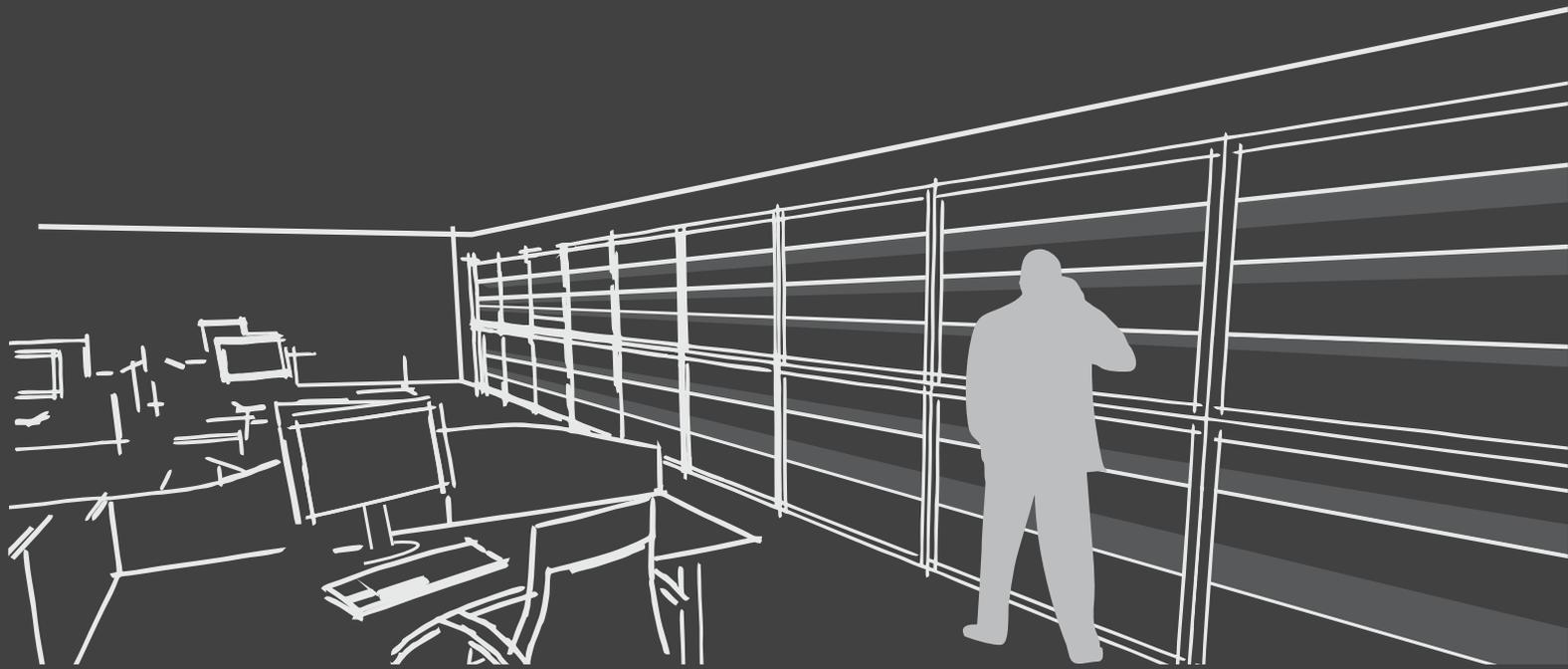
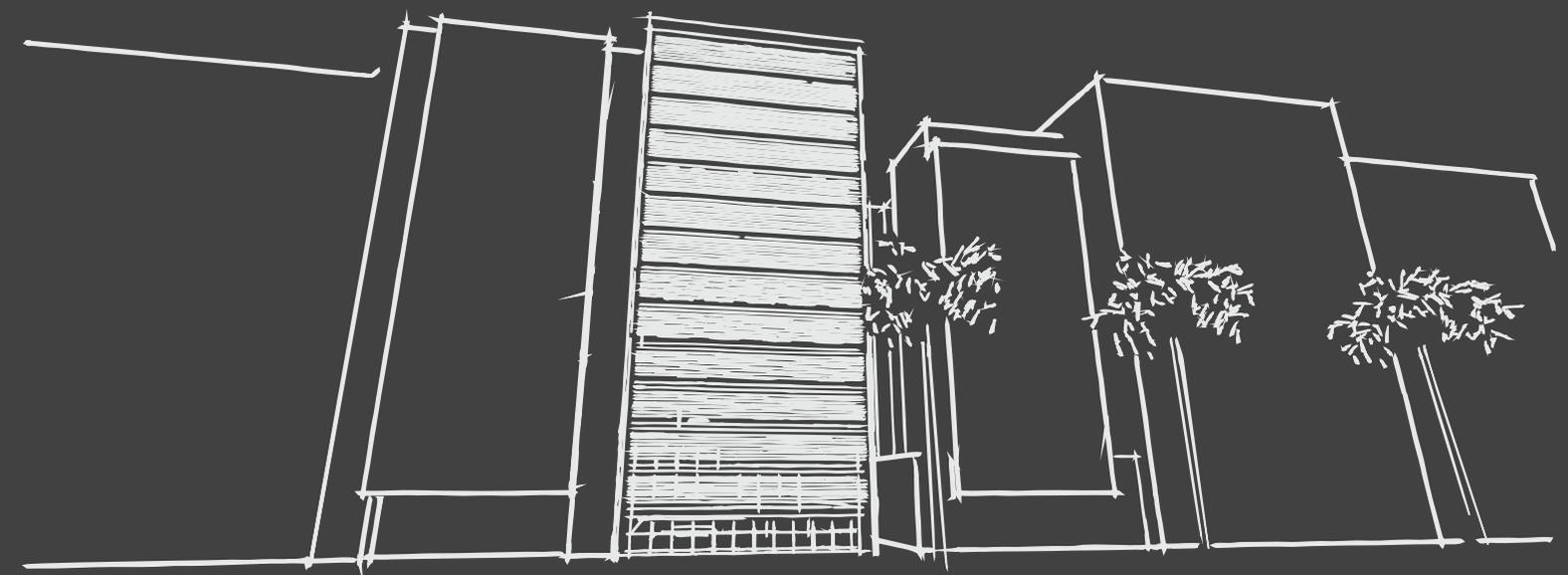


UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA



**A ABORDAGEM MULTICRITÉRIO NA CONCEPÇÃO ARQUITETÔNICA:
UM ESTUDO SOBRE AS ABERTURAS LATERAIS EM EDIFÍCIO DE
ESCRITÓRIOS NO RIO DE JANEIRO**



MARÍLIA RAMALHO FONTENELLE

Universidade Federal do Rio de Janeiro

**A ABORDAGEM MULTICRITÉRIO NA CONCEPÇÃO ARQUITETÔNICA:
UM ESTUDO SOBRE AS ABERTURAS LATERAIS EM EDIFÍCIO DE
ESCRITÓRIOS NO RIO DE JANEIRO**

Marília Ramalho Fontenelle

2012



UFRJ

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura



**A ABORDAGEM MULTICRITÉRIO NA CONCEPÇÃO ARQUITETÔNICA:
UM ESTUDO SOBRE AS ABERTURAS LATERAIS EM EDIFÍCIO DE
ESCRITÓRIOS NO RIO DE JANEIRO**

Marília Ramalho Fontenelle

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura, Linha de pesquisa Sustentabilidade, Conforto Ambiental e Eficiência Energética.

Orientador: Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos, D.Sc.

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2012

**A ABORDAGEM MULTICRITÉRIO NA CONCEPÇÃO ARQUITETÔNICA:
UM ESTUDO SOBRE AS ABERTURAS LATERAIS EM EDIFÍCIO DE
ESCRITÓRIOS NO RIO DE JANEIRO**

Marília Ramalho Fontenelle

Orientador: Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos, D.Sc

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências da Arquitetura, Linha de pesquisa Sustentabilidade, Conforto Ambiental e Eficiência Energética.

Aprovada por:

Presidente, Prof. Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos, D.Sc.

Prof^a. Cláudia Mariz de Lyra Barroso Krause, D. Sc.

Prof. Eduardo Breviglieri Pereira de Castro, D.Sc.

Prof^a. Maria Maia Porto, D.Sc.

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Fontenelle, Marília Ramalho.

A abordagem multicritério na concepção arquitetônica: um estudo sobre as aberturas laterais em edifício de escritórios no Rio de Janeiro / Marília Ramalho Fontenelle – Rio de Janeiro: UFRJ/FAU, 2012.

xviii, 131f.: il.; 31 cm.

Orientador: Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos.

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ PROARQ/ Programa de Pós-graduação em Arquitetura, 2012.

Referências Bibliográficas: f. 126-131.

1. Aberturas laterais. 2. Abordagem Multicritério. 3. Iluminação Natural. 4. Eficiência energética. 5. Edifício de escritórios. I. Bastos, Leopoldo Eurico Gonçalves. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-graduação em Arquitetura. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador e amigo, Leopoldo Bastos, pelas inúmeras discussões sobre este trabalho, pelas correções e sugestões, pelo incentivo, entusiasmo, presença e confiança no meu potencial.

À professora e amiga Cláudia Krause, pelos ensinamentos, pela generosidade no estágio supervisionado, pelas discussões sobre a pesquisa e por sua contribuição como membro da banca examinadora.

Ao professor Eduardo Castro, por me disponibilizar as ferramentas necessárias para realização da pesquisa e pelas contribuições como membro da banca examinadora.

À professora Maria Maia, pelas discussões sobre iluminação natural e pelas contribuições como membro da banca examinadora.

À professora Giselle Arteiro, pela contribuição como membro suplente da banca examinadora.

Aos professores do PROARQ, em especial aos da linha de pesquisa Sustentabilidade, Conforto Ambiental e Eficiência Energética, pelos preciosos ensinamentos e pela receptividade carinhosa.

Aos membros administrativos do PROARQ, em especial a Maria da Guia, Rita e Vanda, pela pronta ajuda sempre que necessário, pelos momentos de descontração e pelo carinho.

À Rejane Loura (UFMG), Cynthia Marconsini (UFRJ), Evelise Didoné (UFSC) e Lucas Arango (UFSC), pela preciosa ajuda na utilização dos programas de simulação.

Aos colegas de mestrado, pelas discussões em sala de aula, pelos trabalhos em grupo, pela troca de conhecimento. A Patrícia di Trapano, pela amizade e pela companhia agradável nos congressos.

À FAPERJ, pelo apoio financeiro concedido para a finalização desta pesquisa através da Bolsa Nota 10. A CAPES, pelo apoio através da bolsa de estudos.

A minha querida família em Fortaleza, em especial aos meus pais, pelo incentivo nos estudos, por sempre me servirem de exemplo e pelo amor.

Aos meus amigos, pelo apoio constante, pela torcida e pelas palavras de entusiasmo a cada nova conquista. Obrigada por se fazerem presentes, apesar da distância.

Ao meu esposo, Marcelo, meu “coorientador”, pelo apoio constante, pela admiração, pelas discussões sobre o tema, pelas ajudas em cálculos, planilhas e gráficos. E, claro, pela maravilhosa companhia e pelo amor.

RESUMO

A ABORDAGEM MULTICRITÉRIO NA CONCEPÇÃO ARQUITETÔNICA: UM ESTUDO SOBRE AS ABERTURAS LATERAIS EM EDIFÍCIO DE ESCRITÓRIOS NO RIO DE JANEIRO

Marília Ramalho Fontenelle

Orientador: Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos, D.Sc

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura.

Este trabalho evidencia a complexidade enfrentada na concepção arquitetônica ao se buscar conciliar múltiplos critérios projetuais. Destaca-se a necessidade de rever o modelo atual de concepção arquitetônica, ressaltando-se a importância de incorporar métodos e ferramentas ao processo de projeto que possibilitem conduzi-lo através de uma visão integrada. A abordagem multicritério é apontada como um dos possíveis caminhos para alcançar este objetivo. Com o objetivo de ressaltar os potenciais desta metodologia e ao mesmo tempo evidenciar as dificuldades enfrentadas na sua incorporação à concepção arquitetônica, propõe-se fazer uma aplicação da abordagem multicritério em um processo de projeto de aberturas laterais de um edifício de escritórios do Rio de Janeiro. A aplicação proposta se inicia com a composição de seis alternativas para as aberturas, que é feita a partir da variação de três parâmetros: dimensão, material de composição e sombreamento das janelas. Estas alternativas são avaliadas com auxílio de ferramentas computacionais e analíticas, além de diversos métodos, sob a ótica dos três critérios: o nível de iluminação natural no plano de trabalho, através de simulações computacionais (Daysim 3.1); a visualização para o exterior, pelo cálculo dos ângulos visuais; e a eficiência energética, através da aplicação do método prescritivo do RTQ-C. Após as análises monocritérios, é feita a aplicação do método ELECTRE III para ordenar as alternativas (*ranking*), possibilitando a identificação daquela que melhor concilia os critérios estudados. Os resultados indicam que: as soluções sombreadas apresentam um desempenho global mais satisfatório que as desprotegidas, mesmo quando nestas são adotados vidros de controle solar; e as aberturas de maiores dimensões apresentam melhores resultados globais para a dimensão e forma específica do ambiente estudado. Ao fim da aplicação, é possível concluir que a abordagem multicritério é um caminho bastante útil para compatibilizar múltiplos critérios, podendo contribuir para uma tomada de decisão mais consistente na fase de concepção arquitetônica.

Palavras-chave: Aberturas Laterais; Abordagem Multicritério; Iluminação Natural; Eficiência Energética; Edifício de Escritórios.

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2012

ABSTRACT

THE MULTICRITERIA APPROACH IN ARCHITECTURAL CONCEPTION: A STUDY ABOUT WINDOWS OF AN OFFICE BUILDING IN RIO DE JANEIRO

Marília Ramalho Fontenelle

Supervisor: Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos, D.Sc.

Abstract of a Master Degree thesis submitted to the Architecture Postgraduate Program, College of Architecture and Urbanism, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, as a partial fulfillment of the requirements to obtain the degree of Master in Architecture Science.

This work highlights the complexity involved in architectural conception when trying to reconcile multiple design criteria. It emphasizes the need to revise the current model of architectural design, highlighting the importance of incorporating methods and tools into the design process to aid designers conduct it through an integrated approach. The Multicriteria Approach is indicated as one of the ways to reach this goal. In order to emphasize the potentials of this approach and the difficulties involved in its incorporation into the design process, it is proposed to apply the multicriteria approach in the design process of windows of an office building in Rio de Janeiro. The application begins with the development of six design solutions of windows by varying three parameters: size, material and shading typology. They are assessed by three criteria, using different tools or methods: indoor daylight level on the work plan, through simulations (Daysim 3.1); landscape view, by calculating visual angles; and energy efficiency, using the RTQ-C prescriptive method. After the mono-criteria analysis, the ELECTRE III method is applied to rank the mono-criteria results and to identify which solution best reconciles the criteria studied. The results indicate that: the shaded solutions show a more satisfactory overall performance than those ones without shading devices, even when it is applied a solar control glass. Also, larger size windows achieve better overall compromised results for the specific size and form of the space studied. In conclusion, it is possible to say that the multicriteria approach is a very useful way to match several criteria in order to achieve a compromising design solution, and then to contribute for a more consistent decision in the architectural design process.

Key words: Windows; Multicriteria Approach; Natural Lighting; Energy Efficiency; Office buildings.

Rio de Janeiro
February 2012

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE GRÁFICOS	xv
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xvii
INTRODUÇÃO	01
Problemática	01
O objeto de estudo	04
Objetivos da pesquisa	04
Justificativa	05
Metodologia	06
Estrutura da dissertação	08

PARTE I – EMBASAMENTO TEÓRICO

CAPÍTULO 01: O DESAFIO DE CONCILIAR MÚLTIPLOS CRITÉRIOS NO PROCESSO DE PROJETO 10 |

1.1. A introdução dos critérios de sustentabilidade no projeto de arquitetura	13
---	----

CAPÍTULO 02: A ABORDAGEM MULTICRITÉRIO 19 |

2.1. Conceitos básicos da abordagem multicritério	20
---	----

2.2. Etapas básicas dos métodos da abordagem multicritério	21
--	----

2.2.1. Escolha dos parâmetros de projeto e definição das alternativas a serem testadas	22
--	----

2.2.2. Definição dos critérios de análise e de seus pesos	23
---	----

2.2.3. As análises monocritérios	23
--	----

2.2.4. Aplicação de um método de abordagem multicritério para identificação da solução preferida.	25
--	----

2.2.4.1. O Método ELECTRE III	26
-------------------------------------	----

2.3. Aplicações na arquitetura	29
--------------------------------------	----

PARTE II – APLICAÇÃO DA ABORDAGEM MULTICRITÉRIO EM UM PROCESSO DE PROJETO

CAPÍTULO 03: ELEMENTOS DA APLICAÇÃO 34 |

3.1. O objeto de estudo	35
-------------------------------	----

3.1.1. O uso do edifício	35
--------------------------------	----

3.1.2. Contexto climático do projeto	35
--	----

3.1.3. Dados do terreno escolhido e de seu entorno imediato	37
---	----

3.1.4. O projeto arquitetônico	40
--------------------------------------	----

3.2. Os critérios	42
-------------------------	----

3.2.1. Conforto visual	42
------------------------------	----

3.2.1.1. Nível de iluminação natural no plano de trabalho	43
---	----

3.2.1.2. Visualização para o exterior	45
3.2.2. Eficiência energética	46
3.3. As restrições	48
3.3.1. Restrições relativas aos dois critérios relacionados ao conforto visual ..	48
3.3.2. Restrições relativas à eficiência energética	49
3.4. Os parâmetros	49
3.4.1. Dimensão das aberturas	50
3.4.2. Material de composição das aberturas	52
3.4.3. Sombreamento das aberturas	56
CAPÍTULO 04: ETAPAS DA APLICAÇÃO	59
4.1. Etapa 01: Definição das alternativas	59
4.1.1. Alternativa 1: 37%_VA_SP	65
4.1.2. Alternativa 2: 52%_VA_SP	66
4.1.3. Alternativa 3: 37%_VB_CP1	66
4.1.4. Alternativa 4: 52%_VB_CP1	67
4.1.5. Alternativa 5: 37%_VB_CP2	68
4.1.6. Alternativa 6: 52%_VB_CP2	69
4.1.7. Resumo das alternativas	69
4.2. Etapa 02: Definição dos pesos dos critérios	71
4.3. Etapa 03: Análises monocritérios	72
4.3.1. Desempenho das alternativas quanto ao nível de iluminação natural no plano de trabalho	72
4.3.1.1. Ferramenta de avaliação	72
4.3.1.2. Os dados de entrada	74
4.3.1.3. Metodologia de avaliação dos resultados	77
4.3.1.4. Análise dos resultados	82
4.3.1.4.1. Alternativa 1: 37%_VA_SP	82
4.3.1.4.2. Alternativa 2: 52%_VA_SP	84
4.3.1.4.3. Alternativa 3: 37%_VB_CP1	86
4.3.1.4.4. Alternativa 4: 52%_VB_CP1	88
4.3.1.4.5. Alternativa 5: 37%_VB_CP2	90
4.3.1.4.6. Alternativa 6: 52%_VB_CP2	92
4.3.1.5. Comparação dos resultados (<i>ranking parcial</i>)	93
4.3.2. Desempenho das alternativas quanto à visualização para o exterior	97
4.3.2.1. Metodologia de avaliação	97
4.3.2.2. Análise dos resultados	99
4.3.2.2.1. Alternativa 1: 37%_VA_SP	99
4.3.2.2.2. Alternativa 2: 52%_VA_SP	99
4.3.2.2.3. Alternativa 3: 37%_VB_CP1	100
4.3.2.2.4. Alternativa 4: 52%_VB_CP1	100
4.3.2.2.5. Alternativa 5: 37%_VB_CP2	101
4.3.2.2.6. Alternativa 6: 52%_VB_CP2	101
4.3.2.3. Comparação dos resultados (<i>ranking parcial</i>)	102
4.3.3. Desempenho das alternativas quanto à eficiência energética	102
4.3.3.1. Metodologia de avaliação	102
4.3.3.2. Os dados de entrada	105
4.3.3.3. Análise e comparação dos resultados (<i>ranking parcial</i>)	109

4.4. Etapa 04: Aplicação de um método de abordagem multicritério para identificação da solução preferida	110
4.4.1. Dados de entrada	110
4.4.2. Análise dos resultados	113
CONSIDERAÇÕES FINAIS	117
Reflexões sobre os resultados da aplicação da abordagem multicritério	118
Reflexões sobre a 1ª etapa da abordagem	119
Reflexões sobre a 2ª etapa da abordagem	120
Reflexões sobre a 3ª etapa da abordagem	120
Reflexões sobre a 4ª etapa da abordagem	123
Reflexões sobre a viabilidade de incorporação da abordagem multicritério à prática projetual.....	124
Recomendações para pesquisas futuras	125
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

- Figura 1.1** – Situação ideal: proposição de uma solução de projeto para cada requisito. Inexistência de conflitos. Fonte: SILVA, 1984. 11
- Figura 1.2** – Primeira etapa: identificação de soluções que satisfaçam cada um dos requisitos do projeto. Fonte: SILVA, 1984. 12
- Figura 1.3** – Segunda etapa: escolha de uma solução que satisfaça cada critério que, combinada às demais soluções, forme uma alternativa de projeto coerente. Fonte: SILVA, 1984. 12
- Figura 1.4** – Matriz de interações entre as categorias do Processo AQUA. Fonte: FCAV, 2007. 15

CAPÍTULO 2

- Figura 2.1** – Tela de entrada do CELECTRE. 28
- Figura 2.2** – Tela de resultados do CELECTRE. 29

CAPÍTULO 3

- Figura 3.1** – Carta solar do Rio de Janeiro (22°50' de latitude sul). Fonte: aplicação do programa Analysis SOL-AR (LABEE, 2009). 36
- Figura 3.2** – Vista aérea do terreno e de seu entorno imediato. Fonte: adaptado do GOOGLE, 2011. 37
- Figura 3.3** – Vista frontal do terreno e dos edifícios vizinhos. Fonte: autora. 38
- Figura 3.4** – Rosa dos ventos indicando frequência de ocorrência e velocidades predominantes dos ventos por direção. Dados da estação meteorológica do Aeroporto Galeão. Fonte: programa Analysis SOL-AR (LABEEE, 2009). 38
- Figura 3.5** – Sombreamento gerado no terreno pelos edifícios vizinhos. Fonte: autora. 39
- Figura 3.6** – Implantação do edifício (em vermelho). Fonte: autora. 40
- Figura 3.7** – Planta baixa do pavimento tipo. 41
- Figura 3.8** – Corte longitudinal AA' do edifício com indicação da trajetória do vento. 41

CAPÍTULO 4

- Figura 4.1** – Estudo das máscaras de sombra previstas para os protetores. Em azul: horário de ocupação. Fonte: aplicação do programa Analysis SOL-AR (LABEEE, 2009). 60

Figura 4.2 – Esquemas de composição do sombreamento das aberturas. Fonte: a autora.	61
Figura 4.3 – Esquema da solução de sombreamento para as aberturas do átrio, do 8º ao 13º pavimento. Fonte: a autora	64
Figura 4.4 – Corte longitudinal do pavimento tipo com adoção da alternativa 1.	65
Figura 4.5 – Corte longitudinal do pavimento tipo com adoção da alternativa 2.	66
Figura 4.6 – Corte longitudinal do pavimento tipo com adoção da alternativa 3.	66
Figura 4.7 – Máscaras de sombra correspondentes aos protetores solares da alternativa 3. Fonte: aplicação do programa Analysis SOL-AR (LABEE, 2009).	67
Figura 4.8 – Corte longitudinal do pavimento tipo com adoção da alternativa 4.	67
Figura 4.9 – Corte longitudinal do pavimento tipo com adoção da alternativa 5.	68
Figura 4.10 – Máscaras de sombra correspondentes aos protetores solares da alternativa 6. Fonte: aplicação do programa Analysis SOL-AR (LABEE, 2009).	68
Figura 4.11 – Corte longitudinal do pavimento tipo com adoção da alternativa 6.	69
Figura 4.12 – Malha de pontos para simulação no Daysim.	76
Figura 4.13 – Síntese das etapas da metodologia de análise dos resultados adotada.	81
Figura 4.14 – Manchas solares nos ambientes com A1	83
Figura 4.15 – Manchas solares nos ambientes com A2	85
Figura 4.16 – Distância às aberturas considerada no cálculo dos ângulos de visualização.	98
Figura 4.17 – Método de cálculo dos ângulos visuais.	98
Figura 4.18 – Alternativa 1: ângulos de visualização para o exterior.	99
Figura 4.19 – Alternativa 2: ângulos de visualização para o exterior.	99
Figura 4.20 – Alternativa 3: ângulos de visualização para o exterior.	100
Figura 4.21 – Alternativa 4: ângulos de visualização para o exterior.	100
Figura 4.22 – Alternativa 5: ângulos de visualização para o exterior.	101
Figura 4.23 – Alternativa 6: ângulos de visualização para o exterior.	101
Figura 4.24 – Esquema da volumetria com suas dimensões.	106
Figura 4.25 – Ângulos verticais médios por fachada e alternativa.	108
Figura 4.26 – Corte esquemático de uma abertura, indicando diferença entre AVS interior e externo.	108
Figura 4.27 – Planta do pórtico indicando o AHS para todas as fachadas e alternativas.	109

Figura 4.28 – Exemplo de dados inseridos na tela inicial do programa CELECTRE para o 1º pavimento e o grupo de variações de peso A.	111
Figura 4.29 – Exemplo de resultados obtidos através do CELECTRE para o 1º pavimento e grupo de pesos A.....	112
Figura 4.30 – Exemplo de dados inseridos na tela inicial do programa CELECTRE para o 1º pavimento e o grupo de variações de peso B.	113
Figura 4.31 – Exemplo de dados inseridos na tela inicial do programa CELECTRE para o 1º pavimento e o grupo de variações de peso I.....	113
Figura 4.32 – A solução preferida: alternativa 6.	116

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1.1 – Matriz de exemplificação das inter-relações entre as categorias do AQUA. Fonte: adaptado de FONTENELLE; BASTOS, 2011..... 16

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 – Matriz de avaliações monocritérios. Fonte: CASTRO, 2005.....26

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 – Normais climatológicas do Rio de Janeiro. Fonte: LABEEE, 2009.35

Tabela 3.2 – Restrições do RTQ-C para a envoltória de edifícios que visam o selo A. Fonte: BRASIL, 2010a.49

Tabela 3.3 – Relação entre PAF e consumo mensal médio de energia elétrica em edifícios comerciais de Salvador-BA. Fonte: adaptado de MASCARENHAS et al., 1995.....51

Tabela 3.4 – Relação entre a coloração do vidro e o óxido adicionado a sua composição. Fonte: CARAM, 1998.....53

Tabela 3.5 – Tipos de vidros e transmissão da radiação nos intervalos ultravioleta, visível e infravermelho. Fonte: adaptado de Caram (1996).....55

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 – Características dos vidros testados.62

Tabela 4.2 – Características dos parâmetros de abertura fixados.63

Tabela 4.3 – Características dos parâmetros de abertura variados.63

Tabela 4.4 – Tabela resumo das alternativas de projeto para as aberturas Sudeste e Noroeste.70

Tabela 4.5 – Grupos de pesos atribuídos aos critérios.71

Tabela 4.6 – Características ópticas dos materiais.....75

Tabela 4.7 – Dados do sítio.....76

Tabela 4.8 – Fatores determinantes da iluminância adequada. Fonte: adaptado de ABNT, 1990.77

Tabela 4.9 – Iluminâncias por classes de tarefas visuais. Fonte: adaptado de ABNT, 1990.77

Tabela 4.10 – 1º pavimento: ordenamento das alternativas por métrica dinâmica.....95

Tabela 4.11 – 7º pavimento: ordenamento das alternativas por métrica dinâmica.....	95
Tabela 4.12 – 13º pavimento: ordenamento das alternativas por métrica dinâmica.....	95
Tabela 4.13 – 1º pavimento: valores normalizados e <i>ranking</i> parcial.....	96
Tabela 4.14 – 7º pavimento: valores normalizados e <i>ranking</i> parcial.....	96
Tabela 4.15 – 13º pavimento: valores normalizados e <i>ranking</i> parcial.....	96
Tabela 4.16 – Ângulos de visualização para o exterior e <i>ranking</i> parcial.....	102
Tabela 4.17 – Cálculo do FA e FF.....	106
Tabela 4.18 – Valores das variáveis relativas às aberturas, por alternativa.....	107
Tabela 4.19 – Valores finais das variáveis a serem inseridas na equação.	109
Tabela 4.20 – Indicadores de Consumo da Envoltória por alternativa e <i>ranking</i>	109
Tabela 4.21 – <i>Rankings</i> finais obtidos por grupos de peso para o 1º pavimento.	114
Tabela 4.22 – <i>Rankings</i> finais obtidos por grupos de peso para o 7º pavimento.	114
Tabela 4.23 – <i>Rankings</i> finais obtidos por grupos de peso para o 13º pavimento.	114
Tabela 4.24 – Síntese dos <i>rankings</i> parciais obtidos nas análises monocritérios.....	115

LISTA DE GRÁFICOS

CAPÍTULO 3

- Gráfico 3.1** – Dados climáticos de um ano típico no Rio de Janeiro plotados em carta psicrométrica. Linha cinza: zona de conforto. Fonte: programa Analysis Bio (LABEEE, 2010).
.....36
- Gráfico 3.2** – Transmissão para várias espessuras de vidros incolores de janelas.
Fonte: KOLLER (1952) apud CARAM (1998).....53
- Gráfico 3.3** – Curva de transmissão espectral ideal para envidraçados que atuem como redutores de calor no edifício e sua comparação com o vidro incolor. Fonte: CARAM, 1998.
.....54

CAPÍTULO 4

- Gráfico 4.1** – Exemplo de apresentação dos resultados em gráfico de curvas isoUDI gerados pelo Surfer v.10, sobreposto em planta baixa.78
- Gráfico 4.2** – Exemplo de conversão do gráfico base isoUDI apresentado no Gráfico 4.1, indicando apenas a área ocupada pela faixa de UDI $\geq 50\%$ (em amarelo).80
- Gráfico 4.3** – Resultados Alternativa 1, 1º pavimento tipo.....82
- Gráfico 4.4** – Resultados Alternativa 1, 7º pavimento tipo.....82
- Gráfico 4.5** – Resultados Alternativa 1, 13º pavimento tipo.....82
- Gráfico 4.6** – Resultados Alternativa 2, 1º pavimento tipo.....84
- Gráfico 4.7** – Resultados Alternativa 2, 7º pavimento tipo.....84
- Gráfico 4.8** – Resultados Alternativa 2, 13º pavimento tipo.....84
- Gráfico 4.9** – Resultados Alternativa 3, 1º pavimento tipo.....86
- Gráfico 4.10** – Resultados Alternativa 3, 7º pavimento tipo.....86
- Gráfico 4.11** – Resultados Alternativa 3, 13º pavimento tipo.....86
- Gráfico 4.12** – Resultados Alternativa 4, 1º pavimento tipo.....88
- Gráfico 4.13** – Resultados Alternativa 4, 7º pavimento tipo.....88
- Gráfico 4.14** – Resultados Alternativa 4, 13º pavimento tipo.....88
- Gráfico 4.15** – Resultados Alternativa 5, 1º pavimento tipo.....90
- Gráfico 4.16** – Resultados Alternativa 5, 7º pavimento tipo.....90
- Gráfico 4.17** – Resultados Alternativa 5, 13º pavimento tipo.....90

Gráfico 4.18 – Resultados Alternativa 6, 1º pavimento tipo.....	92
Gráfico 4.19 – Resultados Alternativa 6, 7º pavimento tipo.....	92
Gráfico 4.20 – Resultados Alternativa 6, 13º pavimento tipo.....	92
Gráfico 4.21 – 1º pavimento: área do pavimento tipo abrangida por DA e UDI \geq 50%.	93
Gráfico 4.22 – 7º pavimento: área do pavimento tipo abrangida por DA e UDI \geq 50%.	94
Gráfico 4.23 – 13º pavimento: área do pavimento tipo abrangida por DA e UDI \geq 50%.	94

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A1	Alternativa 1
A2	Alternativa 2
A3	Alternativa 3
A4	Alternativa 4
A5	Alternativa 5
A6	Alternativa 6
Aenv	Área da envoltória
Apcob	Área de projeção da cobertura
Atot	Área total construída
AHS	Ângulo Horizontal de Sombreamento
AQUA	Alta Qualidade Ambiental
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
AVS	Ângulo Vertical de Sombreamento
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Method
CASBEE	Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency
CP1	Com Proteção tipo 1
CP2	Com Proteção tipo 2
CSV	Comma Separated Values
DA	Daylight Autonomy
DA_{con}	Continuous Daylight Autonomy
DA_{max}	Maximum Daylight Autonomy
DF	Daylight Factor
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
FA	Fator de Altura
FF	Fator de Forma
FS	Fator Solar

HQE	Haute Qualité Environnementale
ICenv	Índice de Consumo da Envoltória
LaBEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
NBR	Norma Brasileira
PAF	Percentual de Abertura na Fachada
PAFo	Percentual de Abertura na Fachada Oeste
PAFt	Percentual de Abertura na Fachada Total
PAZ	Percentual de Abertura Zenital
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
RTQ-C	Regulamento Técnico de Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviço e Públicos
RTQ-R	Regulamento Técnico de Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
SP	Sem Proteção
SWERA	Solar and Wind Energy Resource Assessment
UDI	Useful Daylight Illuminance
VA	Vidro A
VB	Vidro B
WWR	Window to Wall Ratio

INTRODUÇÃO

Problemática

As aberturas laterais ou janelas são elementos arquitetônicos presentes na envoltória das edificações. Elas têm uma influência significativa na determinação da qualidade energético-ambiental do espaço construído, pois regulam a captação da radiação solar – seja em forma de luz ou calor –, do vento, do ruído, dos odores e da poluição em geral, além de possibilitar a integração visual entre os ambientes interior e exterior.

O projeto das aberturas é uma tarefa bastante complexa, uma vez que ao se trabalhar com seus diversos parâmetros – dimensão, tipologia, posição na fachada, sombreamento, orientação, materiais de composição, etc. – deve-se buscar conciliar seus aspectos funcionais e formais, além de uma série de requisitos relacionados ao bem-estar dos usuários, ao consumo energético e ao ciclo de vida da edificação.

Analisando o estoque edificado existente no Brasil, verifica-se que as janelas dos edifícios foram muitas vezes concebidas priorizando-se exclusivamente o aspecto formal da edificação. Observa-se, sobretudo no conjunto de edifícios de escritórios, a repetição da mesma solução – grandes extensões de superfícies envidraçadas, operáveis ou não – seja para conferir ao edifício uma linguagem internacional, de modernidade, seja para possibilitar uma extensa visualização da paisagem, geralmente com o intuito de aumentar o valor de mercado do empreendimento. Negligenciando outros requisitos de projeto, muitos arquitetos concebem edifícios padronizados, inadequados às condicionantes climáticas brasileiras, confiando em sistemas artificiais para garantir o conforto ambiental dos usuários e a qualidade do ar dos espaços internos.

Como bem ressalta Lovell (2010), os anseios do mercado pela transparência visual dos edifícios através de fachadas totalmente envidraçadas entram em conflito direto com a responsabilidade dos arquitetos de se alinharem aos princípios de sustentabilidade, valorizados atualmente. De fato, no caso de um país tropical como o Brasil, a incompatibilidade desta solução arquitetônica com seu contexto climático tem resultado, dentre outras consequências, numa elevada demanda de energia elétrica por algumas edificações, no desconforto lumínico, acústico e por vezes térmico de seus usuários e na baixa qualidade do ar de alguns espaços. Além disso, sua adoção em larga escala em várias regiões do país tem contribuído para homogeneizar a paisagem urbana, destruindo aos poucos o sentido de lugar destas cidades.

Diante deste cenário, uma série de pesquisas desenvolvidas no Brasil nas últimas décadas evidencia a importância de resgatar estratégias bioclimáticas na produção arquitetônica

nacional, apontando as aberturas como um dos principais elementos a serem trabalhados para possibilitar a adequação do edifício ao meio onde está inserido.

Motta (2007) desenvolve um estudo sobre o desempenho de diferentes vidros adotados em aberturas quanto ao consumo energético das edificações, avaliando sua adequação às condicionantes climáticas de Belo Horizonte e São Paulo. Santos (2007) e Fiuza (2008) fazem uma análise comparativa de variadas soluções de sombreamento das janelas no aproveitamento da iluminação natural no ambiente construído. Oiticica e Bertoli (2008) estudam o comportamento acústico de algumas soluções de peitoril ventilado para edificações de clima quente e úmido. Marcondes (2010) testa diversas soluções de aberturas avaliando-as quanto à eficiência no aproveitamento da ventilação natural em edifícios de escritório de São Paulo.

Conforme se observa, estas e outras pesquisas fazem análises comparativas de soluções de projetos para as aberturas com o objetivo de indicar aquelas com melhores desempenhos energético-ambientais para um dado contexto climático. Verifica-se que, em muitos casos, estes estudos são desenvolvidos enfocando um único critério de projeto, como o conforto acústico, a eficiência energética, o aproveitamento da ventilação ou da iluminação natural. Raras são as pesquisas que avaliam a eficiência das aberturas – ou mesmo de outros elementos arquitetônicos – com uma visão mais global, isto é, considerando múltiplos critérios em suas avaliações de desempenho. Como resultado, tem-se uma série de referenciais esquemáticos de soluções projetuais com comprovada eficiência face a um determinado critério, porém possivelmente inadequadas a outros.

Lovell (2010) ressalta a importância de se desenvolver o projeto da envoltória dos edifícios através de uma abordagem holística, que considere simultaneamente os múltiplos aspectos do projeto que podem ser afetados numa tomada de decisão. A autora evidencia que elementos como o vento, o calor, a luz e a energia invariavelmente coexistem e não podem ser considerados de forma fragmentada.

Verifica-se que o processo de projeto é nitidamente mais complexo que o cenário trabalhado nas citadas pesquisas, pois lida não apenas com uma, mas com uma série de solicitações, definidas pelos atores envolvidos direta ou indiretamente no empreendimento. Ainda que o arquiteto possa estabelecer uma hierarquia de prioridades entre estas múltiplas solicitações, não se recomenda que ele tome uma decisão baseada em apenas uma delas.

Observa-se que, na prática profissional de projeto, os arquitetos tomam decisões apoiados principalmente em sua intuição, a qual é construída a partir de suas experiências anteriores, bem como da experiência de outros projetistas. Tendo em vista que cada projeto apresenta suas especificidades, as quais o somatório de experiências passadas nem sempre

consegue englobar, o desempenho dos edifícios muitas vezes é comprometido pela falta de uma análise mais aprofundada do comportamento das soluções face a um dado contexto.

Pesquisas desenvolvidas nas últimas décadas evidenciam que é preciso superar o modelo atual de concepção arquitetônica se desejar-se compatibilizar de forma eficiente as diversas solicitações de projeto. Isto se torna mais evidente se considerarmos que novos critérios de projeto – muitos deles de pouco ou nenhum domínio dos projetistas – têm sido somados ao processo de concepção arquitetônica para adequarmos as novas edificações ao conhecido tripé ambiental, social e econômico do desenvolvimento sustentável.

Alguns autores acreditam que esta mudança pode ser posta em prática pela adoção de métodos e ferramentas que auxiliem o arquiteto a conciliar os múltiplos critérios projetuais. Dentre os métodos de auxílio à tomada de decisão, tem-se destacado nas últimas décadas a Abordagem Multicritério. Já aplicada em outros campos do conhecimento, como a economia, a administração e a engenharia, esta abordagem tem sido adotada recentemente na arquitetura, sobretudo em pesquisas acadêmicas internacionais, para auxiliar o projetista na tomada de decisão.

De um modo geral, ela consiste na comparação de distintas soluções propostas para um problema considerando simultaneamente seus comportamentos face a múltiplos critérios. Com o auxílio de um método de abordagem multicritério, é possível identificar, dentro de um grupo de soluções, aquela que melhor concilia todos os critérios considerados, e, portanto, é a mais indicada para solucionar um dado problema.

Este problema, no projeto de arquitetura, está relacionado à definição dos diversos elementos que compõem o objeto arquitetônico – com as aberturas laterais e zenitais, a cobertura, a estrutura, dentre outros –, definição esta que envolve a compatibilização de uma série de solicitações projetuais.

Uma das principais contribuições que esta abordagem pode trazer para o processo de concepção arquitetônica é a de garantir uma análise comparativa mais consistente e precisa das alternativas de projeto. Isto porque, através dela, são efetivamente levados em conta os impactos positivos ou negativos que cada das alternativas pode gerar para o desempenho global da edificação, informações estas que muitas vezes uma simples análise baseada na intuição não consegue acumular e confrontar. A abordagem multicritério pode permitir, portanto, que o arquiteto faça sua decisão de forma mais consciente, contribuindo para a melhoria da qualidade dos projetos de arquitetura.

O objeto de estudo

Como visto, a construção da temática deste trabalho foi impulsionada por duas principais questões de interesse: a verificação sobre o papel decisivo das aberturas laterais no desempenho energético-ambiental das edificações e a necessidade de projetá-las com base em uma abordagem integrada, que auxilie o projetista a conciliar as múltiplas solicitações inerentes ao projeto de arquitetura.

Dada a quantidade de pesquisas já desenvolvidas tendo como enfoque as aberturas laterais, entendeu-se que a grande contribuição deste trabalho estaria na forma como estes elementos arquitetônicos seriam abordados.

Assim, optou-se por definir como objeto de estudos desta dissertação a Abordagem Multicritério. Ainda que não sejam o objeto central deste trabalho, as aberturas laterais serão constantemente evidenciadas, pois servirão de base para aplicação da abordagem multicritério na concepção arquitetônica, servindo de exemplo como um dos diversos elementos arquitetônicos que devem ser concebidos através de uma visão integrada.

Objetivos da pesquisa

O objetivo principal deste trabalho consiste em aplicar um dos métodos da abordagem multicritério na concepção de aberturas laterais de um edifício de escritórios no Rio de Janeiro, com o intuito de ressaltar as dificuldades enfrentadas e os potenciais detectados na incorporação desta abordagem ao projeto de arquitetura.

Como objetivos específicos, propõe-se:

- Desenvolver nos projetistas uma sensibilidade para identificar como os parâmetros das aberturas influenciam na qualidade energético-ambiental das edificações;
- Detectar os conflitos existentes entre os critérios de projeto considerados: “nível de iluminação natural no plano de trabalho”, “visualização para o exterior” e “eficiência energética”;
- Identificar, dentre as alternativas de projeto comparadas, aquela que melhor concilia os critérios projetuais pré-estabelecidos;
- Refletir sobre a viabilidade de incorporação da abordagem multicritério à prática profissional de projeto.

Conforme se observa, este trabalho se propõe sobretudo a fazer um relato minucioso do processo de aplicação da abordagem multicritério, ressaltando a complexidade em incorporá-la à concepção arquitetônica.

A identificação da solução de abertura que melhor concilia os critérios projetuais é uma consequência deste processo e, dada sua importância, merece ser destacada. Assim, conforme ressaltado, muito embora as aberturas laterais não sejam o objeto de estudos deste trabalho, em decorrência da aplicação da abordagem multicritério na concepção destes elementos, conclusões sobre a sua influência na qualidade energético-ambiental da edificação serão destacadas e poderão trazer importantes contribuições para o estudo das aberturas laterais.

É importante ressaltar que este trabalho faz um pequeno recorte dentre os diversos parâmetros e critérios que podem ser considerados no projeto de arquitetura. Ainda que haja um esforço em transpor para a pesquisa acadêmica a dimensão da complexidade enfrentada no fazer arquitetônico, entende-se a necessidade de fazer este recorte para que seja possível, dentro do tempo destinado a esta pesquisa, percorrer todas as etapas que compõem a abordagem multicritério.

Justificativa

Através desta pesquisa, busca-se evidenciar o potencial que a abordagem multicritério apresenta para simplificar a tomada de decisão. Almeja-se avançar em relação às pesquisas supracitadas, superando a abordagem monocriterial comumente adotada por uma multicriterial, que se aproxima da realidade enfrentada pelos projetistas.

O trabalho também poderá trazer importantes contribuições para a reflexão sobre a viabilidade de incorporar a abordagem multicritério na prática profissional de projeto. Verifica-se em diversas pesquisas que a adoção desta abordagem, em geral, demanda um tempo significativo, principalmente para a avaliação isolada das alternativas de projeto face a cada critério. Questiona-se como este tempo pode ser reduzido.

Observa-se também que boa parte dos estudos sobre esta abordagem está concentrada na aplicação de seus métodos no processo de projeto, entretanto, há uma carência na discussão sobre as dificuldades enfrentadas em cada etapa, que porventura venham a tornar sua incorporação à prática profissional bastante complexa ou mesmo inviável.

Também se verifica uma lacuna na discussão sobre como os aspectos subjetivos – inerentes à concepção arquitetônica – são tratados ao longo do processo de aplicação da abordagem e como eles se relacionam aos critérios objetivos considerados.

Assim, ao se fazer uma aplicação desta abordagem no processo de projeto, espera-se preencher algumas destas lacunas, analisando suas contribuições para a evolução do fazer arquitetônico.

Como consequência da aplicação da abordagem multicritério no processo de projeto, esta pesquisa também pode trazer importantes contribuições ao auxiliar os projetistas na concepção de aberturas laterais das edificações de clima quente e úmido, sobretudo na identificação dos parâmetros e critérios relacionados a ela que influenciam diretamente no desempenho energético-ambiental das edificações.

Entende-se a importância em ressaltar a complexidade existente não só na definição do desenho da abertura, mas no projeto de arquitetura como um todo, dada a dificuldade em compatibilizar os múltiplos critérios envolvidos na tomada de decisão.

Metodologia

A metodologia adotada nesta pesquisa é composta por três fases.

A primeira fase consiste em fazer uma revisão bibliográfica sobre o tema abordagem multicritério. Inicialmente, pretende-se pesquisar sobre o desafio de conciliar múltiplos critérios no processo de projeto, buscando compreender a problemática em questão e ressaltar a relevância do tema trabalhado.

Em seguida, como forma de apresentar um caminho para superar este desafio, propõe-se estudar a abordagem multicritério, evidenciando seus fundamentos, seus principais elementos, as etapas básicas de sua aplicação e um de seus métodos mais aplicados. Por fim, são estudados alguns exemplos de incorporação de métodos de análise multicritério ao projeto de arquitetura para identificação de suas possibilidades de aplicação.

