

Conforto térmico como condicionante do projeto arquitetônico-paisagístico: o caso dos espaços abertos do novo centro de pesquisas da Petrobras no Rio de Janeiro, CENPES II

Thermal comfort as assumption for architectonic landscape design: the case of outdoor spaces of the Petrobras New Research Center in Rio de Janeiro, CENPES II

Leonardo Marques Monteiro
Denise Duarte
Joana Soares Gonçalves
Marcia Peinado Alucci

Resumo

Este artigo apresenta o estudo de conforto térmico em espaços abertos para o Novo Centro de Pesquisas da Petrobras, no Rio de Janeiro, CENPES II, que foi parte de um projeto maior de pesquisa e consultoria que envolveu questões ambientais e arquitetônicas. O projeto arquitetônico foi objeto de um concurso nacional de projeto, cujo complexo arquitetônico contemplou dez tipologias de edifícios, constituindo a expansão do centro de pesquisas existente, o CENPES I, que data da década de 1970. Os espaços abertos foram incorporados na proposta como lugares para permanência prolongada, além de serem espaços de passagem e acesso, ressaltando-se a importância da interação entre arquitetura e clima para o conforto do usuário. A diversidade das soluções arquitetônicas e paisagísticas criou uma variedade de espaços abertos em que as condições de conforto térmico foram detalhadamente verificadas. Os métodos empregados basearam-se na Temperatura Neutra Exterior e na Nova Temperatura Efetiva, para aplicação de um modelo adaptativo. Os resultados mostraram que ventilação adequada e, principalmente, sombreamento são absolutamente necessários, agregando valor a esses espaços e, conseqüentemente, à arquitetura do complexo, que teve como ponto de partida a inserção climática e a valorização dos espaços. Em geral, os espaços abertos estudados apresentaram condições de conforto térmico satisfatórias, devidas principalmente à adequada consideração de estratégias de ventilação e sombreamento no projeto arquitetônico e paisagístico e também dos edifícios.

Palavras-chave: Conforto térmico. Modelo preditivo. Espaços abertos. Paisagismo. Arquitetura.

Abstract

This paper presents the outdoor thermal comfort study for the Petrobras New Research Centre, in Rio de Janeiro, CENPES II, which was part of a bigger research and consultancy project involving environmental and architectural issues. The architectural design was the subject of a national competition, encompassing ten types of buildings, which represented the expansion of the existing research centre, CENPES I, dating from 1970s. Open spaces were incorporated in the proposal as places for long permanence, raising the importance of the interaction between architecture and climate. The diversity of architectural and landscape solutions created a variety of open spaces where thermal comfort needed to be verified. The methods were based on Outdoor Neutral Temperature and New Effective Temperature for the application of an adaptive model. Ventilation and especially shadows proved to be absolutely necessary. Overall, the open spaces studied showed satisfactory thermal comfort, especially due to the consideration of ventilation and shading strategies in the design of the open spaces and the buildings.

Keywords: Thermal comfort. Predictive model. Open spaces. Landscape design. Architecture.

Leonardo Marques Monteiro
Departamento de Tecnologia da
Faculdade de Arquitetura e
Urbanismo
Universidade de São Paulo
Rua do Lago 876, Cidade
Universitária
São Paulo - SP - Brasil
CEP 05508-080
Tel.: (11) 3091-4538
E-mail: leo4mm@gmail.com

Denise Duarte
Departamento de Tecnologia da
Faculdade de Arquitetura e
Urbanismo da Universidade de São
Paulo
E-mail: dhduarte@terra.com.br

Joana Gonçalves
Departamento de Tecnologia da
Faculdade de Arquitetura e
Urbanismo da Universidade de São
Paulo
E-mail: jocarch@usp.br

Marcia Peinado Alucci
Departamento de Tecnologia da
Faculdade de Arquitetura e
Urbanismo da Universidade de São
Paulo
E-mail: marcialu@usp.br

Recebido em 17/06/08
Aceito em 12/12/08

Introdução

Este artigo apresenta os conceitos, as avaliações e as recomendações referentes ao conforto térmico em espaços abertos para o desenvolvimento do projeto arquitetônico e paisagístico do novo Centro de Pesquisas da Petrobrás (CENPES II), no Rio de Janeiro, com foco nos espaços abertos.

O projeto arquitetônico é de autoria de Zanettini Arquitetura S.A., com co-autoria de José Wagner Garcia. O complexo de edifícios apresenta área de 100.000 m², com laboratórios, escritórios, um centro de convenções, restaurantes, oficinas, um edifício para a equipe de manutenção, e outras atividades, totalizando nove usos distintos, que complementam o centro de pesquisas existente (CENPES I). O projeto em questão foi ganhador de um concurso realizado por meio de carta-convite a quatro escritórios de arquitetura em 2004, tendo sido iniciada sua construção em 2007, com previsão de conclusão em 2011.

Esse é, certamente, o primeiro complexo arquitetônico da arquitetura contemporânea brasileira de grande porte a incorporar conceitos de desempenho ambiental já nas etapas iniciais do projeto, com importância para a definição do partido arquitetônico. O edital do concurso pedia uma proposta que estivesse inserida no contexto climático e de menor impacto ambiental de uma forma geral, sendo classificada pela Petrobras de eco-eficiente, com menções ao desempenho ambiental e energético dos edifícios. A elaboração do edital, que trazia as questões de desempenho ambiental como mandatórias, contou com a colaboração dos pesquisadores do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (Labeee), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Nesse contexto de exigências e expectativas por uma arquitetura de melhor desempenho ambiental, a valorização dos espaços abertos na concepção geral do novo centro de pesquisa veio da idéia de se criar uma arquitetura que respondesse ao clima e à cultura do lugar, em que a paisagem natural convida o usuário a usufruir dos espaços abertos. Contudo, tendo em vista o rigor do clima local, para alcançar tal propósito seria necessário um trabalho de tratamento cuidadoso desses espaços, com vistas ao conforto térmico.

Tomando-se como base as condições de exposição à insolação e aos ventos, somadas às vistas da Baía de Guanabara, e a intenção de promover um ambiente de encontros e vivência do espaço externo, o partido arquitetônico trouxe uma composição horizontal, de edifícios conectados por espaços abertos e de transição entre interior e exterior. Enquanto o paisagismo inspirou-se na memória da vegetação nativa, sendo essa a Mata Atlântica e a Restinga, a arquitetura dos edifícios caracterizou-se pelo sombreamento de coberturas e fachadas, cores claras, isolamento térmico da envoltória, ventilação natural (sempre que possível, de acordo com as exigências da função, com as condições climáticas e com as exigências do conforto térmico) e captação da luz difusa.

Os estudos de desempenho ambiental dos edifícios e dos espaços abertos foram desenvolvidos em um contexto simultâneo de consultoria e pesquisa, por membros do Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética (LABAUT) do Departamento de Tecnologia da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAUUSP). Buscou-se desenvolver, desde as etapas iniciais de projeto, uma abordagem integrada com os diversos agentes envolvidos no processo, de forma a propiciar o desenvolvimento de soluções ambientalmente responsáveis e condizentes com o contexto (LABAUT, 2005). Nesse sentido, este artigo é o primeiro de uma série de três, que apresenta aqui questões relativas aos espaços abertos do empreendimento, seguido por um artigo que aborda o desempenho térmico das edificações e, finalmente, por um terceiro artigo, que considera as questões de iluminação dos ambientes.

As premissas projetuais do projeto paisagístico, desenvolvido após a etapa do concurso por Benedito Abbud Arquitetura Paisagística Ltda., seguiram os princípios definidos ainda na fase do concurso, que davam primazia para a restauração da Mata Atlântica e da Restinga, as quais, juntamente com o tema da água, tornaram-se as questões centrais do projeto paisagístico. A Figura 1 mostra um esquema geral da implantação do conjunto, e a Figura 2 apresenta uma imagem de seu modelo físico.

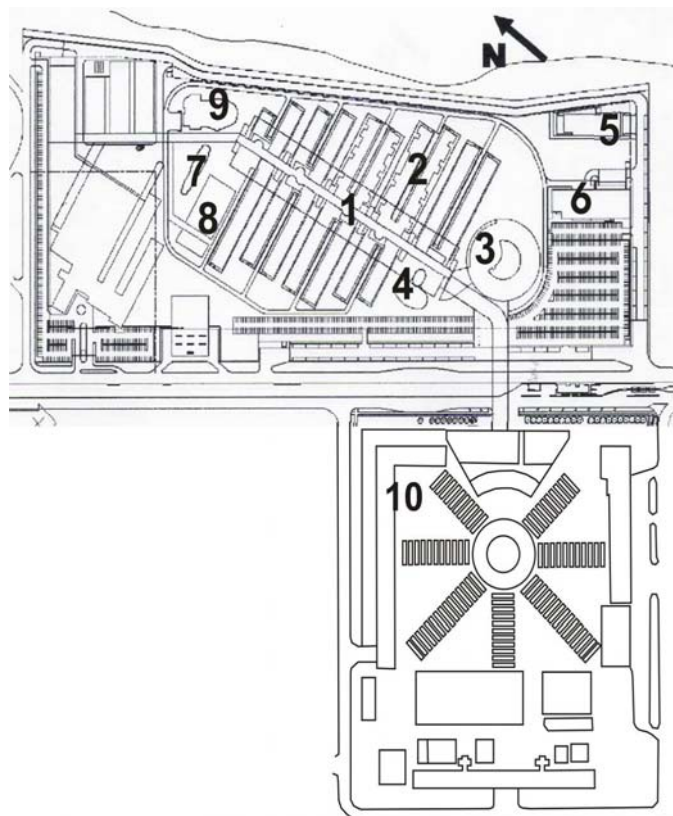


Figura 1 - Implantação do conjunto do novo centro de pesquisas da Petrobras: (1) Edifício Central, (2) Laboratórios, (3) Centro de Convenções, (4) Laboratório de Realidade Virtual, (5) Empreiteirópolis, (6) Edifício de Apoio e Manutenção, (7) Orquidário, (8) Planta Piloto, (9) Restaurante, (10) CENPES I.



Fonte: Zanettini Arquitetura S.A.

Figura 2 - Modelo físico do novo centro de pesquisas da Petrobrás no Rio de Janeiro (CENPES II) visto do sudeste.

Com relação à abordagem de conforto térmico adotada neste trabalho, algumas considerações devem ser feitas. Grande parte dos trabalhos de pesquisa em conforto objetiva aplicações para ambientes fechados, uma vez que as condições climáticas internas são mais controladas e passíveis de intervenções com sistemas passivos e ativos usuais de condicionamento térmico. Já nos espaços abertos, as variáveis climáticas são também passíveis de condicionamento, mas o controle é substancialmente menor, devido à ausência, parcial ou total, de confinamento.

Essa ausência de confinamento leva a certas especificidades: a necessidade de consideração do ganho de irradiância solar, a importância da ação do vento conjugada com a incerteza de sua ação e a impossibilidade de intervenções de controle efetivo, baixo controle das variáveis temperatura e umidade do ar devido ao transporte de massa e energia proporcionado por ação dos ventos, e diferentes anseios de conforto térmico devido à heterogeneidade de indivíduos e atividades. Deve-se citar ainda mais uma dificuldade: a questão da aclimação dos indivíduos, que acaba por gerar a necessidade de estudos experimentais mais complexos do que em ambientes fechados, uma vez que se tem menor controle das variáveis. Devido a essas dificuldades apresentadas, existem poucos trabalhos que abordam o conforto térmico especificamente em espaços abertos. Ainda assim, grande parte dos modelos preditivos existentes para tal fim deriva de modelos para espaços fechados ou são analogias de situações típicas destes (MONTEIRO, 2008).

As primeiras pesquisas para o estabelecimento de um índice para predição de conforto são os trabalhos empíricos de Temperatura Efetiva (ET), de Houghten e Yaglou (1923), de Nova Temperatura Efetiva (ET*), de Vernon e Warner (1932), e de Temperatura Resultante (RT), de Missenard (1948). A primeira tentativa de prever o estresse térmico em situações de trabalho mais extremas foi por meio do Índice de Taxa de Suor Prevista para Quatro Horas, de McAriel *et al.* (1947). Esses quatro índices foram divulgados na forma de nomogramas, visando a facilitar seu uso, não tendo sido suas equações originalmente publicadas.

