

ARQUITETURA DE PERFORMANCE PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UMA EDIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DE ESCRITÓRIOS

Bruno de Paiva y Raviolo (1); José Aderson Araújo Passos Filho (2); Karoline Cordeiro de Andrade (3); Natasha Catunda (4); Nayana Helena Barbosa de Castro (5); Daniel Ribeiro Cardoso (6)

(1) Graduando em Arquitetura e Urbanismo, bruno.raviolo@gmail.com

(2) Arquiteto e urbanista, aderson.passos@gmail.com

(3) Arquiteta e urbanista, karolinecordeiro.arquiteta@gmail.com

(4) Arquiteta e urbanista, mestranda em Integrated Building Systems, cnatasha@student.ethz.ch,

(5) Arquiteta e urbanista, mestranda do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, nayanahelena@gmail.com

(6) Doutor, professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, danielcardoso@ufc.br
Universidade Federal do Ceará, Av. da Universidade, 2890 - Fortaleza - CE, sala 11 , +41 78 690 10 27

RESUMO

O artigo apresenta um estudo de caso do projeto de uma edificação de escritórios voltada para a obtenção de uma alta performance energética dentro do contexto tecnológico e climático do estado do Ceará. A principal premissa é ganhar eficiência ao reduzir o uso de sistemas ativos através do auxílio de simulações computacionais integradas ao processo de projeto. Para tanto, empregou-se simulações computacionais de dinâmica dos fluidos e processos evolutivos de otimização por algoritmos genéticos para aproveitamento da luz natural. O artigo traz os resultados preliminares obtidos até o momento, bem como os próximos passos da pesquisa. É relatado ainda o processo projetual adotado, o qual constitui-se como método que poderá ser aplicado na elaboração de projetos arquitetônicos para outras edificações de mesma tipologia e de contexto climático similar.

Palavras-chave: conforto ambiental, eficiência energética, simulação computacional, processo de projeto, edifícios de escritórios.

ABSTRACT

This paper presents the case of an office building design oriented towards high energy performance in the technological and climatic context of the state of Ceará. The main guideline is to gain efficiency through the reduction of active systems' usage demand by employing computational simulations embedded within design process. To accomplish this computational fluid dynamics and evolutionary processes through genetic algorithms to maximize natural lighting were used. This paper shows partial results of such simulations as well highlights the next steps to be taken in this research. Design process is also reported, to be used as a reference for future projects of the same typology and technological and climatic context.

Keywords: environmental comfort, energy efficiency, computational simulation, design process, office buildings.

1. INTRODUÇÃO

Segundo o Balanço Energético Nacional, 50,8% da energia elétrica do Brasil é consumida pelo setor de edificações (BRASIL, 2016), ocorrendo principalmente durante a vida útil do edifício, para sua operação e atividades cotidianas dos usuários (UNEP, 2009), sendo a maior parte consumida por sistemas artificiais para iluminação, condicionamento de ar e aquecimento de água. Em climas quentes e úmidos, a demanda energética de sistemas ativos, como climatização e iluminação artificial chega a ser 47% e 22%, respectivamente, da demanda energética de edifícios de escritórios (ELETROBRÁS, 2007). Uma vez que as pessoas passam a maior parte do seu tempo dentro de espaços edificados para desempenhar suas atividades diárias, as características de conforto ambiental dos edifícios acabam por ser determinantes no perfil de consumo energético desse setor (MONTEIRO, 2015, p. 27). Esses gastos são estimulados particularmente pela cultura do ambiente climatizado no espaço de escritório, aumentando o consumo de energia elétrica das edificações, especialmente das que apresentam uma arquitetura majoritariamente dependente de sistemas ativos para climatização (JOHNSON, 2014; HENSEL, 2013). Uma alternativa para a redução significativa da demanda energética desse setor é adaptar melhor os edifícios às características climáticas do local onde ele será construído, fazendo uso de sistemas passivos, como o aproveitamento de iluminação e ventilação naturais: a chamada arquitetura bioclimática.

Tal conceito tem origem no emprego de estratégias de conforto ambiental em edificações que remetem à era pré-industrial, mas que, devido principalmente aos avanços tecnológicos e à adoção da climatização artificial, vieram a ser consideradas defasadas e retrógradas diante de exigências normativas cada vez mais rígidas (JOHNSON, 2014; HENSEL, 2013). Esta relação entre sistemas ativos e arquitetura se tornou um vínculo de dependência através da evolução tipológica dos edifícios de escritório durante o período denominado Modernismo, especialmente pela linha do *International Style*, que passou a replicar indiscriminadamente edifícios com grandes fachadas envidraçadas sem considerar as variáveis climáticas do seu entorno, aumentando a necessidade de utilização de sistemas ativos para garantir conforto ambiental aos usuários e conseqüentemente, elevando os gastos energéticos (MALLGRAVE, 2011). A elevação desses gastos em um contexto de crises energéticas e ambientais fomentaram a discussão acerca da importância da eficiência energética, que no início dos anos 90 se aproximou da crescente discussão social pautada pela sustentabilidade, o que acabou por impulsionar a produção de uma arquitetura mais sustentável e energeticamente eficiente, desta vez munida de ferramentas tecnológicas derivadas da Revolução Informacional proporcionada pelos meios digitais (MALLGRAVE, 2011; DENARI, 2012). Atualmente a otimização dos sistemas passivos durante o processo de projeto pode ser facilitada pelo uso de simulações computacionais. Segundo Gonçalves, Moura e Kuniochi (2015), a adoção dessas simulações como ferramenta de teste para avaliar a performance da edificação é muito importante para a redução da demanda energética se realizada nas etapas iniciais de concepção arquitetônica. Tais ferramentas vêm encontrando cada vez mais espaço dentro da prática de projeto ao redor do mundo, cuja adoção foi impulsionada principalmente pela preocupação com projetos mais eficientes energeticamente em escritórios de Arquitetura de grande porte (ANDERSON, 2014).