Na segunda fase da metodologia, é dado início a uma aplicação da abordagem multicritério em um processo de projeto. Como objeto da aplicação, é concebido um projeto de um edifício de escritórios a ser implantado em um terreno disponível no bairro Flamengo, na cidade do Rio de Janeiro. A escolha de um lote real para implantação da edificação é de fundamental importância por possibilitar a inclusão de uma série de restrições no processo de projeto, tais como o contexto climático do lugar, a lei de uso e ocupação do solo aplicável ao lote, suas dimensões, os impactos gerados ao terreno pelos edifícios vizinhos, dentre outros.

Uma vez determinado o objeto de análise, são definidos os outros elementos da abordagem multicritério – os parâmetros, os critérios e as restrições – que comporão a aplicação proposta para este trabalho, destacando os principais conceitos a eles relacionados.

Os parâmetros são os elementos arquitetônicos variados para composição das alternativas de projeto a serem comparadas entre si, e nesta pesquisa, correspondem aos aspectos

relativos às aberturas laterais da edificação, tais como dimensão, sombreamento e material de composição das janelas.

Os critérios são normas de confronto que servem de base para comparação das alternativas, e neste trabalho, dizem respeito a aspectos diretamente relacionados ao conforto visual dos usuários – limitando-se nesta pesquisa às condições de “nível de iluminação natural no plano de trabalho” e “visualização para o exterior” – e a “eficiência energética” da edificação.

As restrições, por sua vez, correspondem às exigências ou recomendações feitas por regulamentos e normas técnicas, que estão diretamente relacionados aos critérios escolhidos, e que fornecerão dados de referência para auxiliar na composição das alternativas.

Tendo definido todos os elementos, é dado início a aplicação da abordagem multicritério propriamente dita.

Na primeira de suas etapas, são concebidas alternativas de projeto para as aberturas laterais dos edifícios.

Na segunda etapa, são definidos os pesos dos critérios, isto é, a importância que eles terão na escolha final da solução de projeto.

Na terceira etapa, são feitas análises dos desempenhos das alternativas considerando um critério por vez. Estas serão realizadas por meio de diversos métodos e ferramentas. A simulação computacional através do programa *Daysim* 3.1 (REINHART, 2010a) é utilizada para avaliar o aproveitamento da luz natural no espaço. O método medição de ângulos de visão é aplicado para avaliar o nível de visualização para o exterior pelas alternativas. A aplicação do método prescritivo do RTQ-C (BRASIL, 2010a) é considerado para avaliar a eficiência energética das soluções.

Na quarta etapa, é aplicado o método ELECTRE III (ROY, 1977) a partir do código computacional CELECTRE (CASTRO, 2005), onde são inseridos os resultados obtidos na etapa anterior. De posse destes dados, o programa CELECTRE faz um ordenamento das alternativas (*ranking*), que indica, dentre as soluções de aberturas consideradas, aquela que melhor concilia os critérios estudados.

A terceira e última fase da pesquisa compreende as considerações finais do trabalho. Neste momento são reunidas as principais conclusões sobre o desempenho das alternativas de aberturas estudadas. Além disso, são ressaltados os desafios enfrentados ao longo do processo, o que dá subsídios para a reflexão sobre a viabilidade de incorporação da análise multicritério no processo de projeto.

Dada a complexidade de lidar com questões tão amplas como a abordagem multicritério, o processo de projeto de arquitetura, os instrumentos e métodos de análise de desempenho e o desenho da janela, entende-se que este é um trabalho de descobertas, que vai sendo construído na medida em que se avança em cada etapa. Só se é possível ter uma visão do todo ao final do seu desenvolvimento e, mesmo chegando ao fim, ainda surgem importantes questionamentos sem respostas. Por isto, é válido ressaltar que ele possui limitações e não consegue abranger todos as nuances contidas na prática profissional de projeto. Ainda assim, acredita-se que seus resultados contribuirão para fomentar a discussão sobre a necessidade de evolução do processo projetual.

Estrutura da dissertação

Este trabalho foi estruturado em duas partes.

A primeira delas compreende o embasamento teórico adotado sobre a problemática tratada pela pesquisa – o desafio de conciliar múltiplos critérios no processo de projeto – e sobre os fundamentos da análise multicritério, assuntos estes que são tratados, respectivamente, nos Capítulos 1 e 2.

A segunda parte da pesquisa – composta pelos Capítulos 3 e 4 – compreende uma aplicação da abordagem multicritério no processo de projeto de um edifício de escritório do Rio de Janeiro. No Capítulo 3, são detalhadas as características do objeto de estudos – o edifício proposto – e os elementos da aplicação, isto é, os parâmetros, critérios e restrições específicos desta aplicação. No Capítulo 4, é descrito todo o processo de implementação das 4 etapas da abordagem multicritério, apresentando e discutindo seus resultados.

Optou-se por definir os elementos da análise antes de dar início à sequência de etapas da abordagem, pois se acredita ser importante à compreensão apresentar alguns conceitos relacionados aos elementos específicos desta análise antes de partir para a aplicação do método. Espera-se que as informações captadas neste primeiro momento possam servir de subsídio para todo o processo decisório a ser enfrentado em seguida.

Por fim, são expostas as considerações finais do trabalho, onde é feita uma conclusão sobre os principais resultados alcançados com a pesquisa, além de ressaltadas as dificuldades enfrentadas em cada uma das etapas da abordagem. São ainda feitas recomendações para pesquisas futuras.

PARTE I

EMBASAMENTO TEÓRICO

CAPÍTULO 01 – O DESAFIO DE CONCILIAR MÚLTIPLOS CRITÉRIOS NO PROCESSO DE PROJETO

O projeto de arquitetura consiste em um processo pelo qual um objeto arquitetônico é concebido. Ele busca solucionar um problema arquitetônico considerando os quatro imperativos de projeto que o definem: as necessidades programáticas, a herança cultural, as características climáticas e do sítio e os recursos materiais disponíveis (MAHFUZ, 1995).

De um modo geral, o processo projetual constitui um procedimento que vai das partes – os elementos arquitetônicos – para o todo – o objeto arquitetônico (MAHFUZ, 1995). Na composição de suas partes, são analisadas as diversas soluções projetuais que possam neutralizar o problema arquitetônico, satisfazendo seus imperativos e formando um todo harmônico. Ao decidir-se por uma entre duas ou mais alternativas para compor suas partes, o arquiteto está fazendo uma avaliação e, para fazê-la, emprega critérios de projeção.

Crítérios são normas de confronto que servem de base para comparação, julgamento ou apreciação de um objeto ou ideia. Eles refletem um objetivo ou alvo a ser alcançado quando se toma uma decisão.

Os critérios de projeção traduzem a concepção do projetista perante o problema a ser solucionado. Eles derivam de seu repertório conceitual, de sua bagagem científico-tecnológica, de suas posturas de natureza filosófica, ideológica ou doutrinária, e de suas inclinações e preferências no plano das possibilidades estéticas da arquitetura (SILVA, 1984). Os critérios, além de serem um reflexo das características pessoais do arquiteto, também englobam as exigências dos demais atores envolvidos no processo, como clientes, construtores, população diretamente afetada, etc.

Em geral, são muitos os critérios a serem considerados e atendidos simultaneamente em um projeto de arquitetura. Eles podem ter um caráter objetivo ou subjetivo, podendo envolver questões estéticas/formais, funcionais, estruturais, ambientais, econômicas, sócio-culturais, dentre outras. Eles são definidos quando iniciado o projeto ou ao longo do processo, tendo o projetista consciência ou não desta escolha.

Durante o processo de concepção, o projetista analisa uma série de formas arquitetônicas¹ possíveis, selecionando aquelas que satisfaçam aos imperativos do projeto (Figura 1.1).

¹ O termo forma arquitetônica empregado refere-se à natureza material e perceptível da solução arquitetônica, o que envolve as categorias funcionais/instrumentais, construtivas, estruturais e estéticas (SILVA, 1984).

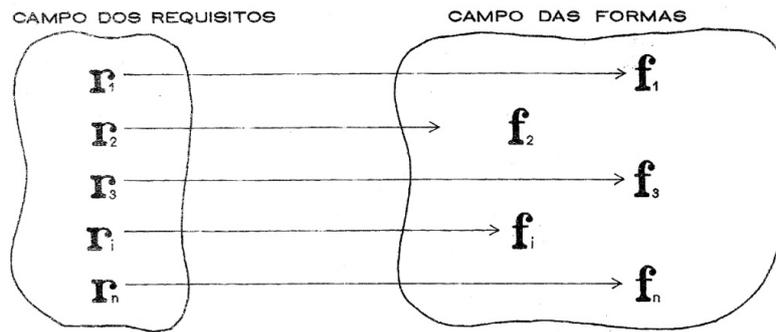


Figura 1.1 – Situação ideal: proposição de uma solução de projeto para cada requisito. Inexistência de conflitos. Fonte: SILVA, 1984.

Segundo Silva (1984), no momento da tomada de decisão, o arquiteto pode se deparar com cinco tipos de situações ou configurações de projeto:

01. Dois ou mais requisitos podem ser satisfeitos por uma única forma arquitetônica, o que é desejável. Exemplo: uma determinada implantação do edifício pode ser considerada adequada tanto pelo critério de acessibilidade como pelo de aproveitamento da iluminação natural.

02. Um mesmo requisito pode ser satisfeito por mais de uma forma arquitetônica, situação que também facilita a tomada de decisão. Exemplo: duas soluções distintas para a cobertura de um edifício satisfazem o critério de reaproveitamento da água da chuva.

03. Um ou mais requisitos podem não encontrar correspondência com formas arquitetônicas, o que os torna inviáveis. Exemplo: o critério de baixo custo do empreendimento pode não ser satisfeito em situações adversas, como quando a atividade exercida em um edifício exige uma solução arrojada e dispendiosa para seu sistema estrutural.

04. O atendimento de um requisito poderá implicar na insatisfação de outro, devido a uma contradição existente entre eles. Exemplo: a decisão de adotar esquadrias fixas, mantendo-as sempre fechadas, pode satisfazer o critério de conforto acústico, mas prejudicar o de aproveitamento da ventilação natural.

05. Duas formas arquitetônicas, isoladamente viáveis a seus requisitos específicos, poderão não ser compatíveis entre si, impedindo sua combinação para formar um todo harmônico. Exemplo: a proposição de um sistema de aquecimento solar para um edifício residencial multifamiliar (forma arquitetônica 1), no qual se pretende destinar grande parte da área da laje de cobertura para o usufruto do proprietário do

apartamento do último pavimento (forma arquitetônica 2), pode ser inviabilizada pela falta de espaço para disposição das placas solares.

Conforme se observa na prática, as três últimas situações são bastante recorrentes na tarefa de concepção, e são elas que exigem a criatividade do projetista e tornam complexa a tomada de decisão.

Em muitos casos, para resolver problemas de incompatibilidade entre dois ou mais critérios ou alternativas de projeto, o arquiteto se depara com a necessidade de fazer uma hierarquização de prioridades. Neste caso, ele deve avaliar, para as circunstâncias específicas do projeto, quais critérios devem ser priorizados e quais devem ser eventualmente sacrificados. Como bem sintetiza Moya (1947 apud SILVA, 1984), “a arquitetura é uma classificação de sacrifícios”.

A competência profissional do arquiteto consiste, portanto, em buscar neutralizar os conflitos entre os critérios para alcançar a coerência formal do todo, ainda que isto represente um eventual decréscimo no grau de satisfação de requisitos envolvidos. Para tanto, o projetista deve, inicialmente, definir conjuntos de soluções que satisfaçam individualmente a cada um dos requisitos (critérios) estabelecidos (Figura 1.2) para, posteriormente, selecionar aquelas alternativas que, combinadas, representem uma solução completa e eficiente do problema (Figura 1.3), resultando em uma forma unitária, integrada e coerente (SILVA, 1984).

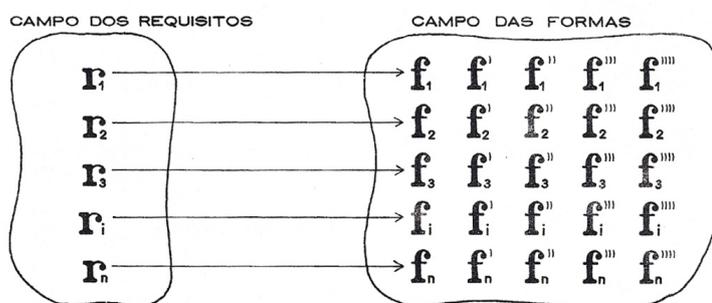


Figura 1.2 – Primeira etapa: identificação de soluções que satisfaçam cada um dos requisitos do projeto. Fonte: SILVA, 1984.

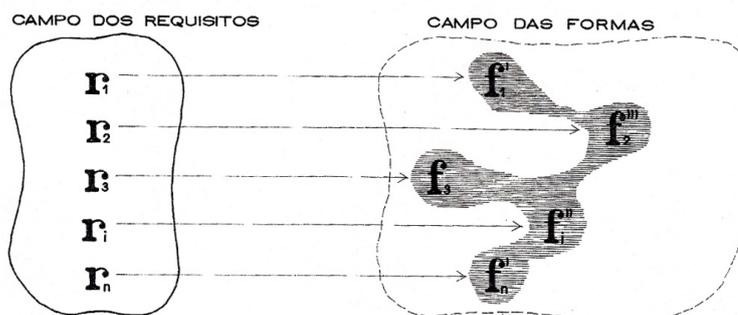


Figura 1.3 – Segunda etapa: escolha de uma solução que satisfaça cada critério que, combinada às demais soluções, forme uma alternativa de projeto coerente. Fonte: SILVA, 1984.

Encontrar esta solução harmônica não é uma tarefa muito simples, principalmente quando há um número significativo de critérios envolvidos no processo. Isto ocorre porque quanto maior o número de critérios, maior o número de conflitos a serem neutralizados, e mais complexa a tarefa de encontrar uma solução que responda satisfatoriamente a todos eles.

1.1. A introdução dos critérios de sustentabilidade no projeto de arquitetura

Nos últimos anos, o número de critérios envolvidos no processo de projeto tem aumentado consideravelmente, devido, principalmente, a crescente preocupação em mitigar os impactos ambientais gerados pela atividade da construção civil. Às clássicas questões formais, técnicas e funcionais foram agregados novos critérios de projeto relacionados aos princípios de sustentabilidade, como a gestão racional dos recursos naturais, o emprego de materiais menos impactantes, a redução dos impactos ao entorno, o respeito ao contexto econômico e sócio-cultural do lugar, dentre outros. Isso sem citar a preocupação com o conforto ambiental e qualidade do ar da edificação, que, negligenciada por muitos arquitetos no Brasil e no mundo nas últimas décadas, vem sendo paulatinamente resgatada em novos projetos.

Diante da complexidade de tratar simultaneamente tantos aspectos no projeto de arquitetura, tem sido observado, tanto no meio acadêmico como profissional, a proliferação de métodos e ferramentas orientados para auxiliar os projetistas a incorporar os princípios de sustentabilidade na concepção arquitetônica.

Alguns destes métodos são destinados a avaliar e certificar os edifícios quanto a sua qualidade energético-ambiental. Eles apresentam listagens com atribuição de pontos para aspectos relevantes a serem considerados na atividade de projeção. Dentre eles, destacam-se o norte-americano LEED, o inglês BREEAM, o japonês CASBEE, o francês HQE e o correspondente brasileiro AQUA.

Além de listarem os critérios ambientais, o BREEAM, o HQE e o AQUA auxiliam ainda o projetista a estabelecer, nas primeiras etapas de concepção, uma hierarquia de prioridades entre os critérios ambientais, com o intuito de orientar as decisões para a resolução das questões mais críticas identificadas na definição do perfil de cada empreendimento. Com isto, possibilita-se uma maior adequação do edifício ao meio onde está inserido, além de tornar menos complexa a tomada de decisão.

Há ainda o método francês ADDENDA, desenvolvido por um escritório de consultoria HQE dirigido pelos arquitetos Pierre Fernandez e Alain Castells, que relaciona os alvos ambientais do referencial francês a parâmetros de concepção arquitetônica, facilitando a

compreensão pelos projetistas de como é possível satisfazer individualmente cada um dos critérios ambientais listados através de soluções projetuais (ZAMBRANO, 2008).

Como bem ressalta Zambrano (2008), alguns dos citados métodos de certificação – como o LEED e o BREEAM – trabalham com os requisitos ambientais individualmente, o que não permite identificar a complexidade maior que está por trás das relações de interdependência existentes entre eles.

Alguns métodos avançam neste aspecto, indicando as interações existentes entre os critérios ambientais. Este é o caso do AQUA e do HQE, que indicam para cada categoria ou alvo ambiental² quais outros podem ser afetados na tomada de decisão. A indicação destas interdependências pode ajudar na escolha para a hierarquização dos critérios ou na busca entre categorias nas escolhas feitas no momento de concepção (FCAV, 2007; CSTB, 2008).

Para o AQUA e o HQE, independente do respeito aos critérios ambientais especificados, o empreendedor e seus parceiros devem assegurar a coerência e a qualidade globais do empreendimento, por meio de um processo interativo e integrado. O elemento principal que condiciona esta coerência global é a análise das interações entre os critérios, e as escolhas que deles derivam (FCAV, 2007; CSTB, 2008).

A Figura 1.4 indica as interações possíveis entre os critérios (categorias) trabalhadas no AQUA e no HQE. Nesta figura, verifica-se que há categorias bastante transversais, como a Categoria 1, 2, 4 e 7, que apresentam uma relação de interdependência com muitas outras, conforme destacam as linhas verde, laranja, vermelho e azul. Além disso, conforme ressalta a linha amarela, a figura mostra a necessidade tratar de forma global as categorias de conforto ambiental (8, 9, 10, 11 e 12) e a de qualidade do ar (13), atentando-se para suas interações.

² Categoria e alvo ambiental são os termos utilizados respectivamente pelo Processo AQUA e pelo Referencial HQE para se referir a um conjunto de preocupações ou critérios a serem satisfeitos pelo projeto que visa à alta qualidade ambiental da edificação.

	Cate- goria 1	Cate- goria 2	Cate- goria 3	Cate- goria 4	Cate- goria 5	Cate- goria 6	Cate- goria 7	Cate- goria 8	Cate- goria 9	Cate- goria 10	Cate- goria 11	Cate- goria 12	Cate- goria 13	Cate- goria 14
Categoria 1 - Relação do edifício com o seu entorno														
Categoria 2 - Escolhas de produtos, sistemas e processos														
Categoria 3 - Canteiro de obras com baixo impacto ambiental														
Categoria 4 - Gestão da energia														
Categoria 5 - Gestão da água														
Categoria 6 - Gestão dos resíduos de uso e operação do edifício														
Categoria 7 - Manutenção – Permanência do desempenho ambiental														
Categoria 8 - Conforto higrotérmico														
Categoria 9 - Conforto acústico														
Categoria 10 - Conforto visual														
Categoria 11 - Conforto olfativo														
Categoria 12 - Qualidade sanitária dos ambientes														
Categoria 13 - Qualidade sanitária do ar														
Categoria 14 - Qualidade sanitária da água														

Figura 1.4 – Matriz de interações entre as categorias do Processo AQUA.
 Fonte: FCAV, 2007.

Para melhor compreensão de como se dão estas interações, vejamos um exemplo de um recorte de um processo decisório hipotético em que se comparam duas alternativas de projeto para o parâmetro abertura – quanto à dimensão, tipologia, sombreamento e materiais das aberturas – propostas para um edifício qualquer. Na Tabela 1.1, é apresentada uma avaliação destas alternativas do ponto de vista das 14 categorias consideradas pelo processo AQUA.

Na Tabela 1.1, estão apresentados os alvos relacionados com o parâmetro abertura, como também as inter-relações estabelecidas. Em vermelho, estão destacados os potenciais de dano de cada solução relacionados ao desempenho do edifício, enquanto que em verde estão indicados os potenciais de benefício.

Tabela 1.1 – Matriz de exemplificação das inter-relações entre as categorias do AQUA.
 Fonte: adaptado de FONTENELLE; BASTOS, 2011.

	N°	CATEGORIAS ³	ALTERNATIVAS DE PROJETO PARA O PARAMETRO ABERTURA	
			ALTERNATIVA 01:	ALTERNATIVA 02:
			DIMENSÃO: fachada 100% envidraçada MATERIAL: esquadria de alumínio e vidro reflexivo simples SOMBREAMENTO: brises móveis em alumínio TIPOLOGIA: esquadrias sem possibilidade de abertura	DIMENSÃO: fachada 50% envidraçada MATERIAL: esquadria de madeira (selo FSC) e vidro comum duplo SOMBREAMENTO: sem sombreamento TIPOLOGIA: esquadrias passíveis de serem abertas
ECO-CONSTRUÇÃO	01	Relação do edifício com seu entorno	Reflexão pelo vidro pode gerar desconforto às edificações vizinhas em algumas horas do dia.	–
	02	Escolha integrada de produtos, sistemas e processos construtivos	Alumínio: material altamente reciclável, durável e de baixa corrosão. Vidro: material reciclável e durável.	Madeira: baixo consumo energético em sua produção, reciclável, baixo impacto ao meio ambiente quando descartada. Vidro: material reciclável e durável.
			A impossibilidade de abrir a janela dificulta a manutenção dos brises e vidros, notadamente em edifícios altos.	Esquadria exige limpeza periódica, o que é possível devido à operabilidade da mesma.
			Alumínio e vidro: materiais cuja produção apresenta um consumo energético considerável.	Caixilhos de madeira exigem uma manutenção maior que o alumínio e podem ter uma durabilidade menor quando em contato com as intempéries.
03	Canteiro de obra com baixo impacto ambiental	Esquadrias e brises podem vir prontos para montagem, gerando poucos resíduos no canteiro.	Esquadrias já vêm prontas para montagem, gerando poucos resíduos no canteiro.	
ECO-GESTÃO	04	Gestão de energia	Sombreamento satisfatório das aberturas pode reduzir o consumo energético da edificação pela redução das cargas térmicas e aproveitamento da luz natural.	Ausência de sombreamento somada ao emprego de vidros comuns pode incrementar o consumo energético da edificação, dependendo da orientação das fachadas e sombreamento gerado pelos edifícios vizinhos.
			Impossibilidade de abertura da esquadria inviabiliza o resfriamento passivo do edifício, o que garantiria a redução do consumo de energia com o ar condicionado.	Abertura da esquadria possibilita o resfriamento noturno do edifício, o que garante a redução do consumo de energia com o ar condicionado.
	05	Gestão da água	–	–
	06	Gestão de resíduos de uso e operação do edifício	–	–

³ Retirados do referencial técnico de certificação do processo AQUA. Disponível em: < <http://www.processoaqua.com.br/pdf/RT-Escritorios%20e%20Edif%C3%ADcios%20escolares-V0-outubro2007.pdf>>. Acesso em: 30/11/11.

	07	Manutenção – permanência do desempenho ambiental	Necessidade de limpeza e manutenção periódica de vidros e brises, prejudicadas pela inoperabilidade da esquadria.	Esquadria exige limpeza periódica, o que possível devido à operabilidade da mesma.
CONFORTO	08	Conforto higrotérmico	Sombreamento das aberturas e refletividade do vidro reduzem as cargas térmicas no interior da edificação.	Ausência de sombreamento somada ao emprego de vidros comuns pode gerar um aumento das cargas térmicas no interior da edificação, dependendo da orientação das fachadas e sombreamento gerado pelos edifícios vizinhos.
	09	Conforto acústico	Vidro simples pode não ser suficiente para garantir um nível de ruído de fundo adequado.	Vidro duplo faz um isolamento mais satisfatório contra ruídos externos, se necessário.
	10	Conforto visual	Relação visual com o entorno é reduzida pelos brises.	Relação visual com o entorno é garantida pela ausência de obstruções, como brises.
			Sombreamento da abertura pode permitir o aproveitamento da luz natural no interior da edificação.	Ausência de sombreamento nas aberturas pode gerar ofuscamento no interior da edificação, dependendo da orientação das fachadas e sombreamento gerado pelos edifícios vizinhos.
	11	Conforto olfativo	–	–
SAÚDE	12	Qualidade sanitária dos ambientes	Impossibilidade de abrir as janelas compromete qualidade do ar na edificação.	A abertura da janela possibilita a renovação do ar na edificação.
	13	Qualidade sanitária do ar	Impossibilidade de abrir as janelas compromete qualidade do ar na edificação.	A abertura das janela possibilita renovação do ar na edificação.
	14	Qualidade sanitária da água	–	–

Observa-se na tabela acima que uma mesma alternativa de projeto pode desencadear simultaneamente prejuízos e benefícios para o desempenho global da edificação. Em alguns casos, identificam-se impactos ambientais positivos e negativos sob a perspectiva de um mesmo alvo, como acontece, por exemplo, nas categorias 2 (escolha integrada de produtos, sistemas e processos construtivos) e 10 (conforto visual).

Para a construção e análise da matriz, requer-se do arquiteto noções básicas sobre uma série de assuntos que até então eram considerados fora de sua alçada, como, por exemplo, aqueles referentes à categoria 2, relacionado ao consumo de energia decorrente da fabricação de um dado meio material ou produto da construção civil e à estimativa a sua durabilidade.

Diante da complexidade exposta, surge um questionamento: como escolher com precisão entre as duas alternativas analisadas aquela que proporciona um maior desempenho para a edificação, tendo fixado as demais variáveis de projeto? Certamente, a tomada de decisão

não deve ser feita exclusivamente identificando aquela que apresentou o menor número de influências negativas ao desempenho ambiental do edifício. Afinal, a matriz de inter-relações apresentada aponta apenas o que influencia, não indicando o seu grau de importância. Desta forma, observa-se ser fundamental mensurar esses impactos para facilitar a comparação do desempenho das soluções, seja por meio de simulações computacionais ou outros métodos que possibilitem uma quantificação.

Nota-se também a importância da definição de uma hierarquia de prioridades entre os critérios, uma vez que a satisfação de todos eles se torna praticamente inviável devido às relações de interdependência existentes.

É importante lembrar que apenas um parâmetro – o parâmetro abertura lateral – e um grupo de critérios – os critérios ambientais – foram considerados nesta exemplificação. A tomada de decisão, como dito, é uma tarefa ainda mais complexa, pois são vários os parâmetros e critérios das mais distintas naturezas considerados no projeto de arquitetura.

Com isto, conclui-se que, diante da complexidade que vem ganhando a tomada de decisão no processo projetual, sobretudo com a incorporação de diversos critérios energético-ambientais, o projetista não deve se apoiar exclusivamente na intuição para escolher uma solução de projeto satisfatória. Conforme já exposto, a intuição pode ser falha e imprecisa, sobretudo quando não apoiada em experiência passadas e/ou estudos referenciais.

É evidente, portanto, a necessidade de superar o modelo tradicional de concepção arquitetônica, para que o profissional possa responder satisfatoriamente às inúmeras exigências ambientais que vêm surgindo nas últimas décadas.

Uma vez compreendida esta problemática, serão apresentados, no capítulo a seguir, os fundamentos da análise multicritério, destacando a importância da adoção de seus métodos de auxílio à tomada de decisão como um dos caminhos para evolução do processo de concepção arquitetônica atual.

CAPÍTULO 02 – A ABORDAGEM MULTICRITÉRIO

Abordagem ou análise multicritério são termos utilizados para designar uma análise comparativa de alternativas para a solução de um problema, as quais são avaliadas simultaneamente por múltiplos critérios. É uma abordagem que considera diversos pontos de vista para a tomada de decisão, com o objetivo de se refletir sobre as possíveis consequências globais geradas quando cada uma destas alternativas é adotada para solucionar um problema.

A abordagem multicritério tem sua origem na crítica à otimização (SCHARLIG, 1985). Enquanto que a otimização busca uma solução que represente o grau máximo de satisfação considerando apenas um único critério, a abordagem multicritério, tal como o nome ressalta, almeja encontrar uma solução que melhor concilie múltiplos critérios de decisão.

Scharlig (1985) ressalta que toda a realidade humana é composta por múltiplos pontos de vista, que se relacionam a distintos sistemas de valores. Estas diversas formas de enxergar a realidade se traduzem em critérios durante um processo decisório.

Quando estes diversos critérios de decisão são considerados no julgamento de possíveis soluções para um problema, é comum que cada um deles aponte uma alternativa diferente como ótima, impossibilitando-se identificar aquela que os compatibilizem de forma satisfatória. Dificilmente a solução apresentada por um dado critério estará em completa consonância com aquela de outro critério, pois, em geral, haverá discordâncias ou conflitos. É com este complexo cenário caracterizado por conflitos que a abordagem multicritério se propõe a trabalhar.

Assim, partindo-se do princípio que a realidade é multicriterial e que os critérios apresentam conflitos entre si, a abordagem multicritério não busca uma solução global ótima, geralmente inexistente. Ela se propõe a estabelecer um nível de satisfação entre todas as variáveis envolvidas, buscando a solução que melhor concilie os critérios e neutralize seus conflitos.

Conforme exposto, o processo de concepção arquitetônica, na maioria dos casos, pode se configurar como uma análise multicritério, uma vez que considerando diversos critérios – que representam o ponto de vista não só do projetista, mas de todos os demais atores envolvidos no empreendimento – seleciona uma entre diversas alternativas para compor o objeto arquitetônico (FONTENELLE; BASTOS, 2011).

No entanto, é importante ressaltar que esta escolha é, muitas vezes, baseada exclusivamente em experiências anteriores do projetista ou de outros profissionais, sendo raros os casos em que o arquiteto se apoia em métodos de auxílio à tomada de decisão

para assegurar que a alternativa escolhida seja de fato aquela que responda de forma mais satisfatória a maior parte das solicitações do projeto.

No meio acadêmico, sobretudo no exterior, vêm sendo desenvolvidas pesquisas que destacam a importância da adoção de métodos de análise multicritério no processo de concepção para melhoria da qualidade dos projetos, seja de novos edifícios, seja para propostas de *retrofit*. Neste sentido, destacam-se as pesquisas de Marks (1996), Blondeau, Sperandio e Allard (2002), Roulet et al. (2002), Rey (2004), Wang, Zmeureanu e Rivard (2005), Castro (2005), Lacouture et al. (2009), Chantrelle et al. (2011), dentre outros. Muitas destes trabalhos evidenciam esta abordagem como um caminho possível para facilitar a integração dos princípios de sustentabilidade no projeto de arquitetura.

A seguir, serão apresentados os fundamentos da abordagem multicritério. Neste tópico, serão destacados seus principais conceitos, elementos, etapas básicas, algumas de suas aplicações feitas no campo da arquitetura e uma breve descrição de um dos métodos desta abordagem, que será adotado na aplicação proposta pelo presente trabalho.

2.1. Conceitos básicos da abordagem multicritério

Segundo Marks (1996), Castro (2005), Wang, Zmeureanu e Rivard (2005), a abordagem multicritério é composta por três elementos básicos: as variáveis ou parâmetros, as restrições ou condicionantes contextuais e os critérios.

No âmbito da arquitetura, as variáveis são os elementos que caracterizam o edifício, como dimensões, orientação, materiais de composição do envelope, sombreamentos etc. As restrições são os limites impostos para definição do conjunto de variáveis que irão compor as soluções a serem testadas, podendo estar relacionadas às exigências impostas para o projeto pelo cliente, às especificidades do terreno e seu entorno, às normas técnicas, às leis de uso e ocupação do solo do município, dentre outras. Os critérios, por sua vez, correspondem aos objetivos a serem alcançados no projeto, e podem ser tanto os critérios clássicos do projeto como outros que porventura venham a ser somados ao processo, tais como os relacionados ao custo da construção, aos impactos gerados ao meio ambiente, etc.

Conforme descrito por Marks (1996), a combinação de variáveis que alcança para todos os seus critérios o mais alto desempenho, obedecendo todas as restrições impostas pelo problema, é chamada solução ideal da análise multicritério. Como os critérios geralmente apresentam conflitos, a solução ideal não existe na maioria dos casos. Na prática, o que se observa é que, em geral, raramente um dos objetivos pode ser alcançado plenamente sem influenciar negativamente pelo menos um dos outros critérios. A essas soluções não ideais dá-se o nome de soluções não-dominantes (MARKS, 1996; CHANTRELLE et al., 2010).

Tendo em vista o grande número de soluções não-dominantes possíveis de serem encontradas no processo de decisão, faz-se necessário selecionar aquela que apresenta a melhor conciliação entre os critérios, a qual é denominada solução preferida. A solução preferida é entendida como aquela que mais se aproxima da solução ideal (CASTRO, 2005). Para identificá-la de forma precisa, recomenda-se a adoção de métodos de abordagem multicritério.

2.2. Etapas básicas dos métodos da abordagem multicritério

Nos últimos 30 anos, muitos métodos de análise multicritério foram desenvolvidos, cada um deles orientado a resolver um tipo de problema, conforme indica Scharlig (1985) e Vincke (1989). Em comum, estes métodos apresentam quatro etapas básicas que devem ser seguidas para uma análise completa do problema. São elas:

01. Escolha dos parâmetros de projeto e definição das alternativas a serem testadas;
02. Definição dos critérios que avaliarão as soluções e determinação de sua importância relativa (pesos);
03. Análises monocritérios: avaliação de desempenho das soluções considerando cada um dos critérios separadamente;
04. Aplicação de um método de abordagem multicritério para identificação da solução preferida.

As três primeiras etapas são idênticas para todos os métodos, e constituem aquilo que podemos chamar de inicialização ou preparação para a aplicação do método propriamente dito (SCHARLIG, 1985). Já a última etapa apresenta algumas variações, dependendo de qual método for adotado.

É importante ressaltar que não se deve considerar esta sucessão de etapas como rígida e linear (SCHARLIG, 1985). É comum que o processo se dê de forma cíclica, em que constantemente se retorna à etapa anterior ou se avança a uma etapa seguinte, para que sejam corrigidos possíveis erros ou resolvidas algumas omissões. Entretanto, para aplicação da etapa 4, é imprescindível que todos os parâmetros, restrições, critérios e análises monocritérios estejam consolidados para que se chegue a um resultado final.

A seguir, será detalhada cada uma destas etapas, evidenciando algumas das complexidades a elas relacionadas no âmbito da arquitetura.

2.2.1. Escolha dos parâmetros de projeto e definição das alternativas a serem testadas

A primeira etapa da análise multicritério consiste em definir as alternativas de projeto a serem testadas, isto é, as ações potenciais ou candidatas para resolução do problema arquitetônico.

Esta etapa se inicia com a escolha dos parâmetros de projeto que comporão as alternativas. Sua definição dependerá da fase ou tipo de projeto para o qual será feita sua aplicação.

Segundo Castro (2005), para as etapas iniciais do projeto, sobretudo no anteprojeto, as variáveis básicas disponíveis são: volumetria externa, orientação das fachadas, áreas externas opacas e envidraçadas, áreas externas abertas à ventilação, nível de sombreamento da fachada devido a dispositivos integrados e materiais construtivos básicos.

Para o projeto executivo, quando boa parte das variáveis de projeto já foi definida e se dá enfoque ao detalhamento da obra, pode-se aplicar métodos de abordagem multicritério para auxiliar a escolha de materiais de acabamento, a fim de identificar a solução que satisfaça, por exemplo, critérios como conforto ambiental, a manutenção do edifício e seu consumo energético.

Em casos de *retrofit* de edifícios, pode-se aplicar métodos para avaliar alternativas de renovação do envelope da edificação, como é o caso das pesquisas desenvolvidas por Rey (2004), que compara três alternativas de reabilitação de fachadas para edifícios de escritório, e Chantrelle et al. (2011), que testam o desempenho de materiais para parede, cobertura e piso.

Seja qual for a etapa do projeto a ser submetida a esta abordagem, o número de variações de um mesmo parâmetro a ser testado dependerá das restrições impostas ao projeto. Não faz sentido, por exemplo, testar inúmeras variações de implantação se os recuos estabelecidos pela lei de uso e ocupação do solo permitem apenas algumas delas. Da mesma forma, uma vez definido o partido formal do projeto, o arquiteto também estabelece restrições quanto às soluções a serem testadas, descartando aquelas que fogem de suas concepções estéticas. Portanto, a escolha das variações do parâmetro jamais deve ser feita de forma aleatória, até mesmo para evitar análises de soluções inviáveis ou de alternativas as quais se espera eliminar por algum motivo numa etapa posterior.

A partir da definição dos parâmetros a serem analisados, são feitas combinações de variações de cada parâmetro, resultando em diferentes alternativas de projeto. Por exemplo, tendo como ponto de partida os parâmetros da cobertura do edifício, pode-se comparar duas soluções de projeto, sendo uma formada por uma cobertura plana composta por laje impermeabilizada e outra coberta inclinada, de duas águas, composta por telhas cerâmicas.

Cada alternativa de projeto, portanto, corresponde a uma das possíveis combinações de variáveis.

É importante ressaltar que se deve tentar limitar o número de parâmetros a serem variados, sob pena de transformar a análise multicritério em um processo extremamente trabalhoso.

2.2.2. Definição dos critérios de análise e de seus pesos

A segunda etapa da abordagem multicritério – a definição dos critérios e seus pesos – deve ser precedida de uma análise aprofundada do contexto do empreendimento para hierarquização de prioridades, não devendo esta ser feita exclusivamente pelos projetistas, mas também pelo cliente, pelos futuros usuários e até mesmo pelos moradores da área onde o edifício será implantado.

Além de definir a importância relativa de cada um dos critérios, este processo é bastante útil para limitar o número de critérios envolvidos no projeto. Isto porque foi descoberto pela prática que, para alguns métodos, a análise multicritério torna-se impraticável quando considerado mais de 12 critérios (ROULET et al., 2002).

Uma pesquisa desenvolvida por Rey (2004) comprova a influência dos pesos no resultado final da análise multicritério. Ele propõe a análise de sensibilidade dos pesos a fim de testar a estabilidade da solução. Para tanto, testa quatro grupos de variações de pesos para cada um dos critérios envolvidos em uma análise multicritério aplicada para o *retrofit* de edifícios de escritório. Há casos em que, a despeito da variação de pesos, os diferentes *rankings* apontam a mesma solução como preferida. Entretanto, em casos específicos, verifica-se uma grande variação no resultado final, chegando a situações em que a pior colocação em um grupo de pesos alcançou a melhor colocação em outro grupo. Conclui-se que a influência dos pesos pode tanto ser sutil como brusca e, por isso, deve-se tomar cuidado na definição dos mesmos, para que a alternativa escolhida satisfaça aos objetivos do projeto.

2.2.3. As análises monocritérios

Nesta fase, são avaliados os desempenhos das alternativas considerando cada critério separadamente, ignorando, neste momento, os conflitos existentes entre eles. Por exemplo, analisa-se o desempenho de uma solução para as aberturas de um edifício considerando individualmente os critérios de conforto lumínico, térmico e acústico, custo, consumo energético, etc. Cada análise permitirá identificar as tendências de comportamento considerando as variações para um determinado parâmetro.

Os instrumentos ou métodos utilizados para realizar a análise monocritério variam em função do critério em questão. Para mensurar o desempenho de uma solução de projeto quanto ao conforto ambiental, consumo de energia e qualidade do ar, os instrumentos mais recomendados são os softwares de simulação. Para as fases iniciais de projeto, quando não há muitos dados disponíveis, a simulação não fornecerá como resultado um número significativo em termos de valor absoluto, mas deverá antes ser encarado como significativo para indicar uma certa tendência do comportamento estudado, ou ainda, como um índice de um certo desempenho relativo (CASTRO, 2005). Na medida em que se avança no projeto, os parâmetros vão sendo definidos, o que possibilita a obtenção de resultados mais precisos através da simulação.

Uma outra forma de fazer a análise monocritério de uma solução é proposta por Graça (2002). A autora propõe a qualificação das soluções por especialistas – no caso, especialistas das sub-áreas de conforto ambiental – através da aplicação de questionários. Utilizando uma escala semântica de valores, cada especialista avalia as soluções propostas, e ao final se estabelece uma média das respostas, que é quantificada para facilitar a comparação entre as alternativas. Observa-se que, mesmo considerando a opinião de mais de um especialista sobre as soluções, este método não apresenta a mesma precisão oferecida pelos softwares de simulação.

Para avaliação das alternativas face a critérios como custo e impacto ao meio ambiente, faz-se necessária a consulta a bancos de dados, fabricantes de materiais, diretório local de preços, etc. Neste caso, um dos maiores impasses atuais para quantificar o desempenho consiste na escassez de dados, principalmente em países que ainda não apresentam muita experiência com práticas sustentáveis. Muitos fabricantes não informam as propriedades físicas de seus materiais, a energia despendida para sua fabricação e transporte, a emissão de gases poluentes, a porcentagem de materiais reciclados utilizados em sua produção, etc. Além de inviabilizar a análise do impacto ambiental de materiais, a inexistência destes dados também prejudica a realização das simulações. Observa-se, portanto, que a inclusão de alguns critérios ambientais no processo de projeto ainda não é uma tarefa muito simples no Brasil.

Dependendo do critério, há casos em que a realização da análise monocritério não apresenta grandes dificuldades. Pode-se citar como exemplo a escolha de um terreno para implantação de um empreendimento residencial em que se tem como um dos critérios a distância do lote ao local de trabalho do cliente. Neste caso, a simples medição desta distância para cada um dos terrenos estudados consistiria uma análise monocritério dos mesmos.

A despeito dos exemplos de critérios objetivos aqui apresentados, é importante ressaltar que na abordagem multicritério também é possível trabalhar com critérios subjetivos. Por exemplo, pode-se solicitar aos moradores da área vizinha ao empreendimento que comparem diferentes soluções de fachada do ponto de vista de seus anseios estéticos. Neste caso, faz-se necessário pré-estabelecer uma escala semântica de avaliação que esteja relacionada às possíveis opiniões destes atores de decisão. Ainda que estas escalas não sejam numéricas a priori, é importante que as respostas possam por fim ser relacionadas a valores numéricos, uma vez que na etapa seguinte, será preciso trabalhar com dados que quantifiquem o desempenho das soluções.

2.2.4. *Aplicação de um método* de abordagem multicritério para identificação da solução preferida

Nesta etapa, também chamada de agregação, os múltiplos critérios são enfim considerados simultaneamente. Há uma variedade significativa de métodos e algoritmos desenvolvidos para comparar o desempenho das alternativas. A maioria deles segue as duas etapas descritas de forma simplificada a seguir:

01. Compara-se de duas em duas as soluções propostas, considerando os resultados de seus desempenhos identificados por meio das análises monocritério. Avalia-se, entre cada um dos pares analisados, se há uma relação de preferência forte ou fraca por uma das ações, uma indiferença ou uma incomparabilidade entre elas.

02. A partir da análise sucessiva dos pares, feita por meio de cálculos matemáticos ou auxílio de softwares, identifica-se a(s) alternativa(s) que apresenta(m) o desempenho mais satisfatório considerando simultaneamente todos os critérios envolvidos.

Alguns métodos têm como resultado final a identificação apenas da solução preferida. Outros possibilitam a criação de um *ranking* entre todas as alternativas testadas, ordenando-as do melhor para o pior desempenho.

Castro (2005) ressalta que o ordenamento das soluções é fundamental para processos de decisão que envolvem múltiplos atores. Isto porque nem sempre a solução preferida será a solução adotada no projeto, uma vez que um dos atores envolvidos na concepção do empreendimento pode optar, entre duas soluções de desempenho semelhantes, pela de menor rendimento, com o intuito de resolver outros problemas que porventura venham a surgir no processo projetual. Conclui-se com isto que o processo de ORDENAÇÃO é preferível ao processo de ESCOLHA, uma vez que o primeiro permite reter maiores informações sobre o resultado do processo decisório que o segundo, que elimina todas as outras alternativas (CASTRO, 2005).

Segundo Rey (2004), esta visão global proporcionada pelo *ranking* fornece aos projetistas todos os elementos necessários para uma justificativa futura sobre a decisão tomada. A este projeto baseado em escolhas consistentes e justificáveis, Rey (2004) dá o nome de *knowledge Project* (projeto consciente).

2.2.4.1. O método ELECTRE III

Um dos métodos mais utilizados para aplicação da última etapa da abordagem multicritério não só no projeto de arquitetura, mas também em outros processos decisórios é o ELECTRE III, que faz parte de um grupo de métodos de análise multicritério desenvolvidos pelo suíço Roy (1977). Com o objetivo de exemplificar um método desta abordagem – que será empregado na aplicação proposta para esta pesquisa – será feita a seguir uma breve descrição de suas etapas.

Conforme esquematizado na Tabela 2.1, os resultados das análises monocritérios (e11, e12, e13...) são inseridos em uma matriz de avaliações na interseção de uma linha (a - alternativa) como uma coluna (c - critério). Todos estes valores devem estar normalizados, para possibilitar a comparação entre dados de unidades diferentes.

Tabela 2.1 – Matriz de avaliações monocritérios. Fonte: CASTRO, 2005.

	c ₁	c ₂	c ₃	...	C _m
	p ₁	p ₂	p ₃	...	P _m
a ₁	e ₁₁	e ₁₂	e ₁₃	...	e _{1m}
a ₂	e ₂₁	e ₂₂	e ₂₃	...	e _{2m}
a ₃	e ₃₁	e ₃₂	e ₃₃	...	e _{3m}
...	e _{ij}	...
a _n	e _{n1}	e _{n2}	e _{n3}	...	e _{nm}

Ao final do preenchimento da matriz, a linha constituirá uma sequência de valores, que representarão o conjunto de julgamentos feitos para uma alternativa potencial. Ela também pode ser entendida como um conjunto de consequências da alternativa analisada.

Ainda na matriz, deve ser indicado o peso (p1, p2, p3...) de cada critério (c1, c2, c3...).

A partir desta matriz, são feitas as comparações dos desempenhos das alternativas em pares, buscando identificar a relação de sobreclassificação entre elas. Neste procedimento, identifica-se se há uma preferência forte ou fraca por uma das alternativas, se há uma indiferença entre elas ou se há uma situação de incomparabilidade entre as ações.

Para identificar de forma precisa qual das três relações é evidenciada em cada comparação, deve ser estabelecido um limite de preferência, indiferença e veto para o conjunto de avaliações de cada critério. O limite de preferência (p) indica a diferença absoluta ou relativa

a partir da qual uma preferência estrita pode ser estabelecida entre duas avaliações. O limite de indiferença (q) indica a diferença absoluta ou relativa entre desempenhos para a qual nenhuma preferência pode ser estabelecida entre as alternativas, devido à imprecisão das medidas ou dados. O limite de veto (v), por sua vez, representa a diferença a partir da qual se ignora a comparação entre as duas alternativas (CASTRO, 2005).