A Temperatura de Globo e de Bulbo Úmido (WBGT), de Yaglou e Minard (1957), é até hoje utilizada devido à simplicidade de obtenção de dados. O Índice de Temperatura Resfriada pelo Vento (WCI), de Siple e Passel (1945), o Índice Equatorial de Conforto (EC), de Webb (1960), e o Humidex, de Masterton e Richardson (1979), consideram de forma simplificada apenas algumas

variáveis, visando a responder a determinadas situações específicas. O Índice de Estresse Térmico por Calor (HSI), de Belding e Hatch (1955), e o Índice de Estresse Térmico (ITS), de Givoni (1969), são os primeiros índices embasados em modelos analíticos, que consideram separadamente os diversos processos de trocas térmicas. Contudo, para a determinação analítica das trocas, são empregadas equações experimentais.

A Nova Temperatura Efetiva Padrão (SET*), de Gagge *et al.* (1967), é obtida também por meio de modelo analítico, mas, nesse caso, apresenta modelagem de dois nós do corpo humano, considerando as trocas entre o core central e a região periférica do corpo e desta com o ambiente externo. O Voto Médio Estimado (PMV), proposto por Fanger (1972) e adotado pela ISO 7730 (2005), é calculado com base no índice de atividade térmica, por meio de balanço térmico do corpo, com modelagem de um nó. O Modelo Climático de Michel (KMM), de Jendritzky *et al.* (1979), também é baseado em balanço térmico de um nó. Os critérios para níveis de sudação em espaços externos da Expo de Sevilha, de Dominguez *et al.* (1992), são também estabelecidos a partir de modelo analítico teórico. Esses autores utilizam metodologia semelhante à da ISO 7933 (1989), mas adotando-se critérios para necessidades específicas. A Fórmula de Conforto (COMFA), de Brown e Gillespie (1995), é mais um modelo analítico de balanço térmico, constituído por um nó e com escala de valores simplificada.

A Temperatura Neutra Exterior (T_{ne}), de Aroztegui (1995), é uma abordagem diferenciada a partir do modelo adaptativo de Humphreys (1978), baseando-se experimentalmente na adaptação dos indivíduos a determinado clima. Essa abordagem é recente nos estudos de espaços externos, mas já está mais desenvolvida para espaços climatizados ou naturalmente ventilados (DE DEAR *et al.*, 1997), tendo inclusive sido incorporada a normatizações (ASHRAE, 2004).

Com relação às pesquisas realizadas na última década, têm-se os trabalhos empíricos de Givoni e Noguchi (2000), que propõem o Índice de Sensação Térmica (TS), desenvolvido a partir de experimentos em um parque da cidade de Yokohama, no Japão. Há ainda os estudos de Nikolopoulou (2004), que propõem o Voto Real de Sensação (ASV), desenvolvido por meio do projeto RUROS, em sete diferentes cidades europeias. As pesquisas experimentais de Bluestein e Oszewski (2002), que levaram à determinação da Nova Temperatura Resfriada pelo

Vento (NWCT), também correlacionam variáveis visando a atender necessidades específicas. Blazejczyk (1996) propõe o modelo MENEX, de apenas um nó, mas que fornece cinco índices distintos. Höppe (1999), com o Modelo de Munique (MEMI), de dois nós, busca uma melhor descrição das trocas termofisiológicas, propondo ainda a Temperatura Equivalente Fisiológica (PET). Pickup e De Dear (2000) propõem a Temperatura Efetiva Padrão Externa (OUT-SET*), considerando a irradiância por meio de um modelo próprio (OUT-MRT). Posteriormente, Jendritzky (2003) revisa seu Modelo de Michel (KMM) e propõe a Nova Temperatura Percebida (PT*).

Em diversos desses trabalhos, verifica-se a tendência em utilizar temperaturas equivalentes de sensação térmica. A Comissão 6 da Sociedade Internacional de Biometeorologia (ISB, 2006) confirma essa tendência em seu Índice Termoclimático Universal (UTCI), que será padronizado em unidades de temperatura. Contudo, haverá escalas de conforto e de alerta de perigo estabelecidas regionalmente, uma vez que se reconhece que a adaptação e a aclimação são aspectos importantes na interpretação do conforto e no estabelecimento de critérios de perigo. Os trabalhos da referida comissão ainda estão em desenvolvimento, não tendo sido determinados o modelo e alguns dos parâmetros a serem empregados (MONTEIRO; ALUCCI, 2007). Considerando-se as duas questões centrais aqui explicitadas – o reconhecimento da importância das questões de adaptação e aclimação e a tendência em se utilizarem temperaturas equivalentes, este trabalho utiliza-se de modelo adaptativo de temperatura equivalente para a avaliação dos espaços externos, conforme se detalha a seguir.

Assim, neste artigo, inicialmente são apresentados os métodos, baseados no modelo adaptativo de Temperatura Neutra Exterior de Aroztegui (1995) e de Nova Temperatura Efetiva segundo as equações de Szokolay (2001). Na sequência, a base de dados climáticos estabelecida para a avaliação do novo Centro de Pesquisas da Petrobrás é referenciada. Com base no clima local, algumas alternativas gerais são definidas e testadas de acordo com os critérios de conforto térmico apresentados, visando a obter-se inicialmente um entendimento crítico das possibilidades e limitações das condições de conforto térmico em espaços abertos, dadas as condições climáticas locais. Indo em direção à avaliação propriamente dita das condições ambientais do projeto arquitetônico e paisagístico proposto, três tipologias de espaços abertos são estudadas em detalhe, por meio de simulações CFD e avaliações

de conforto, concluindo-se com a recomendação de soluções projetuais adequadas em termos de conforto térmico.

Métodos

Para o cálculo de conforto térmico em áreas externas utilizou-se o índice de temperatura neutra exterior (T_{ne}), proposto por Aroztegui (1995), o qual toma como referência o trabalho de Humphreys (1978), que propôs o conceito de Temperatura Neutra (T_n).

Humphreys (1978) define Temperatura Neutra (t_n) como sendo a temperatura ambiente considerada termicamente neutra pela população, em função das condições locais. O autor apresenta uma relação linear, válida para ambientes interiores, verificada entre a temperatura média mensal (t_{mm}) e a Temperatura Neutra (t_n), em situações em que a velocidade do ar é baixa e a temperatura radiante média (t_{rm}) é próxima à temperatura do ar. Assim, tem-se:

$$t_n = 17,6 + 0,31 \cdot t_{mm}, \quad (1)$$

onde:

t_n = Temperatura Neutra [°C]; e

t_{mm} = temperatura média mensal [°C].

A equação acima é válida para valores entre 18,5°C e 30,5°C e para indivíduos em atividade sedentária, usando roupas leves. Para outras atividades podem-se adotar as seguintes correções: (a) para trabalho leve ($M = 210$ W), menos 2 °C; (b) para trabalho moderado ($M = 300$ W), menos 4,5 °C; e (c) para trabalho pesado ($M = 400$ W), menos 7 °C.

Aroztegui (1995) propõe a Temperatura Neutra Exterior, definida com base nas mesmas variáveis que compõem a Temperatura Neutra Interna, definida anteriormente por Humphreys, incorporando também variáveis relativas à irradiância solar e à velocidade do vento.

Com relação a essas variáveis, o autor coloca que a primeira, em teoria, deve reunir não apenas a irradiância direta do sol, mas também a irradiância difusa e as reflexões do entorno. Com relação à segunda, coloca que ela é afetada no espaço e no tempo por acidentes aleatórios no nível do pedestre. Assim, afirma que essas variáveis são de difícil apreciação, sendo, dessa forma, necessário adotar determinadas simplificações. Assim, baseando-se no Índice de Estresse Térmico (ITS) de Givoni (1981), o autor propõe uma equação empírica que considera as variáveis características do exterior com relação à temperatura neutra interior.

Para uma taxa de sudção em atividade sedentária e adotando-se condições médias para as características do indivíduo e do entorno (com umidade relativa entre 35% e 65%), foi determinada a equação da temperatura neutra exterior:

$$t_{ne} = 3,6 + 0,31 \cdot t_{mm} + \{100 + 0,1 \cdot R_{dn} [1 - 0,52 (v \cdot 0,2 - 0,88)]\} / 11,6 \cdot v \cdot 0,3, \quad (2)$$

onde:

t_{ne} = Temperatura Neutra Exterior [°C];

t_{mm} = temperatura média mensal [°C];

R_{dn} = irradiância solar direta normal (W/m²); e

v = velocidade do ar (m/s).

A temperatura neutra exterior é calculada para uma temperatura média mensal, corrigida para uma umidade relativa do ar de 50%. Sendo assim, neste trabalho, utilizou-se a formulação da Nova Temperatura Efetiva para a correção dos valores de temperatura média mensal para um valor equivalente ao de uma situação com 50% de umidade relativa, ou seja, ao invés de se utilizar apenas o valor da temperatura média mensal do ar, utilizou-se o valor da temperatura média mensal em termos da Nova Temperatura Efetiva, que considera a temperatura e também a umidade do ar, fornecendo valores de temperatura equivalente, tendo como referência uma situação com 50% de umidade relativa. As definições e os procedimentos adotados para tanto são explicitados na sequência.

Segundo ASHRAE (2001), a Nova Temperatura Efetiva (TE^*) é a temperatura operativa de um ambiente a 50% de umidade relativa do ar, que causaria as mesmas trocas de calor sensível e latente que as experimentadas pelo usuário no ambiente em estudo, e é calculada pela equação abaixo (ASHRAE, 2001):

$$TE^* = t_o + w \cdot I_m \cdot LR \cdot (p_a - 0,5 \cdot p_{sTE^*}), \quad (3)$$

onde:

t_o = temperatura operativa [°C];

w = fração de pele úmida [adimensional];

I_m = índice de permeabilidade da roupa à umidade [adimensional];

LR = relação de Lewis;

p_a = pressão de vapor [kPa]; e

p_{sTE^*} = pressão de saturação na Nova Temperatura Efetiva [kPa].

A temperatura operativa (t_o) é a temperatura de um ambiente uniforme imaginário no qual um ocupante apresentaria as mesmas trocas térmicas

radiantes e convectivas que ele apresenta no ambiente não uniforme real. Numericamente, é a média entre a temperatura de bulbo seco (t_{bs}) e a temperatura média radiante (t_{rm}), ponderada pelos respectivos coeficientes de troca térmica (h_c e h_r). ASHRAE (2001) apresenta a equação:

$$t_o = h_r \cdot t_{rm} + h_c \cdot t_{bs} / (h_r + h_c), \quad (4)$$

onde:

t_{rm} = temperatura média radiante [°C];

t_{bs} = temperatura de bulbo seco [°C];

h_r = coeficiente de troca radiativa [W/m² °C]; e

h_c = coeficiente de troca convectiva [W/m² °C].

Neste trabalho, para o cálculo de TE^* , assumiu-se, utilizando o proposto por Szokolay (2001), que a nova temperatura efetiva é dada por retas na carta psicrométrica, passando pelo ponto onde a umidade relativa corresponde a 50% para aquela temperatura. A inclinação dessas retas é igual a $0,023 \cdot (TE^* - 14)$, caso $TE^* < 30$, e $0,028 \cdot (TE^* - 14)$, para $TE^* > 30$. Desse modo, tendo-se a temperatura operativa e a umidade absoluta de um ponto, é possível, por meio de cálculo iterativo, encontrar a nova temperatura efetiva para aquela condição.

Para as variáveis climáticas, considerou-se que a temperatura radiante média é numericamente equivalente à temperatura do ar ($t_{rm} \approx t_{bs}$). Essa aproximação é válida admitindo-se que o entorno imediato não possua superfícies com altas temperaturas, fato conseguido com o sombreamento das fachadas e com a adoção predominante de pisos vegetados. Ressalta-se que valores mais realistas poderiam ser obtidos com o cálculo das temperaturas radiantes médias para cada situação, considerando-se para as diversas superfícies a absorvância, a irradiância e o fator de forma. Contudo, no estudo realizado, foi considerada a simplificação indicada. A importância da consideração dos valores de temperatura radiante média para situações específicas é aqui ressaltada, visando ao desenvolvimento de trabalhos futuros.

