

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO

**Técnicas de Incorporação de  
Controle de Acesso à Luz Solar em  
Modelos Computacionais de Edificações**

por

PABLO COLOSSI GRAZZIOTIN

Dissertação submetida à avaliação,  
como requisito parcial para a obtenção do grau de  
Mestre em Ciência da Computação.

Profa. Dra. Carla Maria Dal Sasso Freitas  
Orientadora

Prof. Dr. Benamy Turkienicz  
Co-Orientador

Porto Alegre, março de 2003.

**CIP - CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO**

Grazziotin, Pablo Colossi

Técnicas de Incorporação de Controle de Acesso à Luz Solar em Modelos Computacionais de Edificações / por Pablo Colossi Grazziotin. - Porto Alegre: PPGC da UFRGS, 2003.

90 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Computação, Porto Alegre, BR-RS, 2003. Orientador: Freitas, Carla Maria Dal Sasso; Co-Orientador: Turkienicz, Benamy.

1. Computação Gráfica na Arquitetura. 2. Simulação de Edificações. 3. Sistemas de Apoio à Decisão em Arquitetura e Urbanismo. 4. Planejamento Urbano. I. Freitas, Carla Maria Dal Sasso. II. Turkienicz, Benamy. III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitora: Profa. Wrana Maria Panizzi

Pró-Reitor de Ensino: Prof. José Carlos Ferraz Hennemann

Pró-Reitora Adjunta de Pós-Graduação: Profa. Jocélia Grazia

Diretor do Instituto de Informática: Prof. Philippe Olivier Alexandre Navaux

Coordenador do PPGC: Prof. Carlos Alberto Heuser

Bibliotecária-Chefe do Instituto de Informática: Beatriz Regina Bastos Haro

## **Agradecimentos**

À minha orientadora Carla M. D. S. Freitas, pelo trabalho de orientação ao longo do Mestrado, sugestões para a implementação, apoio durante a redação e revisão do Trabalho Individual, papers e, especialmente, da Dissertação.

Ao meu co-orientador Benamy Turkienicz, pelos esclarecimentos sobre a área de arquitetura, correções de nomenclatura e também pelo auxílio na escrita e revisão de papers e da Dissertação.

Ao professor Fernando O. R. Pereira, pela ajuda com a parte do envelope solar, por todas as explicações sobre a sua metodologia e pela indicação de demais referências sobre o assunto.

À minha namorada Clara, pela companhia, apoio e paciência de agüentar meu mau humor durante a escrita de meu Trabalho de Conclusão, Trabalho Individual e, finalmente, Dissertação.

Aos meus pais, Nilson e Jane, pela educação, incentivo e ajuda que sempre recebi.

Ao SIMMLAB pelo apoio e pelo ambiente de trabalho a mim disponibilizado.

E aos meus amigos Kenzo e Goiano, pelo apoio, troca de idéias, companhia em congressos e pela amizade.

Muito Obrigado!

## Sumário

<b>Lista de Abreviaturas.....</b>	<b>6</b>
<b>Lista de Figuras.....</b>	<b>7</b>
<b>Lista de Tabelas.....</b>	<b>9</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>10</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>11</b>
<b>1 Introdução.....</b>	<b>12</b>
1.1 Objetivos.....	14
1.2 Organização do texto.....	15
<b>2 Ambientes de Simulação de Edificações.....</b>	<b>16</b>
2.1 Radiance / Adeline .....	16
2.2 Ecotect.....	18
2.3 Virtual Environment .....	19
2.4 DOE-2 .....	20
2.5 CityZoom.....	22
2.6 Comentários Finais.....	27
<b>3 Controle de Acesso à Luz Solar .....</b>	<b>29</b>
3.1 Introdução .....	29
3.2 A Abordagem de Knowles .....	29
3.2.1 Embasamento Legal .....	29
3.2.2 Estrutura Espaço-Temporal .....	30
3.3 A Abordagem de Shaviv .....	33
3.3.1 Envelopes Solares.....	33
3.3.2 Volume Solar.....	34
3.4 A Abordagem de Pereira .....	35
3.4.1 Metodologia Proposta.....	36
<b>4 Integração do conceito de Envelope Solar ao CityZoom.....</b>	<b>41</b>
4.1 Posição do Sol.....	41
4.1.1 Determinação da Posição do Sol .....	41
4.1.2 Diagrama da Trajetória do Sol.....	44
4.2 Cálculo do Envelope Solar .....	48
4.3 Integração do Envelope Solar à Simulação.....	50
4.4 Interface de Visualização 3D .....	53
<b>5 Resultados .....</b>	<b>57</b>

<b>5.1</b>	<b>Simulação de Normativas urbanísticas .....</b>	<b>57</b>
<b>5.2</b>	<b>Cálculo e Aplicação do Envelope Solar .....</b>	<b>58</b>
<b>5.3</b>	<b>Informações sobre Luz Solar Direta Recebida .....</b>	<b>58</b>
<b>5.4</b>	<b>Visualização de Sombras .....</b>	<b>58</b>
<b>5.5</b>	<b>Comentários Finais.....</b>	<b>72</b>
<b>6</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>73</b>
<b>6.1</b>	<b>Avaliação Geral .....</b>	<b>73</b>
<b>6.2</b>	<b>Trabalhos Futuros .....</b>	<b>74</b>
	<b>Anexo 1 Temperatura Neutra do Mês.....</b>	<b>75</b>
	<b>Anexo 2 Fator de Ponderação.....</b>	<b>76</b>
	<b>Anexo 3 Trabalho Publicado no SIBGRAPI 2001.....</b>	<b>77</b>
	<b>Anexo 4 Trabalho Publicado no SIACG 2002 .....</b>	<b>79</b>
	<b>Referências .....</b>	<b>88</b>

## Lista de Abreviaturas

ADELIN	Advanced Daylighting and Electric Lighting Integrated New Environment
CAD	Computer Aided Design
CRA	Community Redevelopment Agency
DC	Depois de Cristo
DOE	Department of Energy
DSS	Decision Support System
ECS	Envelope de Coleta Solar
EDS	Envelope de Direito Solar
FP	Fator de Ponderação
GIS	Sistema de Informações Geográficas
HVAC	Heating, Ventilation, Air-Conditioning
IBPSA	International Building Performance Simulation Association
IEA	International Energy Agency
IES	Integrated Environmental Solutions Ltd
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
LABCON	Laboratório de Conforto Ambiental
LASTRAN	Laboratório de Sistemas de Transporte
LEGG	Laboratório de Ensaios Geotécnicos e GeoAmbientais
NTU	Núcleo de Tecnologia Urbana
PDDU	Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano
PPGC	Programa de Pós-Graduação em Computação
SIMMLAB	Laboratório para Simulação e Modelagem em Arquitetura e Urbanismo
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