Assim, para estabelecer o ordenamento entre quaisquer duas alternativas “A” e “B”, isto é, para descobrir qual das três relações ocorre entre as alternativas, utiliza-se o seguinte critério:

“A” é FORTEMENTE PREFERIDA em relação à “B” se $g(A) - g(B) > p$

“A” é FRACAMENTE PREFERIDA em relação à “B” se $q < g(A) - g(B) \leq p$

“A” é indiferente em relação à “B” se $|g(A) - g(B)| \leq q$

Onde $g(A)$ e $g(B)$ são as avaliações (desempenhos) das alternativas.

Uma vez definidas as relações de sobreclassificação, é calculado o índice de concordância, que mede o grau de confiança para com a hipótese de que “A” sobreclassifica “B”. Em seguida, calcula-se também o índice de discordância, que mede o grau de desconfiança para com a hipótese de que “A” sobreclassifica “B”. Os cálculos destes índices geram duas matrizes – a matriz de concordância e a de discordância – que irão derivar uma terceira, denominada matriz de credibilidade, que provê uma medida quantitativa da força assertiva de “A” sobreclassifica “B”, ou de que “A” é no mínimo tão boa quanto “B”. A partir desta matriz final, pode-se determinar um *ranking* das alternativas.

A aplicação do método acima descrito pode ser facilitada pela utilização de diversas ferramentas computacionais, dentre as quais se pode destacar o software CELECTRE, desenvolvido por Castro (2005). O programa permite ordenar até 10 alternativas avaliadas face a 10 critérios distintos, aos quais podem ser atribuídos pesos individuais.

Os valores de desempenho obtidos através das análises monocritérios, após serem normalizados, devem ser inseridos nos campos que cruzam uma alternativa e um critério considerado (Figura 2.1).

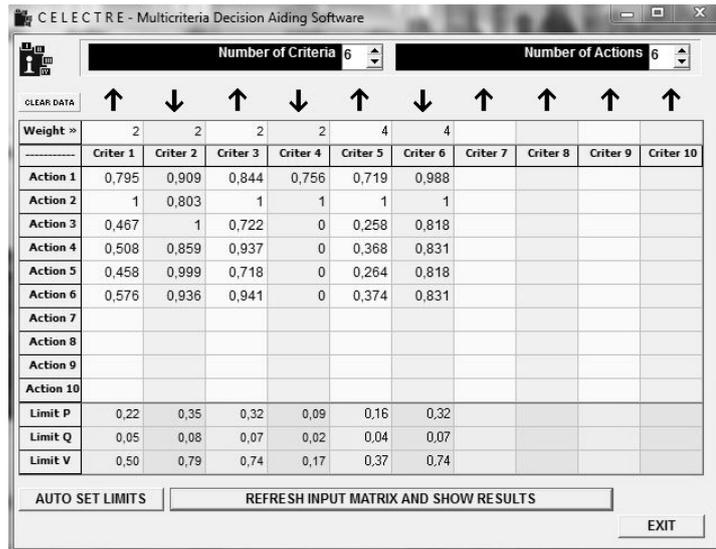


Figura 2.1 – Tela de entrada do CELECTRE.

O usuário deve escolher entre maximizar ou minimizar cada um dos critérios através da indicação de uma seta acima da coluna correspondente a ele. Uma seta voltada para cima significa maximizar o critério (maiores valores, melhor *ranking*), enquanto que a seta para baixo significa minimizá-lo (menores valores, melhor *ranking*) (CASTRO, 2005). Por exemplo, no critério de consumo de energia, se o objetivo do projeto for alcançar a eficiência energética do edifício, deve-se indicar uma seta para baixo sobre a coluna referente a este critério. Da mesma forma, para o critério conforto lumínico, se for definido que o desempenho da alternativa é maior na medida em que se aumenta a iluminância no plano de trabalho, deve-se indicar uma seta para cima sobre a coluna referente a este critério.

Os valores para os limites de concordância – preferência, indiferença e veto – de cada critério são estabelecidos automaticamente pelo programa ou indicados pelo usuário.

Após inserção dos dados de entrada, o programa executa os cálculos inerentes ao método ELECTRE III e apresenta instantaneamente o *ranking* das alternativas.

A Figura 2.2 mostra a tela de resultados do CELECTRE, onde é apresentado o ordenamento das soluções. Na tabela a esquerda, é mostrada a Matriz de Credibilidade e na tabela inferior (*Best Action*), são destacados os valores de desempenho face a cada critério da solução melhor colocada.

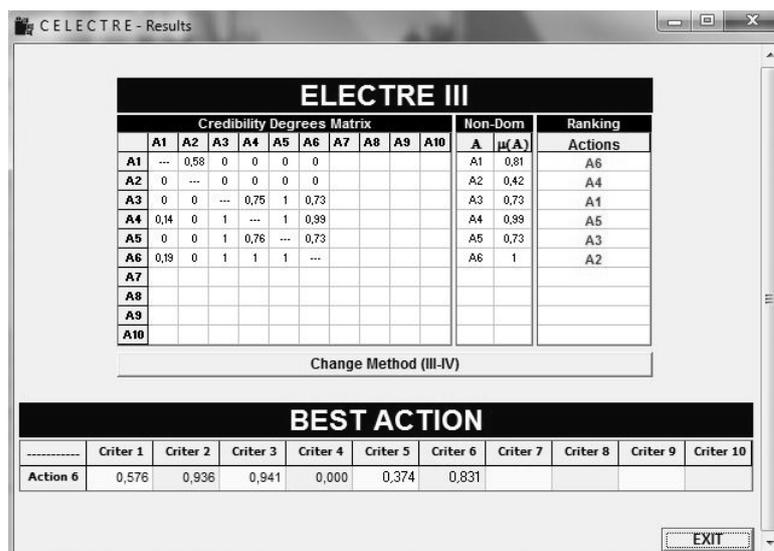


Figura 2.2 - Tela de resultados do CELECTRE.

Conforme se observa, o CELECTRE permite que arquiteto trabalhe com a abordagem multicritério sem que seja necessário lidar com cálculos matemáticos aprofundados – comuns deste e de outros métodos de análise multicritério – com os quais os projetistas geralmente não são familiarizados. Por ser um programa de fácil manuseio e interface amigável, acredita-se que Castro (2005) tenha tornado a abordagem mais palatável aos arquitetos, facilitando sua aplicação e, portanto, sua integração ao processo global de projeto.

2.3. Aplicações na arquitetura

São diversos os contextos de aplicações da abordagem multicritério para auxílio ao arquiteto na tomada de decisão, tanto no que diz respeito aos métodos adotados, como quanto aos critérios e variáveis consideradas. A seguir, são descritos de forma sucinta três das pesquisas estudadas, que representam algumas das várias possibilidades de aplicação desta abordagem.

Lacouture et al. (2009) desenvolveram um método de análise multicritério para auxiliar os arquitetos na escolha de materiais construtivos que conciliem baixo impacto ao meio ambiente e restrições orçamentárias. O método considera todos os critérios ambientais do item “materiais” da certificação norte-americana LEED, tais como: emprego de materiais reciclados e/ou certificados e com baixo impacto ao entorno, redução da emissão de VOC (*Volatile Organic Compounds* ou Compostos Orgânicos Voláteis) e outros gases poluentes, emprego de matéria-prima local, etc. Através da aplicação do método desenvolvido, os

autores esperam maximizar a pontuação no processo de certificação satisfazendo as restrições de gastos.

Como forma de demonstrar o método desenvolvido, Lacouture et al. (2009) apresentam um estudo de caso de um edifício de escritórios localizado na cidade de Bogotá, na Colômbia. São avaliados os desempenhos individuais de oito soluções de projeto, cada uma apresentando uma combinação distinta de materiais aplicados em piso, parede, forro, esquadrias e coberturas. Para tanto, são levantados os dados sobre o custo dos materiais e características ambientais, através da consulta em *software* – *Building for Environmental and Economic Sustainability Software* (BEES) –, fabricantes, fornecedores e diretório local de preços.

Além da solução preferida, são apresentadas também outras soluções que combinam maior custo e maior pontuação do LEED, com o intuito de alertar a diferença no orçamento para se alcançar as pontuações seguintes. Os resultados demonstraram que, em alguns casos, um acréscimo reduzido no custo da construção pode ocasionar um incremento significativo no aumento de pontos e, conseqüentemente, na redução dos impactos ambientais gerados pelo edifício.

Lacouture et al. (2009) enfatizam que a disponibilidade e preço dos materiais podem alterar a solução preferida e que, portanto, para o caso específico deste parâmetro, o resultado da análise multicritério pode variar ao longo do tempo. Os autores também alertam que a falta de dados ambientais sobre os materiais - muitas vezes não disponibilizados pelos fabricantes – pode inviabilizar a aplicação do método proposto.

Outra pesquisa desenvolvida por Blondeau, Sperandio e Allard (2002) apresenta uma aplicação de dois métodos distintos – sendo um de otimização (o método combinatório⁴) e outro de abordagem multicritério (o método de sobreclassificação⁵) – para auxiliar na escolha de uma estratégia de ventilação para um edifício universitário, seja por meios passivos ou ativos, que apresente simultaneamente desempenhos satisfatórios quanto aos seguintes critérios: conforto térmico, qualidade do ar e consumo energético.

⁴ Este método consiste em substituir os múltiplos critérios por um único critério que sintetiza os demais. Para tanto, faz-se necessário definir uma função matemática denominada função utilitária (*utility function*), que representará a combinação de todos os critérios envolvidos. (BLONDEAU; SPERANDIO; ALLARD, 2002)

⁵ Neste caso, os desempenhos individuais das soluções considerando cada critério são comparados em pares, objetivando encontrar uma relação de superação de uma alternativa sobre a outra. (BLONDEAU; SPERANDIO; ALLARD, 2002)

A partir de três parâmetros – vazão de ar diurna, renovação de ar noturna e potência de resfriamento – cria oito estratégias de ventilação cujos desempenhos serão testados individualmente face a cada um dos critérios envolvidos. São traçados índices mínimos ou máximos para o conforto térmico, qualidade do ar e consumo de energia, que servirão de base para eliminar, durante o processo de definição das alternativas, algumas soluções cujos desempenhos estejam abaixo do aceitável.

Por fim, são aplicados os dois métodos propostos, que irão ordenar as soluções, destacando a que melhor concilia todos os três critérios. Apesar de bastante diferentes, ambos os métodos apontaram a mesma estratégia de ventilação como a mais adequada para o edifício em estudo.

Chantrelle et al. (2011) desenvolveram um instrumento de análise multicritério – o MultiOpt – para renovação de edifícios, através da aplicação de um algoritmo genético (NSGA-II). O MultiOpt trabalha com seis parâmetros distintos que definem o envelope e estrutura dos edifícios: tipos de paredes opacas, de cobertura, de laje, de pisos intermediários, de divisórias e de janelas.

Para ilustrar a aplicação do instrumento desenvolvido, Chantrelle et al. (2011) combinam variações dos parâmetros supracitados e avaliam o desempenho das soluções propostas face a quatro critérios: consumo energético, conforto térmico, custo da construção e impacto ao meio ambiente (emissão de CO₂). Foi atribuído o mesmo peso a todos os critérios.

A análise das soluções é feita em três etapas. Na primeira – a análise monocritério –, são feitas simulações computacionais termo-energéticas e pesquisas em banco de dados relativos aos impactos do ciclo de vida dos materiais e seu custo, com o objetivo de quantificar o desempenho de cada alternativa de projeto face aos critérios envolvidos.

A segunda e a terceira etapas compreenderam a análise multicritério feita, respectivamente, pela comparação em pares e trios de alternativa. Na comparação em pares, observou-se que a diversidade de soluções multicriteriais é inversamente proporcional ao grau de semelhança dos resultados monocriteriais. Por exemplo, observou-se que para reduzir a emissão de CO₂ no empreendimento, é necessário reduzir a quantidade de materiais empregados na mesma, o que também gera a redução do custo da construção. Neste caso, o custo da construção e a emissão de CO₂ são objetivos diretamente proporcionais, gerando resultados monocriteriais semelhantes. Por outro lado, observou-se que os critérios consumo energético e custo da construção podem ser inversamente proporcionais, pois para reduzir o consumo de energia, é necessário, dentre outras estratégias, investir em materiais isolantes, o que encarece a construção. Neste caso, foi encontrado um maior número de resultados multicriteriais do que na primeira comparação.

Na última etapa – comparação em trio de alternativas -, os resultados alcançados foram numerosos e diversos, e devido a não indicação de um *ranking* global que ordenasse as alternativas, detectou-se uma dificuldade em selecionar uma entre trinta soluções.

Através destes três exemplos, observa-se o grande potencial da adoção de métodos de análise multicritério para auxiliar o projetista na integração dos princípios de sustentabilidade no projeto de arquitetura. Entretanto, uma das maiores dificuldades para sua implementação se encontra na etapa de análise monocritério, pois exige do arquiteto um conhecimento vasto em diversas áreas de atuação, bem como sua capacitação para utilização de *softwares* de simulação e um comprometimento por parte dos fabricantes para disponibilizar a declaração ambiental dos produtos.

PARTE II

APLICAÇÃO DA ABORDAGEM MULTICRITÉRIO
EM UM PROCESSO DE PROJETO

CAPÍTULO 03 – ELEMENTOS DA APLICAÇÃO

Uma vez detalhada a problemática tratada neste trabalho e apresentados os fundamentos da abordagem multicritério, será dado início à aplicação da mesma em um processo de projeto. O objeto de estudo a ser trabalhado consiste em um projeto de um edifício de escritórios proposto para a cidade do Rio de Janeiro.

Antes de iniciar a aplicação das 4 etapas da abordagem, optou-se por apresentar seus elementos específicos, os quais serão detalhados neste capítulo.

Inicialmente, será introduzido o objeto de estudo proposto para a aplicação, indicando dados como o uso do edifício projetado, seu contexto climático, as características do terreno e do entorno imediato, a tipologia escolhida, dentre outros. Os demais dados necessários para a realização das análises monocritérios (etapa 3), tais como propriedades ópticas dos materiais construtivos, padrão de ocupação, características do sistema de iluminação artificial, serão descritos somente nos tópicos correspondentes as análises monocritérios, como dados de entrada.

A partir da avaliação das especificidades do objeto de estudo, serão selecionados três critérios a serem considerados na análise, apresentando seus conceitos, sua importância para a qualidade do projeto de arquitetura e algumas estratégias para alcançar os objetivos a eles relacionados.

No tópico seguinte, serão especificadas as restrições do projeto, tendo como base recomendações de normas e regulamentos relacionados aos critérios selecionados. Estas restrições serão consideradas na composição das alternativas, como forma de realizar uma triagem das soluções propostas, a fim de selecionar apenas aquelas que apresentam a priori um bom desempenho do ponto de vista dos critérios considerados.

Por fim, serão selecionados, dentre os diversos parâmetros de projeto, alguns daqueles que se relacionam aos três critérios escolhidos, apresentando seus conceitos e indicando suas possibilidades de variação.

3.1. O objeto de estudo

3.1.1. O uso do edifício

O objeto de estudo da análise multicritério deste trabalho consiste em um projeto arquitetônico de um edifício de escritórios situado no Rio de Janeiro-RJ, a ser ocupado anualmente no período das 8 às 18 horas.

3.1.2. Contexto climático do projeto

A cidade onde será implantada a edificação proposta – o Rio de Janeiro – está localizada a 22°54' de latitude Sul, 43°12' de longitude Oeste, e apresenta uma altitude variada devido seu relevo acidentado (IBGE, 2011).

O clima predominante é o tropical quente úmido, sendo caracterizado por temperaturas médias máximas entre 25 e 30,2°C, temperaturas médias mínimas entre 18,4 e 23,5°C e umidade relativa média do ar entre 77 e 80% (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Normais climatológicas do Rio de Janeiro. Fonte: LABEEE, 2009.

V*	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	29.4	30.2	29.4	27.8	26.4	25.2	25.3	25.6	25	26	27.4	28.6
2	23.3	23.5	23.3	21.9	20.4	18.7	18.4	18.9	19.2	20.2	21.4	22.4
3	26.2	26.5	26	24.5	23	21.5	21.3	21.8	21.8	22.8	24.2	25.2
4	79	79	80	80	80	79	77	77	79	80	79	80

* Variáveis: 1 – Temperaturas médias máximas (°C); 2 – Temperaturas médias mínimas (°C); 3 – Temperaturas médias (°C); 4 – Umidade relativa do ar (%).

O Gráfico 3.1 apresenta os dados climáticos referentes ao horário de ocupação de um edifício de escritórios – período das 8 às 18h – de um ano típico do Rio de Janeiro plotados no diagrama psicrométrico de Givoni (1981), disponível no programa Analysis Bio (LABEEE, 2010)⁶. Conforme se observa, o predomínio de alta umidade relativa do ar associada a altas temperaturas gera desconforto na maioria das horas do ano. Cerca de 35% das horas apresentam conforto e aproximadamente 65% são caracterizadas pelo desconforto, sendo 60% destas horas de desconforto decorrentes de altas temperaturas combinadas a uma elevada umidade relativa do ar.

⁶ A plotagem equivale a 4015 das 8760 horas do ano, considerando inclusive as horas relativas a fins de semana e feriados, pela impossibilidade de excluí-las no programa Analysis Bio 2.2 (Labeee, 2010).

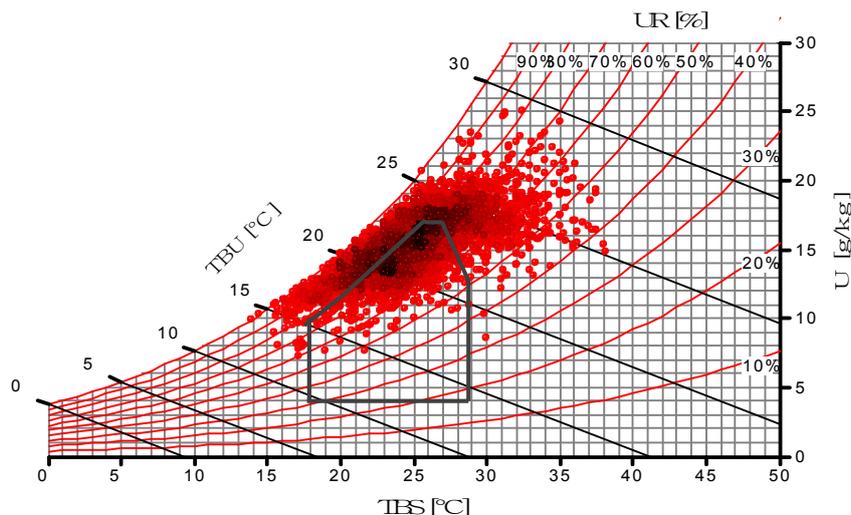


Gráfico 3.1 – Dados climáticos de um ano típico no Rio de Janeiro plotados em carta psicrométrica. Linha cinza: zona de conforto. Fonte: programa Analysis Bio (LABEEE, 2010).

Segundo a carta solar referente à latitude de 22°50'S (Figura 3.1), a radiação solar só incide diretamente na fachada Sul dos edifícios do Rio de Janeiro entre os meses de setembro e março, passando a incidir diretamente na fachada Norte, ainda que por algumas horas, a partir do final de janeiro. Observa-se também que no inverno a altura solar é de no máximo 41° ao meio dia, enquanto no verão alcança aproximadamente 90° neste mesmo horário.

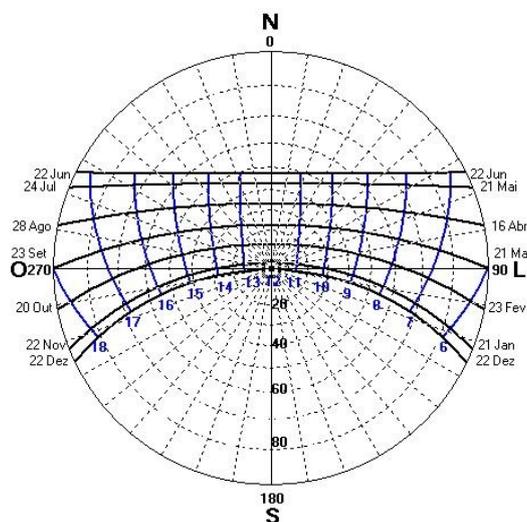


Figura 3.1 – Carta solar do Rio de Janeiro (22°50' de latitude sul). Fonte: aplicação do programa Analysis SOL-AR (LABEEE, 2009).

O relevo acidentado da cidade provoca mudanças significativas na direção e velocidade dos ventos, o que torna imprescindível uma análise específica da circulação do ar na área da cidade para onde se concebe o projeto de uma edificação.

Através desta breve caracterização do clima do Rio de Janeiro, pode-se inferir que o desconforto higrotérmico, notadamente no período estival, é devido às altas temperaturas e

elevada umidade relativa do ar. Portanto, os projetos de edifícios concebidos para este contexto climático devem priorizar estratégias que promovam a redução da transferência de calor para o interior da edificação, tais como o sombreamento das aberturas, aproveitamento da ventilação natural, emprego de materiais construtivos adequados termicamente, dentre outras.

Também se deve atentar para a composição do envelope principalmente nas fachadas Norte, Leste e Oeste, uma vez que são as que mais recebem radiação solar direta ao longo do ano. As aberturas com estas orientações são as que exigem um maior cuidado no projeto dos elementos de proteção solar, de modo a impedir a penetração dos raios do Sol com pequenos ângulos de altura.

3.1.3. Dados do terreno escolhido e de seu entorno imediato

O terreno escolhido para implantação do edifício de escritórios localiza-se na zona Sul da cidade do Rio de Janeiro, na Praia do Flamengo, nº 132, no bairro Flamengo. Como entorno imediato, tem-se, a Sudeste, o Aterro do Flamengo e a Baía de Guanabara, a Nordeste e Sudoeste, edifícios residenciais multifamiliares, e a Noroeste, algumas edificações de poucos pavimentos (Figura 3.2 e 3.3).



Figura 3.2 – Vista aérea do terreno e de seu entorno imediato.
Fonte: adaptado do GOOGLE, 2011.



Figura 3.3 – Vista frontal do terreno e dos edifícios vizinhos. Fonte: autora.

O terreno possui uma área total de 1.580 m², sendo 19,08m e 87,23m sua largura e seu comprimento máximos, respectivamente. A orientação de sua divisa frontal – 108° de azimute – possibilita uma ampla vista da paisagem, que inclui o Parque do Flamengo, a baía de Guanabara e a cidade de Niterói.

Conforme indicam os dados da estação meteorológica do Aeroporto Galeão, a direção dominante dos ventos em todas as estações do ano é a Sudeste, alcançando velocidade de até 3 m/s nesta direção (Figura 3.4). Na direção Sul, a segunda mais frequente, os ventos apresentam maior velocidade, alcançando até 6 m/s.

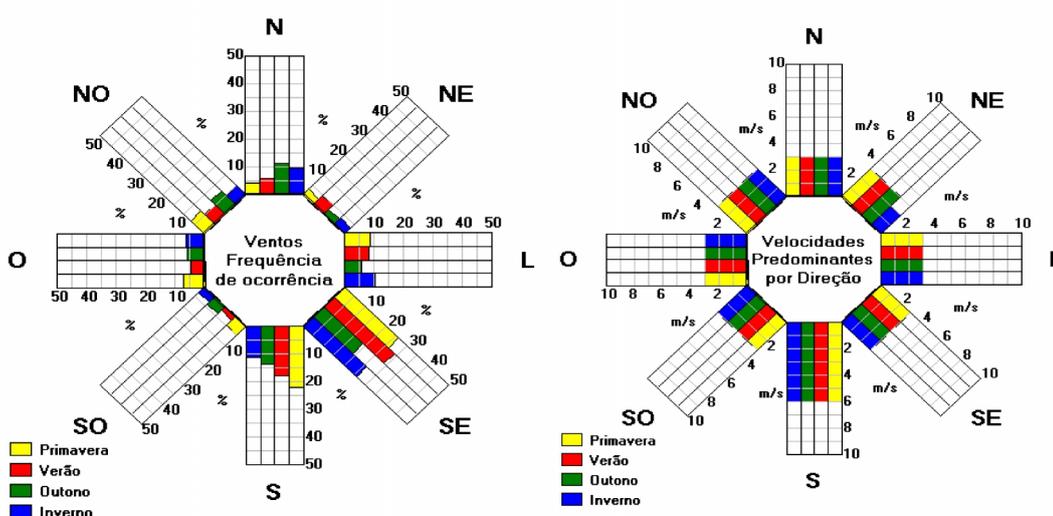


Figura 3.4 – Rosa dos ventos indicando freqüência de ocorrência e velocidades predominantes dos ventos por direção. Dados da estação meteorológica do Aeroporto Galeão. Fonte: programa Analysis SOL-AR (LABEEE, 2009).

Através de uma análise da carta solar do Rio de Janeiro e de simulações realizadas no programa *Google Sketchup* 8.0 (GOOGLE, 2010) a partir da modelagem dos edifícios vizinhos, constatou-se que o edifício residencial situado a Nordeste funciona como principal barreira contra insolação do terreno, sombreando o lote principalmente entre os meses de fevereiro e outubro (Figura 3.5). Entre os meses de abril e agosto, este sombreamento chega a ser quase total ou total no horário próximo a meio-dia. O edifício residencial junto à divisa Sudoeste, de menor extensão, também gera sombras no lote, notadamente entre os meses de janeiro e abril e de agosto a dezembro, geralmente à tarde. As demais edificações a Noroeste do terreno, por apresentarem um baixo gabarito e maior distância do lote, sombreiam-no apenas no fim da tarde, quando a altura solar é mais baixa.

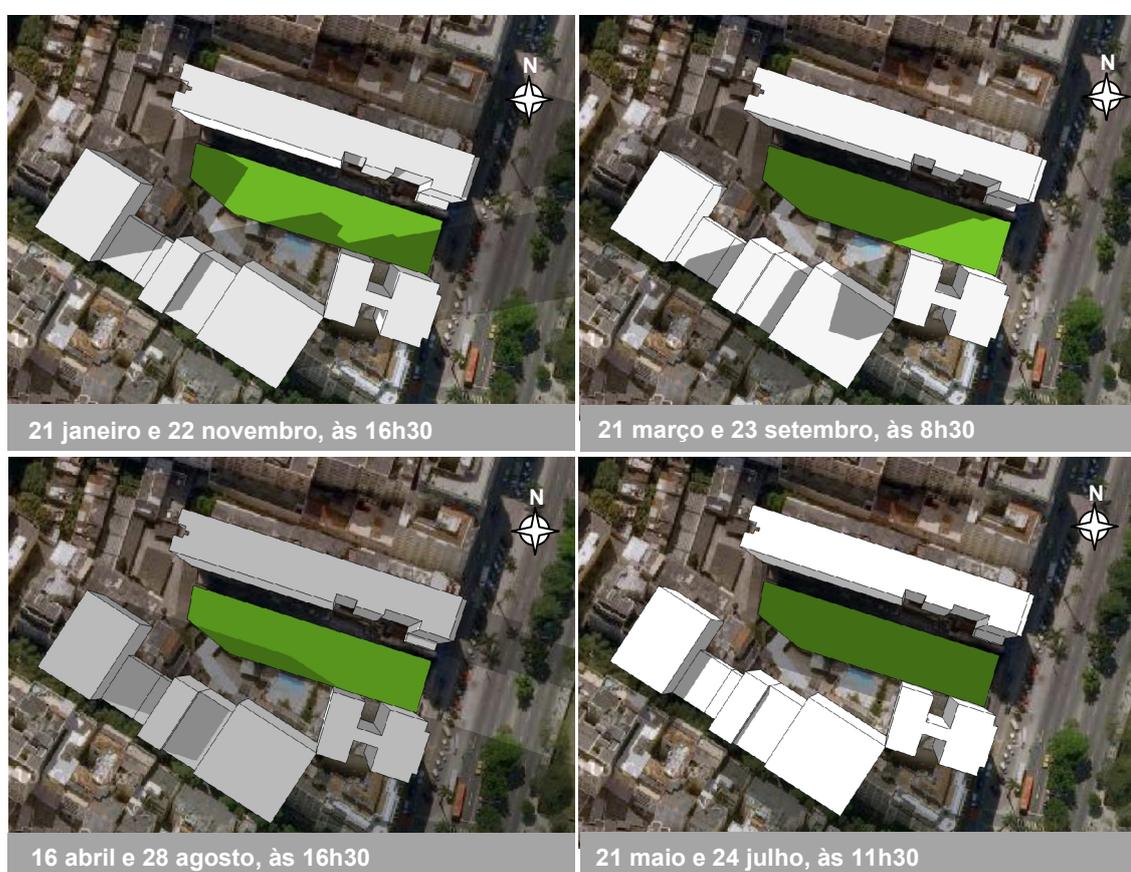


Figura 3.5 – Sombreamento gerado no terreno pelos edifícios vizinhos. Fonte: autora.

Os parâmetros urbanísticos indicados para este trecho da cidade pela Lei de Uso e Ocupação do Solo (PCRJ, 2011) são:

- Máximo de 13 pavimentos para edifícios afastados ou não da divisa do lote, não sendo computado neste número o pavimento de uso comum;
- Taxa de ocupação: 70%

– Número de edificações: 1 por lote.

3.1.4. O projeto arquitetônico

Tendo em vista as dimensões e formato do terreno, as restrições estabelecidas pela legislação edilícia e o interesse em aproveitar ao máximo a área do lote, para efeito deste trabalho foi decidido implantar no terreno um edifício de escritório de 13 pavimentos com volumetria paralelepipedica, cujas fachadas Nordeste e Sudoeste encostam-se às divisas (Figura 3.6).

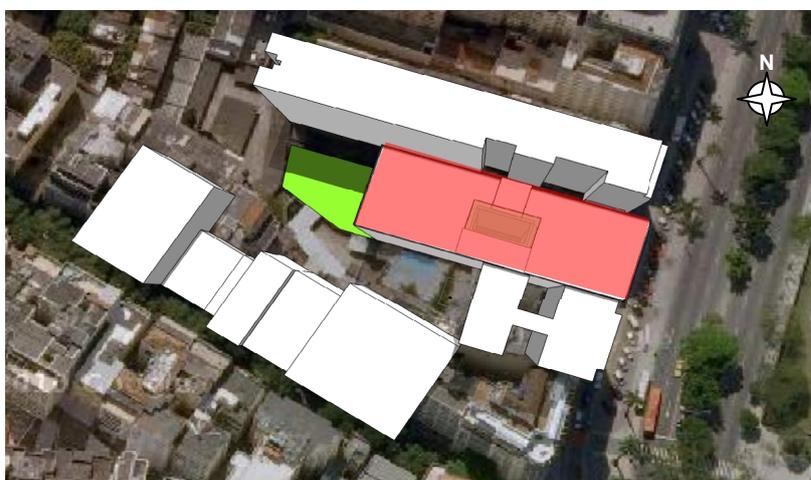


Figura 3.6 – Implantação do edifício (em vermelho). Fonte: autora.

A tipologia escolhida foi a de planta livre – bastante comum em projetos contemporâneos de edifícios de escritórios – que permite uma maior integração entre os espaços e reduzida formação de barreiras contra luz e ventos.

Ocupando uma área de 1.106 m², que corresponde a 70% da área do lote, a edificação projetada apresenta um átrio central, concebido para iluminar naturalmente as áreas do pavimento mais distantes das fachadas Sudeste e Noroeste e para realizar a exaustão dos banheiros e copa (Figura 3.7 e 3.8). Também junto a ele, foram inseridos os elementos de circulação vertical do edifício – elevadores e escada de incêndio –, duas salas de reuniões vedadas por divisórias e dois espaços de circulação.

Nas fachadas Sudeste e Noroeste, foram criados dois elementos verticais em formato triangular, situados junto às extremidades das aberturas. Além de terem uma função estética, servem para complementar o sombreamento gerado por dispositivos de proteção a serem futuramente propostos para estas janelas.

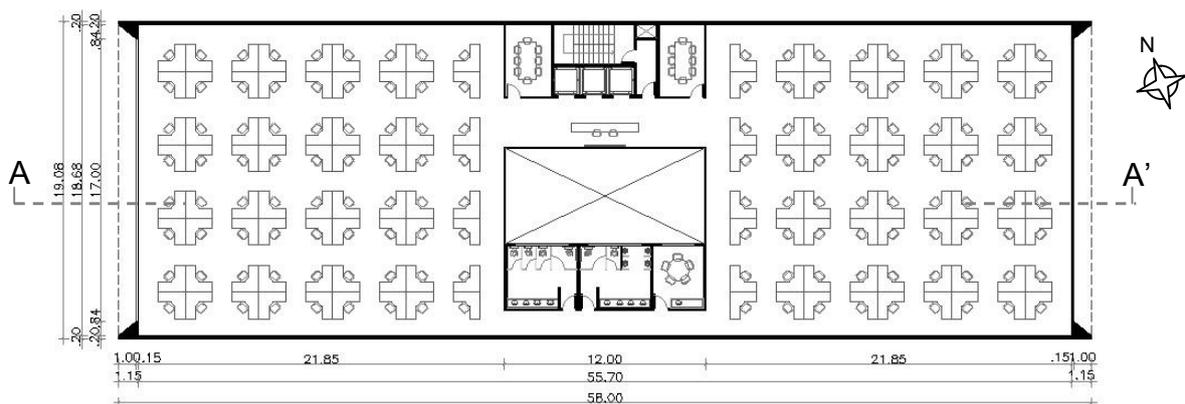


Figura 3.7 – Planta baixa do pavimento tipo.

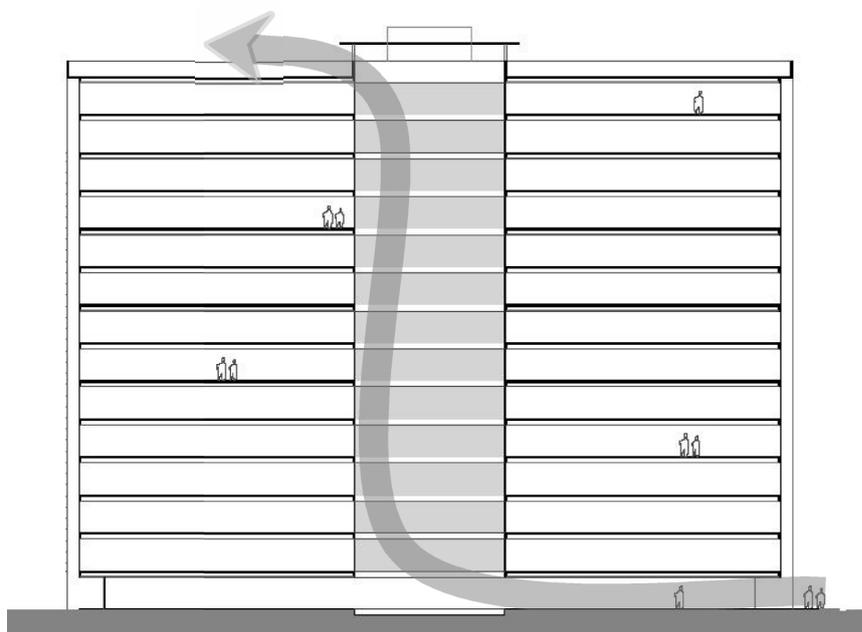


Figura 3.8 – Corte longitudinal AA' do edifício com indicação da trajetória do vento.

A despeito do potencial de aproveitamento da ventilação natural para garantir o conforto térmico dos usuários, os pavimentos tipo foram projetados para serem condicionados artificialmente, sendo os banheiros e a copa os únicos ambientes destes pavimentos para os quais não será previsto o uso do ar condicionado.

Na cobertura, o átrio está protegido por uma cobertura plana de vidro, sob a qual foram criadas aberturas de exaustão. Adjacentes à cobertura do átrio encontram-se dois volumes de cinco metros de altura, previstos para disposição da caixa d'água e da casa de máquina dos elevadores.

3.2. Os critérios

Para análise da aplicação da metodologia proposta, foram escolhidos apenas três critérios, ainda que se tenha consciência da importância em incluir outros no processo de concepção para que a alternativa apontada como de maior desempenho possa de fato solucionar a maior parte dos problemas envolvidos no projeto.

Os três critérios escolhidos foram: o nível de luz natural no plano de trabalho, a visualização para o exterior e a eficiência energética da edificação.

Os dois primeiros critérios estão relacionados ao conforto visual dos usuários, e foram escolhidos a partir da consideração da natureza da atividade a ser desempenhada no edifício bem como pela especificidade do seu entorno. Entende-se que privilegiá-los é de fundamental importância para possibilitar a alta produtividade no trabalho e contribuir para o bem-estar dos usuários, aproveitando os efeitos psicológicos positivos que a visualização da paisagem pode proporcionar.

A eficiência energética também é um critério de grande relevância, uma vez que, segundo o Balanço Energético Nacional do ano base de 2009, os edifícios comerciais respondem pelo segundo maior consumo de energia no país, perdendo apenas para os edifícios residenciais (MME, 2010). A inclusão deste terceiro critério na análise também está em consonância com as atuais iniciativas de redução do consumo de energia dos edifícios, que têm como expressão máxima a criação do processo de etiquetagem Procel Edifica para edifícios comerciais, de serviço e públicos (BRASIL, 2010a).

Nos próximos dois itens, serão apresentados alguns dos principais conceitos relacionados aos três critérios escolhidos. Optou-se por introduzir os dois primeiros - o nível de luz natural no plano de trabalho e a visualização do exterior – através dos conceitos de conforto visual, para melhor compreensão do todo do qual eles fazem parte.

3.2.1. Conforto visual

O conforto visual é um critério amplo, que está relacionado a uma série de subcritérios de caráter objetivo e subjetivo, tais como: o nível de iluminação (natural, artificial ou mista) no plano de trabalho, a uniformidade na distribuição da luz, a luminância das superfícies, as sensações psicológicas provocadas pelas cores, o ofuscamento, a proteção contra a penetração solar, e a concessão da vista para a paisagem.

É importante enfatizar que para assegurar um conforto visual para os usuários, é essencial que todos estes subcritérios sejam observados simultaneamente na concepção

arquitetônica. A satisfação de apenas alguns deles pode trazer benefícios aos usuários, entretanto, não assegura o conforto visual pleno dos mesmos.

Neste trabalho, será dado enfoque apenas ao nível de iluminação natural no plano de trabalho e a possibilidade de visualização para o exterior. Entende-se que com este recorte, não será possível avaliar globalmente os benefícios das soluções de abertura para conforto visual dos usuários, entretanto, sabe-se que se estará contribuindo para o alcance do citado objetivo.

A seguir, será feita uma breve explanação sobre os subcritérios de conforto visual enfocados nesta pesquisa.

3.2.1.1. Nível de iluminação natural no plano de trabalho

Uma das várias formas de contribuir para o conforto visual dos usuários no ambiente construído consiste em assegurar um nível satisfatório de iluminação no plano de trabalho para a execução da tarefa por eles exercida.

Uma boa iluminação exige menor esforço de adaptação do indivíduo às condições do ambiente para realizar uma atividade, evitando o seu cansaço visual (VIANNA; GONÇALVES, 2001). Ela oferece condições para a produtividade dos usuários na execução de uma determinada tarefa. Além disso, pode alterar o estado de ânimo daqueles que transitam ou ocupam um dado espaço e pode vir a influenciar a sua cognição e comportamento (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 1998; FONSECA; PORTO; CLARKE, 2002).

A iluminação de um ambiente pode ser feita por meio da luz natural, da luz artificial ou pela combinação de ambas, sendo que a iluminação natural apresenta algumas vantagens com relação à artificial. Segundo Baker, Fanchiotti e Steemers (1998), o olho humano se adapta melhor a luz natural do que a artificial, pois esta não reproduz as cores como aquela, nem varia conforme as horas do dia, reduzindo, assim, a riqueza em cores e contrastes dos objetos iluminados. Além disso, ao substituir a luz artificial pela natural, reduz-se o consumo de energia elétrica da edificação.

Dependendo dos requisitos e das características espaciais de um ambiente, é possível que a luz natural por si só não assegure uma boa iluminação para toda sua área, sendo necessário complementá-la com a luz elétrica. Segundo Castro (2005), um das formas de possibilitar a complementação dos dois tipos de iluminação consiste na divisão dos circuitos elétricos em faixas paralelas à abertura lateral, de forma que a luz elétrica só seja acionada

– manualmente ou por meio de sensores fotoelétricos – quando a luz natural não assegurar uma iluminação satisfatória para os espaços internos.

A iluminância é uma medida indicada em lux ou lumens/m² que representa a densidade de fluxo luminoso que chega a uma superfície (CORBELLA; YANNAS, 2003). Para cada tipo de tarefa visual, há um nível de iluminância adequado para que a atividade seja bem desempenhada, evitando a fadiga visual e conseqüentemente a baixa produtividade dos usuários.

A NBR 5413 – “Iluminância de interiores / especificações” – indica níveis de iluminância mínimos, médios e máximos para diferentes tarefas visuais e apresenta procedimentos para determinação da iluminância conveniente segundo a idade, a refletância do fundo da tarefa visual, a velocidade e precisão necessárias para realização da atividade. Para as atividades desempenhadas em ambientes de escritório, por exemplo, os níveis de iluminância recomendados variam de 300 até 1.500 lux.

Segundo Santos (2007), esta norma brasileira é datada da época em que a utilização de computadores ainda não era uma realidade em grande parte dos escritórios. Assim sendo, não há nela qualquer menção às necessidades lumínicas de espaços informatizados, como é o caso da maioria dos escritórios brasileiros. Atualmente, esta norma se encontra em processo de revisão.

Várias são as pesquisas que buscam na prática valores de referência para iluminância que possam ser considerados satisfatórios para ambientes de escritório onde o uso do computador é constante.

Durante uma pesquisa em espaços de trabalho informatizados, Schuler (1995) verificou que a maioria dos usuários se sentiu confortável com iluminâncias em torno de 100 lux, valor este abaixo dos 500 lux recomendado pela maioria das normas internacionais.

Lee, DiBartolomeo e Selkowitz (1999) observaram que níveis acima do comumente indicado pelas normas técnicas para este tipo de atividade são também tolerados pelos ocupantes quando não há incidência direta da radiação solar no ambiente. Em outra pesquisa desenvolvida por Roache (2002), verificou-se que em escritórios iluminados naturalmente, iluminâncias entre 700-1.800 lux são consideradas aceitáveis pelos ocupantes, tanto para o uso do computador, como para outras atividades.

Baseados nos resultados destas e de outras pesquisas, Nabil e Mardaljevic (2005) criaram o termo *Useful Daylight Illuminance* (UDI) para designar uma faixa de iluminância entre 100 e 2.000 lux considerada como aceitável para o desempenho de atividades em escritório onde há predomínio do uso do computador. Para os autores, iluminâncias abaixo de 100 lux são consideradas insuficientes, enquanto que valores acima de 2000 lux geram desconforto

visual⁷. Considera-se também que para iluminâncias entre 100 e 500 lux, a luz natural em alguns casos pode ser utilizada como única fonte de iluminação, e que valores entre 500 e 2000 lux são considerados desejáveis ou pelo menos toleráveis.

Neste trabalho, este intervalo de iluminância definido por Nabil e Mardajevic (2005) será utilizado como parâmetro de avaliação do desempenho das alternativas estudadas, como forma de comparar as condições de iluminação natural no plano de trabalho proporcionadas por cada uma delas.

3.2.1.2. Visualização para o exterior

A integração visual do espaço interior com o exterior também contribui para o conforto visual dos usuários dos edifícios, uma vez que promove um bem-estar visual, emocional e psicológico. Estes benefícios decorrem do fato de que a visualização para o exterior possibilita informações sobre o passar do dia, as condições atmosféricas reinantes, além de apresentar dados sobre um contexto social, espacial e temporal (FONSECA; PORTO; CLARKE; 2002).

A visualização para o exterior está totalmente vinculada à presença de aberturas – laterais ou zenitais – na envoltória das edificações. Quanto maiores forem as aberturas e menores as barreiras visuais a elas associadas, maior a integração com a paisagem. Estas barreiras podem ser formadas por peitoris, caixilhos, elementos de proteção solar ou mesmo algum material adotado na janela que reduza a transparência da superfície envidraçada, como as películas adesivas.

A visualização para o exterior também depende da posição em que o usuário se encontra no ambiente. Devido sua visão angular, ele tem uma percepção mais ampla da paisagem na medida em que se aproxima da janela. A altura dos olhos também influencia esta visualização. Por isso, o projetista deve identificar a atividade a ser exercida em um determinado ambiente de modo a estudar a possibilidade de uma visualização para o exterior. Por exemplo, os usuários de ambientes corporativos tendem a permanecer a maior parte do tempo sentados em suas áreas de trabalho, o que implica em desenhar janelas com peitoris mais baixos, de forma a reduzir as barreiras visuais para o exterior.

⁷ Questiona-se se este limite de 2.000 lux não estaria sendo muito rigoroso e se ele faz sentido dissociado dos efeitos do ofuscamento. Estes mesmos 2.000 lux em um ambiente com superfícies de baixa refletância certamente acarretariam efeitos totalmente diferentes daqueles gerados por superfícies de alta refletância. De fato, é um limite que poderia ser melhor estudado, mas, na falta de outro valor de referência, este será o utilizado nesta pesquisa.

Devido a sua importância, este subcritério de conforto visual é considerado por certificações que avaliam a qualidade ambiental dos edifícios, como o LEED, HQE, AQUA, BREEAM, dentre outros. Baseados nas considerações supracitadas, estes procedimentos estabelecem pré-requisitos mínimos para assegurar uma boa visualização para o exterior pelos usuários das edificações.

A certificação americana LEED, por exemplo, beneficia com um ponto aqueles edifícios cujas aberturas possibilitam aos usuários uma visualização direta para o exterior (USGBC, 2009).

A certificação inglesa BREEAM, por sua vez, indica como um dos pré-requisitos básicos de conforto visual assegurar para todas as posições em um determinado espaço de ocupação permanente uma distância máxima de sete metros para uma parede onde exista uma abertura. Esta distância pode ser ainda menor para alguns tipos de edificações, como as habitações multifamiliares, em que se exige uma distância máxima de 5 metros entre uma possível posição do usuário até uma janela (BRE, 2011). Conforme se observa, estes pré-requisitos indiretamente limitam as dimensões dos ambientes.

3.2.2. Eficiência energética

Eficiência energética pode ser entendida como a obtenção de um serviço através de um baixo dispêndio de energia elétrica. Nas edificações em geral, estes serviços se referem àqueles alimentados pela energia elétrica, como a iluminação artificial, o condicionamento artificial do ar, o funcionamento de diversos equipamentos, etc.