Diante deste contexto, está sendo desenvolvido um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D), intitulado Arquitetura de Performance para Eficiência Energética em Edificações. O intuito dessa pesquisa é a elaboração de um projeto arquitetônico para tipologia de escritórios, voltado à eficiência energética, utilizando ferramentas que auxiliem as tomadas de decisão de projeto e otimizem a performance do edifício dentro do contexto de clima quente e úmido. Assim, foi trabalhada uma edificação experimental situada dentro do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), no litoral do estado do Ceará.

2. OBJETIVO

Este artigo tem por objetivo explicar as etapas do processo de projeto utilizando a concepção do Edifício Experimental dentro do contexto mencionado, bem como apresentar os resultados preliminares de otimizações arquitetônicas realizadas por meio de simulações digitais integradas ao processo de projeto.

3. MÉTODO

O método de trabalho foi estruturado de acordo com as seguintes etapas: levantamento do estado da arte sobre arquitetura de performance para eficiência ; leitura dos dados climáticos e definição de estratégias bioclimáticas para conforto ambiental no local de projeto; concepção do partido arquitetônico; desenvolvimento do projeto com simulações computacionais integradas.

3.1. Estado da Arte

O emprego das simulações computacionais na arquitetura desemboca no projeto baseado em performance, na qual o desempenho da edificação se torna um norteador do processo de projeto, a par ou até mesmo superando o aspecto formal (KOLAREVIC, 2014). As simulações adicionam mais camadas de informação ao processo de projeto, podendo ser empregadas em diferentes etapas deste. Os seus resultados permitem o refinamento do projeto, guiando o seu desenvolvimento em direção à uma maior eficiência (GONÇALVES; BRUNELLI; BODE, 2015). Assim, o emprego dessas simulações é crucial, especialmente durante o princípio do projeto, quando os potenciais ganhos de eficiência são maiores e as decisões arquitetônicas têm maior impacto na performance da edificação. Contudo, a complexidade resultante desta crescente quantidade de informação dificulta seu progresso, fazendo com que as decisões tomadas atinjam múltiplos aspectos do projeto simultaneamente, provocando interações que alteram o projeto de uma forma difícil de prever, o que torna o processo decisório custoso e complicado (HENSEL, 2013). Uma alternativa é realizar paralelamente não só as simulações durante as primeiras etapas de projeto, como também buscar realizá-las dentro de um mesmo ambiente, onde a informação resultante retroalimenta o modelo, configurando uma arquitetura generativa, onde a forma é uma resposta a um problema formulado previamente.

No cenário internacional a produção das primeiras experiências nesta área foram materializadas através de técnicas sofisticadas tirando partido principalmente da personalização em massa e robotização da produção, que são dependentes de um contexto tecnológico e socioeconômico muito diferentes do brasileiro. Portanto, um diferencial desta pesquisa é a viabilização da execução de uma arquitetura voltada para a performance utilizando a tecnologia construtiva tradicional, dominada localmente, em uma tentativa ainda mais ortodoxa que a linha *High-Low* apresentada por Beaucueuil (2015), onde a simulação e produção de peças personalizadas para execução em canteiro de obras se depara com a mão-de-obra tradicional.

3.2. Leitura Bioclimática

O local de implantação do edifício é um terreno de uma empresa geradora de energia instalada dentro do CIPP, possuindo um entorno com edificações de pequeno porte, além de torres de resfriamento da termoeletrica a sotavento. O entorno é caracterizado pela presença de cobertura vegetal nativa, de porte mediano. O terreno está em um platô, com topografia praticamente plana (Figuras 1 e 2).



Figura 1 (à esquerda): Vista a partir do terreno das torres de resfriamento a sotavento. Fonte: Autores

Figura 2 (à direita): Vista a partir do terreno das edificações do entorno. Fonte: Autores

A etapa de levantamento de dados climáticos partiu da leitura de arquivos com formatação Typical Meteorological Year (TMY), que é um ano fictício construído a partir de meses escolhidos com base em uma seqüência de anos registrados. Em virtude da falta de arquivos climáticos adequados sobre o clima do CIPP e dada a sua proximidade com a cidade de Fortaleza, é possível utilizar o arquivo climático desta cidade sem maiores prejuízos (BARNABY, 2011). Os estudos caracterizam o clima do sítio como possuindo uma alta incidência de radiação solar direta; elevadas temperatura média e umidade relativa, ambas com constância ao longo do ano; com a direção predominante dos ventos compreendida entre sul e leste.

O emprego do diagrama bioclimático apresentado por Givoni (1994) revela a ventilação natural como principal estratégia passiva para alcançar o conforto ambiental durante a maior parte do ano (Figura 2 e 3). O sombreamento de paredes e aberturas nas fachadas, protegendo contra a insolação excessiva, também foi considerada uma prioridade, evitando o superaquecimento dos ambientes. Tais diretrizes também estão previstas na NBR 15.220 (ABNT, 2005), para a Zona Bioclimática 8, com aberturas grandes e sombreadas.

Com base nestas diretrizes foram definidas estratégias para conforto ambiental adequadas ao contexto climático do local, como: a ventilação cruzada, por sua eficácia e constância ao longo do ano típico; uso de elementos vazados nas fachadas, como *brises-soleil* e cobogós, barrando a insolação direta, mas permitindo a passagem dos ventos; a inércia térmica, amortecendo e atrasando o fluxo de calor irradiado pela cobertura; iluminação natural indireta, através de aberturas zenitais com um sistema de anteparos reflexivos e aberturas laterais.