## Lista de Figuras

FIGURA 2.1	– Vista interior do <i>hall</i> de uma fábrica – vista com contornos de iluminação (J-L Scartezzini, R. Compagnon, 1994) .....	17
FIGURA 2.2	– Interface do ECOTECH v5.00 .....	18
FIGURA 2.3	– Exemplo de imagem gerada pela ferramenta SunCast.....	20
FIGURA 2.4	– Formulário principal do VisualDOE 3.1 .....	21
FIGURA 2.5	– Hierarquia de classes do CityZoom .....	22
FIGURA 2.6	– Módulos do CityZoom.....	23
FIGURA 2.7	– Interface do CityZoom – Ambiente de Projeto 2D .....	23
FIGURA 2.8	– Aximagic.....	24
FIGURA 2.9	– Visualizador de Resultados Numéricos .....	24
FIGURA 2.10	– Mosaic.....	25
FIGURA 2.11	– Editor de Normativas Urbanísticas .....	26
FIGURA 2.12	– Interface do Simulador de Edificações .....	26
FIGURA 2.13	– Visualizador 3D OpenGL .....	27
FIGURA 2.14	– Relação entre a área do envelope da edificação e o espaço utilizável, em função da forma da edificação. (Diagrama gerado pelo Solarbüro, Dr. Peter Goretzki, 1997) .....	28
FIGURA 3.1	– Restrições espaço-temporais no envelope solar: o tamanho e a forma do envelope são determinados pelas sombras projetadas sobre as propriedades vizinhas em horas específicas. ....	31
FIGURA 3.2	– Padrões de sombreamento para diferentes orientações de ruas: (a) Norte-Sul e Leste-Oeste e (b) Nordeste-Sudoeste .....	32
FIGURA 3.3	– Envelope Solar sobre quadras em três diferentes orientações .....	33
FIGURA 3.4	– Tipos de Envelope Solar: (a) Envelope de Direito Solar e (b) Envelope de Coleta Solar .....	34
FIGURA 3.5	– Volume Solar é o volume gerado pela interseção dos dois envelopes	35
FIGURA 3.6	– Valores de Radiação Ponderada projetados no Diagrama da Trajetória Aparente do Sol na latitude 27,5°S, fachada com orientação Norte .....	37
FIGURA 3.7	– Máscara da obstrução dos edifícios .....	38
FIGURA 3.8	– Aplicação dos ângulos às bordas do terreno para definição do envelope solar.....	39
FIGURA 3.9	– Envelope solar inicial construído a partir dos ângulos de obstrução da Tabela 3.1 .....	40
FIGURA 3.10	– Possíveis alternativas de forma da quadra respeitando o envelope solar inicial.....	40
FIGURA 4.1	– Posição do Sol dada pelo Azimute e Altitude.....	41
FIGURA 4.2	– Declinação do Sol .....	42
FIGURA 4.3	– Projeções (a) Ortográfica e (b) Estereográfica.....	45
FIGURA 4.4	– Diagrama da Trajetória Aparente do Sol .....	46
FIGURA 4.5	– Diagrama da Obstrução da Abóbada Celeste.....	47
FIGURA 4.6	– Interface para entrada de dados geográficos e climáticos.....	48
FIGURA 4.7	– Interface de Visualização e Edição do Envelope Solar.....	50
FIGURA 4.8	– Definição da largura e profundidade iniciais e possíveis fachadas da edificação simulada.....	51
FIGURA 4.9	– Aplicações dos recuos às edificações iniciais.....	51

FIGURA 4.10 – Ocupação obtida para as edificações da figura 4.9(b) .....	52
FIGURA 4.11 – Aproveitamento obtido para as edificações da figura 4.10.....	52
FIGURA 4.12 – Arestas (marcadas em vermelho) projetando sombras. ....	54
FIGURA 4.13 – Definição de um polígono de sombra em função da fonte de luz.....	54
FIGURA 4.14 – Definição de um polígono de sombra quando a fonte de luz é o sol ..	54
FIGURA 4.15 – Visualização das edificações com sombras geradas considerando o sol às 8 horas .....	55
FIGURA 4.16 – Superposição do Envelope Solar às edificações no cenário 3D.....	56
FIGURA 5.1 – Simulação de edificações sem uso do envelope solar.....	59
FIGURA 5.2 – Simulação de edificações sem uso do envelope solar, vista 3D – 21/3, 12:00.....	59
FIGURA 5.3 – Simulação de edificações com uso do envelope solar, vista 3D – 21/3, 12:00.....	60
FIGURA 5.4 – Superposição do Envelope Solar às edificações da figura 5.2.....	60
FIGURA 5.5 – Posicionamento do observador .....	61
FIGURA 5.6 – Visualização da obstrução da abóbada celeste, observador na posição da Figura 5.5 .....	61
FIGURA 5.7 – Posicionamento do observador próximo à fachada de interesse.....	62
FIGURA 5.8 – Obstrução da abóbada celeste e horas de sol direto na fachada indicada na Figura 5.7 .....	62
FIGURA 5.9 – Obstrução da abóbada celeste e horas de sol direto na fachada indicada na Figura 5.7, ponto de interesse deslocado para o 3º andar	63
FIGURA 5.10 – Obstrução da abóbada celeste e horas de sol direto na fachada indicada na Figura 5.7, ponto de interesse deslocado para o 5º andar	63
FIGURA 5.11 – Posição do sol e obstrução da abóbada celeste – 21/12, 9:00 .....	64
FIGURA 5.12 – Sombras projetadas – 21/12, 9:00 .....	64
FIGURA 5.13 – Posição do sol e obstrução da abóbada celeste – 21/12, 17:00 .....	65
FIGURA 5.14 – Sombras projetadas – 21/12, 17:00 .....	65
FIGURA 5.15 – Posição do sol e obstrução da abóbada celeste – 21/12, 12:00 .....	66
FIGURA 5.16 – Sombras projetadas – 21/12, 12:00 .....	66
FIGURA 5.17 – Posição do sol e obstrução da abóbada celeste – 21/3, 12:00 .....	67
FIGURA 5.18 – Sombras projetadas – 21/3, 12:00 .....	67
FIGURA 5.19 – Posição do sol e obstrução da abóbada celeste – 21/6, 12:00 .....	68
FIGURA 5.20 – Sombras projetadas – 21/6, 12:00 .....	68
FIGURA 5.21 – Sombras projetadas para simulação sem Envelope Solar – 21/3, 9:00.....	69
FIGURA 5.22 – Sombras projetadas para simulação com Envelope Solar – 21/3, 9:00.....	69
FIGURA 5.23 – Sombras projetadas para simulação sem Envelope Solar – 21/3, 12:00.....	70
FIGURA 5.24 – Sombras projetadas para simulação com Envelope Solar – 21/3, 12:00.....	70
FIGURA 5.25 – Sombras projetadas para simulação sem Envelope Solar – 21/3, 17:00.....	71
FIGURA 5.26 – Sombras projetadas para simulação com Envelope Solar – 21/3, 17:00.....	71