Segundo Mascaró e Mascaró (1992), a eficiência energética das edificações depende de três principais fatores: as condições climáticas do lugar, o desempenho térmico e luminoso da envoltória e os costumes de utilização das instalações e do edifício. Assim, pode-se dizer que a eficiência energética do edifício depende de três principais atores: o projetista, que deve buscar adequar o edifício ao contexto climático do entorno, o construtor, que deve se comprometer a empregar materiais de bom desempenho ao edifício, e o usuário, que deve instalar equipamentos elétricos com eficiência reconhecida e aproveitar ao máximo os recursos naturais disponíveis para garantia do conforto ambiental no espaço construído.

Infelizmente, a falta de comprometimento destes três atores na eficiência energética das edificações tem sido uma constante nas últimas décadas. O visível abandono dos princípios bioclimáticos pelos arquitetos em decorrência do advento da luz elétrica e de sistemas mecânicos de condicionamento de ar, bem como a importação e repetição de soluções arquitetônicas inapropriadas para as condicionantes climáticas do lugar acarretaram um aumento no consumo de energia das edificações. As construtoras e incorporadoras, por sua

vez, geralmente estão focadas na redução dos custos iniciais da construção, demonstrando pouca preocupação com os gastos decorrentes da operação do edifício, uma vez que, na maioria dos casos, não são mais responsáveis por esta etapa. Com isto, elas deixam de empregar materiais, técnicas e elementos arquitetônicos que promovam melhorias para o conforto ambiental e desempenho energético da edificação. Por fim, os usuários geralmente não têm consciência ou, por questão de hábito, não utilizam o potencial de economia que pode ser proporcionado pelo uso de meios naturais da ventilação e iluminação na climatização e ambientação dos espaços interiores.

De acordo com o Balanço Energético Nacional do ano base de 2009 (MME, 2010), aproximadamente 48% da energia total produzida no país é consumida pelas edificações, que a utilizam, principalmente, para garantia do conforto ambiental dos usuários, através do uso de sistemas artificiais de iluminação e condicionamento de ar.

As inúmeras pesquisas realizadas no Brasil nas últimas décadas apontam para a necessidade de adoção de nova postura na concepção, construção e operação das edificações como estratégia para reduzir o consumo energético gerado por elas. Em suas pesquisas, Mascaró (1991) e Lamberts, Dutra e Pereira (1997) incentivam a uma retomada de estratégias bioclimáticas no projeto para a concepção de edifícios melhor adaptados ao meio em que se inserem, e identificam os principais parâmetros de projeto que influenciam no desempenho energético da edificação. Mascaró e Mascaró (1992) enfatizam que 25 a 45% da energia são consumidos indevidamente por má orientação da edificação e por desenho inadequado de suas fachadas e acrescenta que 20 a 30% da energia consumida seriam suficientes para o funcionamento da edificação, o que comprova a necessidade de reavaliar as estratégias projetuais recorrentes.

Diante desta problemática, em 2003, no Brasil, foi criado pelo Procel (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica), o programa Procel Edifica, como resposta a Lei nº 10.295, decretada em 2001, que dentre outros aspectos, aponta a necessidade do desenvolvimento de mecanismos que promovam a eficiência energética nas edificações construídas no país (BRASIL, 2001). O Procel Edifica foi criado tendo como objetivo estimular e divulgar a aplicação de conceitos de eficiência energética em edifícios desde a fase de concepção projetual até sua gestão, apontando o uso dos recursos naturais (água, luz, ventilação, etc.) na edificação como uma das diversas formas de conservação energética.

A fim de garantir a prática efetiva desses princípios, o Procel, junto ao Inmetro, implementou em 2009 a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) para edifícios comerciais, de serviços e públicos, e em 2010, a ENCE para edifícios residenciais unifamiliares e

multifamiliares. Ainda de caráter voluntário, esse processo de etiquetagem certifica edificações novas, classificando-as em um dos cinco níveis de eficiência energética pré-definidos. Cada um desses níveis apresenta requisitos com maior ou menor rigor quanto à eficiência energética da edificação, resultante da relação do desempenho de sua envoltória (fachadas e cobertura), sistema de iluminação e de condicionamento de ar.

Os Regulamentos Técnicos da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) e de Edificações Residenciais (RTQ-R) são documentos que especificam requisitos técnicos, bem como métodos para classificação de edifícios de usos supracitados quanto à eficiência energética. Para garantir a conservação de energia nas edificações, eles recomendam aos arquitetos, dentre uma série de medidas, a adequação da envoltória ao contexto climático do lugar, seja quanto à transmitância e absorvância térmica dos materiais que compõem as fachadas e cobertura, seja quanto ao cuidado no dimensionamento das aberturas e dos elementos de proteção solar.

Os regulamentos incentivam também a adoção de estratégias passivas – iluminação e ventilação naturais – e indicam o emprego de equipamentos com eficiência energética reconhecida. Iniciativas que aumentem a eficiência da edificação, como a aplicação de sistemas ou fontes renováveis de energia, inovações técnicas que reduzam o consumo energético e a contribuam para a racionalização do uso de água, recebem uma bonificação na classificação geral do desempenho do edifício.

A eficiência energética dos edifícios também é um dos critérios destacados por certificações que avaliam a alta qualidade ambiental do edifício, como o LEED, HQE, AQUA, BREEAM, dentre outros. O consumo de energia pela edificação é considerado nestas certificações de forma mais ampla, pois além de avaliarem a demanda energética prevista para a operação do edifício, analisam o dispêndio de energia desencadeado pela produção dos materiais de construção e também pelo transporte deles ao canteiro de obras. No que diz respeito à etapa de operação do edifício, elas destacam a importância da redução da demanda energética pela aplicação de estratégias bioclimáticas, do uso de fontes energéticas renováveis e do emprego de equipamentos eficientes.

3.3. As restrições

3.3.1. Restrições relativas aos dois critérios relacionados ao conforto visual

Como restrição aplicada à concepção das alternativas a fim de assegurar o bom desempenho das soluções face aos critérios de nível de iluminação natural no plano de trabalho e visualização para o exterior, adotou-se:

- a proteção contra penetração solar no ambiente durante seu horário de ocupação, objetivando evitar níveis de iluminância excessivo no plano de trabalho, além da redução dos ganhos térmicos pela edificação;
- a garantia de visualização para o exterior, reduzindo ao máximo as barreiras visuais sem que isso comprometa a observância à restrição relativa à penetração solar.

3.3.2. Restrições relativas à eficiência energética

Para o critério eficiência energética, serão consideradas como restrições para a composição das alternativas os pré-requisitos da envoltória definidos pelo RTQ-C para edifícios que visam o selo A, de alta eficiência energética (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Restrições do RTQ-C para a envoltória de edifícios que visam o selo A.
Fonte: BRASIL, 2010a.

Propriedade dos materiais da envoltória	Restrições para o selo A (Zona Bioclimática 8)
Transmitância térmica da cobertura (Ucob) de ambientes condicionados artificialmente	$\leq 1,00 \text{ W/m}^2\text{K}$
Transmitância térmica das paredes externas (Upar) de ambientes condicionados artificialmente	$\leq 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$
Absortância dos materiais das paredes	$< 0,50$
Absortância dos materiais das coberturas	$< 0,50$

3.4. Os parâmetros

Tendo como base os critérios escolhidos para a realização da análise, foi selecionado um grupo de parâmetros de projeto: os parâmetros relativos às aberturas laterais da edificação.

As aberturas laterais ou janelas são elementos arquitetônicos presentes na envoltória das edificações. Elas constituem um dos componentes mais sensíveis do edifício sob o ponto de vista do conforto ambiental e da eficiência energética, uma vez que é através deste elemento do envelope que a radiação solar penetra na edificação – seja em forma de luz ou em forma de calor –, e que o vento é captado, aumentando as trocas térmicas entre o exterior e interior. Além disso, é através das janelas que o ruído externo, a poluição e os odores são captados para os espaços interiores. Desta forma, é de fundamental importância atentar para a influência que as variáveis da abertura – tais como dimensão, sombreamento, tipologia, posição na fachada, orientação e materiais de composição – apresentam para o desempenho do edifício.

Para esta pesquisa, foram escolhidos três destes parâmetros – dimensão, sombreamento e materiais – para serem variados e comporem alternativas de projeto distintas, cujos desempenhos serão comparados simultaneamente sob o ponto de vista dos três critérios de análise.

Nos itens a seguir, serão indicados como estes três parâmetros da abertura estão relacionados aos critérios escolhidos e quais são as possibilidades de variações que eles apresentam para compor soluções de projeto. Em complementação a esses dados, serão apresentados resultados de algumas pesquisas que possam apontar quais variações são mais indicadas para cada orientação de fachada estudada para se alcançar um bom desempenho da edificação sob o ponto de vista dos três critérios escolhidos. Acredita-se que a coleta prévia destas informações possa ser bastante útil para que sejam consideradas no processo de análise apenas aquelas alternativas satisfatórias face aos três critérios.

3.4.1. Dimensão das aberturas

A dimensão das aberturas tem uma destacada influência na quantidade de radiação solar e vento captados para o interior da edificação. Quanto maior a área da abertura, maior será a quantidade de energia trocada entre os ambientes interior e exterior. Portanto, deve-se buscar dimensioná-la de forma que não prejudique a qualidade energético-ambiental do espaço construído, tanto no inverno como no verão.

O Percentual de Abertura na Fachada (PAF), também conhecido como *Window-to-Wall Ratio* (WWR), é o principal indicador relacionado à dimensão das aberturas de uma edificação. Este índice representa a razão entre a área de aberturas de uma fachada – desconsiderando a área ocupada pelos caixilhos – e a área total da fachada onde se encontram estas aberturas. Ressalta-se que, sendo o PAF relativo a uma única fachada do edifício, pode-se inferir, segundo este conceito, que uma edificação pode apresentar diferentes PAF's, cada um relativo a uma de suas fachadas.

O RTQ-C introduz, ainda, um outro conceito relacionado à dimensão das aberturas de um edifício: o Percentual de Abertura na Fachada total (PAFt). O que difere este indicador do PAF é que ele representa um percentual único de abertura na fachada para toda a edificação. O PAFt é calculado pela razão entre a soma das áreas de aberturas envidraçadas ou com fechamentos transparentes ou translúcidos de todas as fachadas e área total das fachadas da edificação (BRASIL, 2010a).

Na realidade, o PAF se mostra um indicador mais sensível que o PAFt, pois permite visualizar a proporção de área de janela contida em uma fachada, possibilitando prever, ainda que superficialmente, o impacto que isto pode trazer para a qualidade energético-

ambiental do edifício. Ao considerar todas as aberturas e fachadas ao mesmo tempo, o PAFt pode mascarar esta proporção. Em casos como o do edifício estudado, em que há aberturas em apenas duas de suas fachadas, e que grande parte de sua envoltória é composta por superfícies opacas de grande extensão (empenas cegas), o valor do PAFt pode ser muito baixo e inclusive mascarar grandes superfícies envidraçadas presentes em uma determinada fachada.

Por este motivo, para aplicação do método prescritivo do RTQ-C, o regulamento exige que se verifique se o valor do PAF da fachada oeste (PAFo) – a fachada mais sacrificada pela incidência da radiação solar – é pelo menos 20% maior que o PAFt do edifício. Se isto ocorrer, considera-se o PAFo nos cálculos do indicador de consumo de energia da edificação, visto que extensões relativamente elevadas de aberturas na fachada oeste irão impactar significativamente na eficiência energética do edifício.

Por ser um indicador mais sensível, e por ser mais comumente adotado na literatura, será utilizado o PAF como indicador de dimensão das aberturas a serem propostas neste trabalho. O valor do PAFt só será utilizado quando da aplicação do método prescritivo do RTQ-C para análise da eficiência energética das alternativas de projeto.

Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas para avaliar a relação do PAF com o conforto ambiental e a eficiência energética das edificações. Uma pesquisa realizada para edifícios comerciais da cidade de Salvador (MASCARENHAS et al., 1995) revela que edificações condicionadas artificialmente e com fachadas envidraçadas, notadamente aqueles com PAF maior que 40%, apresentam um desempenho energético mais baixo que a média das edificações em cujo envelope predomina superfícies opacas ou cujas aberturas são protegidas parcial ou totalmente por brises (Tabela 3.3)⁸.

Tabela 3.3 – Relação entre PAF e consumo mensal médio de energia elétrica em edifícios comerciais de Salvador-BA. Fonte: adaptado de MASCARENHAS et al., 1995.

Nome da tipologia	PAF	Consumo mensal médio por unidade de área (kWh/m ²)
Pesada	≤ 20%	6,7
Média	> 20% e < 40%	7,4
Envidraçada	≥ 40%	10,9
Protegida	-	7,0

⁸ É válido destacar que estas conclusões só se aplicam para edificações cujas janelas permanecem fechadas, não sendo possível aproveitar a ventilação natural para o conforto higrotérmico dos usuários. Caso contrário, um PAF poderia tornar o edifício mais eficiente do ponto de vista energético, uma vez que a vazão de ar no ambiente seria incrementada, possivelmente reduzindo ou mesmo eliminando o uso de sistemas de condicionamento artificial na edificação.

Oliveira e Melhado (2009), por sua vez, defendem que, para garantir um bom desempenho energético do edifício, as fachadas devem apresentar um PAF menor que 50%, tal como especifica a ASHRAE 90 (2004).

É importante ressaltar que, além de impactarem no consumo de energia, grandes aberturas também podem comprometer o conforto visual nas edificações. Se por um lado propiciam uma desejável integração entre o exterior e o interior, contribuindo para o bem-estar do usuário, por outro, grandes áreas envidraçadas podem gerar níveis de iluminância acima do aceitável nos ambientes, prejudicando a realização de determinadas tarefas.

Conforme se observa nestas pesquisas, não há um consenso quanto ao PAF recomendado para garantir o conforto visual e a eficiência energética das edificações brasileiras. No entanto, observa-se que quanto menor a latitude da cidade, mais restrições devem ser feitas quanto ao emprego de grandes superfícies envidraçadas nas fachadas.

3.4.2. Material de composição das aberturas

As características do material que compõe as aberturas influenciam na parcela da radiação solar que é transmitida, absorvida e refletida por elas. Por isso, é importante atentar para as propriedades destes materiais quando eles forem especificados em um projeto.

Atualmente, grande parte das esquadrias empregadas na construção civil é composta por superfícies semi-transparentes ou translúcidas, como vidros e policarbonatos. Sendo o vidro o material mais utilizado atualmente, será dado enfoque neste trabalho as suas propriedades.

De acordo com Olgay (2008), o vidro pode ser até trinta vezes mais vulnerável aos efeitos solares que a parede opaca, devido a sua alta condutividade térmica e baixa inércia térmica, se comparado a alvenaria.

As características do vidro que mais influenciam na quantidade de radiação solar que é transmitida para o interior da edificação são a espessura, a composição e o tratamento a ele aplicado.

De acordo com Caram (1998), quanto maior a espessura do vidro, menor é a radiação transmitida por ele, devido ao aumento da absorção dos raios pelo material. Como se observa no Gráfico 3.2, nos vidros incolores de 1 e 3mm, essa variação é mais significativa para os raios ultravioletas (100 a 400nm) e menos perceptiva para regiões mais próximas do visível (380 a 480nm). Entretanto, outras pesquisas comprovam que, para vidros coloridos, a espessura influi de forma mais significativa, principalmente no que se refere à transmissão dos raios visíveis.

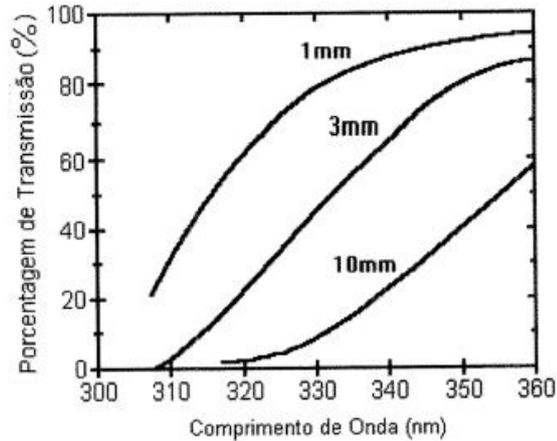


Gráfico 3.2 – Transmissão para várias espessuras de vidros incolores de janelas. Fonte: KOLLER (1952) apud CARAM (1998).

A adição de uma determinada quantidade de um óxido específico na composição do vidro, além daquela comumente presente neste material, influencia em sua coloração, modificando suas propriedades de absorção e reflexão. Por exemplo, a concentração de óxido de ferro (Fe_2O) resulta na coloração verde do vidro, o que faz com que comprimentos de onda referente a esta cor sejam refletidos pelo material. A Tabela 3.4 indica outras relações entre a coloração apresentada pelo vidro e o óxido adicionado à sua composição.

Tabela 3.4 – Relação entre a coloração do vidro e o óxido adicionado a sua composição. Fonte: CARAM, 1998.

Coloração	Óxido adicionado
Verde	Fe_2O
Azul/verde	CuO
Vermelha	Cu_2O
Branca opaca	SnO_2
Púrpura	MnO_2
Azul	CoO

Verifica-se também que dependendo do tratamento aplicado ao vidro – têmpera, laminação ou metalização – suas propriedades ópticas também podem ser alteradas (CARAM, 1998).

Em uma pesquisa que avaliou a influência do tipo de vidro no consumo energético de edificações localizadas em Belo Horizonte e São Paulo, Motta (2007) detectou que a variação da espessura deste material tem menor interferência na eficiência energética da edificação. Resultados de simulações computacionais indicaram que um aumento de 50% da espessura do vidro reduziu em 4,5% o custo de condicionamento devido à janela. Por outro lado, a alteração de sua cor produziu resultados mais expressivos quanto ao consumo energético da edificação, tendo o vidro verde se destacado dentre os estudados por reduzir a demanda de energia em 27%.

O índice mais importante relacionado aos meios semi-transparentes é o Fator Solar, que representa a soma da porcentagem da transmissão solar direta que ocorre através do vidro mais a parcela da energia absorvida por ele e re-irradiada para o interior (OLGYAY, 1973; GIVONI, 1981; FROTA e SCHIFFER, 2007). Um fator solar de 0,87, por exemplo, indica que 87% da radiação solar que incide no vidro é parte transmitida diretamente e parte reincidenta para o interior após ser absorvida pelo material.

O fator solar é o único índice relacionado às propriedades do vidro incluído no método prescritivo proposto pelo RTQ-C e RTQ-R para o cálculo do índice de consumo de energia da edificação. Os regulamentos também estabelecem limites de fator solar para os vidros utilizados em aberturas zenitais, os quais variam de acordo com o percentual de áreas envidraçadas nas coberturas e com o nível de eficiência energética almejado para a edificação.

Apesar de sua importância em indicar a parcela de radiação transmitida e re-irradiada, este índice não é suficiente para identificar quanto desta radiação fornece luz e quanto dela transmite calor para o ambiente.

Tendo em vista que o vidro tem uma transparência seletiva à radiação em função do comprimento de onda, é de fundamental importância ter conhecimento sobre as características espectrofotométricas dos tipos de vidro disponíveis no mercado, buscando aqueles que apresentem boa transmissão da radiação visível (380 a 480nm) e reduzida transmissão da região do espectro referente ao infravermelho (780 a 10000nm). Vidros que apresentam estas propriedades são ideais para regiões de clima quente, pois possibilitam um melhor aproveitamento da luz natural sem que haja um incremento significativo da temperatura interna. O Gráfico 3.3 apresenta a curva de transmissão espectral destes vidros considerados mais eficientes.

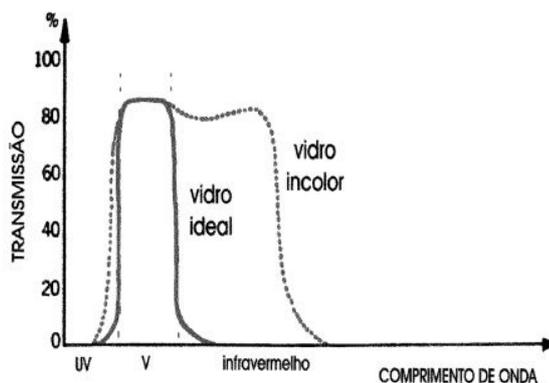


Gráfico 3.3 – Curva de transmissão espectral ideal para envidraçados que atuam como redutores de calor no edifício e sua comparação com o vidro incolor. Fonte: CARAM, 1998.

Observando a dificuldade da obtenção de informações sobre as características espectrofotométricas dos vidros pelos fabricantes, Caram (1996; 1998) e Pereira e Ferreira (2007) avaliaram o comportamento de diversos vidros disponíveis no mercado. Os autores consideraram o comportamento dos vidros nas várias regiões do espectro solar (ultravioleta, visível e infravermelho), a fim de auxiliar os arquitetos na especificação deste material. A Tabela 3.5 apresenta um resumo dos resultados obtidos por Caram (1996).

Tabela 3.5 – Tipos de vidros e transmissão da radiação nos intervalos ultravioleta, visível e infravermelho. Fonte: adaptado de Caram (1996).

Tipo de vidro	Espess. (mm)	Transmissão relativa ao intervalo característico (%)			Transmissão total (%)
		ultra-V	Visível	Infra-V	
Incolor (monolítico float)	4	39	88	77	78
	6	38	86	70	72
Cinza (monolítico float)	4	14	57	56	54
	6	12	46	43	42
Bronze (monolítico float)	4	14	61	57	56
	6	11	49	54	52
Verde (monolítico float)	4	18	71	43	48
	6	16	68	40	45
Refletivo Incolor (pirolítico)	6	6	34	60	53
Refletivo prata (pirolítico)	6	18	54	63	60
Refletivo cinza (pirolítico)	6	11	43	72	63
Refletivo bronze (pirolítico)	6	5	28	45	40
Refletivo verde (pirolítico)	6	5	53	42	43
Laminado incolor	6	2	85	63	65
Laminado cinza	6	1	45	55	51
Laminado bronze claro	6	1	53	55	52
Laminado bronze escuro	6	1	31	42	38
Laminado verde	6	2	81	65	66
Laminado rosa	6	1	52	55	52
Laminado azul	6	1	75	65	64

É importante esclarecer que a transmissão total indicada não corresponde ao fator solar, pois não inclui o que é re-irradiado para o interior do ambiente após absorção pelos meios materiais. Vale ressaltar também que, devido à opacidade do vidro aos comprimentos de onda inferiores à 300nm e superiores à 4000nm (CARAM, 1998), o intervalo relativo ao ultravioleta e ao infravermelho indicadas na tabela acima correspondem aproximadamente aos intervalos de comprimentos de onda de 300 e 400nm e 780 e 4000nm, respectivamente.

A tabela destaca características interessantes, como as apresentadas pelo vidro verde e reflexivo cinza. O primeiro permite uma boa iluminação ao mesmo tempo em que atenua a transmissão da radiação infravermelha, atuando como redutor de calor. Já o reflexivo cinza comporta-se de forma contrária, pois minimiza a transmissão da luz visível de maneira significativa e é bastante transparente ao infravermelho.

Caram (1998) ressalta que, dentre os testados, o vidro verde destaca-se como um dos mais eficientes, por ter suas características espectrofotométricas próximas ao do “vidro ideal”.

Outro aspecto que merece destaque é o fato de que as superfícies transparentes distintas, mas de mesma cor, não possuem o mesmo comportamento ótico, como observado nos vidros laminados e nos vidros laminados comuns. Por exemplo, o vidro laminado verde possui transparência distinta do vidro plano verde, sendo semelhantes apenas na região do visível.

Como visto, a especificação do vidro que irá compor a esquadria empregada nos edifícios deve levar em consideração não somente o fator solar, mas também sua capacidade de transmissão nas diferentes regiões do espectro. Assim, será possível fazer uma decisão consciente dos impactos que este material pode gerar para o conforto visual dos usuários e o consumo energético das edificações.

3.4.3. Sombreamento das aberturas

O sombreamento é outro parâmetro da abertura que se relaciona diretamente às condições de conforto visual e eficiência energética das edificações. Geralmente, está relacionado à existência ou ausência de elementos de proteção solar integrados às fachadas.

Os elementos de proteção são anteparos associados às superfícies semi-transparentes ou translúcidas para interceptar os raios solares, reduzindo a radiação que é transmitida para o interior da edificação. Sendo uma proteção bem projetada sob o ponto de vista geométrico, pode permitir adequado uso da luz natural, com aproveitamento da luz refletida por seus elementos (FROTA, 2004). Também é importante por minimizar os ganhos de calor no edifício, possibilitando a redução do uso de sistemas artificiais de condicionamento de ar e, conseqüentemente, do consumo de energia na edificação.

O simples emprego de elementos de proteção solar, no entanto, não garante a melhoria do conforto ambiental e eficiência energética do edifício. É importante que estes sejam projetados a partir da análise das trajetórias solares, e que se tenha conhecimento de que algumas de suas características – como orientação, posição na fachada, cor, forma e mecanismo de funcionamento – podem influenciar no seu desempenho.

Um dos elementos de controle solar mais conhecidos é o *brise-soleil* (quebra-sol), um dispositivo formado por lâminas horizontais, verticais ou combinadas. Há ainda os elementos cerâmicos vazados (ou cobogós), muxarabis, gelosias, marquises, toldos, prateleiras de luz (ou *lightshelf*), pergolados, venezianas, sacadas, varandas, cortinas, persianas, dentre outros.

Os protetores solares podem ser classificados quanto à posição que ocupam nas fachadas – verticais, horizontais ou mistos –, quanto a movimentação – móveis ou fixos - e quanto à localização relativa às aberturas – internos, externos ou dentro da esquadria. (RIVERO, 1985; BITTENCOURT, 1996).

Protetores verticais são elementos situados perpendicularmente em relação ao plano horizontal da fachada, enquanto que os horizontais são elementos cujos eixos horizontais estão paralelos à fachada a ser protegida.

Há orientações em que protetores horizontais ou verticais, sozinhos, não conseguem fazer o controle eficaz da radiação solar. Elementos mistos, que combinam peças verticais e horizontais, são os mais indicados nestes casos.

Quanto à movimentação, os protetores solares podem ser fixos ou móveis. Estes últimos são aqueles constituídos por elementos flexíveis que podem ser movimentados mecânica ou automaticamente, permitindo uma modificação de sua orientação, de forma a acompanhar o movimento do sol e satisfazer a necessidade dos usuários quanto a maior ou menor iluminância no espaço. Segundo Frota (2004), uma das desvantagens dos sistemas móveis é que dependem de uma manutenção freqüente para não comprometer seu desempenho.

Os protetores podem estar localizados interna ou externamente ao edifício, ou mesmo situados dentro da própria esquadria. Os dispositivos internos são aqueles em que a radiação solar primeiro atinge a esquadria para, posteriormente, incidir sobre eles, enquanto que os externos barram uma parcela da radiação solar antes de atingir a abertura. Nos protetores situados entre as folhas de vidro – geralmente, persianas -, o que ocorre com a radiação solar é um misto entre o que acontece com os protetores externos e os internos.

Segundo Givoni (1981) e Olgyay (2008), o protetor externo tende a ser mais eficiente, pois barra a radiação solar antes de atingir a abertura e evita que os raios solares, ao se transformarem em calor, aumentem a temperatura no interior da edificação. De fato, conforme indicado por Olgyay (2008) em uma pesquisa que compara o desempenho de diversos tipos de protetores solares, os dispositivos externos podem apresentar uma eficiência de até 35% maior que o protetor interno.

Givoni (1981) realizou uma pesquisa em um edifício localizado em Israel para quantificar a influência da cor dos protetores solares externos e internos nos ganhos de calor. Para uma situação em que as janelas permanecem fechadas, os resultados comprovaram que o desempenho térmico da edificação é melhor quando seus dispositivos externos apresentam cor escura e quando seus protetores internos apresentam cor clara.

Segundo o autor, protetores externos com cores escuras tendem a absorver uma maior parcela da radiação solar, que, ao ser re-irradiada como infravermelho longo (acima de

3000nm), não é transmitida para o interior do edifício, devido à opacidade do vidro a estes comprimentos de onda.

Por outro lado, protetores internos com cores claras tendem a refletir uma maior parcela da radiação solar, absorvendo apenas uma pequena parte dela. A parcela refletida – composta principalmente por ondas visíveis – incrementa a iluminação do ambiente, pouco afetando na temperatura interna à edificação.

É importante lembrar que esta pesquisa se concentra na influência da cor apenas sobre o desempenho termo-energético da edificação. Pesquisas com a de Fiuza (2008) comprovam que protetores de cores escuras, por apresentarem uma baixa reflexão da radiação, podem prejudicar significativamente o aproveitamento da luz natural nos espaços interiores. Da mesma forma, não faz sentido empregar cores escuras na face superior de prateleiras de luz, pois seus desempenhos dependem em grande parte da alta reflexão de seus materiais de composição.

Em contraposição as ideias de Givoni (1981), Frota (2004) defende o uso de cores claras nas faces do protetor expostas ao sol – independente se externos ou internos – para evitar maior sobreaquecimento desta superfície, o que pode ser prejudicial não só para o edifício como para seu entorno imediato. De fato, a pesquisa supracitada está focada exclusivamente no desempenho do edifício estudado, desconsiderando o aumento da temperatura gerado por protetores externos de cores escuras às edificações vizinhas.

Frota (2004) também ressalta a importância de estabelecer uma distância mínima de trinta centímetros entre o dispositivo sombreador e a superfície da fachada, o que evitará a transmissão do calor por condução no contato desta com aquele e possibilitará a ventilação deste espaço, evitando o sobreaquecimento da envoltória.

No RTQ-C e RTQ-R, os elementos de proteção solar também são considerados nos cálculos do índice de consumo de energia. Seu emprego é indicado por meio dos ângulos de sombreamento vertical (AVS), gerado por protetores horizontais, e horizontal (AHS), gerado por dispositivos verticais. Até o momento, os regulamentos não exigem como pré-requisito comprovar a eficiência dos protetores, o que faz com que, no método prescritivo, seus desempenhos sejam generalizados por meio dos ângulos de sombreamento (FONTENELLE; SANTOS; 2011). Neste caso, a simulação computacional pode superar esta lacuna, pois quantifica os efeitos reais dos protetores solares no conforto visual e no consumo energético da edificação.

CAPÍTULO 04 – ETAPAS DA APLICAÇÃO

Uma vez definidos os elementos da análise multicritério proposta para este trabalho, será neste capítulo descrito todo o processo a ser percorrido até a seleção de uma alternativa de projeto para as aberturas das fachadas Sudeste e Noroeste do edifício de escritórios.

4.1. Etapa 01: Definição das alternativas

A primeira etapa da análise multicritério consistiu em conceber as alternativas de projeto para as aberturas do edifício, a partir dos parâmetros pré-definidos: dimensão, sombreamento e material de composição das aberturas.

Com o intuito de limitar o número de soluções avaliadas, a composição das alternativas foi baseada nas restrições de projeto previamente definidas, bem como em outros aspectos limitadores de caráter objetivo e subjetivo.

Inicialmente foi traçado um partido formal para o projeto, isto é, uma diretriz projetual que represente os anseios estéticos da arquiteta para o envelope do objeto arquitetônico. Entende-se que a definição desses aspectos subjetivos é de fundamental importância para que a criação das alternativas não seja uma mera combinação de variáveis, e sim, decorrente, dentre outros aspectos, de uma reflexão sobre o resultado formal que se pretende alcançar.

Além do partido formal, foram também estabelecidas algumas premissas de projeto, de caráter objetivo, que dizem respeito à ocupação do edifício, à manutenção dos elementos arquitetônicos, à exequibilidade da solução, dentre outras questões. As três primeiras delas correspondem às restrições anteriormente definidas. As demais estão relacionadas a outros critérios de projeto, que apesar de não terem sido destacados no início do processo, inevitavelmente são introduzidos nesta etapa para garantir a qualidade das soluções propostas. São elas:

- Proteger o edifício da radiação solar direta, evitando a penetração dos raios solares pelas aberturas durante o período de ocupação previsto para a edificação (8 às 18 horas);
- Garantir ao máximo a visualização para o exterior;
- Empregar materiais construtivos cujas propriedades satisfaçam aos pré-requisitos estabelecidos pelo RTQ-C para edifícios situados na Zona Bioclimática 8 que almejam a etiqueta A, de mais alta eficiência energética;

- Garantir que o posicionamento dos elementos de proteção solar não prejudique a operabilidade, a limpeza e manutenção das esquadrias;
- Evitar que os protetores solares avancem mais de um metro da projeção da fachada, para não tornar a execução do projeto muito complexa;
- Criar peças que apresentem flexibilidade de aplicação para fachadas de orientação opostas, evitando a criação de uma grande variedade de elementos que torne o custo da execução muito elevado;

Uma vez listadas tais restrições de projeto, foi dado início à concepção das alternativas. O primeiro passo consistiu em estudar a carta solar do Rio de Janeiro, identificando que ângulos de sombreamento são necessários para bloquear a penetração do sol entre as 8 e 18 horas ao longo do ano pelas aberturas localizadas nas fachadas de azimute 108° (Sudeste) e 288° (Noroeste).

Conforme se observa na Figura 4.1, detectou-se que as aberturas da fachada Sudeste devem ser sombreadas por elementos de proteção solar fixados horizontalmente à janela e inclinados de forma que o ângulo vertical de sombreamento⁹ (α) seja menor ou igual a 25°. Para a fachada Noroeste, a proteção horizontal deve ser ainda mais rigorosa, de forma que a inclinação dos brises assegure o bloqueio contra a penetração de raios de altura solar de 0°.

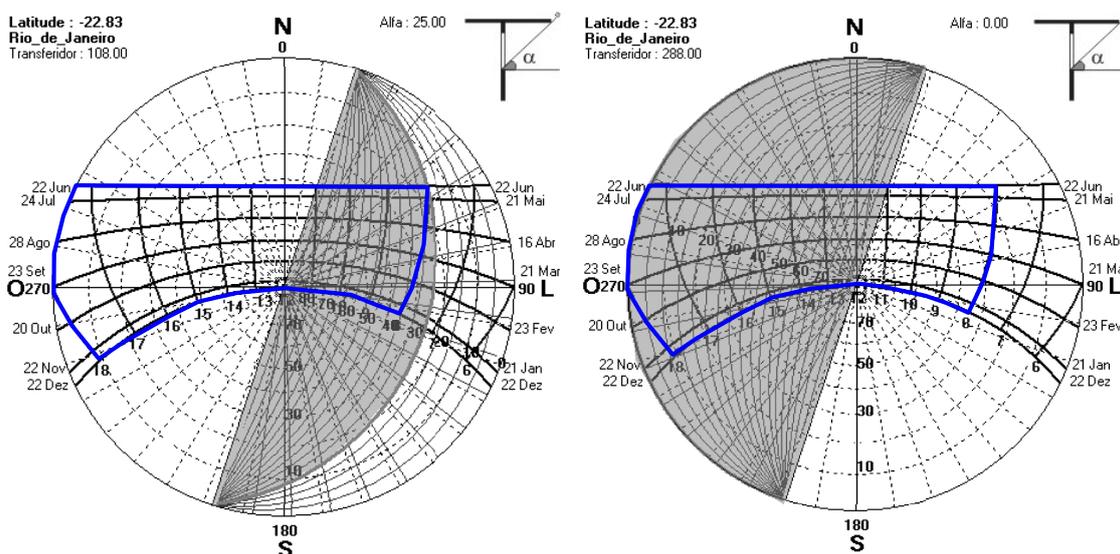


Figura 4.1 – Estudo das máscaras de sombra previstas para os protetores. Em azul: horário de ocupação. Fonte: aplicação do programa Analysis SOL-AR (LABEEE, 2009).

⁹ Os ângulos de sombreamento aqui mencionados se referem ao ângulo externo, isto é, o ângulo formado entre um plano normal à fachada e outro formado pela extremidade mais distante da proteção solar horizontal até a base da folha de vidro.

Baseando-se nestes estudos, foram definidas as soluções de sombreamento para compor as alternativas. Dois elementos de proteção – anteparo e brises horizontais fixos – foram propostos, sendo o primeiro variado quanto sua presença ou ausência e o segundo quanto a sua quantidade e inclinação.

A quantidade e inclinação dos brises horizontais variaram, respectivamente, de acordo com a altura e orientação da janela, de forma a sempre garantir o bloqueio da penetração solar no período de ocupação do edifício.

O anteparo horizontal, quando presente, faz composição com os brises para assegurar a proteção total das aberturas contra a radiação nos horários próximos ao meio dia. Quando ausente, é substituído pelos mesmos brises fixados horizontalmente e inclinados, sombreando a janela neste horário (Figura 4.2).

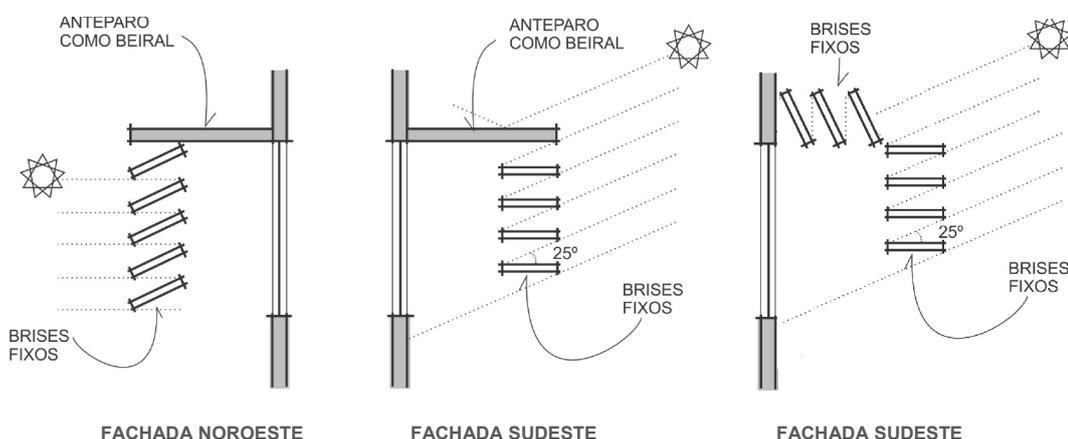


Figura 4.2 – Esquemas de composição do sombreamento das aberturas. Fonte: a autora.

Descartou-se a possibilidade de adotar tais anteparos horizontais como prateleiras de luz, uma vez que foi verificado através de simulações testes que este tipo de dispositivo não funciona de forma satisfatória para as orientações em questão, apresentando uma contribuição pouco expressiva no aumento dos níveis de iluminância nos espaços interiores mais distantes das janelas.

Além das alternativas com proteção, também foram concebidas duas soluções em que as aberturas não são protegidas por nenhum dispositivo de sombreamento, mas empregam um vidro com baixa transmissão do visível. Apesar de a linguagem arquitetônica resultante desta solução se distanciar um pouco daquela proposta pelas alternativas com elemento de proteção, julgou-se importante avaliar se o sombreamento das janelas é imprescindível para proporcionar o conforto visual dos usuários e a redução no consumo de energia elétrica. Por este motivo, estas soluções também foram incluídas na análise.

Para assegurar a operabilidade da esquadria – do tipo basculante – foi necessário criar um espaçamento entre os brises horizontais e a superfície envidraçada, atentando para o limite máximo de um metro de avanço com relação à fachada.

No que diz respeito ao parâmetro dimensão da abertura, foram propostas duas variações, que correspondem exclusivamente às diferenças de altura das janelas pela presença ou ausência de um peitoril em alvenaria. Os Percentuais de Abertura na Fachada (PAF) equivalentes a estas duas soluções são, aproximadamente, de 37 e 52%.

Os PAF's foram calculados da seguinte forma: somou-se a área de superfície envidraçada da fachada Sudeste excluindo-se a área dos caixilhos, e dividiu-se este valor pela área total da mesma fachada (largura multiplicada pela altura do edifício). O mesmo foi feito para a fachada Noroeste. O PAF encontrado é o mesmo para as duas fachadas, pois as dimensões das aberturas são idênticas para ambos os casos.

Os tipos de vidro escolhidos para serem testados nas aberturas dos pavimentos tipo diferem não só quanto à transmissão na faixa visível, mas também no infravermelho (Tabela 4.1). O vidro com maior transmissão do visível será adotado nas alternativas em que a abertura está associada a elementos de proteção solar, enquanto que o de baixa transmissão do visível será empregado em aberturas não sombreadas. Neste último caso, os ganhos térmicos decorrentes da ausência de proteção também são minimizados pela baixa transmissão de raios infravermelhos pelo vidro.

Tabela 4.1 – Características dos vidros testados.

Características	Vidro A (VA) ¹⁰	Vidro B (VB) ¹¹
Nome	Cool lite KNT	Float incolor
Fabricante	Cebrace	AFG
Aparência	incolor	incolor
Espessura total (mm)	24 (6 v + 12 ar + 6 v)	25 (6 v+13 ar +6 v)
Transmissão luminosa (%)	46	78
Absorção (%)	50	29
Fator Solar	0,37	0,70
Valor U (W/m ² °C)	1,89	3,20

Optou-se por adotar vidros insulados (duplos), visando aumentar o isolamento acústico do edifício, que fica próximo a vias de grande movimento. Apesar da diferença de suas características ópticas, os vidros testados apresentam a mesma tonalidade (incolor), satisfazendo aos anseios estéticos pré-definidos.

¹⁰ Dados retirados do Catálogo Técnico da Cebrace. Disponível em: <<http://www.cebrace.com.br/v2/produtos-aplicacoes/produtos/7>>. Acesso em: junho/2011.

¹¹ Dados retirados do Banco de Dados de Vidro da FAU-USP. Disponível em: <<http://www.usp.br/fau/deptecnologia/docs/bancovidros>>. Acesso em: junho/2011.

Com exceção dos parâmetros dimensão, sombreamento e material de composição, todas as demais variáveis relativas às aberturas foram fixadas, tais como cor, material e dimensão dos caixilhos e elementos de proteção solar. Estes e outros parâmetros fixados estão descritos na tabela a seguir (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Características dos parâmetros de abertura fixados.

Parâmetros fixados	Característica
Caixilhos	Material: alumínio
	Cor: cinza claro (reflexão = 70%)
	Espessura: 50 mm
Brises	Material: alumínio
	Cor: cinza claro (reflexão = 70%)
	Espessura: 15 mm
Marquise	Profundidade: 500 mm
	Material: alumínio
	Cor: branco (reflexão = 88%)
Vidro	Espessura: 100 mm
	Profundidade (a partir da fachada): 1 m
	Tipo: insulado (duplo)
	Espessura total: 24-25 mm

Em suma, para criação das alternativas das aberturas voltadas para Sudeste e Noroeste, foram consideradas 2 variações para o parâmetro dimensão da abertura, 2 para seu material de composição e 3 para o sombreamento das janelas, conforme sintetizado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Características dos parâmetros de abertura variados.

Parâmetros variados	Nomenclatura	Variações
Dimensão	37%	PAF = 37% (com peitoril)
	52%	PAF = 52% (sem peitoril)
Material	VA	Vidro incolor (Transm. luminosa = 46%)
	VB	Vidro incolor (Transm. Luminosa = 78%)
	SP	Ausência de sombreamento horizontal
Sombreamento	CP1	Beiral (anteparo) acima + brises horizontais fixos em frente à abertura
	CP2	Brises horizontais fixos acima e em frente à abertura

Observa-se que se fosse feita a combinação de todas estas variações, seria 12 o número de alternativas de projeto concebidas. Entretanto, como será visto a seguir, apenas 6 soluções serão incluídas na análise.

A redução do número de alternativas para a metade decorreu da incompatibilidade de empregar um vidro de baixa transmissão do visível em uma abertura já sombreada por protetores, visto que, conforme verificado em simulações testes, esta combinação inviabiliza um aproveitamento satisfatório da luz natural no ambiente.

No que diz respeito ao tratamento das aberturas do átrio central, em todas as alternativas, o vidro empregado em suas janelas será sempre o vidro B, de alta transmissão luminosa, para melhor aproveitamento da luz natural nas áreas mais profundas do ambiente. Os caixilhos empregados nestas aberturas serão os mesmos dos propostos para as janelas Sudeste e Noroeste.

Com o objetivo de bloquear a penetração solar pelas aberturas do átrio nos escritórios situados nos pavimentos mais altos, optou-se por proteger suas janelas com brises horizontais fixos de 25 cm de profundidade, instalados a 30 cm de distância do vidro (Figura 4.3).

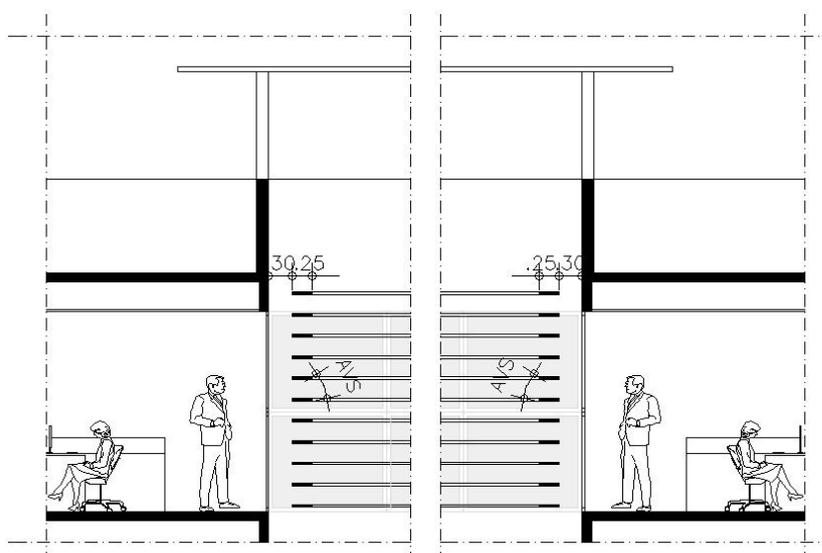


Figura 4.3 – Esquema da solução de sombreamento para as aberturas do átrio, do 8º ao 13º pavimento. Fonte: a autora.

Estes brises somente serão empregados do 8º ao 13º andar, uma vez que foi verificado através do estudo da carta solar que a penetração solar do 1º ao 7º pavimento é pouco significativa e que o emprego de elementos sombreadores nestes andares comprometeria o aproveitamento da luz natural. O ângulo vertical de sombreamento proposto para as aberturas do átrio no 13º pavimento – único andar dentre os estudados a receber sombreamento – é de 25º, o que equivale a um espaçamento de 12 cm entre brises.

É importante ressaltar que esta solução de tratamento das aberturas do átrio será sempre a mesma, independentemente das alternativas adotadas para as janelas das fachadas principais do edifício.

Ao longo do processo desta etapa de composição das alternativas, foram realizadas algumas simulações testes para verificar se as soluções propostas de fato apresentavam um bom desempenho do ponto de vista do aproveitamento da luz natural. Estas simulações computacionais foram fundamentais tanto na definição dos dispositivos de sombreamento

do átrio, como na escolha do tipo de vidro empregado, e vieram a complementar os estudos de geometria solar realizados ao longo desta etapa de concepção.