3.3. Concepção

A principal premissa para mitigação do consumo de energia elétrica do edifício foi reduzir a demanda por ar-condicionado e iluminação artificial, por meio de estratégias passivas de projeto para obtenção de conforto térmico e lumínico. O partido arquitetônico compreendeu, então, a elaboração de um projeto onde coexistissem pelo menos dois tipos de ambientes - os climatizados e os não-climatizados. Neste segundo tipo de ambiente foram localizadas as áreas de descompressão, previstas no programa de necessidades como espaços de trabalho, mas também de descanso. Com isso esses ambientes foram associados ao conceito de *free-running buildings*, no qual edificações operam sem qualquer tipo de condicionamento artificial (HENSEL 2013; ETHERIDGE, 2012). Adicionalmente, foi adotado o conceito organizacional *clean desk*, o qual permite que os usuários possam migrar livremente pelos espaços ofertados pela edificação, explorando a heterogeneidade das qualidades ambientais do edifício, como diferentes níveis de iluminação, de privacidade e de velocidade dos ventos.

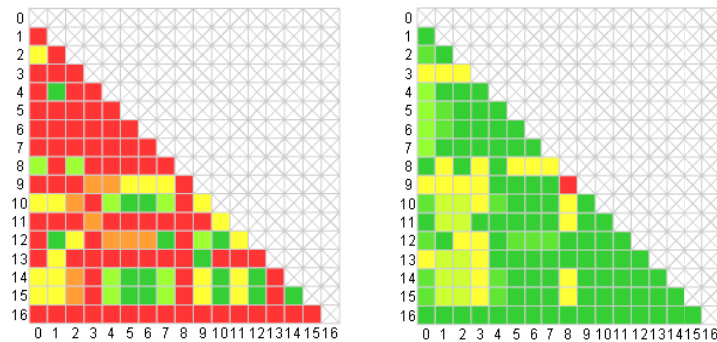
O partido de Arquitetura fundiu esses valores e concebeu a área de descompressão como uma rede de espaços de caráter híbrido ao funcionar como circulação, descanso e espaço de trabalho ao mesmo tempo, operando com ventilação natural e iluminada primariamente por um sistema de iluminação natural. Ela é um espaço de trabalho alternativo, projetada com base nos requerimentos do modelo de conforto adaptativo (NICOL, 2004), respeitando as preferências da cultura corporativa por áreas climatizadas artificialmente, ao mesmo tempo em que oferece espaços de trabalho auxiliares. Os ambientes tradicionais de trabalho, por sua vez, foram subdivididos em zonas independentes, cujo dimensionamento foi racionalizado durante o processo de projeto de modo a reduzir a carga térmica necessária para refrigeração, minimizando conflitos típicos de escritórios provocados pela disputa dos *set-points* ar-condicionado, ao mesmo tempo em que preservou a funcionalidade e a quantidade necessária dos postos de trabalho.

3.4 Método de Projeto

Para explorar o conceito de arquitetura generativa durante o processo de projeto como forma de obter melhor performance da edificação, foram empregados softwares que contribuíram nas tomadas de decisões, gerando formas iniciais com base em simulações e permitindo a realização de ajustes geométricos para maximizar a eficiência das estratégias escolhidas. O fluxo de trabalho envolveu inicialmente o modelador *Rhinoceros 3D*, do tipo *Computer Aided Design* (CAD) associado ao *plugin Grasshopper* para gerar ambiente de programação algorítmica de sintaxe visual. O processo de projeto foi fundamentado no desenvolvimento e emprego de um conjunto de algoritmos para cada tipo de simulação prevista, respondendo diretamente no ambiente CAD. Posteriormente, a informação destes modelos paramétricos simplificados foi transportada para o *ArchiCAD 19*, software do tipo *Building Information Modeling* (BIM), para representar a arquitetura adequadamente.

3.4.1 Organização Espacial

Foi realizado um estudo sobre as relações de atração e repulsão entre os ambientes previstos no programa de necessidades, pelo qual, mediante processos participativos e análise de edifícios dentro da mesma tipologia, foram desenvolvidos valores numéricos que foram tabulados em uma matriz triangular (Figura 3). Os dados passaram então a informar um algoritmo de *form-finding*, processo através do qual se encontra uma forma que seja resultante do equilíbrio de forças dentro de um dado limite, ou domínio, de acordo com um certo estado de tensões (VEENEEDAAAL, 2012). Através de um motor digital de simulação de forças físicas, *Kangaroo*, o algoritmo forma um sistema que encontra formas equilibradas de organização dos ambientes que satisfaziam as condições tabulares originais, mas ainda permitindo a intervenção humana ao longo das simulações.



Figuras 3: Matrizes contendo os dados tabulares que descrevem as relações entre os diferentes ambientes. À esquerda, relações de atração e, à direita, relações de afastamento. As cores indicam a intensidade de atração entre os ambientes, sendo o verde uma atração de maior intensidade, o amarelo uma atração intermediária e o vermelho uma atração de menor intensidade. Os números informam os ambientes: 0) Recepção/Espera; 1) Diretoria/Secretaria; 2) Auditório; 3) Máquinas; 4), 5), 6) e 7) Salas de reunião; 8) e 9) Banheiros; 10) Área de Trabalho; 11) Arquivo; 12) Suporte/Contratos; 13) Copa; 14) e 15) Áreas de Trabalho; 16) Circulação Vertical. Fonte: Autores. Fonte: Autores.