## Lista de Tabelas

TABELA 3.1 – Ângulos de obstrução para cada orientação de fachada em Florianópolis/SC .....	38
TABELA 4.1 – Valor Base recomendado por mês para determinação da Data Juliana .....	43
TABELA 4.2 – Ângulos de obstrução para cada orientação de fachada.....	49
TABELA 5.1 – Comparação dos ambientes estudados com o CityZoom SE. As células hachuradas ressaltam as alterações em relação ao CityZoom.	72

## Resumo

Os benefícios obtidos com a disponibilidade de radiação solar dentro ou ao redor dos edifícios são fundamentais no planejamento urbano e provocam significativo impacto sobre o uso do solo, densidade de construção, valorização do solo urbano, conforto térmico e economia de energia.

CityZoom é um ambiente computacional de apoio à decisão em projetos de arquitetura e urbanismo onde modelos de desempenho podem ser utilizados de forma integrada e associados automaticamente a Normativas Urbanísticas.

Este trabalho utiliza técnicas de computação gráfica para aferir o acesso de edifícios à luz solar a partir de um modelo de simulação de potencial construtivo de lotes urbanos já existente no ambiente CityZoom. O modelo, denominado BlockMagic, foi estendido com uma técnica de cálculo de envelope solar, recurso que permite simular se a geometria dos edifícios interferirá, positiva ou negativamente, na vizinhança imediata. Ulteriormente, foram desenvolvidas ferramentas para visualização 2D e 3D dos resultados das simulações.

**Palavras-Chave:** Computação Gráfica na Arquitetura, Simulação de Edificações, Sistemas de Apoio à Decisão em Arquitetura e Urbanismo, Planejamento Urbano.

**TITLE:** “TECHNIQUES FOR INTEGRATING SUNLIGHT ACCESS CONTROL TO COMPUTER MODELS OF BUILDINGS”

### **Abstract**

The benefits obtained from the available solar radiation in and around buildings are essential to urban planning. The inclusion of such features in the planning process has an expressive impact over land use, building density, land value, thermal comfort and energy saving.

CityZoom is a computational decision support system for architecture and urbanism. The software provides an environment where performance models can be used in an integrated way, and automatically associated to Building Regulations.

This work uses computer graphics techniques to assess the building access the sunlight availability to simulated buildings in the CityZoom environment. The performance model used to simulate the Building Regulations, BlockMagic, was extended to use a solar envelope calculation technique, allowing it to measure the effect of a simulated buildings on its immediate neighboring buildings. Tools for 2D and 3D visualization of the simulation results were also developed.

**Keywords:** Computer Graphics Application in Architecture, Building Simulation, Decision Support System in Architecture and Urbanism, Urban Planning.

## 1 Introdução

Ao contrário do que ocorre nas cidades da maioria dos países industrializados, a configuração das cidades brasileiras muda, de forma drástica, em espaços curtos de tempo, sem que ocorra um processo simultâneo de reordenação do uso do solo. Planos Diretores de Desenvolvimento Urbano (PDDU), teoricamente responsáveis pelo processo de ordenação e reordenação do uso do solo, são lentos na absorção das transformações e no processamento de suas conseqüências para o desenvolvimento urbano.

Por isto, é cada vez mais presente a demanda por tecnologias e ferramentas de planejamento que aumentem a rapidez de percepção sobre as origens dos problemas urbanos e, ao mesmo tempo, confiram agilidade ao processo de tomada de decisões. A consideração da insolação durante o planejamento é essencial para a definição dos benefícios a serem obtidos a partir da disponibilidade de radiação solar dentro ou ao redor dos edifícios, tendo significativo impacto sobre o uso do solo, densidade de construção, valorização do solo, conforto térmico e economia de energia.

As experiências francesa e americana, iniciadas na década de 70, mostraram que a implementação de regulamentos climáticos e energéticos permitiu uma utilização mais racional dos recursos energéticos em edifícios residenciais, comerciais e de escritório, gerando economia considerável de energia, acompanhada da elevação dos níveis de conforto no interior dos edifícios [INS95]. Tais regulamentos são considerados, hoje, indispensáveis. Tendo sido implementados e aprimorados, os resultados apontam claramente, trinta anos depois, para uma queda sensível do consumo no parque edificado. No caso francês, o consumo de energia nos novos edifícios sofreu uma redução de 50% entre 1974 e 1989.

No Brasil, recursos tecnológicos e métodos colocados à disposição de prefeituras municipais e planejadores urbanos são geralmente limitados quando se trata de avaliar, de forma eficaz, a disponibilidade do sol para uma determinada configuração urbana. Câmaras de Vereadores têm imensas dificuldades para avaliar e, conseqüentemente, aprovar com a consciência necessária, normativas urbanísticas que terão implicações sobre a disponibilização do sol.

Algumas prefeituras, como a de Belo Horizonte, realizaram nos últimos anos alguns avanços. No estudo de insolação e ventilação realizado pela Prefeitura de Belo Horizonte em 1995 [INS95] foram calculados ângulos de altura solar que atendem aos critérios mínimos de insolação e iluminação natural propostos pelo Plano Diretor. Um Sistema de Informações Geográficas (GIS) é utilizado para aplicar este conjunto de ângulos a qualquer lote. O modelo matemático para a determinação do recuo mínimo e altura máxima do edifício considerando insolação e iluminação natural é uma relação trigonométrica simples, a partir do ângulo de altura solar que satisfaz aos dois critérios.