A seguir, serão apresentadas as 6 alternativas de projeto a serem consideradas na análise. A nomenclatura de cada uma delas descreve a combinação dos parâmetros, indicando o PAF da solução, o tipo de vidro e o tipo de sombreamento (indicado na Tabela 4.3), nesta ordem.

4.1.1. Alternativa 1: 37%_VA_SP

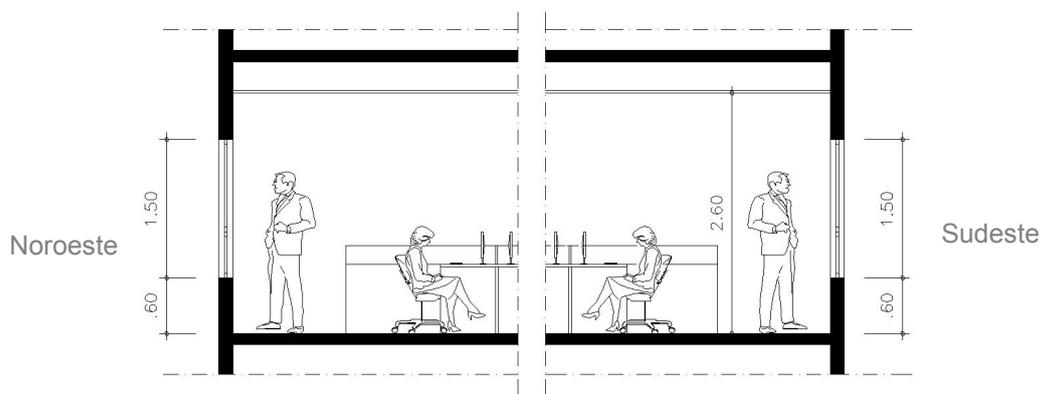


Figura 4.4 – Corte longitudinal do pavimento tipo com adoção da alternativa 1.

A alternativa 1 (Figura 4.4) apresenta uma janela em fita de 1,50 m de altura e 17 m de comprimento sobre um peitoril de 0,60m, dimensões estas que conferem a solução um PAF de 37%. A altura do peitoril decorre do cuidado em não criar uma barreira visual significativa para o exterior, considerando um usuário em posição sentada.

As aberturas não apresentam qualquer tipo de proteção solar, além dos elementos verticais localizados nas extremidades das janelas. Para compensar a ausência destes dispositivos, foi proposto o emprego do tipo de vidro A (46% de transmissão luminosa) nas esquadrias.

4.1.2. Alternativa 2: 52%_VA_SP

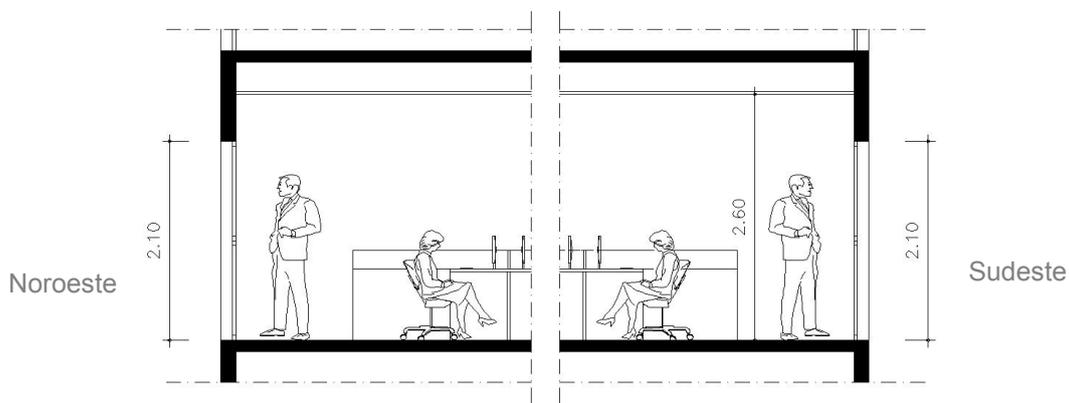


Figura 4.5 – Corte longitudinal do pavimento tipo com adoção da alternativa 2.

A alternativa 2 (Figura 4.5) difere da primeira apenas pela altura da abertura, devido a eliminação do peitoril. O PAF resultante desta solução para ambas as fachadas é de 52%.

4.1.3. Alternativa 3: 37%_VB_CP1

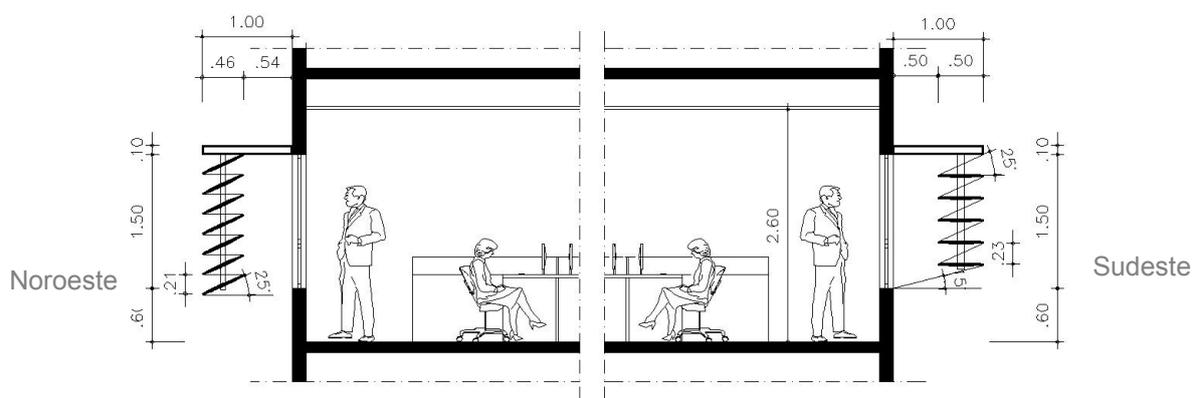


Figura 4.6 – Corte longitudinal do pavimento tipo com adoção da alternativa 3.

Para a alternativa 3 (Figura 4.6), foi criada uma abertura de 1,50m de altura sobre peitoril de 0,60m. Tais dimensões conferem às fachadas um PAF de 37%. Como superfície transparente, empregou-se o vidro tipo B (78% de transmissão luminosa).

As soluções de sombreamento propostas para as fachadas Sudeste e Noroeste são compostas igualmente por anteparos horizontais e por brises, estes últimos variando apenas quanto à inclinação, para responder às distintas solicitações contra a penetração solar.

A Figura 4.7 apresenta as máscaras de sombra geradas pela composição dos protetores horizontais com os elementos verticais localizados na extremidade das aberturas nas fachadas Sudeste e Noroeste.

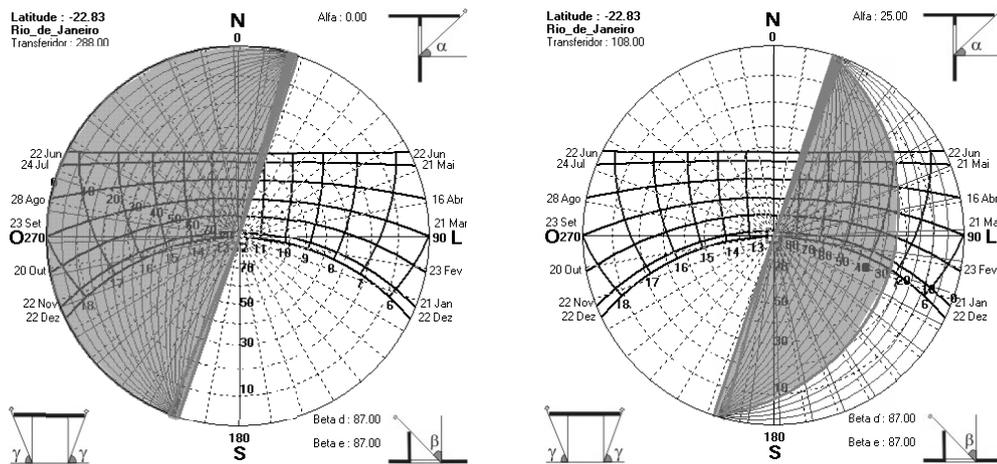


Figura 4.7 – Máscaras de sombra correspondentes aos protetores solares da alternativa 3. Fonte: aplicação do programa Analysis SOL-AR (LABEE, 2009).

4.1.4. Alternativa 4: 52%_VB_CP1

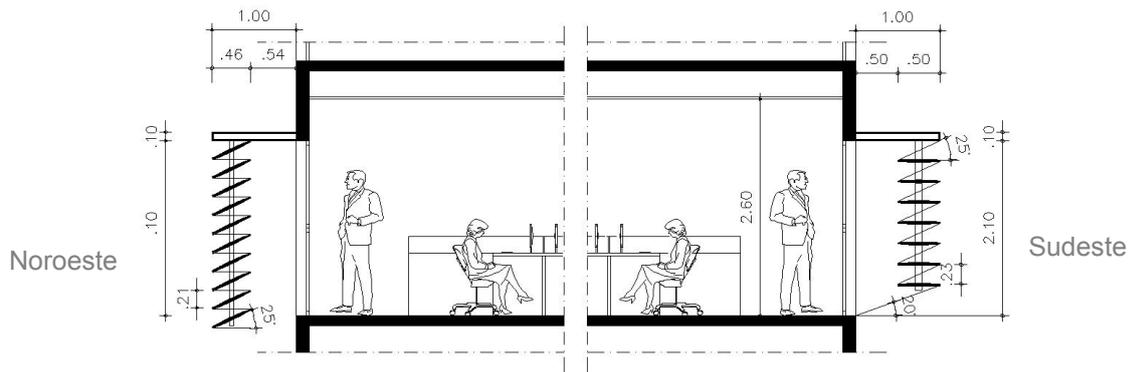


Figura 4.8 – Corte longitudinal do pavimento tipo com adoção da alternativa 4.

A alternativa 4 (Figura 4.8) é resultante da adaptação dos elementos de proteção da alternativa 3 para aberturas de altura de 2,10m, sem peitoril. Estas dimensões das janelas conferem às fachadas um PAF de 52%. O vidro utilizado nesta solução é do tipo B.

Por manter os mesmo ângulos de sombreamento, as máscaras de sombra referentes aos dispositivos de proteção solar associados aos elementos verticais das extremidades das aberturas são as mesmas da alternativa 3.

4.1.5. Alternativa 5: 37%_VB_CP2

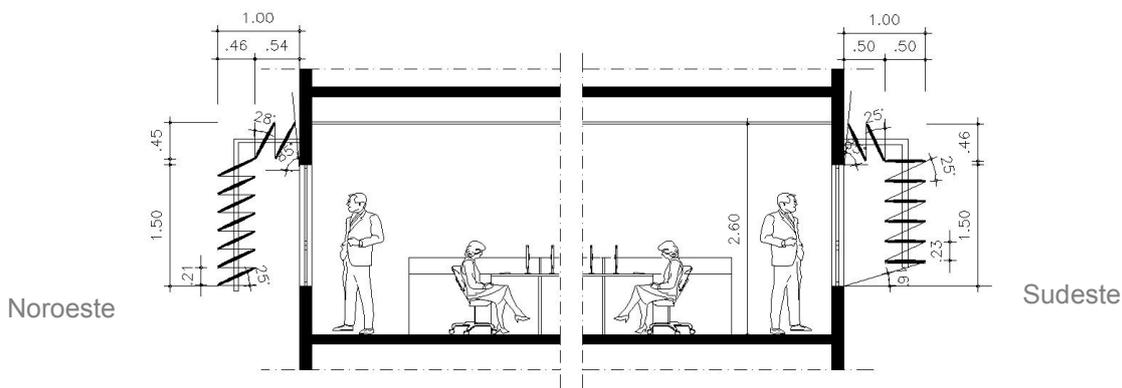


Figura 4.9 – Corte longitudinal do pavimento tipo com adoção da alternativa 5.

Na alternativa 5 (Figura 4.9), brises fixos inclinados substituíram o anteparo horizontal acima da janela. Propõe-se investigar os efeitos desta solução vazada nos ganhos térmicos da edificação, tendo em vista que a convecção do ar no espaço entre a fachada e os brises pode reduzir a transferência de calor para o interior da edificação.

Nesta solução, optou-se por reduzir ao máximo o contato dos brises com as fachadas do edifício, minimizando também a condução do calor por estes elementos de proteção para a fachada. Como consequência, este desenho é o único que não bloqueia totalmente a penetração solar no ambiente. Em ambas as aberturas, os brises superiores permitem a radiação solar direta no escritório para raios com altura solar igual ou maior que 85°. Entretanto, a penetração solar não ultrapassa além de 5 centímetros da face interna da parede onde estão as janelas.

A Figura 4.10 apresenta as máscaras de sombra geradas pela composição dos protetores horizontais com os elementos verticais localizados na extremidade das aberturas.

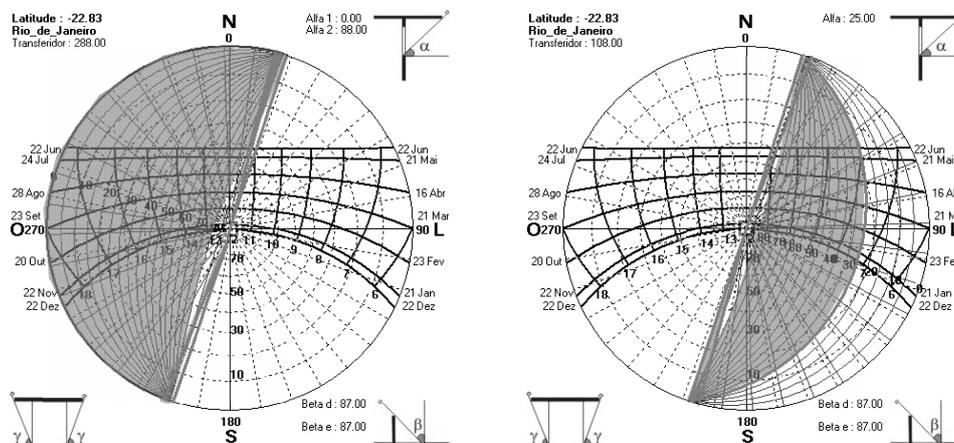


Figura 4.10 – Máscaras de sombra correspondentes aos protetores solares da alternativa 6. Fonte: aplicação do programa Analysis SOL-AR (LABEE, 2009).

A altura das aberturas é igual nas duas orientações (1,50m), conferindo às fachadas um PAF de 37%. Para a área envidraçada foi proposto um vidro tipo B.

4.1.6. Alternativa 6: 52%_VB_CP2

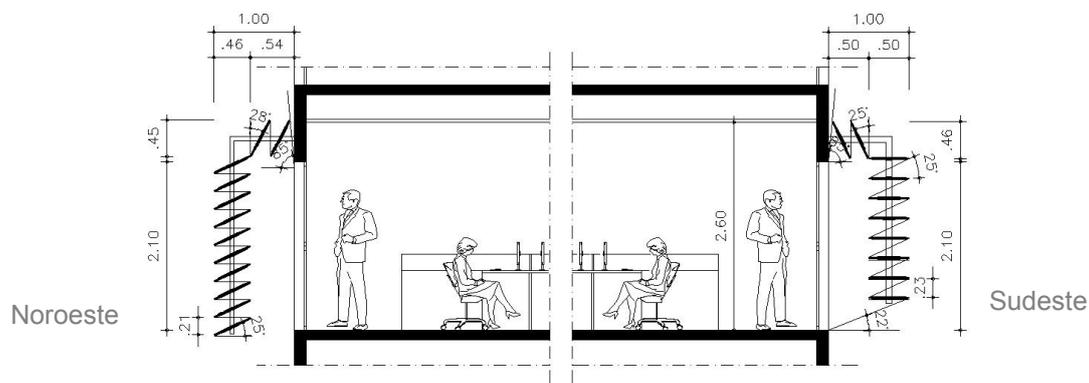


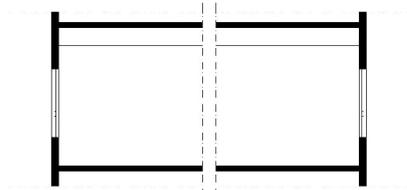
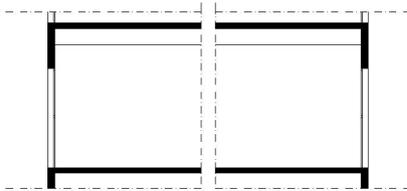
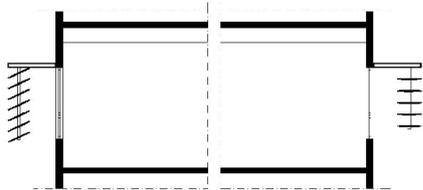
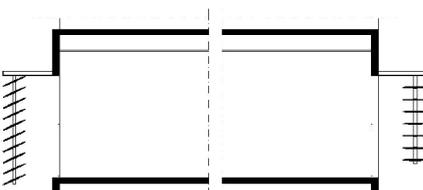
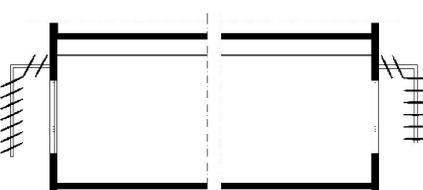
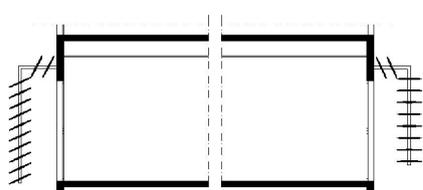
Figura 4.11 – Corte longitudinal do pavimento tipo com adoção da alternativa 6.

A alternativa 6 (Figura 4.11) difere da anterior apenas pela eliminação do peitoril em alvenaria, modificando o PAF para 52%. O vidro empregado nesta solução foi do tipo B.

4.1.7. Resumo das alternativas

A Tabela 4.4, a seguir, apresenta um resumo das alternativas acima descritas.

Tabela 4.4 – Tabela resumo das alternativas de projeto para as aberturas Sudeste e Noroeste.

Altern.	Corte	PAF	Vidro	Sombreamento
A1		37%	VA (TL=46%)	SP (sem elementos de proteção solar horizontal)
A2		52%	VA (TL=46%)	
A3		37%	VB (TL=78%)	CP1 (proteção com anteparo e brises)
A4		52%	VB (TL=78%)	
A5		37%	VB (TL=78%)	CP2 (proteção somente com brises)
A6		52%	VB (TL=78%)	

4.2. Etapa 02: Definição dos pesos dos critérios

Como exposto no Capítulo 2, na prática de projeto, a atribuição de pesos aos critérios deve ser precedida de uma análise aprofundada das especificidades do empreendimento – como, por exemplo, as características do entorno ou o tipo de uso do edifício proposto – para que sejam privilegiados os aspectos que exigem uma maior atenção do projetista.

Sendo este trabalho uma pesquisa acadêmica, optou-se por testar não apenas uma, mas várias possibilidades de priorização de critérios, a fim de investigar a influência dos pesos no ordenamento final das soluções (análise de sensibilidade dos pesos).

Propôs-se testar 13 grupos distintos de variações de pesos. Um dos grupos representa uma situação em que todos os três critérios trabalhados são considerados igualmente importantes, ou seja, apresentam o mesmo peso (grupo A). Os outros 12 grupos foram definidos priorizando-se sempre um dos critérios em detrimento dos outros, atribuindo-lhe pesos duas, três, quatro e cinco vezes maior que os pesos dos demais (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 – Grupos de pesos atribuídos aos critérios.

Grupos de pesos	Critério priorizado	Peso atribuído
A	Todos	Pesos iguais para todos os critérios
B		2 vezes maior que os demais
C	Nível de iluminação natural no plano de trabalho	3 vezes maior que os demais
D		4 vezes maior que os demais
E		5 vezes maior que os demais
F		2 vezes maior que os demais
G		3 vezes maior que os demais
H	Visualização para o exterior	4 vezes maior que os demais
I		5 vezes maior que os demais
J		2 vezes maior que os demais
K	Eficiência energética	3 vezes maior que os demais
L		4 vezes maior que os demais
M		5 vezes maior que os demais

Com estas variações, espera-se simular diversas situações que possam porventura ser definidos pelos atores envolvidos no processo decisório. Dentre as situações estudadas, destaca-se aquela que pode ser considerada uma das mais recorrentes na prática profissional: a priorização do critério visualização para o exterior pelo cliente (grupo F a I) para aproveitar ao máximo o potencial de paisagem específico deste terreno, e, conseqüentemente, valorizar o empreendimento.

4.3. Etapa 03: Análises monocritérios

Nesta etapa, foram feitas avaliações dos desempenhos das alternativas desenvolvidas na etapa 1, considerando um critério por vez. Nos tópicos a seguir, serão apresentadas as ferramentas e métodos utilizados nas análises, os resultados obtidos e os ordenamentos das alternativas para cada um dos três critérios: nível de iluminação natural no plano de trabalho, visualização para o exterior e eficiência energética.

4.3.1. Desempenho das alternativas quanto ao nível de iluminação natural no plano de trabalho

4.3.1.1. Ferramenta de avaliação

Para realizar as análises do desempenho das alternativas face ao critério “nível de iluminação natural no plano de trabalho”, optou-se por utilizar um programa de simulação computacional. Sua escolha deveria ser cuidadosa, para evitar que esta etapa se tornasse demasiadamente trabalhosa e demorada não só na realização das simulações como também na comparação de seus resultados.

Para escolha do programa simulador, foi inicialmente avaliado que tipo de simulação melhor responde ao anseio de reduzir ao máximo o trabalho e o tempo destinado à aplicação da análise multicritério. Para tanto, foi feita uma comparação entre dois tipos de simulação computacional: a estática e a dinâmica.

Segundo Reinhart (2010b), uma simulação estática de iluminação expressa resultados na forma de imagens fotorealísticas ou valores de iluminância de um determinado ponto do ambiente, em relação a um céu de referência. Assim, ao ser feita uma simulação estática, é possível identificar as condições de iluminamento no espaço para um determinado dia do ano, considerando um único tipo de céu.

A simulação dinâmica, por sua vez, gera séries anuais de iluminância considerando as mudanças de condições do céu ao longo do dia e do ano. Os cálculos deste tipo de simulação se baseiam em arquivos de dados meteorológicos do tipo SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*), que incluem variáveis climáticas de uma determinada cidade, tais como: mês, dia e hora, temperatura de bulbo seco e bulbo úmido, velocidade dos ventos, temperatura do solo, pressão barométrica, tipo de céu e radiação solar. Desta forma, ao ser realizada uma simulação dinâmica, é possível avaliar as condições de iluminamento no espaço ao longo de um ano através de medidas dinâmicas que indicam a ocorrência anual de intervalos de iluminância nos diversos pontos do ambiente.

Observa-se que para avaliar o desempenho de uma alternativa de projeto quanto ao aproveitamento da iluminação natural, é importante analisar as condições de iluminamento em diferentes períodos do ano. Utilizando um programa computacional de simulação estática, faz-se necessário realizar um número significativo de simulações para incluir diferentes tipos de céu, dias e meses do ano na análise. Através de uma simulação dinâmica, o número de simulações diminui consideravelmente, e é possível ter uma amostragem mais completa e precisa sobre o comportamento anual da luz natural no ambiente.

Assim, optou-se por realizar simulações dinâmicas de iluminação natural, e o programa escolhido para tal objetivo foi o *Daysim 3.1*.

O *Daysim* é uma ferramenta computacional gratuita desenvolvida em 1998 pela Universidade de Harvard (Estados Unidos), pelo Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá (Canadá) e pelo Instituto Fraunhofer de Sistemas de Energia Solar (Alemanha) sob a coordenação de Christoph Reinhart. O programa foi validado por Reinhart e Walkenhorst (2001).

O programa utiliza o método de raio-traçado adotado pelo software *Radiance*¹² para calcular o perfil anual de iluminação natural do ambiente, baseando-se em um arquivo climático e no modelo de céu de Pérez (PEREZ; SEALS; MICHALSKY, 1993).

A simulação é realizada a partir de um modelo tridimensional do ambiente ou edifício importado de programas como *Autocad*, *Ecotect*, *Google Sketchup* e *3Dmax*. Após definição da grade de pontos de referência no ambiente, da especificação das propriedades ópticas dos materiais e da importação do arquivo climático para o programa, é dado início ao cálculo do iluminamento.

Os resultados são apresentados em métricas dinâmicas, dentre as quais podem-se destacar o *Daylight Autonomy* (DA) e o *Useful Daylight Illuminances* (UDI)¹³.

¹² O *Radiance* é um programa de simulação baseado no comportamento físico da luz, desenvolvido nos Estados Unidos, na Universidade da Califórnia. Ele prediz a distribuição das iluminâncias e luminâncias no ambiente construído sob condições de céu pré-definidas e possui um mecanismo baseado no método de raio-traçado (ray-trace) largamente utilizado e aceito na validação da iluminação natural em edificações (WARD, 1993).

¹³ Além das métricas DA e UDI citadas, o *Daysim* também apresenta os resultados através do Fator de Luz Diurna (Daylight Factor – DF), Autonomia de Luz Natural Contínua (Continuous Daylight Autonomy – DAcon), Autonomia de Luz Natural Máxima (Maximum Daylight Autonomy – DAmx), e Exposição Anual de Luz (Annual Light Exposure). Os conceitos destas métricas podem ser encontrados em Reinhart (2010b).

O *Daylight autonomy* (DA) indica a porcentagem das horas ocupadas por ano nas quais um nível mínimo de iluminância pode ser mantido apenas pela iluminação natural (REINHART; MORRISON, 2003). Um alto valor de DA não representa uma garantia para a economia de energia elétrica, uma vez que este índice não permite a identificação de situações onde os níveis de iluminação são excessivamente elevados, podendo provocar efeitos adversos associados ao conforto visual e às cargas térmicas.

O *Useful Daylight Illuminance* (UDI) corresponde à porcentagem de horas ocupadas por ano nas quais a iluminância de um ponto no ambiente se encontra dentro de um intervalo de iluminâncias pré-estabelecido (NABIL; MARDALJEVIC, 2006). O Daysim considera três faixas de nível luminoso: Insuficiente (<100 lux), Útil (que corresponde ao UDI propriamente dito, entre 100 e 2000 lux) e Excessiva (>2000 lux).

O *Daysim* também possibilita identificar o consumo de iluminação artificial de acordo com diferentes padrões de uso (número de pessoas no local e horas de permanência), potência e sistemas de controle de iluminação artificial. Com estes dados, é possível aproveitar os resultados obtidos com o Daysim em simulações termo-energéticas.

4.3.1.2. Os dados de entrada

Para as simulações realizadas no *Daysim*, foram utilizados como dados de entrada:

- Os seis modelos tridimensionais das alternativas de projeto gerados no programa *Google Sketchup*;
- As características ópticas dos materiais aplicados no projeto;
- A malha de pontos de referência gerada no *Google Sketchup* com o auxílio do *plugin Sud2s*;
- O arquivo climático do Rio de Janeiro, referente à estação meteorológica do Aeroporto Santos Dumont;
- Os horários e dias do ano previstos para a ocupação do edifício;
- O valor de referência relativo à iluminância recomendada para o tipo de atividade;
- Informações sobre o perfil do usuário e sobre as instalações elétricas.

Os materiais das superfícies dos modelos tridimensionais foram previamente definidos no *Google Sketchup* ao longo do processo de modelagem. Suas características ópticas estão sintetizadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Características ópticas dos materiais.

	Superfície	Cor	Reflet. (%) ¹⁴	Transm. visível (%)
Superfícies internas	Parede	Branco	88	0
	Piso	Cinza médio	40	0
	Forro	Cinza claro	70	0
	Anteparo	Branco	88	0
	Brisas	Cinza claro	70	0
	Fachada (superfície opaca)	Branco	88	0
	Cobertura (superfície opaca)	Branco	88	0
Envoltória	Caixa d'água / Casa de máquinas	Branco	88	0
	Caixilho	Cinza claro	70	0
	Vidros fachadas Sudeste/Noroeste	Incolor	-	46 ou 78
	Vidros fachada átrio	Incolor	-	78
	Vidro cobertura átrio ¹⁵	Incolor	-	72
Entorno	Prédios vizinhos	Marfim	65	0
	Pavimentação passeio	Marfim	65	0
	Gramma (jardim fundos terreno)	Verde escuro	35	0

A malha de pontos também foi definida ainda no processo de modelagem, antes da exportação das maquetes para o *Daysim*. A disposição deles foi baseada nas recomendações da NBR 15215-4, que prescreve métodos para a verificação experimental das condições de iluminância e luminância de ambientes internos (ABNT, 2003).

Em observância a norma, foi criado um plano horizontal a 75 centímetros de altura em relação ao piso do ambiente sobre o qual foram dispostos os pontos de referência seguindo uma malha de 1,70 por 1,70 metros (Figura 4.12). No total, foram criados 300 pontos, sendo 143 em cada ala do pavimento tipo e 14 nas áreas de circulação. Este número ultrapassa consideravelmente aquele recomendado pela norma para um ambiente desta dimensão — 36 pontos para cada uma das duas alas do pavimento tipo — o que é justificado pelo cuidado em buscar uma malha que melhor se adeque as dimensões do ambiente garantindo uma distância mínima recomendada de 50 centímetros entre as paredes e os pontos.

Conforme se observa na Figura 4.12, foram excluídos da análise as salas de reuniões, os banheiros, a copa e a caixa de escada. A área dos ambientes estudados totaliza 865,64 m².

¹⁴ A refletância das superfícies opacas foi baseada nos valores indicados por Castro et al. (2003) e Figueiredo et al. (2009), a partir das cores dos materiais. As refletâncias das superfícies transparentes não foram aqui especificadas, pois o *Daysim 3.1* não solicita esta informação quanto a este tipo de material.

¹⁵ Valor de refletância referente ao vidro SunGuard® High Performance Neutral 70 laminado.

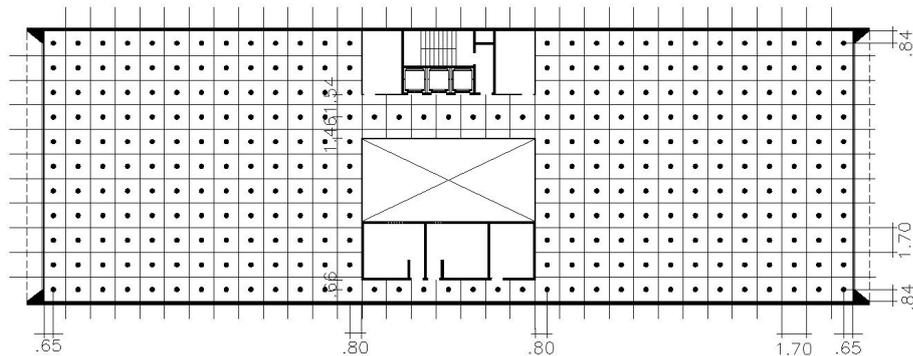


Figura 4.12 – Malha de pontos para simulação no Daysim.

Uma vez importado o modelo tridimensional de cada alternativa contendo a malha de pontos e os dados dos materiais, foi carregado no Daysim o arquivo climático do Rio de Janeiro¹⁶. Os dados do sítio utilizados foram os especificados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Dados do sítio.

Dado	Especificação
Latitude	22.90° S
Longitude	43.17° O
Altitude	3 m
Fuso-horário	-3 h
Refletância do solo	40%

Para análise dos resultados pelo Daysim, foi informado o padrão de ocupação do edifício através do fornecimento de um arquivo no formato CSV (*Comma Separated Values*), que indica uma ocupação anual da edificação de segunda à sexta-feira, das 8 às 18h, com intervalo de almoço das 12 às 13h. Neste arquivo, foram considerados os meses relativos ao horário de verão, bem como as datas referentes aos feriados nacionais.

O programa também solicita a especificação de um valor de referência de iluminância satisfatória para os cálculos de autonomia de luz natural (*Daylight Autonomy – DA*). Em observância a NBR 5413 (ABNT, 1990), foi definido que, para usuários de idade entre 40 e 55 anos que exercem uma atividade sem importância de precisão e velocidade em um plano de trabalho com refletância superior a 70%, a iluminância adequada é de 500 lux (Tabelas 4.8 e 4.9).

¹⁶ O arquivo SWERA utilizado foi obtido no site do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina (<http://www.labee.ufsc.br>).

Tabela 4.8 – Fatores determinantes da iluminância adequada.
Fonte: adaptado de ABNT, 1990.

Características da tarefa e do observador	Peso		
	-1	0	1
Idade	Inferior a 40 anos	40 a 55 anos	Superior a 55 anos
Velocidade e precisão	Sem importância	Importante	Crítica
Refletância do fundo da tarefa	Superior a 70%	30 a 70%	Inferior a 30%

Tabela 4.9 – Iluminâncias por classes de tarefas visuais. Fonte: adaptado de ABNT, 1990.

Classe B de tarefas visuais	Iluminância (lux)	Tipo de atividade
		Tarefas com requisitos visuais normais, trabalho médio de maquinaria, escritórios
Iluminação geral para área de trabalho	500 – 750 – 1000	Tarefas com requisitos especiais, gravação manual, inspeção, indústria de roupas.
	1000 – 1500 – 2000	

Ainda para a análise dos resultados realizada pelo programa, indicou-se também uma densidade de potência elétrica de $9,7 \text{ W/m}^2$, conforme recomendado pelo RTQ-C para edifícios de escritórios que almejam uma etiqueta A de eficiência energética.

O programa considera ainda o perfil do usuário quanto ao controle da luz artificial e de persianas internas instaladas no ambiente. Para esta análise, indicou-se que o usuário é ativo: ele movimenta as persianas sempre que há incidência direta da radiação no plano de trabalho e controla manualmente a luz elétrica, utilizando-a apenas quando as condições de iluminação no ambiente são insatisfatórias.

No total, foram realizadas 18 simulações no *Daysim*, o que corresponde a 6 simulações para cada um dos 3 pavimentos tipo simulados: 1º, 7º e 13º. A necessidade de fazer a simulação para mais de um pavimento decorre do fato de terem sido considerados os efeitos de sombreamento dos edifícios vizinhos na edificação em estudo e também por esta apresentar um átrio central, que influencia os níveis de iluminação no espaço do escritório.

4.3.1.3. Metodologia de avaliação dos resultados

O primeiro passo para definição da metodologia de avaliação dos resultados obtidos com o *Daysim* foi escolher, dentre as métricas dinâmicas trabalhadas pelo programa, aquelas que seriam consideradas neste trabalho.

Há uma série de pesquisas que considera apenas uma das métricas para avaliação do desempenho lumínico de um ambiente. Didoné (2009) e Amorim et al. (2011), por exemplo, comparam o desempenho de alternativas de projeto apenas sob o ponto de vista da Autonomia de Luz Natural (DA).

Reinhart, Mardaljevic e Rogers (2006), em um estudo comparativo semelhante ao desenvolvido no presente trabalho, fazem uma análise mais completa, considerando simultaneamente as métricas Fator de Luz Diurna (DF), DA, DA_{con}, DA_{max}, UDI_{<100}, UDI₁₀₀₋₂₀₀₀ e UDI_{>2000}. Os autores observaram que cada métrica considerada separadamente pode resultar em um diferente ordenamento das alternativas e que, portanto, é aconselhável que seja incluída na análise o maior número de métricas possível, de forma a cruzar seus resultados.

Para efeito deste trabalho, tendo em vista o anseio em realizar uma avaliação mais consistente, mas que não demande um tempo significativo para tratamento de todos os resultados, optou-se por considerar as quatro principais métricas dinâmicas utilizadas pelo *Daysim*: DA, UDI_{<100}, UDI₁₀₀₋₂₀₀₀ e UDI_{>2000}.

Após definição das métricas dinâmicas consideradas na análise, foi então necessário definir como os resultados seriam tratados e apresentados.

Para facilitar a visualização da distribuição do fluxo luminoso no espaço ao longo do ano, foram criados gráficos de curvas isoDA e isoUDI a partir dos resultados obtidos nas simulações para os 3 pavimentos e 6 alternativas estudadas. Para isto, foi utilizado o programa *Surfer v.10*¹⁷, que transforma dados de planilhas de coordenadas de pontos relacionados a valores em mapas topográficos e outros gráficos 2D e 3D.

Todos os gráficos gerados no Surfer foram transformados em imagens e inseridos em escala na planta baixa do pavimento tipo, obedecendo ao distanciamento entre a malha de pontos e as paredes (Gráfico 4.1).

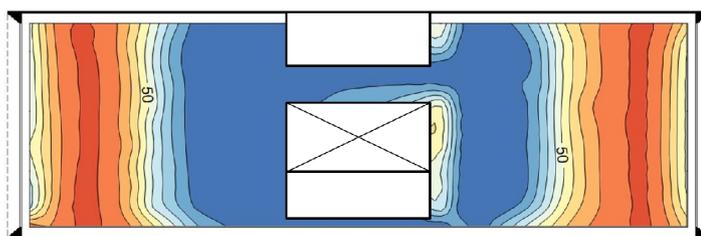


Gráfico 4.1 – Exemplo de apresentação dos resultados em gráfico de curvas isoUDI gerados pelo Surfer v.10, sobreposto em planta baixa.

Os gráficos de curvas ISO se mostraram bastante úteis para uma visualização inicial dos resultados, entretanto foram considerados insuficientes para comparar de forma mais

¹⁷ O programa Surfer foi desenvolvido pela empresa americana Golden Software e é largamente utilizado em diversas pesquisas para análise do resultado de medições e simulações de iluminação natural. Sua versão demo está disponível gratuitamente para *download* no site: <http://www.goldensoftware.com>

precisa os desempenhos das alternativas e identificar aquela que alcançou o melhor desempenho considerando todas as métricas dinâmicas em questão.

Para resolver este problema multicritério apresentado já nesta etapa monocritério, foi necessário aplicar um método – o ELECTRE III – através do programa CELECTRE, para cruzar os resultados das 4 métricas dinâmicas estudadas, buscando estabelecer um ordenamento das alternativas sob o ponto de vista do nível de iluminação natural no plano de trabalho.

Conforme descrito no Capítulo 2, para aplicação do programa, é necessário inserir para cada alternativa um único valor que represente seu desempenho face ao critério em questão. Foi preciso então estabelecer um critério para obter este valor único de desempenho dentre tantas informações fornecidas pelos resultados do *Daysim*.

Baseado na metodologia desenvolvida por Didoné (2009), optou-se por relacionar uma faixa de porcentagem de horas do ano (DA ou UDI) com a área do pavimento por ela abrangida. A obtenção da metragem ocupada por esta faixa pré-estabelecida poderia facilitar a comparação do desempenho das alternativas.

Surgiu então um questionamento: que intervalo de DA ou UDI poderia ser fixado? Isto é, que porcentagem mínima de horas poderia ser considerada satisfatória para o adequado aproveitamento da luz natural no edifício? Conforme ressaltam Reinhart, Mardaljevic e Rogers (2006), a aplicação de métricas dinâmicas ainda carece de estudos que estabeleçam valores absolutos de referência para definir um critério de aprovação/reprovação do desempenho lumínico detectado. Portanto, reconhecendo esta lacuna, foi necessário estabelecer um critério para arbitrar uma faixa de porcentagem de horas mínima.

Para efeito deste trabalho, a faixa mínima satisfatória de DA e UDI considerada foi a de 50% das horas de ocupação do edifício. Esta escolha decorre da orientação de suas fachadas principais (Sudeste e Noroeste): tendo em vista que pelo menos uma destas fachadas estará recebendo radiação solar direta no seu horário de ocupação ao longo do ano, considera-se satisfatório o aproveitamento da luz natural em pelo menos metade das horas em que o edifício é ocupado.

Assim, observa-se que quanto maior a área abrangida pela faixa de 50 a 100% de DA e $UDI_{100-2000}$ e quanto menor a área correspondente à mesma faixa de $UDI_{<100}$ e $UDI_{>2000}$, maior será o desempenho lumínico de uma determinada solução de projeto.

Para quantificar em metros quadrados a área de abrangência desta faixa pré-estabelecida, foi necessário gerar gráficos isoDA e isoUDI no *Surfer v.10* apresentando apenas a curva

corresponde a faixa acima de 50%. O Gráfico 4.2 exemplifica como isto foi feito, partindo do gráfico de curva isoUDI do Gráfico 4.1.

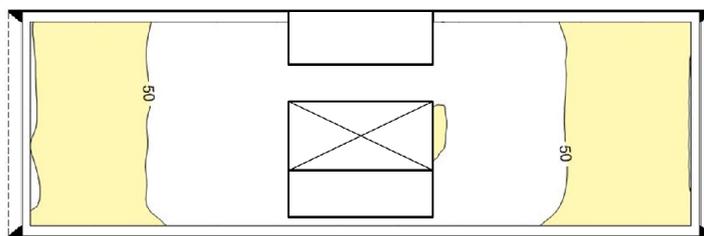


Gráfico 4.2 – Exemplo de conversão do gráfico base isoUDI apresentado no Gráfico 4.1, indicando apenas a área ocupada pela faixa de UDI \geq 50% (em amarelo).

Em seguida, estes gráficos simplificados foram exportados para o programa *Autocad 2008*, onde foi possível calcular a área total ocupada por esta faixa, por métrica dinâmica. As áreas encontradas foram então tabuladas e normalizadas.

Antes de fazer o ordenamento das alternativas, foram gerados *rankings* das mesmas considerando cada métrica dinâmica separadamente, com o objetivo de verificar se diferentes resultados seriam gerados para cada uma delas. Gráficos e tabelas foram criados para facilitar a compreensão desta análise.

Finalmente, os valores normalizados foram inseridos no programa *CELECTRE*, obtendo-se um ordenamento das alternativas para cada um dos pavimentos estudados – 1º, 7º e 13º.

A Figura 4.13 sintetiza as etapas da metodologia de análise dos resultados descritas neste tópico.

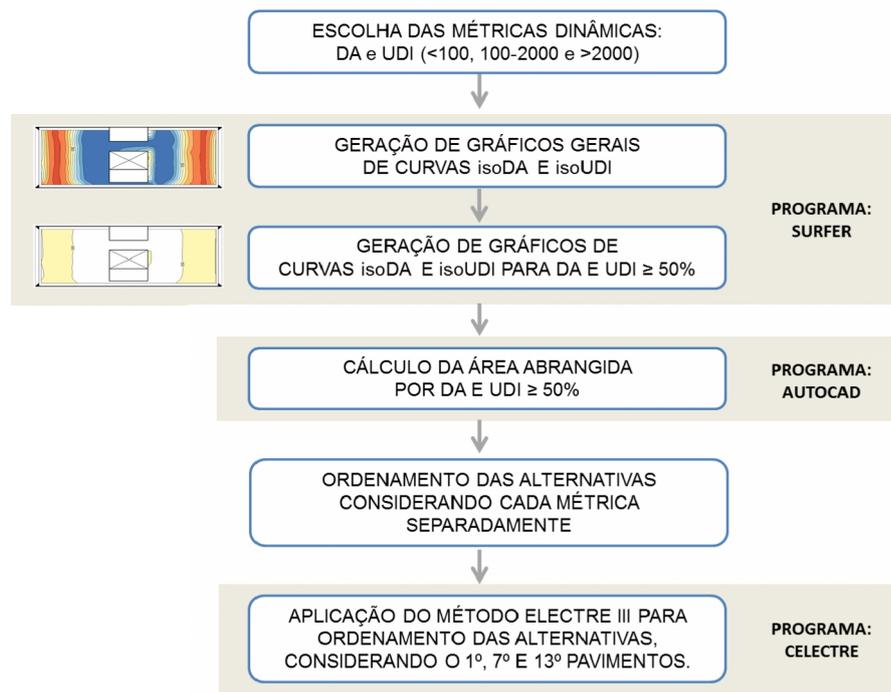


Figura 4.13 – Síntese das etapas da metodologia de análise dos resultados adotada.

No tópico a seguir, serão apresentados os resultados das simulações, seguindo as etapas da metodologia de avaliação supracitada.

4.3.1.4. Análise dos resultados

4.3.1.4.1. Alternativa 1: 37%_VA_SP

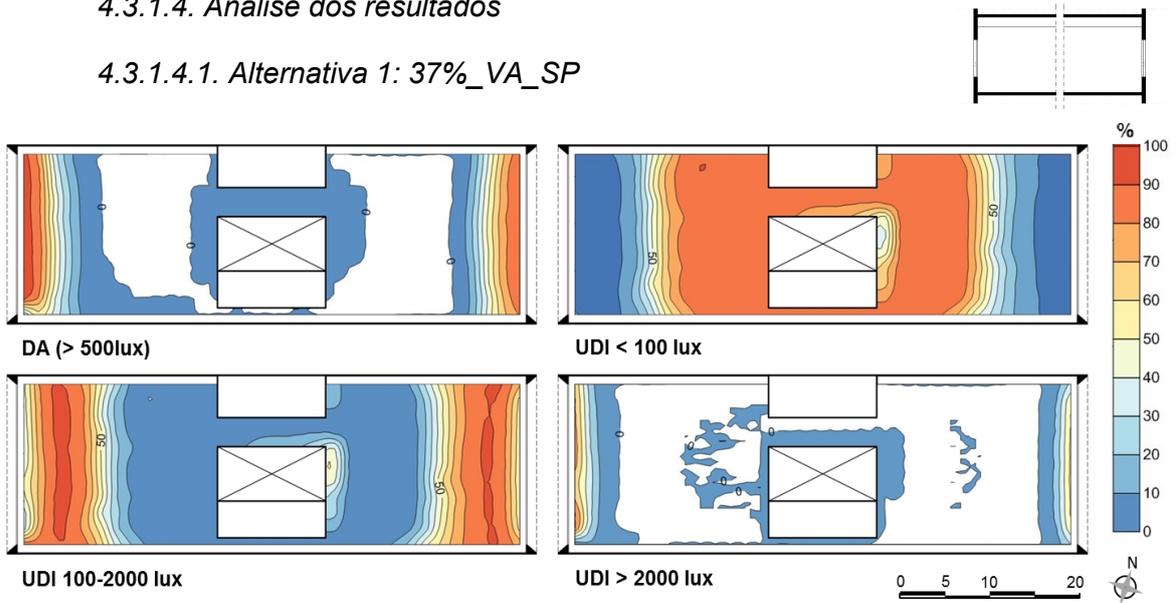


Gráfico 4.3 – Resultados Alternativa 1, 1º pavimento tipo.

