



PROJETO DE GRADUAÇÃO

Sobre os limites da solução passiva de climatização na manutenção do conforto térmico em edificações - Caso de estudo: Fundação Darcy Ribeiro

Por,
Alyson Vinicio de Souza Moraes

Brasília, 28 de Junho de 2012.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

PROJETO DE GRADUAÇÃO

Sobre os limites da solução passiva de climatização na manutenção do conforto térmico em edificações - Caso de Estudo: Fundação Darcy Ribeiro

POR,

Alyson Vinicio de Souza Morais

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. João Manoel Dias Pimenta, UnB/ ENM (Orientador)

Prof. Antonio Fortes, UnB/ ENM

Prof. Mario Olavo, UnB/ ENM

Brasília, 28 de Junho de 2012.

Dedicatória

Dedico este a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Alyson Vinicio de Souza Morais

RESUMO

O foco deste trabalho é o estudo sobre os limites das soluções passivas de arquitetura na climatização de edificações, avaliando a capacidade dos elementos projetados pelos arquitetos para estabelecer o conforto térmico. Esta avaliação será feita através de simulações termoenergéticas utilizando o software DesignBuilder, tendo-se o prédio do Beijódromo como caso de estudo. A conclusão deste trabalho é obter uma integração entre as variáveis arquitetônicas para uso racional da energia e as simulações energéticas, visando à elaboração de projetos de prédios com um menor consumo de recursos e que atenda a condição de conforto térmico de seus usuários.

Palavra-chave: solução passiva de arquitetura, DesignBuilder, eficiência energética

ABSTRACT

The focus of this paper is the study of the limitations of the passive solutions of architecture for building climatization, evaluating the elements designed by architects to establish thermal comfort. This assessment will be done through thermoenergetic simulations utilizing the software DesignBuilder, taking up the Beijódromo as case of study. The conclusion of this paper to obtain an integration of the architectural variables for the rational use of energy and energy simulations, aiming the elaboration of buildings projects with a lower consumption of resources that meets the condition of thermal comfort of its users.

Key-words: passive solutions of architecture, DesignBuilder, energetic efficiency

SUMÁRIO

1 Introdução	1
1.1 O tema em estudo e sua importância	1
1.2 Revisão bibliográfica	2
1.3 Objetivos	4
1.4 Metodologia	5
1.5 Estrutura do trabalho	5
2 Revisão de conceitos teóricos	7
2.1 Eficiência energética em edificações	7
2.2 Carga térmica	8
2.3 Conforto térmico	10
2.3.1 Termo-regulação	11
2.3.2 Índice de conforto	14
2.4 Ferramentas computacionais	17
2.4.1 DOE 2.1E	17
2.4.2 EnergyPlus	18
2.4.3 Design Builder	19
3 Solução passiva de arquitetura	20
3.1 Ventilação natural	20
3.2 Ventilação noturna	21
3.3 Telhado vegetado	21
3.4 Brise	24
4 Caso de estudo	27
4.1 Aspectos Gerais	27
4.2 Localização	28
4.3 Fundação Darcy Ribeiro	29
4.4 O Beijódromo e suas soluções passivas	31
5 Simulação e resultados	33
5.1 Metodologia	33
5.2 Parâmetros de simulação	33
5.3 Resultados	39
5.3.1 Renderização	39
5.3.2 Conforto térmico	40
5.4 Dados medidos	43
5.4.1 Termômetro de globo	43
5.4.2 Termo higrômetro	45
6 Análise dos resultados	47
6.1 Conforto térmico	47
6.2 Proposta de climatização no prédio do Beijódromo	49
7 Conclusões	51
Referências Bibliográficas	52
Anexo A	54

LISTA DE FIGURAS

2.1	Zona de Conforto Térmica.....	10
2.2	Modelagem de um edifício no VisualDOE.....	18
3.1	Telhados vegetados turfados na Islândia	22
3.2	Exemplo de telhado vegetado na Alemanha	22
3.3	Exemplo da projeção da sombra de um poste no piso.....	24
3.4	Brise horizontal finito	25
3.5	Mascaramento proporcionado pelo brise horizontal finito	25
3.6	Brise vertical finito.....	25
3.7	Mascaramento proporcionado pelo brise vertical finito	26
3.8	Brises mistos	26
4.1	Visão do prédio do Beijódromo	27
4.2	Vista do espelho d'água que circunda o Beijódromo	27
4.3	Localização e orientação do Beijódromo.....	28
4.4	Localização do Beijódromo	28
4.5	Pavimento Térreo da Fundação Darcy Ribeiro	29
4.6	Pavimento superior da Fundação Darcy Ribeiro.....	30
4.7	Projetos desenvolvidos pelo arquiteto João Filgueras.....	31
4.8	Vista superior da entrada de ar no prédio Beijódromo	31
4.9	Vista em perspectiva da entrada de ar no prédio do Beijódromo	32
4.10	Brises de proteção solar do prédio do Beijódromo	32
5.1	Tela para entrada dos dados climáticos e localização do edifício.....	33
5.2	Janela para construção geométrica do edifício.....	34
5.3	Planta DXF do pavimento do edifício importada para o Design Builder.....	35
5.4	Bloco de uma edificação com apenas uma subdivisão de zona.....	35
5.5	Zona térmica 20 do edifício Beijódromo.....	36
5.6	Renderização do modelo tridimensional do edifício Fundação Darcy Ribeiro.....	39
5.7	Resultado do PMV hora a hora ao longo de um ano no prédio do Beijódromo.....	41
5.8	Resultado da temperatura do ar hora a hora ao longo do ano no prédio do Beijódromo....	42
5.9	Resultado da umidade relativa do ar hora a hora ao longo do ano no prédio Beijódromo..	42
5.10	Medição de dados com o termômetro de globo no prédio do Beijódromo.....	43
5.11	Medição da umidade relativa no ambiente Estar e Leitura do prédio Beijódromo...44	
5.12	Resultado da umidade relativa do ar do ambiente Estar e Leitura do prédio Beijódromo....	44
5.13	Medição de dados com o termo - higrômetro no prédio do Beijódromo.....	45
5.14	Medição da temperatura do ar no ambiente Estar e Leitura do prédio Beijódromo.....	45
5.15	Resultado da temperatura do ar do ambiente Estar e Leitura do prédio Beijódromo.....	46
6.1	Temperatura operativa da zona térmica Estar e Leitura do prédio Beijódromo.....	48
6.2	Resultado do PMV do prédio do Beijódromo com um sistema de condicionamento de ar.....	50
A.1	Resultado Kansas hora a hora ao longo do ano no prédio do Beijódromo.....	54
A.2	Resultado Pierce PMV ET hora a hora ao longo do ano no prédio do Beijódromo....	55
A.3	Resultado Pierce PMV SET hora a hora ao longo do ano no prédio Beijódromo.....	55
A.4	Resultado Temperatura Operativa hora a hora longo do ano prédio Beijódromo....	56
A.5	Resultado Temperatura Radiante hora a hora longo do ano no prédio Beijódromo.	56

LISTA DE TABELAS

1.1	Usos finais para edifícios com e sem ar condicionado no Brasil	2
2.1	Taxa metabólica de diferentes atividades.....	12
2.2	Índice de resistência térmica para vestimentas.....	13
2.3	Escala térmica do voto médio predito	15
5.1	Vazão eficaz mínima de ar exterior para ventilação (NBR 16401, 2008).....	37
5.2	Densidade típica de carga para diversos tipos de escritórios (NBR 16401, 2008)..	37

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

H	taxa de produção interna de calor	W/m^2
h_c	coeficiente de convecção	$W/m^2.K$

Símbolos Gregos

α	ângulo de incidência do sol na superfície
β	ângulo de incidência do sol na superfície
γ	ângulo de incidência do sol na superfície

Siglas

ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>					
BLAST	<i>Building Loads Analysis and Thermodynamics</i>					
CLF	<i>Cooling Load Factor</i>					
CLTD	<i>Cooling Load Temperature Difference</i>					
DOE	<i>Department Of Energy</i>					
LaAR	Laboratório de Ar Condicionado e Refrigeração					
PMV	<i>Predict Mean Vote</i>					
PPD	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>					
SLF	<i>Solar Load Factor</i>					
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica					
TFM	<i>Transfer Function Method</i>					
TETD	<i>Total Equivalent Temperature Differential</i>					
TRY	Test Reference Year					
UnB	Universidade de Brasília					
LabEEE	Laboratório	de	Eficiência	Energética	em	Edificações

1 Introdução

Neste tópico é apresentada a importância do tema em estudo, a revisão bibliográfica, a estrutura e metodologia do trabalho que, por fim, permitirão alcançar o(s) objetivo(s) deste estudo.

1.1 O tema em estudo e sua importância

A preocupação da sociedade em administrar de forma mais consciente os recursos energéticos é um dos temas mais recorrentes da atualidade. Analisando o crescimento populacional e a mudança na forma de vida das pessoas, beneficiadas pela distribuição dos avanços tecnológicos, os gastos com as mais diversas formas de energia cresceram vertiginosamente nas últimas décadas do século XX e início do novo milênio. Mesmo assim, ainda são os países mais desenvolvidos, com um alto padrão de consumo de seus habitantes, que apresentam maior consumo de energia.

No estudo destes impactos ambientais em nível global, o aumento das emissões de CO₂, também causado pelo desenvolvimento da sociedade, registra elevadas taxas de crescimento nos últimos anos e projeções de continuarem em alta. Esse aumento é perceptível desde a era pré-industrial, com crescimento de 70% entre 1970 e 2004, segundo o relatório do International Panel on Climate Change (IPCC). De acordo com Zakaria (2007), os gastos com energia devem dobrar até 2050, sendo Índia e China os grandes responsáveis por este aumento, pois os dois países estão construindo 650 termelétricas, o que deve emitir uma quantidade de CO₂ cinco vezes maior que a economia gerada pelo protocolo de Kyoto, assinado em 1997, se todos os países ocidentais tivessem cumprido as metas propostas.

No Brasil, no ano de 2001, este aumento na demanda por energia residencial foi interrompido pela crise energética na principal fonte de geração elétrica do país, a hidrelétrica. Com os reservatórios das usinas muito aquém de suas capacidades normais o risco de apagão era iminente, provocando uma série de mudanças pontuais nos hábitos dos brasileiros e definitivas na concepção de aparelhos que dependem da energia elétrica, como a busca por certificações de eficiência energética destes.

Outra ação importante que se originou desta turbulência no setor de energia nacional foi à criação do programa Procel Edifica pela Eletrobrás/PROCEL em 2003, que visa incentivar a utilização racional de energia em edificações e, inicialmente, a Regulamentação para Etiquetagem Voluntária de Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. A perspectiva deste programa em alguns anos é consolidar a etiquetagem de edificações como obrigatória a prédios que ainda serão construídos, como já acontece em outros países, exemplo a Inglaterra.

A classificação da etiquetagem do programa Procel Edifica aborda três vertentes principais, que são: o desempenho térmico da envoltória do edifício, a capacidade instalada do sistema de iluminação

e o desempenho do sistema de condicionamento de ar. Desta forma, observando que cerca de 46% do consumo total de energia elétrica no Brasil é concentrado nas edificações dos setores residencial, comercial e público (Ministério das Minas e Energias, MME 2003), e que deste gastos em edifícios que dispõe de climatização 48% do consumo total é destinado ao condicionamento de ar e 24% para a iluminação (PROCEL, 1993). Nos prédios condicionados naturalmente a iluminação é responsável por 70% do consumo da edificação.

Tabela 1.1 - Usos finais para edifícios com e sem ar condicionado no Brasil.
Fonte: Procel (1993)

Sistema	Uso final (%)	
	Edifícios com ar condicionado	Edifícios sem ar condicionado
Ar condicionado	48	-
Iluminação	24	70
Equipamentos de escritório	15	16
Elevadores e bombas	13	14

Portanto, este trabalho em conjunto, unindo soluções arquitetônicas e simulações computacionais em nível de projeto, pretende propor formas de elaborar empreendimentos voltados à economia de energia e água, diminuição de resíduos nos canteiros de obras, redução de custos ao longo da vida útil do prédio e conforto ao usuário.

1.2 Revisão bibliográfica

A aplicação de simulações computacionais com o intuito de verificar a condição energética de prédios conta com várias opções de programas nos dias de hoje, demonstrando uma evolução compatível com a popularização e redução de custos no uso das tecnologias do setor de informática, o que ocorreu durante a década de 90 e continua até o presente momento. Entretanto, nota-se que esta área é pouco explorada fora do ambiente da academia, resultando na concepção de muitos projetos de edifícios ruins, com gastos de energia excessivos e perspectivas errôneas sobre quais e como algumas soluções da arquitetura podem contribuir para a construção de um edifício com bom desempenho térmico.

Em uma comparação de dados medidos em campo e resultados simulados nos programas NBSLD, DOE-2 e BLAST-2, Kusunda, et al. (1981) conclui que as simulações apresentam valores superiores as medições em ambientes reais.

Ao utilizar três metodologias distintas para avaliar o ganho energético através da radiação solar em simulações com o software DOE 2.1, Kierkus, et al. (1991) não pode afirmar com exatidão o valor da carga térmica.

Aktusu e Vitorino, et al. (1991) sugerem que o programa utilizado para calcular a carga térmica que determina o fluxo de calor e a temperatura seja inspecionado por uma validação.

No estudo da influência de certas variáveis arquitetônicas em relação ao total de energia elétrica consumida, Gómez, et al. (1995) demonstra que alterações na envoltória do prédio permitem uma redução na carga térmica destas edificações.

A capacidade de redução no total da energia consumida em edificações já construídas é de 30% e, para novos projetos, este valor sobe para 50%, segundo PROCEL (apud Pedrini, 1997). Em complemento a estes dados, Rivard (apud Pedrini, 1997) diz que cerca de 50% dos problemas ligados a deficiência energética de prédios comerciais tem origem no envelope da edificação.

O programa Design Builder, criado após anos de pesquisa e desenvolvimento da empresa especialista em codificação energética DESIGNBUILDER, foi lançado no mercado em dezembro de 2005 (Design Builder, 2007).

Severo (1999) estima o consumo mensal de energia para vários tipos de sistemas de climatização no período de um ano, aplicando estes sistemas em um prédio hipotético, através do software DOE 2.1.

Kruger, et al. (2000), utiliza os programas TRNSYS e AILOS visando simular técnicas de ventilação natural em edificações, com o intuito de manter o conforto térmico nos prédios.

A partir de simulações do software EnergyPlus para o sistema de condicionamento de ar de um edifício localizado na região sul do Brasil, Silva (2003) compara dados encontrados pelo programa a resultados de medições in loco, e conclui que a diferença entre estes é pequena, tendo o consumo elétrico simulado em um mês próximo do aferido no prédio.

Verdi (2003) avalia um sistema de ar condicionado com o software EnergyPlus e identifica que este estava superdimensionado, alterando a rotina de funcionamento do equipamento para um valor inferior a utilizada antes de ser identificado a discrepância.

Hagel (2005) avalia a demanda energética de uma edificação em Brasília, por meio do software EnergyPlus, e compara estes resultados com dados recolhidos no prédio, concluindo que esta é uma boa ferramenta para análises energéticas.

Modificando a orientação de um edifício (localizado em Brasília), os equipamentos utilizados no condicionamento dos ambientes, as características dos vidros e os materiais do telhado, Borduni (2006) simula estas condições no programa EnergyPlus e identifica uma economia de energia, em relação ao projeto original, se todas estas medidas fossem implementadas. Este trabalho é um indicativo de como é útil dispor de simulações energéticas no momento de elaborar um novo projeto e para investir em reformas nas edificações já existentes.

Farias (2007) elaborou um estudo da influência de características arquitetônicas no conforto térmico de uma edificação, através dos programas Design Builder e EnergyPlus. Com uma variação

dos dados de zonas bioclimáticas para o prédio modelado no Design Builder, conseguiu determinar soluções específicas em todas as três regiões bioclimáticas utilizadas como referências.

Nascimento (2007) simulou uma edificação no software Design Builder e obteve resultados de carga térmica, demanda de energia pelo sistema de climatização e valores de emissão de dióxido de carbono (CO₂). As alterações em componentes formadores de sombras, utilização de materiais com propriedades térmicas diferentes e mudança na orientação do prédio apresentaram reduções nas três variáveis obtidas pelas simulações.

Apesar de toda importância na realização de simulações energéticas para a o retrofit de prédios ou no advento de novos projetos de edificações, não há a prática de realizar estes estudos por parte de projetistas, sejam arquitetos ou engenheiros não cientistas. O empecilho para transformar esta rotina em prática usual, segundo Depecker, et al. (2000) está na complexidade de utilização destes programas, com interfaces não amigáveis e linguagens muito técnicas.

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é estudar a aplicação de soluções passivas de arquitetura em edificações, que visam à manutenção da situação de conforto térmico nos ambientes sem o auxílio de sistemas artificiais de climatização ou com grandes reduções na participação destes sistemas. Esta avaliação será feita através de simulações computacionais e terão como caso de estudo o edifício do Beijódromo, localizado no campus Darcy Ribeiro, em Brasília - DF. Além disso, outros objetivos específicos que devem ser citados:

- Realizar uma revisão bibliográfica e mostrar a importância do estudo da eficiência energética em edificações;
- Dominar a ferramenta computacional Design Builder;
- Simular a edificação do caso de estudo, o Beijódromo, de acordo com seus projetos originais e, na sequência, com alterações arquitetônicas que objetivam modificar os dados de eficiência energética do prédio;
- Levantar dados *in loco* no edifício de estudo, Beijódromo, para comparar com os resultados das simulações a serem realizadas no software Design Builder;
- Sugerir um método de trabalho que integre as soluções passivas de arquitetura com as simulações energéticas durante a elaboração de novos projetos de edifícios, com o intuito de construir prédios com menor consumo de energia.

1.4 Metodologia

A metodologia de trabalho construída para alcançar os objetivos propostos busca, inicialmente, uma revisão bibliográfica sobre o tema em estudo, analisando o histórico da utilização de simulações computacionais e suas aplicações para avaliar a eficiência energética de edificações.

Em seguida, é feita uma revisão de conceitos teóricos sobre os temas eficiência energética em edificações, carga térmica, conforto térmico e ferramentas computacionais, explicitando o funcionamento do software Design Builder e do programa EnergyPlus.

Depois, realizar o levantamento das características utilizadas por arquitetos na tentativa de “climatizar” edificações dispondo apenas de soluções passivas de arquitetura, sem a utilização de sistemas artificiais de condicionamento dos ambientes.

A apresentação do caso de estudo, prédio do Beijódromo, foi realizada na sequência. As características originais do projeto são descritas, a definição do layout, a orientação do edifício e demais itens que tenham relevância ao estudo deste relatório.

O próximo passo é a modelagem do prédio no programa Design Builder e a realização de simulações, primeiro como o edifício se encontra hoje, projeto original, que se tornará a referência para comparações. Depois, implementar simulações com propostas de intervenções arquitetônicas que influenciem nas análises energéticas.

Na continuação do estudo, é prevista uma etapa para levantamento de dados no edifício do Beijódromo, em que estas informações coletadas serão comparadas com os resultados das simulações realizadas.

Por fim, propor soluções que melhorem a eficiência energética do edifício Beijódromo e, ao mesmo tempo, atendam a condição de conforto térmico de seus usuários.

1.5 Estrutura do trabalho

A estrutura deste trabalho está dividida em sete capítulos. No primeiro capítulo discorre-se sobre a relevância do tema em estudo e, também, é realizada uma revisão bibliográfica que traz o histórico dos trabalhos realizados a partir de simulações e permite uma determinação de como este tipo de estudo é relevante para o assunto eficiência energética em edificações. Para encerrar este primeiro tópico, faz-se um levantamento dos objetivos específicos e a metodologia utilizada para cumprir tais metas.

No segundo capítulo é feita uma revisão de conceitos teóricos abordando eficiência energética em edificações, carga térmica, conforto térmico e as ferramentas computacionais utilizadas, o software Design Builder, que é a plataforma computacional escolhida na condução do trabalho.

Já no terceiro capítulo tem-se um texto que explora o conceito de solução passiva de arquitetura, as características de como são implementadas em projetos, e uma discussão inicial de como é feita a sua seleção, permitindo a afirmação de que conseguirão climatizar um prédio sem a necessidade de um sistema artificial de condicionamento dos ambientes.

O quarto capítulo é composto pela apresentação do prédio do Beijódromo, descrevendo a divisão interna, rotina de funcionamento, localização do edifício e demais informações que tenham relevância para com o estudo desenvolvido neste relatório.

No quinto capítulo são tratadas as simulações realizadas e as medições realizadas in loco, apresentando os principais dados de entrada e os resultados obtidos para cada intervenção estudada no projeto.

No sexto capítulo é feita uma análise dos resultados obtidos nas simulações.

O sétimo capítulo abriga as conclusões finais e as referências bibliográficas.

2 Revisão de conceitos teóricos

Neste capítulo é realizada uma revisão dos principais conceitos teóricos que se relacionam com o tema em estudo.

2.1 Eficiência energética em edificações

O conceito de eficiência energética em edificações ultrapassa a análise apenas do consumo de energia com os sistemas de climatização, iluminação e demais gastos provenientes de outros equipamentos. Segundo Agopyan (2000), a elaboração de edifícios mais sustentáveis abrange medidas como a redução do consumo energético na produção de insumos, como o cimento e a cerâmica de revestimento, e a tentativa de reduzir os desperdícios durante a execução da obra. Ampliando ainda mais essa linha de pensamento, Bourdeau (2000), diz que a importância da construção civil em um desenvolvimento sustentável supera a de todas as outras áreas industriais.

