

Arquitetura e desempenho luminoso: CENPES II, o novo centro de pesquisas da Petrobras, no Rio de Janeiro, Brasil

*Architectural and daylighting performance: CENPES II,
The new research centre from Petrobras, in Rio de
Janeiro, Brazil*

Norberto Corrêa da Silva Moura
Anna Christina Miana
Joana Carla Soares Gonçalves
Denise Helena Silva Duarte

Resumo

Este artigo apresenta os resultados da avaliação de desempenho de iluminação natural do projeto do novo centro de pesquisas da Petrobras, CENPES II, no clima tropical do Rio de Janeiro, sob as condições de céu típico parcialmente nublado e com grande luminosidade. O projeto arquitetônico tinha mais de 100.000 m² de área construída, distribuída entre dez novos edifícios. De acordo com o programa de necessidades, o acesso da iluminação natural deveria ser maximizado em todos os espaços interiores, sempre que permitido pelas exigências da função, oferecendo conforto visual e eficiência energética. Nesse caso, os desafios do projeto no que tange ao desempenho ambiental estão relacionados à necessidade de proteção solar e à não-ocorrência de ofuscamento, devido às condições climáticas e ao céu com grande luminosidade. Este artigo está focado no desempenho dos dois edifícios principais do complexo. As avaliações de iluminação foram realizadas com o suporte de técnicas de simulação computacional, sendo realizadas comparações com critérios de desempenho nacionais e internacionais. Ao final, os estudos mostraram os efeitos positivos da adoção de algumas estratégias de projeto clássicas, que são pouco comuns na prática da arquitetura comercial brasileira.

Palavras-chave: Luz natural. Arquitetura bioclimática. Conforto visual. Clima tropical. Simulação computacional. Processo de produção da arquitetura.

Abstract

This paper presents the results of the performance evaluation in terms of daylighting of the Petrobras New Research Centre (CENPES II) building design in the tropical climate of Rio Janeiro, Brazil, under a typical partially cloudy and bright sky. The architectural design encompasses an area over 100,000 m², distributed among ten new buildings. According to the design brief, daylighting should be maximized in all interior spaces whenever allowed by functional requirements, providing both visual comfort and energy efficiency. In that case, the design challenges were related to the need for solar protection and avoidance of glare, due to climatic conditions, including a fairly bright sky. This paper is focused on the two main building of the Center. The performance assessments were carried out with the support of advanced computer simulations, being compared to national and international design criteria. The results indicate the positive effects of the adoption of some conventional design strategies, which are not widely used in commercial building design in Brazil.

Keywords: Daylight. Bioclimatic architecture. Visual comfort. Tropical climate. Computer simulation. Architectural process.

Norberto Corrêa da Silva
Moura
Departamento de Tecnologia da
Arquitetura, Faculdade de
Arquitetura e Urbanismo
Universidade de São Paulo
Rua do Lago, 876, Cidade
Universitária
São Paulo - SP - Brasil
CEP 05508-080
Tel.: (11) 3091-5084
E-mail: betomoura@usp.br

Anna Christina Miana
Departamento de Tecnologia da
Arquitetura, Faculdade de
Arquitetura e Urbanismo
Universidade de São Paulo
Tel.: (11) 3091-4681
E-mail: annamiana@uol.com.br

Joana Carla Soares
Gonçalves
Departamento de Tecnologia da
Arquitetura, Faculdade de
Arquitetura e Urbanismo
Universidade de São Paulo
Tel.: (11) 3091-4571
E-mail: jocararch@usp.br

Denise Helena Silva Duarte
Departamento de Tecnologia da
Arquitetura, Faculdade de
Arquitetura e Urbanismo
Universidade de São Paulo
Tel.: (11) 3091-4571
E-mail: dhduarte@terra.com.br

Recebido em 02/02/09
Aceito em 04/04/09

Introdução

O estudo de desempenho luminoso do projeto do novo centro de pesquisas da Petrobras no Rio de Janeiro, CENPES II, faz parte de um trabalho mais amplo de pesquisa e consultoria de desempenho ambiental da arquitetura, classificado pela Petrobras como “ecoeficiência”, incluindo desempenho térmico, luminoso e energético dos edifícios e conforto dos espaços abertos. O CENPES II se insere no contexto da arquitetura contemporânea brasileira como um projeto pioneiro no que tange à introdução das preocupações de desempenho ambiental, com um processo de projeto interdisciplinar e rigoroso tecnicamente, para um empreendimento de mais de 100.000 m² de área construída, na Ilha do Fundão, às margens da Baía de Guanabara.

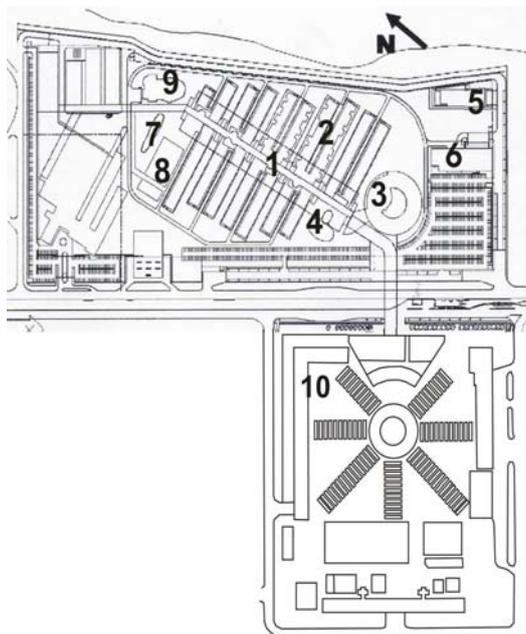
O projeto arquitetônico foi fruto de um concurso nacional de arquitetura em 2004, envolvendo quatro escritórios convidados, em que questões de desempenho ambiental tiveram um papel direcionador da arquitetura, incluindo itens relacionados ao desempenho térmico, luminoso e energético dos edifícios, até questões de impacto ambiental dos materiais e uso racional de água. Para a elaboração dos quesitos de desempenho ambiental do edital, a Petrobras contou com a colaboração de especialistas do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEEE) e do Laboratório de Conforto Ambiental (LABCON), ambos da Universidade Federal de Santa Catarina e da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. O interesse da Petrobras pelas questões ambientais levou à busca da certificação internacional LEED, de edifício “verde”, *Leadership in Energy and Environmental Design*.

Cobrindo uma área de aproximadamente 100.000 m², o programa de atividades do CENPES II tem o propósito de complementar o centro de pesquisas existente, com os seguintes edifícios: Empreiteiroópolis (galpão para os trabalhadores de manutenção, 3.496 m²), Planta-Piloto (4.515 m²), Oficinas (3.923 m²), Central de Utilidades, Prédio Central (escritórios, 35.891 m²), Laboratórios (32.989 m²), Centro de Convenções (6.539 m²), Restaurante (3.210 m²), Orquidário (973 m²) e o Laboratório de Realidade Virtual (1.570 m²). A conclusão da obra do novo centro está prevista para 2011 (ver Figuras 1 e 2).

O edital primou por uma série de requisitos ambientais, incluindo o bom aproveitamento da luz natural em todos os espaços interiores em que fosse possível pelas exigências da função, a fim de proporcionar conforto visual com eficiência energética. A intensa radiação solar do clima tropical do Rio de Janeiro trouxe o desafio, para o projeto de arquitetura, de providenciar proteção solar e ainda permitir o acesso da luz natural, sem a ocorrência de ofuscamentos. Com respeito ao desempenho ambiental do projeto arquitetônico, as questões de ecoeficiência colocadas pela Petrobras compreenderam sete áreas de atuação do conforto ambiental: conforto térmico dos espaços abertos, luz natural, desempenho térmico dos edifícios, ventilação natural, conforto acústico, desempenho térmico e desempenho energético de edifícios condicionados artificialmente.

A proposta vencedora foi a do escritório Zanettini Arquitetura S.A., com co-autoria de José Wagner Garcia, um projeto fortemente influenciado pelos conceitos da arquitetura bioclimática carioca. A composição predominantemente horizontal é valorizada por uma série de espaços de transição, com pátios, terraços e circulações abertas, que têm um papel fundamental na qualidade ambiental do conjunto, a fim de promover a socialização nas áreas comuns e a eficiência energética dos edifícios, dentro das possibilidades do clima tropical do Rio de Janeiro. Além disso, outras características da arquitetura bioclimática carioca foram reinterpretadas, como as estratégias de sombreamento (com coberturas duplas e *brise-soleil*), uso de cores claras, vegetação e ventilação natural. Alguns edifícios do complexo seguiram a tipologia da construção industrial, devido a sua função e às vantagens da ventilação natural e da iluminação natural (zenital), incorporadas na forma do edifício industrial com cobertura em *sheds*. São esses: Empreiteiroópolis, Oficinas, Planta-Piloto e Central de Utilidades.

O projeto de arquitetura foi informado por um detalhado processo de avaliação de desempenho ambiental, desde a etapa de concepção, pela equipe de pesquisadores do Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética, do Departamento de Tecnologia da Arquitetura, (LABAUT, 2004a, 2004b, da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAUUSP).



- (1) Prédio Central (escritórios)
- (2) Laboratórios
- (3) Centro de Convenções
- (4) Laboratório de Realidade Virtual
- (5) Oficinas
- (6) Empreiteirópolis
- (7) Orquidário
- (8) Planta-Piloto
- (9) Restaurante
- (10) Central de Utilidades
- (11) CENPES I

Figura 1 - Implantação do novo centro de pesquisas incluindo o edifício do centro de pesquisas existente CENPES I



Fonte: Zanettini Arquitetura S.A.

Figura 2 - Modelo físico do complexo arquitetônico do CENPES II, novo Centro de Pesquisas da Petrobras. Vista da orientação sul

Implantação e partido arquitetônico: sua relação com a exposição solar e a iluminação natural

O projeto do conjunto do CENPES II foi desenvolvido desde o princípio focado nas condições climáticas do Rio de Janeiro, baseado nos estudos de insolação, iluminação natural e ventilação para a definição da implantação do complexo e do partido arquitetônico (ver Figura 3). O elemento principal, organizador do arranjo físico de todos os edifícios que compõem o empreendimento, é o conjunto arquitetônico formado pelo Prédio Central e pelos Laboratórios, localizados no centro do terreno (edifícios 1 e 2 da Figura 1) e contendo as principais funções do complexo.

O Prédio Central, o maior edifício do complexo em extensão, é composto de um bloco linear de três pavimentos, sob o qual está a circulação coberta no piso térreo que interliga as diversas alas dos Laboratórios; na cobertura, um terraço proporciona uma ampla visão do local, ao mesmo tempo em que amplia a área útil do edifício (o terraço é coberto, porém aberto lateralmente para o exterior). O 1º pavimento, sobre a circulação linear coberta no térreo, é um piso técnico (*pipe-rack*) onde estão as tubulações de gases e outras utilidades para os Laboratórios, incluindo o sistema de ar-condicionado. Nos outros dois pavimentos do lado leste, predominam os espaços destinados aos escritórios e, no lado oeste, estão os escritórios e os terraços.