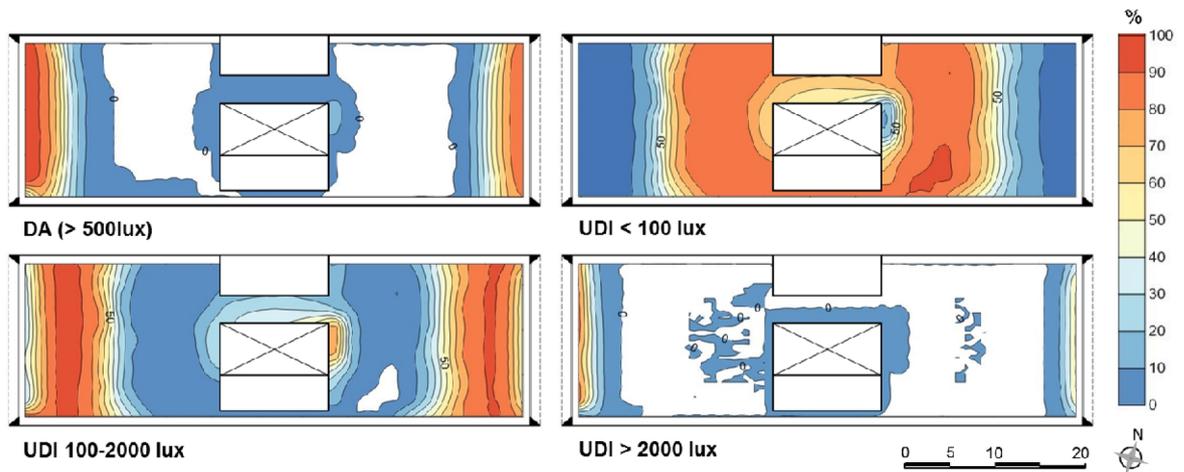


Gráfico 4.4 – Resultados Alternativa 1, 7º pavimento tipo.

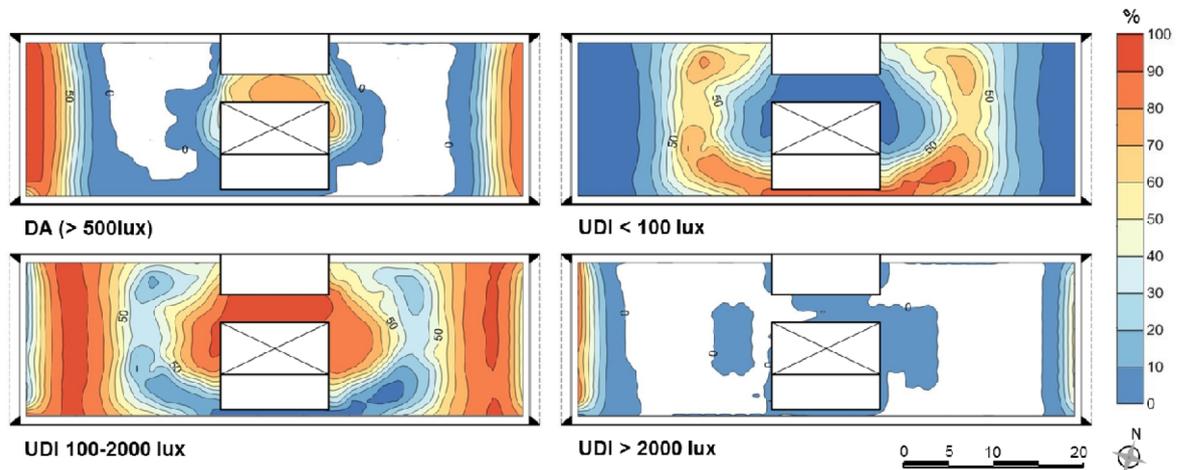


Gráfico 4.5 – Resultados Alternativa 1, 13º pavimento tipo.

Através do gráfico isoDA e isoUDI (Gráfico 4.3 a 4.5), verificou-se que para a Alternativa 1, há uma ocorrência relativamente alta de iluminâncias úteis (100 a 2000 lux) no espaço do escritório, principalmente nas áreas próximas à janela e no 13º pavimento como um todo, o que propicia bons resultados quanto à autonomia da luz natural no edifício.

Em todos os andares, observa-se que em geral a distribuição da luz natural entre as duas alas do pavimento tipo – ala Sudeste e Noroeste – é semelhante. Entretanto, há uma diferença visível da captação da luz natural pelo átrio nas duas alas. Esta variação pode ter ocorrido devido à diferença do grau de turbidez do céu entre o período da manhã e da tarde. Por apresentar uma menor turbidez, o céu da tarde pode ter permitido uma melhor captação da luz na ala Sudeste através da superfície envidraçada do átrio que recebe radiação neste período.

A influência do átrio central é pouco significativa no 1º andar, mas se torna mais perceptível no 7º e principalmente no 13º pavimento, onde o auto-sombreamento é reduzido.

Os resultados demonstram que do 1º para o 7º pavimento, há uma transição suave nas diferenças de aproveitamento da luz natural. Entretanto, do 7º para o 13º andar, há uma variação bastante significativa, principalmente para os resultados relativos às métricas DA, $UDI_{<100}$ e $UDI_{100-2000}$.

Tendo em vista a indicação de um perfil ativo para os usuários da edificação, não se compreende o motivo pelo qual se detectou ocorrência de iluminâncias ditas excessivas (> 2000 lux) no ambiente de trabalho. Esperava-se que um usuário ativo manipulasse persianas para evitar seu desconforto visual, o que aparentemente não ocorreu nem para esta nem para as demais alternativas.

A Figura 4.14, obtida através de simulação no programa *Google SketchUp*, complementa os resultados do Daysim, destacando a mancha solar criada no ambiente pela ausência de proteção solar. No dia 21 de junho, o sol penetra até 2,70 metros da janela, enquanto que no dia 21 de dezembro, a penetração é de até 2,70m.

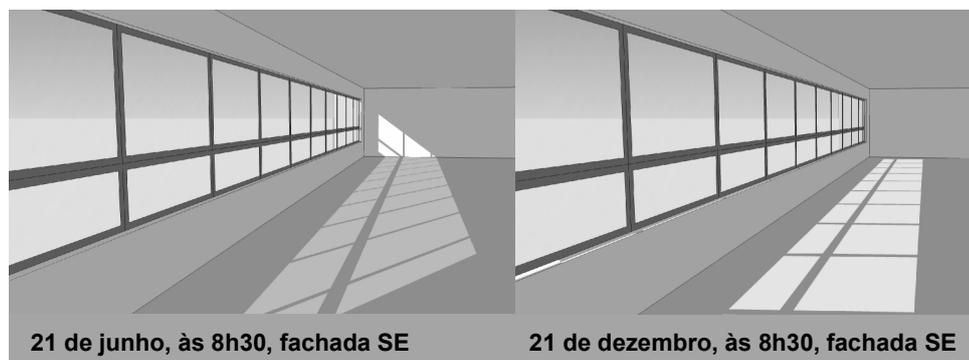


Figura 4.14 – Manchas solares nos ambientes com A1.

4.3.1.4.2. Alternativa 2: 52%_VA_SP

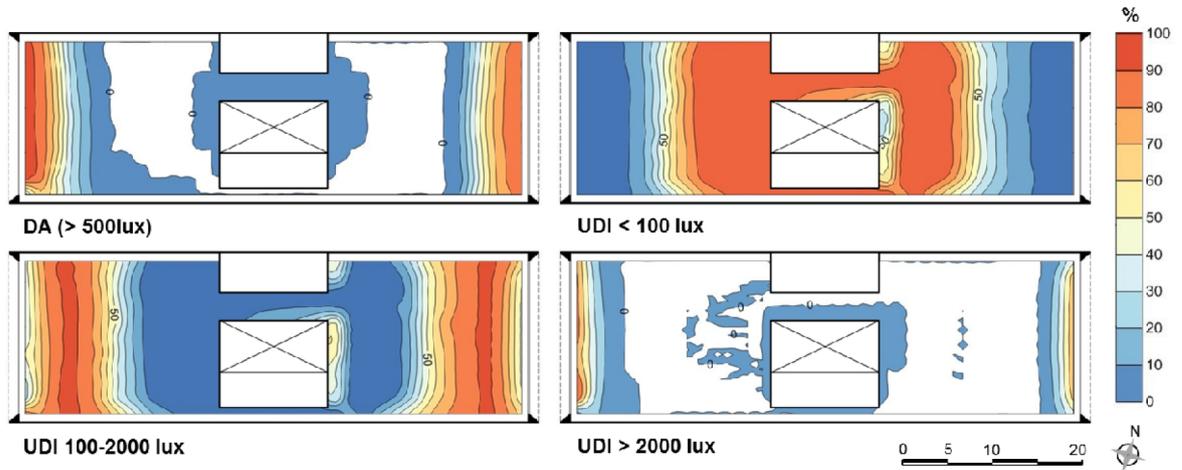


Gráfico 4.6 – Resultados Alternativa 2, 1º pavimento tipo.

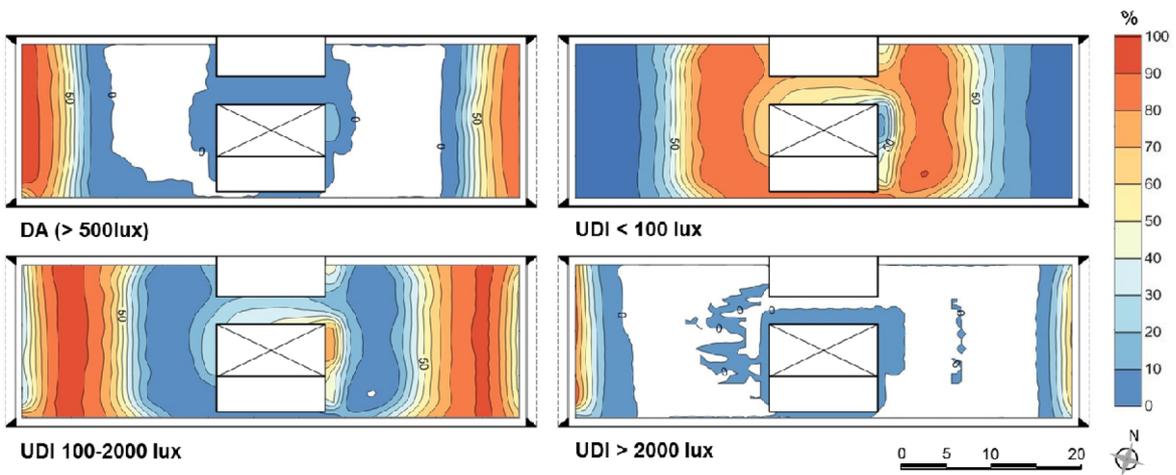


Gráfico 4.7 – Resultados Alternativa 2, 7º pavimento tipo.

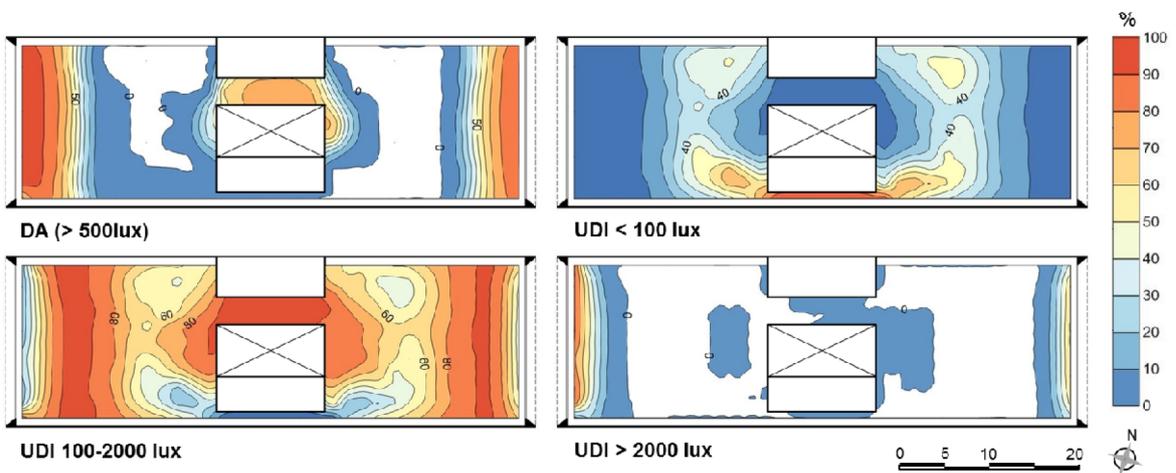


Gráfico 4.8 – Resultados Alternativa 2, 13º pavimento tipo.

Na alternativa 2, verifica-se que o aumento da área de abertura na fachada torna o ambiente mais iluminado do que na alternativa 1, elevando a frequência do intervalo de iluminâncias úteis (100 à 2000 lux). A presença do átrio também contribui para uma melhor distribuição da luz natural no espaço, e, junto às janelas, é responsável pela redução dos valores de $UDI_{<100}$ (Gráficos 4.6 a 4.8).

Os resultados de $UDI_{>2000}$ são bastante semelhantes aos da primeira alternativa, o que confirma que o aumento do percentual de abertura da fachada contribuiu para a melhoria das condições de conforto lumínico no ambiente, já que teve uma influência maior no incremento das iluminâncias úteis.

Observa-se um aumento da autonomia de luz natural no edifício, sobretudo no 13º pavimento, consequência dos bons resultados em $UDI_{100-2000}$.

Assim como na Alternativa 1, verifica-se que, apesar de a ala Sudeste do pavimento ser mais iluminada ao longo do ano, nota-se que a área próxima à janela na ala Noroeste apresenta um nível de iluminação maior. Isto pode ocorrer por diversos fatores: a redução do grau de turbidez do céu no período da tarde, a reflexão das superfícies dos edifícios vizinhos – refletividade de 65% –, e o fato de o sol incidir nesta fachada na maior parte das horas de ocupação do edifício, conforme indicam os estudos da carta solar já apresentados.

A Figura 4.15, resultante de simulações no programa *Google SketchUp*, complementa os resultados do Daysim, destacando a mancha solar criada no ambiente pela ausência de proteção solar. A penetração solar tem mesma profundidade que as manchas da solução anterior, uma vez que a diferença entre elas consiste apenas na presença ou ausência de peitoril.



Figura 4.15 – Manchas solares nos ambientes com A2.

Pode-se concluir que o emprego de vidro de controle solar reduz a intensidade da radiação que penetra no ambiente, porém ele não a bloqueia, prejudicando o conforto dos usuários que trabalham próximos às janelas tanto no início (fachada Sudeste) como no fim do expediente (fachada Noroeste).

4.3.1.4.3. Alternativa 3: 37%_VB_CP1

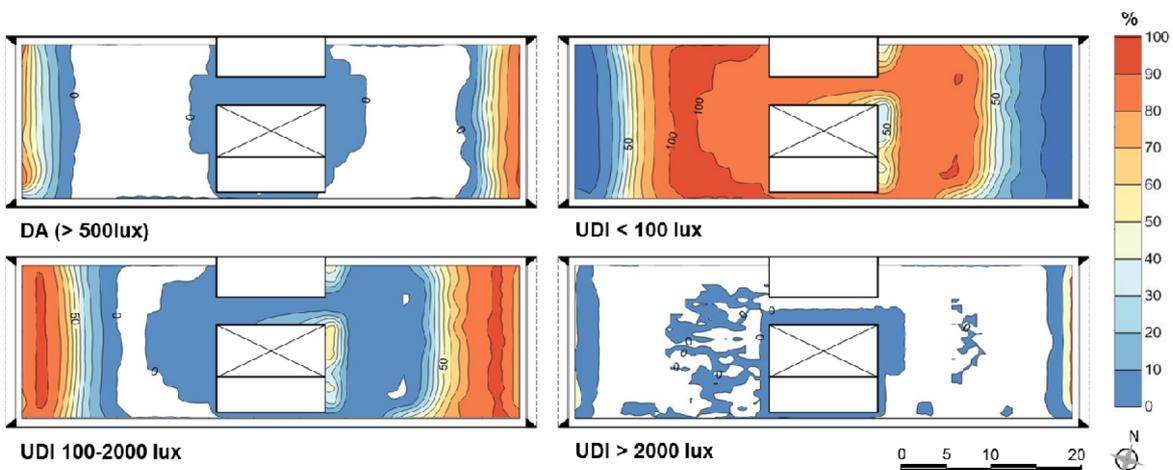


Gráfico 4.9 – Resultados Alternativa 3, 1º pavimento tipo.

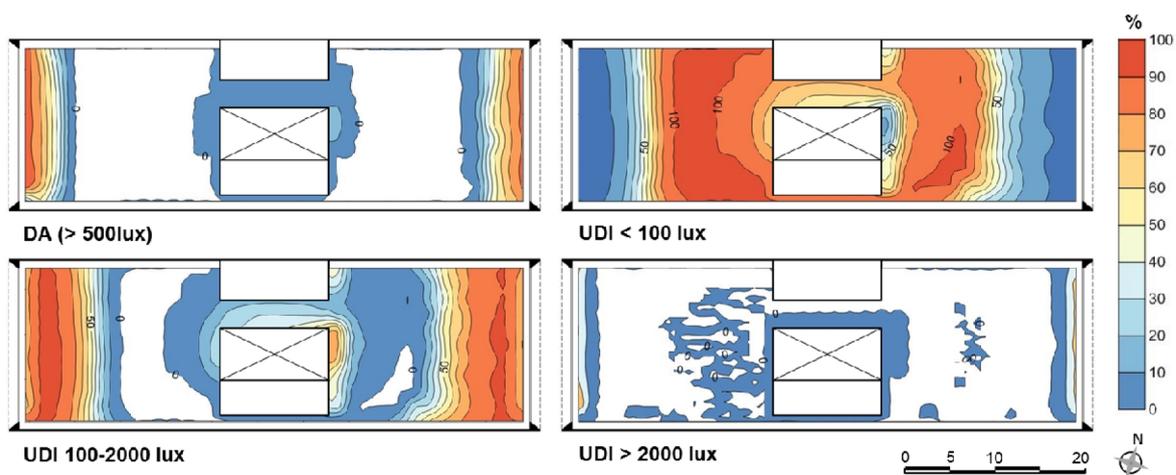


Gráfico 4.10 – Resultados Alternativa 3, 7º pavimento tipo.

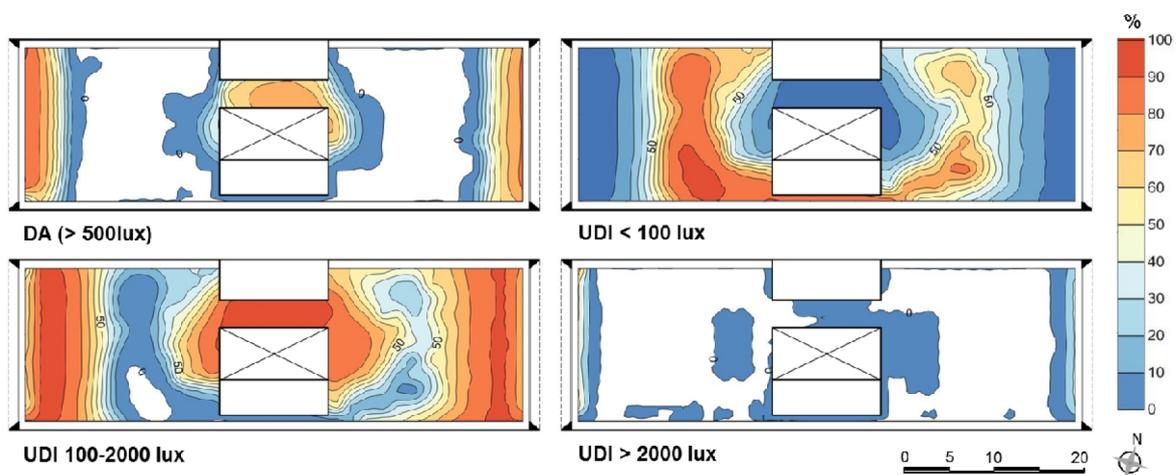


Gráfico 4.11 – Resultados Alternativa 3, 13º pavimento tipo.

A alternativa 3 apresentou uma visível redução da ocorrência de iluminâncias úteis (100 a 2000 lux) em todos os pavimentos, se comparada às alternativas anteriores. Consequentemente, houve uma queda significativa da autonomia de luz natural no edifício (Gráficos 4.9 a 4.11).

Observa-se também um aumento da incidência de iluminâncias abaixo de 100 lux e uma queda da frequência do intervalo de iluminâncias excessivas (>2000 lux).

Nesta alternativa, surge uma diferença bastante evidente no aproveitamento da luz natural entre as alas Sudeste e Noroeste, principalmente do ponto de vista das métricas $UDI_{100-2000}$ e $UDI_{<100}$. A ala Sudeste mais uma vez apresenta um melhor desempenho lumínico, ainda que na área próxima à janela Noroeste se observe uma ocorrência maior do intervalo de iluminâncias úteis.

Assim como nas alternativas anteriores, a captação da luz natural pelo átrio é mais perceptível na ala Sudeste. Observa-se nesta área uma ocorrência maior de iluminâncias excessivas, principalmente no 13º pavimento.

Devido à presença de elementos de proteção solar nesta solução, não há penetração solar no ambiente.

4.3.1.4.4. Alternativa 4: 52%_VB_CP1

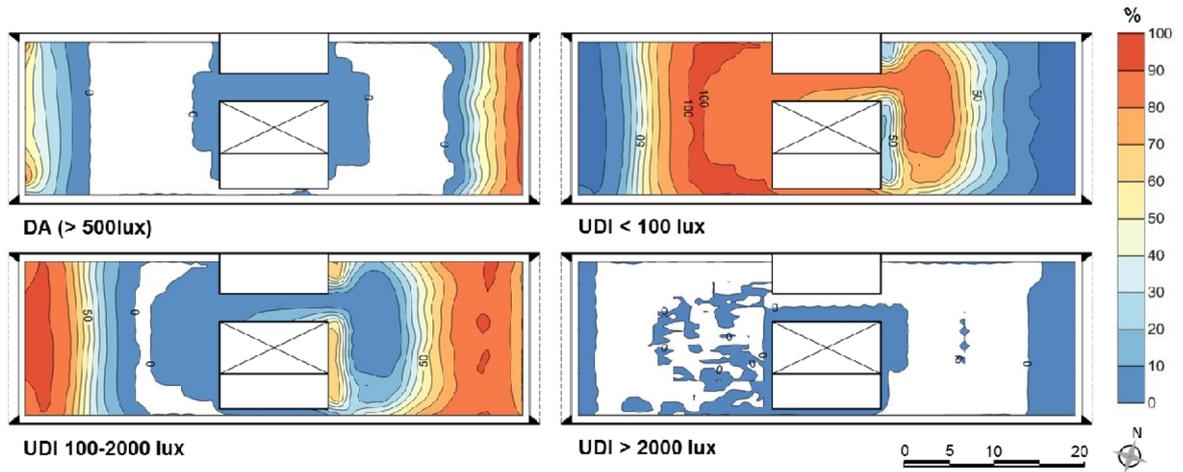


Gráfico 4.12 – Resultados Alternativa 4, 1º pavimento tipo.

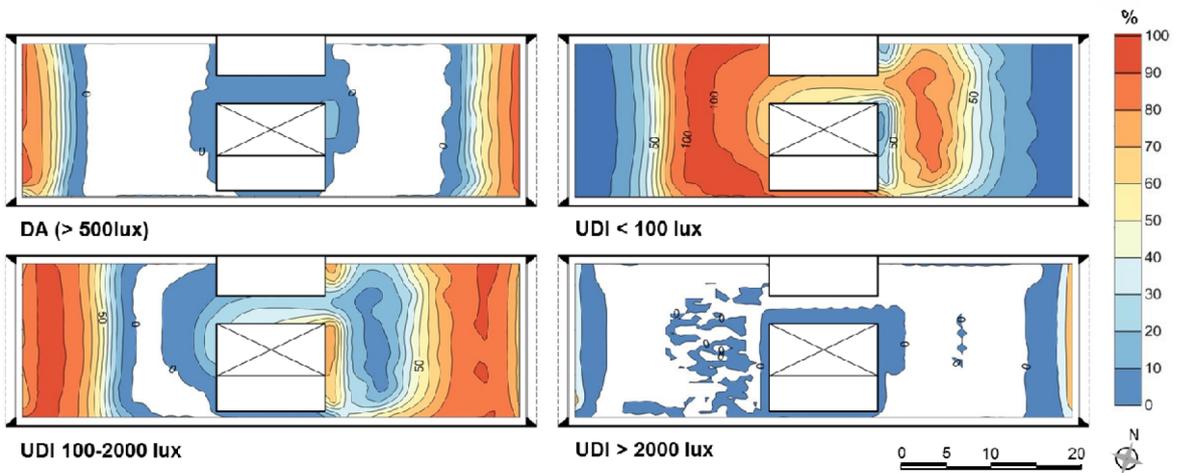


Gráfico 4.13 – Resultados Alternativa 4, 7º pavimento tipo.

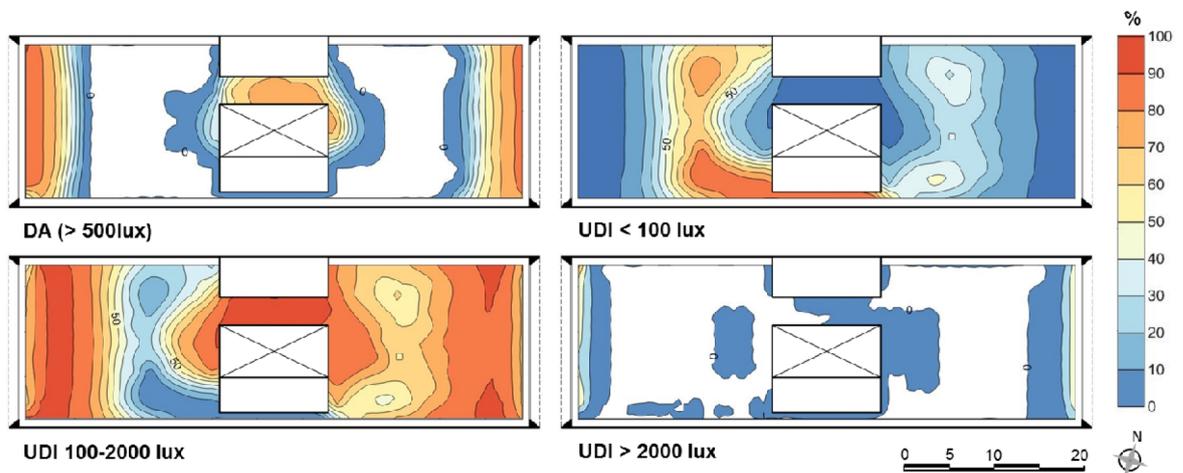


Gráfico 4.14 – Resultados Alternativa 4, 13º pavimento tipo.

Na alternativa 4, devido à ampliação da altura da janela pela retirada do peitoril e o consequente aumento da visão da abóbada celeste, detectou-se um maior aproveitamento da iluminação natural no ambiente do que na alternativa 3 (Gráficos 4.12 a 4.14). Ainda assim, percebe-se que uma autonomia da luz natural satisfatória restringe-se às áreas próximas às janelas Sudeste e Noroeste.

Nota-se que a frequência de iluminâncias excessivas e a autonomia de luz são semelhantes nas alternativas 3 e 4, entretanto, há uma diferença maior entre as ocorrências da faixa de iluminâncias úteis (100 à 2000 lux) e insuficientes (<100 lux) nas duas soluções.

Assim como na alternativa anterior, observa-se um desequilíbrio na distribuição da luz entre as alas Sudeste e Noroeste.

Ainda que a Alternativa 4 tenha apresentado um melhor desempenho que a Alternativa 3, ele se mostrou inferior ao das alternativas sem proteção (1 e 2), se considerarmos os resultados de DA, $UDI_{<100}$ e $UDI_{100-2000}$.

Devido à presença de elementos de proteção solar nesta solução, não há penetração solar no ambiente.

4.3.1.4.5. Alternativa 5: 37%_VB_CP2

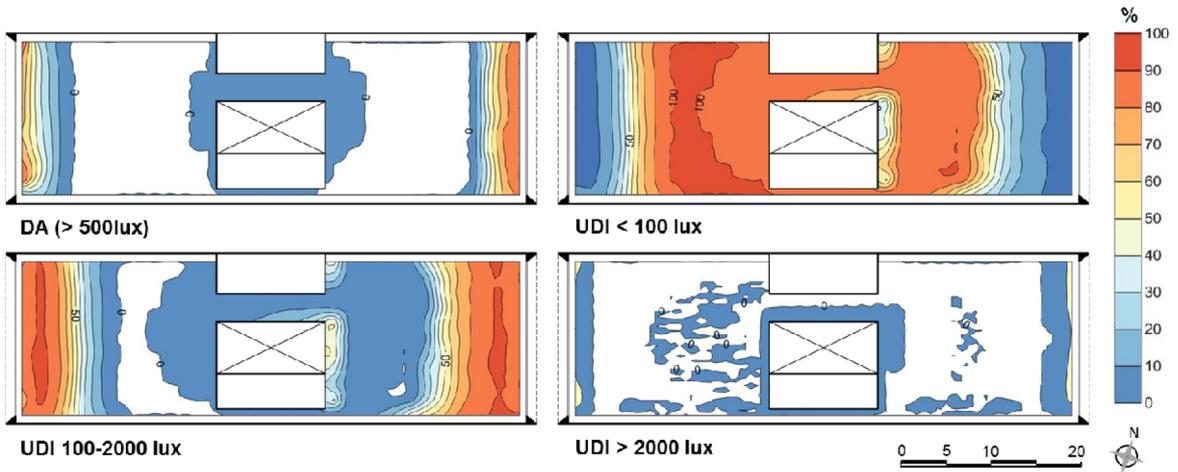


Gráfico 4.15 – Resultados Alternativa 5, 1º pavimento tipo.

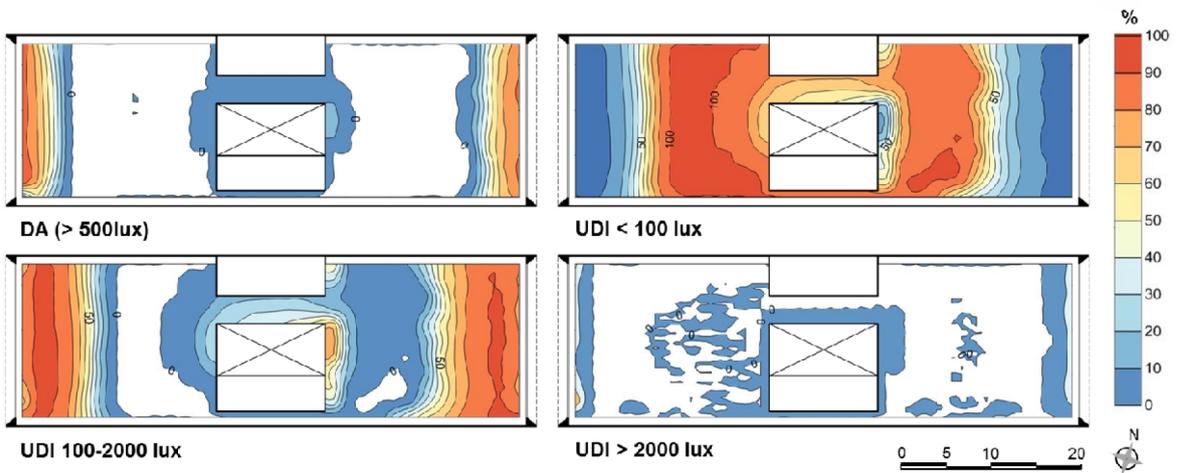


Gráfico 4.16 – Resultados Alternativa 5, 7º pavimento tipo.

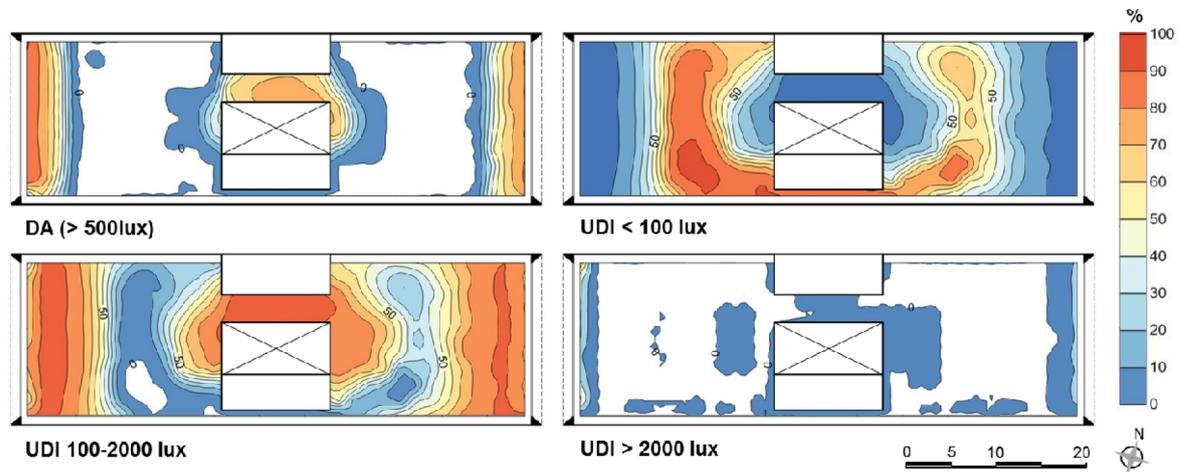


Gráfico 4.17 – Resultados Alternativa 5, 13º pavimento tipo.

A alternativa 5 apresentou uma redução na ocorrência de iluminâncias úteis (100 à 2000 lux) e um aumento na frequência de iluminâncias insuficientes (<100 lux) se comparado à alternativa anterior (Gráficos 4.15 a 4.17). Entretanto, seus resultados foram bastante similares ao da alternativa 3, o que decorre das semelhanças existentes entre as soluções quanto à dimensão das aberturas e ao sombreamento.

Houve também uma queda da autonomia de luz natural em todos os pavimentos. A ala Sudeste, assim como nas alternativas 3 e 4, destaca-se por apresentar um melhor desempenho lumínico, sobretudo devido a influência do átrio central.

A redução do percentual de abertura na fachada desencadeou também uma diminuição da ocorrência do intervalo de iluminâncias excessivas (>2000 lux).

4.3.1.4.6. Alternativa 6: 52%_VB_CP2

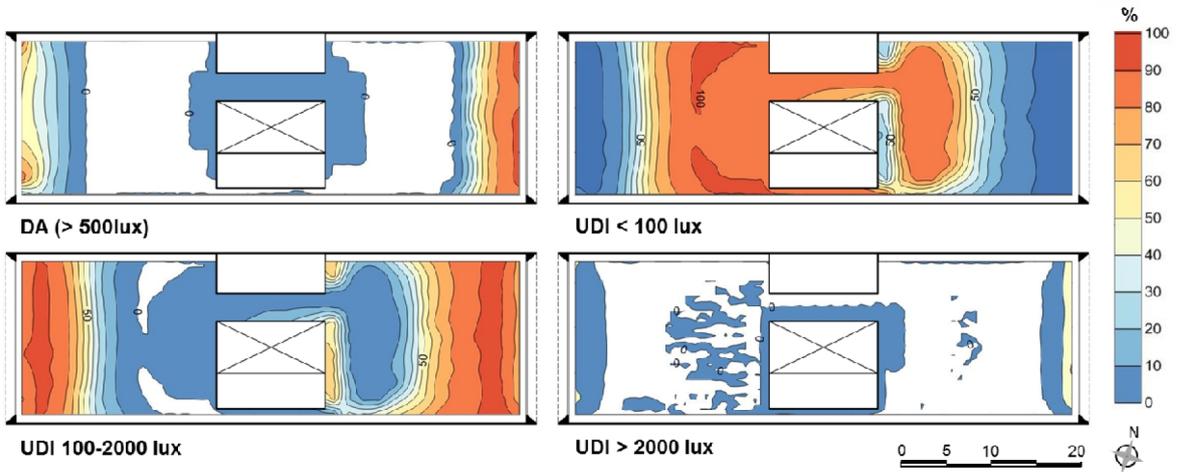


Gráfico 4.18 – Resultados Alternativa 6, 1º pavimento tipo.

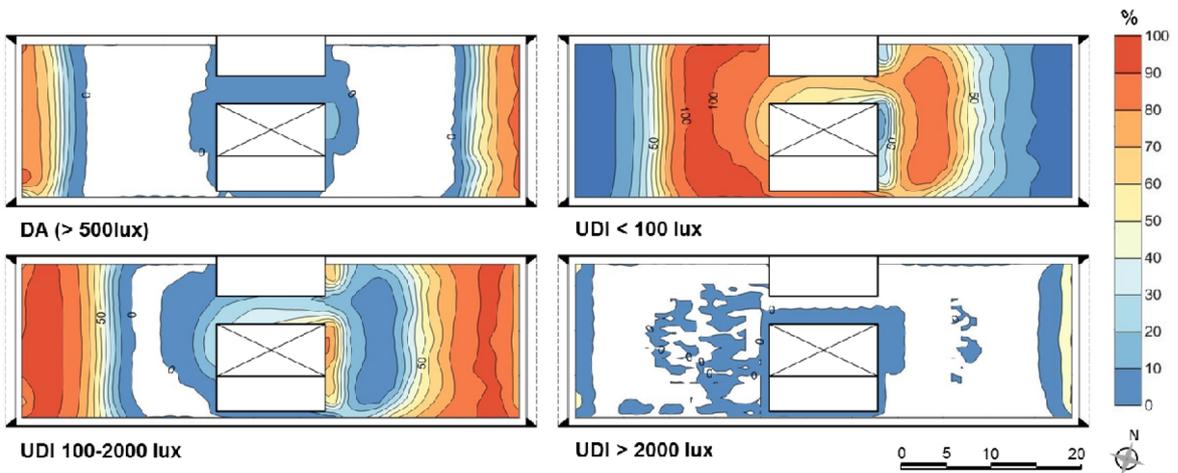


Gráfico 4.19 – Resultados Alternativa 6, 7º pavimento tipo.

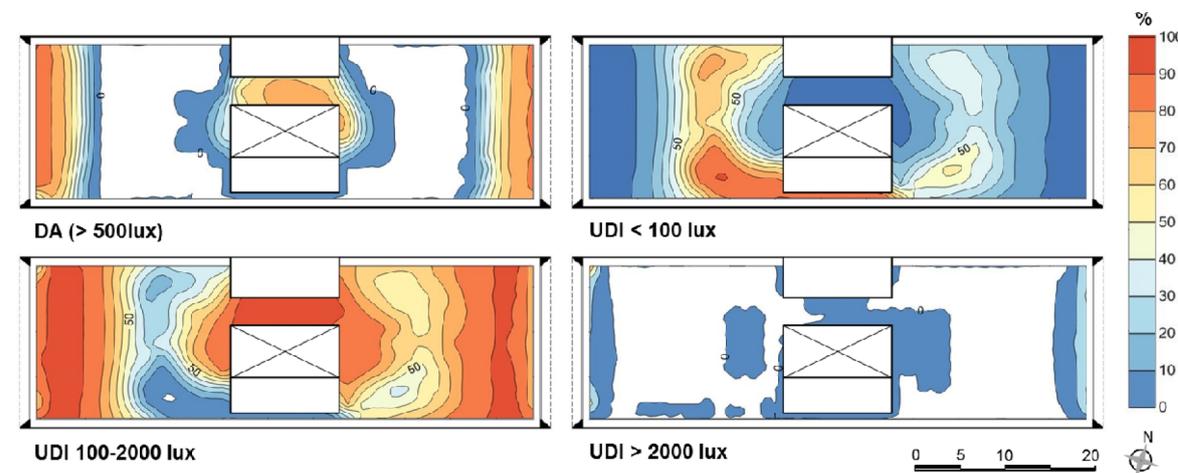


Gráfico 4.20 – Resultados Alternativa 6, 13º pavimento tipo.

Assim como ocorreu com as alternativas 3 e 5, a alternativa 6 apresentou um resultado similar a alternativa 4, principalmente para a métrica DA, o que indica que a substituição do anteparo por brises inclinados pouco influencia o desempenho lumínico do edifício (Gráficos 4.18 a 4.20).

O que se observa mais visivelmente é uma redução da frequência da faixa de iluminâncias insuficientes no ambiente se comparado à alternativa anterior, sobretudo no último pavimento. Houve também um aumento da ocorrência de iluminâncias úteis em todos os pavimentos, bem com um leve incremento da autonomia de luz natural.

Devido ao fato de a penetração solar nesta solução ser desprezível, não se observa uma ocorrência muito elevada de iluminâncias maiores que 2000 lux próximo à janela, entretanto, ela é maior que a detectada na solução anterior.

Da mesma forma como ocorre nas demais soluções que apresentam elementos de proteção solar, observa-se um desequilíbrio na distribuição da luz entre as alas Sudeste e Noroeste.

4.3.1.5. Comparação dos resultados (ranking parcial)

Como já exposto, para facilitar a comparação dos desempenhos das 6 alternativas estudadas, foi feita uma simplificação dos gráficos de curvas ISO apresentados para quantificar a área do pavimento tipo abrangida pela faixa de DA e $UDI \geq 50\%$.

Os resultados apresentados nos Gráficos 4.21 a 4.23 indicam as áreas encontradas para cada métrica dinâmica considerada e para cada um dos três pavimentos estudados. As setas inseridas junto às métricas apontam se elas são diretamente (\uparrow) ou inversamente (\downarrow) proporcionais ao desempenho lumínico das alternativas.

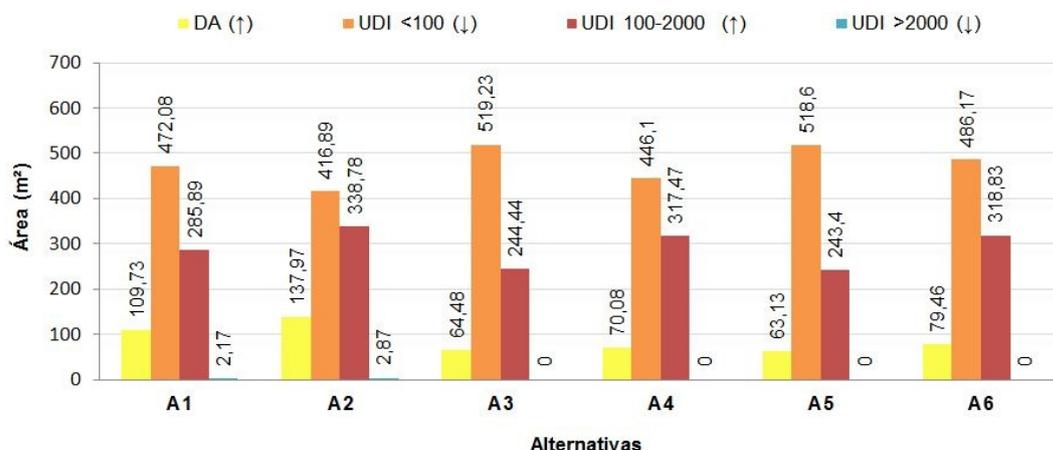


Gráfico 4.21 – 1º pavimento: área do pavimento tipo abrangida por DA e $UDI \geq 50\%$

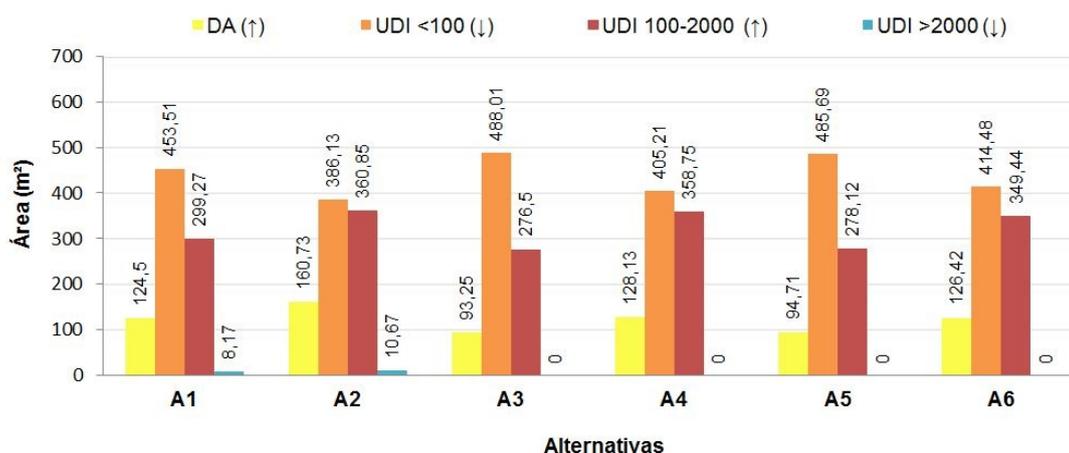


Gráfico 4.22 – 7º pavimento: área do pavimento tipo abrangida por DA e UDI \geq 50%.

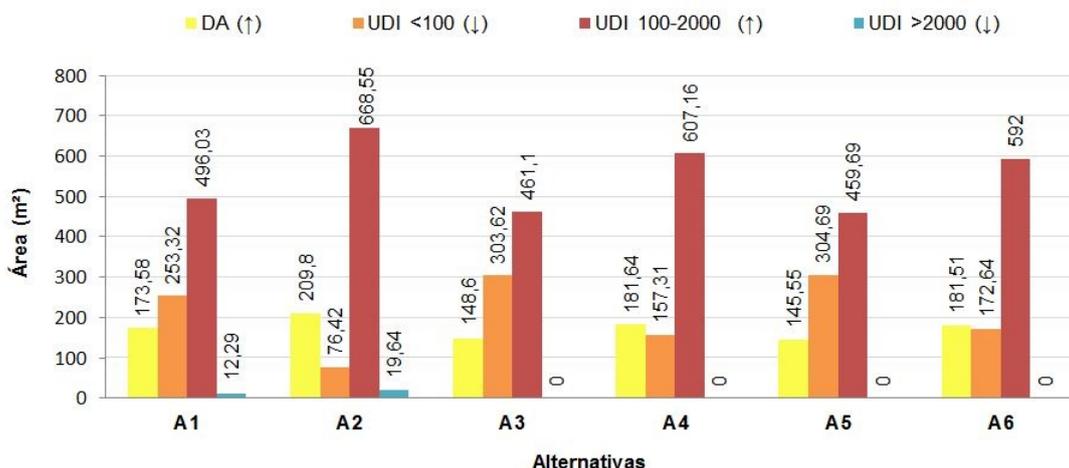


Gráfico 4.23 – 13º pavimento: área do pavimento tipo abrangida por DA e UDI \geq 50%.

Conforme se observa nos resultados do 1º e 7º pavimento, a métrica $UDI_{<100}$ é a que abrange a maior área do escritório em todas as alternativas, enquanto que no 13º pavimento, destaca-se principalmente a métrica $UDI_{100-2000}$. Em todos os pavimentos, os resultados relativos à $UDI_{>2000}$ são pouco expressivos¹⁸.