Nesta perspectiva, a preocupação em conceber construções eficientes do ponto de vista energético possui uma etapa fundamental, a de projeto. As medidas iniciadas nesta concepção, como as especificações dos materiais, os aspectos ambientais, o ambiente em volta do edifício e a gestão de recursos, devem continuar na fase de construção do prédio e participarem da etapa de utilização. E, ainda neste sentido, o envolvimento da indústria civil pode gerar uma grande economia de recursos naturais, observada a enorme demanda de materiais exigida na escala de produção de edificações.

Entre as principais ações relacionadas à produção de prédios sustentáveis ao mesmo tempo em que promovem o conforto térmico a seus usuários, tem-se:

- Utilizar uma nova rotina de projeto, levando em conta o ciclo de vida do prédio, com seus custos de manutenção, uso, operação e desmontagem;
- Aplicar idéias que facilitem a flexibilidade dos edifícios em reformas e modernizações;
- Adotar equipamentos que gerem menores níveis de degradação ao meio ambiente durante o seu ciclo de vida;
- Aprimorar a gestão da produção, diminuindo resíduos nos canteiros de obra e destinar, de forma adequada, àqueles que são gerados;
- Selecionar materiais que compõe estruturalmente o prédio com uma análise criteriosa de sua capacidade térmica;
- Implementar, sempre que possível, o uso da luz natural e ventilação natural.

Em relação à fase de projeto, a responsabilidade do arquiteto deve ser a de coordenar o processo de criação, e não apenas elaborar um projeto arquitetônico. É desejável que este tenha o conhecimento

básico dos conceitos relacionados ao desempenho energético de edificações para tornar a discussão multidisciplinar com todos os outros especialistas, engenheiros eletricitas, mecânicos, civis e demais profissionais.

Ao realizar esta junção de áreas do conhecimento em prol do objetivo da eficiência energética do edifício, a matriz de respostas geradas para as distintas questões de projeto não culminarão em resultados superpostos, mas, sim, em uma resposta integrada.

2.2 Carga térmica

O cálculo da carga térmica permite determinar a quantidade de calor total, latente e sensível, que deverá ser retirada ou fornecida ao ar do ambiente para mantê-lo em condições adequadas de temperatura e umidade (ASHRAE, 1993). Este dado, a carga térmica, é encontrada após a identificação de todas as variáveis arquitetônicas, climáticas e humanas do projeto.

A partir deste cálculo, pode-se dimensionar um sistema para resfriamento ou aquecimento do ambiente interior.

As fontes térmicas ou fatores mais decisivos na estimativa da carga térmica, de acordo com as variáveis já identificadas (arquitetônicas, climáticas e humanas) são:

- Ganhos e perdas térmicas por condução através do envoltório do prédio: nas paredes, teto, forro, piso e fachadas;
- Trocas entre meio externo e interno por condução e ganhos de calor por insolação, decorrentes das janelas e fechamentos transparentes;
- Aumento da carga térmica em razão das condições do ar de infiltração e renovação;
- Iluminação artificial que produz uma quantidade de calor incorporada no cálculo da carga térmica;
- O calor dissipado por todos os equipamentos utilizados no ambiente, como impressoras, computadores e outros;
- Quantidade de pessoas que utilizam o ambiente e qual o nível metabólico delas (que atividades físicas desenvolvem);
- Insolação, que varia de acordo com a orientação do prédio, os modelos de janela e, se existirem, quais suas proteções solares;
- Temperatura do ar externo;
- Umidade do ar externo.

Após o reconhecimento de todas as características que formam o ambiente construído, da maneira mais fidedigna possível, a escolha do sistema e sua capacidade instalada serão compatíveis com um valor de carga térmica que reflète na realidade a demanda energética da edificação.

Ganho de calor no ambiente

É a taxa que registra a entrada de calor no local em estudo ou a quantidade deste que é gerado em seu interior. O calor pode ser latente ou sensível.

Taxa de transferência de calor

As duas variáveis mais importantes relacionadas à taxa de transferência de calor em um projeto de climatização são:

- Demanda térmica;
- Taxa de retirada de calor do ambiente.

Calor latente e sensível

A definição de calor latente, de acordo com (ASHRAE, 1993), é de uma variável adicionado ao ambiente através de ar externo e dos usuários deste local. Já o calor sensível, é acrescentado ao ambiente pelo processo de condução, convecção e/ou radiação. E, para manter a taxa de umidade relativa constante, é necessário que haja condensação na serpentina de refrigeração em uma taxa igual à em que a umidade é incorporada no ambiente.

Calor radiante

É um acréscimo de calor indireto, que é adicionado à carga térmica após a absorção do calor pelas superfícies da edificação, envoltório, e seus componentes internos, móveis e equipamentos. Assim, quando há a elevação de temperatura destes componentes, o calor é transferido em parte por convecção ao ar do ambiente e o restante é emitido em forma de radiação pelas superfícies. A relação entre a quantidade de calor radiante ganho e sua perda na carga térmica é determinada pela capacidade térmica das superfícies que compõe o ambiente analisado.

Metodologias de cálculo

As principais metodologias de cálculo da carga térmica são:

- TFM - *Transfer Function Method*;
- TETD - *Total Equivalent Temperature Differential*;
- CLF - *Cooling Load Factor*;
- SLF - *Solar Load Factor*;
- CLTD - *Cooling Load Temperature Difference*.

O principal método abordado neste trabalho é o TFM, Método da Função de Transferência, que é utilizado pela ferramenta computacional EnergyPlus. Este método de cálculo considera o conceito de balanço de calor entre a condução, convecção e a radiação entre todas as superfícies de cada ambiente. Em uma primeira etapa, são identificadas todas as fontes que geram calor e, depois, faz-se a conversão desse calor gerado em carga térmica. A base de resultados obtidos é relativa a um período de tempo anual.

2.3 Conforto térmico

O conceito de conforto térmico é como um estado mental que reflete a satisfação do homem com o ambiente térmico que o envolve. Quando há uma não satisfação, esta pode ser oriunda da sensação de desconforto pelo calor ou pelo frio, que é provocada devido a não estabilidade do balanço térmico, isto é, pelas diferenças entre o calor produzido pelo corpo e o calor perdido para o ambiente (LabEEE, 2005). A norma, em nível internacional, que rege o conforto térmico em ambientes é a ISO 7730 (1994).

De acordo com (ASHRAE, 1993), existe um dado estatístico que expressa a zona de conforto com uma faixa de condições em que a maior parte dos usuários de um ambiente em estudo sentem-se confortáveis (Figura 2.1).

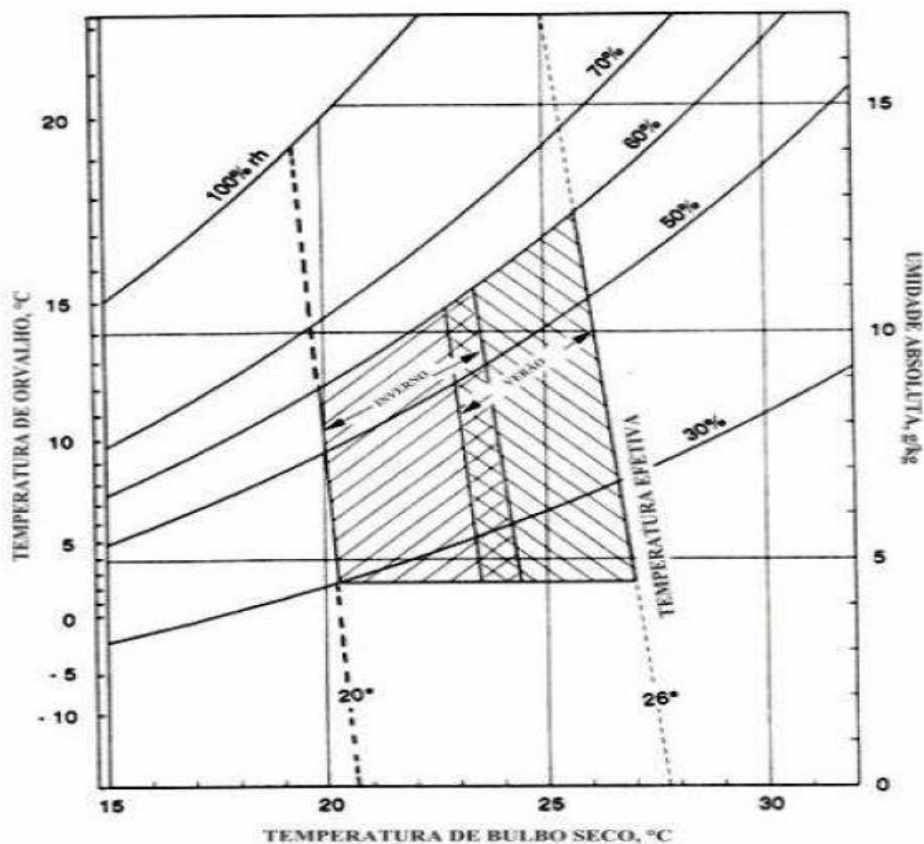


Figura 2.1 - Zona de Conforto Térmico.
Fonte: (ASHRAE, 1993)

Os principais fatores em relação ao conforto térmico que serão analisados são os ambientais e os individuais, constituídos por:

- Fatores ambientais:
 - Temperatura do ar;
 - Temperatura radiante média;
 - Umidade relativa do ar;
 - Velocidade do ar;
- Fatores Individuais:
 - Metabolismo causado por atividades físicas;
 - Resistência térmica do vestuário.

Em relação às trocas térmicas entre corpo e ambiente, a dissipação de calor por meio de mecanismos que envolvem estas ações é dividida em trocas secas, que ocorrem pelos processos de condução, convecção e radiação, e as trocas úmidas, que são feitas através da evaporação.

De acordo com a atividade física executada é possível determinar a quantidade de calor que será liberada no ambiente. Quando esse calor perdido tem origem em uma troca seca é chamado de calor sensível, que varia de acordo com as diferenças de temperatura entre usuário e local de estudo. Para as reações que agregam mudanças de fase, como quando o suor passa para o estado gasoso, as trocas são úmidas, o processo é a evaporação e o calor perdido é o latente.

2.3.1 Termo-regulação

Os mecanismos de termo-regulação do corpo humano possuem um determinado comportamento para os dois tipos de sensação de desconforto térmico existentes, o calor e o frio. Em períodos do ano com altas temperaturas há a dificuldade em eliminar calor, provocando a vasodilatação. Esta medida do organismo eleva o volume de sangue, acelerando o ritmo cardíaco e causando a transpiração. Já com o frio existe a dificuldade em manter o calor em função da baixa temperatura do ambiente, ocasionando a vasoconstrição, que provoca a redução do volume de sangue, diminuindo o ritmo cardíaco. Uma atividade que gera calor decorrente da reação ao frio é o arrepio e o tritar.

A partir das análises das reações, tanto ao frio como do calor, é possível concluir que o principal órgão termo-regulador do organismo humano é a pele, sendo que as trocas de calor são realizadas nesta parte do nosso corpo. Ao regular o fluxo sanguíneo que percorre este órgão há o controle da temperatura da pele, sendo que quanto maior a vazão sanguínea, mais elevada é a sua temperatura.

Na ativação das defesas fisiológicas perante situações de desconforto térmico, a regulação vasomotora do fluxo de sangue na camada subcutânea é a primeira medida a atuar, através das já definidas vasodilatação ou vasoconstrição que atuam com o objetivo de aumentar ou diminuir a resistência térmica desta camada periférica do corpo. E, por fim, outra defesa para o controle da temperatura da pele existente é a transpiração, que é iniciada no momento em que as perdas por convecção e radiação são menores do que as perdas necessárias a regulação térmica do corpo.

Metabolismo

A temperatura interna do corpo humano deve ser uma constante, em torno de 37°C, sendo que seus extremos para a sobrevivência ficam no intervalo de 32°C a 42°C. Desta forma, o processo em que a energia interna é criada a partir de elementos combustíveis orgânicos, o metabolismo, fornece energia ao organismo. Entretanto, do total dessa energia gerada por uma pessoa apenas 20% é convertida em potência de trabalho, sendo que os 80% restantes são transformados em calor que deve ser dissipado para manutenção do equilíbrio da temperatura interna do corpo (LabEEE, 2005). No instante em que a situação de desconforto térmico for detectada pelo organismo o sistema termo-regulador ativa os mecanismos de controle, seja para reagir ao frio ou ao calor.

Tabela 2.1 - Taxa metabólica de diferentes atividades.
Fonte: ISO 7730 (1994)

Atividade	Metabolismo (W/m ²)
Reclinado	46
Sentado, relaxado	58
Atividade sedentária (escritório, escola etc.)	70
Fazer compras, atividades laboratoriais	93
Trabalhos domésticos	116
Caminhando em local plano a 2 km/h	110
Caminhando em local plano a 3 km/h	140
Caminhando em local plano a 4 km/h	165
Caminhando em local plano a 5 km/h	200

Vestuário

A composição das roupas utilizadas por uma pessoa tem efeito direto nos mecanismos de trocas térmicas do indivíduo com o ambiente. O vestuário representa uma barreira ao processo de trocas através da convecção, pois funciona como isolante térmico, abrigando uma camada de ar, mais ou menos quente, junto ao corpo. Entre as influências da vestimenta pode-se citar a redução do ganho de calor relativo à radiação solar direta, diminuição das perdas em condições de baixo teor de umidade, altera o efeito refrigerador do suor e, também, diminui a sensibilidade do corpo as variações de temperatura e velocidade do ar.

Na avaliação da influência de cada roupa no conforto térmico deve-se analisar a resistência térmica dos tecidos, fibras, tamanhos e ajustes ao corpo. A unidade de medição é o clo, representada quantitativamente por:

$$1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W} = 1 \text{ terno completo}$$

O índice de resistência térmica (I_{cl}) é dado pela somatória dos valores de resistência de todas as roupas de um indivíduo no ambiente em estudo (ISO 7730, 1994):

$$I = \sum I_{cl} \quad (1)$$

Tabela 2.2 - Índice de resistência térmica para vestimentas.
Fonte: ISO 7730 (1994)

Vestimenta	Índice de resistência térmica – I_{cl} (clo)
Meia calça	0,10
Meia fina	0,03
Meia grossa	0,05
Calcinha e sutiã	0,03
Cueca	0,03
Cuecão longo	0,10
Camiseta de baixo	0,09
Camisa de baixo mangas compridas	0,12
Camisa manga curta	0,15
Camisa fina mangas comprida	0,20
Camisa manga comprida	0,25
Camisa flanela manga comprida	0,30
Blusa com mangas compridas	0,15
Saia grossa	0,25
Vestido leve	0,15
Vestido grosso manga comprida	0,40
Jaqueta	0,35
Calça fina	0,20
Calça média	0,25
Calça flanela	0,28
Sapatos	0,04

Temperatura do ar

Na comparação dos fatores ambientais que influenciam o conforto térmico, a temperatura do ar é o mais relevante deles. A diferença de temperatura entre dois pontos gera a convecção natural do ar, que é movimentado em um sentido de ascensão do ar quente e descida do ar mais frio, resfriando o

ambiente. Ainda neste sentido, o conforto térmico é baseado na subtração entre a temperatura da pele e do ar, fornecendo o valor da perda de calor do usuário.

Temperatura radiante média

O conceito de temperatura radiante média é definido pela temperatura uniforme de um ambiente imaginário em que a troca de calor por radiação é igual ao ambiente real não uniforme (LabEEE, 2005).

Velocidade do ar

A velocidade do ar age na intensificação do processo de convecção. Em um ambiente interno pode existir o deslocamento do ar sem a ação direta do vento, através da convecção natural. No momento em que meios mecânicos são empregados, como um ventilador, o coeficiente de convecção sobe, também elevando a sensação de perda de calor, denominando este processo como convecção forçada. Como uma última consequência deste fator ambiental analisada, a eficiência da retirada de água em contato com a pele reduz a sensação de calor, isto é, há o aumento da evaporação no corpo humano.

Umidade relativa do ar

A perda de calor por convecção é um mecanismo de troca térmica que sofre variação com a ação conjunta da umidade do ar e da velocidade do vento. Como a eliminação de cerca de 25% da energia térmica total gerada por um organismo é realizada sob forma de calor latente, sendo 10% por respiração e 15% por transpiração (LabEEE, 2005). Assim, a eficiência na eliminação de calor por evaporação reduz ao elevar-se a umidade relativa. Quando o ar está saturado (valor máximo de vapor d'água no ar), a evaporação não ocorre e o ser humano começa a ganhar mais calor no momento em que a temperatura do ar é maior que a da pele. E, ainda, no caso em que o ar está seco, as perdas continuam mesmo com as temperaturas mais elevadas.

2.3.2. Índice de conforto

O índice de conforto térmico abordado neste capítulo possui aplicação as condições ambientais utilizadas na elaboração e construção de edificações e ainda leva em conta as condições climáticas do Brasil, que é o Voto Médio Preditado - PMV.

Esta metodologia foi desenvolvida por Fanger (Fanger, 1972) e faz uma análise da sensação de conforto térmico em função de seis variáveis. É feito um relacionamento destas variáveis com o voto médio predito (PMV - Predicted Mean Vote) e a parcela, em porcentagem, de pessoas insatisfeitas (PPD - Predicted Percentage of Dissatisfied). A norma internacional sobre conforto térmico, a ISO 7730, adota este método.

A análise do método está relacionada com o voto de uma grande quantidade de pessoas, como mostrado na tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Escala térmica do voto médio predito.

Fonte: Fanger (1972)

Escala	Sensação
+3	muito quente
+2	quente
+1	levemente quente
0	neutro
-1	levemente frio
-2	frio
-3	muito frio

De acordo com (ISO 7730, 1984), o índice do PMV deve ser usado apenas entre + 2 e -2, pois acima destes valores cerca de 80% das pessoas estariam insatisfeitas em relação ao conforto térmico.

E, mais ainda, com as diferenças entre as pessoas devido à idade, sexo, nacionalidade e outras características, é muito difícil definir uma situação de conforto térmico que agrade a todos, sempre haverá insatisfeitos em uma amostragem de pessoas estudadas. Por isso, a (ISO 7730) considera um ambiente termicamente aceitável quando o PPD < 10%, isto é, $-0,5 < PMV < +0,5$.

Em relação à forma de cálculo do PMV no software EnergyPlus, de acordo com (DOE, 1993), tem-se que:

$$M = L \quad (2)$$

onde,

M é a taxa de energia produzida pelo metabolismo humano;

L é a taxa de calor perdido pelo corpo.

Desta forma, se a produção de calor pelo corpo for igual a sua perda de calor, tem-se uma situação de conforto térmico. A equação da taxa de calor perdido é dada por:

$$L = Q_{res} + Q_{dry} + E_{sk} \quad (3)$$

onde,

Q_{res} representa o termo da taxa de perda de calor pela respiração, formulado da seguinte maneira,

$$Q_{res} = E_{res} + C_{res} = 0,0023M(44 - P_a) + 0,0014M(34 - T_a) \quad (4)$$

onde,

E_{res} é a troca de calor latente de respiração;

C_{res} é a troca de calor sensível de respiração;

P_a é a pressão de vapor do ambiente;

T_a é a temperatura do ar.

Q_{dry} representa a taxa de calor sensível dissipado pela pele, formulado da seguinte maneira,

$$Q_{dry} = Q_c + Q_r = h_c f_{cl} (T_{cl} - T_a) + f_{eff} f_{cl} \varepsilon \sigma (T_{cla}^4 - T_{ra}^4) \quad (5)$$

onde,

Q_c é a taxa de calor de convecção;

Q_r é a taxa de calor radiante;

f_{eff} é a fração da superfície efetiva para radiação;

f_{cl} é o fator de vestimenta;

T_{cla} é a temperatura da superfície da vestimenta;

T_{ra} é a temperatura média radiante.

E o termo E_{sk} , que é a perda de calor da pele por evaporação apresenta a seguinte formulação,

$$E_{sk} = E_{rsw} + E_{diff} = 0,42(H - 58,2) + 0,4148(P_{sk} - P_a) \quad (6)$$

onde,

E_{rsw} é a taxa de calor perdido pelo processo de evaporação do suor;

E_{diff} é a taxa de perda de calor por difusão de vapor de água pela pele;

P_a é a pressão de vapor de água a uma temperatura ambiente;

P_{sk} é a pressão de vapor de água a temperatura da pele, definida matematicamente da seguinte forma,

$$P_{sk} = 1,92T_{srk} - 25,3 \quad (7)$$

onde,

T_{srk} é a temperatura da pele necessária para o conforto térmico, definida em função de H, que é a taxa de produção interna de calor por unidade de área corporal,

$$T_{skr} = 35,7 - 0,028H \quad (8)$$

Logo, ao ser determinada a taxa de evaporação do suor que uma pessoa deve ter para atingir o conforto térmico em certa condição, o modelo calcula a perda de calor L. A escala PMV tem como base a perda de energia L em relação à taxa metabólica M, através da formulação dada por:

$$PMV = (0,303e^{-0,036M} + 0,028)(H - L) \quad (9)$$

2.4 Ferramentas computacionais

Avaliar as edificações através de simulações computacionais é uma ótima forma de conhecer o desempenho energético destes prédios, tanto de iluminação, térmico ou do consumo de energia (LabEEE, 2005). Neste texto são avaliados os programas Design Builder, plataforma utilizada para simular o edifício que constitui o caso de estudo, o EnergyPlus, que é a base de cálculo buscada pelo Design Builder, e o DOE 2.1E.