Com 300 m de extensão e 50 m de largura, o Prédio Central funciona como um eixo suspenso no alinhamento norte-sul, que direciona a distribuição das nove alas dos Laboratórios na direção ortogonal leste-oeste, implantadas no nível do terreno. Assim, as fachadas dos laboratórios estão dispostas nas orientações norte e sul, favorecendo o controle da radiação solar e a iluminação natural nesses ambientes, enquanto a orientação leste e oeste das fachadas do Prédio Central é consequência de outras prioridades de projeto, tais como o conceito estrutural e de composição arquitetônica, as vantagens da orientação norte-sul para os Laboratórios e o papel direcionador deste edifício – eixo central que organiza o arranjo físico de todo o complexo.

Embora as orientações leste e oeste possam apresentar desvantagens em relação ao desempenho térmico e luminoso dos ambientes (que foram tratadas na forma e no projeto das

fachadas), o bloco de dois pavimentos de escritórios, orientados para leste, é favorecido pela vista panorâmica da Baía de Guanabara (ver Figura 4).

A disposição ortogonal do conjunto (Prédio Central e Laboratórios) favoreceu a orientação das aberturas dos Laboratórios, que estão orientadas para norte e sul, ideais para maximizar o aproveitamento da luz difusa e controlar a radiação solar direta (ver Figura 3). As alas de Laboratórios totalizam a maior área do conjunto e, diferentemente dos escritórios, servem a atividades que exigem condições ambientais rigorosamente controladas e que não se beneficiam de vistas para o exterior, como os escritórios. Em contrapartida, as fachadas do Prédio Central resultaram na orientação predominante leste e oeste, indesejáveis para as condições climáticas locais por sua grande exposição à radiação solar direta.

Buscando lidar com os impactos desfavoráveis da orientação, o envelope da construção foi projetado em detalhes, de acordo com os princípios bioclimáticos. Uma membrana composta de diversos materiais – telha sanduíche, vidros verdes laminados e tela – consiste numa segunda cobertura em todo o edifício, que funciona como atenuante da radiação solar direta, além de ser permeável à ventilação. Essa proteção também avança nas duas laterais, formando um beiral com função de *brise-soleil* horizontal e bloqueando parte da radiação solar direta incidente nas fachadas leste e oeste, além de reduzir o ofuscamento em todo o ambiente dos escritórios.

Em relação à concepção formal do edifício e ao posicionamento das aberturas, a inclinação das fachadas e o recuo das aberturas (como se observa na tradicional arquitetura carioca da primeira metade do século passado) minimizam a incidência de radiação solar direta. Como a face leste, voltada para a Baía de Guanabara, apresenta maior exposição à radiação solar direta, devido à maior altura do edifício nessa orientação, foram introduzidos dispositivos internos de sombreamento nas aberturas, complementando o desempenho do beiral.

Auxiliando o sistema de iluminação natural dos escritórios, as fachadas internas das duas alas recebem iluminação natural a partir da circulação interna semi-aberta, por meio de áreas envidraçadas próximo ao teto. Vale comentar que essa contribuição é mínima, uma vez que a segunda cobertura do edifício, que protege a circulação interna, é predominantemente opaca, com algumas áreas translúcidas.

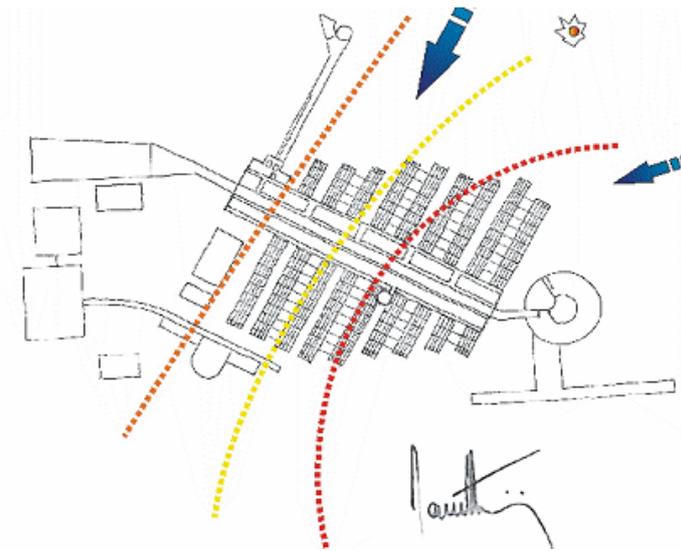
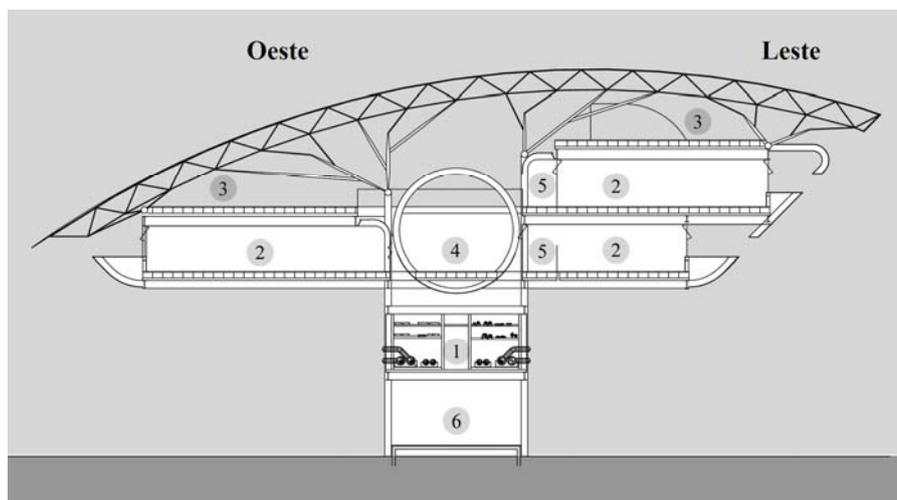
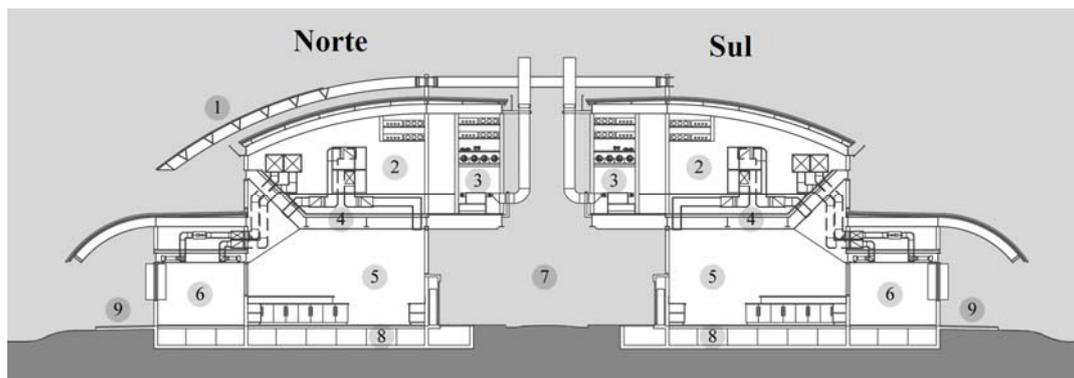


Figura 3 - Croqui do arquiteto destacando o papel da orientação solar na organização e definição dos setores do conjunto, com destaque para os edifícios principais: Prédio Central, Laboratórios e Centro de Convenções



- 1 *pipe-rac*;
- 2 escritórios;
- 3 terraços;
- 4 circulação central;
- 5 circulação interna;
- 6 circulação do térreo.

Figura 4 - Corte transversal do Prédio Central



- 1 cobertura externa com painéis fotovoltaicos;
- 2 pavimento técnico;
- 3 *pipe-rack*;
- 4 teto técnico;
- 5 sala de laboratório;
- 6 gabinete dos pesquisadores;
- 7 rua interna de serviços;
- 8 piso técnico;
- 9 circulação externa aberta.

Figura 5 - Laboratórios, corte transversal com os vários espaços que compõem o edifício

Na etapa do concurso, essa segunda cobertura foi concebida como uma grande tela metálica, permeável à radiação solar, aos ventos e às chuvas, criando um ambiente de passagem e convivência bem próximo das condições externas. Com o desenvolvimento do projeto, a cobertura foi alterada para uma superfície de telha metálica sanduíche, com pequenas áreas envidraçadas, a fim de maximizar o uso dos terraços.

Quanto às estratégias adotadas para a iluminação natural dos Laboratórios, além do efeito positivo da orientação adotada, foram introduzidos conceitos arquitetônicos fundamentais já na fase de concepção, os quais foram revistos e consolidados durante o desenvolvimento do projeto. As alas dos Laboratórios são entremeadas por espaços abertos, compatibilizando, na fachada posterior, as exigências operacionais das instalações com as necessidades de iluminação natural, enquanto, na fachada frontal, configuram-se pátios e corredores abertos com tratamento paisagístico.

Destaca-se que, mesmo com a ampliação das áreas destinadas à passagem das instalações durante o desenvolvimento do projeto, interferindo nos espaços disponíveis para aproveitamento da luz diurna, a orientação adequada das aberturas

possibilitou o uso de dispositivos que proporcionaram bom resultado na iluminação natural dos ambientes internos (ver Figura 5).

Os estudos de insolação do conjunto Prédio Central e Laboratórios foram iniciados pela análise das interferências dos edifícios em seu entorno imediato, considerando-se o sombreamento mútuo, e nos espaços abertos. Através de simulações computacionais, complementadas por cálculos analíticos, foram determinados os horários de radiação solar direta sobre as fachadas e coberturas, e a disponibilidade de iluminação natural nas aberturas laterais e zenitais, utilizando projeções de sombras e máscaras de obstruções. O potencial para aproveitamento da energia solar, tanto por painéis fotovoltaicos como por coletores solares para aquecimento de água, também foi considerado nas etapas iniciais do projeto e incorporado ao partido arquitetônico. Nesse intuito, as coberturas das alas dos Laboratórios foram cuidadosamente analisadas, buscando-se identificar as melhores áreas expostas à radiação solar e, em função dos resultados obtidos nos estudos de sombra, estabeleceram-se áreas prioritárias para instalação dos painéis fotovoltaicos e coletores solares (ver Figura 6).