Somado a este processo, uma diretriz advinda da análise climática ressaltou a importância de orientar a edificação perpendicularmente à incidência dos ventos predominantes, vindos do sudeste, para maximizar sua captação. Essa orientação permitiu, paralelamente aos resultados do *form-finding*, a definição da forma e da volumetria da edificação, resultando em um formato elíptico, que apresenta uma alta relação entre área de superfície e volume (Figura 4). Esta sugestão de setorização foi então desenvolvida dentro de um processo tradicional, resultando na planta-baixa da edificação (Figura 5).

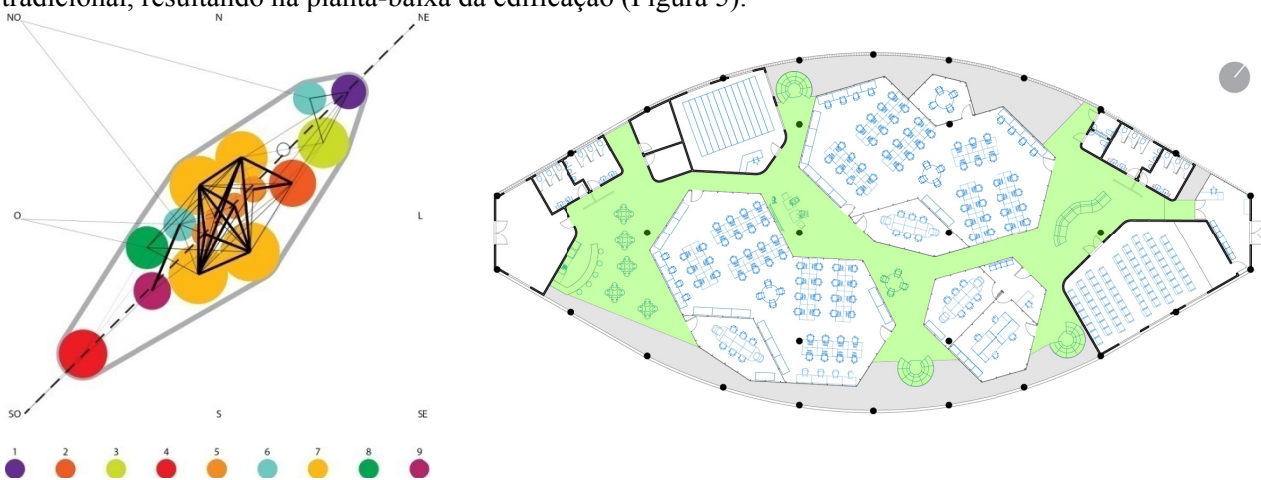


Figura 4 (à esquerda): Resultado da simulação física de atrações, afastamentos e colisões das bolhas correspondentes aos ambientes enumerados: 1) Recepção; 2) Diretoria; 3) Auditório; 4) Máquinas; 5) Reuniões; 6) Banheiros; 7) Áreas de Trabalho; 8) Arquivo; 9) Copa. Linha diagonal tracejada representando o eixo longitudinal do edifício; linhas entre ambientes e pontos cardiais e colaterais representam as atrações e suas intensidades; hull cinza contornando as bolhas definindo a envoltória “elíptica” do edifício.

Figura 5 (à direita): Planta-baixa da edificação baseada no resultado da simulação. Destacada de verde, a área de decompressão que funciona sem condicionamento artificial e incorpora áreas de lazer, descanso e trabalho. Fonte: Autores.

3.4.2 Ventilação Natural

A captação dos ventos predominantes durante o dia é o principal fator para garantia de conforto térmico nas áreas não condicionadas, e durante a noite é importante pelo efeito de resfriamento noturno, que diminui a carga térmica acumulada durante o dia na edificação (GIVONI, 1994). Tendo em vista as alterações de pressão e velocidade do ar decorrente da geometria facetada e fragmentada das áreas de trabalho, foi utilizado o software CFD ANSYS-CFX, para simulação de ventilação natural. Os estudos computacionais de dinâmica dos fluidos analisaram o comportamento do fluxo de ar por meio de indicadores como velocidade e direção, levando em conta os obstáculos do entorno, bem como o espaço da edificação.

Para a redução do número de cenários a ser simulado, optou-se pelos vento vindos do leste, após a constatação de sua predominância durante o período de funcionamento da edificação. O estudo de Leite (2015) sobre o clima de Fortaleza traz a velocidade dos ventos em 4,54m/s como dado de entrada da simulação. Foi construído um perfil de velocidade dos ventos locais a partir de uma fórmula exponencial pela *Building Research Establishment* (1978 apud LEITE, 2015), cuja análise do tipo de terreno do projeto relevou coeficientes de $k = 0,52$ e $a = 0,25$ e o parâmetro de altura calculado automaticamente pelo software.

Uma simulação do tipo *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS) foi realizada seguindo a metodologia apresentada em Leite (2015), utilizando o modelo de turbulência k-ε e esta definida em 5%. As simulações foram todas isotérmicas e usaram ar a 25°C, sem levar em consideração forças convectivas, com o critério de convergência definido em 10^{-4} e que pode ser considerado razoavelmente convergido. Uma malha desestruturada foi utilizada em conjunto com uma camada de células prismáticas no piso e nas faces das edificações dentro de um domínio cilíndrico, observando as devidas proporções mínimas para a redução do efeito de blocagem.

