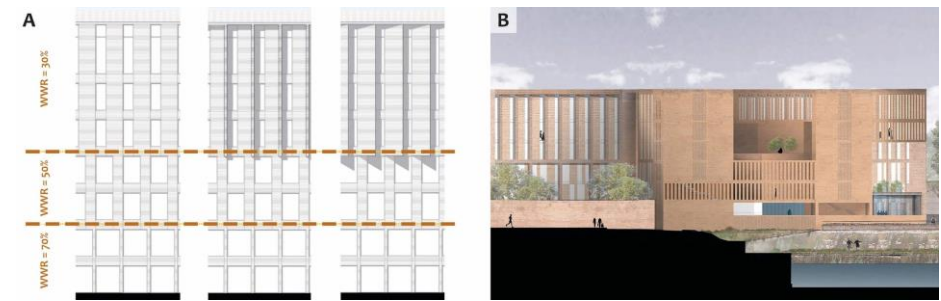
pré-estabelecidas de área envidraçada e tipo de sombreamento, a fim de resolver um problema de desempenho multicriterial, com uma análise comparativa dos resultados. Os nove cenários foram então testados nos sete andares das dez fachadas do projeto de três blocos retangulares multifacetados, incluindo fachadas voltadas para o exterior e pátios internos. As alternativas de melhor desempenho para cada pavimento em cada fachada variaram em decorrência da exposição à radiação solar global resultante da orientação e do grau de obstrução externa associada ao entorno, bem como da própria forma arquitetônica.

A título de ilustração, os resultados de simulações de FLN e da carga térmica de climatização artificial para o 2º e 5º pavimento, nas dez fachadas do projeto, são apresentados a seguir (Figura 9). As simulações mostram os benefícios da diminuição da área envidraçada e do aumento do sombreamento, com o aumento da exposição à radiação global. Vê-se também um impacto mais significativo da obstrução sobre os valores de FLN do que na demanda energética para a climatização. Com respeito ao aproveitamento da iluminação natural, os cenários com área envidraçada de 30% ficam aquém da meta de desempenho, mas próximos a ela quando sem o sombreamento. Os cenários com 50% de vidro, com e sem sombreamento, têm o melhor desempenho, em geral. Por outro lado, as fachadas com 70% de área envidraçada ultrapassam a meta na grande maioria dos casos, mesmo com o sombreamento externo. A diferença de desempenho entre cenários é menor nos estudos de carga térmica.

Em síntese, as soluções mais adequadas para cada pavimento e orientação foram selecionadas de acordo com a menor demanda energética de climatização e iluminação para o melhor aproveitamento da iluminação natural. Paralelamente, a fim de compatibilizar as recomendações de fundo quantitativo para o desempenho térmico e luminoso do edifício com as intenções arquitetônicas de unidade formal de fachada, as recomendações foram agrupadas em pavimentos e orientações (Figura 10).



**Figura 9** - Resultados de FLN (Fator de Luz Natural) e de demanda energética anual de climatização artificial (aquecimento e resfriamento) e iluminação artificial (kWh/m<sup>2</sup> ano) para os 9 cenários de fachada no 2º e o 5º pavimento, nas dez fachadas do edifício. As metas de desempenho estão destacadas pela faixa cinza. Fonte: Imagens cedidas pelo escritório inglês de engenharia de sistemas e consultoria ambiental BDSP Partnership. Edição dos autores.



**Figura 10** - (A) Diagrama de generalização das estratégias de fachada para os 7 andares do edifício. (B) Imagem do modelo digital do edifício. Fonte: Imagens cedidas pelo escritório inglês de engenharia de sistemas e consultoria ambiental BDSP Partnership. Edição dos autores.

Como resultado final de projeto, as diretrizes empregadas foram: para os dois primeiros pavimentos - área de vidro da fachada (WWR) equivalente a 70%, sem proteção solar externa ao redor de todas as orientações; para o terceiro e quarto - área envidraçada menor, de 50%, também sem proteção externa, para todas as orientações; para os três últimos pavimentos - área envidraçada de 30%, podendo a fachada estar sem proteção externa, com proteção vertical perpendicular a fachada ou inclinada, de acordo com o grau de exposição à radiação global. Tem-se aqui um exemplo de resposta arquitetônica final que traz uma variação de tratamento das fachadas, adequando-as às condições mais favoráveis de desempenho ambiental, ao invés da adoção de uma solução ótima para cada caso de orientação e altura.

### Considerações finais

Os procedimentos analíticos desenvolvidos por meio de simulações computacionais facilitam a verificação e o aperfeiçoamento de soluções arquitetônicas, possibilitando não apenas a indicação de soluções “ótimas” do ponto de vista ambiental e energético, mas também abrindo um leque de soluções adequadas.