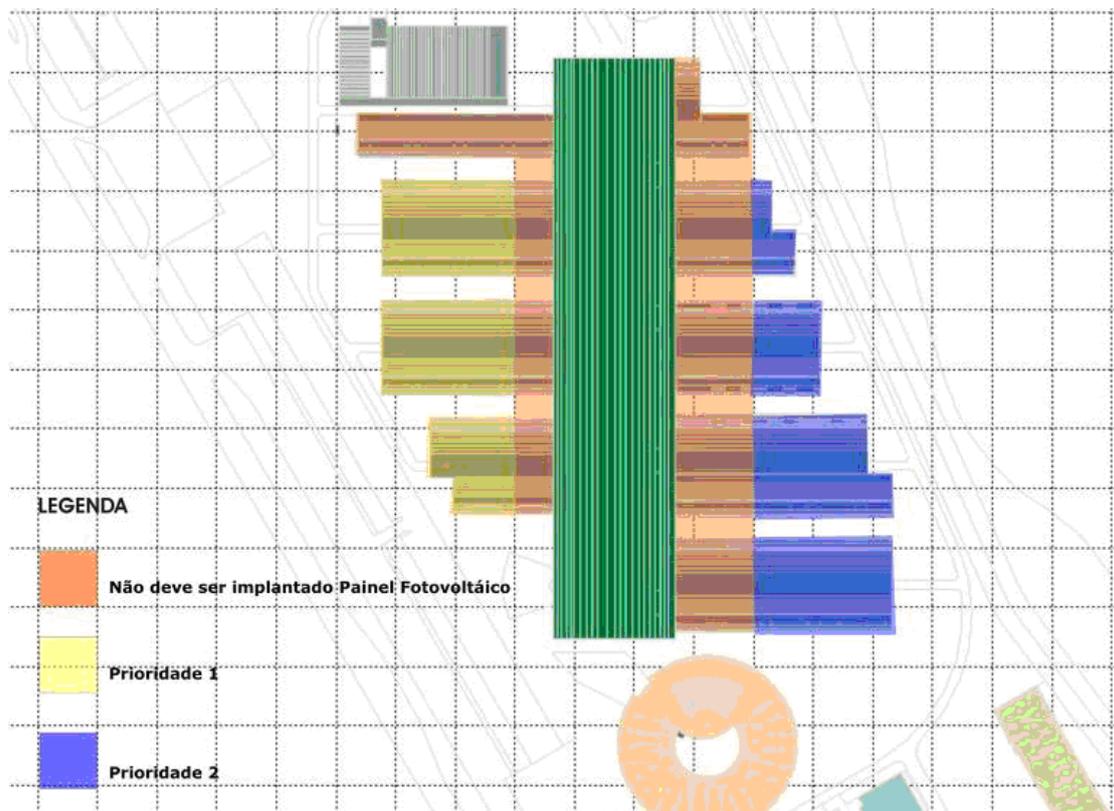


Figura 6 - Implantação do conjunto mostrando a priorização de áreas para a colocação de painéis fotovoltaicos

Os resultados das simulações de insolação do conjunto mostraram que durante o solstício de verão existe pouca interferência das sombras entre os edifícios. A mais significativa é proveniente da sombra do Prédio Central sobre parte da cobertura dos Laboratórios. No início da manhã, às 7 horas, nota-se uma faixa de aproximadamente 25 m de sombra na região da cobertura dos Laboratórios lindeira à fachada oeste do Prédio Central. Essa faixa diminui gradualmente, tornando-se insignificante próximo às 12 horas. A partir desse horário, a faixa de sombra passa para o lado leste do Prédio Central, atingindo 50 m de projeção horizontal por volta das 5 horas. Isso ocorre devido à assimetria do Prédio Central, com um pavimento na fachada oeste e dois na fachada leste.

Nos edifícios com cobertura em *sheds*, assim como na abertura zenital dos Laboratórios, adotou-se para análise o ponto central na linha inferior das aberturas. Os pontos localizados nos *sheds* auxiliaram na avaliação da penetração solar por essas aberturas, permitindo dimensionar eventuais elementos de controle da radiação solar direta, dada sua importância para evitar o ofuscamento, garantir a uniformidade da iluminação natural e reduzir a carga térmica dentro do ambiente.

Para estimar o período de insolação anual das fachadas, aplicou-se o traçado de máscaras de

obstrução no ponto médio da linha definida pelo encontro do plano da fachada com o do piso exterior.

Avaliação de desempenho

A pesquisa em iluminação natural tem evoluído no sentido de melhor caracterizar as fontes de luz natural. Nesse aspecto, destaca-se a CIE (2003), que padronizou o céu genérico, definindo 15 tipos de céu entre os modelos de céu claro e encoberto já padronizados, através de uma única equação, que é uma generalização da fórmula do céu claro. Essa publicação resume o trabalho de diversos pesquisadores: Perez, Seals e Michalsky (1993); Kittler, Perez e Darula (1997, 1998); e Tregenza (1999). O modelo de céu genérico CIE mostrou-se adequado para distribuições de luminâncias com variação suave e contínua em toda a abóbada celeste, mas também apresentou boa aproximação para o céu intermediário com características não homogêneas na distribuição das nuvens, próprio de climas marítimos. Entretanto, a maior precisão no modelo de céu não garante sua aplicação prática se não houver dados medidos que possibilitem caracterizar o céu típico de determinada região. O Programa Internacional de Medição da Luz Diurna (IDMP, 2006 – *International Daylight*

Measurement Programme), implantado pela CIE em 1991, representou o primeiro passo para a formação de um atlas mundial de disponibilidade de luz natural, resultando em uma rede de estações por todo o planeta com o objetivo de obter longos períodos de medição.

Uma vez que não havia como caracterizar o céu típico do Rio de Janeiro devido à falta de medições de luz natural conforme as recomendações CIE, optou-se por adotar o método clássico do Fator de Luz Diurna (FLD)¹, com algumas implementações e estratégias que permitissem otimizar o aproveitamento da luz natural.

O método FLD só é aplicável ao modelo de céu encoberto. Embora essa seja uma simplificação – pois não se pode determinar sua frequência de ocorrência se não existem medições no local –, o método permite estimar o nível de iluminação independentemente das condições climáticas locais (MARDALJEVIC, 1999, p. 212).

A Figura 7 apresenta um gráfico similar ao utilizado por Mardaljevic (1999), elaborado através do aplicativo Climaticus (ALUCCI, 2003). Os dados foram calculados a partir das Normas Climatológicas (1961-1990) para a cidade do Rio de Janeiro e fornecem a frequência de ocorrência anual da iluminância no plano horizontal desobstruído no período entre nascer e pôr-do-sol. A cada valor percentual corresponde um valor mínimo da iluminância atingido em klux. Portanto, observa-se que, para a cidade do Rio de Janeiro, em 80% do período anual a iluminância no plano horizontal ultrapassa 13.250 lux. Esse foi o valor de referência utilizado, possibilitando avaliar a iluminância nos ambientes internos e sua correspondência com as recomendações normativas (ABNT, 1991).

Assim, nas simulações feitas através do Radiance, adotaram-se apenas uma data e um horário (Solstício de Inverno às 12h00), que apresentassem a iluminância de referência no plano horizontal desobstruído (13.250 lux) para a latitude do Rio de Janeiro. Cabe destacar que, na metodologia adotada, essa iluminância não se aplica apenas à data e ao horário simulados, mas representa o valor que é ultrapassado no local de estudo em 80% do período anual, conforme indicado na Figura 7.

Dessa forma, tanto os valores absolutos (lux) quanto os relativos (FLD) obtidos nas simulações servem para avaliação do desempenho dos ambientes, possibilitando verificar o atendimento às recomendações normativas.

¹ O mesmo que DF (*Daylight Factor*).

A avaliação de desempenho da iluminação natural nas edificações, incluindo método, critérios, estudos de caso e principais resultados, é apresentada a seguir, referenciada no relatório técnico *CENPES-II, Arquitetura e Eco-eficiência: Conforto e Desempenho Luminoso das Edificações II* (2004).

Método e critérios

A avaliação da iluminação natural nos ambientes internos foi estruturada conforme segue:

- (a) verificação dos resultados das simulações, adotando-se o procedimento de cálculo recomendado pela Norma NBR 15215-3 (ABNT, 2005) *Iluminação natural – Parte 3 – Procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural em ambientes internos*;
- (b) apresentação dos resultados em iluminância (lux) e fator de luz diurna (FLD), em uma grade de pontos no plano de trabalho, e análise do desempenho luminoso do ambiente com base nos valores de FLD confrontados com a frequência de ocorrência durante o período de ocupação; e
- (c) análise dos resultados, adotando-se a norma NBR 5413 – *Iluminância de Interiores* (ABNT, 1991) para uma referência quantitativa (observando-se os valores de iluminância recomendados no plano de trabalho), complementada pelas normas alemãs DIN 5034, *Daylight in interiors* (1985a), e DIN 5035, *Artificial lighting of interiors* (1985b), uniformidade > 66% e fator de luz do dia (FLD) > 2%, considerando-se ainda a adequação ao padrão LEED (USGBC, 2002).

Utilizaram-se os seguintes parâmetros nas simulações de iluminação:

- (a) tipo de céu: céu encoberto CIE;
- (b) data e hora: solstício de inverno às 12h00, correspondendo à iluminância de 13.250 lux no plano horizontal desobstruído;
- (c) simulações com valores de iluminância absolutos (lux) e relativos (FLD);
- (d) refletâncias do piso, parede e teto: 0,35, 0,60 e 0,85 respectivamente;
- (e) altura do plano de trabalho: nos ambientes com atividades de escritório, 0,70 m, e nos ambientes com atividade industrial, 1,00 m do piso acabado; e
- (f) nas aberturas, em geral, adotou-se vidro laminado incolor com 0,89 de transmissão luminosa. Apenas no Prédio Central e nos *sheds* adotou-se também o vidro verde laminado de transmissão luminosa 0,69.

cidade **Rio de Janeiro**

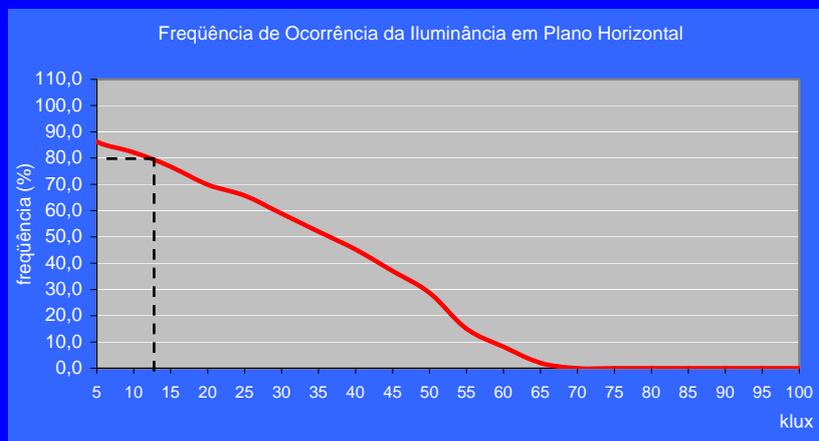


Figura 7 - Frequência de ocorrência da iluminância no plano horizontal para o Rio de Janeiro (ALUCCI, 2003)

Prédio central

No Prédio Central, as orientações predominantes leste e oeste das fachadas acarretaram a necessidade de proteção da radiação solar direta nas aberturas laterais. Inevitavelmente, o aproveitamento da luz difusa da abóbada celeste ficou prejudicado pelo efeito das obstruções, fato este que, somado à profundidade dos ambientes, determinou regiões pouco favorecidas pela iluminação natural no centro dos ambientes.