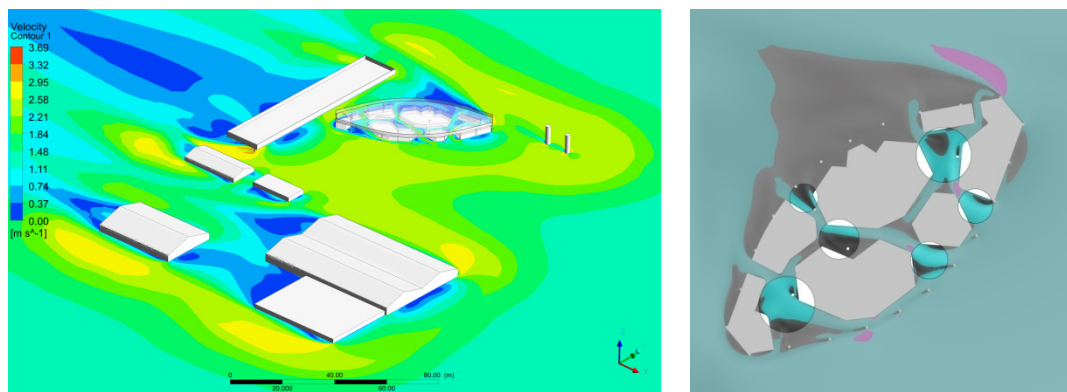


Figura 6 (à esquerda): Simulação do comportamento da ventilação proveniente da direção leste no terreno, incluindo obstáculos existentes no entorno, que conta com pequenas edificações de pequeno porte.

Figura 7 (à direita): Planta-baixa resultante da simulação do comportamento do fluxo de vento dentro da área de descompressão. Em cinza, velocidades abaixo do necessário para trazer conforto dentro de um momento crítico, em ciano, ventos com velocidade dentro da faixa de conforto; e em magenta, ventos velozes demais para um ambiente de trabalho. Fonte: Autores

A simulação CFD facilitou o ajuste do projeto através de refinamentos, melhorando o fluxo de ar nos pontos de interesse da área de descompressão que abrigam mobiliário para os usuários, permitindo avaliar o comportamento da ventilação em diferentes etapas de projeto, desde estudos no terreno para melhorar a incidência dos ventos durante a implantação (Figura 6); como no desenvolvimento da planta, sendo sobreposta uma região que demarca possíveis áreas de conforto térmico através do modelo de conforto adaptativo (Figura 7).

Para este modelo de conforto, a velocidade do ar é considerada um parâmetro essencial e precisa estar dentro de uma margem calculada para o ambiente ser, de fato, confortável termicamente (NICOL, 2004; MONTEIRO, BITTENCOURT, YANNAS, 2015). A análise do arquivo climático forneceu dados para a suposição de um cenário de pior caso de um dia típico de trabalho, assumindo uma temperatura operativa de 31°C e temperatura média do ambiente externo de 29°C. Para o cálculo preliminar desta faixa de conforto durante o processo de projeto, foi utilizada como ferramenta de apoio a calculadora CBE Thermal Comfort Tool (2017) com o modelo de conforto adaptativo previsto na ASHRAE-55 (2013). Para os limites de 90% de aceitabilidade, uma regressão manual realizada pelos autores encontrou uma velocidade mínima de 0,9m/s e a máxima em 2,5m/s, evitando problemas práticos em ambientes de trabalho (VECCHI, 2011). Para guiar o processo de projeto, esta faixa foi superposta nos resultados de modo a retornar visualmente as melhorias do projeto de Arquitetura.

3.4.3 Iluminação Natural

3.4.3.1 Cobogós e Brises

Para garantir uma maior eficiência lumínica, buscou-se realizar o máximo aproveitamento da iluminação solar indireta, com o intuito de evitar, além do ganho de carga térmica, gastos desnecessários com iluminação artificial. Para isso foram empregados brises e cobogós nas fachadas de maior comprimento, sudeste e noroeste, permitindo a entrada de luz pelas laterais do edifício. Esses elementos foram otimizados por meio de modelagem paramétrica no *Grasshopper* e simulação no *software Geco*, interface para a ferramenta de análise solar *Autodesk Ecotect Analysis*. Por meio dessas simulações foi possível definir o quão grande seriam as aberturas dos cobogós e o qual deveria ser o espaçamento entre os brises, como pode ser visto nas figuras 8 e 9.

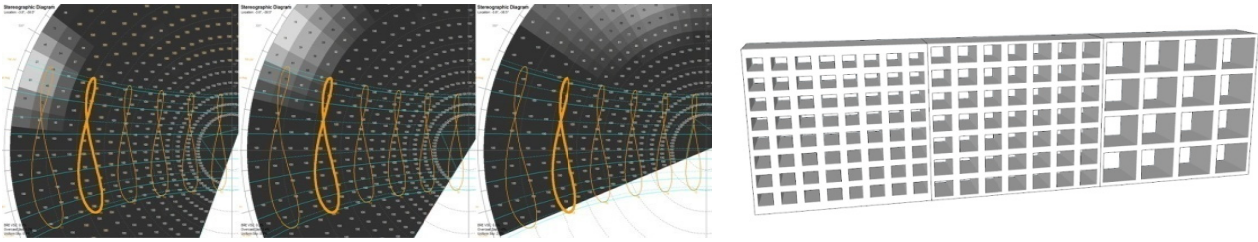


Figura 8 . Diagrama Estereográfico Solar das três orientações predominantes da fachada curva onde os cobogós foram utilizados. As linhas de cor ciano representam a projeção dos percursos diários do sol no céu, nascendo no leste e se pondo no oeste. As linhas de cor laranja (analemas) representam uma projeção do percurso solar no céu ao longo do ano quando observado em um mesmo horário. O analema em destaque é o de 16:00. Fonte: Autores, com base no *software Solar Tool*.