Durante a formulação do atual PDDU de Porto Alegre, foram calculadas manualmente as porcentagens de fachada de um edifício recebendo luz solar direta em diferentes datas, horas, orientações e alturas das edificações vizinhas. Tal procedimento manual revela a utilização de recursos e métodos tecnologicamente ultrapassados. Em outras palavras, faltam ferramentas para verificar e avaliar, de forma eficaz, a disponibilidade de sol para uma dada configuração urbana.

Há vários anos a Computação Gráfica vem sendo aplicada à Arquitetura, principalmente através da utilização de ferramentas CAD (*Computer Aided Design*), a fim de auxiliar na modelagem e visualização de edificações e áreas urbanas. Existem também diversas ferramentas computacionais para a simulação e avaliação de edificações sob o ponto de vista do consumo energético, do conforto visual, térmico ou acústico, entre outros.

Entretanto, faltam ferramentas que integrem, em um mesmo ambiente, aspectos energéticos e climáticos, entre outros, com os aspectos normativos, isto é, com a regulamentação urbanística. Tais aspectos são independentes e têm critérios de avaliação também independentes. Não se parecem um com o outro, porém são interativos, de modo que, se for alterado um deles para uma melhoria, algum outro pode sofrer conseqüências negativas com a mudança. Segue que, para observar como estes aspectos se relacionam, precisar-se-ia lançar mão de técnicas, para modelar as cidades, que fossem sensíveis aos diferentes aspectos funcionais [HIL94]. É necessário integrar diferentes áreas do conhecimento sobre desempenho urbano, a partir da descrição da cidade, a fim de construir uma base de dados sobre os aspectos complexos e inter-relacionados que estão por trás da mesma.

Estes dados podem ser, então, analisados por uma ferramenta computacional e utilizados na tomada de decisões estratégicas sobre a cidade. Um Sistema de Apoio à Decisão (DSS – Decision Support System) operando sobre uma base de dados contendo diferentes aspectos de uma cidade geraria respostas rápidas para diferentes alternativas de planejamento e crescimento urbano, considerando as inter-relações entre estes aspectos.

O CityZoom é um ambiente de apoio à decisão em projetos de arquitetura e urbanismo [CIT99]. Está atualmente em desenvolvimento como um projeto do Laboratório para Simulação e Modelagem em Arquitetura e Urbanismo (SIMMLAB/UFRGS), com a cooperação do Laboratório de Sistemas de Transporte (LASTRAN/UFRGS), do Laboratório de Ensaios Geotécnicos e GeoAmbientais (LEGG/UFRGS) e do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS), todos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e do Laboratório de Conforto Ambiental (LABCON/UFSC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

A estrutura do ambiente está baseada na integração de modelos de desempenho que operam sobre entidades do modelo do sistema urbano. A cidade é vista como um objeto e é modelada em toda sua complexidade, desde a rede viária e quadras (visões topologicamente complementares) até o interior das unidades habitacionais.

Alguns dos modelos de desempenho previstos para o sistema são: modelo de simulação de potencial construtivo; modelo de conforto ambiental; modelo de solos; modelo de tráfego e transporte. O principal objetivo do CityZoom é prover um ambiente onde estes modelos possam ser correlacionados.

Um desses modelos é o BlockMagic [TUR99], voltado à simulação de potencial construtivo de lotes a partir de Normativas Urbanísticas contidas em Planos Diretores de Desenvolvimento Urbano (PDDU). Esta ferramenta pode simular rapidamente um conjunto, mesmo que grande, dos mais diversos tipos de terrenos ou validar edificações construídas manualmente pelo usuário. O objetivo deste trabalho é integrar controle de acesso à luz solar ao BlockMagic e aprimorar os métodos de visualização de resultados do mesmo. Com tal integração, ter-se-ia uma ferramenta computacional que facilitaria a simulação de alternativas de crescimento urbano e a verificação do impacto que estas teriam sobre a qualidade de vida dentro e fora das edificações no que diz respeito à insolação e iluminação natural.

Esta ferramenta seria de grande valia para diferentes classes de usuários, possibilitando realizar simulações do desempenho ambiental e do potencial construtivo de edificações inseridas no tecido urbano com maior rapidez e transparência do que se faz atualmente. Para os planejadores urbanos, a rapidez aumentaria a eficácia e a transparência aumentaria os níveis de participação social nas decisões de planejamento, auxiliando na implementação de novos Planos Diretores de Desenvolvimento Urbano ou na alteração dos já existentes. Para os arquitetos e empreendedores, seria possível avaliar rapidamente o potencial de diferentes lotes e gerar possibilidades de volumes a serem construídos naqueles lotes. Aos leigos, a ferramenta permitiria observar a quantidade de horas de sol em cada fachada de um imóvel a ser comprado ou alugado.

## 1.1 Objetivos

Os objetivos do presente trabalho são integrar técnica de controle de acesso à luz solar a uma ferramenta de planejamento urbano existente e explorar a aplicação de técnicas de visualização 2D e 3D aos problemas do planejamento urbano. Como objetivos específicos têm-se:

- Integrar a técnica de Envelope Solar ao módulo de simulação de potencial construtivo do CityZoom, Blockmagic;
- Refinar a interface de visualização e navegação tridimensional, permitindo a geração de sombras realistas e em tempo real;
- Implementar formas alternativas de visualização bidimensional dos resultados, tais como obstrução da abóbada celeste e diagrama da trajetória aparente do sol.

## **1.2 Organização do texto**

O capítulo 2 apresenta a revisão de trabalhos correlatos significativos, entre eles o CityZoom, resumindo as características de diversos ambientes para simulação de edificações. No capítulo 3 são revisadas diferentes abordagens para implementação do Envelope Solar. O capítulo 4 detalha a metodologia utilizada na implementação do Envelope Solar, sua integração ao CityZoom e as ferramentas de visualização desenvolvidas ao longo do presente trabalho. Os resultados são apresentados no capítulo 5, e as conclusões no capítulo 6.

## 2 Ambientes de Simulação de Edificações

Existem diversas ferramentas, tanto comerciais como acadêmicas, para projeto e simulação de edificações. Estas ferramentas contam com recursos para auxiliar planejadores e arquitetos em diferentes questões, tais como o acesso ao sol, disponibilidade de luz natural e elétrica, conforto térmico, necessidade de ventilação, entre outras. Tais ferramentas são apresentadas e têm suas descrições publicadas em periódicos como o *Solar Energy Journal* e o *Journal of Solar Energy Engineering*, ou em diferentes conferências, como as do PLEA (Passive and Low Energy Architecture – Arquitetura Passiva e de Baixa Energia) da IBPSA (International Building Performance Simulation Association – Associação Internacional de Simulação de Performance de Edificações), e outras associações de pesquisadores, desenvolvedores e demais interessados em simulação de performance de edificações, visando aprimorar o ambiente construído.