2.4.1 DOE 2.1E

O software DOE 2.1E foi elaborado para analisar o desempenho termo-energético de prédios, sendo o seu desenvolvimento feito pelo Lawrence Berkeley Laboratory em conjunto com o Department of Energy (DOE), localizado nos Estados Unidos. No Brasil, foi implementado pelo Núcleo de Pesquisa em Construção (NPC), de acordo com Lamberts (1995). A simulação realizada pelo programa é a do consumo horário e dos custos de energia em um prédio, sendo que as variáveis de entrada são:

- Características da arquitetura, como forma, materiais utilizados e afins;
- Rotina de utilização da edificação, como quantidade de pessoas e tipo de atividade;
- Identificação do sistema de condicionamento de ar aplicado no prédio;
- Determinação do sistema de iluminação instalado e sua potência por unidade de área;
- Dados climáticos, como temperatura, umidade e radiação solar;
- Custos do consumo e demanda da energia elétrica.

Nos estudos desenvolvidos a partir do DOE 2.1E pode-se viabilizar as possibilidades de economia de energia elétrica em edificações já construídas, fazer considerações sobre mudanças dos aparelhos que compõe o sistema de climatização, a forma de funcionamento destes e, até, mudanças na arquitetura. Logo, a avaliação de novos projetos também é realizada, permitindo considerar as variáveis para a elaboração de um edifício com a máxima eficiência energética.

Para modelar as edificações, como pode ser observada na Figura 2.2, tem-se o software VisualDOE, que é uma versão mais recente do software DOE 2.1E, e apresenta uma interface gráfica amigável.

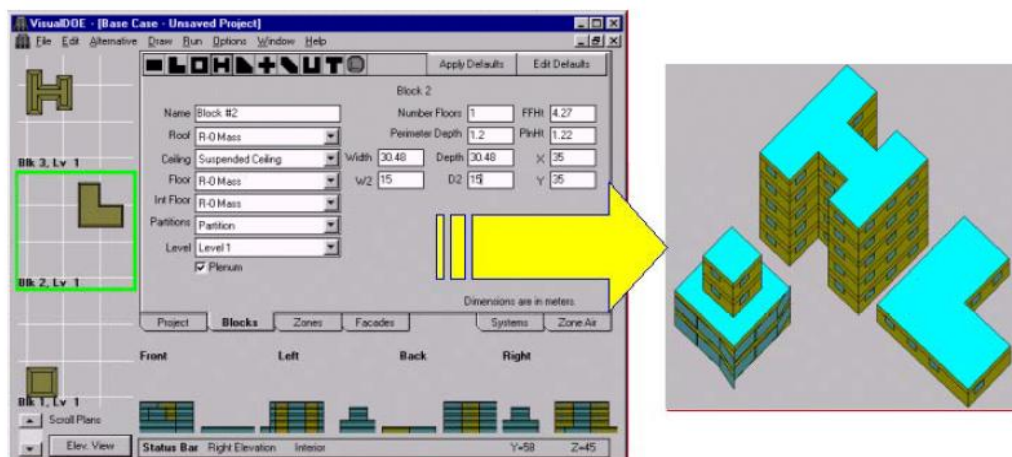


Figura 2.2 - Modelagem de um edifício no VisualDOE.
 Fonte: Lamberts (1995)

2.4.2 EnergyPlus

O programa EnergyPlus, que realiza simulações termo-energéticas, utiliza as características potencializadas de outros dois softwares, o Blast e o DOE -2. Do programa Blast toma como referência sua metodologia de cálculo, o balanço térmico, aperfeiçoando esta em determinados aspectos que facilitam a simulação das edificações na atualidade. Logo, um novo código foi produzido para calcular a variável carga térmica em intervalos de tempo pré-estabelecidos, transferindo na sequencia estes valores encontrados para o módulo de simulação de sistemas de condicionamento de ar.

Ainda citando outras evoluções percebidas frente a outros programas de simulação, este consegue realizar o estudo do fluxo de ar entre zonas térmicas, de sistemas de resfriamento ou aquecimento que atuam por radiação ou até do ganho e perda de umidade em materiais (Lamberts, 1995).

Uma das características mais importantes é a interface aberta do programa, que permite que outros programadores criem novas interfaces para utilização do EnergyPlus, como é o caso do Design Builder, HLCP, Hevacomp e outros.

Enfim, a necessidade em trabalhar com novos projetos mais eficientes e conseguir uma redução no consumo de eletricidade pode ser uma das causas do fornecimento gratuito do EnergyPlus através de meios digitais, difundido amplamente por seu criador, o Departamento Americano de Eficiência Energética e Energia Renovável (EERE).

Balanço de Energia utilizado pelo software EnergyPlus

Na realização do balanço de energia pelo software EnergyPlus existem algumas hipóteses que são assumidas, como:

- Temperatura das superfícies uniformes;

- Radiação de onda curta e longa uniforme;
- Troca de radiação entre as superfícies;
- Condução no interior do elemento;
- Uma zona térmica pode apresentar temperaturas diferentes.

De acordo com Strand (2001), as três etapas deste balanço energético abordam as superfícies externas, as superfícies internas e o volume do interior de cada ambiente. E, em relação ao equacionamento do balanço, há o envolvimento dos processos de condução, convecção e radiação para cada superfície que constitui a edificação.

Dados climáticos

As informações climáticas utilizadas são resultados da coleta de amostras de vários anos em uma região específica, neste caso a cidade de Brasília, armazenando dados ao longo do dia sobre a temperatura, velocidade dos ventos, umidade relativa e outros.

Os arquivos escolhidos para compor a base de entrada de dados climáticos neste trabalho foram selecionados através de uma busca por meses característicos ao longo de vários anos de amostras coletadas na região de Brasília, compondo assim um arquivo TRY - Test Reference Year, que se assemelha mais as reais condições climáticas, eliminando variações.

2.4.3 Design Builder

O programa Design Builder é uma ferramenta que conta com o EnergyPlus como sua base de cálculo, elaborado com uma interface amigável e evoluções nas partes gráficas e de modelagem. É um software de simulações termo-energéticas que possui a capacidade de representações das mais complexas edificações com facilidade.

Entre as características positivas na sua utilização pode-se citar a possibilidade de obtenção de dados referentes à rotina de funcionamento do edifício, o comportamento físico e ambiental, recursos de imagens durante a modelagem e, por fim, a compreensão dos gastos energéticos para a produção de projetos de edificações eficientes.

No preenchimento de entradas no programa é possível escolher a base de dados climáticos a ser carregada, a determinação de características de construção, atividades dos usuários, sistemas de climatização, rotinas de ocupação e sistemas de iluminação. Todas estas entradas de informações são bastante simples, controladas por uma barra de ferramentas.

E, depois de realizadas as simulações, os resultados finais são analisados sem a necessidade de intermédio de outro programa, além da possibilidade de exportá-los para diversos outros formatos.

3 Solução passiva de arquitetura

Neste capítulo é feita uma análise de algumas das soluções passivas utilizadas na manutenção do conforto térmico em edificações.

A aplicação de soluções passivas que visam manter o conforto térmico de edificações sem recorrer a utilização de climatizações artificiais são instrumentos dos projetistas arquitetos para elaborar projetos de construções com maior eficiência energética. Em determinadas situações é possível aliar idéias estéticas da arquitetura e, ao mesmo tempo, dispor da utilização destas soluções sem que elementos arquitetônicos sejam prejudicados.

Desta forma, este capítulo discorrerá sobre quatro destas soluções passivas a disposição dos arquitetos projetistas, sendo que duas delas são aplicadas no prédio do Beijódromo. As quatro soluções abordadas são:

- Brises;
- Telhado vegetado;
- Ventilação noturna;
- Ventilação natural.

3.1 Ventilação natural

A função da ventilação é mais ampla do que somente retirar carga térmica da edificação. Esta também é responsável por renovar o ar do ambiente e promover o resfriamento fisiológico dos usuários, de acordo com Cândido (2006). Em relação à influência da ventilação natural na sensação de conforto térmico, pode-se dizer que o processo de evaporação do suor é beneficiado por esta solução passiva, pois a temperatura efetiva é reduzida através do movimento do ar, o que aumenta os limites dos valores de conforto térmico.

Observado o potencial de implementação deste recurso, se faz necessária a avaliação de como é o desempenho da ventilação natural, que é uma tarefa complexa, devido ao fato de envolver fatores muito variáveis, como o vento e o ar em movimento. As interferências a que estão sujeitadas o vento são importantes na hora de analisar o uso de ventilação em um edifício, pois obstáculos no caminho, como árvores ou outras edificações, podem alterar as velocidades e direções do vento, tornando estas duas variáveis imprevisíveis. Além destas duas formas de interferência a ventilação, Bittencourt e Cândido (2006) citam a distribuição espacial dos edifícios e altura dos mesmos, inclinações de beirais e telhados, existências de cercas e muros e a presença de vegetação.

Entrando na análise do desempenho da ventilação no interior do prédio, existem três fatores que moldam a configuração dos fluxos de ar:

- Dimensão e localização das aberturas de entrada e saída do ar;
- Modelo e configuração destas aberturas;
- Localização de outros componentes, por exemplo, as divisórias internas.

3.2 Ventilação noturna

A ventilação noturna utiliza uma estratégia bioclimática que dispõe da ventilação natural visando resfriar as superfícies internas do envelope de uma edificação. Se na ventilação natural as vazões de ar deveriam ser direcionadas aos ambientes internos ocupados, para que o contato do ar em movimento com a pele favoreça a evaporação do suor e, por consequência, cause a sensação de conforto térmico, principalmente em climas quentes e úmidos, neste outro tipo de estratégia de solução passiva são as condições de temperatura nos ambientes internos que serão afetadas, sob as seguintes perspectivas:

- Realizar o amortecimento térmico, que é a redução dos picos de temperatura do ar, valores máximos e mínimos, nos ambientes internos;
- Diminui a temperatura do ar durante todo o dia e, com maior eficiência, no horário da manhã;
- Reduz a temperatura dos solos;
- Promove o retardamento dos picos de temperatura do ar em relação à temperatura externa, o que é chamado de atraso térmico.

No momento de analisar o desempenho da ventilação noturna é feito um levantamento qualitativo da distribuição dos fluxos e da velocidade do ar, avaliando a capacidade bioclimática da região de promover o resfriamento das superfícies internas e também alcançar com sucesso os demais processos benéficos desta solução.

Por fim, a avaliação da eficácia das estratégias de ventilação natural e noturna ou outras afins podem ser melhoradas e mais exploradas a partir de simulações termo-energéticas, o que será feito no Beijódromo. Com os resultados destas ferramentas computacionais é possível avaliar outras combinações de horários de ventilação, novos valores de vazões e mais mudanças que beneficiem a eficiência energética.

3.3 Telhado vegetado

O contexto histórico da prática de incorporação de vegetação em superfícies construídas, verticais ou horizontais, pode ser estudado em arquiteturas vernaculares em todo o mundo há muito tempo. Um

tipo de telhado muito usado até meados da 2ª guerra mundial foram os telhados vegetados turfados, como pode ser visto na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Telhados vegetados turfados na Islândia.

O telhado vegetado é um sistema de cobertura constituído por camadas especiais que permitem a sobrevivência e integridade física de uma massa de vegetação sobre a superfície superior da edificação (Lamberts, 2010). Este tipo de solução passiva traz outros benefícios além do aumento da eficiência energética de prédios e do conforto térmico dos ocupantes do ambiente interno, como o potencial para redução de enchentes urbanas e mitigação dos efeitos climáticos de ilhas de calor.



Figura 3.2 - Exemplo de telhado vegetado na Alemanha.

A aplicação desta solução passiva requer um estudo de viabilidade in loco para cada região, avaliando qual é o seu desempenho térmico em determinada especificidade climática de uma cidade. Assim, deve-se avaliar a influência da vegetação e do substrato no microclima interno e externo, o fluxo de calor através da cobertura e, por fim, comparar o desempenho energético do telhado vegetado com as típicas coberturas das casas na região em estudo através de resultados experimentais.

Assim, além da melhoria do desempenho energético da edificação, mais benefícios podem ser contados às cidades que possuem este tipo de arquitetura, como o aumento da qualidade do ar, crescimento do isolamento termo-acústico, elevação do tempo de vida útil, diminuição de problemas referentes aos sistemas construtivos e surgimento de novas paisagens na morfologia urbana.

Em relação aplicação dos telhados vegetados no Brasil, praticamente não existem experiências documentadas sobre a utilização desta técnica no país, com exceção da exploração de um viés estético, como é o caso do terraço-jardim do Ministério da Educação no Rio de Janeiro (Kohler et al, 2003).

Formas construtivas dos telhados vegetados

No que se diz respeito às formas de construção dos telhados vegetados encontram-se dois tipos predominantes, o extensivo e intensivo.

O do tipo extensivo é identificado pelo seu baixo peso, 70 a 170 Kg/m², por sua camada de substrato delgada, 5 a 15 cm, por sua baixa necessidade de manutenção, constituídos por plantas rasteiras e tolerantes a seca, e com baixo custo. A implementação destes pode ser feita em edificações já construídas e com uma inclinação de até 40% (Peck; Kuhn, 1991).

Ainda de acordo com Peck e kuhn (1991), os intensivos são caracterizados por serem, em quase tudo, o oposto dos extensivos. Possui um alto peso, 300 a 900 Kg/m², uma espessa camada de substrato, 20 a 60 cm, alta necessidade de manutenção, é preciso irrigar plantas, e alto custo.

Função térmica dos telhados vegetados

O resfriamento passivo da cobertura é causado pela absorção da radiação solar incidente nas plantas desse telhado. E, somado a isto, há o benefício do efeito sombreador da camada de vegetação em relação às superfícies construídas e a baixa difusidade térmica oriunda da camada de solo úmida. Todos estes resultados acabam por reduzir as temperaturas superficiais e diminuir o fluxo de calor no interior das edificações da cobertura (Del Barrio, 1998).

Diferente da teoria que se acreditava, os telhados vegetados não são isolantes térmicos, mas, sim, dispositivos que armazenam calor, isto é, a eficiência destes está na alta capacidade térmica associada a grandes trocas de calor latente. A partir do momento em que o fluxo de calor no sentido do interior das edificações é reduzido, o conforto térmico melhora, os ganhos térmicos nos períodos de maior calor são diminuídos e o consumo de energia elétrica com climatização do ambiente interna é menor.

Economia de energia da edificação

Segundo Onmura et al. (2001), medições realizadas em um telhado vegetado, constituído de grama, no Japão apontaram uma redução no valor de 50% do fluxo de calor em direção ao ambiente interno. Outro dado proveniente desta pesquisa diz respeito à redução da temperatura superficial, que neste caso caiu de 60 °C para 30°C no período do dia.

Outro autor, Liu (2003), comparou um telhado vegetado com um convencional de concreto e chegou à conclusão que a energia requerida para o condicionamento devido ao fluxo de calor através do telhado vegetado foi reduzido em mais de 75 %. E, também nesse mesmo estudo, foi comprovado que estes são mais eficientes na redução do ganho de calor (95%) do que na redução da perda de calor

(26%). Por fim, compara-se a demanda energética de cada um dos tipos, sendo que o telhado comum necessita de 7,5 KW/dia, enquanto o vegetado demanda 1,5 KW/dia para resfriamento.

3.4 Brise

As brises são proteções utilizadas com o intuito de evitar que a radiação direta incida no ambiente interno da edificação. Para tal, é necessário o estudo dos movimentos do Sol e Terra, com seus efeitos sob a visão do observador na terra. A definição deste observador pode ser a de um ponto, uma reta, um plano como uma parede ou um volume, no caso de uma edificação (Lamberts, 2001).

Entre estes dados sobre deslocamento do sol e terra, pode-se citar o conhecimento da altura solar e o azimute, que são necessários para projetar uma sombra em determinada hora. Assim, uma piscina é construída ou um edifício sem que estes elementos sejam sombreados pelo entorno.

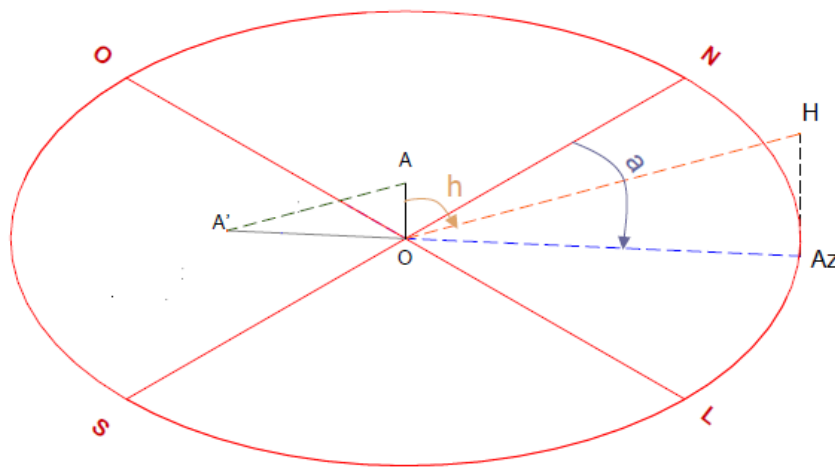


Figura 3.3 - Exemplo da projeção da sombra de um poste no piso.
Fonte: Lamberts (2001)

O tipo de brise e suas dimensões variam de acordo com a eficiência desejada. Assim, é considerado eficiente um brise quando este impedir a entrada de raios solares nas horas calculadas.

Traçado de máscaras

Outra informação necessária ao dimensionamento deste tipo de solução passiva de arquitetura é o mascaramento que cada tipo de brise proporciona, logo, o traçado de máscaras é a ferramenta utilizada no projeto de proteções solares.

Tipos de brises

O primeiro tipo de brise analisado possui sua eficiência limitada devido a sua projeção lateral condicionada pelo ângulo γ , de acordo com a Figura 3.4 e 3.5.

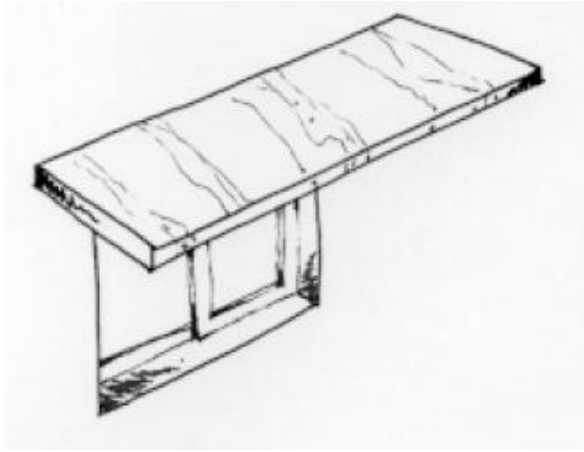


Figura 3.4 - Brise horizontal finito.
Fonte: Lamberts (2001)

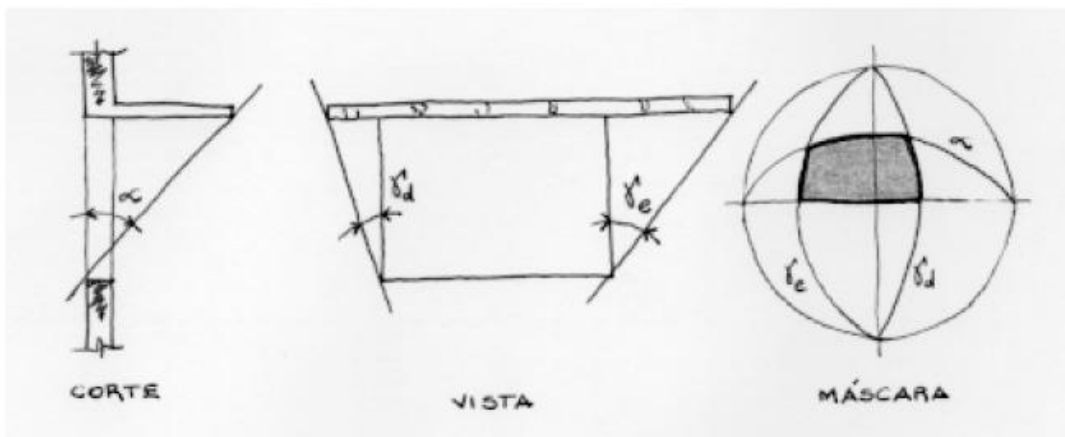


Figura 3.5 - Mascaramento proporcionado pelo brise horizontal finito.
Fonte: Lamberts (2001)

Já no caso do brise vertical, a produção do sombreamento é originada pelo ângulo β e será limitada pelo ângulo γ (Figura 3.6 e 3.7).