No intuito de melhorar o desempenho luminoso dos escritórios, diferentes alternativas foram estudadas para potencializar o ganho em iluminação das aberturas laterais leste e oeste, as quais necessitam de proteção da radiação solar direta no início da manhã na fachada leste e, no final da tarde, na fachada oeste.

Foram estudadas três opções de *brise* horizontal para os escritórios da fachada Leste (2º e 3º Pavimentos), sendo duas opções de *brise* com chapa perfurada e uma com aletas metálicas com função de prateleiras de luz. Considerando-se

eficiência, manutenção e composição arquitetônica, foi adotada a Opção C, que apresentou obstrução total a partir das 7h00, no solstício de verão, e a partir das 8h30, no solstício de inverno, com ângulo de sombra horizontal de 27° (ver Figura 8). Entretanto, por sua disposição ortogonal à trajetória solar e pela necessidade de eficiência total (a não-entrada da radiação direta em nenhum horário), os dispositivos de proteção inevitavelmente restringiram o aproveitamento da luz difusa.

Ainda na época do concurso, os últimos pavimentos de escritório eram beneficiados por aberturas zenitais, que foram subtraídas após a mudança da cobertura para a solução da telha sanduíche, que praticamente eliminou qualquer benefício da iluminação zenital, colocada no piso dos terraços. Assim, mesmo com a elevada luminância do céu do Rio de Janeiro (latitude 22°53'S), a necessidade de proteção solar em conjunto com a profundidade dos ambientes mostraram-se problemáticas para o aproveitamento da luz natural.

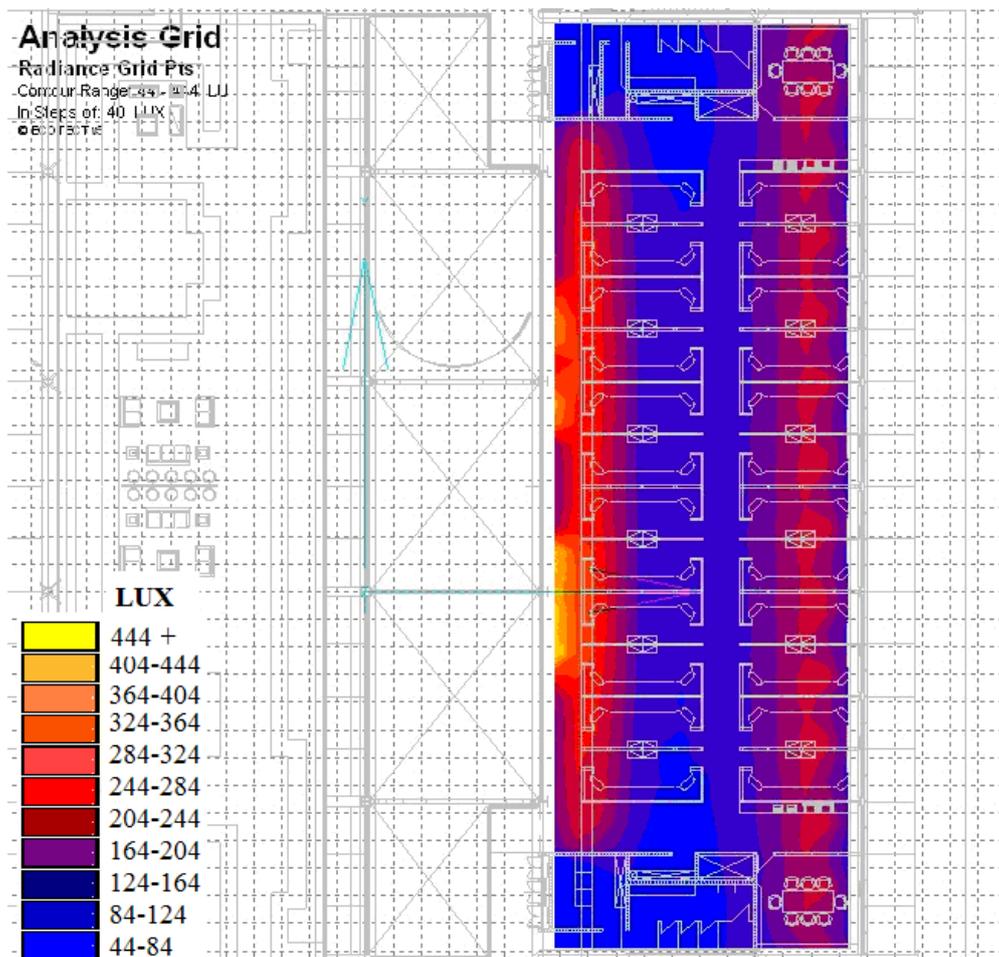


Figura 9 - Prédio Central - Distribuição dos níveis de iluminação no 3º Pavimento, orientação leste

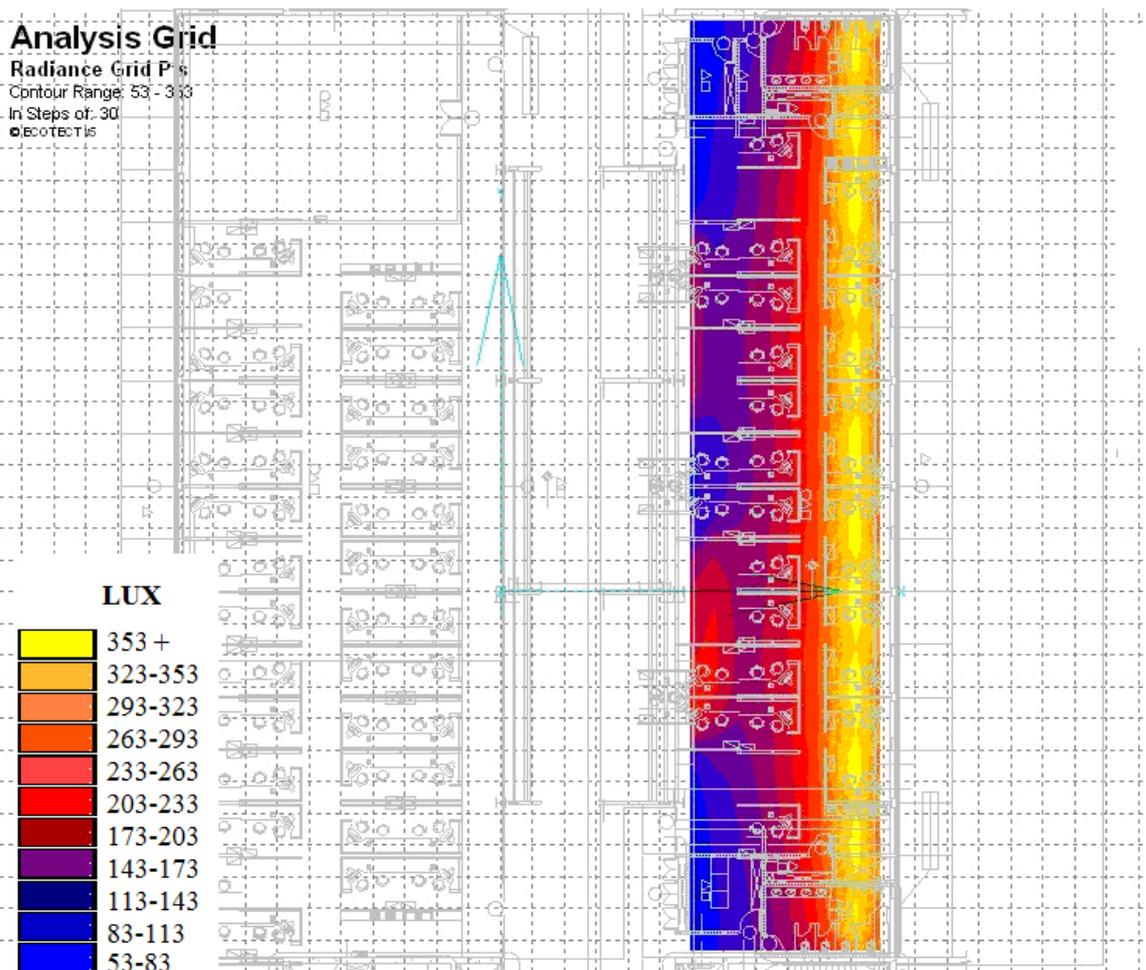


Figura 10 - Prédio Central - Distribuição dos níveis de iluminação no 2º Pavimento, orientação leste

Nos escritórios orientados para a fachada leste no 2º Pavimento, o nível de iluminação próximo às aberturas foi um pouco maior que no 3º Pavimento. Porém, alguns pontos no fundo da sala só receberam luz através da circulação central aberta, resultando num nível mais baixo de iluminação natural e numa distribuição menos uniforme (ver Figura 10).

Quanto ao atendimento aos critérios de avaliação, a faixa exterior dos escritórios orientados para oeste no 2º Pavimento atingiu o FLD de 2% em 100% da área, apresentando autonomia em relação à iluminação artificial. Já na faixa interior, apenas 20% da área do piso atingiu o FLD de 2%, necessitando complementação da iluminação pelo sistema artificial. Nos escritórios voltados para leste nesse mesmo pavimento, a faixa exterior também apresentou autonomia da iluminação natural do ambiente, mas a faixa interior não atingiu o FLD mínimo requerido.

No 3º Pavimento, o FLD na faixa exterior leste esteve sempre abaixo de 2%, enquanto a faixa interior atingiu FLD de 2% em apenas 35% da

superfície, confirmando a necessidade de iluminação zenital nesses ambientes, conforme havia sido estabelecido nas etapas iniciais do projeto.

Os escritórios orientados para a fachada oeste no 2º Pavimento apresentaram nível elevado próximo às aberturas, entre 2.000 e 2.900 lux, decrescendo para o mínimo em torno de 130 lux no fundo da sala (ver Figura 11). Além da maior probabilidade de ofuscamento, a uniformidade foi prejudicada pelo alto nível de iluminância próximo às aberturas, sem grande ganho nas áreas internas mais afastadas. A complementação com iluminação artificial e o uso de dispositivos internos de controle foram a solução encontrada para homogeneizar a distribuição da iluminação geral desses ambientes durante o período de ocupação.