Entretanto, as diversas ferramentas existentes são voltadas à simulação e avaliação de edificações sob o ponto de vista físico ou energético. Não consta na literatura consultada nenhuma ferramenta, além do CityZoom, capaz de realizar simulações sobre Normativas Urbanísticas.

A seguir são apresentados diferentes trabalhos desenvolvidos na área de simulação de edificações e suas principais características. O CityZoom é exposto no final deste capítulo e as suas novas capacidades de consideração do acesso ao sol são explicadas no capítulo 5.

### 2.1 Radiance / Adeline

Radiance [RAD97] [WAR94], desenvolvido por Greg Ward Larson durante seu emprego (1985-1997) no Lawrence Berkeley National Laboratory, em Berkeley, Califórnia, começou como um estudo de algoritmos de *ray-tracing*. Após demonstrar o potencial de economia de energia através de melhorias no projeto considerando iluminação natural e artificial, o projeto obteve financiamento do Departamento de Energia dos Estados Unidos e do governo Suíço. Seus principais objetivos eram:

- assegurar o cálculo preciso de iluminação;
- modelar tanto luz elétrica como solar;
- suportar diversos modelos de reflexão;
- suportar geometrias complexas;
- aceitar entrada de dados de sistemas CAD sem utilizar filtros.

Radiance acabou tornando-se um conjunto de programas para análise e visualização de iluminação em projetos. O sistema de *ray-tracing* permite simulações de iluminação e luz solar precisas e fisicamente válidas.



Parâmetros especificam a geometria da cena, materiais, fontes de luz, data e condições do céu (no caso de cálculos de luz solar). Os valores calculados incluem radiação espectral (i.e. claridade + cor), irradiação (intensidade de iluminação + cor) e índices de brilho. Os resultados das simulações podem ser mostrados como imagens coloridas, valores numéricos ou mapas de isolinhas.

A principal vantagem do Radiance sobre ferramentas mais simples de cálculo de iluminação e rendering é que não há limitações de geometria ou de materiais que podem ser simulados. Radiance é utilizado por arquitetos e engenheiros para prever iluminação, conforto visual e mesmo a aparência de projetos inovadores, e por pesquisadores para avaliar novas tecnologias de iluminação artificial e natural (Figura 2.1).

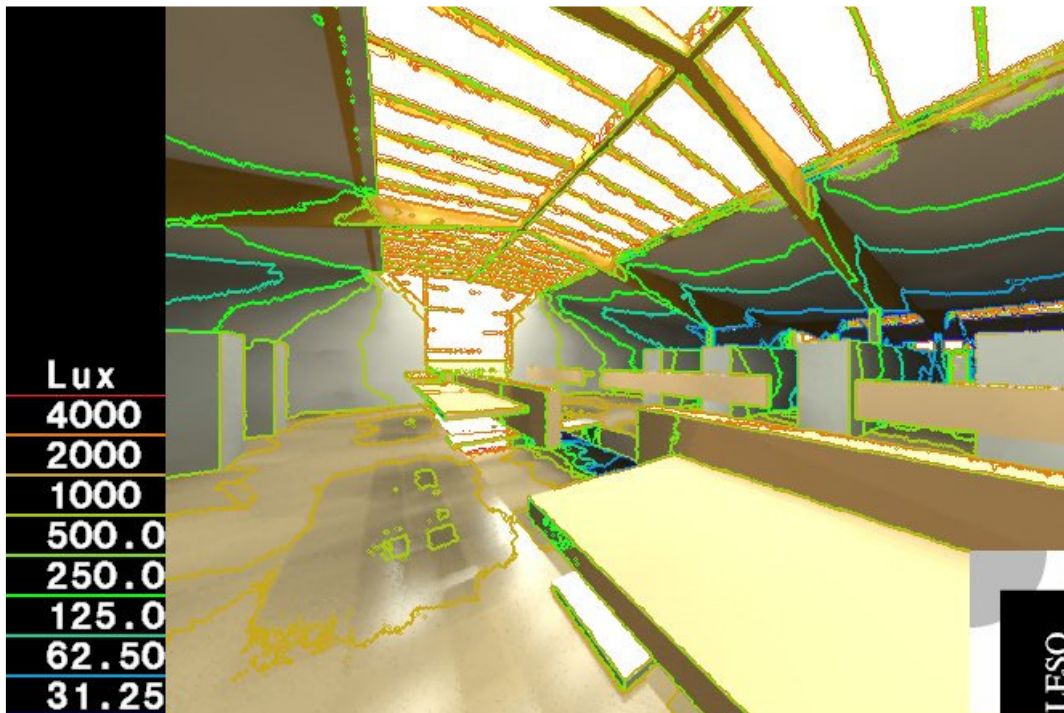


FIGURA 2.1 – Vista interior do hall de uma fábrica – vista com contornos de iluminação (J-L Scartezini, R. Compagnon, 1994 [RAD97])

Originalmente desenvolvido para UNIX, foi então integrado ao software ADELINÉ que é executado em plataforma Windows.

O ADELINÉ 2.0 (Advanced Daylighting and Electric Lighting Integrated New Environment) [ADE96] [ERH97] é uma ferramenta de análise integrada para fins de projeto de edificações. Foi desenvolvido por uma equipe internacional de pesquisadores, sendo parte do *framework* da Agência Internacional de Energia (IEA – International Energy Agency) para análise de iluminação solar.

Visa auxiliar os arquitetos em todas as questões associadas com o projeto considerando iluminação natural e elétrica. O sistema pode ser aplicado tanto a simples salas como a complexos edifícios.

Seu principal objetivo é tratar os efeitos da iluminação natural sobre a performance energética de uma edificação nas primeiras fases do projeto a fim de evitar decisões de projeto inadequadas, dessa forma permitindo que arquitetos, construtores e especialistas em energia construam edifícios energeticamente eficientes.

Entre os resultados possíveis para um edifício estão:

- vistas fotorealísticas e fisicamente exatas da edificação;
- distribuição de iluminação natural e elétrica em todas as superfícies componentes;
- avaliação do conforto visual;
- distribuição de iluminação horária em um plano de referência para um modelo padrão de céu (com ou sem nuvens, com ou sem sol) para um dia do mês;
- horas de luz solar por ano.