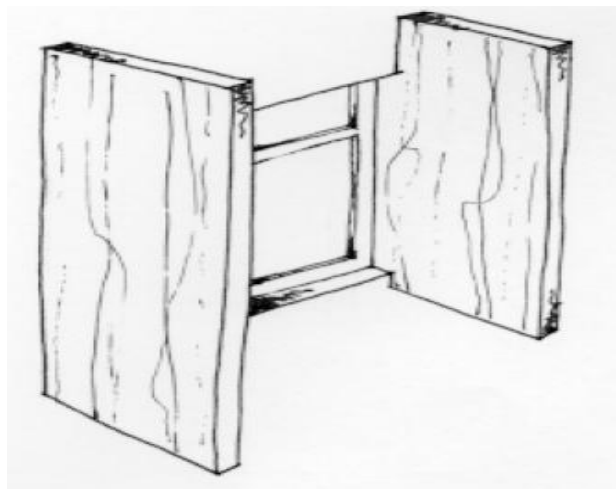


Figura 3.6 - Brise vertical finito.
Fonte: Lamberts (2001)

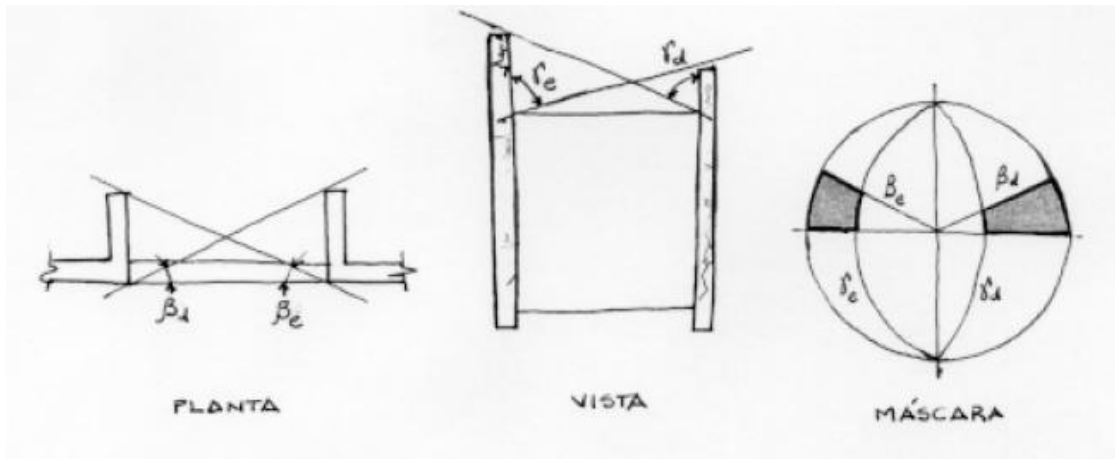


Figura 3.7 - Mascaramento proporcionado pelo brise vertical finito.
 Fonte: Lamberts (2001)

Por fim, utilizando o mascaramento fornecido pelos dois tipos de brises apresentados, o vertical e horizontal finito, juntamente com o finito e vertical infinito, pode-se montar o mascaramento de qualquer tipo de brise, com as mais diversas combinações entre horizontal e vertical (Figura 3.8).

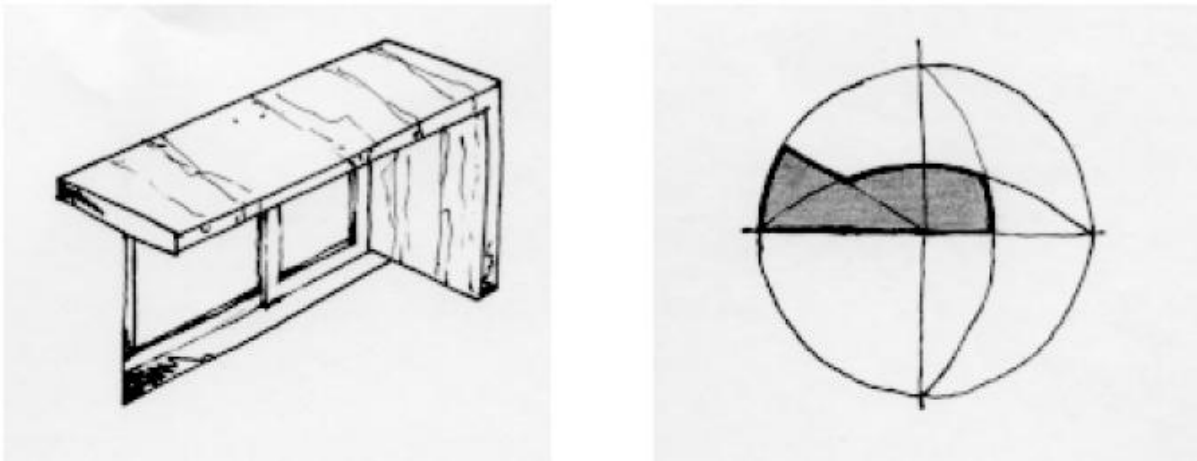


Figura 3.8 - Brises mistos.
 Fonte: Lamberts (2001)

4 Caso de estudo

Neste tópico será apresentado o Beijódromo, detalhando suas principais características, como a construção e sua localização.

4.1 Aspectos Gerais

O prédio do Beijódromo é um espaço público construído para abrigar o acervo de um dos fundadores da Universidade de Brasília (UnB), Darcy Ribeiro. E, além desta função de armazenar as obras literárias, o edifício funciona como um espaço de estudo, contando com mesas e computadores, e um ambiente para realizar exposições artísticas das mais diversas modalidades.



Figura 4.1 - Visão do prédio do Beijódromo.



Figura 4.2 - Vista do espelho d'água que circunda o Beijódromo.

4.2 Localização

O Beijódromo está localizado na Praça Maior da UnB, ao lado do edifício da reitoria, e ocupa uma área construída total de aproximadamente 2.062,81 m².

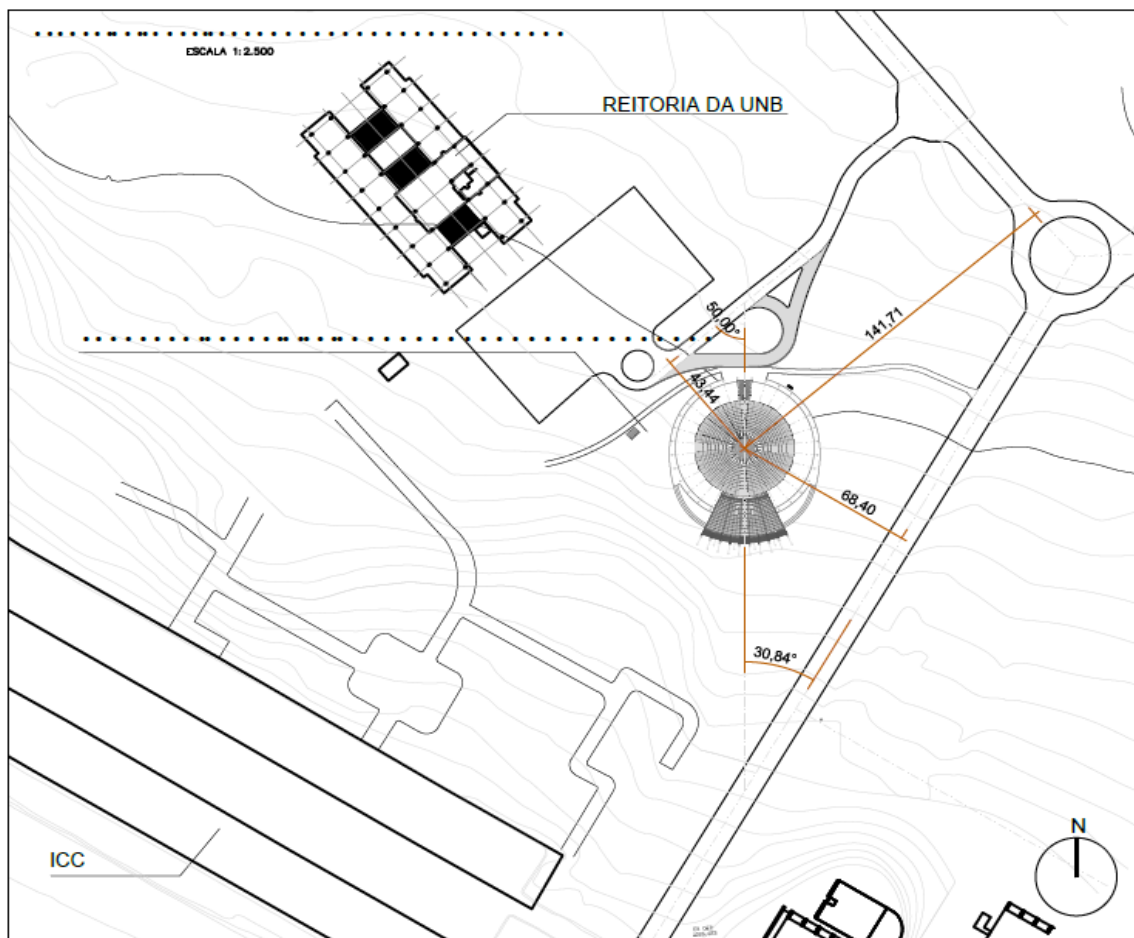


Figura 4.3 - Localização e orientação do Beijódromo.



Figura 4.4 - Localização do Beijódromo.
Fonte: *Google Earth* (2011)

4.3 Fundação Darcy Ribeiro

A Fundação Darcy Ribeiro, também conhecida como Beijódromo, é composta por dois pavimentos. O pavimento térreo (Figura 4.5) possui uma área construída de 818,38 m².

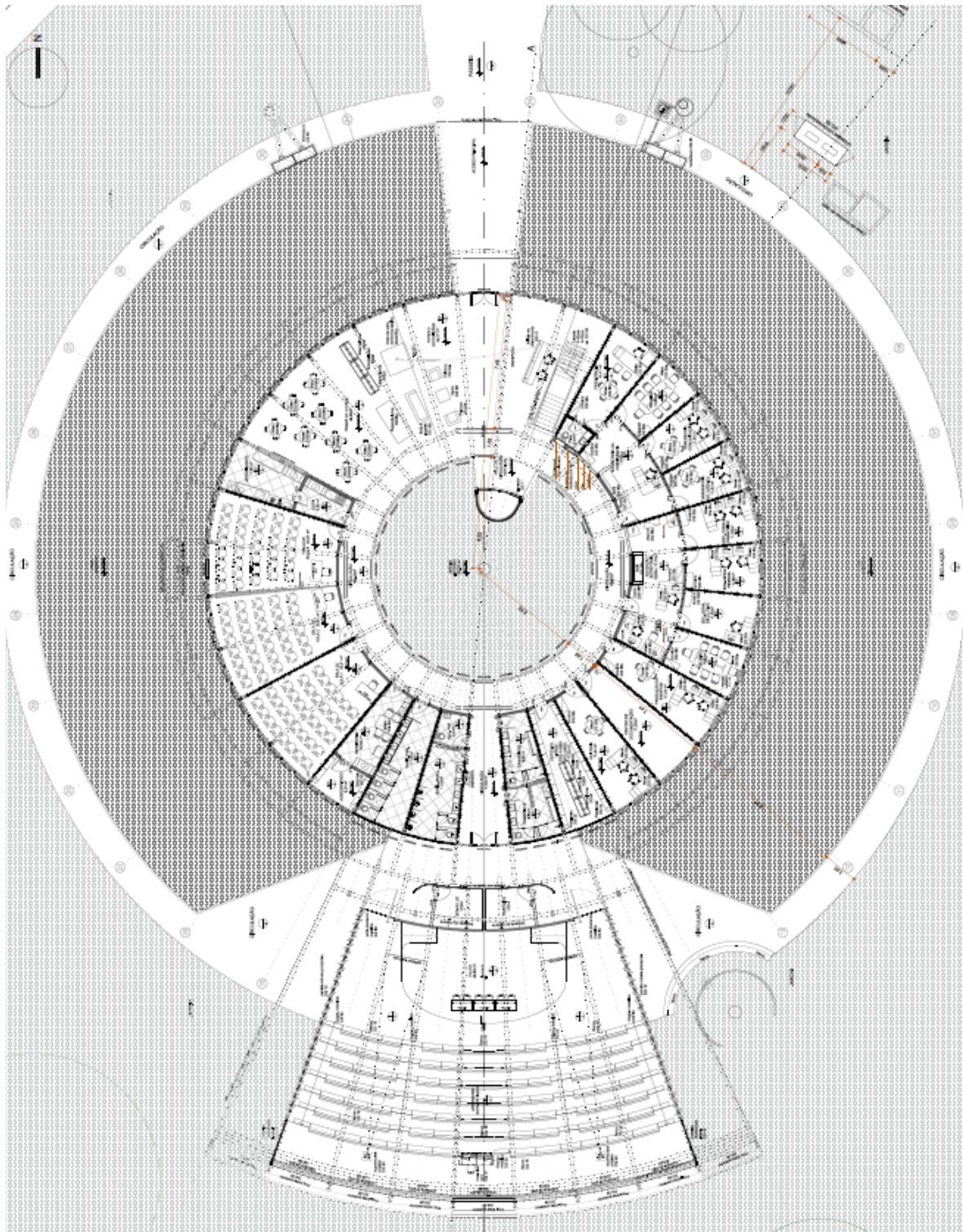


Figura 4.5 - Pavimento Térreo da Fundação Darcy Ribeiro.

O pavimento superior do Beijódromo (Figura 4.6) tem uma área construída de 685,38 m².



Figura 4.6 - Pavimento superior da Fundação Darcy Ribeiro.

4.4 O Beijódromo e suas soluções passivas

O edifício em estudo, Beijódromo, foi projetado pelo arquiteto João Filgueras Lima com o intuito de não necessitar de um condicionamento de ar artificial. Este profissional, também conhecido como Lelé Filgueras, é reconhecido por projetar diversas edificações que utilizam da iluminação e ventilação natural. Entre seus projetos mais reconhecidos estão os prédios da rede Sarah, nos quais os efeitos da ventilação natural são aproveitados também para evitar infecções hospitalares, já que este mecanismo é mais eficaz do que os tradicionais ambientes herméticos.



Figura 4.7 - Projetos desenvolvidos pelo arquiteto João Filgueras.
Fonte: CTRS

Ao trazer a análise desta solução passiva para o caso de estudo, prédio do Beijódromo, a ventilação natural é uma das estratégias de solução passiva aplicadas pelo arquiteto. Como pode ser visto nas figuras 4.8 e 4.9, foi previsto a colocação de uma tela perfurada para permitir o fluxo do ar até o pavimento superior do edifício. Neste percurso, o ar deve ser umidificado pelo espelho d'água que circunda prédio, contribuindo de forma mais efetiva para a manutenção do conforto térmico dos usuários no ambiente interno.



Figura 4.8 - Vista superior da entrada de ar no prédio Beijódromo.



Figura 4.9 - Vista em perspectiva da entrada de ar no prédio do Beijódromo.

Em outra análise de aplicação de uma solução no prédio do Beijódromo, constata-se que há a potencialidade de implementação da ventilação noturna, mas que esta solução não foi pensada como uma alternativa, pelo autor do projeto, na contribuição da climatização da edificação. Enfim, com um estudo sobre as características bioclimáticas de Brasília, poder-se-ia utilizar a ventilação noturna em determinados períodos de tempo.

E na análise da segunda solução passiva de climatização no caso de estudo, as proteções solares, conhecidas como brises, são utilizadas em torno de todo o pavimento térreo do Beijódromo. O tipo projetado é do tipo vertical e impede a penetração da radiação solar direta na fachada transparente, composta por vidro, construída no térreo.



Figura 4.10 - Brises de proteção solar do prédio do Beijódromo.

5 Simulação e resultados

Neste tópico são apresentadas as simulações do edifício em estudo, o Beijódromo, no programa Design Builder e, também, os dados registrados em medições feitas no prédio.

5.1 Metodologia

O programa utilizado para realizar as simulações do edifício da Fundação Darcy Ribeiro, também conhecido como Beijódromo, é o Design Builder, já descrito no tópico Ferramentas Computacionais do capítulo 2 deste trabalho. Assim, será detalhada na sequência a rotina de entrada de dados no software até a realização da simulação, que fornecerá informações necessárias à análise do conforto térmico em virtude da aplicação de soluções passivas de arquitetura neste prédio.

5.2 Parâmetros de simulação

Ao abrir o programa e criar um novo projeto, o usuário deve escolher a região onde será construído o seu prédio, isto é, um arquivo climático da biblioteca é selecionado para servir de referência nos cálculos realizados pelo Design Builder, como pode ser observado na figura 5.1.

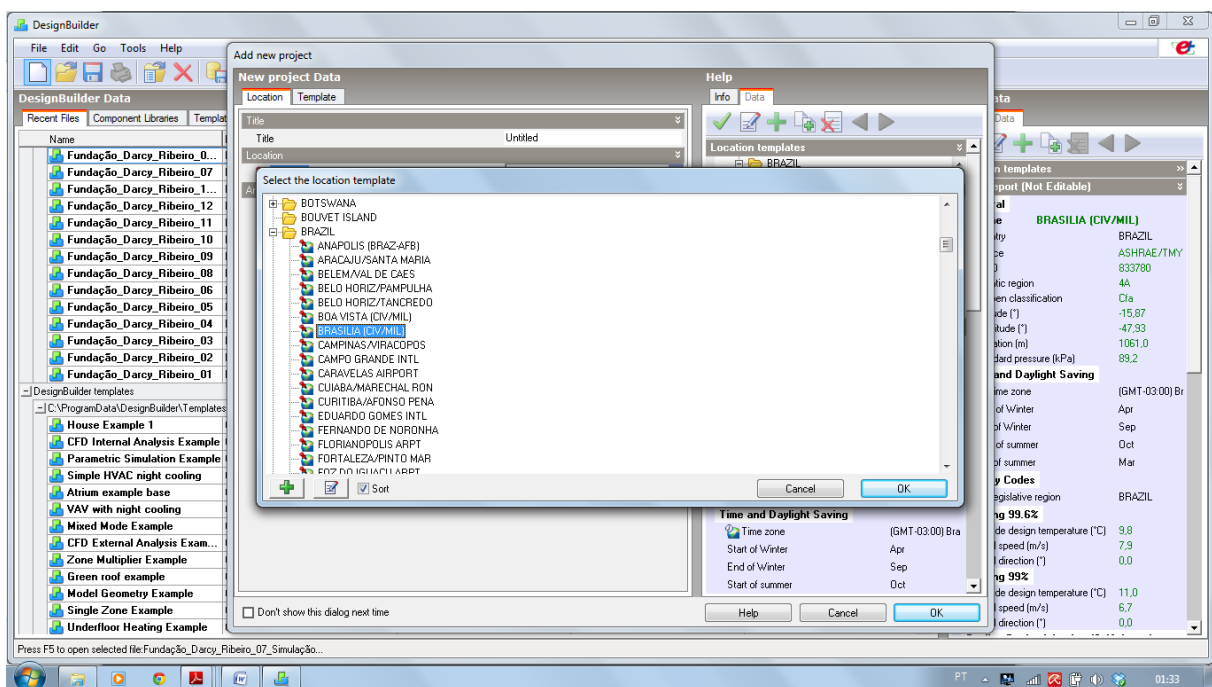


Figura 5.1 - Tela para entrada dos dados climáticos e localização do edifício.

Entretanto, para este projeto, foi selecionado um arquivo climático TRY, que é diferente da base de dados climáticos TMY, que é a fornecida pelo programa. O arquivo importado para utilização

possui uma precisão maior, pois elimina as variações bruscas que aleatoriamente aparecem nos registros ao longo de décadas de aferições das variáveis climáticas.

Na próxima tela tem-se a janela que servirá para a construção geométrica do modelo. Esta modelagem é feita em um espaço de visualização tridimensional, com os eixos X, Y e Z representados por diferentes cores na janela de desenho, que são, respectivamente, o vermelho, verde e azul.

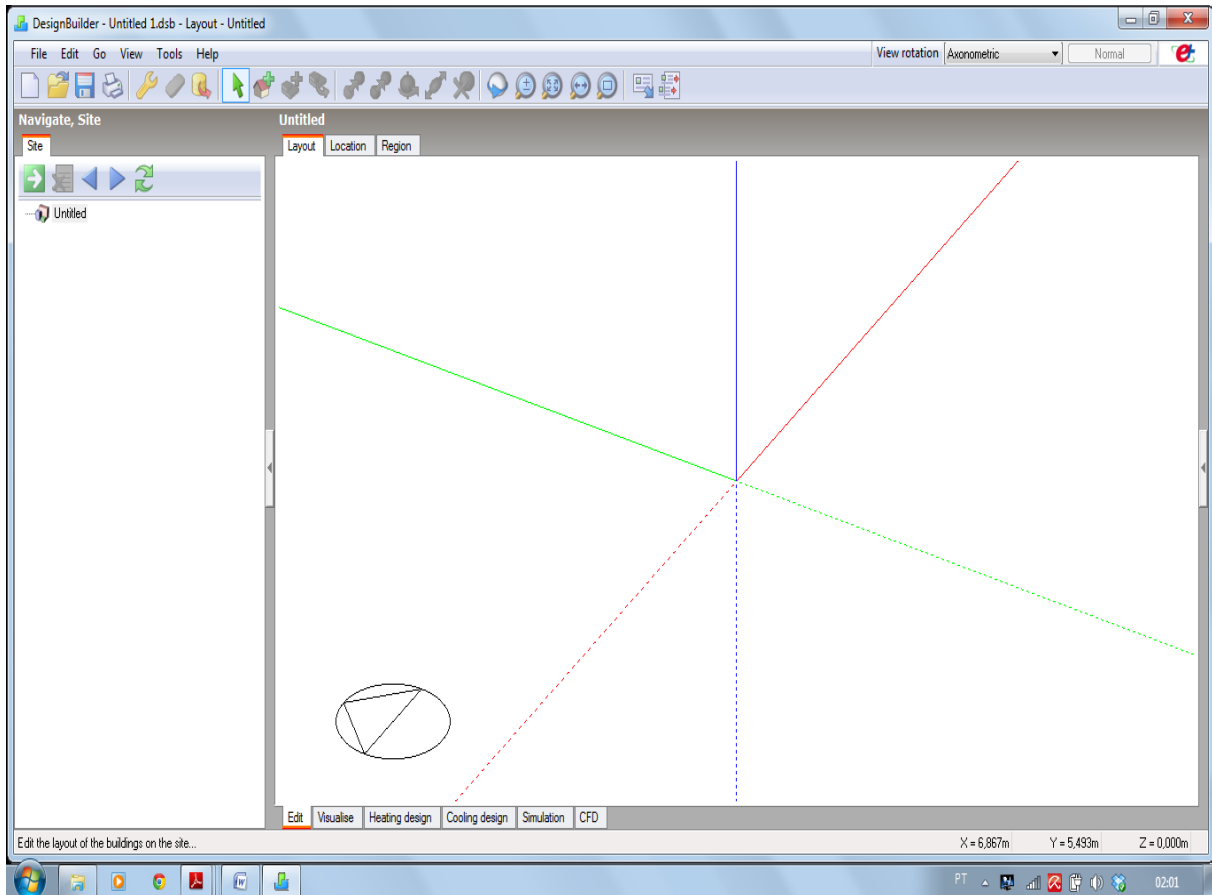


Figura 5.2 - Janela para construção geométrica do edifício.