Por outro lado, deve-se ter em mente que o índice de conforto adotado é o de Temperatura Neutra Exterior, que considera apenas a temperatura média mensal, a irradiância solar direta normal e a velocidade do ar, conforme definidos por Aroztégui (2005). Dessa forma, a utilização concomitante da nova temperatura efetiva vem a contribuir preponderantemente considerando-se o efeito da umidade do ar nas condições de conforto, efeito o qual não era considerado pelo índice de Aroztégui. Ressalta-se que a consideração da temperatura radiante média seria um acréscimo,

uma vez que se reconhece que a consideração apenas da irradiância solar direta normal acaba por subestimar os ganhos térmicos por radiação devido à existência principalmente da radiação difusa, mas também da radiação refletida e da radiação emitida por superfícies aquecidas. Este trabalho apresenta, então, como contribuição específica, o acréscimo da consideração da umidade do ar no referido índice. Com relação à temperatura radiante média, ainda que ela tenha importante papel, principalmente nas situações em que haja uma exposição maior às fontes de radiação térmica anteriormente mencionadas, a mesma não foi dimensionada neste trabalho, considerando-se que, devido ao sombreamento e à proteção das fachadas, o fator de visão de céu é baixo e as áreas remanescentes que possivelmente estejam ensolaradas apresentam pequenos valores de fator de forma.

Assim, neste trabalho, assumiu-se que a temperatura operativa é numericamente igual à temperatura do ar ($t_o = t_{bs}$). São então calculadas as novas temperaturas efetivas externas para cada hora do ano, assumindo-se que $t_o = t_{bs}$. A nova temperatura efetiva usada no cálculo de t_{ne} é a temperatura média de todas as horas dos últimos 30 dias. Conforme se pode verificar, a utilização da nova temperatura efetiva, ainda que desconsiderando o cálculo da temperatura radiante média, apresenta valores mais restritivos para a avaliação do índice de temperatura neutra exterior, uma vez que considera os elevados valores de umidade do clima do Rio de Janeiro.

Adotando-se uma faixa de tolerância de $\pm 2,5^\circ\text{C}$ para essa temperatura, 90% dos ocupantes ou mais estariam satisfeitos com as condições térmicas do ambiente. Admitindo-se uma tolerância de $\pm 3,5^\circ\text{C}$, obter-se-ia um índice de satisfação de 80%. Neste estudo adotou-se a faixa de tolerância mais restritiva, trabalhando-se com um índice de satisfação superior a 90% dos ocupantes.

Base de dados climáticos

O novo centro de pesquisas da Petrobrás está localizado na cidade do Rio de Janeiro, latitude 22.53S, longitude 43.17W, mais precisamente na Ilha do Fundão, ao nível do mar. O Laboratório de Meteorologia Aplicada a Sistemas de Tempo Regionais, do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (MASTER/IAG/USP), forneceu os dados da estação meteorológica do Aeroporto Internacional Antonio Carlos Jobim, que é a estação meteorológica mais próxima disponível.

Os dados considerados foram: temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, pressão

atmosférica, velocidade e direção do vento, para os anos de 1998 a 2004 (METAR, 2005). Os mesmos dados, para os anos de 2002 a 2004 podem ser encontrados na base de dados climáticos do software de domínio público EnergyPlus, desenvolvido pelo DOE (2004).¹ Para o cálculo dos dados de irradiância solar foi utilizado o modelo de interpolação tridimensional de distância inversa de Shepard, segundo Zelenka *et al.* (1992), considerando-se ainda o desconto de distância norte-sul proposto por Wald e Lefèvre (2001), utilizando-se o aplicativo Meteonorm 5.0 (METEOTEST, 2003).

Os dados dos anos de 1998 e 1999 não foram considerados, pois, nesse período, foram feitas apenas quatro medições diárias. Optou-se, então, por evitar a interpolação de valores para a obtenção de bases horárias. Portanto, considerando-se os dados horários de 2000 a 2004, valores horários médios de temperatura e umidade do ar foram estabelecidos com base nas temperaturas de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido e pressão atmosférica. Para os valores de velocidade e direção do vento, os valores registrados mais próximos ou coincidentes foram utilizados, considerando-se frequência de ocorrência para cada 45° .

Assim, um ano de referência foi criado com 8.760 horas para cada variável. Pode-se observar que o ano de referência adotado é significativamente representativo das condições climáticas registradas especificamente no período de 2000 a 2004. Em discussão com o cliente, Petrobrás, ficou acordado que seriam utilizados esses dados recentes para o estabelecimento da base de dados climáticos, uma vez que o banco de dados TRY (LABEEE, 2005) apresentava temperaturas do ar consideravelmente mais baixas do que as verificadas nos anos imediatamente anteriores.

Apenas para efeito de comparação, deve-se citar que a temperatura média anual da referida base de dados TRY é de $23,6^\circ\text{C}$, sendo a temperatura média anual obtida pelo método recém-apresentado de $24,4^\circ\text{C}$. Com relação à taxa de umidade, tem-se a média de 15,0 g vapor/kg de ar úmido na base TRY e 15,8 g vapor/kg de ar úmido na base estabelecida. A velocidade média do ar é de 2,8 m/s na base TRY contra 3,0 m/s na base aqui proposta. Por fim, a irradiância direta normal

¹ Os dados encontram-se disponíveis na página <http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus>. Para tanto, seleciona-se "Weather data", "Real-Time Weather data", "Search", "Weather station list", "Country", "Brazil Rio de Janeiro Aeroporto" e o período desejado. Em nossa última visita à página (em 17/08/2008), estavam disponíveis os dados de 02/14/2002 02:00PM a 08/14/2008 06:00PM.

média na base TRY é de 156 W/m^2 contra 193 W/m^2 na base em utilização. Conforme se pode observar, exceto pela velocidade média do vento, que apresenta valores ligeiramente superiores aos da base TRY, as demais variáveis apresentam valores mais rigorosos para a avaliação das

condições térmicas do clima quente e úmido do Rio de Janeiro.

Para elucidar os dados utilizados, as Figuras 3 a 6 apresentam, respectivamente, os dados de temperatura do ar, taxa de umidade, velocidade do vento e irradiância global sobre plano horizontal da base de dados climáticos em questão.

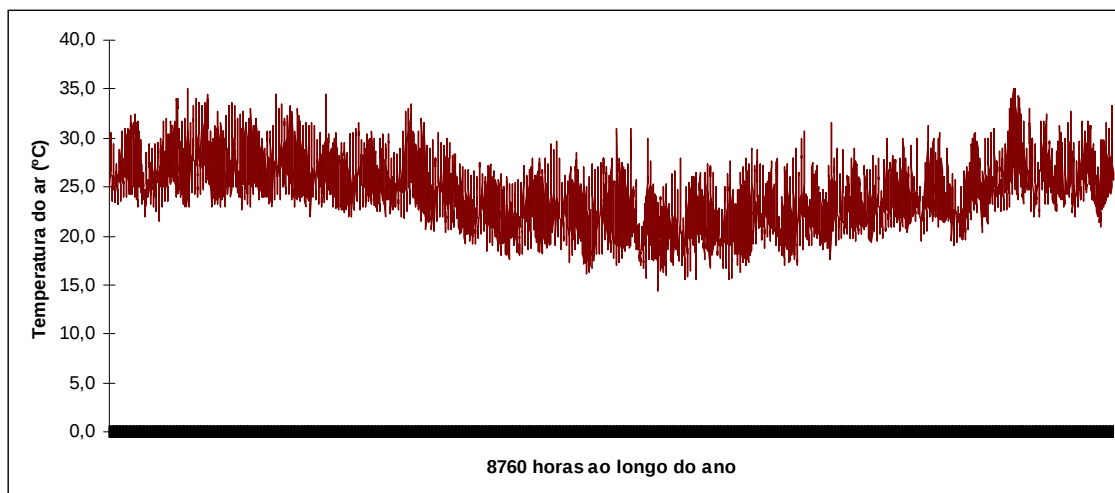


Figura 3 – Temperatura do ar ao longo do ano de referência

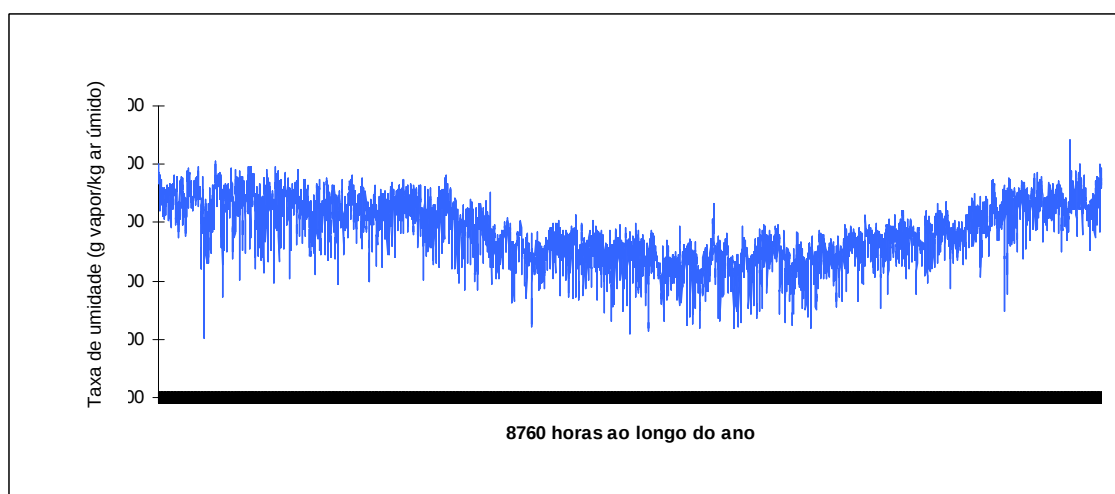


Figura 4 – Taxa de umidade ao longo do ano de referência

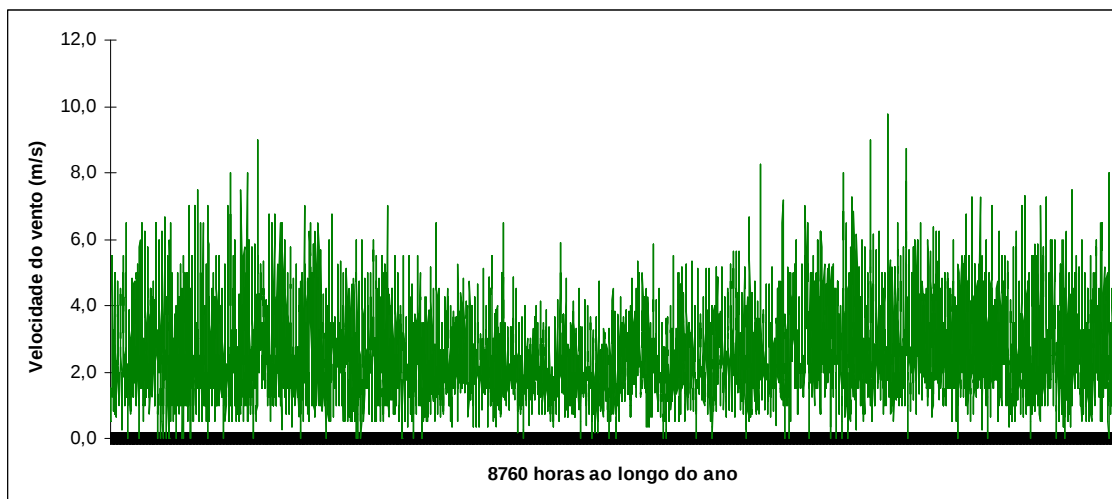


Figura 5 – Velocidade do vento ao longo do ano de referência

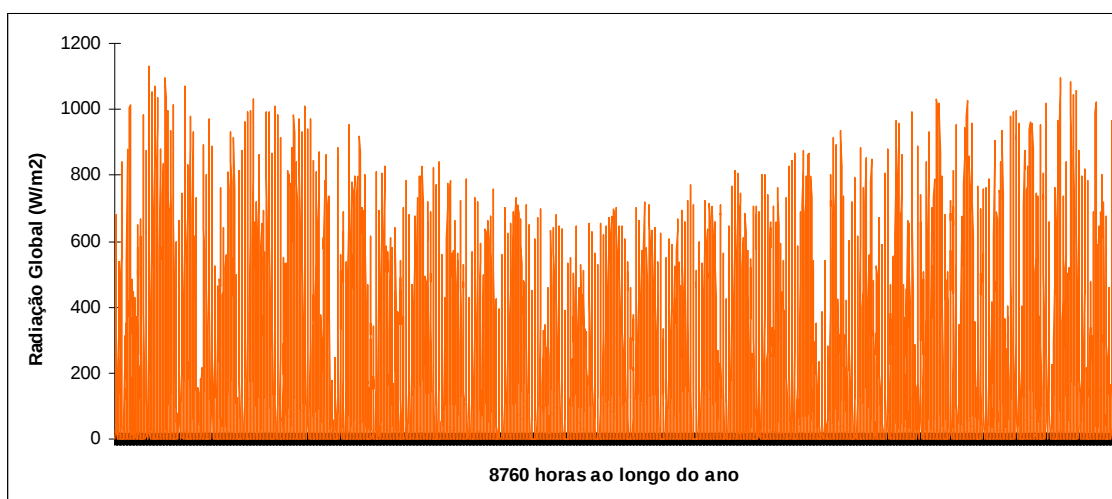


Figura 6 – Irradiância global sobre plano horizontal ao longo do ano de referência