Embora as aberturas leste e oeste estejam parcialmente protegidas da radiação solar direta, foram adotados dispositivos de sombreamento interno, para que o usuário possa ter controle segundo suas necessidades e expectativas. A

trajetória solar ortogonal ao plano das aberturas nessas fachadas dificulta a eficiência de proteções fixas, o que requer a complementação através de dispositivos móveis, permitindo ainda a penetração solar controlada no ambiente. Essa estratégia também foi utilizada nas aberturas direcionadas para a circulação central, pois nos períodos de insolação a penetração solar pela cobertura poderá provocar ofuscamento e desconforto visual, além do aumento da carga térmica interna.

A iluminação natural nos ambientes de trabalho do Prédio Central deve ser avaliada em relação à

distribuição e quantidades mínimas por determinado período. Porém, no caso da área de convivência (áreas de trabalho e lazer), foi necessária uma compreensão mais abrangente do comportamento da luz, importante não apenas para a atividade humana, mas também para o desenvolvimento das espécies indicadas no projeto paisagístico. De fato, o conceito e as especificações das espécies vegetais foram determinados em função dos resultados obtidos nas simulações de iluminação natural.

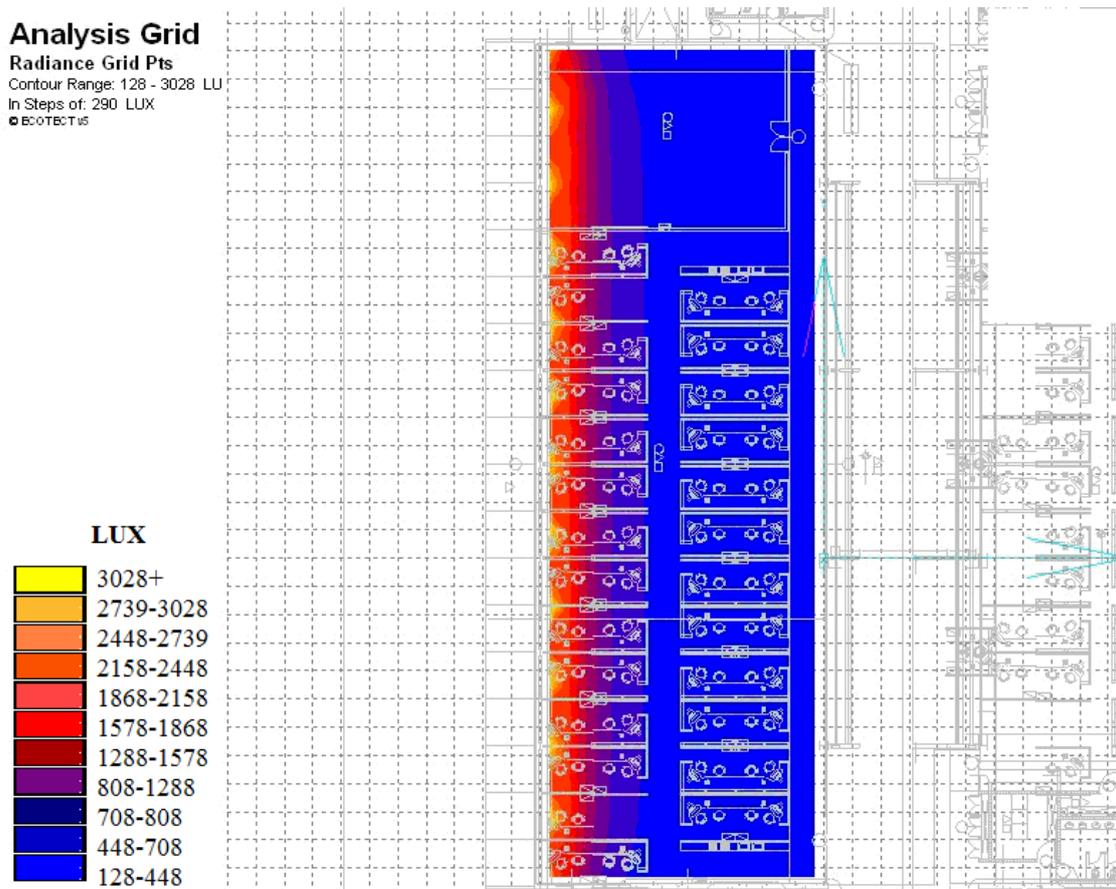


Figura 11 - Prédio Central - Distribuição dos níveis de iluminação no 2º Pavimento, orientação oeste

Laboratórios

Durante o desenvolvimento do projeto, o piso técnico contendo as instalações para os Laboratórios necessitou ser ampliado, interferindo nas aberturas das fachadas norte e sul, voltadas para as ruas internas entre os Laboratórios. Assim, a captação de luz natural pelas aberturas laterais nessas fachadas foi prejudicada devido à redução do fator de visão de céu pelas aberturas. Este fato poderia ser compensado pelas aberturas zenitais (tipo shed), mas a cobertura do pavimento técnico sobre os Laboratórios, que suporta os coletores solares, também provoca uma obstrução significativa da abóbada celeste nas janelas altas, tanto para os Laboratórios voltados a norte, como para aqueles voltados a sul, reduzindo o potencial de iluminação natural dentro do ambiente.

A fim de melhorar o desempenho luminoso da sala dos laboratórios, duas soluções diferentes foram adotadas, uma para cada orientação. Para os Laboratórios voltados a norte, a alternativa foi potencializar o desempenho de iluminação natural pela janela alta, aproveitando-se a cobertura do gabinete junto ao laboratório como prateleira de luz, para aumentar a reflexão de luz natural. Para tanto, deslocou-se a extremidade inferior dos coletores solares previstos, aumentando-se o fator de visão de céu pela linha inferior do *shed*.

Para isso, o ângulo de sombra vertical, do beiral da cobertura que suporta os coletores, passou de 23,72° para 30°, reservando-se uma faixa de aproximadamente 2 m para instalação de pérgolas metálicas. Estas têm como finalidade obstruir a penetração solar pela abertura e aumentar a incidência da radiação solar direta na cobertura do gabinete, que passa a ter a função de prateleira de luz.

Com a alteração do ângulo de sombra vertical na fachada norte, verificou-se a penetração da luz solar direta no ambiente a partir de meados de abril até o final de agosto, no período da manhã, das 7h00 às 8h00, e no período da tarde, após as 16h00. Esse intervalo é crescente entre abril e junho, passando a ser decrescente até agosto (ver Figura 12). Dessa forma, a incidência da luz solar direta no ambiente diminui ao se aproximar o verão, ocorrendo apenas em um pequeno intervalo no início e no final do período de ocupação.

As pérgolas metálicas da orientação norte foram dimensionadas para obstruir a radiação solar direta pela abertura e otimizar o aproveitamento da luz difusa. Embora a permeabilidade da luz direta pelas pérgolas aumente com a altura solar, há um equilíbrio na insolação da cobertura do gabinete por todo o ano, pois, assim como a radiação solar

direta é obstruída pelas pérgolas, a penetração solar sob o alinhamento do beiral aumenta. Portanto, nos períodos próximos ao solstício de verão, o desempenho da prateleira de luz é potencializado, enquanto, nos períodos próximos ao solstício de inverno, embora as pérgolas provoquem maior obstrução, a menor altura solar compensa tal perda, resultando em maior penetração do sol, que banha a cobertura do gabinete, limitada pelo beiral.

Essa solução não prejudicou a área reservada para a pesquisa de fontes alternativas de energia. Embora reduza a região disponível para os coletores solares, a faixa ocupada pelas pérgolas metálicas mostrou a compatibilidade de soluções dentro do mesmo enfoque, envolvendo alternativas em diferentes estágios de complexidade tecnológica e atendendo ao mesmo propósito. Assim, parte da área destinada para gerar energia com energia solar passou a ser aproveitada para potencializar a iluminação natural no ambiente.

A penetração solar na cobertura do gabinete foi analisada mediante simulações nos solstícios de verão e inverno e nos equinócios às 12h00. Na Opção A, que corresponde ao projeto original, a sombra na cobertura do gabinete é significativamente maior do que na alternativa proposta (Opção B), o que justificou a introdução do sistema de pérgolas metálicas. O sistema de pérgolas é mais permeável aos raios solares no solstício de verão, e a faixa de penetração solar que atinge a cobertura do gabinete está mais bem determinada, potencializando o desempenho da prateleira de luz na cobertura do gabinete. Nos equinócios, a permeabilidade é menor devido à inclinação das aletas, mas ainda se nota uma significativa incidência de luz solar direta na cobertura do gabinete. No solstício de inverno as duas opções são praticamente equivalentes, pois o sistema de pérgolas passa a apresentar eficiência total de obstrução da luz solar direta. Entretanto, a eficiência da cobertura do gabinete como prateleira de luz é mantida, pois o sol consegue atingir uma área maior sob as aletas devido a sua menor altura.

Nos Laboratórios voltados para a orientação sul, como a iluminação zenital não necessita de proteção solar horizontal, a iluminação no ambiente é favorecida devido à maior parcela de céu visível, sem os inconvenientes da penetração da radiação solar direta. Sendo assim, o ângulo de sombra vertical do beiral da segunda cobertura sobre a abertura zenital (originalmente com a mesma extensão da cobertura da fachada norte) foi ampliado, aumentando a visão de céu pela abertura.