## 2.2 Ecotect

ECOTECT [ECO2002] [MAR96] é uma ferramenta de projeto ambiental completa que combina uma interface de modelagem 3D intuitiva (Figura 2.2) com funções de análise solar, térmica, de iluminação, acústica e de custo. Foi desenvolvido pela SQUARE ONE Research PTY LTD. O principal objetivo é prover uma ferramenta simples, precisa e, principalmente, que forneça resultados visuais.

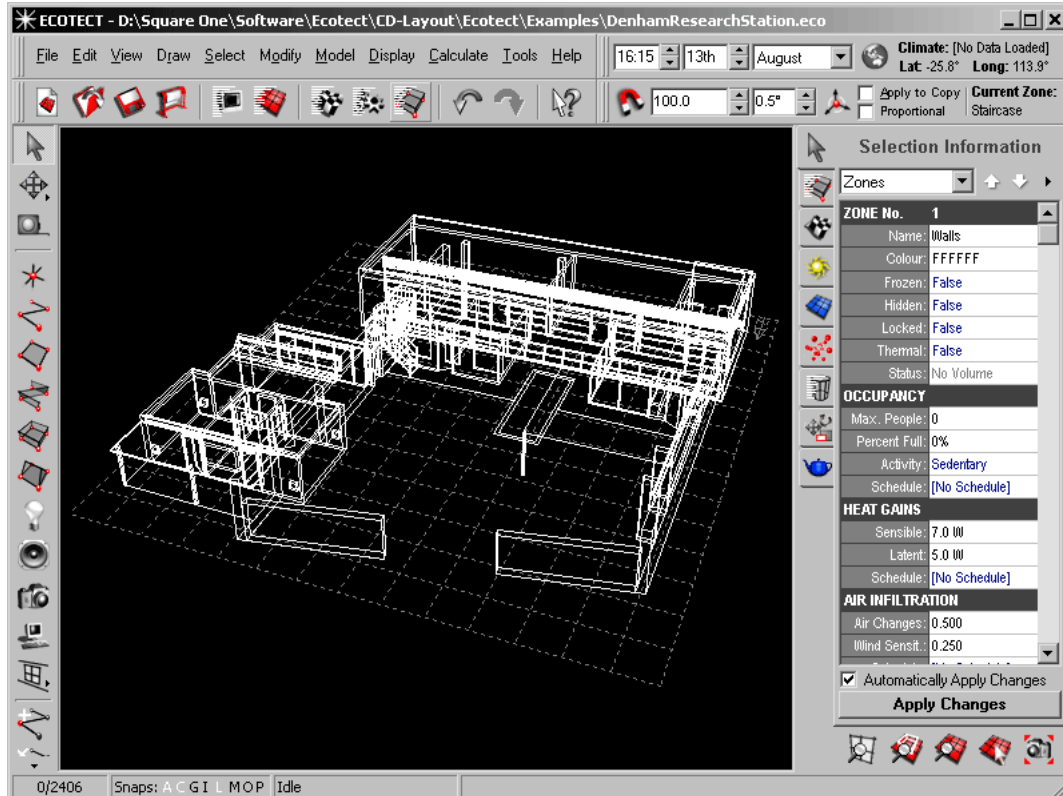


FIGURA 2.2 – Interface do ECOTECT v5.00 [ECO2002]

ECOTECH leva em consideração princípios de projeto ambiental durante as fases mais conceituais do projeto. Para tanto, o software fornece resultados visuais e analíticos desde o modelo mais simples, progressivamente guiando o processo de projeto conforme informações mais detalhadas são disponibilizadas. Ele possui um ambiente de modelagem 3D e ferramentas para:

- visualização interativa de sombras, penetração de luz solar e reflexões;
- visualização de sombras em diagramas de trajetória solar estereográficos ou ortográficos;
- visualização de sombras para qualquer período de dias e horas;
- análise de radiação e exposição solar;
- projeto considerando iluminação natural e elétrica;
- análise de performance térmica;
- análise acústica;
- gerenciamento de recursos;
- análise de ventilação.

Estas ferramentas trabalham de forma interativa dentro do ambiente, sendo possível verificar, por exemplo, o efeito de um diferente tipo de carpete sobre a acústica e a temperatura de uma sala. O modelo é completamente escalável, podendo tratar desde simples modelos de sombras até cidades inteiras.

## 2.3 Virtual Environment

O Virtual Environment [VIR2002] é um sistema integrado desenvolvido pela IES (Integrated Environmental Solutions Ltd.). Ele permite que arquitetos, engenheiros e empreendedores avaliem a performance de uma edificação durante qualquer fase do seu processo de planejamento ou mesmo durante o seu ciclo de vida, aumentando a produtividade e reduzindo os custos.

O Virtual Environment é construído ao redor do conceito de um modelo de dados único e integrado. Cada uma de suas ferramentas utiliza esse modelo único sempre que possível, a fim de evitar duplicações, assegurando a consistência e minimizando erros. Ele abrange diversas ferramentas para análise de edificações, tais como:

- análise térmica;
- planejamento de custos;
- análise do ciclo de vida;
- análise de correntes de ar;
- iluminação solar e elétrica (Figura 2.3);
- padrões de segurança.

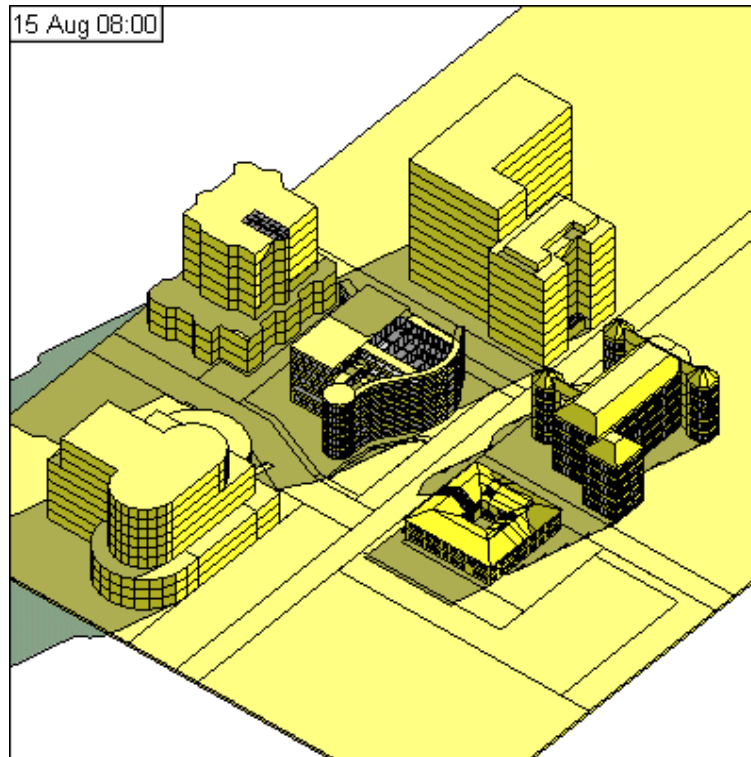


FIGURA 2.3 – Exemplo de imagem gerada pela ferramenta SunCast [VIR2002]