¹⁸ É importante ressaltar que a inexpressividade destes resultados pode ser decorrente da faixa de DA e UDI que foi estabelecida (\geq 50%). A área abrangida por $UDI_{>2000}$ poderia ser significativamente maior se esta faixa fosse menos rigorosa, como por exemplo para DA e UDI \geq 20%. No caso dos resultados para as alternativas A1 e A2 (sem proteção), não se deve tirar conclusões precipitadas sobre a eficiência do uso de vidros de controle solar na substituição dos protetores solares ao se observar estas áreas de abrangência reduzidas. O desconforto gerado por iluminâncias excessivas pode ser maior nestas soluções e pode não estar sendo contabilizado devido à faixa de DA e UDI escolhida.

As Tabelas 4.10 a 4.12 apresentam o ordenamento das alternativas por métrica dinâmica a partir dos resultados acima, evidenciando que diferentes *rankings* podem ser encontrados quando cada métrica é considerada separadamente. Isto reforça as conclusões de Reinhart, Mardaljevic e Rogers (2006) sobre a importância de considerar e cruzar os resultados de diversas métricas dinâmicas para fazer um ordenamento mais consistente das alternativas¹⁹.

Tabela 4.10 – 1º pavimento: ordenamento das alternativas por métrica dinâmica.

Colocação	DA	UDI _{<100}	UDI ₁₀₀₋₂₀₀₀	UDI _{>2000}
1º	A2	A2	A2	A3, A4, A5, A6
2º	A1	A4	A6	A1
3º	A6	A1	A4	A2
4º	A4	A6	A1	-
5º	A3	A5	A3	-
6º	A5	A3	A5	-

Tabela 4.11 – 7º pavimento: ordenamento das alternativas por métrica dinâmica.

Colocação	DA	UDI _{<100}	UDI ₁₀₀₋₂₀₀₀	UDI _{>2000}
1º	A2	A2	A2	A3, A4, A5, A6
2º	A4	A4	A4	A1
3º	A6	A6	A6	A2
4º	A1	A1	A1	-
5º	A5	A5	A5	-
6º	A3	A3	A3	-

Tabela 4.12 – 13º pavimento: ordenamento das alternativas por métrica dinâmica.

Colocação	DA	UDI _{<100}	UDI ₁₀₀₋₂₀₀₀	UDI _{>2000}
1º	A2	A2	A2	A3, A4, A5, A6
2º	A4	A4	A4	A1
3º	A6	A6	A6	A2
4º	A1	A1	A1	-
5º	A3	A3	A3	-
6º	A5	A5	A5	-

Observa-se que a Alternativa 2, em todos os pavimentos, é a que apresenta os melhores desempenhos do ponto de vista da Autonomia de Luz Natural, do UDI_{<100} e do UDI₁₀₀₋₂₀₀₀. Em contrapartida, é também a solução que apresenta a maior área abrangida por UDI_{>2000} ≥ 50%.

Destaca-se também que os *rankings* relativos ao 7º e 13º pavimento são idênticos para todas as métricas, com exceção de UDI_{>2000}. O mesmo não ocorre no 1º pavimento, onde se observa diferentes ordenamentos das alternativas para cada métrica.

¹⁹ É válido ressaltar que fazer um ordenamento das alternativas por métrica dinâmica (ou subcritério de projeto) não é indispensável para se aplicar a abordagem multicritério. Isto foi feito apenas para ressaltar a importância de considerar mais de uma métrica dinâmica para uma avaliação mais consistente das alternativas face ao critério de nível de iluminação natural.

No 7º e 13º pavimentos, os ordenamentos encontrados são muito semelhantes entre si, apresentando uma pequena variação na 5ª e a 6ª colocação.

Verifica-se também que mesmo para a cobertura, as áreas identificadas na métrica $UDI_{>2000}$ são muito pequenas se comparado à área total do pavimento (864,65 m²).

Tendo em vista estas diferenças nos ordenamentos das alternativas por métrica, decidiu-se cruzar seus resultados de forma a encontrar um único *ranking* para cada pavimento. Para tanto, foram inseridos no programa CELECTRE os valores normalizados das áreas calculadas, considerando cada pavimento por vez.

Para todos os subcritérios, foi dado o mesmo peso. Os valores para os limites de concordância – preferência, indiferença e veto – foram estabelecidos automaticamente pelo programa. As métricas DA e $UDI_{100-2000}$ foram maximizadas (maiores valores, melhor *ranking*) e as $UDI_{<100}$ e $UDI_{>2000}$ foram minimizadas (menores valores, melhor *ranking*).

Nas Tabelas 4.13 a 4.15, são apresentados os *rankings* obtidos por pavimento.

Tabela 4.13 – 1º pavimento: valores normalizados e *ranking* parcial.

	Valores normalizados				Ranking Parcial 1º pav.
	↑ DA	↓ $UDI_{<100}$	↑ $UDI_{100-2000}$	↓ $UDI_{>2000}$	
A1	0,795	0,909	0,844	0,756	A6
A2	1,000	0,803	1,000	1,000	A4
A3	0,467	1,000	0,722	0	A3
A4	0,508	0,859	0,937	0	A5
A5	0,458	0,999	0,718	0	A2
A6	0,576	0,936	0,941	0	A1

Tabela 4.14 – 7º pavimento: valores normalizados e *ranking* parcial.

	Valores normalizados				Ranking Parcial 7º pav.
	↑ DA	↓ $UDI_{<100}$	↑ $UDI_{100-2000}$	↓ $UDI_{>2000}$	
A1	0,775	0,929	0,829	0,766	A6, A4
A2	1,000	0,791	1,000	1,000	A5
A3	0,580	1,000	0,766	0	A3
A4	0,797	0,830	0,994	0	A2
A5	0,589	0,995	0,771	0	A1
A6	0,787	0,849	0,968	0	-

Tabela 4.15 – 13º pavimento: valores normalizados e *ranking* parcial.

	Valores normalizados				Ranking Parcial 13º pav.
	↑ DA	↓ $UDI_{<100}$	↑ $UDI_{100-2000}$	↓ $UDI_{>2000}$	
A1	0,827	0,831	0,742	0,626	A6, A4
A2	1,000	0,251	1,000	1,000	A3
A3	0,708	0,996	0,690	0	A5
A4	0,866	0,516	0,908	0	A2
A5	0,694	1,000	0,688	0	A1
A6	0,865	0,567	0,885	0	-

Como se pode observar, apesar de que a alternativa 2 tenha apresentado melhor colocação em três das quatro métricas dinâmicas consideradas, ela obteve a penúltima posição nos *rankings* de todos os pavimentos, o que destaca a influência que seu desempenho de $UDI_{>2000}$ teve no resultado final. Isto ocorreu mesmo em casos em que, considerando esta métrica, a área abrangida por DA e $UDI \geq 50\%$ era insignificante se comparado à área total analisada. Ainda assim, optou-se por considerar os resultados $UDI_{>2000}$, visto que iluminâncias excessivas, mesmo que em uma área reduzida do ambiente, podem prejudicar o conforto visual de alguns usuários, comprometendo sua produtividade²⁰.

Vale ressaltar que, mesmo quando testada no CELECTRE a redução significativa do peso de $UDI_{>2000}$ em relação ao peso das demais métricas, o *ranking* não foi alterado.

As soluções 6 e 4 obtiveram as melhores colocações em todos os pavimentos, o que evidencia a importância de sombrear as aberturas para evitar a incidência de iluminâncias excessivas no ambiente de trabalho. A altura elevada das aberturas também contribuiu para seu desempenho final, proporcionando um melhor aproveitamento da iluminação natural que nas soluções sombreadas equivalentes a elas (A5 e A3, respectivamente).

Em todos os pavimentos, a solução de pior desempenho foi a alternativa 1, que apresentou um aproveitamento da luz natural menos eficiente pela ocorrência de iluminâncias excessivas em pequenos trechos do plano de trabalho.

Uma questão importante a ser ressaltada é que, ao final desta análise monocritério, devido à consideração de quatro subcritérios, foram obtidos quatro valores numéricos por pavimento que representam o desempenho das alternativas face ao nível de iluminação natural no plano de trabalho, e não um, como desejado para aplicação da quarta etapa da abordagem multicritério (Tabelas 4.13 a 4.15). Na carência de métodos validados que auxiliassem a condensar estes quatro valores em um, todos os resultados para cada subcritério serão considerados na aplicação da etapa 4, conforme será descrito no tópico 4.4 deste capítulo.

4.3.2. Desempenho das alternativas quanto à visualização para o exterior

4.3.2.1. Metodologia de avaliação

Para definição da metodologia de avaliação das alternativas face ao critério de visualização para o exterior, partiu-se do conhecimento de como funciona a visão humana.

²⁰ Lembrando que a área abrangida por $UDI_{>2000}$ pode ser ainda maior se considerada uma faixa de ocorrência menor que 50%. Dai porque não desprezar os resultados desta métrica dinâmica.

O homem enxerga o ambiente através de um campo de visão, cuja extensão angular para a cabeça e olhos imóveis é de: 2 graus para o campo central, 40 graus para visualização do fundo e acima de 120 graus vertical e 180 graus horizontal para a visualização do ambiente como um todo (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 1998).

Entretanto, como ressaltam os citados autores, a visão humana não se limita a estes ângulos, se considerarmos o movimento dos olhos e da cabeça. Assim, partindo do entendimento do conceito de campo de visão angular, associando a ele a possibilidade de movimentação, foi definida uma metodologia de avaliação das alternativas.

Para efeito deste trabalho, a visualização para o exterior de cada alternativa foi quantificada considerando um usuário sentado a 4 metros de cada janela, distância esta onde se localiza a primeira fileira de usuários voltados para a abertura, segundo o layout proposto (Figura 4.16).

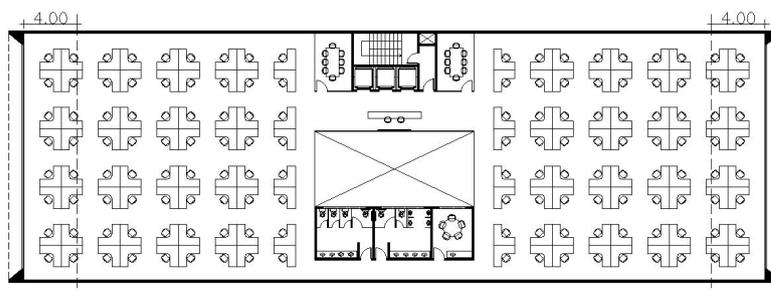


Figura 4.16 – Distância às aberturas considerada no cálculo dos ângulos de visualização.

Optou-se por considerar os usuários sentados, pois, devido à natureza da atividade desempenhada no edifício, eles permanecerão a maior parte do tempo nesta posição. A altura do olho considerada foi de 1,10 m do piso.

Sobre o corte longitudinal do espaço de escritório, foram traçadas, a partir deste ponto – a 4 metros das janelas e a 1,10 metros do piso – linhas retas até as aberturas, representando o campo de visão de um usuário com a cabeça e os olhos móveis. Ao ser feito este desenho, foram observados os obstáculos visuais gerados pelo peitoril e pelos elementos de proteção solar (Figura 4.17).

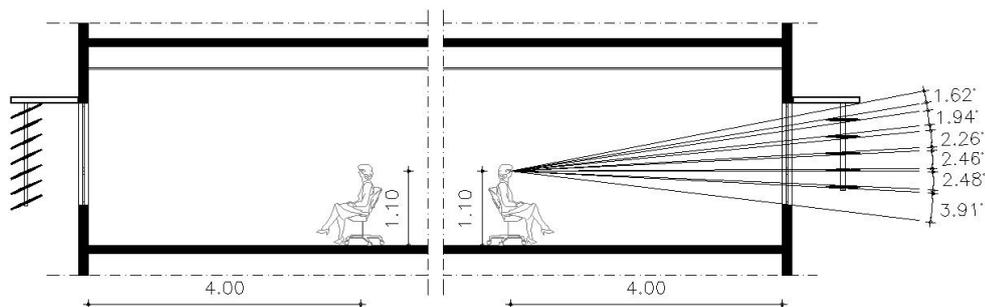


Figura 4.17 – Método de cálculo dos ângulos visuais.

Os ângulos horizontais – medidos em planta – foram desconsiderados, pois eles são iguais para todas as alternativas.

Uma vez quantificado estes ângulos de visualização para o exterior, eles foram somados para obtenção de um ângulo de visualização total por fachada. Por fim, os ângulos totais das fachadas Sudeste e Noroeste foram somados para representar o ângulo de visualização total de uma determinada alternativa.

O ordenamento das alternativas foi feito do maior para o menor ângulo de visão total (soma das duas fachadas).

4.3.2.2. Análise dos resultados

4.3.2.2.1. Alternativa 1: 37%_VA_SP

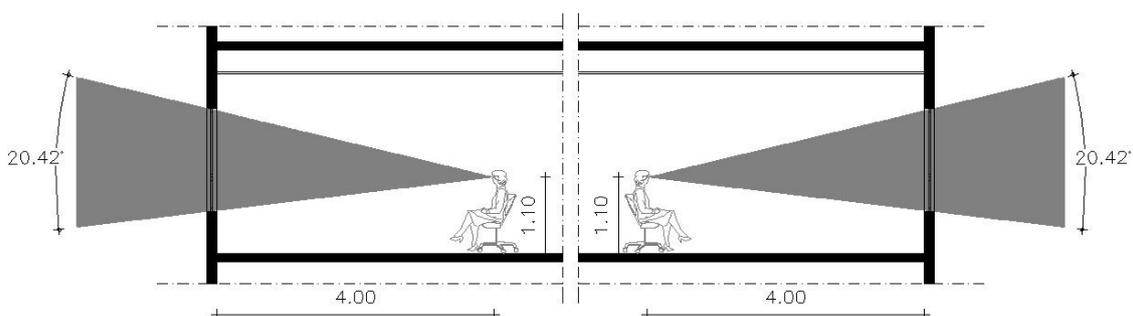


Figura 4.18 – Alternativa 1: ângulos de visualização para o exterior.

Na alternativa 1 (Figura 4.18), as aberturas das fachadas Sudeste e Noroeste são idênticas quanto aos parâmetros dimensão e sombreamento. Por isto, apresentam o mesmo ângulo de visão. O ângulo total de visualização para o exterior, considerando as duas fachadas, é de 40,84°.

4.3.2.2.2. Alternativa 2: 52%_VA_SP

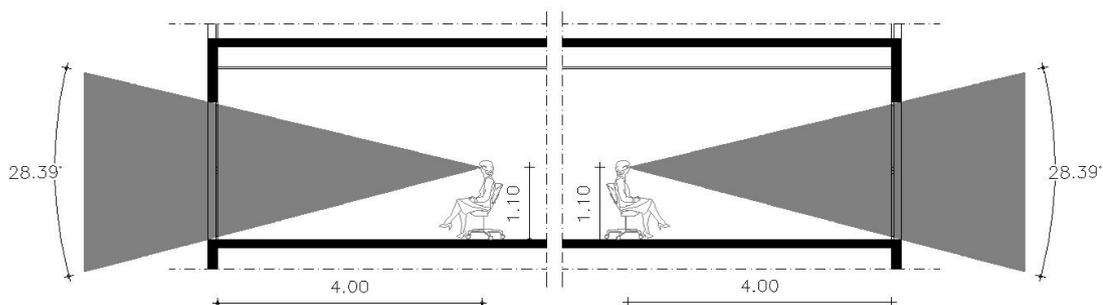


Figura 4.19 – Alternativa 2: ângulos de visualização para o exterior.

A alternativa 2 (Figura 4.19) apresenta aberturas maiores em ambas as fachadas e não possui nenhum dispositivo de proteção solar. Com isto, o ângulo total de visualização para o exterior é o maior de todas as alternativas, sendo igual a 56,78°.

4.3.2.2.3. Alternativa 3: 37%_VB_CP1

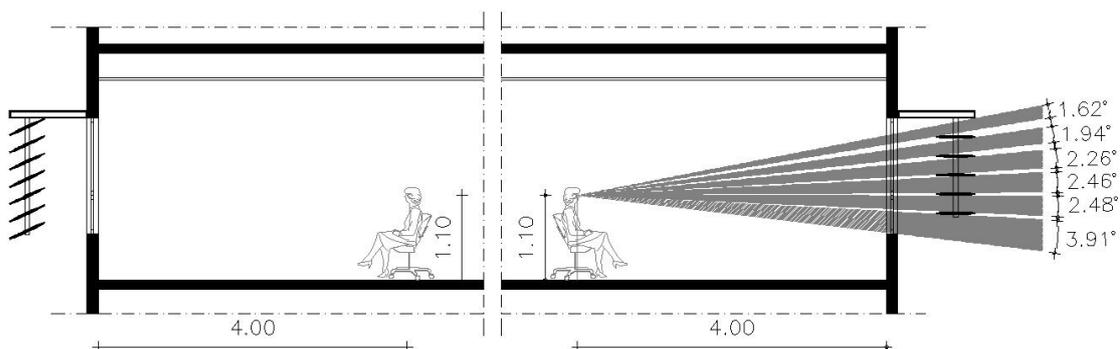


Figura 4.20 – Alternativa 3: ângulos de visualização para o exterior.

Na alternativa 3 (Figura 4.20), os elementos de proteção solar propostos para as duas fachadas apresentam inclinações diferentes, o que resulta em ângulos distintos de visualização para o exterior. O ângulo total da fachada Sudeste é de 14,67°, enquanto que o da fachada Noroeste é igual à zero para um usuário nesta posição. Assim, o ângulo total desta alternativa é igual a 14,67°.

4.3.2.2.4. Alternativa 4: 52%_VB_CP1

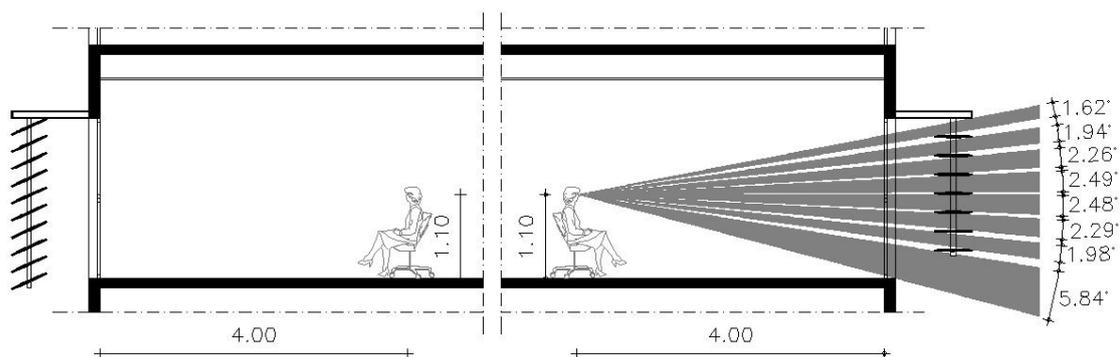


Figura 4.21 – Alternativa 4: ângulos de visualização para o exterior.

Na alternativa 4 (Figura 4.21), o ângulo total de visualização a partir da fachada Sudeste é de 20,90°, e da fachada Noroeste é zero, devido a inclinação dos elementos de proteção solar. Com isto, o ângulo total das duas fachadas é de 20,90°.

4.3.2.2.5. Alternativa 5: 37%_VB_CP2

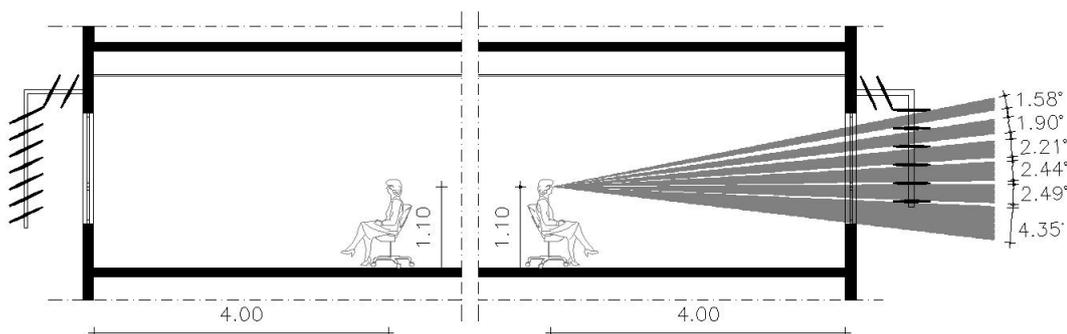


Figura 4.22 – Alternativa 5: ângulos de visualização para o exterior.

Na alternativa 5 (Figura 4.22), há uma redução do ângulo de visualização pela fachada Sudeste em relação a alternativa anterior, principalmente devido à redução da altura da janela. Observa-se que a substituição do anteparo pelos brises superiores em nada contribuiu para o aumento da visualização para o exterior considerando esta posição do usuário.

O ângulo total referente à fachada Sudeste é de $14,97^\circ$, enquanto que o da Noroeste é zero. Assim, o ângulo total das duas fachadas é de $14,97^\circ$.

4.3.2.2.6. Alternativa 6: 52%_VB_CP2

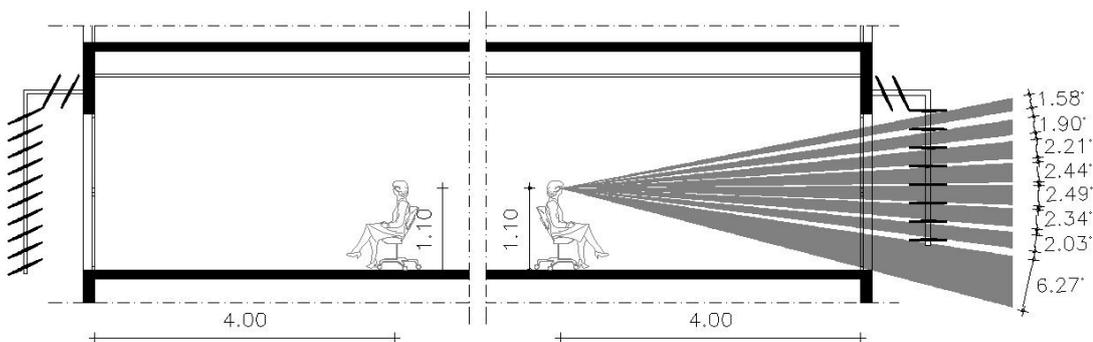


Figura 4.23 – Alternativa 6: ângulos de visualização para o exterior.

Na alternativa 6 (Figura 4.23), a fachada Sudeste apresenta um ângulo total de visualização para o exterior de $21,26^\circ$, enquanto que a abertura oposta não possibilita nenhuma visualização para o entorno a partir desta posição do usuário. Assim, o ângulo total referente às duas fachadas é de $21,26^\circ$.

4.3.2.3. Comparação dos resultados (ranking parcial)

Para facilitar a comparação das alternativas, a Tabela 4.16 sintetiza os resultados acima apresentados, indicando o ordenamento final das alternativas para este critério.

Tabela 4.16 – Ângulos de visualização para o exterior e *ranking* parcial.

Alternativa	Fachada Sudeste	Fachada Noroeste	Total (soma)	Valores normalizados	Ranking Parcial
A1	20,42°	20,42°	40,84°	0,719	A2
A2	28,39°	28,39°	56,78°	1,000	A1
A3	14,67°	0	14,67°	0,258	A6
A4	20,90°	0	20,90°	0,368	A4
A5	14,97°	0	14,97°	0,264	A5
A6	21,26°	0	21,26°	0,374	A3

De acordo com os resultados, a alternativa 2 ficou em primeira colocação quanto à visualização para o exterior, graças à dimensão e inexistência de barreiras visuais em suas janelas.

Como esperado, as soluções que apresentam peitoris em suas aberturas tiveram uma baixa colocação neste ordenamento, com exceção da alternativa 1, destituída de elementos de proteção solar.

Houve uma diferença significativa entre os ordenamentos dos critérios “nível de iluminação natural” e “visualização para o exterior”. Como observado, no critério anterior, a alternativa 2 apresentou um baixo desempenho quanto a métrica $UDI_{>2000}$ decorrente principalmente da ausência de elementos sombreadores, aspecto este que, do ponto de vista da visualização para o exterior, beneficiou esta solução. Observa-se aqui um exemplo claro de como os critérios podem apresentar conflitos entre si.

4.3.3. Desempenho das alternativas quanto à eficiência energética

4.3.3.1. Metodologia de avaliação

A proposta inicial para avaliar o desempenho das alternativas face ao critério de eficiência energética consistia em realizar simulações computacionais com o programa *EnergyPlus*, *software* gratuito de simulação termo-energética desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, que tem sido bastante utilizado em pesquisas nacionais nesta área.

Entretanto, ao longo de sua aplicação, verificou-se que, sendo um programa bastante completo e complexo, sua utilização ia contra o esforço do presente trabalho em apresentar métodos de avaliação do desempenho de alternativas que não tornassem o processo demasiadamente trabalhoso e demorado. Isto porque se observou que a utilização do

programa, além de demandar um conhecimento aprofundado sobre questões de pouco domínio dos arquitetos, exigia uma capacitação demorada dos mesmos para sua utilização e uma pesquisa trabalhosa sobre alguns dados de entrada de difícil acesso a estes profissionais.

Assim, dado o interesse em viabilizar a aplicação da abordagem multicritério na prática profissional sem que necessariamente seja preciso o auxílio de consultores ao longo deste processo, optou-se por adotar o método prescritivo proposto pelo RTQ-C para a avaliação termo-energética das alternativas.

É importante ressaltar que, como há previsões de tornar o RTQ-C obrigatório para o projeto de novos edifícios comerciais, de serviço e públicos, entende-se ser coerente propor neste trabalho um método de avaliação termo-energética que inevitavelmente será incorporado futuramente ao processo projetual.

O método prescritivo consiste em um dos métodos propostos pelo regulamento do Procel Edifica para determinação da eficiência energética da edificação. Ele consiste em uma série de parâmetros predefinidos ou a calcular que indicam a eficiência do sistema (CARLO; LAMBERTS, 2010).

No que diz respeito à envoltória da edificação, o RTQ-C estabelece pré-requisitos relacionados às características térmicas dos seus materiais componentes, incluindo a transmitância térmica, cores e absorvância de superfícies e o fator solar da abertura zenital.

Além disso, apresenta equações diferenciadas para as oito zonas bioclimáticas brasileiras, através das quais se faz o cálculo do Índice de Consumo da envoltória (ICenv). Este índice é resultante da combinação de outras variáveis do envelope do edifício que também influenciam no seu desempenho energético, tais como os parâmetros relativos às características dimensionais do edifício – Fator de Forma (FF) e Fator de Altura (FA) – e os parâmetros relacionados às aberturas – Percentual de Área de Abertura na Fachada (PAFt), Fator Solar (FS) e ângulos de sombreamento dos protetores solares (AVS e AHS) .

As 8 equações propostas pelo método foram obtidas a partir de um número significativo de simulações computacionais termo-energéticas no *Energyplus* feitas com protótipos de edifícios que representam as principais tipologias de edificações comerciais, de serviço e públicas existentes no Brasil. Apesar de se aplicar a maioria de tipologias construídas atualmente no país, estas equações não abrangem todas as soluções arquitetônicas possíveis, sendo mais indicadas para edifícios com geometria simplificada.

A seguir, tem-se um exemplo de equação, aplicável a edifícios com área de projeção média dos pavimentos superior a 500 m² localizados nas zonas bioclimáticas 6 e 8.

$$ICenv = -160,36.FA + 1277,29.FF - 19,21.PAFt + 2,95.FS - 0,36.AVS - 0,16.AHS + 290,25.FF.PAFt + 0,01.PAFt.AVS.AHS - 120,58$$

[Eq. 4.1]

Segundo o RTQ-C (BRASIL, 2010a), as variáveis das equações e suas respectivas definições são:

- ICenv: Indicador de Consumo da Envolvória (adimensional).
- FF: Fator de Forma, que representa a razão entre a área da envoltória (Aenv) e o volume total da edificação (Vtot). A Aenv é resultante da soma das áreas das fachadas, empenas e cobertura, incluindo as aberturas. O Vtot representa o volume delimitado pelos fechamentos externos do edifício (fachadas e cobertura), com exceção de pátios internos descobertos.
- FA: Fator de Altura, que indica a razão entre a área de projeção da cobertura (Apcob) e a área total construída (Atot), com exceção dos subsolos. A Apcob equivale à área de projeção horizontal da cobertura, incluindo terraços cobertos ou descobertos e excluindo beiras, marquises e coberturas sobre varandas. A Atot representa a soma das áreas dos pisos dos ambientes fechados da construção, medidas externamente.
- PAFt: Percentual de Área de Abertura na Fachada total, calculado pela razão entre a soma de todas as áreas de abertura envidraçada (não considera caixilhos) e a área total de fachada da edificação. Exclui área externa de caixa d'água no cômputo da área de fachada, mas inclui a área de caixa de escada até o ponto mais alto da cobertura. Para uso do PAFt, primeiramente deve-se realizar o cálculo do PAF para a fachada Oeste (PAFo), obtido pela razão entre a área da abertura envidraçada da fachada Oeste e a área da fachada Oeste. Caso o PAFo seja maior que PAFt + 20%, deve-se utilizar o PAFo na equação. Caso contrário, utiliza-se o PAFt.
- FS: Fator Solar, que indica a razão entre o ganho de calor que entra num ambiente através de uma abertura e a radiação solar incidente nesta mesma abertura. Inclui o calor radiante transmitido pelo vidro e a radiação solar absorvida, que é re-irradiada ou transmitida, por condução ou convecção, ao ambiente.
- AVS: Ângulo Vertical de Sombreamento, gerado por elementos de proteção solar horizontais. O ângulo é formado entre dois planos que contêm a base da abertura: O primeiro é o plano vertical na base da folha de vidro, e o segundo é o plano formado pela extremidade mais distante da proteção solar horizontal até a base da folha de vidro.

- AHS: Ângulo Horizontal de Sombreamento, gerado por elementos de proteção solar verticais. O ângulo é formado entre dois planos que contêm a base da abertura: O primeiro é o plano que contém a base da folha de vidro, e o segundo é o plano formado pela extremidade mais distante da proteção solar vertical até a base da folha de vidro.

A fim de comparar o desempenho das alternativas face ao critério eficiência energética, propõe-se calcular o Indicador de Consumo da Envoltória (ICenv) para cada uma delas. Os valores obtidos serão normalizados e, em seguida, será feito um ordenamento das soluções face ao critério de eficiência energética.

Como visto, o objetivo de aplicar o método prescritivo do RTQ-C neste trabalho não está em identificar qual etiqueta será alcançada em cada alternativa, até porque, se ocorrer de todas elas obterem a mesma classificação, tornar-se-á inviável fazer a comparação entre as soluções de projeto somente considerando a etiqueta.

Sendo um valor numérico, o Indicador de Consumo da Envoltória pode ser diretamente introduzido nos cálculos da análise multicritério. No caso de considerar a etiqueta, seria necessário relacioná-las a uma escala numérica para então serem feitos os cálculos.

Por fim, é importante ressaltar que se verificou uma restrição de aplicação do método prescritivo especificamente para o edifício estudado em caso de se desejar considerar a etiqueta como indicador de desempenho para a análise multicritério. Segundo o RTQ-C, “para edificações com Percentual de Abertura Zenital (PAZ) maior que 5%, pretendendo-se alcançar classificação A, deve-se utilizar a simulação computacional”. Tendo em vista que o edifício estudado apresenta um PAZ igual a 10% devido à cobertura envidraçada do átrio, seria necessário realizar simulações computacionais para confirmar a obtenção da etiqueta A.

Baseando-se nestas observações, foi decidido utilizar apenas o Indicador de Consumo da Envoltória para quantificar o desempenho termo-energético das soluções propostas. Seu cálculo será realizado com a equação 4.1 (acima apresentada), visto que o edifício estudado está situado na zona bioclimática 8 e apresenta uma área de projeção média dos pavimentos igual a 1068,48m².

4.3.3.2. Os dados de entrada

Para o cálculo do ICenv de cada alternativa, foi necessário inicialmente calcular as variáveis a serem inseridas na equação.

Primeiramente, foi feito um esquema simplificado da volumetria do edifício e levantadas suas dimensões (Figura 4.24). Foram então calculadas as variáveis comuns a todas as alternativas de projeto: Fator de Forma e Fator de Altura.

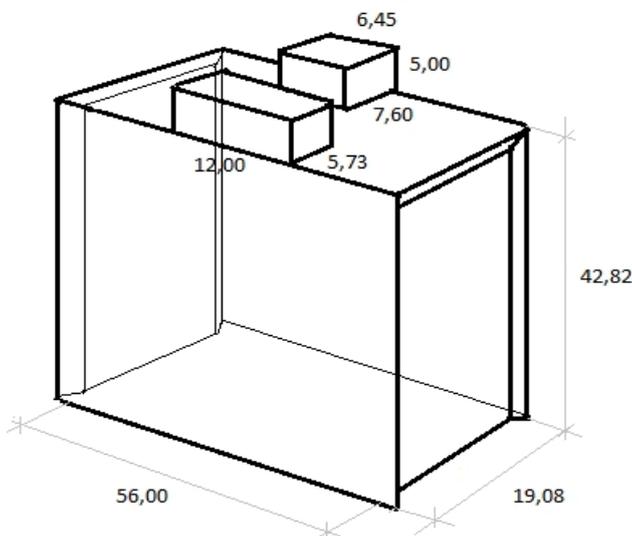


Figura 4.24 – Esquema da volumetria com suas dimensões.

A Tabela 4.17 indica os valores da Área de projeção da cobertura (A_{pcob}), Área total construída (A_{tot}), Área da envoltória (A_{env}) e Volume total da edificação (V_{tot}). Os valores de Fator de Forma (FF) e Fator de Altura (FA), também indicados, foram obtidos a partir destas variáveis.

Tabela 4.17 – Cálculo do FA e FF.

A_{pcob} (m^2)	A_{tot} (m^2)	A_{env} (m^2)	V_{tot} (m^3)	FA (A_{pcob}/A_{tot})	FF (A_{env}/V_{tot})
1068,48	14178,49	7816,13	46341,21	0,075	0,17

As áreas de projeção da cobertura e da envoltória foram calculadas excluindo-se a área de superfície gerada pelos pórticos das fachadas Sudeste e Noroeste, bem como as superfícies de peitoris da cobertura, pois segundo definição do regulamento, não são consideradas envoltória²¹. Para A_{env} , consideraram-se as fachadas dos volumes de caixa d'água e elevador/escada.

O volume do átrio foi incluído no cálculo do volume total da edificação, pois devido à presença da cobertura envidraçada, foi considerado como ambiente interno. Seguindo este

²¹ Para o RTQ-C, a envoltória é formada por planos que separam o ambiente interno do ambiente externo.

raciocínio, as superfícies envidraçadas que delimitam o átrio não foram consideradas no cálculo da envoltória.

A área total construída considerou a área dos 13 pavimentos tipo, do pavimento térreo e do piso da caixa de elevador/escada e da caixa d'água (na cobertura).

O Fator de Forma obtido está dentro do valor mínimo permitido para uso na equação.

Após obtenção do FF e FA, foram calculadas as variáveis específicas de cada alternativa: PAFt, PAFo, AVS e AHS. Os Fatores solares – já especificados anteriormente – foram obtidos em consulta aos catálogos de vidro disponibilizados pelos fabricantes.

A Tabela 4.18 apresenta os valores obtidos para cada alternativa.

Tabela 4.18 – Valores das variáveis relativas às aberturas, por alternativa.

Alternativa	PAFt	PAFo	FS	AVS	AHS
A1	0,09	0,37	0,37 (VA)	0	3
A2	0,13	0,52	0,37 (VA)	0	3
A3	0,09	0,37	0,70 (VB)	52,92	3
A4	0,13	0,52	0,70 (VB)	55,74	3
A5	0,09	0,37	0,70 (VB)	40,08	3
A6	0,13	0,52	0,70 (VB)	45,02	3

Conforme indicado pelo RTQ-C, para o cálculo do PAFt, desconsiderou-se os caixilhos nas áreas de superfície envidraçada e levou-se em conta todas as áreas de fachada – incluindo empenas e fachadas do volume da caixa de elevador/escada – no cálculo da área total de fachada²².

Observa-se que para todas as alternativas, o PAFo é maior que PAFt + 20%, o que implicará na utilização do valor de PAFo na equação.

Para o cálculo do AVS, foi necessário inicialmente calcular uma média aritmética dos ângulos de sombreamento de cada abertura – recomendado pelo RTQ-C para casos de ângulos diferentes – conforme indicado na Figura 4.25. Em seguida, foi feita uma ponderação dos ângulos obtidos em função da área envidraçada das aberturas.

É importante ressaltar que os ângulos de sombreamento considerados no RTQ-C (AVS e AHS) são ângulos internos, e que os ângulos até então apresentados neste trabalho são externos (Figura 4.26). Assim, os AVS e AHS foram obtidos subtraindo os valores anteriormente indicados por 90°.

²² Para o RTQ-C, a fachada é formada por superfícies externas verticais ou com inclinação superior a 60° em relação a horizontal. Inclui superfícies opacas, paredes, translúcidas, transparentes e vazadas, como combogós e vãos de entrada (BRASIL, 2010a).

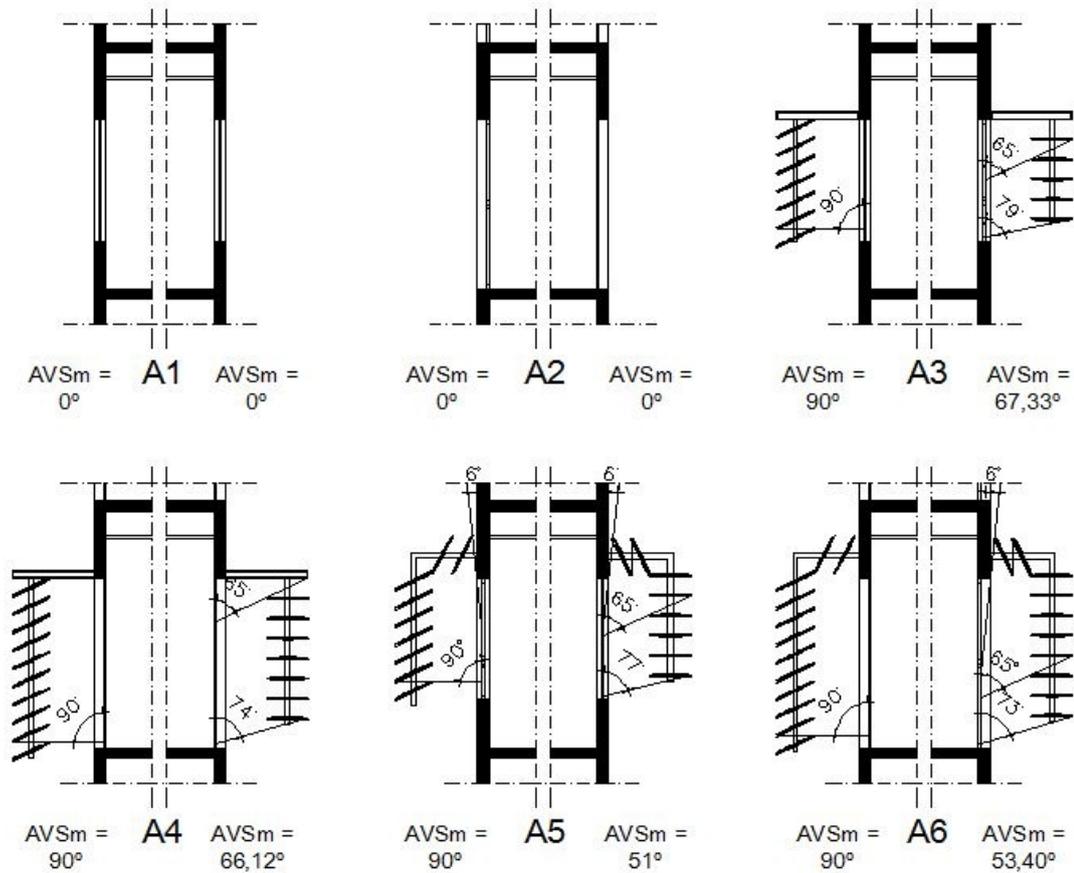


Figura 4.25 – Ângulos verticais médios por fachada e alternativa.

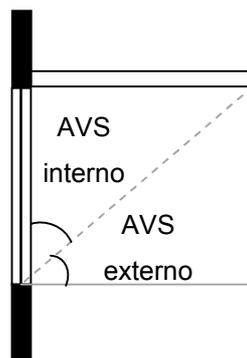


Figura 4.26 – Corte esquemático de uma abertura, indicando diferença entre AVS interno e externo.

A área envidraçada de cada janela dos pavimentos tipos é de 20,66 m² para as alternativas 1, 3 e 5, e de 30,21 m² para as alternativas 2, 4 e 6. A área envidraçada de cada abertura do térreo é de 36,57 m² para todas as soluções testadas e a mesma não é sombreada.

O AHS obtido é relativo ao sombreamento gerado pelos pórticos das fachadas Sudeste e Noroeste, que funcionam como elementos de proteção verticais para as janelas de todos os pavimentos (Figura 4.27).

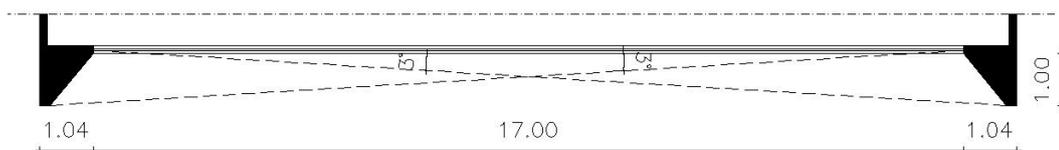


Figura 4.27 – Planta do pórtico indicando o AHS para todas as fachadas e alternativas.

O RTQ-C estabelece valores limites de AVS e AHS como fator de segurança para algumas equações. Para a aplicada neste trabalho, os ângulos usados devem ter valor máximo de 45°. Desta forma, foi necessário substituir os AVS das alternativas 3, 4 e 6 por este valor limite. Os demais valores obtidos foram mantidos.

A Tabela 4.19 indica os valores finais introduzidos na equação.

Tabela 4.19 – Valores finais das variáveis a serem inseridas na equação.

Alternativa	FA	FF	PAFo	FS	AVS	AHS
A1	0,075	0,17	0,37	0,37	0	3
A2	0,075	0,17	0,52	0,37	0	3
A3	0,075	0,17	0,37	0,70	45	3
A4	0,075	0,17	0,52	0,70	45	3
A5	0,075	0,17	0,37	0,70	40,08	3
A6	0,075	0,17	0,52	0,70	45	3

4.3.3.3. Análise e comparação dos resultados (ranking parcial)

Inserindo-se os valores da tabela acima na equação 4.1, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 4.20, a seguir.

Tabela 4.20 – Indicadores de Consumo da Envoltória por alternativa e *ranking* parcial.

Alternativa	ICenv	Valores Normalizados	Ranking Parcial
A1	96,24	0,955	A3
A2	100,76	1,000	A5
A3	81,51	0,809	A4, A6
A4	86,23	0,856	A1
A5	83,22	0,826	A2
A6	86,23	0,856	-

Os resultados se mostraram bastante coerentes com o indicado pela literatura estudada no Capítulo 3: as melhores classificações foram alcançadas por aquelas alternativas com menor PAF e com dispositivos de proteção solar, e as piores foram aquelas sem sombreamento das aberturas.

No caso da alternativa 2, as mesmas características que fazem dela a melhor solução do ponto de vista do critério visualização para o exterior – ausência de proteção solar e grande dimensão da abertura – a tornam menos eficiente sob a perspectiva do consumo de energia. Mais uma vez, verifica-se aqui um exemplo de conflito entre os critérios considerados.

Observa-se que as alternativas 4 e 6 alcançaram a mesma classificação, ainda que elas apresentem uma diferença entre si quanto ao elemento acima da janela. Esta variação de projeto tinha sido inicialmente proposta quando se pensava em avaliar o desempenho das alternativas por meio de simulação computacional, prevendo-se que os resultados de A6 refletiriam os benefícios gerados pela convecção do ar pelos brises superiores. Como visto, a equação do método prescritivo do RTQ-C não é sensível a essas variações.

Observou-se também que a substituição do AVS original da alternativa 4 pelo valor limite de 45° imposto pelo método contribuiu para que este empate com a alternativa 6 ocorresse.

A título de curiosidade, avançou-se nos cálculos do método prescritivo para identificar a relação dos ICenv obtidos com as etiquetas de eficiência energética, ainda que, como dito, elas não sejam consideradas na análise multicritério nem possam ser confirmadas sem a realização de simulações computacionais. Verificou-se que as alternativas que apresentam dispositivos de proteção solar (A3, A4, A5 e A6) alcançaram etiqueta A, enquanto que as alternativas 1 e 2, sem sombreamento das aberturas, alcançaram respectivamente as etiquetas C e D.

4.4. Etapa 04: aplicação de um método de abordagem multicritério para identificação da solução preferida

4.4.1. Dados de entrada

Conforme já exposto, para esta etapa, foi utilizado o método ELECTRE III, através da aplicação do programa CELECTRE.

O primeiro passo consistiu em preencher os campos da tela inicial do CELECTRE. Na Figura 4.28, tem-se um exemplo referente ao 1º pavimento e ao grupo de pesos A (pesos iguais para todos os critérios).

Weight >>	1	1	1	1	1	1				
-----	Criterion 1	Criterion 2	Criterion 3	Criterion 4	Criterion 5	Criterion 6	Criterion 7	Criterion 8	Criterion 9	Criterion 10
Action 1	0,795	0,909	0,844	0,756	0,719	0,955				
Action 2	1	0,803	1	1	1	1				
Action 3	0,467	1	0,722	0	0,258	0,809				
Action 4	0,508	0,859	0,937	0	0,368	0,856				
Action 5	0,458	0,999	0,718	0	0,264	0,826				
Action 6	0,576	0,936	0,941	0	0,374	0,856				
Action 7										
Action 8										
Action 9										
Action 10										
Limit P	0,22	0,35	0,32	0,09	0,16	0,33				
Limit Q	0,05	0,08	0,07	0,02	0,04	0,07				
Limit V	0,50	0,79	0,74	0,17	0,37	0,75				

Figura 4.28 – Exemplo de dados inseridos na tela inicial do programa CELECTRE para o 1º pavimento e o grupo de variações de peso A.