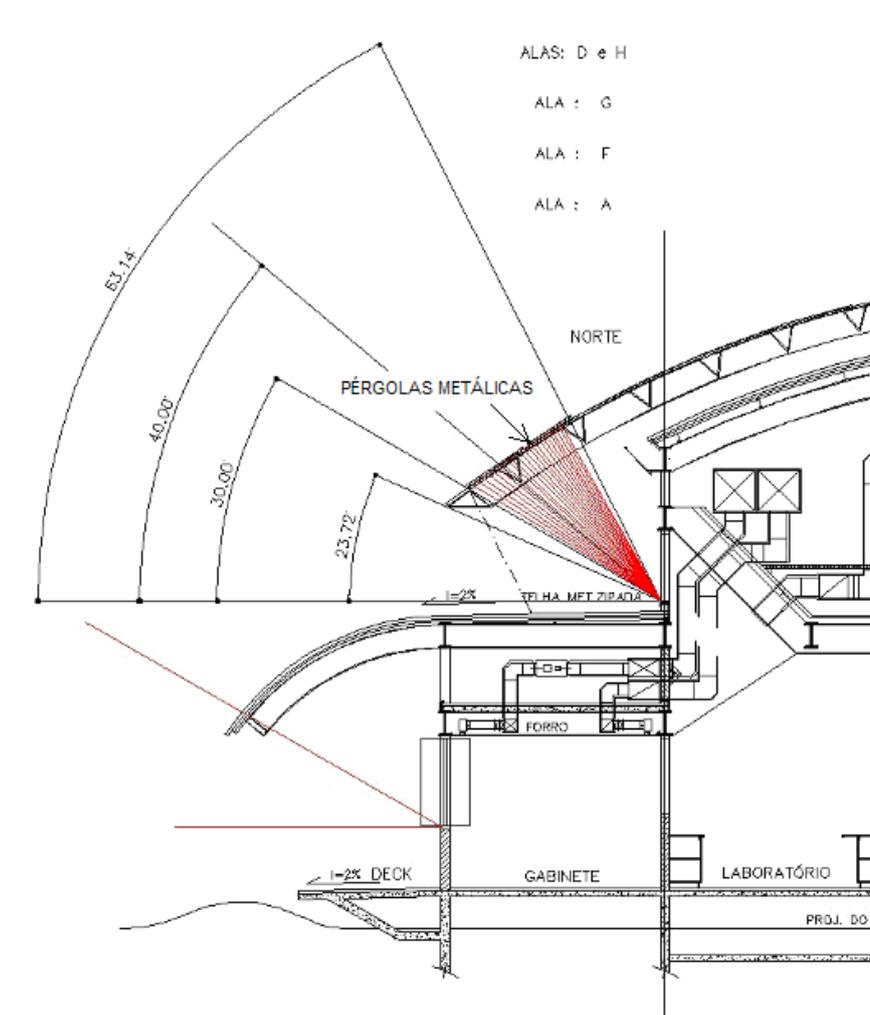
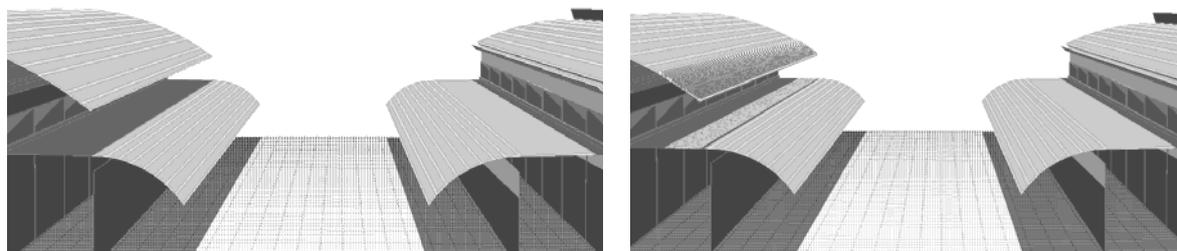


Figura 12 - Laboratórios (Opção B) - Corte da fachada principal mostrando o dimensionamento da janela alta e da proteção solar em forma de aletas



(a) Opção A

(b) Opção B

Figura 13 - Laboratórios - Estudos de insolação e o impacto da proteção solar na incidência de radiação solar sobre as aberturas zenitais no solstício de verão

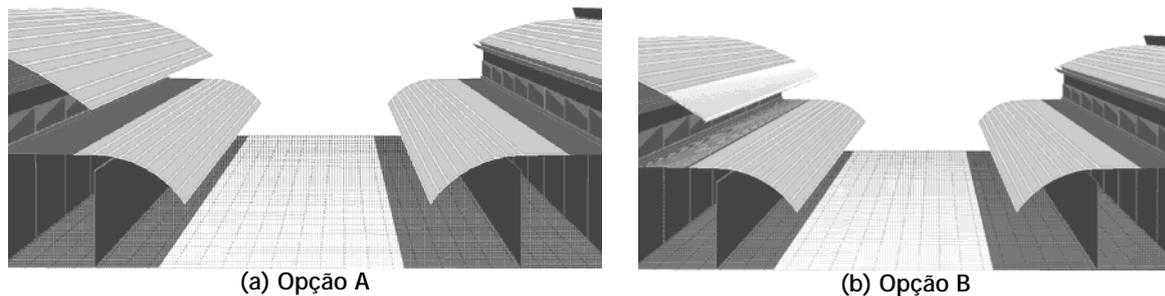


Figura 14 - Laboratórios - Estudos de insolação e o impacto da proteção solar na incidência de radiação solar sobre as aberturas zenitais nos equinócios

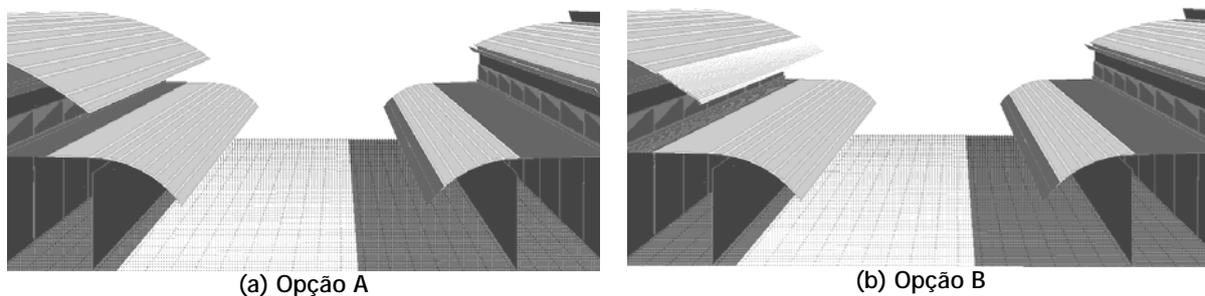


Figura 15 - Laboratórios - Estudos de insolação e o impacto da proteção solar na incidência de radiação solar sobre as aberturas zenitais no solstício de inverno

As Figuras 13 a 15 mostram uma avaliação comparativa, entre o projeto original (Opção A) e a alternativa proposta (Opção B), da penetração solar na cobertura do gabinete norte, localizado no lado esquerdo das figuras. As simulações foram feitas para os solstícios e equinócios.

A análise visual apresentada nessas figuras ilustra uma estratégia de utilização da radiação solar direta para potencializar a iluminação natural nas condições de céu claro, pois nessa hipótese configuram-se regiões do céu com menor luminância que o céu encoberto, podendo apresentar iluminação insuficiente nos ambientes conforme a parcela de céu visível através das aberturas. Deve-se observar que, uma vez que o modelo de céu utilizado nas simulações é o céu encoberto CIE, a influência da radiação solar direta na cobertura do gabinete não está sendo considerada no cálculo.

Ao final, os níveis de iluminação apresentaram-se adequados no interior dos Laboratórios. No Laboratório norte, a iluminância média esteve em torno de 270 lux e, no Laboratório sul, em torno de 367 lux. Destaca-se que, nas áreas de trabalho, os níveis médios atingidos superaram esses valores (ver Figuras 16 e 17).

Conclui-se que os dispositivos propostos para aproveitamento da luz natural apresentaram bom desempenho e que a orientação favorável, com as aberturas direcionadas para norte e sul, foi determinante para o resultado obtido.

Análise dos resultados

Para a avaliação da uniformidade da distribuição da luz natural, foram selecionadas as regiões representativas de cada ambiente, caracterizadas de acordo com o *layout* do mobiliário. Nessas regiões, adotou-se o conjunto de pontos mais próximo do plano de trabalho efetivamente utilizado, delimitado pelas mesas e bancadas. A uniformidade foi calculada pela razão entre a iluminância mínima (E_{min}) e a média das iluminâncias (E_{med}), cujo valor deve ser superior a 0,66 s, conforme a DIN 5035 (1985b). Essa uniformidade de distribuição foi um dos critérios de avaliação do projeto de iluminação natural para todos os ambientes, juntamente com os níveis mínimos de iluminância, em função da atividade, exigidos por norma.

No Prédio Central, as áreas de convivência (3º e 4º Pavimentos) mostraram níveis acima de 300 lux,

correspondendo ao FLD de 2%. Nas estações de trabalho localizadas nas faixas próximo às aberturas, delimitadas pelas divisórias internas, o FLD predominante esteve em torno de 5%. Isso ocorreu por serem essas faixas estreitas, o que possibilita o alcance de níveis adequados até atingir a circulação interior entre as estações. A partir desse ponto (circulação interior), o FLD esteve abaixo de 2%, mostrando a necessidade de

iluminação artificial suplementar. Na fachada oeste, embora as faixas das estações de trabalho sejam mais largas (profundidade aproximada de 5,50 m), o FLD superior a 2% predominou em quase toda a área próximo às aberturas. Já na faixa interior, o FLD superior a 2% e 1,5% abrangeu apenas 20% e 30%, respectivamente, da área do piso (ver Tabela 1).

Frequência de Ocorrência																	
Prédio / Número	Ambiente Simulado				DF	S	E int (lux)	E ext (lux)	%	E int (lux)	E ext (lux)	%	E int (lux)	E ext (lux)	%		
Prédio Central / 276	Módulo Norte	pav 03	Convivência Oeste	Faixa Exterior	0.020	100%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%		
				Faixa Interior	0.020	100%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%		
		pav 04	Convivência Este	Faixa Exterior	0.020	100%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%		
				Faixa Interior	0.020	100%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%		
		Módulo Central	pav 02	Escritórios Oeste	Faixa Exterior	0.020	100%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%	
					Faixa Interior	0.020	20%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%	
	Corredor Central			0.020	80%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%			
	Escritórios Este			Faixa Exterior	opção a	0.020	100%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%	
			opção b		0.020	100%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%		
			opção c		0.020	100%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%		
			Faixa Interior	opção a	0.020	0%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%		
				opção b	0.015	30%	300	20000	80%	500	33333	60%	750	50000	35%		
				opção c	0.020	0%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%		
	pav 03		Escritórios Este	Faixa Exterior	opção a	0.020	65%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%	
					opção b	0.015	70%	300	20000	80%	500	33333	60%	750	50000	35%	
					opção c	0.020	40%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%	
				Faixa Interior	opção a	0.015	30%	300	20000	80%	500	33333	60%	750	50000	35%	
					opção b	0.020	10%	300	20000	80%	500	33333	60%	750	50000	35%	
					opção c	0.020	30%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%	
			Escritórios Oeste	Faixa Exterior	0.015	40%	300	20000	80%	500	33333	60%	750	50000	35%		
				Faixa Interior	0.020	100%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%		
				Faixa Exterior	0.020	100%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%		
		Faixa Interior		0.020	100%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%			
	Módulo Sul	pav03	Convivência Oeste	Faixa Exterior	0.020	100%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%		
				Faixa Interior	0.020	100%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%		
		pav 04	Convivência Este	Faixa Exterior	0.020	100%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%		
				Faixa Interior	0.020	100%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%		
		Edifício Planta Piloto / 253	Galpão de Desenvolvimento Sustentável				0.020	45%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%
			Abastecimento				0.020	0%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%
	0.015						40%	300	20000	80%	500	33333	60%	750	50000	35%	
	Empre. / 257		Vestiários				0.020	85%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%
			Administração				0.020	40%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%
							0.015	45%	300	20000	80%	500	33333	60%	750	50000	35%
			Almoxarifado				0.020	100%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%
			Oficinas				0.020	100%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%
	Laboratórios / 258		Padrão Norte				0.020	70%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%
Padrão Sul				0.020	75%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%			
Padrão Norte (Gabinete)				0.020	50%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%			
Padrão Sul (Gabinete)				0.020	50%	300	15000	85%	500	25000	70%	750	37500	55%			
Sala anexa Norte				0.015	25%	300	20000	80%	500	33333.3	60%	750	50000	35%			
Sala anexa Sul				0.015	30%	300	20000	80%	500	33333.3	60%	750	50000	35%			