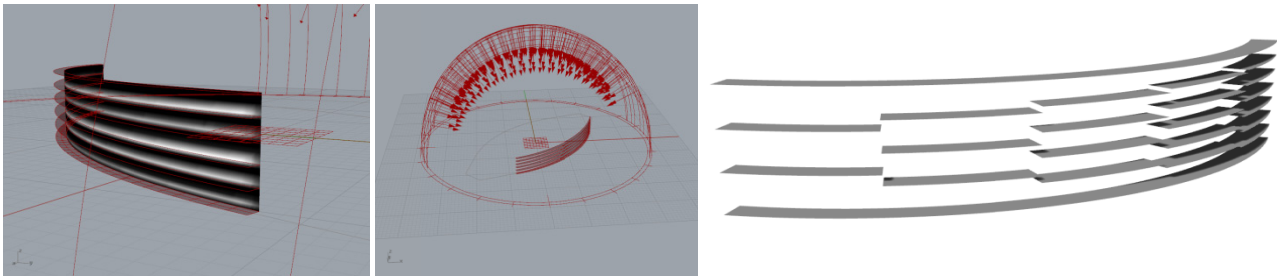


Figura 9: Análise solar dos brises em simulações de modelos parametrizados para a distribuição gradual das peças com afastamentos diferentes, mediante orientação de regiões específicas de uma segunda fachada curva, como à direita da imagem, em perspectiva esquemática do conceito. Fonte: Autores, com base nos softwares *Rhinoceros 3D* e *Grasshopper*.

A fachada curva onde os cobogós foram utilizados foi discretizada em três orientações predominantes, para a aplicação de três dimensões diferentes de aberturas, distribuídas de forma gradual ao longo do edifício. Nos cálculos da ferramenta *Solar Tool*, do *Ecotect*, mantendo-se como parâmetro de entrada a mesma profundidade de 20 cm para os cobogós, assim como a carta solar do local do edifício, chegou-se a dimensões de aberturas de, respectivamente, 6, 8 e 16 cm de lado, dos blocos mais voltados para o oeste para os mais voltados para o norte, de forma que toda a fachada ficasse sombreada até o horário de encerramento das atividades do edifício, às 16:00 (Figura 8). De maneira análoga, os brises foram calculados para um único valor de entrada referente à profundidade das peças, 40 cm, também usando a carta solar do local do edifício, lida através do *plugin Geco* dentro do modelador paramétrico *Grasshopper*, que, para cada um dos vãos entre pilares da fachada curva, calculou um diferente espaçamento entre os brises, de forma que a fachada ficasse totalmente sombreada a partir do horário de início das atividades do edifício, às 7:00 (Figura 9).

3.4.3.2 Coberta e Anteparos Reflexivos

Além de garantir a entrada de iluminação pelas fachadas, foram inseridas aberturas zenitais na cobertura (Figura 10), permitindo a entrada de luz na parte central da edificação. Entretanto, para evitar a incidência de luz direta, foram colocados anteparos reflexivos, abaixo dessas aberturas (Figura 11), capazes de refletir a luz para o forro da laje, trazendo luz difusa para o interior do edifício. O calor solar incide diretamente apenas nesses anteparos, executados com materiais isolantes térmicos de baixa emissividade nas superfícies inferiores e de alta reflexão nas superfícies superiores (ACM de cor metálica com acabamentos escovado e polido, respectivamente, com entre camada de espuma isolante). Localizados em níveis acima das salas, os anteparos garantem que as trocas convectivas mantenham o ar aquecido pelo sol sempre acima, longe dos usuários, onde a ventilação cruzada do edifício pode realizar o seu arrefecimento e exaustão. Esses anteparos e aberturas também foram otimizados através de modelagem paramétrica no *Grasshopper* e simulados no software de análise solar *Diva*.

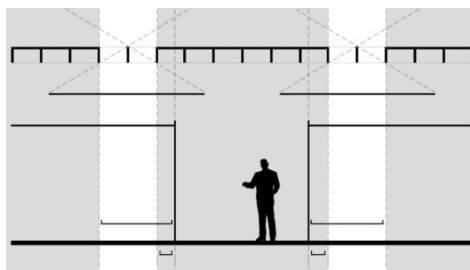


Figura 10: Corte esquemático mostrando a circulação e as salas, com o segundo nível de cobertura acima definido pela laje nervurada e

as aberturas zenitais, bem como os anteparos reflexivos posicionados logo abaixo. Fonte: Autores.

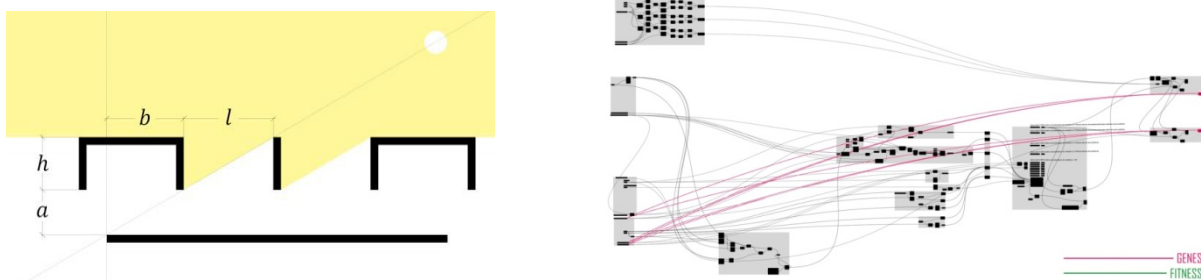


Figura 11 (à esquerda): Corte esquemático do anteparo posicionado abaixo da laje nervurada, com o bloqueio total da radiação direta, mediante relação entre as dimensões a , h , b e l . Fonte: Autores.

Figura 12 (à direita): Definição algorítmica no *Grasshopper*, fazendo uso do modelo da envoltória do edifício e a geração automatizada das geometrias otimizadas pelo algoritmo genético: aberturas zenitais e dimensões a , h , b e l dos anteparos. Fonte: Autores.