Seguindo essa abordagem, a proposta metodológica de aplicação de procedimentos paramétricos no processo de concepção arquitetônica, aqui apresentada, parte de um conjunto de objetivos da adequação ambiental, relacionados com o clima local, aos quais são associadas estratégias passivas de desempenho térmico e luminoso. Nesse contexto, uma série de estudos analíticos, incluindo a verificação de



parâmetros de projeto e estratégias arquitetônicas, são propostos para a investigação do impacto de parâmetros básicos do projeto arquitetônico, com vistas ao desempenho térmico e luminoso de um ambiente interno. Essas análises facilitam a compreensão do papel de cada parâmetro de projeto no desempenho inicial do caso-base de concepção arquitetônica e de suas variações. Passando para as análises dos cenários de soluções acumulativas, obtém-se a otimização dos modelos paramétricos. Alternativamente, o estudo dos cenários de soluções combinatórias oferece um conjunto de opções adequadas para o desempenho de projeto. Ao final, o conjunto de resultados das múltiplas fases de procedimentos analíticos reúne diretrizes de projeto para a adequação ambiental da arquitetura.

No âmbito da concepção arquitetônica, a simplicidade do caso-base é um fator chave para que os resultados numéricos obtidos nas simulações computacionais sejam facilmente relacionados com os parâmetros arquitetônicos do modelo, contribuindo para a indicação de diretrizes projetuais específicas, como visto nos trabalhos apresentados por Bhatla e Gonçalves (2012) e Bode (2015). O intuito, com isso, é aprofundar o entendimento do impacto dos parâmetros de projeto na adequação ambiental da arquitetura, indo além da generalidade do diagnóstico climático e, conseqüentemente, dando mais especificidade às estratégias de projeto já na etapa de concepção. Dessa forma, ao invés de um papel corretivo de soluções pré-definidas, os resultados de procedimentos analíticos alimentam a etapa criativa do projeto de arquitetura com informações sobre o potencial de um conjunto de estratégias passivas elencadas para o desempenho térmico e luminoso (da luz natural) do projeto.

Tem-se, com essas análises, uma quantificação inicial dos efeitos de conceitos e ideias fundamentais definidoras do projeto, para informar a geração da forma e o detalhamento dos demais parâmetros projetuais. Em suma, propõem-se uma contribuição metodológica para uma mudança de cultura no processo de concepção arquitetônica, calcada num entendimento aprofundado das condições climáticas em que o edifício é inserido e do potencial das estratégias passivas para a adequação ambiental da arquitetura.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pelos recursos financeiros aplicados aos projetos de pesquisa, incluindo o processo 307842/2015-0, o programa PNPd-CAPES - FAUUSP 2015 e o auxílio para tese de doutorado - FAUUSP 2011.

## Referências

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING. **ASHRAE Greenguide: Design, Construction, and Operation of Sustainable Buildings. 5th Edition.** ASHRAE, Atlanta, GA, 2018.

BANHAM, R. **The Architecture of the Well Tempered Environment.** Chicago: University of Chicago Press, 1984.

BHATLA S.; GONÇALVES, J. C. S. The Environmental Performance of the TTDI Towers, Kuala Lumpur. **CTBUH Journal, International Journal on Tall Buildings and Urban Habitat. Tall Buildings' Design, Construction and Operation.** Chicago, CTBUH, p.24 - 28, 2012.

BODE, K. Capítulo 13: Projeto Integrado e o Papel da Simulação Computacional de Desempenho Ambiental, Exemplos de Projeto. In: GONÇALVES, Joana; BODE, Klaus (Organizadores). **Edifício Ambiental.** São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

CIBSE - CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS. Applications Manual AM10. **Natural ventilation in non-domestic buildings.** CIBSE, London: 2005.

CRAWLEY, D. B. Estimating the impacts of climate change and urbanization on building performance. **Journal of Building Performance Simulation**, v 1:2, p. 91-115, 2008.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico (7ª edição).** São Paulo: Editora Nobel, 2005.

GIVONI, B. Man, **Climate and Architecture.** Elsevier Publishing Co. Ltd., New York, 1969.

\_\_\_\_\_. **Passive and Low Energy Design of Buildings.** New York: John Wiley & Son INC., 1994.

GONÇALVES, J. C. S. Introdução. In: GONÇALVES, Joana Carla Soares; BODE, Klaus (Organizadores). **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

GONÇALVES, J. C. S. **Adequação Ambiental de Edifícios: Proposta Metodológica Para a Pesquisa Pró-Projeto Arquitetônico**. Tese de Livre-Docência (FAUUSP - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo). FAUUSP, 2014.

GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. The Environmental Value of Buildings: a proposal for performance assessment with reference to the case of the tall office building. **Innovation: The European Journal of Social Science Research**. V.24, p.31 - 55, 2011.

GONÇALVES, J. C. S.; DUARTE, D. H. S. Arquitetura sustentável: uma integração entre ambiente, projeto e tecnologia em experiências de pesquisa, prática e ensino. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 6, n. 4, p. 51-81 out./dez., 2006.

GONÇALVES, J. C. S.; UMAKOSHI-KUNIOCHI, E. M. **The Environmental Performance of Tall Buildings**. Londres: James & James, Earthscan, 2010.

GONÇALVES, J. C. S.; UMAKOSHI-KUNIOCHI, E. M.; MOURA, N. C. S. Capítulo 11: Avaliação de Desempenho, Simulação Computacional e o Projeto Arquitetônico. In: GONÇALVES, Joana Carla Soares; BODE, Klaus (Organizadores). **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

HAWKES, D. **The Environmental Tradition. Studies in the Architecture of Environment**. London: Spon, 1996.

HAWKES, D. **The Environmental Imagination. Techniques and Poetics of the Architecture Environment**. London and New York: Routledge, 2008.

IES - ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY. ANSI/IES RP-16-17, **Nomenclature and Definitions for Illuminating Engineering. Daylight Factor**. 2018. Disponível em: <https://www.ies.org/standards/definitions/>

INCROPERA, F.; DE WITT, D. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Editora Guanabara Koogan, 3a Edição, 1992.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **The IPCC and the Sixth Assessment cycle**. Geneva: IPCC, 2017. Disponível em:

[https://www.ipcc.ch/pdf/ar6\\_material/AC6\\_brochure\\_en.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/ar6_material/AC6_brochure_en.pdf) Last access: April 11th 2018.

KOLAVERIC, B.; MALKAWI, A. M. **Performative Architecture**. Nova York: Spon Press, 2005.

KOWALTOSKI, D. et al. Reflexão sobre metodologias de projeto arquitetônico. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 6, n. 2, p. 07-19, abr./jun. 2006.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (LABEEE). **Relatório 200504: processamento de arquivos climáticos para simulação do desempenho energético de edificações**. LABEE, 28 de fevereiro de 2005. Disponível em: [http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/arquivos\\_climaticos/RT200504.pdf](http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/arquivos_climaticos/RT200504.pdf).

MALKAWI, A. L.; AUGENBROE, G. (Orgs). **Advanced Building Simulation**. Oxon: Spon Press, 2004.

MOON, P.; SPENCER, D. E. Illumination from a non-uniform sky. **The Illuminating Engineer**, v.37, p.707-726, 1942.

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. **Lighting Research and Technology**. No. 37, pp. 41-59. Sage Publishing, 2005.

OLGYAY, V. **Design with Climate, Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism**. New Jersey: Princeton University Press, 1963.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification. **Hydrol. Earth Syst. Sci.** 11: 1633–1644, 2007.

PISELLO, A.; M. GORETTI; F. COTANA; A. Method for assessing buildings' energy efficiency by dynamic simulation and experimental activity. **Applied Energy**. 2012. 97: p. 419-429.

REINHART, C.; HERKEL, S. The Simulation of annual daylight illuminance distributions: A state-of-the-art comparison of six RADIANCE-based methods. **Energy and Buildings**. No. 32, pp. 167-187. Elsevier, 2000.

REINHART, C. F.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. **Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design**. Leukos, v. 3, n. 1, 2006.

ROMERO, M. A. B. Estratégias Bioclimáticas de Reabilitação Ambiental adaptadas ao projeto. In: Marta Adriana Bustos Romero; Julia Teixeira Fernandes. (Org.). **Reabilitação Ambiental Sustentável Arquitetônica e Urbanística**. 2ed. Brasília: FAU UNB, 2015, p. 377-430.

STEEMERS, K.; STEANE, M. A. **Environmental Diversity in Architecture**. Oxon: Spon Press, 2004.

UMAKOSHI, E. M. **O Edifício Alto Comercial de Melhor Qualidade Ambiental e Eficiência. Energetica: Proposta de Avaliação Qualitativa e Quantitativa**. Tese (FAUUSP - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo). FAUUSP, 2010.

YANNAS, S. Adaptive Strategies for an Ecological Architecture. **AD - Architectural Design**, June 2011, pp 62-69. John Wiley & Sons Ltd, 2011.

SZOKOLAY, Steven V. **Introduction of Architectural Science. The basis of sustainable design**. Architectural Press, Elsevier Science. Oxford, 2004.