DF - valor de referência para Fator de Luz Diurna

S - área do piso em que o Fator de Luz Diurna é superior ao FD

Eint - iluminância interior

Eext - iluminância exterior

% - frequência de ocorrência

Tabela 1 - Frequência de ocorrências dos níveis de iluminação interna em todos os edifícios do complexo

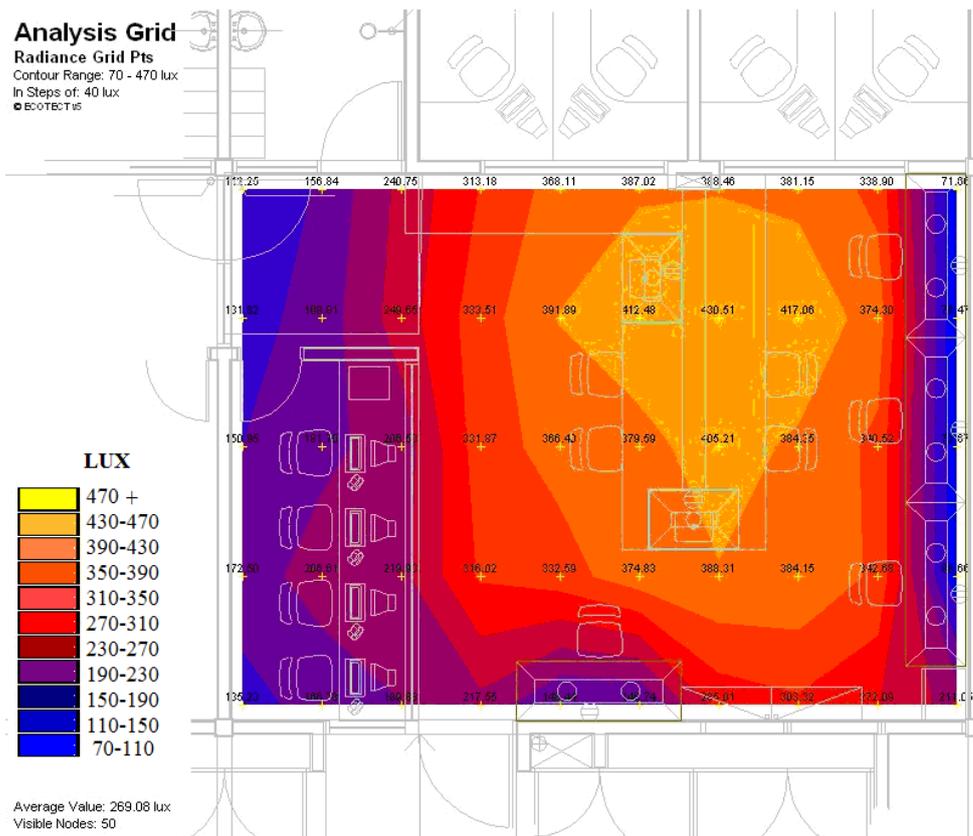


Figura 16 - Laboratórios - Distribuição dos níveis de iluminação na sala principal do estudo de caso da ala norte

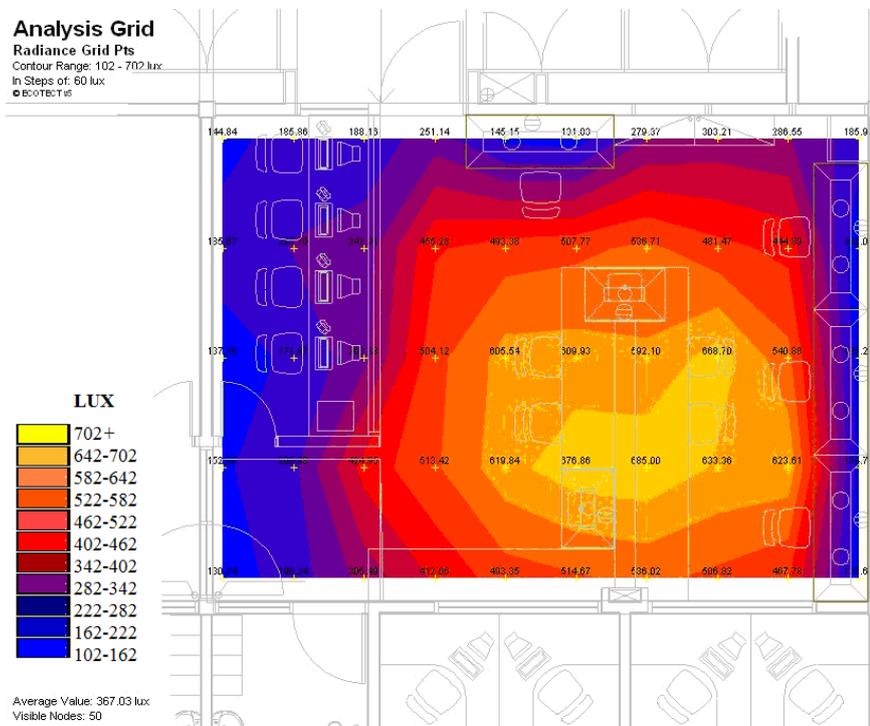


Figura 17 - Laboratórios - Distribuição dos níveis de iluminação na sala principal do estudo de caso da ala sul

Conforme os critérios adotados para avaliação dos resultados neste trabalho, o FLD de 2% corresponde à iluminância de 265 lux. Esse valor aproxima-se do valor mínimo de iluminação artificial recomendado pela ABNT para salas de leitura (300 lux), enquanto, para atividade de escritório, o nível mínimo de iluminação recomendado corresponde a 500 lux. Considera-se este nível muito elevado nas condições atuais de trabalho, podendo prejudicar a visibilidade dos monitores de computador. Para compatibilizar as exigências legais e normativas com as necessidades reais de iluminação nos ambientes, optou-se pela complementação da iluminação geral em pontos localizados sobre as mesas de trabalho, acionada pelos usuários. Portanto, o FLD de 2% foi admitido como referência mínima, estimando-se uma redução entre 40% e 45% no consumo de energia para iluminação artificial, no período de trabalho, devido ao desempenho da iluminação natural observado nas simulações dos escritórios do Prédio Central.

Nos Laboratórios foram considerados três ambientes: Laboratório, Sala Anexa e Gabinete. Esses ambientes foram analisados para o Laboratório Norte e o Laboratório Sul. Observou-se o FLD de 2% em 75% da área do Laboratório Sul, 70% do Laboratório Norte e 50% nos Gabinetes. As salas anexas apresentam níveis menores, predominando FLD abaixo de 1,5%.

Os escritórios do Prédio Central e os Laboratórios mostraram boa uniformidade em quase todos os ambientes. Apenas em alguns casos foram encontrados valores inferiores a 0,66, como no 2º Pavimento do Prédio Central, em que as estações de trabalho próximas às aberturas da fachada oeste apresentaram 0,35 de uniformidade. Entretanto, a utilização de dispositivos internos para obstrução da radiação solar direta e a existência de complementação com a iluminação artificial, para atingir o nível mínimo necessário no plano de trabalho, contribuíram para melhorar a uniformidade em todo o ambiente.

Nos Laboratórios, a uniformidade está sempre acima de 0,66. As obstruções externas, o beiral avançado e a iluminação zenital, além da menor profundidade dos ambientes, favoreceram esse resultado.

Em resumo, a uniformidade da iluminação natural apresentou os seguintes resultados:

- (a) Prédio Central: 3º Pavimento, Orientação Oeste: 0,82-0,88;
- (b) Prédio Central: 2º Pavimento, Orientação Este: 0,82-0,88;

(c) Prédio Central: 2º Pavimento, Orientação Oeste: 0,35-0,75;

(d) Laboratórios: Orientação Norte: 0,94; e

(e) Laboratórios: Orientação Sul 0,85.

Após a determinação do FLD e da uniformidade da iluminação natural na grade de pontos no plano de trabalho, foi possível verificar o atendimento às recomendações normativas e a autonomia das diversas regiões dos ambientes em relação ao sistema artificial de iluminação. Para isso, foram relacionados os níveis de iluminação exteriores e interiores ao longo do ano. Esses estudos visaram dar subsídios ao projeto de iluminação artificial, em favor de sua maior eficiência energética, estimando o tempo e a quantidade de iluminação artificial necessária para complementar os níveis mínimos, durante o período de ocupação, nos diferentes ambientes.

Como já observado, a referência da disponibilidade de luz diurna foi obtida utilizando-se o aplicativo *Climaticus*, que relaciona o nível mínimo em klux com a frequência de ocorrência das iluminâncias durante o período anual em valores percentuais, para um conjunto de cidades brasileiras. Essa relação é inversamente proporcional, pois, quando o nível exterior aumenta, diminui a frequência de ocorrência e vice-versa. O período de ocupação, segundo a programação de atividades da Petrobras, compreende os horários de 7h00 às 17h00, que é menor do que o período de horas de luz natural, do nascer ao pôr-do-sol. Por essa razão, a frequência de ocorrência para o período do projeto foi estimada como sendo aproximadamente 10% superior ao valor indicado no gráfico *Climaticus*, que considera a disponibilidade de luz natural no período total de um dia.

Algumas recomendações internacionais (DIN, 1985a; USGBC, 2002) adotam FLD mínimo de 2% para considerar um ambiente bem iluminado naturalmente. Considerando-se a maior disponibilidade de luz natural nos países tropicais, partiu-se de FLD de 2% recomendado para uma referência inicial, mas, para os ambientes com FLD abaixo desse valor de referência, adotou-se FLD mínimo de 1,5% como um valor aceitável. Nesses casos, para estabelecer o mesmo critério de avaliação, elevou-se a iluminância exterior até atingir um nível de iluminação equivalente ao FLD de 2% e, conseqüentemente, a frequência de ocorrência diminui conforme o gráfico da Figura 7.

Na Tabela 1, a coluna S mostra o percentual da área do ambiente onde o nível de referência é atingido, e a coluna FO indica a frequência de ocorrência das iluminâncias exteriores necessárias

para atingir os três níveis adotados de iluminação interior. Observa-se no Prédio Central que a faixa do ambiente próximo às aberturas (faixa exterior) atinge FLD de 2% em toda a superfície, correspondendo a uma iluminância interior (Eint) acima de 300 lux e exterior (Eext) acima de 15.000 lux, com frequência de ocorrência (FO) de 85% do período anual. Já na faixa afastada das aberturas (faixa interior), o FLD de 2% só abrange 20% da superfície, aumentando para 30% ao se considerar o FLD de 1,5%. Quando se aumenta Eint para 500 lux ou 750 lux, Eext passa respectivamente para 25.000 lux e 37.500 lux, diminuindo FO para 70% e 55% na linha FLD de 2%. Nota-se ainda que esses valores se alteram para o FLD de 1,5%.