Alternativas gerais

Devido à diversidade de configurações previstas no projeto para as áreas abertas, foram analisadas inicialmente nove alternativas para a avaliação do conforto térmico nos ambientes externos:

- (a) 100% da intensidade da irradiância solar incidente e 100% da velocidade do ar (rv);
- (b) 50% da intensidade da irradiância solar incidente e 100% da velocidade do ar ($r*v$);
- (c) 100% da intensidade da irradiância solar incidente e 50% da velocidade do ar ($rv*$);
- (d) 50% da intensidade da irradiância solar incidente e 50% da velocidade do ar ($r*v*$);
- (e) 100% da intensidade da irradiância solar incidente e 0% da velocidade do ar (r);
- (f) 50% da intensidade da irradiância solar incidente e 0% da velocidade do ar ($r*$);

(g) 0% da intensidade da irradiância solar incidente e 100% da velocidade do ar (v);

(h) 0% da intensidade da irradiância solar incidente e 50% da velocidade do ar ($v*$); e

(i) 0% da intensidade da irradiância solar incidente e 0% da velocidade do ar (-).

Os valores da intensidade da irradiância solar e da velocidade do ar utilizados, assim como os de temperatura e umidade relativa do ar, são extraídos do banco de dados climáticos (ano de referência, com 8.760 h). Para a consideração da velocidade do ar, corrigiram-se os valores de velocidade do vento, medidos no Aeroporto do Galeão a 10 m de altura, para a altura do pedestre, a 1 m do chão, segundo o proposto pelo Building Research Establishment (*apud* BITTENCOURT, 1994):

$$v = v_m \cdot k \cdot z^a, \quad (5)$$

onde:

v = velocidade do vento na altura z [m/s];

v_m = velocidade do vento na estação meteorológica (10 m de altura) [m/s];

z = altura de referência [m];

e k , a = coeficientes de terreno [adimensionais]. Consideraram-se os coeficientes de terreno para campo aberto plano, adotando-se $k = 0,68$ e $a = 0,17$.

Ressalta-se que, para as alternativas gerais, consideraram-se apenas situações hipotéticas, sem intervenção da arquitetura e do paisagismo. Assim, considerou-se campo aberto plano, uma vez que a área em estudo encontra-se na orla marítima. O estudo subsequente dos casos específicos (na área central do centro de convenções, nas áreas entre os laboratórios térreos e nos terraços do edifício

central) utiliza as velocidades do ar fornecidas por simulações fluido-dinâmicas computacionais.

Resultados preliminares

Considerando-se inicialmente as nove alternativas hipotéticas, obtiveram-se resultados, em termos de porcentagens de sensação de conforto e de desconforto por calor e por frio, para cada alternativa e para cada mês do ano. Esses resultados são apresentados nas Tabelas de 1 a 3. Uma síntese dos resultados preliminares encontrados é apresentada na Tabela 4. Nessas tabelas, os resultados apresentados consideram o período de ocupação do conjunto (das 7h às 17h), informado pela Petrobrás, ao longo dos dias úteis do ano.

Mês	rv			r*v			rv*		
	frio	conforto	calor	frio	conforto	calor	frio	conforto	calor
Janeiro	4,0	58,1	37,9	12,6	73,9	13,5	0,0	41,9	58,1
Fevereiro	5,9	54,5	39,6	10,5	74,1	15,4	0,5	36,4	63,1
Março	7,4	49,6	43,0	12,4	74,4	13,2	0,0	35,1	64,9
Abril	7,5	48,6	43,9	12,5	72,9	14,6	0,0	34,4	65,6
Mai	6,1	61,0	32,9	13,0	75,8	11,2	0,0	39,4	60,6
Junho	7,5	62,8	29,7	15,4	81,4	3,2	0,0	41,1	58,9
Julho	2,6	62,8	34,6	5,6	81,8	12,6	0,0	38,5	61,5
Agosto	5,8	52,5	41,7	11,6	77,3	11,1	0,0	36,8	63,2
Setembro	14,1	56,4	29,5	23,2	70,9	5,9	0,0	51,8	48,2
Outubro	13,8	56,1	30,1	22,9	71,5	5,6	0,0	57,3	42,7
Novembro	9,9	62,8	27,3	16,5	78,9	4,6	0,0	52,5	47,5
Dezembro	6,9	58,9	34,2	17,7	72,3	10,0	0,4	43,7	55,9
Ano	7,6	57,0	35,4	14,5	75,4	10,1	0,1	42,4	57,5

Tabela 1 - Quantificação do conforto para as alternativas (rv), (r*v) e (rv*), em % de horas

Mês	r*v*			r			r*		
	frio	conforto	calor	frio	conforto	calor	frio	conforto	calor
Janeiro	0,0	53,0	47,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0
Fevereiro	0,5	50,5	49,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0
Março	0,0	47,9	52,1	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0
Abril	0,0	46,9	53,1	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0
Mai	0,0	47,4	52,6	0,0	0,0	100,0	0,0	0,5	99,5
Junho	0,0	54,5	45,5	0,0	0,4	99,6	0,0	1,4	98,6
Julho	0,0	45,5	54,5	0,0	0,9	99,1	0,0	5,2	94,8
Agosto	0,0	47,9	52,1	0,0	1,7	98,3	0,0	3,9	96,1
Setembro	0,0	65,9	34,1	0,0	0,0	100,0	0,0	2,0	98,0
Outubro	0,0	65,2	34,8	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0
Novembro	0,0	64,9	35,1	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0
Dezembro	0,4	59,3	40,3	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0
Ano	0,1	54,1	45,8	0,0	0,3	99,8	0,0	1,1	98,9

Tabela 2 - Quantificação do conforto para as alternativas (r*v*), (r) e (r*), em % de horas

Mês	v			v*			-		
	frio	conforto	calor	frio	conforto	calor	frio	conforto	calor
Janeiro	26,1	70,0	3,9	0,8	74,3	24,9	0,0	0,0	100,0
Fevereiro	26,8	69,5	3,7	0,9	68,2	30,9	0,0	0,0	100,0
Março	33,1	64,9	2,0	0,0	79,3	20,7	0,0	0,2	99,8
Abril	33,4	63,6	3,0	0,0	77,7	22,3	0,0	0,6	99,4
Mai	22,5	71,9	5,6	0,0	68,0	32,0	0,0	0,9	99,1
Junho	26,1	73,1	0,8	0,0	86,2	13,8	0,0	2,3	97,7
Julho	7,8	90,9	1,3	0,0	67,1	32,9	0,0	7,8	92,2
Agosto	23,6	73,6	2,8	0,0	77,7	22,3	0,0	4,6	95,4
Setembro	35,9	62,3	1,8	0,5	90,5	9,0	0,0	3,1	96,9
Outubro	37,2	61,3	1,5	0,8	81,0	18,2	0,0	0,9	99,1
Novembro	33,1	66,1	0,8	0,4	86,4	13,2	0,0	0,0	100,0
Dezembro	39,8	58,0	2,2	0,9	83,1	16,0	0,0	0,0	100,0
Ano	28,8	68,8	2,4	0,4	78,3	21,3	0,0	1,7	98,3

Tabela 3 – Quantificação do conforto para as alternativas (v), (v*) e (-), em % de horas

	rv	r*v	rv*	r*v*	r	r*	v	v*	-
frio	7,6	14,5	0,1	0,1	0,0	0,0	28,8	0,4	0,0
conforto	57,0	75,4	42,4	54,1	0,3	1,1	68,8	78,3	1,7
calor	35,4	10,1	57,5	45,8	99,8	98,9	2,4	21,3	98,3

Tabela 4 – Resultados comparativos para as alternativas verificadas, em % de horas

Considerando-se a síntese dos resultados comparativos para as alternativas verificadas nas Tabelas 1 a 3, observa-se na Tabela 4 que a manutenção da intensidade da velocidade do ar é condição importante para a satisfação das condições de conforto, assim como também é importante o bloqueio da irradiância solar.

Na alternativa com 100% da intensidade da irradiância solar incidente e 100% da intensidade da velocidade do ar (rv), observam-se 57% das horas de ocupação em conforto. Reduzindo-se a intensidade da irradiância solar incidente para 50% e mantendo-se a intensidade da velocidade do ar (r*v), tem-se um aumento das condições de conforto para 75,4%. Caso se reduzam a intensidade da irradiância solar incidente para zero e a intensidade da velocidade do ar para 50% (v*), tem-se um aumento das condições de conforto para 78,3%.

Por outro lado, caso se reduza a intensidade de ambas variáveis a 50% (r*v*), têm-se apenas 54,1% das horas ocupadas em conforto, valor próximo ao da alternativa com 100% da intensidade de ambas as variáveis. Verifica-se, ainda, que, reduzindo-se a zero a intensidade de ambas as variáveis (-), a porcentagem de horas em conforto é praticamente nula (1,7%), o que mostra que a manutenção de certa intensidade de velocidade do ar é necessária.

Como conclusão, pode-se afirmar em linhas gerais que, reduzindo-se metade da intensidade da

irradiância solar, é necessário manter-se toda a intensidade da velocidade do ar. Reduções maiores na intensidade da irradiância solar permitem reduções proporcionais na intensidade da velocidade do ar, até o limite em que a intensidade de irradiância solar é igual a zero e a intensidade de velocidade do ar é reduzida pela metade. Essas soluções, seguindo os resultados da Tabela 4, propiciam condições de conforto da ordem de 75% a 78% das horas de ocupação.

Tais resultados preliminares serviram de referência para o desenvolvimento e a adequação inicial do projeto paisagístico de Abbud (2005), apresentado na Figura 7, e a conseqüente avaliação de três ambientes em particular, que são considerados na seqüência.

Casos específicos

Foram estudadas três tipologias de ambientes externos, configurando-se nove situações distintas. Foram considerados os seguintes espaços externos, indicados na Figura 8: a área central do centro de convenções; as áreas entre os laboratórios térreos; e os terraços do edifício central (na cobertura do edifício, sobre os andares de escritórios). Levaram-se em consideração os referidos ambientes externos por apresentarem utilização freqüente, com possível permanência de média a longa duração, além de servirem como espaços de passagem.



Figura 7 – Projeto paisagístico de Abbud (2005) para o novo centro de pesquisas da Petrobrás

Os valores de temperatura do ar, umidade do ar e irradiância solar utilizados são os encontrados no Banco de Dados Climáticos.

Para a consideração da velocidade do ar, utilizaram-se os resultados das simulações fluido-dinâmicas, as quais foram realizadas por meio do software ANSYS ICEM CFD 5.0 (CFX). A modelagem tridimensional do conjunto de edifícios deu-se em ambiente CAD e utilizou-se o ANSYS ICEM para a geração de malha. Foram adotados, então, os seguintes parâmetros: velocidade inicial de 3 m/s a 10 m de altura do solo, direção predominante (SE), modelo de turbulência k-Epsilon, regime transiente, e pressão atmosférica ao nível do mar (1 atm).

A seleção das velocidades do vento para a realização das simulações foi feita por meio da análise dos dados climáticos apresentados no já citado Banco de Dados Climáticos. Observa-se, na Figura 9, que 54% das ocorrências de direção do vento concentram-se entre os valores de 90 e 180 graus de azimuth. Assim, adotou-se a direção predominante sudeste. A Tabela 5 traz as porcentagens de tempo em que as velocidades do vento do quadrante mencionado (sudeste) estão acima de determinados valores.