Outra importante função visualizada na figura 5.2 é a orientação do norte verdadeiro. A qualquer momento há a possibilidade de alteração desta orientação no projeto, que é imprescindível na determinação de gastos energéticos, pois a escolha de uma indicação errônea do norte pode elevar o consumo de energia de uma edificação.

E, na sequência, a edificação é erguida através de blocos, que são construídos ao completar o perímetro dos pavimentos. A partir do momento em que diversos blocos são adicionados ao desenho, tem-se a modelagem tridimensional básica da envoltória do seu prédio.

Neste projeto, foi utilizado um atalho que facilita a elaboração destes blocos, que é a importação de um desenho em formato DXF do pavimento a ser desenhado, como visto na figura 5.3. Logo, a delimitação do perímetro que irá compor o prédio é realizada com maior precisão e em menor tempo.

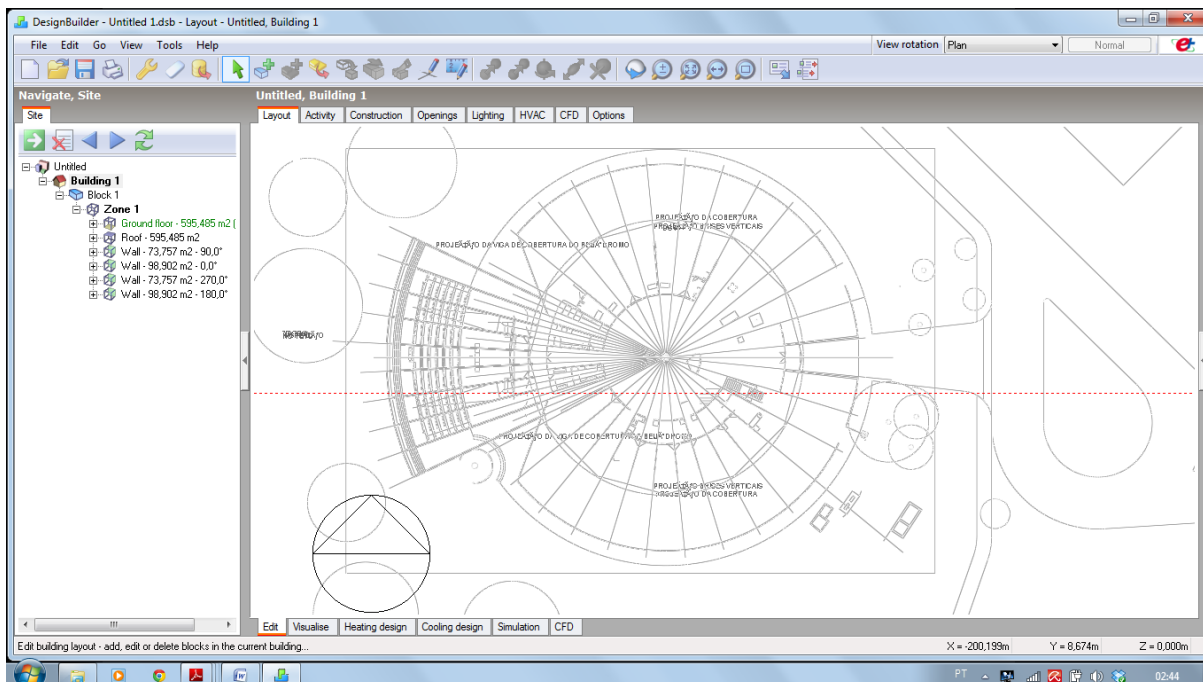


Figura 5.3 - Planta DXF do pavimento do edifício importada para o Design Builder.

Concluída a etapa de determinação dos blocos, parte-se para a delimitação das zonas que compõem estes blocos, ou seja, essas zonas irão subdividir o bloco para representar os diferentes ambientes do edifício.

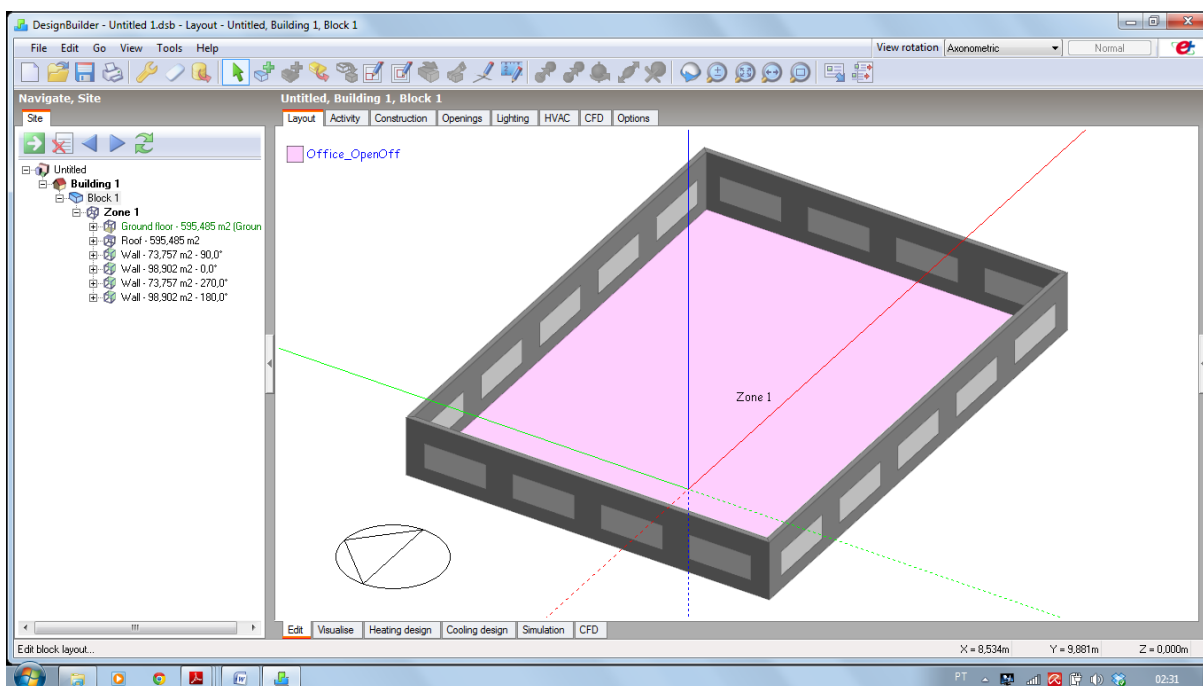


Figura 5.4 - Bloco de uma edificação com apenas uma subdivisão de zona.

As zonas criadas constituem ambientes para os cálculos de diversos índices, por exemplo, a carga térmica. E, ao efetuar estes cálculos para cada zona térmica do prédio, será gerado um conjunto de dados que representa toda a sua edificação.

Após o término da elaboração do modelo geométrico tridimensional, deve-se definir as características geométricas mais detalhadas, como a implementação de brises de proteção, por exemplo, e a rotina de funcionamento do edifício, como a descrição dos horários e ambientes em que há ocupação neste prédio.

Assim, visando uma melhor compreensão de como proceder na entrada destes dados e, além disso, exemplificando como foi realizada essa pormenorização no projeto de simulação do Beijódromo, será analisada na sequência uma das zonas térmicas do edifício em estudo.

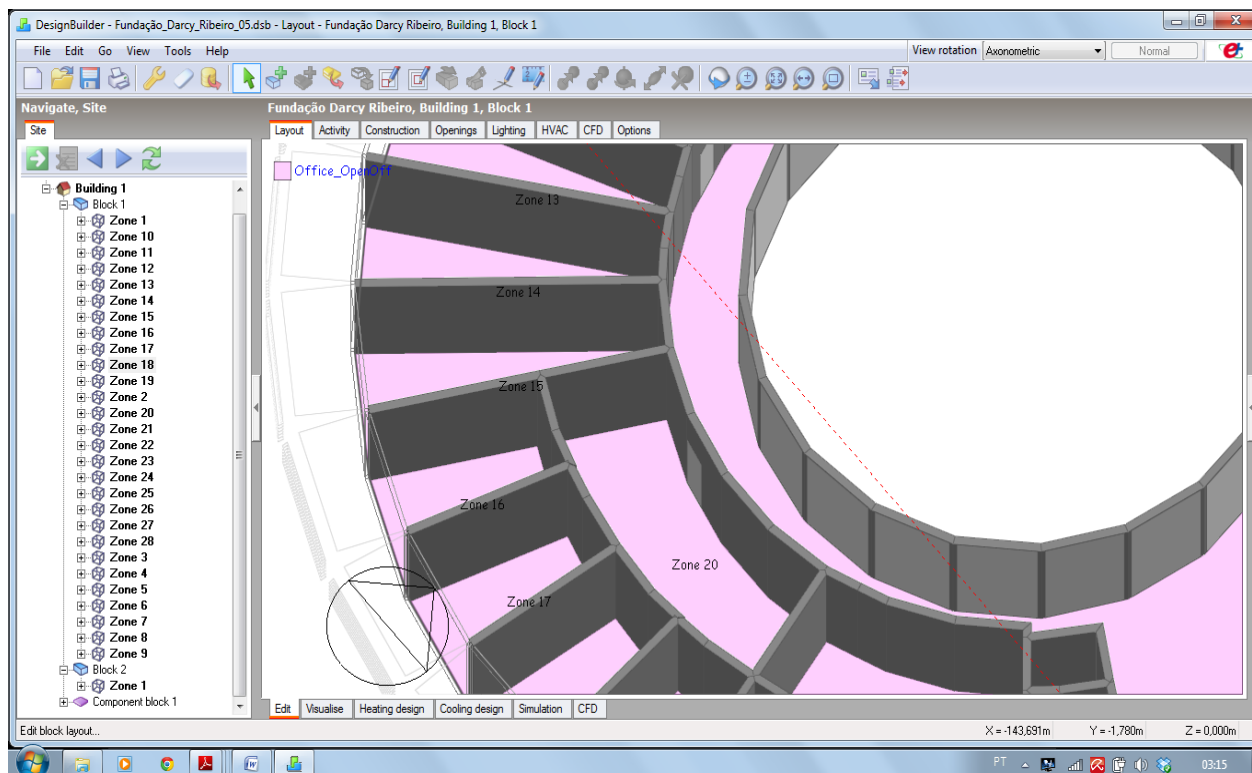


Figura 5.5 - Zona térmica 20 do edifício Beijódromo.

A zona térmica de número 20 é um ambiente denominado “Recepção da Secretaria Geral”, localizado no térreo da Fundação Darcy Ribeiro. Dentre todas as informações de entrada no programa possíveis para esta zona, as mais importantes são:

- Atividades;
- Construção;
- Aberturas;
- Iluminação;
- Climatização.

Atividades

Nesta entrada, determina-se o tipo de atividade desempenhada na zona térmica, como a taxa de ocupação, o metabolismo dos indivíduos e a presença de equipamentos de escritório, entre outros.

Em relação à zona 20, a entrada para determinação da ocupação, que é a quantidade de pessoas por metro quadrado (pessoas/m²), foi feita através do conhecimento da área do ambiente, 17,76 m², e da quantidade máxima de pessoas que ocupam a zona, que são 6 pessoas.

No que diz respeito à ventilação, a norma ABNT NBR 16401, Parte 3: Qualidade do Ar Interior, estipula a vazão eficaz mínima de ar exterior para a ventilação de um ambiente. Logo, observando a finalidade do local, neste caso é destinado para recepção, a tabela 1 (NBR 16401, 2008) traz o valor de 3,1 L/s*peessoa.

Tabela 5.1. Vazão eficaz mínima de ar exterior para ventilação (NBR 16401, 2008).

Local	D pessoas/ 100 m ²	Nível 1		Nível 2		Nível 3		Exaustão mecânica L/s* m ^{2 a}
		F _p L/s*peess.	F _a L/s*m ²	F _p L/s*peess	F _a L/s*m ²	F _p L/s*peess	F _a L/s*m ²	
Comércio varejista								
Supermercado de alto padrão	8	3,8	0,3	4,8	0,4	5,7	0,5	--
Supermercado de padrão médio	10	3,8	0,3	4,8	0,4	5,7	0,5	--
Supermercado popular	12	3,8	0,3	4,8	0,4	5,7	0,5	--
Mall de centros comerciais	40	3,8	0,3	4,8	0,4	5,7	0,5	--
Lojas (exceto abaixo)	15	3,8	0,6	4,8	0,8	5,7	0,9	--
Salão de beleza e/ou barbearia ^b	25	10	0,6	12,5	0,8	15,0	0,9	--
Animais de estimação ^b	10	3,8	0,9	4,8	1,1	5,7	1,4	4,5
Lavanderia "self-service"	20	3,8	0,3	4,8	0,4	5,7	0,5	--
Edifícios de escritórios								
Hall do edifício, recepção	10	2,5	0,3	3,1	0,4	3,8	0,5	--

Outra entrada importante neste tópico são as taxas de dissipação de calor dos equipamentos de escritório, como computadores e copiadoras. Através da tabela C.6 (NBR 16401, 2008), a zona 20 foi classificada com uma densidade típica de carga de equipamentos correspondente ao nível Média/Alta, que possui uma densidade de 16,2 W/m².

Tabela 5.2 - Densidade típica de carga para diversos tipos de escritórios (NBR 16401, 2008).

Densidade típica de carga de equipamentos para diversos tipos de escritórios		
Tipo de carga	Densidade W/m ²	Descrição do escritório Assumindo:
Leve	5,4	15,5 m ² por posto de trabalho com computador e monitor em cada um, mais impressora e fax. Fator de diversidade de 0,67, exceto 0,33 para impressoras
Média	10,7	11,6 m ² por posto de trabalho com computador e monitor em cada um, mais impressora e fax. Fator de diversidade de 0,75, exceto 0,50 para impressoras
Média/alta	16,2	9,3 m ² por posto de trabalho com computador e monitor em cada um, mais impressora e fax. Fator de diversidade de 0,75, exceto 0,50 para impressoras
Alta	21,5	7,7 m ² por posto de trabalho com computador e monitor em cada um, mais impressora e fax. Fator de diversidade de 1,0, exceto 0,50 para impressoras

Construção

Outra aba de entrada é a de construção, que define os componentes utilizados no edifício para calcular a transferência de calor pelas superfícies de paredes, coberturas e pisos.

A primeira definição de dados desta aba deve ser feita no nível de edifício, para que todos os ambientes do prédio herdem as propriedades definidas. Desta forma, em caso de ocorrerem especificidades a serem indicadas nos blocos ou zonas térmicas, estes dados podem ser modificados em níveis inferiores de hierarquia, que afetam apenas as zonas escolhidas.

Nesta seção pode-se caracterizar todos os sistemas construtivos do modelo geométrico desenhado, por isso, as entradas são subdivididas em vários itens, dos quais os mais importantes são as paredes externas, as partições internas e o telhado.

Quanto ao prédio em estudo, a partir de plantas em DWG que continham as informações referentes a todos os materiais que constituem a edificação, buscou-se representar com maior fidedignidade ao original o modelo tridimensional.

Aberturas

No campo aberturas, é possível definir as configurações de todos os tipos de aberturas operáveis. Para tanto, tem-se arquivos carregados na biblioteca do programa com configurações prontas e que também podem ser editadas nos mais diversos níveis de hierarquia do edifício, desde os blocos, as zonas térmicas até as superfícies.

No que diz respeito à Fundação Darcy Ribeiro, umas das principais alterações de entrada nesta seção ocorreu para adicionar a solução passiva de arquitetura aplicada no prédio, que são as brises verticais implementadas ao longo de todas as janelas do pavimento térreo e em outros pontos da edificação. Estas são inseridas a partir do elemento Shading, localizado na aba aberturas.

Iluminação

O preenchimento dos parâmetros do sistema de iluminação ocorre neste momento de entrada de dados no prédio. Seguindo o padrão de outras seções, existem arquivos na biblioteca com diversos exemplos de modelos, que podem ser configurados de acordo com a rotina e características do edifício analisado. No conjunto de funções desta seção, as que mais se destacam são: iluminação geral, controle de iluminação e a iluminação de tarefa.

Das funções desta aba citadas acima, a parte dedicada à iluminação geral possibilita a capacidade de preencher a densidade de potência de iluminação, neste caso em W/m^2 , juntamente com a rotina do uso da iluminação e o tipo de luminária utilizada em cada zona térmica do prédio.

Em relação à zona 20 do prédio do Beijódromo, buscou-se a referência da densidade de potência a ser aplicada na norma ABNT NBR 16401, Part1: Projetos das instalações, que traz a tabela C.2 (NBR

16401, 2008) com os valores a serem aplicados dependendo da utilização de cada zona. No caso da zona 20, como é definida como Recepção, a potência dissipada recomendada pela norma é de 8 W/m².

Climatização

E, por último, nesta abordagem simplificada sobre as possibilidades de entrada de dados no programa Design Builder, tem-se a aba climatização. No que diz respeito ao condicionamento de ar existem cinco tipos de sistemas na biblioteca do software, que podem abranger apenas uma zona, quanto múltiplos ambientes do edifício.

Ainda, além das opções para condicionamento do ar, esta aba permite também a entrada de informações para o consumo de aquecimento de água, a ventilação natural, ventilação mecânica e a distribuição da temperatura do ar.

5.3 Resultados

Após a finalização da entrada de todos os dados relevantes à simulação termo-energética do seu edifício, em que as atividades a que se destina estão definidas, assim como os materiais aplicados, o tipo de iluminação empregado e o meio determinado para garantir o conforto térmico dos transeuntes desta zona térmica, o programa Design Builder é capaz de simular e fornecer diversos dados que o ajudarão a estudar a eficiência energética do prédio.

5.3.1 Renderização

A ferramenta de renderização do software Design Builder permite a visualização de um retrato da edificação, em que é detalhado o efeito do sombreamento ao longo de um dia na sua edificação e, também, a percepção das texturas dos materiais aplicados na construção.

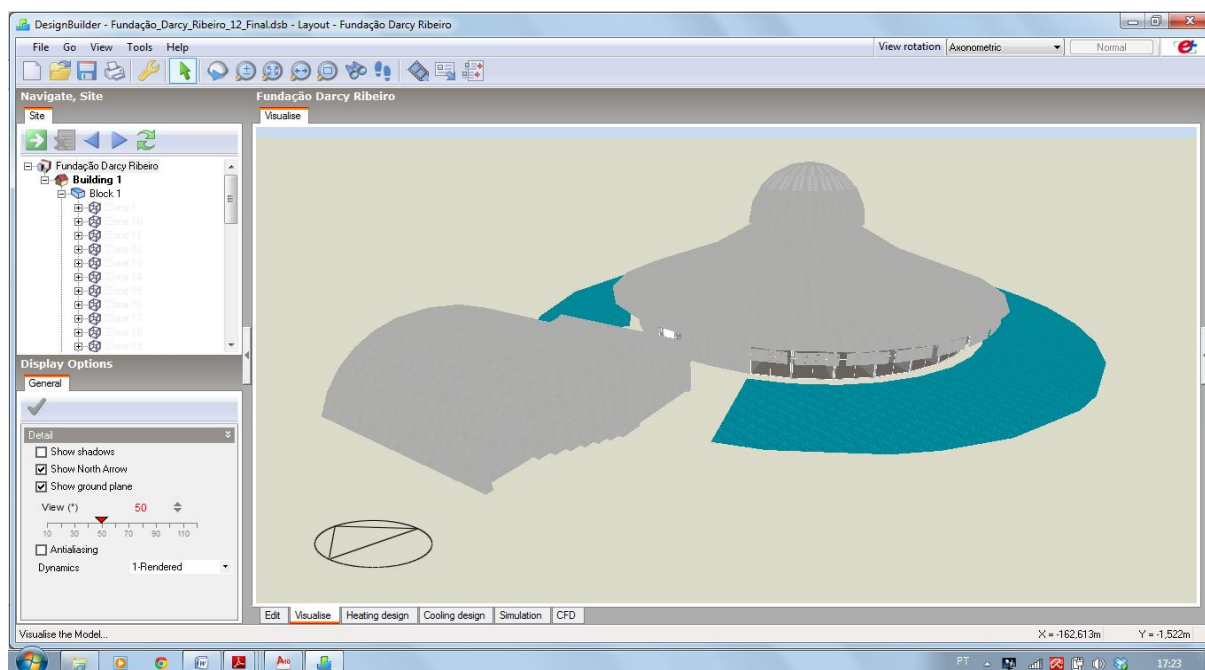


Figura 5.6 - Renderização do modelo tridimensional do edifício Fundação Darcy Ribeiro.