## 2.4 DOE-2

DOE-2 [DOE95] é um programa desenvolvido em FORTRAN por diversos laboratórios norte-americanos, juntamente com a Universidade de Paris, com verba do Departamento de Energia (DOE – Department of Energy) dos Estados Unidos. Ele prevê o consumo e custo horário de energia de um edifício baseado na informação climática, na descrição da edificação e de seus equipamentos de calefação, ventilação e ar condicionado (HVAC – heating, ventilation, air-conditioning), e na taxa de utilização dos mesmos.

Utilizando o DOE-2 o projetista pode determinar quais parâmetros irão melhorar a eficiência energética de um edifício mantendo o conforto térmico e a relação custo-benefício. O usuário pode fornecer uma descrição simples ou progressivamente detalhada do edifício, ou mesmo alternativas ao projeto, e obter estimativas precisas de consumo energético, condições do ambiente interno e custos.

DOE-2 pode ser usado em diversas aplicações, especialmente envolvendo projeto de edificações e sistemas HVAC, ou escolha de alternativas de economia de energia ou redução de demanda de energia em horários de pico. Alguns exemplos de usos possíveis são:

- avaliar o efeito da espessura, tipo do material e orientação das fachadas e cobertura;
- avaliar o efeito de sombras internas e externas, vidros coloridos ou refletivos e do uso de iluminação natural;
- fazer o projeto inicial dos elementos básicos da edificação, sistemas HVAC primários e secundários e fontes de energia;
- durante a construção, avaliar propostas de alterações sobre as especificações iniciais;
- avaliar edificações existentes para possíveis aperfeiçoamentos.

Diversas adaptações do DOE-2 foram feitas por empresas privadas, adicionando interfaces para facilitar seu uso, por exemplo, o VisualDOE 3.1 [VIS2002] (Figura 2.4).

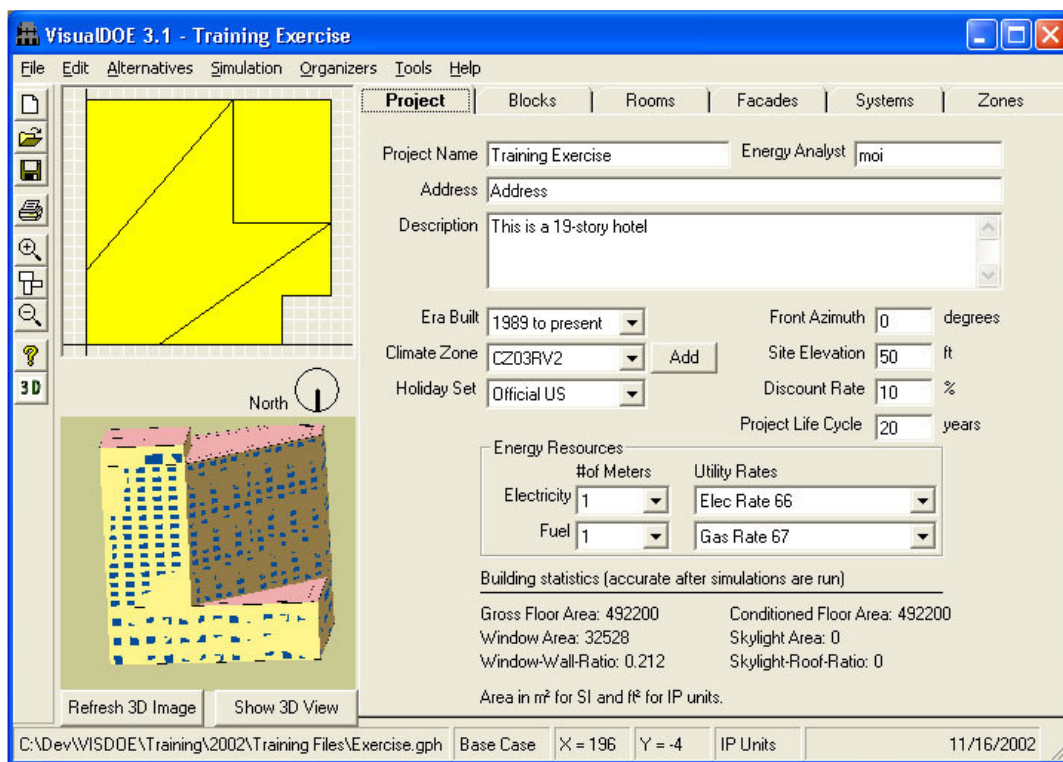


FIGURA 2.4 – Formulário principal do VisualDOE 3.1 [VIS2002]

DOE-2 é utilizado em mais de 60 universidades americanas para pesquisa e ensino, e por várias empresas em projetos energeticamente eficientes como uma alternativa de redução de custos com eletricidade.

## 2.5 CityZoom

O CityZoom é um ambiente de apoio à decisão em projetos de arquitetura e urbanismo [CIT99]. O projeto surgiu e está ainda em desenvolvimento no Laboratório para Simulação e Modelagem em Arquitetura e Urbanismo (SIMMLAB/UFRGS), com o objetivo de prover um ambiente onde modelos de desempenho podem ser utilizados de forma integrada, visando otimizar o planejamento urbano.

O projeto conta com a cooperação dos demais laboratórios que formam o Núcleo de Tecnologia Urbana (NTU/UFRGS), o Laboratório de Sistemas de Transporte (LASTRAN/UFRGS), o Laboratório de Ensaios Geotécnicos e GeoAmbientais (LEGG/UFRGS) e o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS), todos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e o Laboratório de Conforto Ambiental (LABCON/UFSC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Cada modelo de desempenho opera em diferentes entidades da hierarquia urbana (Figura 2.5), afetando todos os objetos e modelos correlacionados.