As ilustrações apresentadas neste relatório foram obtidas a partir de simulações com velocidade do vento igual a 3 m/s, a 10 m do solo (altura aproximada dos terraços do edifício central), valor que é atingido ou superado em praticamente 50% do tempo em que o vento vem do quadrante considerado, conforme pode ser verificado na já referida Tabela 5. Os valores de velocidade do vento foram corrigidos para as diferentes alturas, incluindo o nível térreo, segundo o perfil apresentado na Figura 10.

Ressalta-se que foi considerado, por simplificação, que, como a maior parte das ocorrências de direção

do vento concentra-se entre leste e sul, o vento dominante sudeste (34% das ocorrências) é representativo das condições gerais (considerando todo o quadrante, este valor é de 54%). Verificando-se a Figura 9, observa-se que as cinco direções remanescentes apresentam frequências de ocorrência menor do que 10%.

Salienta-se, também, que considerando a velocidade média do vento em termos anuais, esta é de 3,0 m/s, sendo que em 44% do tempo a velocidade do vento é superior a 3,0 m/s. Dessa forma, a utilização do valor da velocidade média é representativa das condições gerais verificadas. Para a verificação do efeito de velocidades maiores e menores (chegando à velocidade mínima teórica de 0 m/s), podem ser observados os estudos das alternativas gerais realizados previamente.

Destaca-se, por fim, que ainda que neste trabalho tenha sido considerada uma direção dominante para a verificação das condições gerais de distribuição das velocidades do vento, estudos futuros devem ser desenvolvidos para diferentes direções, para a realização das simulações fluido-dinâmicas computacionais, considerando-se pelo menos todas as direções com frequência de ocorrência considerada significativa, mas idealmente todas as direções possíveis. Segundo Cost Action C14 (2004), o desejável é a consideração de 12 direções distintas, tomadas de 30° em 30°.

A Figura 11 apresenta os resultados de velocidade do vento a 1,5 m de altura do solo, para todo o conjunto dos edifícios. Na sequência, são apresentados os três casos estudados: a área central do centro de convenções; os jardins entre os laboratórios térreos; e os terraços do edifício central.

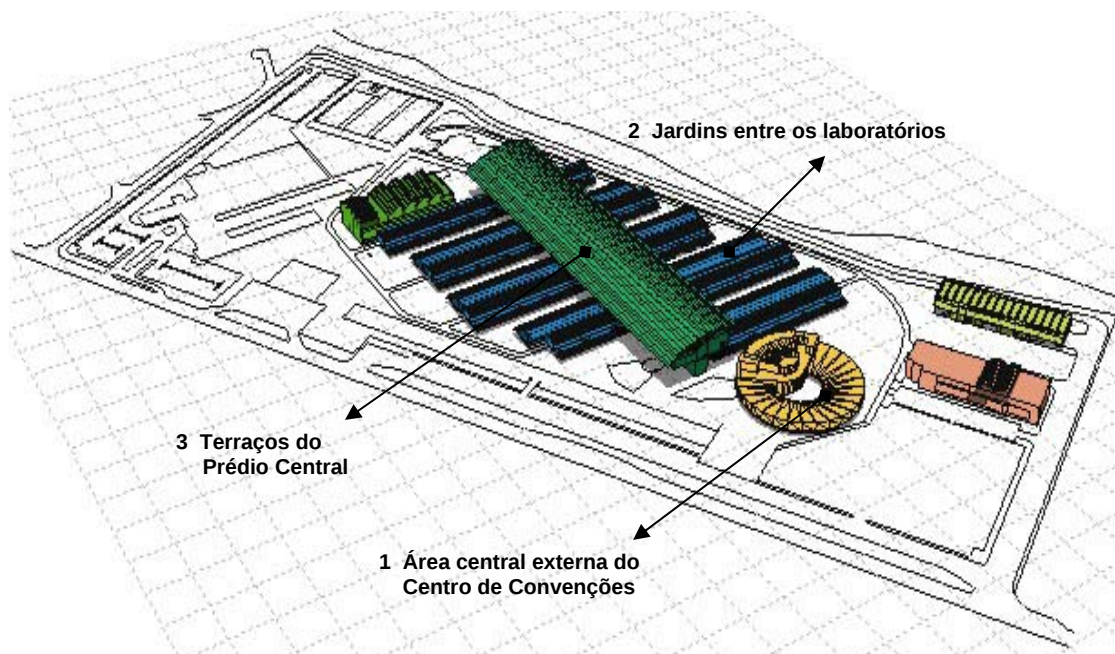


Figura 8 - Identificação das três tipologias estudadas

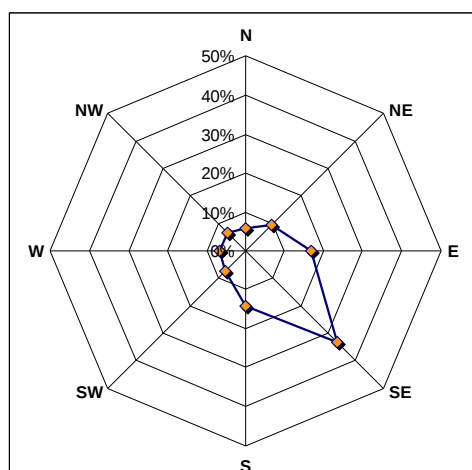


Figura 9 - Rosa-dos-ventos do ano de referência

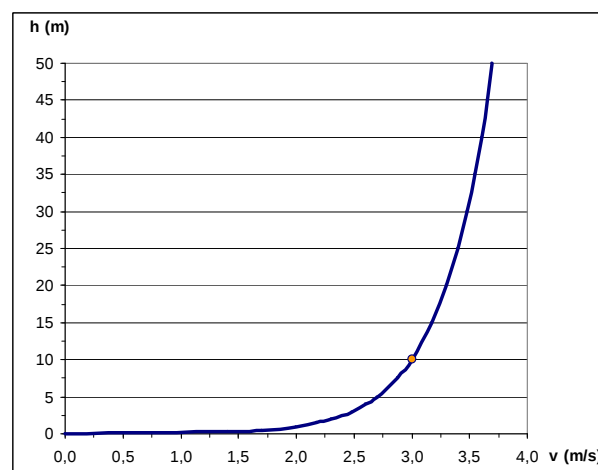


Figura 10 - Perfil do vento (3 m/s a 10 m de altura)

Velocidade do vento maior ou igual a (m/s)	Frequência de ocorrência (%)
0,5	99,9
1	97,7
2	73,6
3	49,6
4	24,6
5	9,6
6	2,4
7	0,5

Tabela 5 - Distribuição das velocidades de vento no quadrante sudeste

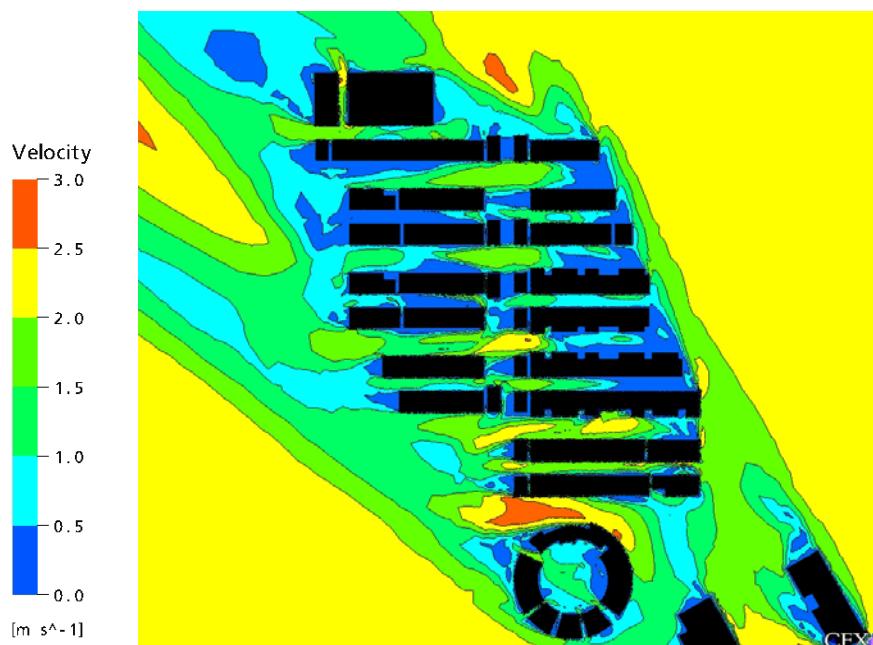


Figura 11 – Distribuição da velocidade do vento no nível do pedestre (1,5 m)

Área central externa do centro de convenções

A área central do centro de convenções faz parte do espaço de chegada e recepção do CENPES II, principalmente de visitantes ou advindos do CENPES I. A forma circular do edifício faz alusão à arquitetura do edifício principal do centro de pesquisas existente, o que cria uma ligação não só física, mas também formal, entre o complexo existente e sua expansão. Com 36 m de diâmetro, a área central é predominantemente descoberta e circundada por salas de conferência e corredores de conexão com o entorno imediato, favorecendo a circulação de usuários e a ventilação desse espaço. O auditório principal, localizado no piso superior, cria um espaço coberto e protegido do sol e das chuvas, destinado a uma lanchonete, ou seja, a um espaço de parada e permanência mais longa.

Observa-se na Figura 11 que as velocidades do vento na área central do centro de convenções estão entre 0 e 1,5 m/s. A área de ocupação efetiva foi projetada para que esta se situasse onde as velocidades do ar estivessem entre 0,5 e 1,5 m/s. Dessa forma, para efeitos de cálculo, adotou-se o valor de 1,0 m/s. A Figura 12 apresenta um corte (na direção norte-sul) com a distribuição das velocidades do vento na área central do centro de convenções.

Considerando-se a irradiância solar direta, adotou-se primeiramente o sombreamento total devido à solução arquitetônica empregada, em que está presente uma projeção da cobertura em direção ao

sul, protegendo parte considerável da área central do edifício dos raios solares. Em seguida, consideraram-se as áreas expostas ao sol. Assim, os resultados para esse ambiente dizem respeito a uma situação média de ventilação, considerando o indivíduo nas condições sombreada e ensolarada. A Figura 13 apresenta a solução paisagística para o ambiente.

Jardins entre os laboratórios

As áreas abertas entre os corredores de laboratórios têm um papel primordial no conceito de ambiente de trabalho e na qualidade ambiental das salas de pesquisadores. Essas salas são voltadas para espaços abertos, projetados para serem áreas de encontro, vivência e mesmo de atividade intelectual, desde que as condições de conforto térmico sejam favoráveis. Com comprimentos variando entre 45 m e 95 m, largura de 12,5 m e orientação norte-sul, os jardins dos laboratórios são delimitados em sua maior extensão pelas circulações abertas de acesso às salas dos pesquisadores e aos laboratórios propriamente ditos. A orientação norte-sul desse bloco de edifícios veio da decisão de privilegiar os laboratórios (maior área total do complexo arquitetônico) com a orientação mais adequada para o clima local, considerando a menor exposição da envoltória às orientações leste e oeste, a captação da luz natural na fachada sul e a proteção solar de menor dimensionamento (comparada com as demais orientações) na fachada norte. Fazendo frente com a fachada interna dos laboratórios, foram projetadas ruas internas, a fim

de servir às atividades dos laboratórios e aos sistemas prediais em geral desses edifícios especificamente. Devido à função e ao caráter técnico das ruas internas, tais espaços não foram incluídos no projeto paisagístico do conjunto.

Pode-se observar na Figura 11 que as velocidades de vento na área principal entre os laboratórios térreos estão predominantemente entre 0 e 1,0 m/s

e entre 1,0 e 2,0 m/s. Assim, consideraram-se dois casos distintos: o primeiro com velocidade média do ar de 0,5 m/s, e o segundo com 1,5 m/s. A adoção desses valores pode ser compreendida por meio da Figura 14, que apresenta os resultados de velocidade do vento nas áreas externas entre os laboratórios, em corte na direção oeste-leste.