Este estudo foi elaborado para todos os edifícios do complexo, além do Prédio Central e dos Laboratórios, incluindo alguns edifícios que seguem a tipologia do edifício industrial, com a cobertura em *shed* (não apresentados neste artigo), possibilitando o diagnóstico da distribuição da luz natural nos ambientes e orientando o escalonamento do sistema artificial para suprir e complementar as regiões que não atingiram os níveis de iluminação necessários. Dessa forma, também pode ser estimado o impacto do aproveitamento da luz natural no consumo energético dos edifícios.

As diretrizes para o aproveitamento e o controle da luz natural aplicadas na fase projetual contribuíram para a expressão arquitetônica do complexo, interferindo nas diversas instâncias que envolvem a concepção do espaço e o bem-estar humano. Assim, intervenções do âmbito do conforto ambiental favoreceram o resultado arquitetônico e reforçaram a tese de sua compatibilidade, ou melhor, de intrínseca correspondência com o projeto arquitetônico.

Considerações finais

Para o aproveitamento eficaz da luz natural aplicou-se o conceito de Iluminação Artificial Suplementar Permanente – *P.S.A.L.I. Permanent Supplementary Artificial Lighting of Interiors* (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975), que propõe delimitar zonas de iluminação com diferentes opções de controle. Dessa forma, tanto a disposição das luminárias como seus acionamentos foram dimensionados em função dessas zonas, definidas pela disponibilidade de luz natural no ambiente, ou seja, acompanhando as curvas isolux determinadas pelas simulações computacionais. Diversamente do que foi estabelecido para o sistema de ar-condicionado, as diretrizes de projeto apresentadas pela Petrobras para o sistema de iluminação artificial não foram

detalhadas quanto ao aproveitamento dos recursos naturais e ao desempenho energético.

Por outro lado, o projeto de iluminação artificial não apenas explorou a interação com a luz natural, mas também foi estruturado com base em conceitos de qualidade e eficiência energética de seu próprio sistema. Para o projeto de iluminação artificial nos ambientes de trabalho do Prédio Central e dos Laboratórios, o principal desafio foi acompanhar a disponibilidade da luz natural nos espaços internos e suas variações. Além da compensação dos níveis de iluminação durante o período diurno por todo o ano, o conceito adotado no projeto de iluminação artificial abrangeu a preocupação com a qualidade do espectro, que possui relação direta com o bem-estar humano. Nesse sentido, as variações de composição da luz natural, conforme os ciclos diários e anuais, foram reproduzidas pelo sistema artificial, com a introdução da tecnologia LED (*Light-Emitting Diodes / Diodos Emissores de Luz*).²

O aproveitamento da iluminação natural em correspondência com o sistema artificial mostrou significativo impacto na eficiência energética dos edifícios, como pode ser observado na Tabela 1. Mesmo considerando-se a sazonalidade própria da luz natural, implicando períodos com excesso de iluminação no Rio de Janeiro, a eficácia luminosa da luz natural supera a das fontes artificiais mais eficientes utilizadas em escritórios, pois a eficácia luminosa do céu claro está entre 100 lm/W e 140 lm/W e a do céu encoberto entre 100 lm/W e 130 lm/W (PEREIRA, 1992, p. 218) enquanto a eficácia luminosa das lâmpadas fluorescentes está entre 55 lm/W e 90 lm/W. Portanto, pode-se trabalhar com a luz natural em uma faixa um pouco maior de variação, sem aumentar a carga térmica no ambiente, em comparação com o sistema artificial.

Retomando a discussão sobre a arquitetura e o aproveitamento da iluminação natural, neste projeto não foram aplicadas soluções inovadoras em iluminação natural, como dutos de luz, painéis prismáticos, painéis cortados a laser ou forro *plenum* refletivo. Embora tais sistemas apresentem potencial para otimizar a iluminação natural no ambiente, ainda envolvem, em geral, certa complexidade tecnológica e custos elevados, justificando, por vezes, sua aplicação pós-obra, o que os torna uma alternativa viável para remediar deficiências do projeto arquitetônico. Isso não quer dizer que a aplicação dessas tecnologias é mais barata pós-obra, mas que podem ser a única

² Esse trabalho foi elaborado pela projetista do sistema de iluminação artificial, não sendo objeto de detalhamento neste artigo.

alternativa nessas condições. Dentro dos princípios da arquitetura bioclimática, optou-se por obter o máximo proveito das soluções arquitetônicas clássicas, como o posicionamento estratégico das aberturas, proteção solar otimizada, elementos criadores do efeito de bandejas de luz, cores claras e outras. Além disso, lançou-se mão de complementos por meio de recursos da tecnologia de ponta, a fim de satisfazer as exigências do conforto ambiental e da eficiência energética.

Dessa forma, a pesquisa e a inovação no projeto do complexo CENPES II estão no processo adotado, integrando as diversas equipes envolvidas com as decisões arquitetônicas. Alguns aspectos indesejáveis observados, como as orientações leste e oeste predominantes nas aberturas do Prédio Central, foram resultado da opção que favoreceu a implantação das alas dos Laboratórios, as quais definiram um perímetro mais extenso contendo as construções com maior complexidade de instalações. Assim, mesmo as questões desfavoráveis inevitáveis estabeleceram-se dentro do gerenciamento, controle e integração das diversas facetas implicadas, incorporando na concepção arquitetônica as soluções mais adequadas para contorná-las.

A cobertura dos Laboratórios, dando suporte a um sistema de aproveitamento da energia solar, ilustra o conceito de uma arquitetura preparada para as inovações tecnológicas adotando soluções clássicas. Tal procedimento permitiu incorporar a necessidade de ampliação do piso técnico contendo as instalações, assimilando seus impactos na iluminação natural com soluções simples e econômicas.

Quando necessário, os avanços tecnológicos disponíveis foram aplicados, como cobertura de vidro verde laminado com tela metálica e caixilhos unitizados, configurando “fachadas entre vãos compostas por estrutura metálica, revestidas na altura do peitoril com painéis de concreto pré-moldado e vidros nos vãos livres” (ZANETTINI; GARCIA, 2006).

A postura de projeto em equipe adotada no projeto CENPES II e os resultados obtidos, em relação ao binômio clima/arquitetura, reforçam a importância em se considerar suas implicações nas fases iniciais, que definem o partido arquitetônico. Com essa abordagem, aplicam-se as inovações tecnológicas como suporte, e não como solução independente de todo o processo.

Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15215-3**: iluminação natural: parte 3: procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural em ambientes internos. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5413**: iluminância de interiores. Rio de Janeiro, 1991.

ALUCCI, Márcia. **Climaticus Versão 1.0s**. São Paulo, LABAUT-FAUUSP (Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética, Departamento de Tecnologia da Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo). São Paulo, 2003.

COMMISSION INTERNATIONALE DE ÉCLAIRAGE. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **CIE S 011E:2003 / ISO 15469:2004(E)**: spatial distribution of daylight: CIE Standard general sky. 2003. 7 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 5034**: daylight in interiors: part 1 u. 2. Berlin, 1985a.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 5035**: artificial light of interiors: part 1 u. 2. Berlin, 1985b.

HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE. **Iluminação Natural**. Lisboa: Fundação Kalousté Gulbenkian, 1975.

IDMP-CIE. **International Daylight Measurement Programme / Commission Internationale de l'Eclairage**. Disponível em: <<http://idmp.entpe.fr/home.html-ssi>>. Acesso em: 06 out. 2006.

KITLER, R.; PEREZ, R.; DARULA, S. A New Generation of Sky Standards. In: PROC. LUX EUROPA CONFERENCE, Amsterdam, 1997. **Anais...** Amsterdam: CIE, 1997. p. 359-73. 1 CD-ROM.

KITLER, R.; PEREZ, R.; DARULA, S. **A Set of Standard Skies Characterising Daylight Conditions for Computer and Energy Conscious Design**. Bratislava: Polygrafia, 1998. (Final report of the U.S.-Slovak Grant Project US-SK 92 052)

LABAUT. **CENPES-II, Arquitetura e Eco-eficiência**: clima, insolação e índices de conforto. (Relatório técnico de acesso restrito, etapas 2-3/Technical Report, phases 2-3). São Paulo: FAUUSP, 2004a.

LABAUT. **CENPES-II, Arquitetura e Eco-eficiência**: conforto e desempenho luminoso das edificações II. (Relatório técnico final de acesso restrito, etapas 2-4/Technical Report, fases 2-4). São Paulo: FAUUSP, 2004b.

MARDALJEVIC, J. **Daylight Simulation**: validation, sky models and daylight coefficients. 1999. 313 f. Tese (PhD em Filosofia) – Institute of Energy and Sustainable Development, De Montfort University Leicester. 1999. 313 p.

PEREIRA, F. O. R. **Luminous and Thermal Performance of Window Shading and Sunlighting Reflecting Devices**. 1992. 301 f. Tese (Doutorado em Filosofia) - Building Science Unit School of Architectural Studies, University of Sheffield, UK, 1992.

PEREZ, R.; SEALS, R.; MICHALSKY, J. All-Weather Model for Sky Luminance Distribution - Preliminary Configuration and Validation. **Solar Energy**, v. 50, n. 3, 1993. p. 235-45.

TREGENZA, P. R. Standard Skies for Maritime Climates. **Lighting Research and Technology**, v. 31, n. 3, 1999. p. 97-106.

UNITED STATES GREEN BUILDING COUNCIL. **Green Building Rating System (LEED-NC)**, version 2.1. 2002.

ZANETTINI, S.; GARCIA, J. W. **Centro de Pesquisas Petrobras**. 2006. Disponível em: <<http://www.arcoweb.com.br/tecnologia/tecnologia76.asp>>. Acesso em: 19 dez. 2006.

Agradecimentos

Agradecimentos aos arquitetos Bruna Luz, Luciana Ferreira e Rodrigo Cavalcante, da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, pelo apoio técnico na realização das simulações. Agradecimentos também à especialista em iluminação artificial Ester Stiller, pelas informações a respeito do projeto de iluminação artificial do CENPES II. Agradecimentos aos arquitetos Siegbert Zanettini e Érika Bataglia, da empresa Zanettini Arquitetura S.A., pela colaboração ao longo dos trabalhos de desempenho ambiental e pelas imagens cedidas para esta publicação. Finalmente, agradecimentos à Petrobras S.A., pelo apoio durante o desenvolvimento do projeto de ecoeficiência do CENPES II e pela autorização para a publicação das informações apresentadas neste artigo.