Para a otimização das distribuições de aberturas na laje nervurada e o dimensionamento e posicionamento dos anteparos reflexivos, técnicas computacionais de otimização evolutiva - algoritmos genéticos - simulam um processo análogo à seleção natural darwiniana para alterar atributos (genes) geométricos dos anteparos (tamanhos, formatos e afastamentos da laje, vide variáveis na Figura 11) para aperfeiçoá-los, a fim de maximizar a entrada de luz difusa na circulação e nas áreas de desconpressão). O algoritmo expresso na sintaxe visual do *Grasshopper* (Figura 12), com a geração das geometrias simuladas para os anteparos e a posição das aberturas feitas na laje nervurada, calcula, por meio do plugin de algoritmo genético Galapagos e com as variáveis fixas de entrada l e h , a dimensão b que bloqueia a luz solar direta e a combinação de dimensão a com seleção específica de aberturas zenitais que mais reflete luz para o interior do edifício.

Na Figura 13, o resultado final da otimização, mostrando as projeções das aberturas feitas na laje nervurada (quadrados) e dos anteparos (contornos fechados ao redor dos quadrados), bem como os níveis de fator de luz diurna no interior da edificação através da escala cromática. O fator de luz diurna é a razão entre a iluminância interna e iluminância externa de um edifício, de acordo com definições específicas da *CIE - Comissão Internationale de l'Eclairage* (TREGENZA, 1980), ou seja: o quão claro o espaço interno está em relação à iluminância externa, em porcentagem. Todas as simulações do processo de otimização evolutiva dos anteparos foram realizadas, para efeitos comparativos entre as suas possíveis geometrias, com configurações padrões do *Radiance* para cálculos com até 4 reflexões difusas (-ab 4), 1000 divisões de ambiente (-ad 1000), 20 super-amostras de ambiente (-as 20), 300 como densidade máxima de valores de ambiente para interpolação (-ar 300) e precisão de ambiente igual a 0.1 (-aa 0.1). A malha de análise para o plano simulado tem células com 1 m de lado. O material usado para todos os elementos geométricos da cena simulada foi configurado como do tipo *plastic*, opaco, com configurações mínimas de specularity e roughness (especularidade e rugosidade), simulando propriedades de pinturas genéricas com refletância de 70%. Na Figura 14, uma perspectiva interna simula o efeito da iluminação no forro da laje nervurada.

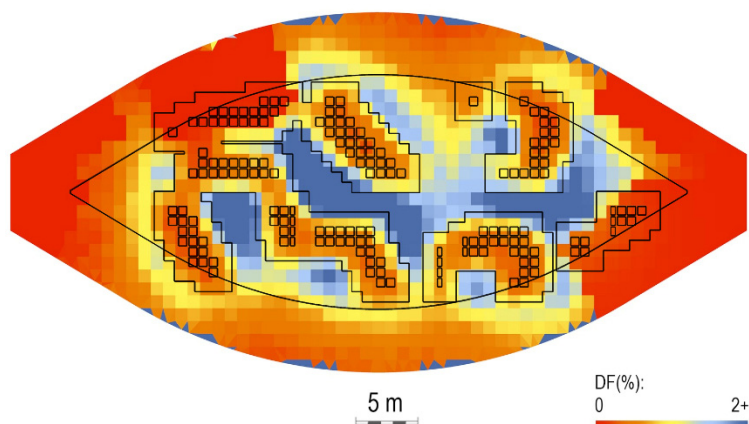


Figura 13: Simulação em ferramenta de análise lumínica dos anteparos reflexivos e das aberturas zenitais. Fonte: Autores, com base no software de análise solar *Diva*.



Figura 14: Perspectiva de um dos anteparos reflexivos.

4. RESULTADOS

Por meio da estratégia de redução das áreas condicionadas artificialmente e pelo complemento com áreas ventiladas naturalmente, foi possível reduzir 33,83% de área condicionada, em relação a outro projeto de escritórios, contendo os mesmos ambientes, desenvolvido anteriormente pela empresa.

Com as estratégias utilizadas para a captação da iluminação natural, foi possível suprir toda a quantidade de iluminância necessária para a circulação e para a área de descompressão nos horários de funcionamento da empresa, reduzindo em 32,5% do consumo energético com iluminação artificial.

5. CONCLUSÕES

A realização do projeto dentro de uma perspectiva de baixa tecnologia construtiva e alta tecnologia de projeto foi viabilizada na proposta apresentada. Para tanto, a arquitetura incorporou elementos como sistema estrutural em concreto armado; utilização de brise-soleil e cobogós; laje jardim com aberturas zenitais e os associou a diversos métodos para aumentar a eficácia das estratégias passivas para conforto ambiental sem recorrer a soluções importadas ou que não fossem dominadas pela mão-de-obra local.

Percebe-se o impacto que as simulações em etapas iniciais tem durante a concepção de um projeto, especialmente na validação de conceitos que apostam de forma mais arrojada na eficiência energética. Sem sua utilização, elementos de comportamento complexo, como as áreas de descompressão e anteparos reflexivos, seriam projetados de forma intuitiva, sem garantias de que alcançariam um nível de desempenho mínimo adequado às atividades previstas no espaço da edificação.

Embora a literatura enfatize a importância da integração entre projeto e simulações a fim de obter uma arquitetura voltada para a performance, percebe-se a importância da sistematização do grau de detalhamento dos diferentes modelos empregados para cada tipo de simulação, não só a nível geométrico como também informacional; bem como a abertura a determinados graus de incerteza em etapas iniciais, ganhando resolução nos resultados de forma gradual à medida em que o projeto vai sendo definido.