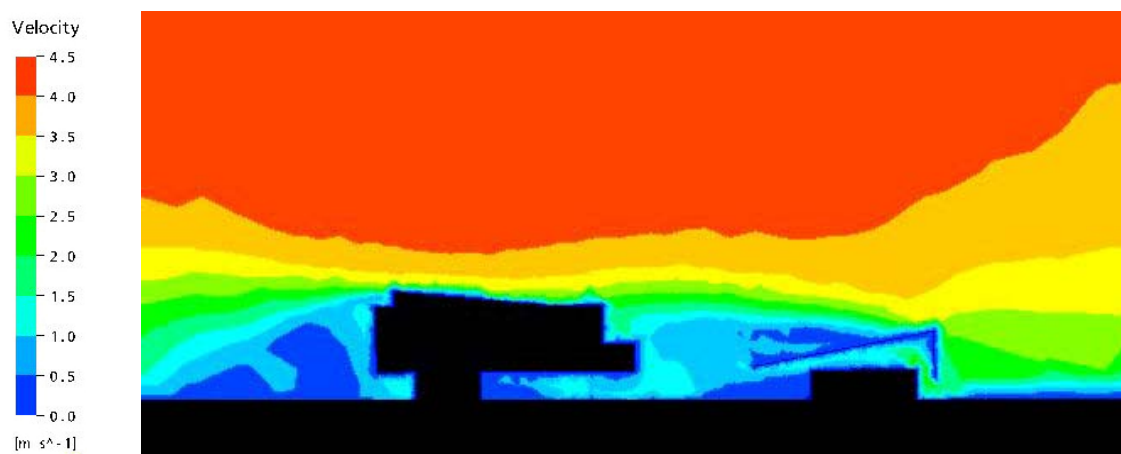


Figura 12 – Distribuição da velocidade do vento no centro de convenções (corte na direção norte-sul)

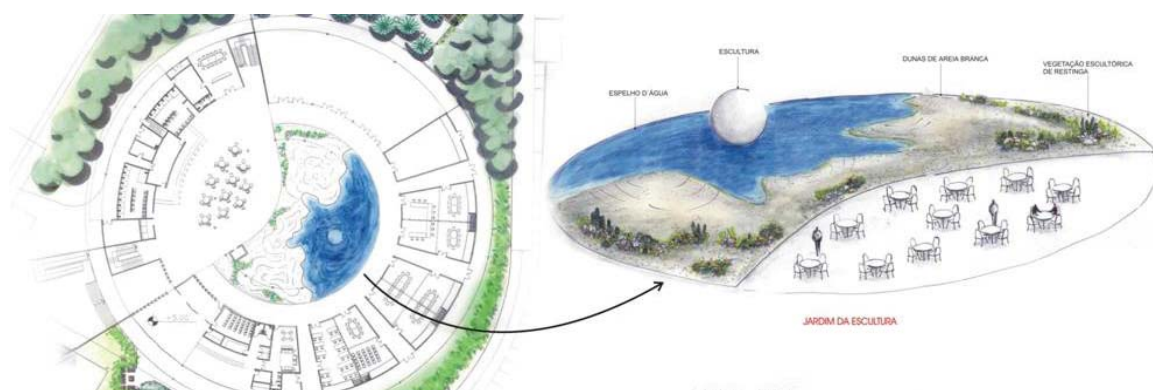


Figura 13 – Projeto paisagístico de Abbud (2005) para o centro de convenções

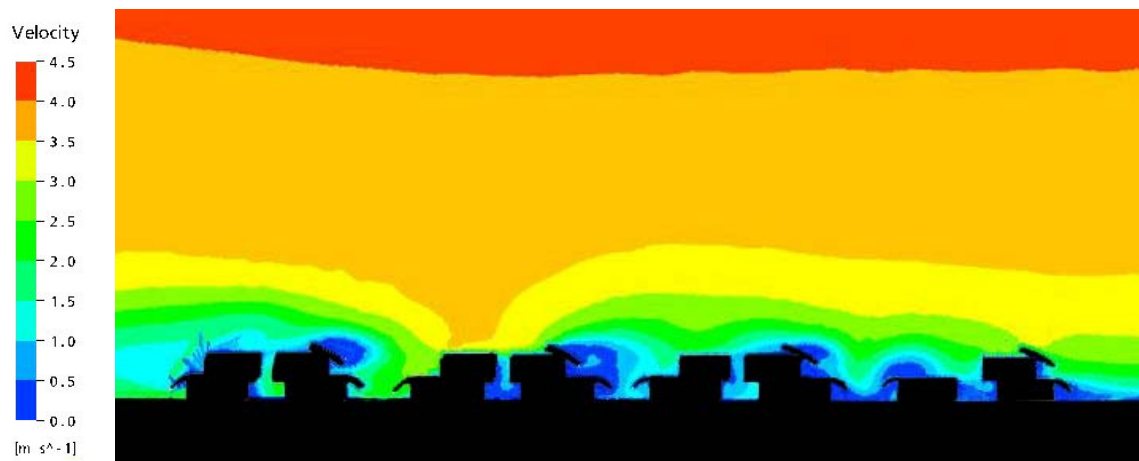


Figura 14 - Distribuição da velocidade do vento nas áreas externas entre os laboratórios (corte na direção oeste-leste)

Dada a necessidade de sombreamento na área externa entre os laboratórios, a fileira central de arvoretas deslocou-se ligeiramente para norte, para possibilitar uma maior área de sombra no espaço central, que será efetivamente ocupado pelas pessoas. As espécies a serem ali plantadas apresentarão densa folhagem, visando a uma maior obstrução da irradiância solar direta. A utilização de arvoretas com copas baixas e densas diminui o fator de visão de céu, minimizando os ganhos de irradiância difusa e contribuindo para o conforto térmico ao longo do dia, ainda que se reconheça que elas também atuam como obstáculos para os ventos. Por outro lado, durante períodos noturnos quentes, evita-se a perda de irradiância para o fundo de céu. Contudo, como a ocupação é prioritariamente diurna, a proposta de arvoretas é desejável, uma vez que se compatibiliza com a necessidade de não-sombreamento das edificações dos laboratórios, as quais receberão em suas coberturas painéis fotovoltaicos.

Copas de árvores, ainda que extremamente densas, apresentam uma transmissão solar da ordem de 5% a 15%, embora esse fato não seja verificado visualmente, uma vez que a transmissão luminosa pode ser bem inferior, pois grande parte da transmissão solar da copa concentra-se em comprimentos de onda infravermelhos (PAUL *et al.*, 2002). Assim, adotou-se para as arvoretas o valor médio de transmissão solar de 10%, utilizando-se a irradiância solar global sobre plano normal, obtida por meio do banco de dados climáticos, conforme a Figura 6. Simularam-se, então, os efeitos das áreas sombreadas pelas arvoretas e as áreas não sombreadas, sobre a sensação de conforto térmico dos usuários.

A Figura 15 apresenta o projeto paisagístico para os corredores entre os laboratórios.

Terraços do prédio central

Os terraços do prédio central são espaços semi-abertos sobre os andares de escritórios do edifício suspenso, com 245 m de comprimento, 13 m de largura cada e 4,6 m e 5,6 m de pé-direito na posição central, respectivamente, do terraço mais elevado e do terraço menos elevado. As principais fachadas são orientadas para o leste (vista da Baía de Guanabara) e para o oeste (vista do continente e do CENPES I), criando uma perpendicularidade com os corredores de laboratórios no térreo, que responde com eficiência para a concepção estrutural e de distribuição dos sistemas prediais do complexo. Os terraços foram concebidos como espaços semi-abertos, com vistas para a paisagem natural e para o próprio conjunto arquitetônico, e ainda com a possibilidade de servir às atividades do ambiente de trabalho em determinados períodos do ano, de acordo com as condições de conforto térmico.

Para os terraços do edifício central realizaram-se três conjuntos de simulações, adotando-se a solução de cobertura em telha metálica sanduíche, tela metálica e tela metálica com sombreamento local (tendo sido essa a opção lançada no projeto na ocasião do concurso).

Considerou-se que a telha metálica sanduíche bloqueia toda a irradiância solar direta incidente, e a tela metálica bloqueia 60%, com base nas informações fornecidas pela equipe de arquitetura, que especificou os materiais a serem avaliados. Ressalta-se que, tratando-se de componentes opacos, deveriam ser informadas as transmitâncias térmicas e as absorptâncias das telhas. Contudo, a informação disponível para a execução dos trabalhos é a apresentada. Reconhece-se que a

telha sanduíche, ainda que apresente maior resistência térmica do que a tela metálica, irá absorver uma parte da energia solar e transmiti-la em parte para o interior. Assim, a quantificação do conforto com a utilização da telha metálica fica superestimada. Por outro lado, com relação à tela metálica, a quantificação do conforto é mais apropriada, uma vez que a absorção de energia solar será muito mais baixa e as perdas convectivas muito mais elevadas.

Com relação ao vento, pode-se observar na Figura 16 que no terraço oeste, a 1,5 m do piso, têm-se velocidades do vento entre 1,0 e 2,0 m/s; e no terraço leste, entre 1,5 e 2,0m/s. Adotou-se, então, o valor médio encontrado no terraço oeste (1,5 m/s). Assim, os resultados encontrados são conservadores, dado que representam a situação mais crítica. Para o terraço leste, o desempenho em termos de conforto térmico será, portanto, ligeiramente superior ao indicado pelos resultados encontrados. A Figura 17 apresenta o projeto paisagístico para os terraços do edifício central.

Resultados

Todas as simulações foram realizadas considerando-se o período de ocupação do conjunto estabelecido pela Petrobrás (das 7h às 17h), ao longo dos dias úteis do ano. Os resultados das temperaturas neutras exteriores para o período de ocupação são apresentados, a título de ilustração na Figura 18, para as áreas expostas ao sol e com maior velocidade do ar entre os laboratórios térreos, para os meses de outubro,

janeiro, abril e julho. Conforme colocado no item 2, Métodos, adotando-se uma faixa de tolerância de $\pm 2,5$ °C para a temperatura neutra exterior, 90% dos ocupantes ou mais estariam satisfeitos com as condições térmicas do ambiente. Assim, nesta figura, os campos verdes indicam conforto, os campos azuis indicam desconforto por frio (por efeito de vento, nesse caso específico), e os campos vermelhos indicam desconforto por calor.

Os resultados obtidos, em termos de porcentagens de sensação de conforto e de desconforto por calor e por frio (devido ao efeito de vento), para cada caso analisado e para cada mês do ano, são apresentados nas Tabelas 6 a 8.

A Tabela 6 apresenta os resultados da área central do centro de convenções com e sem sombreamento, o que permite a comparação do efeito do bloqueio solar total.

A Tabela 7 traz os resultados das áreas com menores e maiores velocidades do ar (0,5 m/s e 1,5 m/s) entre os laboratórios térreos, sem sombreamento (transmissão solar igual a 10%) e com sombreamento das arvoretas.

A Tabela 8 apresenta os resultados para os terraços do edifício central, adotando-se soluções de cobertura em telha metálica sanduíche, tela metálica e tela metálica com sombreamento local, considerando-se que a telha metálica sanduíche barra toda a irradiância solar direta incidente e a tela metálica barra 60% da mesma.