Nos retângulos pretos na parte superior da tela, foram indicados o número de critérios (*criteria*) e alternativas (*actions*) consideradas na análise. Conforme relatado no tópico 4.3.1.5 deste capítulo, na impossibilidade de encontrar um valor numérico único que represente, para cada pavimento estudado, o desempenho das alternativas face ao critério de nível de iluminação natural, todos os valores de seus quatro subcritérios – DA, UDI_{<100}, UDI₁₀₀₋₂₀₀₀ e UDI_{>2000} – tiveram de ser inseridos no programa. Assim, no lugar de 3, foi indicado um número de 6 critérios para as análises, sendo quatro relacionados ao “nível de iluminação natural”, e dois, aos critérios “visualização para o exterior” e “eficiência energética”.

Na matriz apresentada na tela inicial do CELECTRE, as colunas representam os critérios e as linhas, as alternativas. Na Figura 4.28, as quatro primeiras colunas representam os subcritérios DA, UDI_{<100}, UDI₁₀₀₋₂₀₀₀ e UDI_{>2000}, e as duas últimas, a visualização para o exterior e a eficiência energética, respectivamente.

As setas acima de cada coluna indicam que os subcritérios DA e o UDI₁₀₀₋₂₀₀₀ e o critério visualização para o exterior foram maximizados (quanto maior o valor, melhor a classificação) e que os subcritérios UDI_{<100} e UDI_{>2000} e o critério eficiência energética foram minimizados (quanto menor o valor, melhor a classificação).

Nos campos abaixo das setas, foram indicados os pesos (*weights*) para cada um dos critérios, neste caso, seguindo o estabelecido para o grupo de variação de peso A (pesos iguais para todos os critérios).

Em seguida, em cada campo que representa o cruzamento entre uma linha de alternativa e uma coluna de critério, foram inseridos os valores normalizados de desempenho obtido com as análises monocritérios.

Finalmente, os valores para os limites de concordância – preferência, indiferença e veto – de cada critério foram definidos automaticamente pelo programa. Uma vez preenchidos todos os campos e solicitado o início dos cálculos, o programa apresentou instantaneamente os resultados da análise multicritério. A Figura 4.29 mostra o resultado final para o 1º pavimento e grupo de pesos A.

Na Figura 4.29, tem-se à esquerda a matriz de credibilidade obtida com os cálculos do método ELECTRE III, e, à direita, o ordenamento final das alternativas. A tabela abaixo realça os valores de desempenho da solução preferida – no caso, a alternativa 6 – para cada critério considerado.

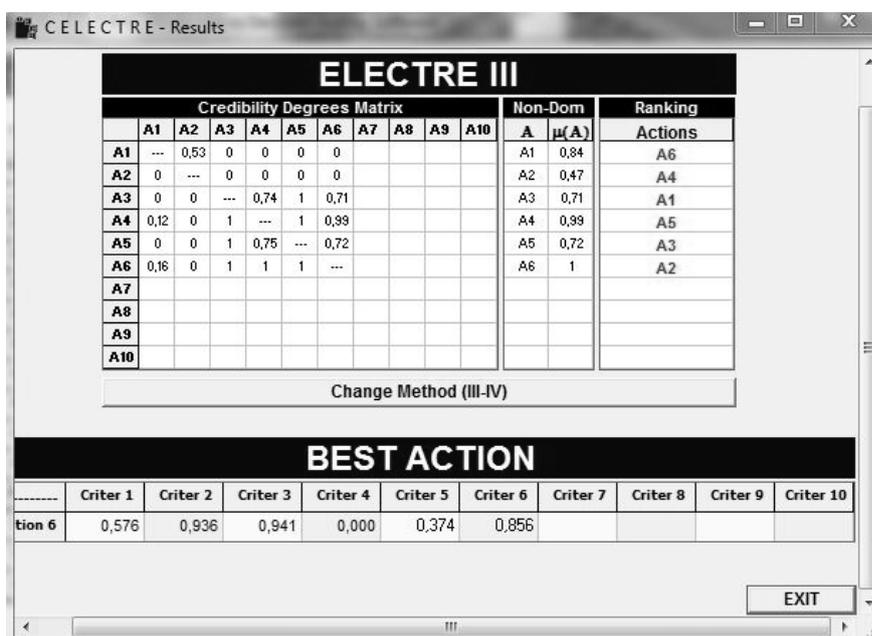


Figura 4.29 – Exemplo de resultados obtidos através do CELECTRE para o 1º pavimento e grupo de pesos A.

Antes de serem discutidos os resultados, serão apresentados a seguir mais alguns exemplos de dados de entrada representando outros grupos de peso, a fim de esclarecer como este parâmetro foi variado nas análises.

A Figura 4.30 indica a tela inicial do CELECTRE com os dados de entrada do grupo de variação de pesos B, em que o critério “nível de iluminação natural no plano de trabalho” é priorizado, ganhando um peso duas vezes maior que dos demais.

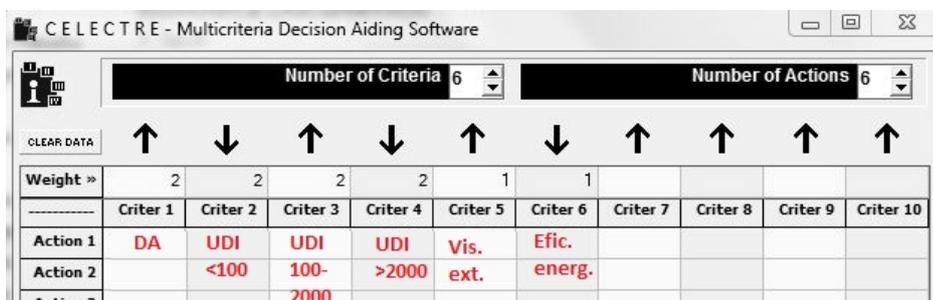


Figura 4.30 – Exemplo de dados inseridos na tela inicial do programa CELECTRE para o 1º pavimento e o grupo de variações de peso B.

A Figura 4.31 apresenta os dados de entrada do grupo de variação de pesos I, em que o critério “visualização para o exterior” ganha um peso cinco vezes maior que os demais.

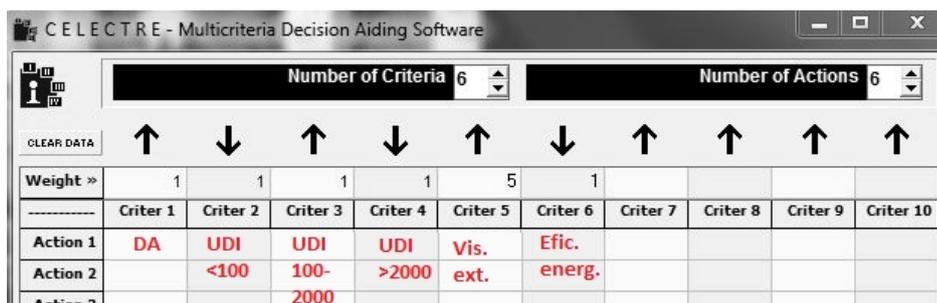


Figura 4.31 – Exemplo de dados inseridos na tela inicial do programa CELECTRE para o 1º pavimento e o grupo de variações de peso I.

Os passos descritos acima foram repetidos sistematicamente para todos os pavimentos estudados e grupos de variações de peso definidos no Tópico 4.2 deste capítulo (p. 71). Os *rankings* obtidos serão apresentados no tópico a seguir.

4.4.2. Análise dos resultados

As Tabelas 4.21 a 4.23 apresentam os diversos *rankings* obtidos para cada grupo de variações de peso. Cada coluna da tabela indica o ordenamento das soluções considerando um critério priorizado por vez e atribuindo a ele pesos 2, 3, 4 e 5 vezes maior que os dos demais. Por exemplo, na Tabela 4.21, a primeira coluna do critério “nível de iluminação natural” indica, para o 1º pavimento, o ordenamento das alternativas quando priorizado este critério e atribuído a ele um peso 2 vezes maior que os demais.

Tabela 4.21 – Rankings finais obtidos por grupos de peso para o 1º pavimento.

	Critério priorizado e peso atribuído a ele em relação aos demais												
	Todos	Nível de Iluminação natural				Visualização para o Exterior				Eficiência energética			
	igual	2x	3x	4x	5x	2x	3x	4x	5x	2x	3x	4x	5x
1º	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6
2º	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4
3º	A1	A3	A3	A3	A3	A1	A1	A1	A1	A3	A3	A3	A3
4º	A3	A5	A5	A5	A5	A5	A5	A2	A2	A5	A5	A5	A5
5º	A5	A1	A1	A1	A1	A3	A3	A5	A5	A1	A1	A1	A1
6º	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A2	A2	A2	A2

Rankings =
Rankings ≠
Rankings =

Tabela 4.22 – Rankings finais obtidos por grupos de peso para o 7º pavimento.

	Critério priorizado e peso atribuído a ele em relação aos demais												
	Todos	Nível de Iluminação natural				Visualização para o Exterior				Eficiência energética			
	igual	2x	3x	4x	5x	2x	3x	4x	5x	2x	3x	4x	5x
1º	A6, A4	A6, A4	A6, A4	A6, A4	A6, A4	A6, A4	A6, A4	A6, A4	A6, A4	A6, A4	A6, A4	A6, A4	A6, A4
2º	A5	A5	A5	A5	A5	A1	A1	A1	A1	A5	A5	A5	A5
3º	A3	A3	A3	A3	A3	A5	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3
4º	A1	A2	A2	A2	A2	A3	A5	A5	A5	A2	A2	A2	A2
5º	A2	A1	A1	A1	A1	A2	A3	A3	A3	A1	A1	A1	A1
6º	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Rankings =
Rankings ≠
Rankings =

Tabela 4.23 – Rankings finais obtidos por grupos de peso para o 13º pavimento.

	Critério priorizado e peso atribuído a ele em relação aos demais												
	Todos	Nível de Iluminação natural				Visualização para o Exterior				Eficiência energética			
	igual	2x	3x	4x	5x	2x	3x	4x	5x	2x	3x	4x	5x
1º	A6, A4	A6, A4	A6, A4	A6, A4	A6, A4	A6, A4	A6, A4	A6, A4	A6, A4	A6, A4	A6, A4	A6, A4	A6, A4
2º	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3
3º	A3	A3	A3	A3	A3	A1	A1	A1	A1	A3	A5	A5	A5
4º	A5	A5	A5	A5	A5	A5	A5	A5	A5	A5	A2	A2	A2
5º	A1	A1	A1	A1	A1	A3	A3	A3	A3	A1	A1	A1	A1
6º	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Rankings =
Rankings =
Rankings ≠

Primeiramente, observou-se que a única colocação que se repete em todos os pavimentos e grupos de variação de peso é da alternativa 6, que alcançou a primeira posição. No caso do

7º e 13º pavimento, ela divide a primeira posição com a alternativa 4, que também apresentou um desempenho global de destaque. A última colocação, por sua vez, apresentou algumas variações, sendo revezada pelas alternativas 1, 2 e 3.

Analisando o ordenamento parcial das alternativas decorrentes das análises monocritérios (Tabela 4.24), verifica-se que a simples comparação entre *rankings* não possibilita chegar aos ordenamentos finais acima indicados. As alternativas 4 e 6, por exemplo, só se destacaram nos *rankings* do critério “nível de iluminação natural”, tendo apresentado um desempenho mediano para os demais. As alternativas 2 e 3, por sua vez, chegaram a ocupar a primeira colocação em critérios diferentes, no entanto não apresentaram um desempenho global de destaque.

Tabela 4.24 – Síntese dos *rankings* parciais obtidos nas análises monocritérios.

Nível de iluminação natural			Visualização para o exterior	Eficiência energética
1º pav.	7º pav.	13º pav.		
A6	A6, A4	A6, A4	A2	A3
A4	A5	A3	A1	A5
A3	A3	A5	A6	A4, A6
A5	A2	A2	A4	A1
A2	A1	A1	A5	A2
A1	-	-	A3	-

No que diz respeito à influência do valor do peso no resultado final, no 1º e no 7º pavimento, verifica-se que para os critérios “nível de iluminação natural” e “eficiência energética” o *ranking* permaneceu igual mesmo alterando os pesos de forma crescente, enquanto que para a “visualização para o exterior”, os ordenamentos foram diferentes. Já para o 13º pavimento, foi o critério “eficiência energética” que apresentou *rankings* diferentes na medida em que ele ganhou maior peso em relação aos demais.

Apesar da diversidade de *rankings* obtidos tanto pela variação de pesos como de pavimentos, foi possível identificar uma única solução preferida para esta análise multicritério: a alternativa 6 (Figura 4.32). A alternativa 4, apesar de não ter alcançado a primeira colocação para todos os pavimentos, também se destacou por seu desempenho global e também representa uma boa escolha para assegurar a eficiência do edifício face aos três critérios estudados.

É importante ressaltar que se os ordenamentos dos três pavimentos indicassem soluções preferidas diferentes, o arquiteto poderia optar por adotar alternativas diversas para grupos de pavimentos. Evidentemente, esta solução diferenciada deveria estar em consonância com linguagem arquitetônica proposta pelo arquiteto e com as restrições impostas pelos empreendedores e construtores.

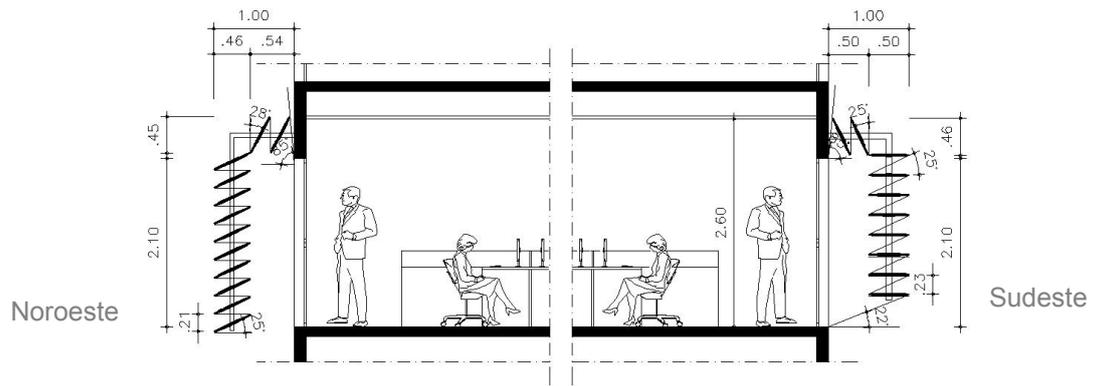


Figura 4.32 – A solução preferida: alternativa 6.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou evidenciar a complexidade enfrentada na concepção arquitetônica ao se buscar conciliar múltiplos critérios projetuais. Destacou-se a necessidade de rever o modelo atual de concepção arquitetônica, ressaltando-se a importância de incorporar métodos e ferramentas ao processo de projeto que possibilitem conduzi-lo através de uma abordagem integrada. Com isto, almeja-se que o arquiteto faça decisões de forma mais consciente e responsável, contribuindo para o aumento do desempenho energético-ambiental das edificações.

A abordagem multicritério foi apontada como um dos possíveis caminhos para alcançar este objetivo. A fim de ressaltar os potenciais desta metodologia e ao mesmo tempo evidenciar as dificuldades enfrentadas na sua incorporação à concepção arquitetônica, propôs-se fazer uma aplicação da abordagem multicritério em um processo de projeto de aberturas laterais de um edifício de escritórios do Rio de Janeiro, buscando identificar qual das soluções avaliadas concilia três critérios priorizados para o projeto: “nível de iluminação natural no plano de trabalho”, “visualização para o exterior” e “eficiência energética”.

Ao longo da aplicação da abordagem multicritério no processo de projeto de um edifício de escritórios, duas questões de interesse puderam ser aprofundadas.

A primeira diz respeito ao interesse em identificar a complexidade envolvida em cada uma das etapas da abordagem multicritério, contribuindo para a reflexão sobre a viabilidade de sua incorporação à prática projetual. Como a compreensão do processo como um todo só foi alcançada ao finalizá-lo, esta questão será melhor aprofundada nestas considerações finais.

A segunda questão diz respeito às aberturas laterais das edificações. Buscou-se, ao longo do trabalho, evidenciar como soluções semelhantes de projeto para as aberturas podem resultar em diferentes níveis de desempenho para as edificações. Também se buscou exemplificar como uma mesma solução pode apresentar excelentes resultados sob o ponto de vista de um critério de projeto, mas se mostrar insatisfatória sob a perspectiva de outro.

Antes de apresentar as reflexões alcançadas sobre a abordagem multicritério, serão ressaltadas algumas conclusões obtidas com os resultados da aplicação, mais especificamente sobre o desempenho das soluções de aberturas estudadas nesta pesquisa.

Reflexões sobre os resultados da aplicação da abordagem multicritério

Algumas importantes reflexões sobre as aberturas laterais puderam ser alcançadas com a aplicação da abordagem multicritério em um processo de projeto.

A concepção de soluções de proteção solar com máscaras de sombra praticamente idênticas, além de ter sido resultante da consideração do horário de ocupação do edifício, foi feita propositalmente com o intuito de avaliar se os desempenhos lumínicos das alternativas seriam também os mesmos. Nas análises monocritéris realizadas através do programa Daysim, verificou-se que as alternativas sombreadas (A3, A4, A5 e A6) apresentaram comportamentos diferentes quanto ao aproveitamento da iluminação natural. Isto pôde ser observado sobretudo entre as alternativas com dimensões de abertura diferentes. As alternativas 4 e 6 apresentaram um desempenho mais satisfatório que as alternativas 3 e 5, por possuírem uma abertura maior, que possibilita uma maior visualização da abóbada celeste, e conseqüentemente, propiciam iluminâncias mais elevadas no plano de trabalho.

Concluiu-se, portanto, que soluções de proteção que apresentam a mesma máscara de sombra não necessariamente geram desempenhos lumínicos iguais. Desta forma, é importante que a concepção do sombreamento das janelas seja apoiada não apenas em estudo da carta solar, mas também em outras ferramentas que possibilitem uma análise mais criteriosa das soluções.

No que diz respeito à visualização para o exterior, verificou-se que quanto maiores as aberturas e menores as barreiras visuais, melhor o desempenho das alternativas face a este critério. Observou-se que este critério apresentou conflitos evidentes com os demais: uma maior visualização para o exterior resultou em um aumento do consumo de energia da edificação, além da incidência de iluminâncias excessivas principalmente nas áreas próximas à janela. Por estes motivos, as alternativas 1 e 2, de um modo geral, proporcionaram um desempenho global relativamente baixo para a edificação, com exceção dos casos em que este critério foi privilegiado.

Quanto ao critério eficiência energética, outras soluções que até então não tinham sido destacadas nos *rankings* parciais ganharam evidência: as alternativas 3 e 5. Verificou-se que, no caso estudado, estas soluções apresentaram os maiores desempenhos energéticos devido à combinação de dimensões menores para as janelas com a adoção de elementos de proteção solar.

Diante da diversidade de *rankings* parciais, observou-se que se não tivesse sido adotado um método de abordagem multicritério ao fim do processo, seria inviável alcançar um ordenamento final preciso das soluções.

Também foi observado que a adoção do método durante a análise monocritério de aproveitamento da iluminação natural foi essencial. A intuição não previa a penalização da alternativa 2 somente por seu baixo desempenho quanto a métrica dinâmica $UDI_{>2000}$, uma vez que ela havia sido apontada como a melhor alternativa para os demais subcritérios. Assim, se a tomada de decisão tivesse sido apoiada exclusivamente na intuição, possivelmente esta alternativa teria sido apontada como a de melhor desempenho global, uma vez que também teve a melhor colocação para o critério visualização para o exterior.

Assim, mesmo realizando uma análise monocritério cuidadosa das alternativas, a aplicação de um método de abordagem multicritério se mostrou fundamental para a obtenção de resultados consistentes.

Ao longo do desenvolvimento da pesquisa, além de focar nos resultados da análise, aproveitou-se para identificar alguns potenciais e dificuldades na aplicação das 4 etapas da abordagem multicritério. Com o objetivo de contribuir para a reflexão sobre a viabilidade de sua incorporação à concepção arquitetônica, algumas considerações serão apresentadas a seguir.

Reflexões sobre a 1ª etapa da abordagem

A primeira etapa da análise multicritério se mostrou bastante trabalhosa, uma vez que uma série de informações – compiladas no capítulo 3 – teve de ser coletada para assegurar que as alternativas concebidas apresentassem uma eficiência mínima desejada do ponto de vista do conforto visual e da eficiência energética. Esta coleta de dados mostrou-se indispensável para assegurar que a solução enfim adotada não só apresentasse o melhor desempenho entre as alternativas testadas, mas também alcançasse a eficiência almejada.

Verificou-se que, apesar de apenas três critérios terem sido priorizados na análise proposta, inevitavelmente outros critérios foram considerados no processo de concepção das alternativas, tais como: manutenção dos elementos arquitetônicos, exequibilidade da solução, etc. Ainda que estes critérios não tenham sido considerados os mais importantes na resolução do problema arquitetônico, e por isso não sejam incluídos diretamente na análise multicritério, é aconselhável que eles sejam considerados – ainda que sem muito rigor – na tomada de decisão, a fim de assegurar a qualidade do projeto.

A realização de simulações testes em algumas alternativas refletiu o cuidado em garantir um desempenho satisfatório para as soluções testadas. É evidente que o ideal seria analisar a eficiência da alternativa face aos três critérios, entretanto, acredita-se que a aplicação de estratégias bioclimáticas em todas as etapas do projeto possibilitou alcançar um desempenho satisfatório do edifício também do ponto de vista do consumo de energia.

Concluiu-se que uma definição cautelosa das alternativas é imprescindível para evitar trabalhos desnecessários nas etapas que se seguem. Restringindo logo no início o número de alternativas a serem avaliadas, seja pela definição do partido formal, seja pela listagem de premissas projetuais, é possível reduzir também o número de simulações computacionais e o trabalho em tabular, normalizar e comparar seus resultados.

Reflexões sobre a 2ª etapa da abordagem

Nesta etapa da análise, não foram enfrentadas grandes dificuldades para atribuição de pesos, uma vez que foi optado por não se restringir a um único cenário.

Entende-se que, na prática profissional, este cenário tende a ser único, e, com isto, os atores envolvidos no processo podem apresentar dificuldades em mensurar a importância de um critério em relação aos demais.

Por este motivo, foi decidido atribuir pesos crescentes a um mesmo critério – 2, 3, 4 ou 5 vezes maior que os outros – para verificar a influência que estas variações podem desencadear no resultado final. Ainda que os cenários estudados não englobem todas as situações possíveis de priorização de critérios, acredita-se que os resultados apresentados podem ser úteis para auxiliar os atores de decisão a quantificar a importância dos critérios trabalhados.

Vale ressaltar que a aplicação do software CELECTRE (CASTRO, 2005) possibilitou testar de forma bastante ágil estes diferentes cenários. Desta forma, ainda que os pesos sejam fixados logo nas primeiras etapas pela análise das especificidades do projeto, o projetista pode testar algumas variações dos pesos na fase final da análise multicritério, para verificar se elas geram alguma diferença no resultado final, notadamente nas primeiras colocações do ordenamento.

Reflexões sobre a 3ª etapa da abordagem

Sem dúvidas, esta etapa da análise multicritério foi a mais trabalhosa e demorada de todo o processo, ainda que se tenha feito um esforço considerável para torná-la menos complexa.

No que diz respeito ao critério “nível de iluminação natural no plano de trabalho”, destaca-se a escolha acertada da ferramenta utilizada. Dentre algumas vantagens identificadas na aplicação do *Daysim*, pode-se citar: a rapidez na capacitação para utilização do programa; a facilidade de modelar o edifício em ambiente 3D pela interface do programa com o *Google Sketchup*; a possibilidade de avaliar as alternativas de projeto ao longo do ano sem que seja necessário realizar um número muito grande de simulações; e a relativa rapidez de duração

das simulações considerando a complexidade dos modelos 3D testados (em média 1 hora e 30 minutos por simulação).

Apesar do grande potencial apresentado pelas simulações computacionais, é importante que o uso destes *softwares* seja feito com certa desconfiança, atentando para as incoerências entre os dados de entrada e os resultados apresentados, uma vez que o usuário não apresenta domínio completo de como ocorre o processo de simulação.

É importante ressaltar a influência da tipologia arquitetônica escolhida para o edifício no tempo de trabalho destinado a esta primeira análise monocritério. A criação de um átrio no centro da edificação exigiu a análise do desempenho das alternativas em mais de um pavimento, o que tornou mais trabalhosa a tabulação e análise dos resultados. A consideração do entorno imediato também foi um aspecto decisivo na complexidade da análise realizada, ainda que tenha exercido uma influência menor no resultado final.

Um dos maiores desafios enfrentados nesta primeira análise foi de definir uma metodologia de avaliação do desempenho das alternativas, o que decorre sobretudo da carência de estudos que estabeleçam valores absolutos de referência para definir um critério de aprovação/reprovação do desempenho lumínico da edificação.

Questiona-se se a metodologia escolhida pode influenciar de algum modo no ordenamento das alternativas para este primeiro critério. Por exemplo: suponhamos que se tivesse sido optado por medir a área de escritório abrangida por uma frequência maior ou igual a 20% das horas de ocupação do ano para os intervalos de iluminância pré-estabelecidos (<100 lux, 100 a 2000 lux e >2000 lux). Certamente as áreas obtidas teriam sido maiores que quando considerada uma frequência maior ou igual a 50%. Acredita-se que existe a possibilidade inclusive de estes valores crescerem de forma desproporcional aos obtidos quando estabelecida uma frequência maior para a análise. Se isto ocorrer, o ordenamento das alternativas pode ser diferente.

A decisão em trabalhar com mais de uma métrica dinâmica tornou o resultado final mais consistente. Por outro lado, o anseio em gerar um ranking parcial para este critério evidenciou que, em alguns casos, quando se trabalha um critério de forma mais aprofundada e rigorosa, a identificação da solução preferida não é tão simples, sendo necessário aplicar um método de abordagem multicritério para isto.

As análises relativas ao critério “visualização para o exterior” se mostraram substancialmente mais simples do que as do critério anterior. Dois aspectos contribuíram para isto: a adoção de uma metodologia simples para análise das alternativas e o fato de não ter sido necessário considerar múltiplos pavimentos na avaliação das alternativas.

O interesse em considerar apenas o aspecto objetivo neste critério também marcado pela subjetividade exigiu o desenvolvimento de uma metodologia que, apesar de não ter sido validada por outros trabalhos, apresentou resultados bastante coerentes.

Uma vez definida a metodologia, a análise das alternativas ocorreu de forma significativamente rápida e sem grandes dificuldades.

Por fim, no que diz respeito ao critério “eficiência energética”, acredita-se que a substituição da simulação computacional pelo método prescritivo do RTQ-C foi uma decisão acertada se considerarmos que sua aplicação é mais simplificada e rápida que a realização de simulações computacionais termo-energéticas.

Por outro lado, este método apresentou algumas limitações. Ele não se aplica a todos os tipos de edifício, notadamente os de geometria mais complexa. O método prescritivo também não permite saber o destino final da energia consumida, isto é, quanto foi gasto com ar-condicionado ou com iluminação artificial, por exemplo. Estas informações, disponibilizadas através de simulações computacionais, certamente tornariam a análise mais completa.

Detectou-se também que pequenas variações de projeto podem não ser refletidas pelo Indicador de Consumo da Envoltória, o que resulta na mesma classificação para alternativas diferentes. Entende-se que os programas de simulação computacional, por serem mais completos e considerarem a influência dos mais diversos aspectos no consumo energético da edificação, são mais sensíveis a estas pequenas variações.

Apesar de todas estas limitações listadas, não se pode negar a validade do método, principalmente para casos em que se deseja fazer uma rápida análise comparativa entre o desempenho termo-energético de alternativas propostas para a envoltória do edifício. Conforme se observou nesta última análise, os resultados também se mostraram bastante coerentes com o indicado pela literatura.

No caso estudado, sendo a geometria do edifício relativamente simples, não houve grandes dificuldades em realizar o levantamento das dimensões e os cálculos das variáveis e do Indicador de Consumo da Envoltória. Em um dia de trabalho, obteve-se todos os resultados e o ordenamento final das alternativas.

Acredita-se que com a familiarização por parte dos arquitetos com as nuances do RTQ-C, sobretudo com seus conceitos e métodos de cálculo, este processo tende a se tornar cada vez mais ágil.

De um modo geral, esta etapa da análise multicritério se mostrou desafiante, fato decorrente sobretudo da carência de metodologias já validadas que se adequem às especificidades da análise multicritério.

Conclui-se que, tendo domínio das ferramentas e métodos e aplicando metodologias consolidadas, torna-se menos trabalhosa e demorada a incorporação desta etapa ao processo de projeto.

Reflexões sobre a 4ª etapa da abordagem

Nesta última etapa da análise, destacou-se a facilidade com que o método ELECTRE III foi aplicado pela utilização do *software* CELECTRE. O programa é de fácil manuseio e tem uma interface simples e amigável. Ao realizar os cálculos de forma instantânea, ele torna todo o processo bastante ágil e palatável aos arquitetos.

Concluiu-se que a aplicação de um método de análise multicritério é essencial para que se possa calcular o desempenho global das alternativas face aos múltiplos critérios considerados. Como dito, a simples comparação entre *rankings* das análises monocritérios, em muitos casos, não possibilita identificar um ordenamento final das alternativas e a solução preferida, sobretudo quando os critérios apresentam conflitos visíveis entre si, como no caso estudado.

Desta forma, em casos como este, em que os resultados das análises monocritérios apontam diferentes soluções como preferidas, é imprescindível que se aplique um método de abordagem multicritério para identificar precisamente a solução que melhor concilia todas as solicitações do projeto.

Ao final da aplicação da abordagem, confirmou-se o que Scharlig (1985) ressaltou sobre a não linearidade do processo de aplicação da análise multicritério. Apesar de que as etapas foram apresentadas de forma linear por uma questão de didática, em alguns momentos, verificou-se a necessidade de retornar a uma etapa anterior e fazer modificações no que tinha sido definido. Por exemplo, inicialmente, na definição das alternativas, foram propostas soluções com prateleiras de luz, as quais foram abandonadas ao verificar sua inadequação ao contexto estudado a partir da primeira análise monocritério. Com isto, retornou-se a primeira etapa para revisão das soluções propostas antes de dar prosseguimento a análise.

Reflexões sobre a viabilidade de incorporação da abordagem multicritério à prática projetual

Nesta pesquisa, houve um cuidado em tornar menos complexa e demorada a aplicação da abordagem multicritério no processo de projeto. Para isto, foi reduzida a quantidade de alternativas a serem comparadas, além de utilizados métodos e ferramentas simples – algumas delas com limitações –, optando, sempre que possível, por informatizar o processo.

Apesar deste esforço, tornou-se claro que a viabilidade de incorporação desta abordagem na prática profissional depende de duas mudanças fundamentais.

A primeira delas consiste na conscientização dos arquitetos de que, para maximizar a qualidade energético-ambiental das edificações, é imprescindível que se estenda o tempo destinado à atividade de projeção. O processo é realmente longo e complexo, e não se é possível realizá-lo de forma responsável sem que se tenha tempo para refletir sobre as decisões a serem tomadas.

A segunda mudança fundamental consiste em entender que o processo de projeto deve ser uma atividade interdisciplinar, em que múltiplos atores constroem conjuntamente, desde as primeiras etapas de concepção, o objeto arquitetônico.

Apesar do esforço em buscar ferramentas que auxiliem o arquiteto a trabalhar de forma independente, verificou-se que, sobretudo para integrar os princípios de sustentabilidade na arquitetura, é fundamental que ele possa contar com o conhecimento de outros profissionais. Há uma série de aspectos a serem considerados no projeto que foge do domínio dos arquitetos. Por vezes, utilizar um método simplificado e limitado pode trazer prejuízos na avaliação das alternativas de projeto. Por isso, nada melhor que ter o apoio de especialistas para avaliar de forma aprofundada e consistente as possíveis consequências de uma determinada decisão.

Ainda que o arquiteto se capacite para utilizar ferramentas para avaliar as alternativas de projeto, é preciso tempo para realizar todas estas análises. Afinal, o processo de projeto é significativamente mais complexo que o aqui apresentado, pois envolve uma série de outros parâmetros e critérios projetuais.

Assim, aplicando-se as mudanças sugeridas, acredita-se que a abordagem multicritério pode ser um dos caminhos viável para maximizar a qualidade energético-ambiental das edificações.

Recomendações para pesquisas futuras

As recomendações para pesquisas futuras aqui indicadas decorrem sobretudo da percepção da importância em testar e aperfeiçoar as metodologias de avaliação e adequação dos resultados às especificidades da abordagem multicritério. Entende-se que a validação das mesmas é fundamental para que o resultado da análise multicritério possa ser considerado confiável e a aplicação possa se tornar mais ágil e simplificada.

Recomenda-se:

- Validar as metodologias adaptadas às especificidades da abordagem multicritério, que possibilitem extrair dos resultados das simulações computacionais de iluminação natural um valor único representativo do desempenho das alternativas de projeto.
- Verificar se os rankings finais obtidos nesta pesquisa poderiam sofrer alterações com a mudança nos valores de DA e UDI utilizados para o cálculo das áreas de abrangência, sobretudo para DA e UDI menores que o utilizado neste trabalho ($\geq 50\%$).
- Em caso de considerar múltiplos pavimentos na análise de desempenho, avaliar qual dos rankings dos pavimentos estudados deve ser considerado quando eles indicarem alternativas diferentes para as primeiras colocações, notadamente em situações em que se pretende escolher uma única solução para todos os pavimentos.
- Pesquisar outras ferramentas e métodos que possam ser utilizados na análise monocritério de visualização para o exterior, que incluam não só aspectos objetivos como subjetivos na avaliação das alternativas.
- Confrontar os resultados obtidos neste trabalho através do método prescritivo do RTQ-C com resultados de simulação computacionais termo-energéticas, verificando se a diferença dos mesmos altera o *ranking* parcial deste critério e o *ranking* final da análise multicritério.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5413 – Iluminância de interiores**. Rio de Janeiro, 1990.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15215-4. Iluminação natural – Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações – método de medição**. Rio de Janeiro, 2003.

AMORIM, C. N. D. et al. Simulação de iluminação natural em cidades brasileiras: a influência da profundidade dos ambientes residenciais. In: **Anais do XI Encontro Nacional e VII Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído**. Búzios-RJ, 2011.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS – ASHRAE. **Energy standard for buildings except low-rise residential buildings**. Atlanta: ANSI – ASHARE 90, 2004.

BAKER, N; FANCHIOTTI, A.; STEEMERS, K. **Daylighting in Architecture. A European Reference Book**. Londres: James & James, 1998.

BITTENCOURT, L. **Uso das Cartas Solares – diretrizes para arquitetos**. Maceió: Edufal, 1996.

BLONDEAU, P.; SPERANDIO, M.; ALLARD, F.. Multicriteria analysis of ventilation in Summer period. In: **Building and Environment**, n. 37, pp. 165-176, 2002.

BRASIL. **Lei n. 10295, de 17 de outubro de 2001**. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Lex: Diário Oficial da União, Brasília, 2001.

_____. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Portaria 372 de 17 de setembro de 2010**. Regulamento de Avaliação da Conformidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. Rio de Janeiro, 2010a. Disponível em: < <http://www.labeee.ufsc.br/projetos/etiquetagem/comercial/downloads>>. Acesso em: 30 de maio de 2011.

_____. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Etiquetagem de Eficiência Energética de Edificações**. Rio de Janeiro, 2010b. Disponível em: < <http://www.labeee.ufsc.br/projetos/etiquetagem/comercial/downloads>>. Acesso em: 30 de maio de 2011.

_____. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Manual para Aplicação dos Regulamentos: RTQ-C e RAC-C**. Rio de Janeiro, 2010c. Disponível em: < <http://www.labeee.ufsc.br/projetos/etiquetagem/comercial/downloads>>. Acesso em: 30 de maio de 2011.

_____. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Portaria 449 de 25 de novembro de 2010**. Regulamento de Avaliação da Conformidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais. Rio de Janeiro, 2010d. Disponível em: < <http://www.labeee.ufsc.br/projetos/etiquetagem/residencial/downloads>>. Acesso em: 30 de maio de 2011.

BRE. **BREAAM New Construction - Non domestic buildings. Technical Manual.** Hertfordshire: BRE, 2011.

CARAM, R. M.. **Vidros e o conforto ambiental: indicativos para o emprego na construção civil.** Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Paulo, 1996.

_____. **Caracterização Ótica de Materiais Transparentes e sua Relação com o Conforto Ambiental em Edificações.** Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

CARLO, J. C.; LAMBERTS, R. Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios – parte 1: método prescritivo. In: **Ambiente Construído**, v. 10, n.2, pp. 7-26. Porto Alegre, 2010.

CASTRO, E. **Método de auxílio à concepção arquitetônica baseado na análise multicritério e em dados simulados dos comportamentos da edificação.** Tese (doutorado) COPPE/UFRJ e INSA/LYON. Rio de Janeiro e Lyon: Universidade Federal do Rio de Janeiro e Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005.

CASTRO, A. et al. Medidas de refletância de cores de tintas através de análise espectral. In: **Ambiente Construído**, v. 3, n. 2, p. 69-76. Porto Alegre: ANTAC, 2003.

CHANTRELLE, F.; LAHMIDI, H.; KEILHOLZ, W.; MANKIBI, M.; MICHEL, P.. Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings. In: **Applied Energy**, n. 88, pp. 1386-1394, 2011.

CORBELLA, O; YANNAS, S. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos.** Rio de Janeiro: Revans, 2003.

CSTB. **Referentiel pour la qualité environnementale des batiments. Etablissements de santé.** Paris: CSTB, 2008.

DIDONÉ, E. L. **A Influência da luz natural na avaliação da eficiência energética de edifícios contemporâneos de escritórios em Florianópolis/SC.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

FCAV. **Referencial técnico de certificação. Edifícios do setor de serviços – Processo AQUA.** São Paulo: Fundação Carlos Alberto Vanzolini, 2007.

FIGUEIREDO, E. et. al.. Medidas de refletância de cores para pintura externa exposta ao tempo. In: **Anais do III Encontro Nacional e I Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído.** Natal, 2009.

FIUZA, Júlia Mattosinho. **Influência de Elementos de Proteção Solar Horizontais Aplicados a Aberturas Laterais, na Admissão e Distribuição da Luz Natural.** Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

FONSECA, I. C.; PORTO, M. M.; CLARKE, C.. Qualidade da luz e sua influência sobre o estado de ânimo do usuário. In: DEL RIO, V.; DUARTE, C. R.; RHEINGANTZ, P. A. (orgs.) **Projeto do Lugar.** Rio de Janeiro: Contra Capa, 2002.

FONTENELLE, M. R.; BASTOS, L. E. G. Desafios de integração dos princípios de sustentabilidade no projeto de arquitetura: a importância de adoção de métodos de auxílio à tomada de decisão. In: **Anais do 2º Simpósio Brasileiro de Qualidade do Projeto no Ambiente Construído**. Rio de Janeiro, RJ, 2011.

FONTENELLE, M. R.; SANTOS, M. J. O. Análise da aplicação de parâmetros da envoltória no método prescritivo do RTQ-C: a relação do bioclimatismo com a eficiência energética de edifícios. In: **Anais do XI Encontro Nacional e VIII Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído**. Búzios, RJ, 2011.

FROTA, A. B. **Geometria da Insolação**. São Paulo: Geros, 2004.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R.. **Manual do Conforto térmico**. 8ª edição. São Paulo: Studio Nobel, 2007.

GIVONI, B.. **Man Climate and Architecture**. London: Applied Science Publishers, 1981.

GOOGLE. **Programa Google SketchUp 8.0**. Califórnia, EUA, 2010.

GRAÇA, V. A. C.. **Otimização de projetos arquitetônicos considerando parâmetros de conforto ambiental: o caso das escolas da rede estadual de São Paulo**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade de Campinas, Campinas, 2002.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Dados geográficos da cidade do Rio de Janeiro**. Disponível em: <www.ibge.gov.br/cidadesat>. Acesso em: agosto/2011.

LABEEE - LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil. **Analysis Solar**. Versão 6.2., 2009.

_____. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil. **Analysis Bio**. Versão 2.2, 2010.

LACOUTURE, D. C-.; SEFAIR, J. A.; FLÓREZ, L.; MEDAGLIA, A. L.. Optimization model for the selection of materials using a LEED-based green building rating system in Colombia. In: **Building and Environment**, v. 44, pp. 1162-1170, 2009.

LAMBERTS, R., DUTRA, L., PEREIRA, F. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. São Paulo: PW Editores – PROCEL, 1997.

LEE, E. S.; DiBartolomeo, D. L.; SELKOWITZ, S. E. The effect of venetian blinds on daylight photoelectric control performance. In: **Illuminating Engineering Society**. IES, 1999.

LOVELL, J. **Building Envelopes – An Integrated Approach**. Nova York: Princeton Architectural Press, 2010.

MAHFUZ, E. da C. **Ensaio sobre a razão compositiva**. Belo Horizonte: AP Cultural, 1995.

MARCONDES, M. P. **Soluções projetuais de fachadas para edifícios de escritórios com ventilação natural em São Paulo**. Tese (doutorado). Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2010.

MARKS, W. Multicriteria Optimisation of Shape of Energy-Saving Buildings. In: **Building and Environment**, v. 32, n. 4, pp. 331-339, 1996.

MASCARENHAS, A. et al. Conservação de Energia em edificações comerciais da cidade de Salvador. In: **Anais do III Encontro Nacional e I Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído**. Gramado, 1995.

MASCARÓ, L. R. de.. **Energia na edificação: estratégias para minimizar seu consumo**. São Paulo: Projeto Editores Associados Ltda., 1991.

MASCARÓ, J. L.; MASCARÓ, L. R. de.. **Incidência das variáveis projetivas e de construção no consumo energético dos edifícios**. Porto Alegre: Sagra-DC Luzzato Editores, 1992.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Balanco Energético Nacional. 2010 - Ano Base 2009**. Rio de Janeiro: EPE, 2010.

MOTTA, S. R. F.. Análise da influência do vidro das janelas sobre o consumo energético das edificações. In: **Anais do IX Encontro Nacional e V Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído**. Ouro Preto, 2007.

NABIL, A.; MARDALJEVIC; J. Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. In: **Lighting Research and Technology**, n. 37 (1), pp. 41-59, 2005.

OITICICA, M. L. G.; BERTOLI, S. R. Comportamento acústico do peitoril ventilado em edificações de clima quente úmido. In: **Anais do VI Congresso Iberoamericano de Acústica – FIA 2008**. Buenos Aires, 2008.

OLGYAY, V. **Design with climate. Bioclimatic approach to architectural regionalism**. New Jersey: Princeton University Press, 1973.

_____. **Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. Barcelona: G. Gili, 2008.

OLIVEIRA, L. A. de; MELHADO, S. B.. Projeto de fachadas leves: especificações de desempenho. In: **Pós**, v. 16, n. 25, São Paulo, 2009.

PEREIRA, E.; FERREIRA, R.. Caracterização ótica de vidros e películas de proteção solar utilizados na construção civil no município de Goiânia-GO e sua relação com o conforto térmico. In: **Anais do IX Encontro Nacional e V Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído**. Ouro Preto, 2007.

PEREZ, R.; SEALS, R.; MICHALSKY, J.. All-weather model for sky luminance distribution preliminary configuration and validation. In: **Solar Energy**, USA, v. 50, n. 3, p. 235-245, 1993.

PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO (PCRJ). **Legislação Bairro a Bairro** (versão 2.2.201105) – Aplicativo georeferenciado para consulta à Lei de uso e Ocupação do Solo do Rio de Janeiro. Secretaria Municipal de Urbanismo, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <<http://www2.rio.rj.gov.br/smu/>>. Acesso em: março, 2011.

REINHART, C. F. **Daysim 3.1**. Cambridge: Harvard University, 2010a.

_____. **Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design**. Harvard Design School, Cambridge, 2010b.

REINHART, C. F.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. In: **Leukos**, v. 3., n. 1, pp 1-25, 2006.

REINHART, C. F.; MORRISON, M. The lightswitch wizard – reliable daylight simulations for initial design investigation. In: **Buildings Simulation**, 2003, Eindhoven, The Netherlands. **Proceedings...** Vol. III. pp.1093-1100, Eindhoven: BS, 2003.

REINHART, C. F.; WALKENHORST, O. Dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a full-scale test office with outer venetian blinds. In: **Energy and Buildings**, n. 33, pp. 683-697, 2001.

REY, E. Office building retrofitting strategies: multicriteria approach of an architectural and technical issue. In: **Energy and Buildings**, n. 36, p. 367-372, 2004.

RIVERO, R. **Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural**. Porto Alegre: Luzzatto/UFRGS, 1985.

ROACHE, L. Summertime performance of an automated lighting and blinds control system. In: **Lighting Research and Technology**. Vol. 34, pp. 11-27, 2002.

ROY, B. **Electre III, um algoritme de classements fondé sur une representation floue des préférences em présence de critère multiples**. Sema, Rapport de recherche n. 81, Paris, França, 1977.

ROULET, C.-A. et al. ORME: a multicriteria rating methodology for buildings. In: **Building and Environment**, v. 37, pp. 579-586, 2002.

SANTOS, C. M. L. **O projeto de iluminação para edifícios de escritórios: influência das variáveis arquitetônicas no comportamento da luz natural e conforto visual**. Dissertação (mestrado). PROARQ-FAU/UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SCHARLIG, A. **Décider sur plusieurs critères**. Presses polytechniques et Universitaires romandes, Lausanne, 1985.

SCHULER, M. Building simulation in application: developing concepts for low energy buildings through a co-operation between architect and engineer. In: **Proceedings of the Solar World Congress, International Solar Energy Society (ISES)**. Hararc: Zimbabwe, 1995.

SILVA, E. **Uma introdução ao projeto arquitetônico**. Porto Alegre: UFRGS, 1984.

USGBC. **LEED 2009 for new construction and major renovations with alternative compliance paths for projects outside the U.S.** Washington D.C: U.S. Green Building Council Inc., 2009.

VIANNA, N. S.; GONÇALVES, J. C. S.. **Iluminação e arquitetura**. São Paulo: Virtus s/c Ltda, 2001.

VINCKE, P. **L'aide multicritère à la decision**. Editions de l'Université de Bruxelles, Editions Ellipse, Bruxelles, 1989.

WANG, W.; ZMEUREANU, R.; RIVARD, H.. Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization. In: **Building and Environment**, v. 40, pp. 1512-1525, 2005.

WARD, G. **Radiance Tutorial**. Building Technology Department, Lawrence Berkeley Laboratory, 1993. Disponível em:<<http://radsite.lbl.gov/radiance>>. Acesso em: agosto, 2011.

ZAMBRANO, L.. **Integração dos princípios de sustentabilidade ao projeto de arquitetura**. Tese (doutorado). PROARQ-FAU/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.