5.3.2 Conforto térmico

De acordo com a norma ABNT NBR 16401, Parte 2: Parâmetros de conforto térmico, que discorre sobre as variáveis de conforto térmico, o modelo de Fanger, visualizado pelos índices PMV e PPD, é indicado para determinar se um ambiente atende aos parâmetros avaliados nesta norma. Em relação a variável PMV, o texto da norma atribui um valor entre - 0,5 e + 0,5 para que se tenha uma indicação aceitável em relação ao conforto térmico, já que em um ambiente nunca haverá uma condição tecnicamente confortável para todas as pessoas, isto é, sempre existirá uma pessoa que considere o local em conforto e outra pessoa que julgue o contrário.

O voto médio predito, como discorrido no capítulo 2, no tópico Índice de conforto deste trabalho, analisa o voto médio de uma grande quantidade de pessoas expostas à mesma zona térmica. A escala que apresenta o PMV é simétrica em relação ao zero, considerado como situação de conforto térmico, e possui uma variação que ocorre, geralmente, em torno de -3 a +3. Os valores positivos referem-se às sensações de calor, enquanto os termos negativos correspondem às sensações de frio. Na análise dos dados gerados pelo programa Design Builder, a escala fornecida da variável PMV, segundo o modelo de Fanger, varia entre -4 a +4.

Já o outro índice que complementa a análise do modelo de Fanger, o PPD, demonstra o percentual relacionado à quantidade de pessoas insatisfeitas, como pode ser visto na tabela 2.3 deste trabalho. Confirmando a expectativa de que um ambiente nunca será confortável termicamente a todas as pessoas que o utilizam, até mesmo na representação do índice igual à zero para o PMV, há 5% de indivíduos insatisfeitos.

Na sequência serão apresentados os resultados de conforto térmico do prédio do Beijódromo, em uma análise energética que avaliou a edificação dia a dia durante um ano.

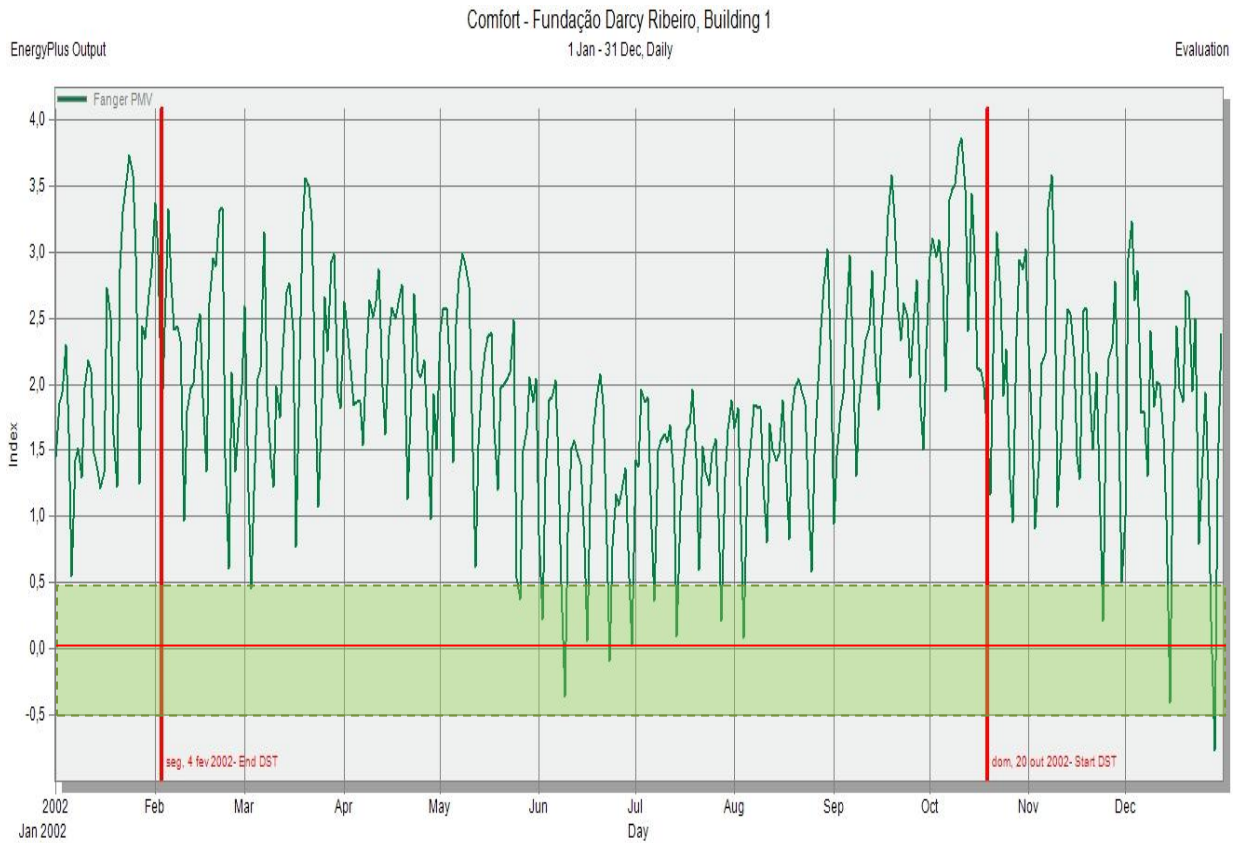


Figura 5.7 - Resultado do PMV dia a dia ao longo de um ano no prédio do Beijódromo.

Ao continuar a análise dos resultados fornecidos pela simulação para determinar a condição de conforto térmico do edifício da Fundação Darcy Ribeiro, tem-se mais dois parâmetros ambientais que afetam diretamente esta condição e serão estudados neste texto, que são a temperatura do ar e a umidade relativa do ar.

Por definição da norma NBR 16401 de 2008, em sua parte 2, a temperatura do ar é a temperatura de bulbo seco do ar no entorno dos ocupantes da zona térmica.

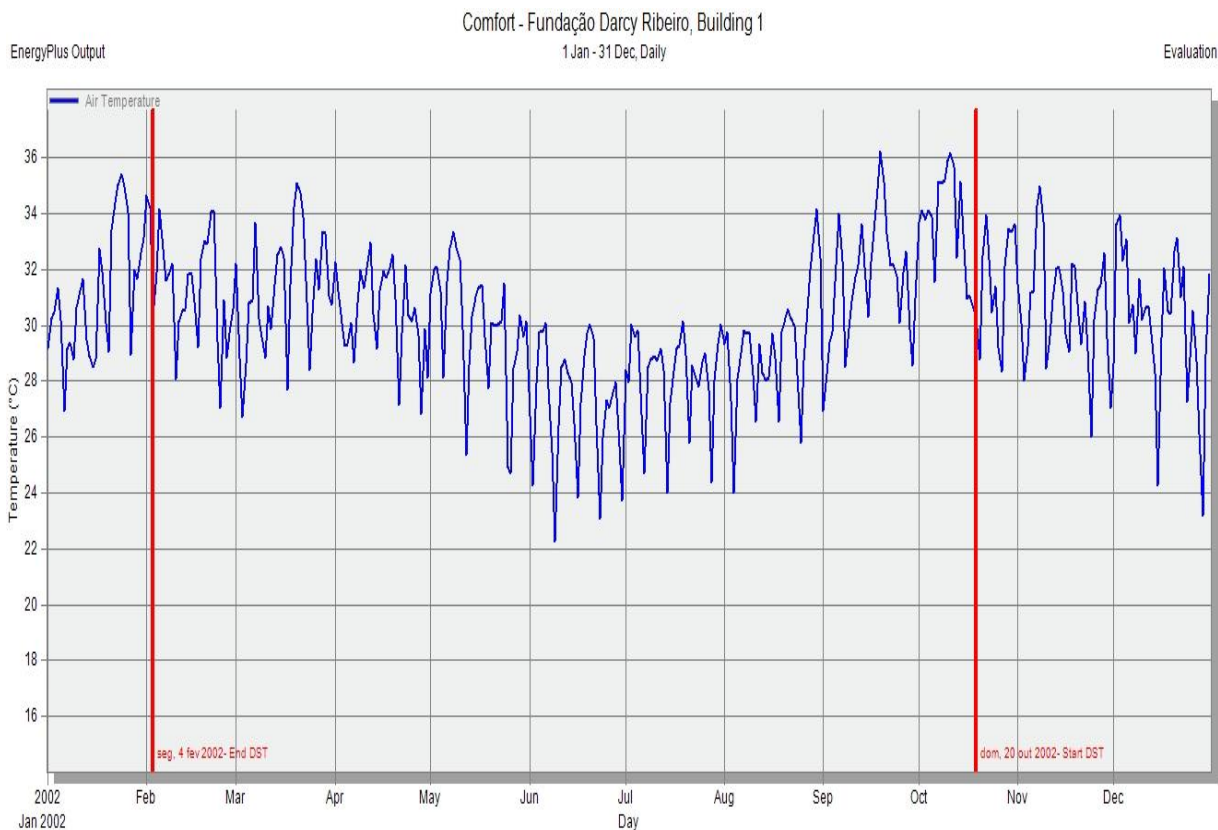


Figura 5.8 - Resultado da temperatura do ar dia a dia ao longo do ano no prédio do Beijódromo.

E, quanto à umidade relativa do ar, tem-se que esta é a razão entre a fração molar do vapor d'água presente na mistura e a fração molar que o vapor d'água teria se a mistura estivesse saturada na mesma temperatura e pressão.

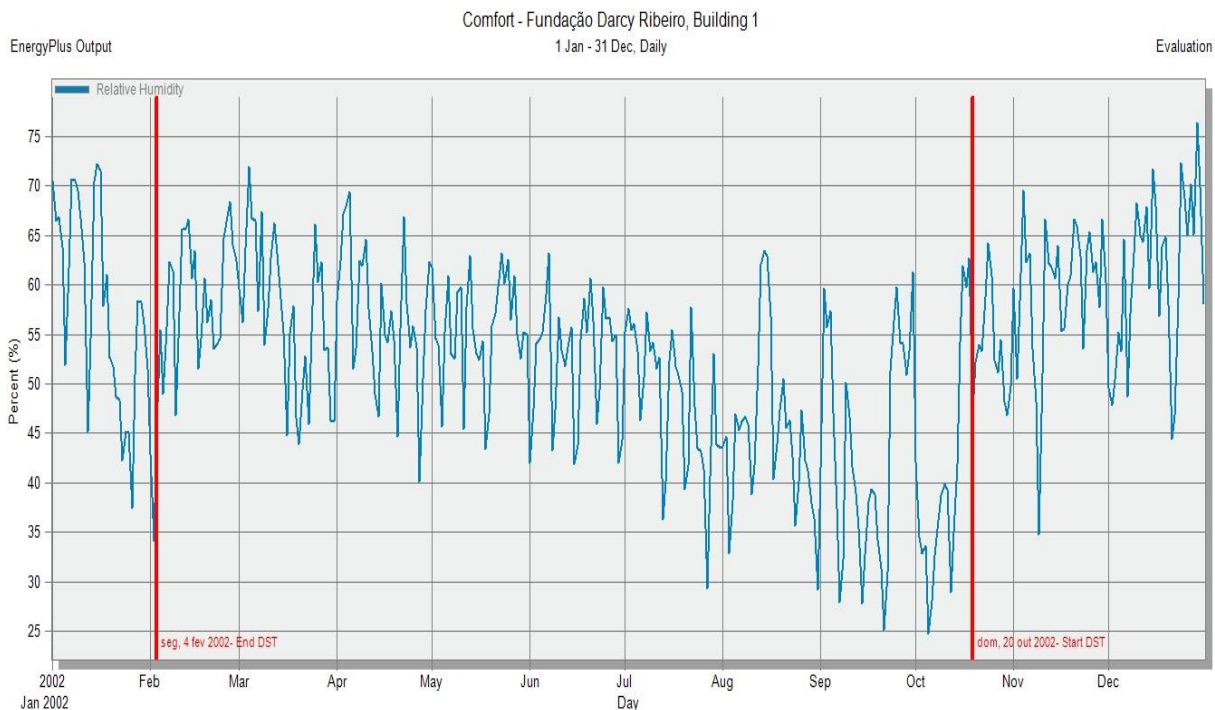


Figura 5.9 - Resultado da umidade relativa do ar dia a dia ao longo do ano no prédio do Beijódromo.

5.4 Dados medidos

As medições realizadas no edifício da Fundação Darcy Ribeiro possuem o objetivo de confrontar as simulações termoenergéticas realizadas através do programa Design Builder, isto é, com a comparação entre as variáveis aferidas em campo e as saídas provenientes do software, é possível afirmar que os parâmetros obtidos nas simulações representam, guardadas as suas devidas proporções, a realidade térmica do que acontece na edificação construída.

Quanto à maneira de realização destas medidas, foi adotado como critério de avaliação e controle a norma ABNT NBR 16401, em sua parte 2, que traz no tópico 6 instruções específicas para a aferição de parâmetros ambientais em campo.

Neste tópico da norma, é recomendado que as medições de temperaturas e velocidades devem ser realizadas nos pontos das zonas ocupadas que apresentem os valores mais desfavoráveis dos parâmetros avaliados, como, por exemplo, perto de janelas e portas de acesso.

Outro ponto importante na realização das medidas, diz respeito à altura da instrumentação, que deve estar a 1,1 m do piso para análise de variáveis em ambientes que as pessoas estão sentadas e a 1,7 m do piso quando abordam locais em que os indivíduos estão em movimento.

Na aferição da umidade relativa do ar, é pedido que se façam quatro medições sucessivas com intervalo de 5 minutos em um ponto representativo de cada zona ocupada.

E, por último, a instrumentação utilizada deve estar calibrada por um estabelecimento pertencente à Rede Brasileira de Calibração (RBC), segundo as recomendações dos fabricantes.

5.4.1 Termômetro de globo

O instrumento utilizado para aferir a variável umidade relativa do ar foi o termômetro de globo, que é um medidor de stress térmico digital portátil. O equipamento é da marca INSTRUTHERM e seu modelo é o TGD - 300. Na figura 5.10 é possível analisar o instrumento aferindo dados no prédio do Beijódromo.

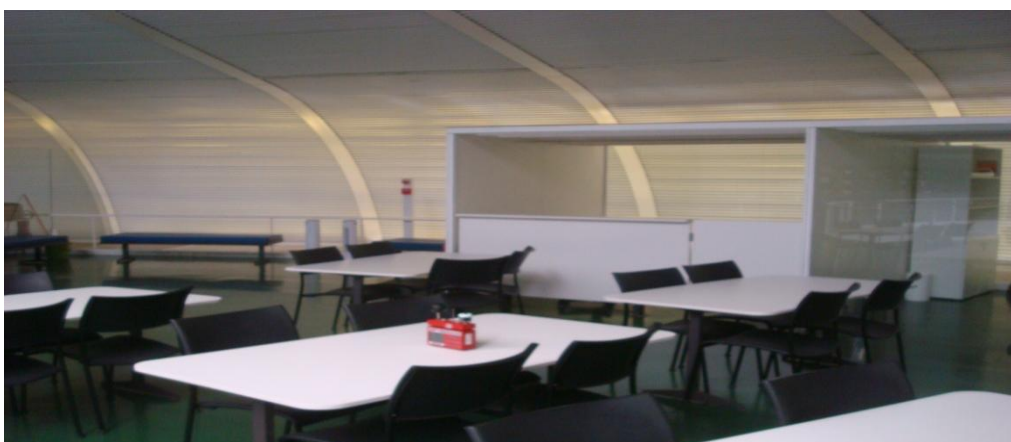


Figura 5.10 - Medição de dados com o termômetro de globo no prédio do Beijódromo.

Os resultados das aferições da umidade relativa, através do termômetro de globo, do ambiente localizado no segundo pavimento do edifício do Beijódromo, com a identificação de Estar e Leitura, são apresentados na figura 5.11. Os dados são referentes à medição em um período de 24 horas.

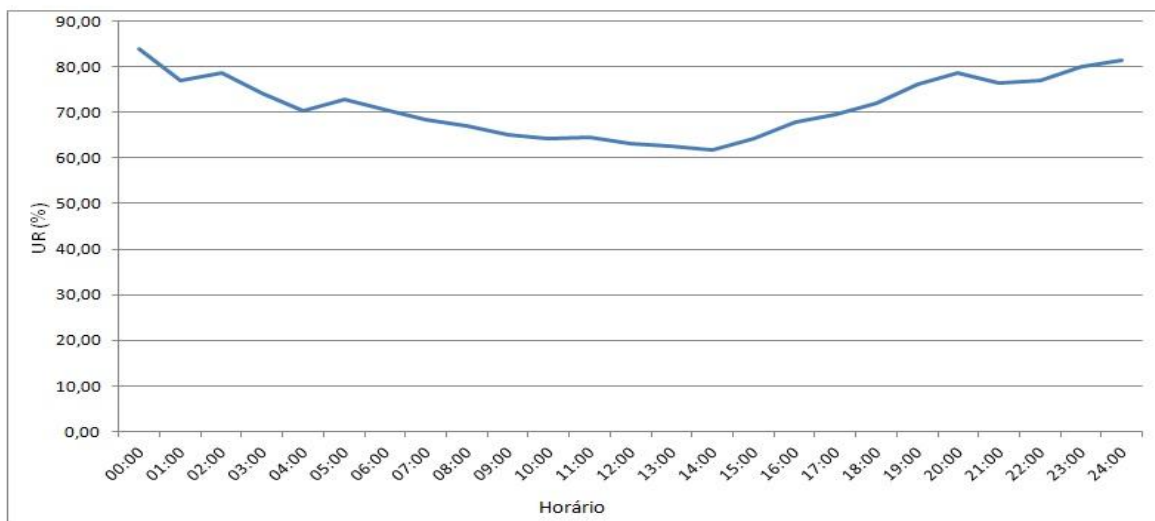


Figura 5.11 - Medição da umidade relativa no ambiente Estar e Leitura do prédio do Beijódromo.

A variação da umidade relativa do ar para o dia de medição neste ambiente, do prédio da Fundação Darcy Ribeiro, ficou entre 61% e 81%, sendo que esta medição foi realizada no mês de Junho.

Os dados da umidade relativa do ar deste mesmo ambiente, no mês de Junho, alcançados pela simulação do modelo tridimensional geométrico são apresentados na figura 5.12.

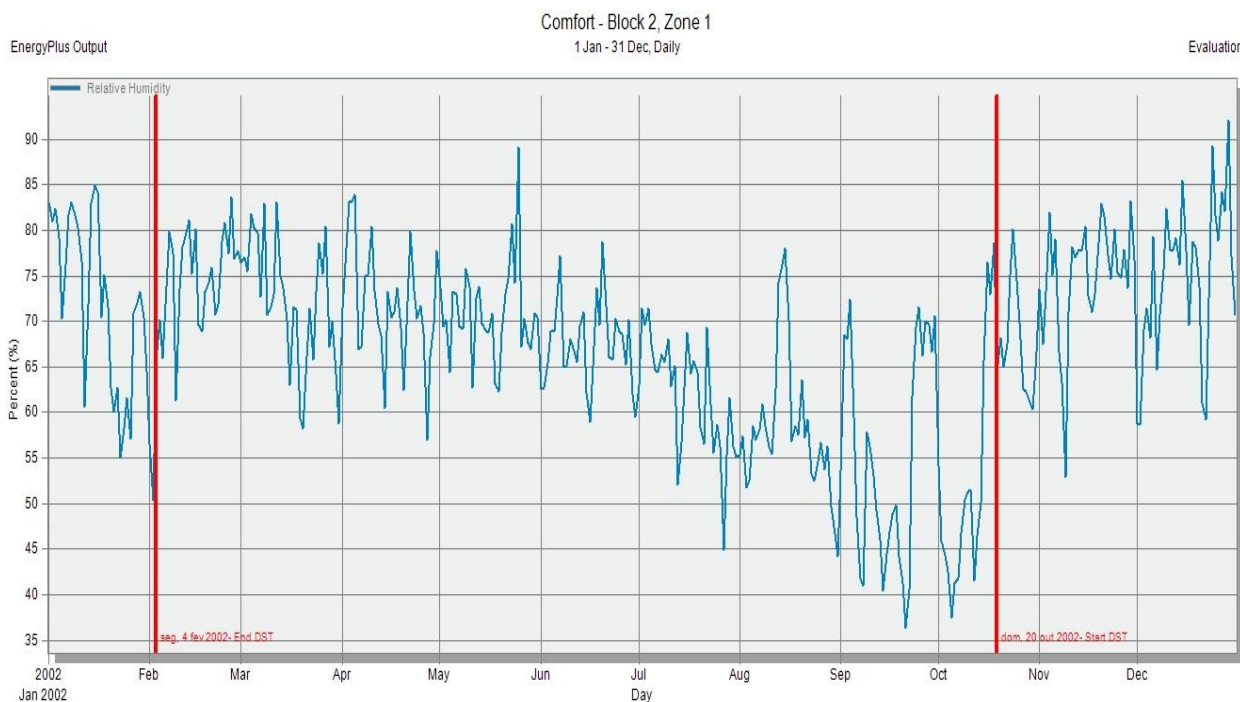


Figura 5.12 - Resultado da umidade relativa do ar do ambiente Estar e Leitura do prédio do Beijódromo.