O vínculo informacional direto entre a plataforma de modelagem paramétrica Grasshopper e o ArchiCAD era, até o momento da elaboração do projeto, pouco fluida e forçou a segmentação do processo de projeto, perdendo a capacidade de adaptação e alteração após certa etapa no processo decisório. Isto acabou por estratificar as simulações em atividades paralelas, auxiliando indiretamente a representação arquitetônica, ao contrário de fornecer uma resposta direta. Contudo, recentes avanços através de plugins para vínculo direto permitem alcançar um patamar maior de integração, constituindo um importante ponto a ser explorado em futuras investigações.

Conclui-se que os métodos utilizados nas soluções arquitetônicas desenvolvidas nesta pesquisa podem ser aplicados, mesmo que de forma parcial, para a elaboração de projetos arquitetônicos que visem um maior desempenho energético de mesma tipologia, isto é, edifícios horizontais de escritórios em um clima quente e úmido próximo ao equador. Está prevista uma etapa de monitoramento da edificação, uma vez construída, que irá fornecer dados para mensurar a discrepância entre resultados simulados e medidos, de modo que os valores informados sejam utilizados na calibração dos modelos utilizados no método de projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220: **desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro, 2005
- ANDERSON, Kjell. **Design Energy Simulation for Architects: Guide to 3D Graphics**. 1.ed. New York: Routledge, 2014.
- ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Standard 55-**Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**, 2013 doi:ISSN 1041e2336.
- BARNABY, Charles S; CRAWLEY, Drury B. Weather data for building performance simulation. In: HENSEN, J; LAMBERTS, R. **Building Performance Simulation for Design and Operation**. London: Spon Press, 2011. p.37-55.
- BEAURECUEIL, Anne Save de, LEE, Franklin. **Arquitetura Generativa High Low: princípios e aplicações** In: GONÇALVES, J. C. S. BODE, K. (Org.). Edifício Ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. (cap. 12).
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2016: Ano Base 2015. Relatório Final. Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2016.

- CBE Thermal Tool Comfort. Disponível em <<http://comfort.cbe.berkeley.edu/>> Acesso em: 3 mai. 2017.
- DENARI, Neil. In: MARBLE, S. (Ed.). **Digital Workflows in Architecture: Design, Assembly, Industry**. Bâsel: Birkhäuser, 2012. p.28-43
- ELETRORBRÁS. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso, ano base 2005**: Relatório Brasil - Sumário Executivo. Rio de Janeiro: ELETRORBRÁS; PROCEL, 2007. (Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil). Disponível em: <<http://www.procel.gov.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7B99EBBA5C-2EA1-4AEC-8AF2-5A751586DAF9%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>>. Acesso em: 04 ago. 2016.
- ETHERIDGE, David. **Natural Ventilation of Buildings: Theory, Measurement, and Design**. West Sussex, John Wiley & Sons, 2012.
- GIVONI, B. **Passive and Low Energy Cooling of Buildings**. 1a. ed. New York: John Wiley & Sons, 1994.
- GONÇALVES, Joana Carla Soares, MARCONDES, Mônica Pereira. **Ventilação natural em edifícios de escritórios: mito ou realidade?** In: GONÇALVES, J. C. S. BODE, K. (Org.). **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. (cap. 2).
- GONÇALVES, Joana Carla Soares, BRUNELLI, Gustavo, BODE, Klaus. **Projeto integrado e o papel da simulação computacional de desempenho ambiental** (exemplos de projeto). In: GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. (Org.). **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. (cap. 9).
- HENSEL, Michael. **Performance-Oriented Architecture: Rethinking Architectural Design and the Built Environment**. West Sussex: Wiley, 2013.
- JOHNSON, Scott. **Performative Skyscrapers: Tall Building Design Now**. Glendale: Balcony Press, 2014.
- KOLAREVIC, Branko. In: OXMAN, Rivka; OXMAN, Robert. **Theories of the Digital in Architecture**. New York: Routledge, 2014. p.103-112
- LEITE, R. C. V. **Cidade, Vento, Energia: Limites de Aplicação da Ventilação Natural para o Conforto Térmico Face à Densificação Urbana em Clima Tropical Úmido**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- MALLGRAVE, F. Harry; GOODMAN, David. **Architectural Theory: 1968 To The Present**. West Sussex: Wiley-Blackwell, 2011. p.215-230.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Eficiência Energética**. Brasília, DF, 2011. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/plano-nacional-de-eficiencia-energetica>>. Acesso em 02 de ago. 2016.
- MONTEIRO, Leonardo Marques. **Conforto Ambiental e as Possibilidades do Modelo Adaptativo**. In: GONÇALVES, Joana Carla Soares; BODE, Klaus (Orgs). **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- NICOL, F. Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics. **Energy and Buildings**, Oxford, Volume 36, Edição 7, p. 628-637. Julho 2004.
- Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA). Fortaleza, Ceará, Brasil. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>>
- TREGENZA, P. **The Daylight Factors and Atual Illuminance Ratios**. Light, Res. Technol, 1980. p. 64-68
- VECCHI, Renata de. **Condições de Conforto Térmico e Aceitabilidade da Velocidade do Ar em Salas de Aula com Ventiladores de Teto para o Clima de Florianópolis/SC**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- VEENENDAAL, D.; BLOCK, P. **An overview and comparison of structural form finding methods for general networks**. Int J Solids Struct, 49 (2012), pp. 3741–3753
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Projeteec**. Disponível em <<http://projeteec.ufsc.br/>>. Acesso em 18 de agosto de 2016
- UNEP - UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME. **Buildings and Climate Change: Summary for Decision Makers**. Paris, 2009. Disponível em: <<http://www.unep.org/sbci/pdfs/SBCI-BCCSummary.pdf>. [21 May 2015]>. Acessado em: 5 de setembro de 2016.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a ANEEL/ASTEF/ENERGIA PECÉM (PRJ 0226) pelo suporte financeiro e encorajamento à pesquisa científica.