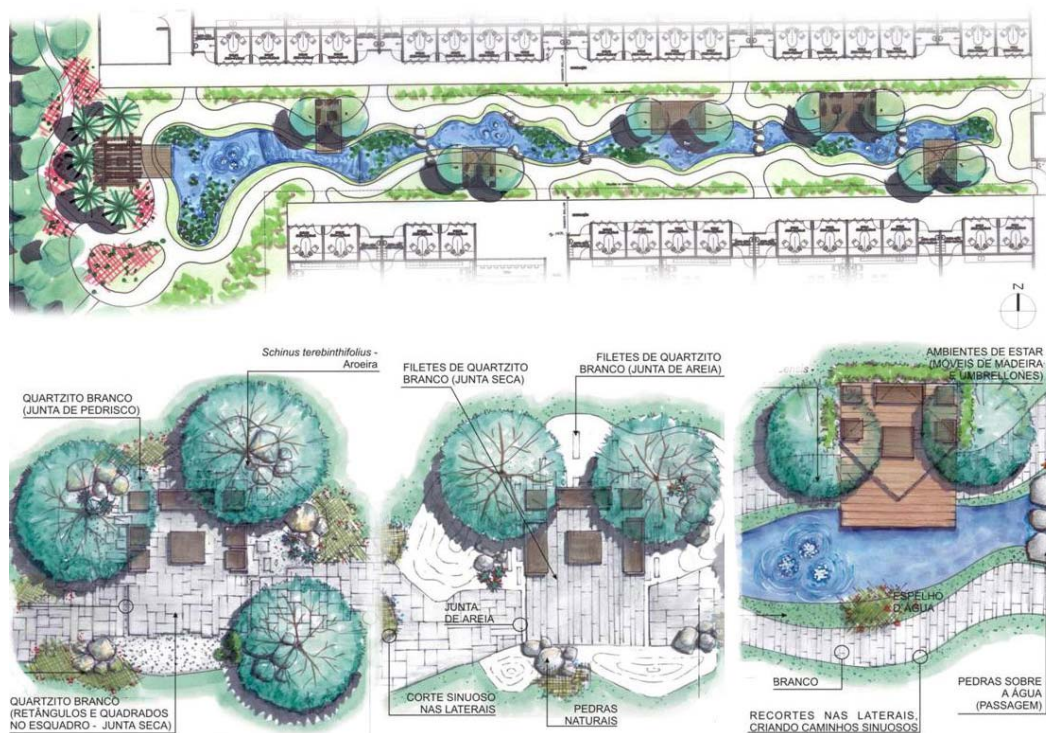


Figura 15 - Projeto paisagístico de Abbud (2005) para os corredores entre os laboratórios

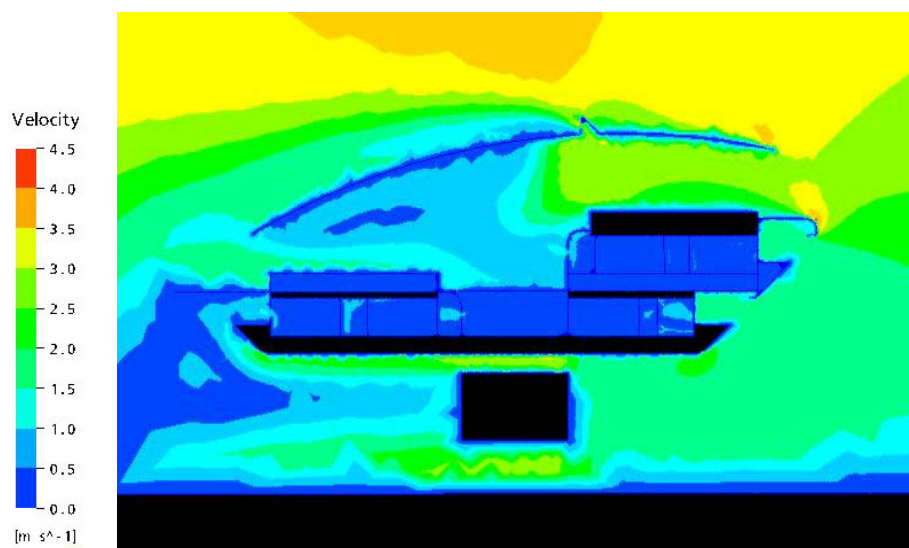


Figura 16 - Distribuição da velocidade do vento no edifício central (corte na direção oeste-leste)

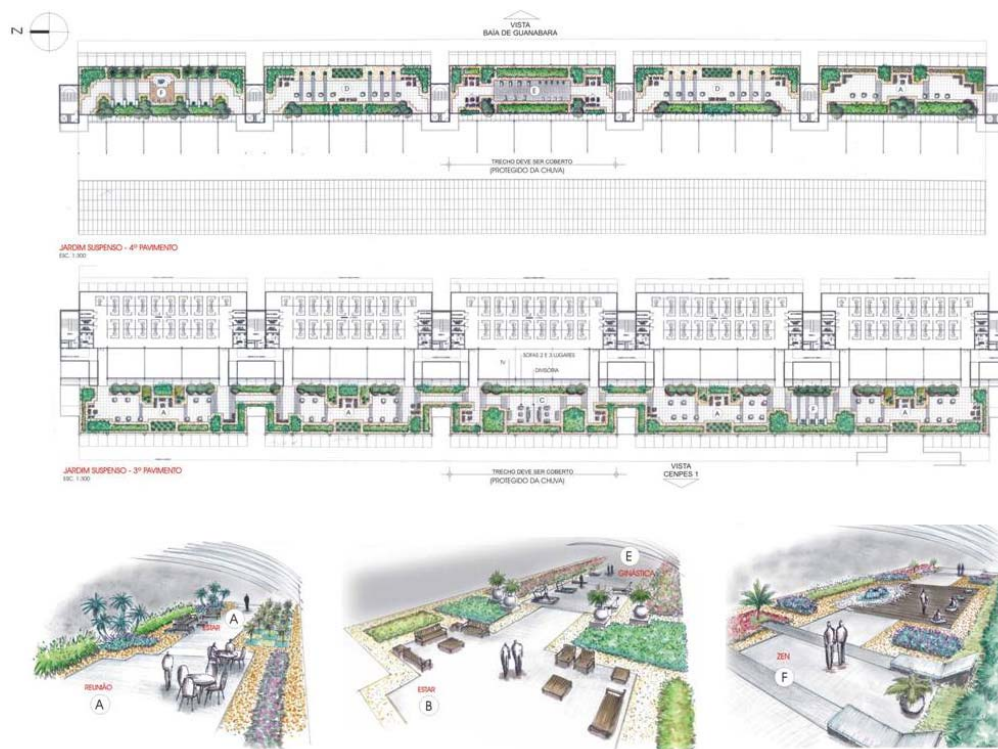


Figura 17 – Projeto paisagístico de Abbud (2005) para os terraços do edifício

	exposta ao sol				sombreada		
Mês	frio	conforto	calor		frio	conforto	calor
Janeiro	0,0	47,8	52,2		0,0	74,7	25,3
Fevereiro	0,0	45,5	54,5		0,0	82,3	17,7
Março	0,0	39,3	60,7		0,0	93,4	6,6
Abril	0,0	38,5	61,5		0,0	91,5	8,5
Maio	0,0	55,8	44,2		0,0	90,5	9,5
Junho	0,0	56,1	43,9		0,0	100,0	0,0
Julho	0,0	61,0	39,0		0,0	91,8	8,2
Agosto	0,0	46,3	53,7		0,0	96,3	3,7
Setembro	0,0	52,7	47,3		0,0	83,6	16,4
Outubro	0,0	59,7	40,3		0,0	82,2	17,8
Novembro	0,0	50,4	49,6		0,0	72,7	27,3
Dezembro	0,0	42,0	58,0		0,0	83,5	16,5
Ano	0,0	49,6	50,4		0,0	86,9	13,1

Tabela 6 – Conforto térmico para a área central do centro de convenções, em % de horas

	com menor velocidade do ar e exposta ao sol			com menor velocidade do ar e sombreada			com maior velocidade do ar e exposta ao sol			com maior velocidade do ar e sombreada		
Mês	frio	conf.	calor	frio	conf.	calor	frio	conf.	calor	frio	conf.	calor
Janeiro	0,0	3,2	96,8	0,0	7,5	92,5	0,0	67,2	32,8	0,0	100,0	0,0
Fevereiro	0,0	9,1	90,9	0,0	13,6	86,4	0,0	64,5	35,5	0,0	100,0	0,0
Março	0,0	11,6	88,4	0,0	21,5	78,5	0,0	55,4	44,6	0,4	99,6	0,0
Abril	0,0	11,4	88,6	0,0	21,1	78,9	0,0	54,3	45,7	0,6	99,4	0,0
Maio	0,0	15,2	84,8	0,0	22,5	77,5	1,3	74,0	24,7	1,3	98,7	0,0
Junho	0,0	23,3	76,7	0,0	46,6	53,4	5,5	69,6	24,9	5,9	94,1	0,0
Julho	0,0	19,9	80,1	0,0	28,1	71,9	3,0	73,6	23,4	3,0	97,0	0,0
Agosto	0,0	18,2	81,8	0,0	39,7	60,3	7,0	59,5	33,5	7,9	92,1	0,0
Setembro	0,0	16,4	83,6	0,0	22,7	77,3	0,5	67,7	31,8	0,5	99,5	0,0
Outubro	0,0	11,1	88,9	0,0	18,6	81,4	0,0	76,7	23,3	0,0	100,0	0,0
Novembro	0,0	9,5	90,5	0,0	17,4	82,6	0,0	72,7	27,3	0,0	100,0	0,0
Dezembro	0,0	5,2	94,8	0,0	19,5	80,5	0,0	60,6	39,4	0,0	100,0	0,0
Ano	0,0	12,8	87,2	0,0	23,2	76,8	1,4	66,3	32,2	1,8	98,2	0,0

Tabela 7 – Conforto térmico para as áreas entre os laboratórios, em % de horas

	telha metálica sanduíche			tela metálica			tela metálica e sombreamento local		
Mês	frio	conforto	calor	frio	conforto	calor	frio	conforto	calor
Janeiro	1,6	71,9	26,5	7,1	64,8	28,1	12,6	72,7	14,7
Fevereiro	1,4	66,8	31,8	9,5	58,2	32,3	13,6	69,5	16,9
Março	0,0	78,9	21,1	9,9	55,8	34,3	12,8	73,6	13,6
Abril	0,0	77,3	22,7	10,0	54,7	35,3	12,9	72,1	14,9
Maio	0,0	67,1	32,9	10,0	64,9	25,1	15,2	72,7	12,1
Junho	0,0	85,0	15,0	12,3	66,4	21,3	16,2	80,2	3,6
Julho	0,0	65,8	34,2	5,6	68,8	25,6	6,9	80,5	12,6
Agosto	0,0	76,4	23,6	7,4	59,9	32,7	12,8	75,2	12,0
Setembro	0,9	89,1	10,0	17,7	61,8	20,5	23,2	70,9	5,9
Outubro	1,6	79,4	19,0	19,0	60,1	20,9	24,1	70,0	5,9
Novembro	0,4	84,3	15,3	14,5	67,4	18,1	16,5	78,1	5,4
Dezembro	0,9	83,1	16,0	10,4	64,5	25,1	18,2	71,4	10,4
Ano	0,6	77,1	22,3	11,1	62,3	26,6	15,4	73,9	10,7

Tabela 8 – Conforto térmico para os terraços do edifício central, em % de horas

Considerações finais

Dentro do escopo apresentado, na área central do centro de convenções, tem-se, na situação exposta ao sol, aproximadamente metade do tempo em conforto. Quando a condição for de sombreamento, em aproximadamente 85% do tempo, o usuário estará em conforto. Considerando-se a área do centro de convenções e comparando-se as duas situações, sob sol e sombra, nesta última o aumento das horas em conforto equivale a 35% do tempo total.

Para melhorar tais resultados, poderiam ser aumentadas as aberturas da edificação, existentes entre as salas multiuso que conectam a área central ao entorno imediato, propiciando maior fluxo de ventilação na área central. Deve-se atentar, porém, que parte dessa área central apresenta um paisagismo configurado por um banco de areia, e velocidades maiores do ar provocariam um deslocamento dela. Uma alternativa para minimizar o problema seria a escolha de uma areia de maior granulometria. Deve ser observado ainda que a periferia da área central externa apresenta

velocidades do ar significativamente mais baixas do que na porção central, conforme pode ser verificado na Figura 11. Esse fato implica que a área periférica apresentará desempenho, em termos de conforto térmico, inferior ao da área mais central.

Com relação às áreas entre os laboratórios térreos, verificou-se que, onde a velocidade do ar é mais baixa, tem-se situação de conforto em apenas 13% do tempo nos locais com irradiância solar direta, porcentagem que aumenta para 23% quando 90% da irradiância solar é bloqueada pelas arvoretas. Por outro lado, onde a velocidade do ar é mais alta, tem-se situação de conforto em 67,5% do tempo nos locais com irradiância solar direta, porcentagem esta que aumenta para 98% quando se tem o sombreamento das arvoretas.

Quanto aos terraços do edifício central, observa-se que a solução com telha metálica sanduíche proporciona maior porcentagem de tempo em conforto (77%) quando comparada à solução com tela metálica (64%). Contudo, quando se considera a solução com tela metálica, acompanhada de estratégias de sombreamento mais localizadas (por exemplo, arvoreta, caramanchão, guarda-sol), verifica-se uma porcentagem bastante próxima à da primeira solução (75%).