Na análise do parâmetro de saída, umidade relativa do ar, referente à simulação da zona térmica Estar e Leitura, ao observar-se o mês de Junho, é possível perceber que os valores de umidade oscilam em torno de 58% a 78%.

5.4.2 Termo higrômetro

A instrumentação utilizada para a retirada do dado temperatura do ar, em campo, foi o Termo - Higrômetro da marca ANAHEIM SCIENTIFIC e modelo H300. Na figura 5.13, tem-se uma ilustração do aparelho aferindo dados em uma das salas da edificação do Beijódromo.



Figura 5.13 - Medição de dados com o termo - higrômetro no prédio do Beijódromo.

Em relação aos resultados alcançados nas medições realizadas com o termo - higrômetro no ambiente Estar e Leitura, referentes à variável temperatura do ar, tem-se a figura 5.14. Estes dados são representativos do escopo de 24 horas de aferição do parâmetro em análise.

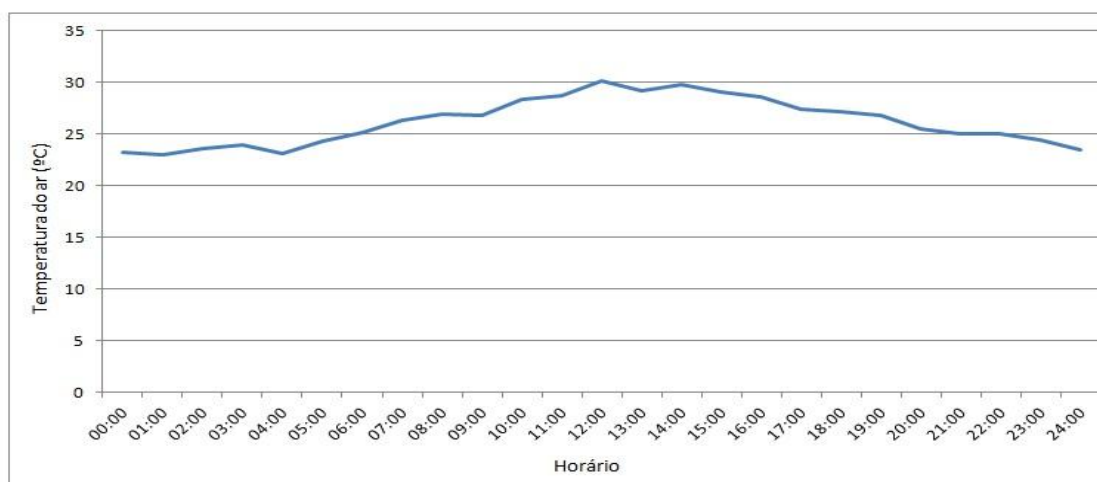


Figura 5.14 - Medição da temperatura do ar no ambiente Estar e Leitura do prédio do Beijódromo.

Quanto aos limites da temperatura do ar, aferida pelo termo - higrômetro no mês de Junho no ambiente Estar e Leitura da Fundação Darcy Ribeiro, tem-se os valores de 23°C a 30°C.

Enquanto isso, os resultados desta mesma variável, a temperatura do ar, atingidos pela simulação do programa Design Builder, também no mês de Junho, são observados na figura 5.15.

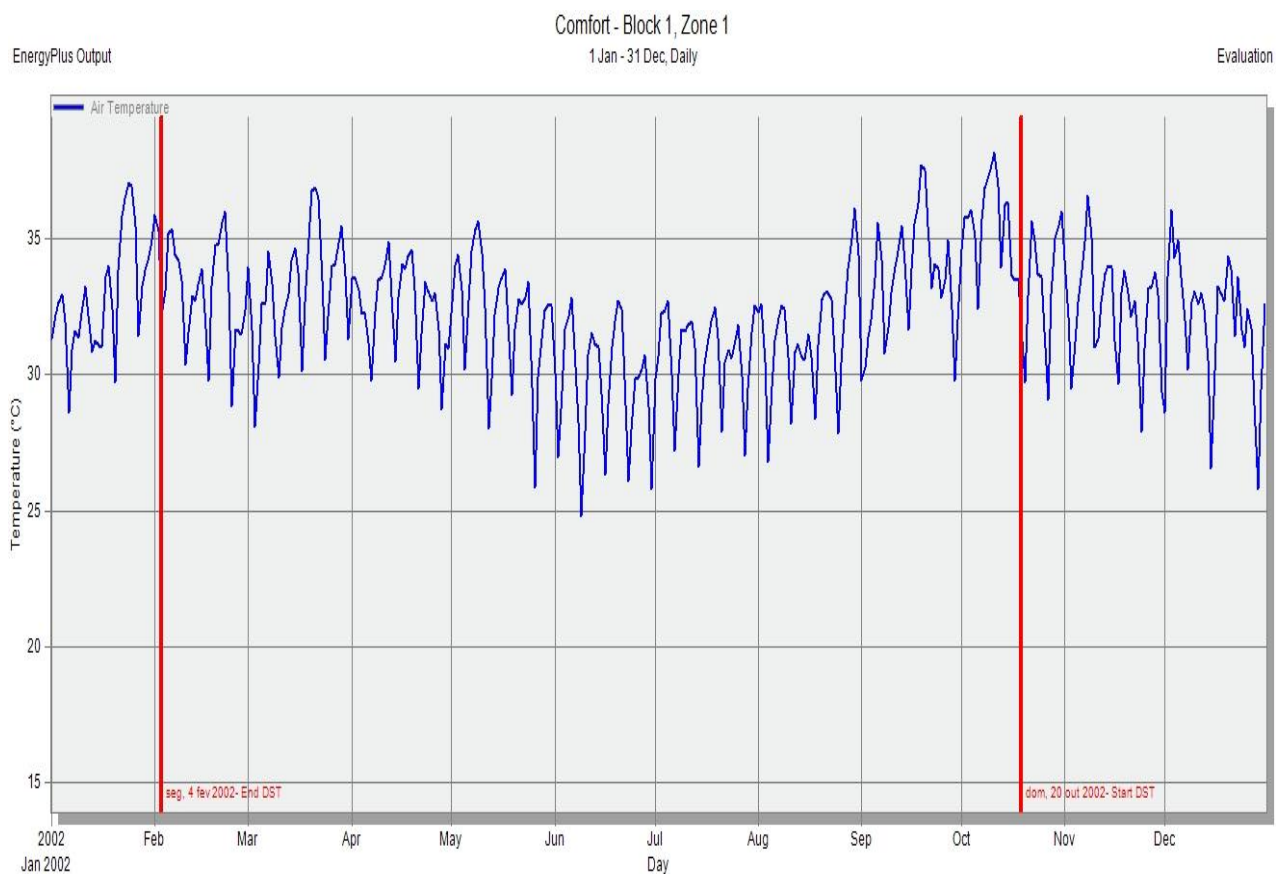


Figura 5.15 - Resultado da temperatura do ar do ambiente Estar e Leitura do prédio do Beijódromo.

Na simulação termo-energética do ambiente Estar e Leitura, a variável temperatura do ar oscilou entre 24°C a 32°C durante o mês de Junho.

6 Análise dos resultados

Neste tópico serão analisados os resultados das simulações feitas do edifício e das variáveis colhidas em campo, com um destaque na análise do conforto térmico existente no Beijódromo.

6.1 Conforto térmico

Na análise do conforto térmico do edifício do Beijódromo, tem-se a avaliação do resultado de saída Fanger PMV (figura 5.7), gerado pelo programa Design Builder. Em uma simulação energética, que registra dados dia a dia durante os 365 dias do ano, é nítida a indicação de desconforto térmico na maior parte do ano.

Com exceções pontuais, como as registradas em alguns momentos dos meses de Junho a Agosto e em Novembro e Dezembro, o edifício em estudo ultrapassa os + 0,5 PMV recomendados pela norma NBR 16401 para que seja atingida a situação de conforto térmico. Nos meses de Janeiro e Outubro, por exemplo, o índice de pessoas insatisfeitas com a sensação de calor, o PPD, chega a ultrapassar o valor de 90 % dos indivíduos nas zonas térmicas.

Em relação à umidade relativa do ar medida no ambiente Estar e Leitura (figura 5.11), seus valores oscilaram entre 61 % a 81 %. De acordo com a ANBT NBR 16401, parte 2: Parâmetros de conforto térmico, a umidade relativa dentro da zona deve ter um valor máximo de 60 %, considerando esta análise feita no inverno. Assim, pode-se afirmar que em nenhum momento das 24 horas de medição realizadas com o instrumento termômetro de globo, a umidade relativa do ar conseguiu alcançar o valor exigido da norma para uma situação de conforto térmico dentro da zona.

Ainda em relação a umidade relativa do ar, também nas simulações da zona térmica Estar e Leitura da edificação do Beijódromo, os valores de umidade ficaram entre 58 % a 78%, o que pela norma brasileira já citada confirma o diagnóstico de desconforto térmico para o ambiente.

E, na análise do último parâmetro ambiental estudado neste trabalho, a temperatura do ar (figura 5.14), tem-se que para determinar a partir de qual valor esta temperatura proporciona uma sensação de desconforto térmico, é necessário determinar o valor da temperatura operativa da zona Estar e Leitura.

A partir do instante em que se conhece a temperatura operativa, é possível recorrer novamente a NBR 16401, em sua parte 2, e verificar se esta obedece ao limite exigido pela norma para conforto térmico, e conseqüentemente, se atender ao exigido a temperatura do ar também estará proporcionado uma condição de conforto térmico ao ambiente em estudo.

Segundo a parte 2 da norma NBR 16401, em zonas com velocidades do ar baixas, menor do que 0,2 m/s, a temperatura operativa pode ser calculada como a média aritmética da temperatura do ar e a temperatura radiante média:

$$t_0 = (t_{ar} + t_r) \frac{1}{2} \quad (10)$$

onde,

t_0 é a temperatura operativa;

t_{ar} é a temperatura do ar;

t_r é a temperatura radiante média.

Como a temperatura do ar é o parâmetro ambiental conhecido, tem-se agora que determinar a temperatura radiante média. De acordo com a NBR 16401, em sua parte 2, a temperatura radiante média pode ser determinada por:

$$t_r = [(t_g + 273)^4 + 2,5 * 10^8 * V_{ar}^{0,6} * (t_g - t_{ar})]^{0,25} - 273 \quad (11)$$

onde,

t_g é a temperatura de globo;

V_{ar} é a velocidade relativa do ar.

O valor da temperatura de globo para a zona térmica Estar e Leitura foi medida pelo termômetro de Globo.

Já a medida referente a velocidade relativa do ar, esta foi aferida por um termo-anemômetro digital, da marca INSTRUTHERM e modelo TAFR - 180. As velocidades registradas pelo anemômetro na zona em estudo oscilaram em torno de 0,1 m/s, que será a velocidade considerada no cálculo da temperatura operativa.

Por fim, o gráfico com os valores da temperatura operativa do ambiente Estar e Leitura durante o período de um dia de medição pode ser visto na figura 6.1.

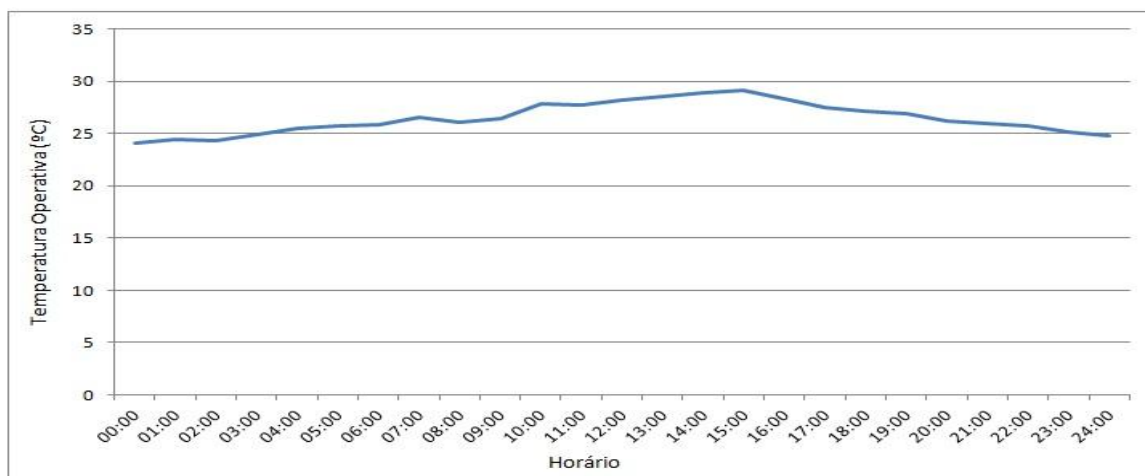


Figura 6.1 - Temperatura operativa da zona térmica Estar e Leitura do prédio do Beijódromo.

Na apuração dos valores encontrados para a temperatura operativa da zona térmica em estudo, tem-se que estes ultrapassam os valores estipulados pela norma NBR 16401, em sua parte 2, praticamente durante todo o período de 24 horas. O valor máximo da temperatura operativa recomendado pela norma é de 23,5°C neste caso. Consequentemente, a temperatura do ar, que foi o parâmetro ambiental medido e simulado na zona, também causa desconforto térmico para o ambiente.

6.2 Proposta de climatização no prédio do Beijódromo

Após a constatação de que o edifício da Fundação Darcy Ribeiro não consegue, por meio apenas de suas soluções passivas aplicadas, manter uma condição de conforto térmico aos seus usuários, foi realizada uma pequena proposta de alteração no sistema de climatização do prédio.

Desta forma, na mesma edificação do Beijódromo simulada para analisar o seu conforto térmico, adicionou-se um sistema de climatização as zonas térmicas, visando avaliar a melhoria que um sistema de condicionamento qualquer pode causar em uma futura intervenção para solucionar a deficiência no conforto térmico.

Logo, o sistema de climatização selecionado para esta avaliação não é derivado de um estudo que avalie as características da edificação e proponha a intervenção que melhor se adapta ao caso, incluindo nestes estudos a geometria do prédio, suas limitações e demais variáveis de um projeto de condicionamento de ar, mas apenas uma demonstração que uma solução não passiva de climatização se faz necessária para que o prédio do Beijódromo atenda as recomendações de conforto térmico das normas brasileiras e, consequentemente, proporcione um ambiente agradável de convivência a seus usuários.

Para fins de conhecimento do método, o sistema aplicado na simulação que propõe uma alteração na climatização do prédio é um sistema Split Unitário, adicionado a cada zona térmica passível de climatização. O resultado do índice Fanger PMV após esta proposta de intervenção pode ser observado na figura 6.2.

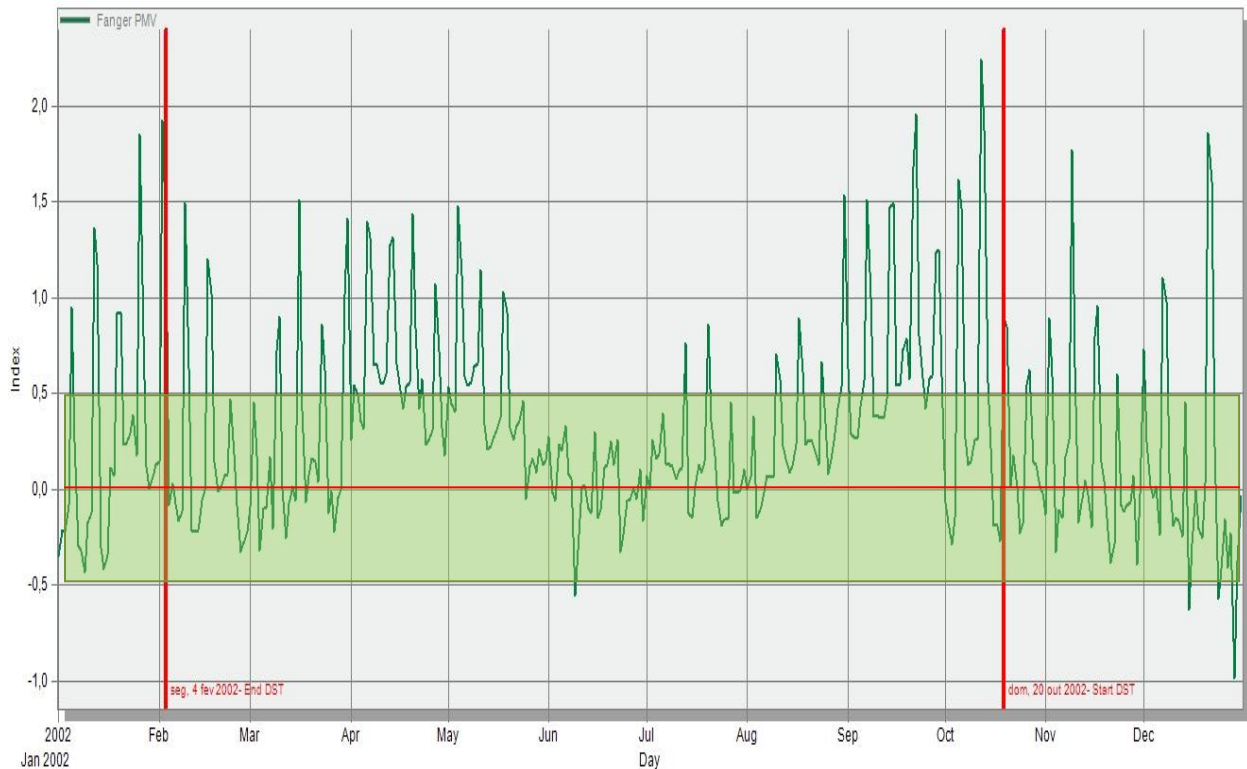


Figura 6.2 - Resultado do PMV do prédio do Beijódromo com um sistema de condicionamento de ar.

O parâmetro de saída PMV, analisado após aplicação do sistema de condicionamento de ar, revela uma mudança na quantidade de meses e tempo em que o prédio permanece em condição de desconforto térmico. Se, anteriormente, apenas em rápidos períodos de cinco meses do ano a edificação apresentava uma situação de conforto térmico, com essa nova análise, em todos os meses do ano existem momentos em que a edificação atende os limites determinados pela norma NBR 16401.

Entretanto, atender as exigências de uma norma de forma parcial não é o objetivo de nenhuma instalação de condicionamento de ar, por isso se faz necessário a elaboração de um estudo que aponte a solução ótima de climatização, que aliada as soluções passivas de arquitetura já instaladas, torne todas as zonas térmicas do prédio do Beijódromo confortáveis termicamente para seus usuários durante todo o ano.

7 Conclusões

A escolha da ferramenta computacional Design Builder apresentou desempenho satisfatório como programa de simulação termoenergética para o trabalho realizado de crítica a situação de conforto térmico da edificação Fundação Darcy Ribeiro. Os dados de saída obtidos pelo software ficaram próximos das medições realizadas in loco, o que demonstra a qualidade de seus cálculos na elaboração de variáveis de saída que foram estudadas para se chegar a uma conclusão sobre as condições térmicas do prédio.

Porém, o programa Design Builder, que é uma interface para utilização do software EnergyPlus, deixa a desejar em relação a sua modelagem tridimensional da edificação e em relação a sua biblioteca de dados. Apesar de apresentar uma forma simples e fácil de modelar o prédio desejado, a construção de geometrias mais complexas, como o teto do prédio do Beijódromo, apresenta um grau de dificuldade imenso, levando, em muitos casos, a uma simplificação da geometria desejada. Além disso, os arquivos carregados em sua biblioteca de dados são limitados em quantidade e possibilidades de edições, demandando então um trabalho de adicionar arquivos novos sempre que necessária a implementação de um sistema que difere dos existentes no default do programa.

Em relação às simulações realizadas no prédio do Beijódromo, é notável o alto índice de desconforto térmico alcançado, sendo que em determinados meses dos anos há uma porcentagem superior a 90% das pessoas usuárias da edificação insatisfeitas com a sensação de calor. E, como forma de confrontar e confirmar os dados de saída expelidos pelo programa, as medições in loco no edifício atestaram a condição de desconforto térmico de parâmetros ambientais, a partir do momento em que registraram valores bem próximos a aqueles vistos na simulação termoenergética da Fundação Darcy Ribeiro.

Desta forma, conclui-se que as soluções passivas de arquitetura, utilizadas na climatização do edifício não conseguem manter a condição de conforto térmico exigida pela norma brasileira ABNT NBR 16401, parte 2: parâmetros de conforto térmico.

Como sugestão para trabalhos de continuação deste estudo, tem-se a elaboração de um projeto de condicionamento de ar que supra a necessidade existente na edificação do Beijódromo, ao mesmo tempo em que respeite suas características construtivas, pois é uma edificação já erguida, apresente eficiência energética na solução ótima a ser determinada e ainda respeite os traços arquitetônicos, que são uma marca evidente deste edifício.