Vale ressaltar que, apesar de essa porcentagem de tempo em conforto ser ligeiramente menor, ela apresenta melhor distribuição dos valores de desconforto (15% para frio, por efeitos de vento, e 10% para calor) quando comparada à solução com telhas metálicas sanduíche, que apresenta praticamente apenas períodos de desconforto por calor. Assim, apesar de maior porcentagem do tempo em conforto, esta solução apresenta uma curva de distribuição tendendo para a zona de desconforto de calor, ou seja, os valores estão mais próximos do limite do desconforto por calor. Já a de tela metálica com sombreamento local apresenta valores mais próximos de melhores condições de conforto, ou seja, na região central da zona de conforto.

As porcentagens de tempo com sensação de frio, causada por efeito de vento, foram encontradas nos terraços, localizados a 10 m de altura, já que a solução arquitetônica adotada pode e deve privilegiar a ação dos ventos para a remoção de carga térmica. Como não há barreiras externas ao terraço e a velocidade do vento a 10 m de altura é maior do que no nível do pedestre, a ventilação natural nos terraços é mais significativa. Contudo, essa sensação poderia ser reduzida com a adoção de barreiras pontuais no terraço, localizadas nos pontos mais afetados.

À primeira vista, comparando-se a solução de telha metálica sanduíche e de tela metálica, sem a adição de outras estratégias de projeto, ambas apresentam desempenho semelhante com relação à sensação de conforto. Contudo, a solução de tela metálica apresenta um potencial maior para a melhoria das condições de conforto, uma vez que, com soluções locais de sombreamento e de barreira do vento, conforme sugerido no parágrafo anterior, conseguem-se porcentagens de tempo de conforto significativamente maiores. No caso da telha metálica sanduíche, em que se tem desconforto praticamente apenas por calor, soluções locais não são possíveis, uma vez que a irradiância já está toda bloqueada e é difícil induzir o aumento da velocidade do vento, ainda que localmente.

Deve-se considerar que, devido à possibilidade de soluções localizadas, a opção pela tela metálica gera situações distintas, com diferentes valores para os parâmetros de irradiância e ventilação, os quais influenciam sobremaneira o conforto térmico em espaços abertos. Com uma maior diversidade de configurações, que geram situações que permitem sensações térmicas ligeiramente mais quentes ou mais frias, tem-se a possibilidade de as pessoas satisfazerem suas necessidades de conforto com a escolha do local que melhor lhes aprouver, aumentando, assim, a porcentagem de usuários satisfeitos.

Além dos resultados encontrados nas avaliações do conforto térmico nos espaços abertos, os estudos de insolação e ventilação do conjunto de edifícios, que usualmente não fazem parte da elaboração de um projeto paisagístico, também informaram o projeto paisagístico do complexo arquitetônico como um todo. Como exemplo disso, a localização das diferentes restingas implantadas nos pátios abertos entre os corredores de laboratórios, que se estendem até a beira-mar, foi revista com base nos estudos de ventilação externa. Sendo assim, a restinga de areia, que inicialmente foi proposta para o pátio mais ao sul, que está na entrada da ventilação externa do conjunto e recebe mais ventos, foi reposicionada para o pátio mais ao norte do conjunto, evitando, dessa maneira, o deslocamento dos grãos de areia para os outros espaços abertos.

Paralelamente, os resultados dos estudos de insolação e disponibilidades de luz natural nos terraços do edifício central foram importantes para a escolha das espécies que melhor se adaptariam àquelas determinadas condições de exposição à luz solar e ao calor. No que tange à criação de sombras, as áreas menos atingidas pelas sombras dos edifícios (ou permanentemente ensolaradas) receberam uma proteção maior do paisagismo do que aquelas já sob sombra, a fim de se criarem

condições favoráveis ao conforto térmico nos espaços abertos do complexo, considerando a circulação e as permanências mais curta e mais longa.

Concluindo, os casos estudados cumprem satisfatoriamente sua função, devido ao tratamento planejado de sombreamento e ventilação dos espaços externos no complexo arquitetônico, que cria situações de conforto diante das condições ambientais externas de clima quente-úmido. Acredita-se que adequadas soluções projetuais foram alcançadas graças à interação entre as equipes de arquitetura, de paisagismo e de consultores de conforto nas etapas iniciais de projeto, possibilitando, assim, desde as etapas conceituais, a necessária troca de informações para o adequado desenvolvimento projetual.

Referências

- ABBUD, Bendito. **Projeto paisagístico para o Novo Centro de Pesquisa da Petrobras** (CENPES II). São Paulo: (s/n), 2005.
- ARÓZTEGUI, José Miguel. Cuantificación del impacto de las sombras de los edificios. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENCAC), 3., 1995, Gramado. **Anais...** Gramado: ENCAC, 1995.
- ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. **Handbook of Fundamentals**. Atlanta: ASHRAE, 2001.
- ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. ASHRAE 55-2004. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta: ASHRAE, 2004.
- BELDING, H. S.; HATCH, T. F. Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strain. **Heating, Piping, Air Conditioning**, n. 27, p. 129-142, 1955.
- BLAZEJCZYK, Krzysztof. Climatological-and-physiological model of the human heat balance outdoor and its applications in bioclimatological studies in different scales. **Zeszyty IGIPZ PAN**, n. 28, p. 27-58, 1996.
- BLUESTEIN, M.; OSCZEWSKI, R. Wind chill and the development of frostbite in the face. In: CONFERENCE ON BIOMETEOROLOGY AND AEROBIOLOGY, 15., Kansas City: American Meteorological Society, 2002. **Proceedings...** Kansas City, 2002. Preprints, p. 168-171.
- COST ACTION C14. **Recommendations on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment**. London: COST/Urban Civil Engineering, 2004.
- DE DEAR, R.; BRAGER, G.; COOPER, D. **Developing an adaptive model of thermal comfort and preference**. Final Report, ASHRAE RP-884, Macquarie University, 1997.
- DOE – Department of Energy of United States of America. **EnergyPlus Energy Simulation Software**. Disponível em: <<http://www.eere.energy.gov>>. Acesso em: 17 ago. 2008.
- DOMINGUEZ *et al.* **Control climático en espacios abiertos: evaluación del proyecto Expo'92**. Sevilla: Universidad de Sevilla, 1992.
- FANGER, P. O. **Thermal comfort: analysis and application in environment engineering**. New York: McGraw Hill, 1972.
- GAGGE, A. P.; STOLWIJK, J. A. J.; HARDY, J. D. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. **Environmental Research**, n. 1, p. 1-20, 1967.
- GIVONI, Baruch. **Climate considerations in building and urban design**. New York: John Wiley & Sons, 1981.
- GIVONI, Baruch. **Man, climate and architecture**. New York: John Wiley & Sons, 1969.
- GIVONI, Baruch; NOGUCHI, Mikiko. Issues in outdoor comfort research. In: PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 17., Cambridge, 2000. **Proceedings...** London: James & James, 2000. p. 562-565.
- HÖPPE, Peter R. The physiological equivalent temperature: a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. **International Journal of Biometeorology**, n. 43, p. 71-75, 1999.
- HOUGHTEN, F. C.; YAGLOU, C. P. Determining lines of equal comfort. **ASHVE Transactions**, n. 29, 1923.
- HUMPHREYS, M. A. Outdoor temperatures and comfort indoors. Garston. Watford. **Building Research and Practice**, v. 6, p. 92-105, Mar./Apr. 1978.
- ISB COMMISSION 6. **Report 2006 of ISB Commission 6 on the Development of a**

Universal Thermal Climate Index UTCI. Genebra, ISB Comission 6, 2006.

ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION. **ISO 7933.** Hot environments: analytical determination and interpretation of thermal stress using calculation of required sweat rate. Genève, 1989.

ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION. **ISO 7730.** Ergonomics of the thermal environment: analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Genève, 2005.

JENDRITZKY, Gerd *et al.* **Klimatologische Probleme: ein einfaches Verfahren zur Vorhersage der Wärmebelastung, in Zeitschrift für angewandte Bäder und Klimaheilkunde.** Freiburg, 1979.

JENDRITZKY, Gerd. Perceived temperature: Klima-Michel-model. In: THE DEVELOPMENT OF HEAT STRESS WATCH WARNING SYSTEMS FOR EUROPEAN CITIES, Freiburg May 3, 2003. **Presentations of Conference The Development...**, Friburgo, 2003.

LABAUT. Avaliação do conforto térmico em áreas externas. In: CONFORTO E DESEMPENHO TÉRMICO DAS EDIFICAÇÕES, 2., São Paulo: FAUUSP/FUPAM. **Anais...**, São Paulo, 2005.

LABEEE. Downloads – **Arquivos climáticos.** Florianópolis: UFSC, 2005. Disponível em <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/downloada_clim.html>. Acesso em: 17 ago. 2008.

MASTERTON, J. M.; RICHARDSON, F. A. **Humidex:** a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity. Environment Canada, CLI 1-79. Ontario, Downsview: Atmospheric Environment Service, 1979.

MCARIEL, B. *et al.* The prediction of the physiological effect of warm and hot environments. **Medical Research**, Council, n. 47, 1947.

METAR. **Dados climáticos do Aeroporto do Galeão 1998-2004.** Laboratório Master – Meteorologia Aplicada a Sistemas de Tempo Regionais, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 2005.

METEOTEST. **Meteonorm 5.0. Switzerland:** The Swiss Federal Office of Energy, 2003.

MISSENARD, A. **Equivalences thermiques des ambiances:** equivalences de passage: equivalence de sejour. Chaleur et Industrie, 1948.

MONTEIRO, L. M. **Modelos preditivos de conforto térmico:** quantificação de relações entre variáveis microclimáticas e de sensação térmica para avaliação e projeto de espaços abertos. 2008. Tese (Doutorado) – FAUUSP, São Paulo, 2008.

MONTEIRO, L. M.; ALUCCI, M. P. Questões teóricas de conforto térmico em espaços abertos: consideração histórica, discussão do estado da arte e proposição de classificação de modelos. **Ambiente Construído**, v. 7, n. 3, p. 43-58, 2007.

NIKOLOPOULOU, Marialena (Org.). **Designing open spaces in the urban environment:** a bioclimatic approach. Atenas: CRES, 2004.

PAUL, K. *et al.* Soil temperature under forests: a simple model for predicting soil temperature under a range of forest types. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 121, p. 167-182, 2004.

PICKUP, Janelle; DE DEAR, Richard. An outdoor thermal comfort index: the model and its assumptions. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF BIOMETEOROLOGY & INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATOLOGY, 15., 1999, Sydney. **Selected Papers from the Conference....** Geneva: World Meteorological Organization, 2000. p. 279-284.

SIPLE, P. A.; PASSEL C. F. Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures. **Proceedings of the American Philosophical Society**, v. 89, n. 1, p. 177-199, 1945.

SZOKOLAY, Steven. Use of the new effective temperature: ET* in practice. In: PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE (PLEA), 18., 2001, Florianópolis. **Proceedings...** Florianópolis: PLEA, 2001. p. 1003-1008.

UNITED STATES GREEN BUILDING COUNCIL. **Green Building Rating System For New Construction & Major Renovations Version 2.1** (LEED-NC). EUA, 2002.

VERNON, H. M.; WARNER, C. G. The influence of the humidity of the air on capacity for work at high temperatures. *J. Hyg.*, v. 32, p. 431-462, 1932.

WALD, L.; LEFÈVRE, M. **Interpolation schemes: profile method** (a process-based distance for interpolation schemes). SoDa Deliverable D5-1-1, 2001.

WEBB, C. Thermal discomfort in an equatorial climate: a monogram for the equatorial comfort index. **Journal of the IHVE**, n. 27, p. 10, 1960.

YAGLOU, C. P.; MINARD, D. Control of heat casualties at military training centers. A.M.A. **Archives of Industrial Health**, n. 16, p. 302-16, 1957.

ZELENKA, A. *et al.* **Techniques for supplementing solar radiation network data.** IEA Report No. IEA-SHCP-9D-1, 1992. v. 1-3.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Klaus Bode e Allan Harries, do BDSP Partnership, de Londres, pelo apoio nas simulações fluido-dinâmicas computacionais. Agradecem também a Benedito Abbud, da Benedito Abbud Arquitetura Paisagística Ltda., pela interação e imagens do projeto paisagístico, e à empresa Zanettini Arquitetura S.A., pela colaboração em todo o desenvolvimento deste trabalho. Agradecem a Petróleo Brasileiro S.A., Petrobras, pelo suporte durante a realização do projeto e pela autorização para a divulgação das informações contidas neste artigo. Finalmente, agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelas bolsas de doutoramento e pós-doutoramento.