Referências Bibliográficas

- ASHRAE, 1993, Fundamentals Handbook, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., SI Edition, Atlanta, USA.
- BORDUNI, R. Nunes, 2006, “Simulação Computacional para Análise de Eficiência Energética em Edificações”. LaAR, Universidade de Brasília
- Department of Energy Efficiency and Renewable Energy of United States of America – EEER em, WWW.eere.energy.gov/buildingd/energyplus.
- FANGER, P. O., 1972. “Thermal Comfort: Analyses and applications in environmental engineering.” McGrall Hill, New York, USA.
- DEPECKER, P., MENEZO, C., BASTOS, L., QUEIROZ, T. “Aide à La décision et structure d’outils pour La conception thermique dès bâtiments, typologie, modes d’usage, incertitude”. 2º Conference on Decision Marking in Urban and Civil Engineering, Lyon, França
- DESIGNBUILDER TUTORIALS, 2007 em www.designbuilder.co.uk/content/view/54/68/
- KUSUNDA, T., BEAN, J. W., 1981. “Comparison of calculated hourly cooling load and Atiic temperature with measure data for Houston test house”. ASHARAE Transactions vol. 87
- LAMBERTS, R., DUTRA, L., PEREIRA, F. O. R., 2004. “Eficiência energética na arquitetura”.
- GÒMEZ, L. A., LAMBERTS, R., 1995. “Simulação da Influência de Algumas Variáveis Arquitetônicas no Consumo de Energia do Edifício”
- LabEEE - Apostila de Desempenho Térmico em Edificações, 2005.
- KRUGER, E., LAMBERTS, R., 2000. ”Avaliação do desempenho térmico de casas populares”. UFSC.
- Norma ISO 7730 - 1994. Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD índices and local thermal comfort criteria.
- PEDRINI, A., 1997. “Desenvolvimento de Metodologia de Calibração de Modelos para Simulações Térmica e Energética de Edificações”, Dissertação de Mestrado em Engenharia, UFS.
- SILVA, C. J. C., 2003. “Simulação Termoenergética de um Sistema de Ar Condicionado para Comparação dos Resultados Medidos e Simulados”. UFRGS.
- VERDI, R. E., 2003. “Análise Termo-Energética de um Prédio Comercial”. UFRGS.
- AKTUSU, M., VITTORINO, F. Proposta de procedimento para avaliação do desempenho térmico de edificações condicionadas e não condicionadas. ENTAC – Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, p. 157 – 171, 1991.
- DOE, D. of E. Thermal comfort: analyses applications in the environmental engineering. Engineering Reference, 1993.
- SEVERO, M., Análise energética de uma edificação com o auxílio de um programa computacional. 1999.

- STRAND, R. K. Modularization and simulation techniques for heat balance based energy and load calculations programs: the experience of ashrae loads toolkit and energyplus. Seventh International IBPSA Conference, 2001.
- KIERKUS, W., COLBORNE, W., WILSON, N. The effect of differences in solar radiation data on the energy requirements of a residence. ASHRAE Transactions, v. 97, p. 325 – 327, February 1991.
- LAMBERTS, R., DUTRA, L., PEREIRA, F. O. R., Eficiência energética na arquitetura. 1997.
- HAGEL, A. P. L. A., “Análise computacional da demanda energética de climatização de edifício”. Monografia de graduação em engenharia., 2005.
- Ministério de Minas e Energia - 2003.
- NASCIMENTO, A. L. R., 2007. “Simulação Energética de Edifícios como Ferramenta de Projeto - Caso de Estudo: Museu de Ciência e Tecnologia de Brasília”, LaAR, Universidade de Brasília.
- FARIAS, G. H. N. F., 2007. “Definição de Soluções de Climatização para Diferentes Regiões Climáticas - Caso de Estudo: Projeto MEC Proinfância”, LaAR, Universidade de Brasília.
- AGOYPAN, V. Prefácio da versão em língua portuguesa. Agenda 21 para a construção sustentável. Tradução do Relatório CIB – Publicação 237. INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION. Tradução de I. Gonçalves; T. Whitaker; ed. De G. Weinstock, D.M Weinstock. São Paulo: s.d. 2000 131p.
- BOURDEAU, L. The Agenda 21 on Sustainable Construction. In: CIB Symposium on Construction and Environment: theory into practice. 23 – 24 de novembro de 2000. São Paulo, 2000.
- ZAKARIA, F. Aquecimento global: é bom se acostumar. Revista Época: Coluna Nosso Mundo. 19 de Fevereiro de 2007. P. 66.
- LAMBERTS, R., TRIANA, M. A. Relatório Estado da Arte. Capítulo Energia. 2005. Projeto Tecnologias para a Construção Habitacional mais Sustentável.
- PROCEL (1993). Manual de conservação de energia elétrica em prédios públicos e comerciais. PROCEL Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. 3ª edição. P. 20.

Anexo A

Neste anexo estão as demais saídas de parâmetros que avaliem o conforto térmico gerado pela simulação do modelo tridimensional geométrico do edifício Fundação Darcy Ribeiro.

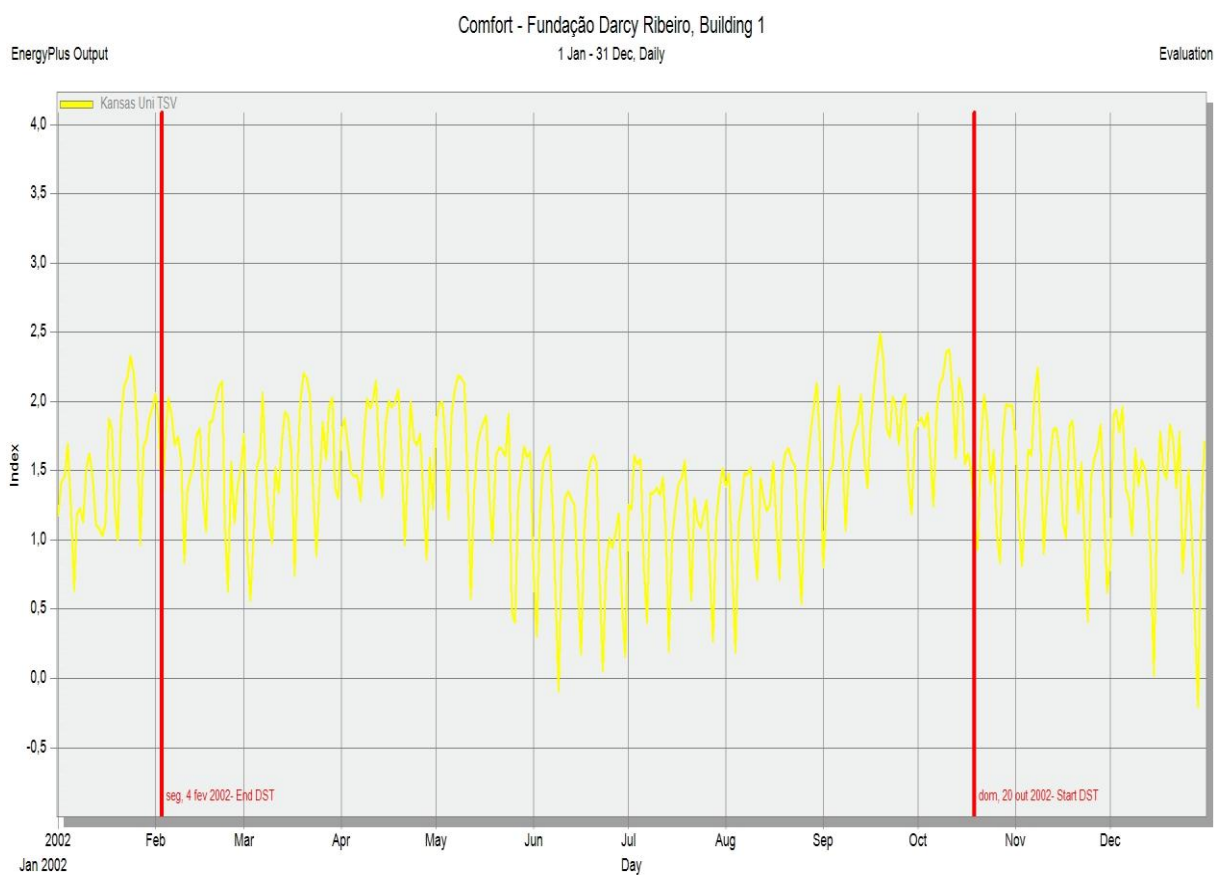


Figura A.1 - Resultado Kansas dia a dia ao longo do ano no prédio do Beijódromo.

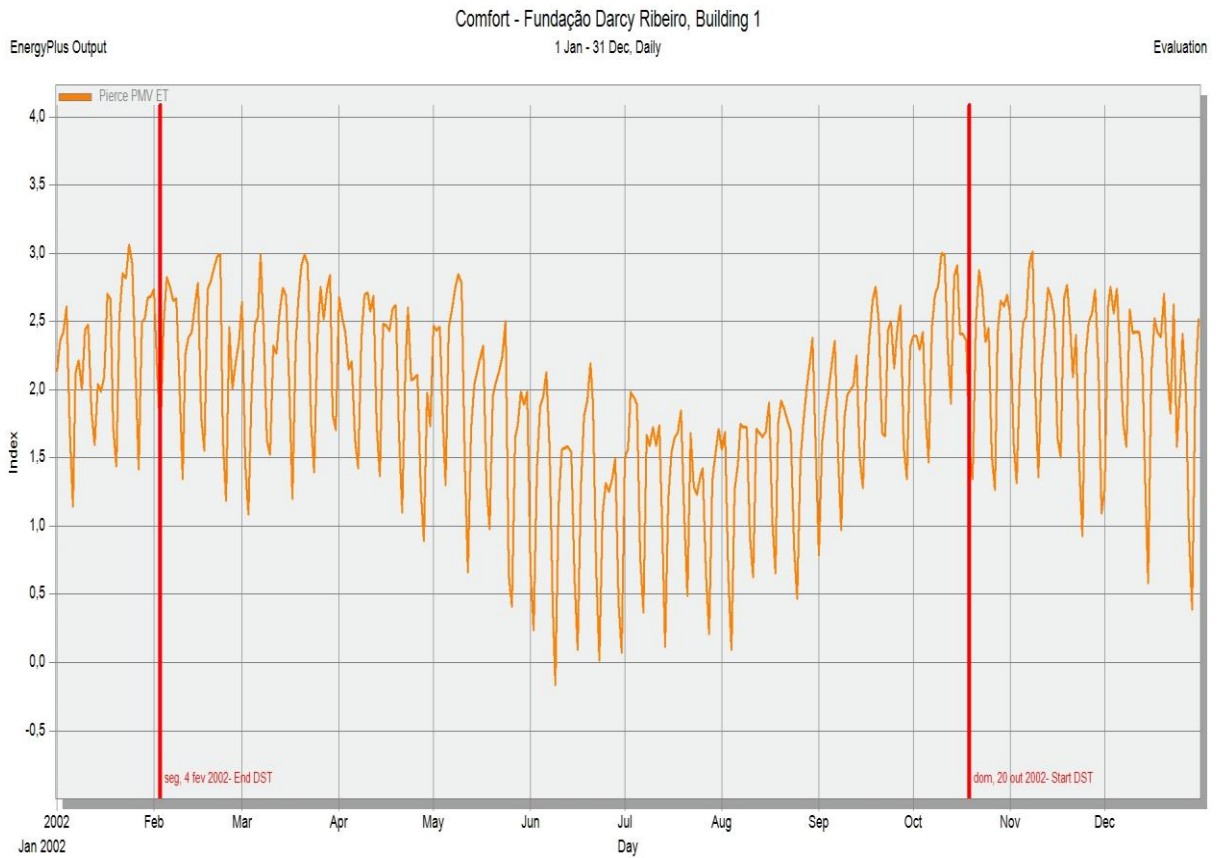


Figura A.2 - Resultado Pierce PMV ET dia a dia ao longo do ano no prédio do Beijódromo.

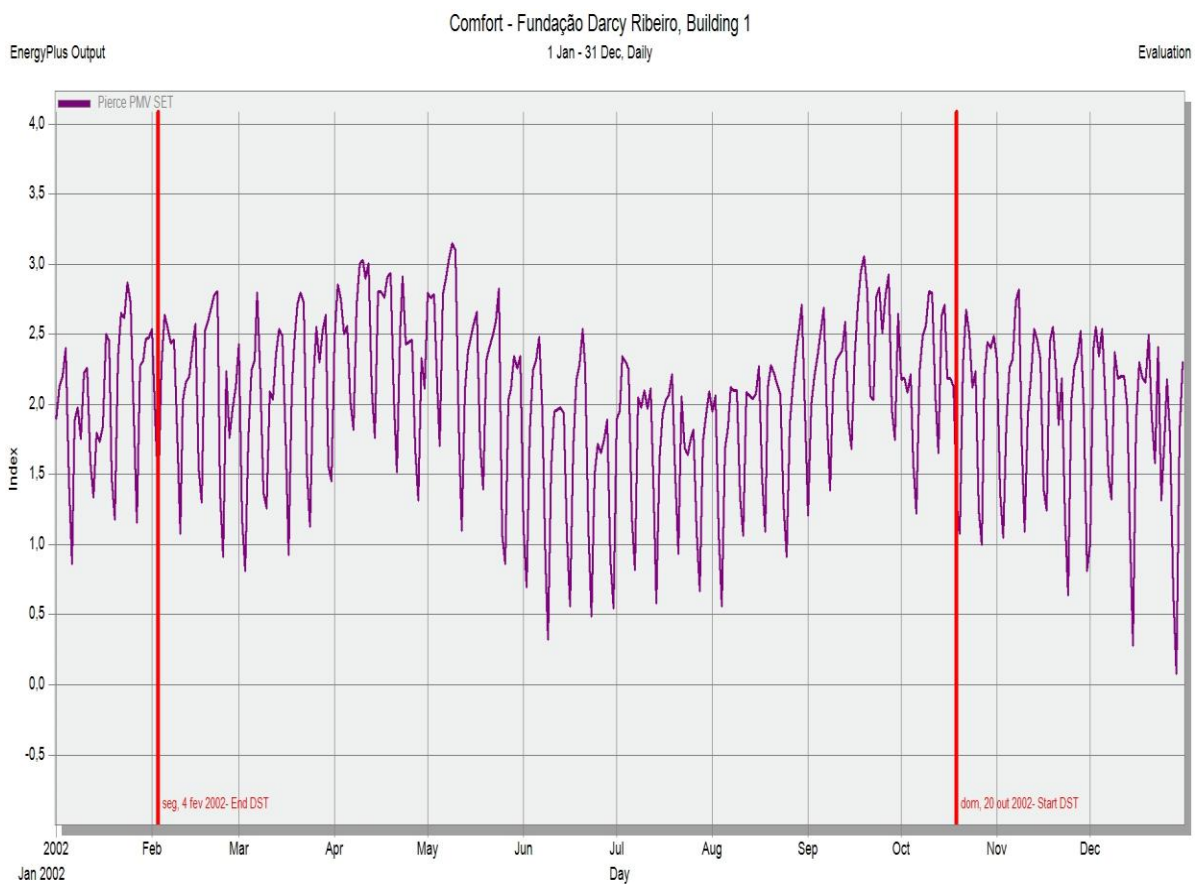


Figura A.3 - Resultado Pierce PMV SET dia a dia ao longo do ano no prédio do Beijódromo.

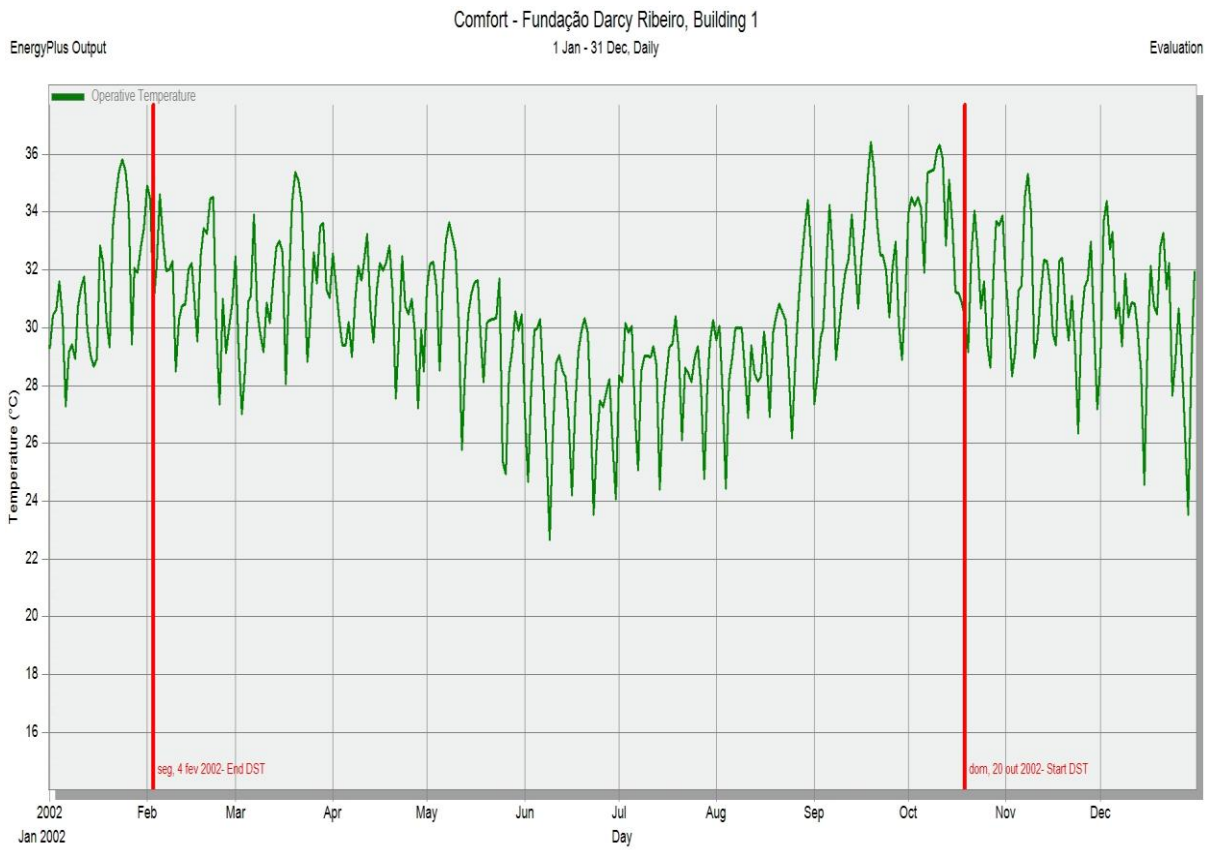


Figura A.4 - Resultado Temperatura Operativa dia a dia ao longo do ano no prédio do Beijódromo.

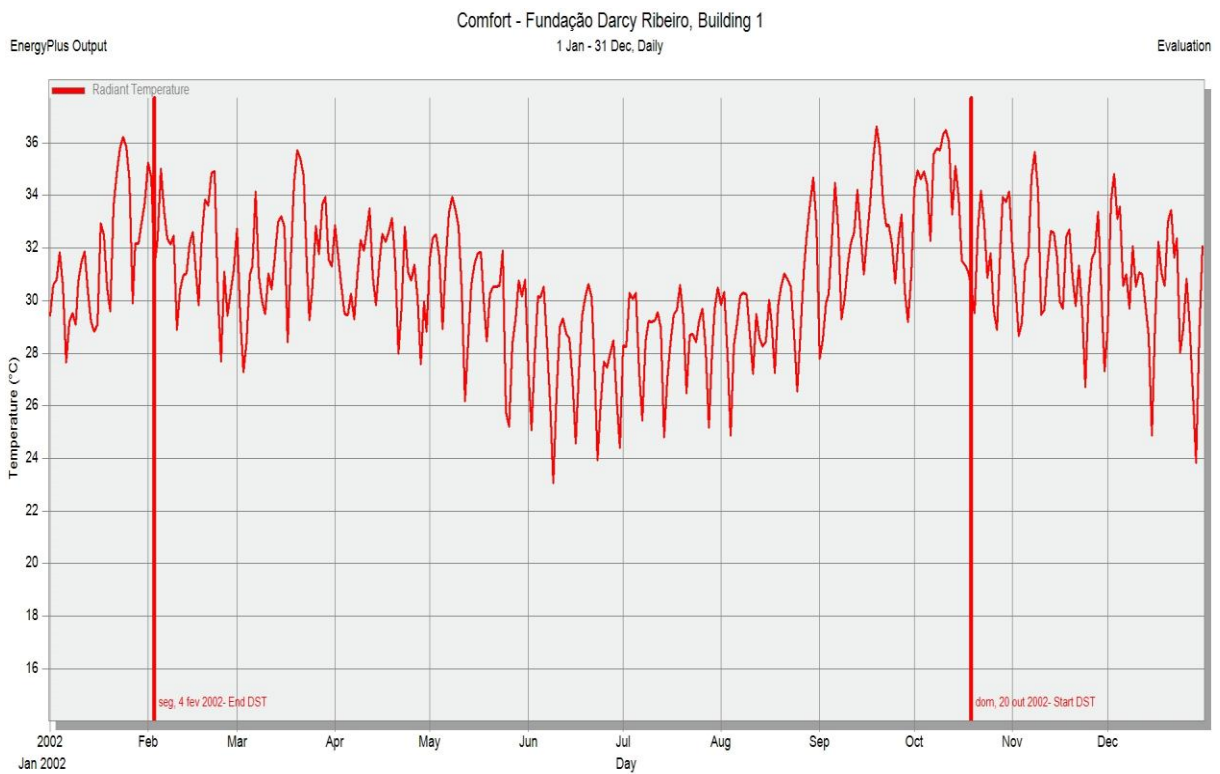


Figura A.5 - Resultado Temperatura Radiante dia a dia ao longo do ano no prédio do Beijódromo.