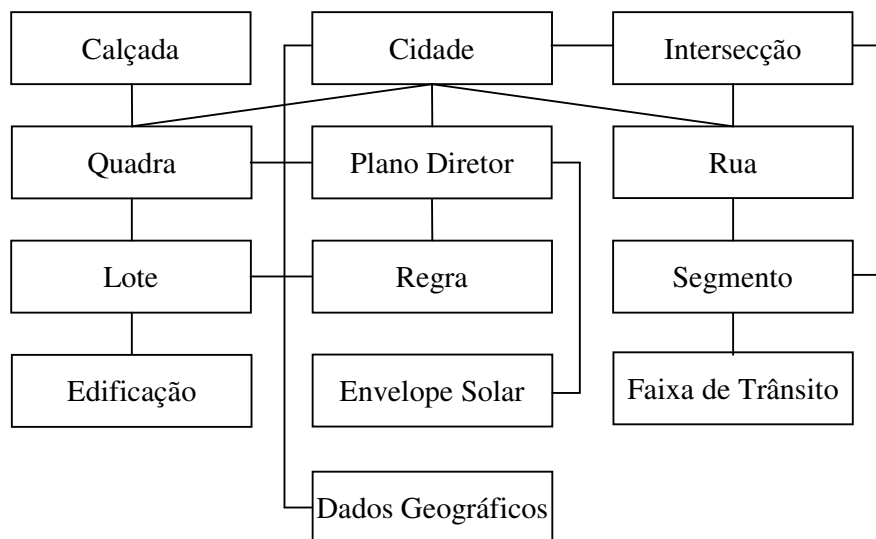


FIGURA 2.5 – Hierarquia de classes do CityZoom

Os módulos atualmente disponíveis no CityZoom são apresentados na Figura 2.6. Os módulos *Visualizador da Abóbada Celeste* e *Envelope Solar* (destacados em cinza claro na figura) do BlockMagic foram inseridos no ambiente CityZoom durante a implementação do presente trabalho, enquanto os módulos *Simulador de Edificações* e *Visualizador 3D OpenGL* (destacados em cinza escuro na figura) sofreram modificações. As adições e modificações feitas no software são abordadas na seção 4.

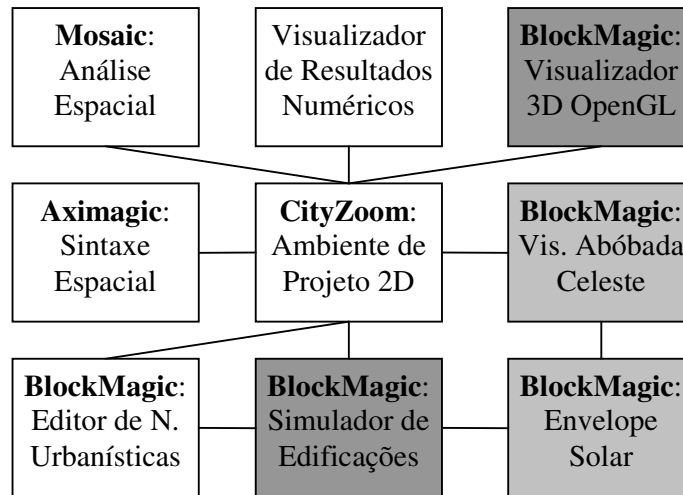


FIGURA 2.6 – Módulos do CityZoom

O módulo central é o Ambiente de Projeto 2D, que fornece ferramentas para projetar graficamente a distribuição de quadras e lotes de uma cidade e serve como interface principal de onde são chamados todos os outros módulos (Figura 2.7).

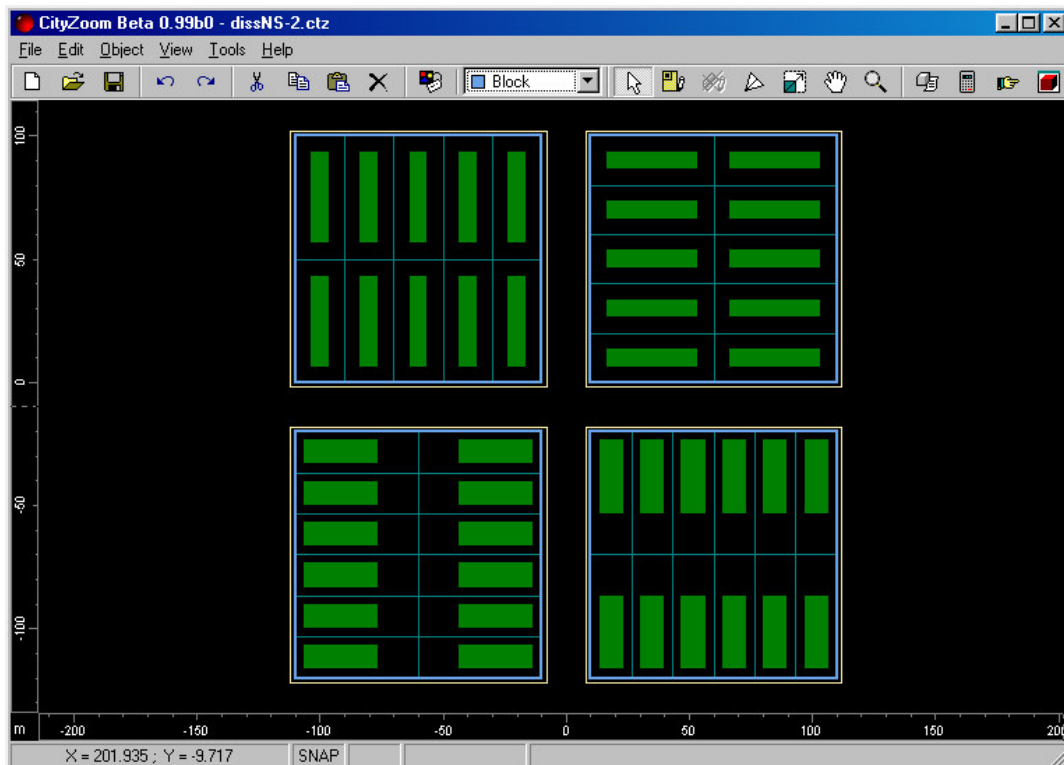


FIGURA 2.7 – Interface do CityZoom – Ambiente de Projeto 2D

O módulo Aximagic trabalha sobre dados axiais, os quais correspondem às vias urbanas, realizando análise de Sintaxe Espacial, que permite a extração de informações sobre as relações topológicas entre as vias (Figura 2.8).



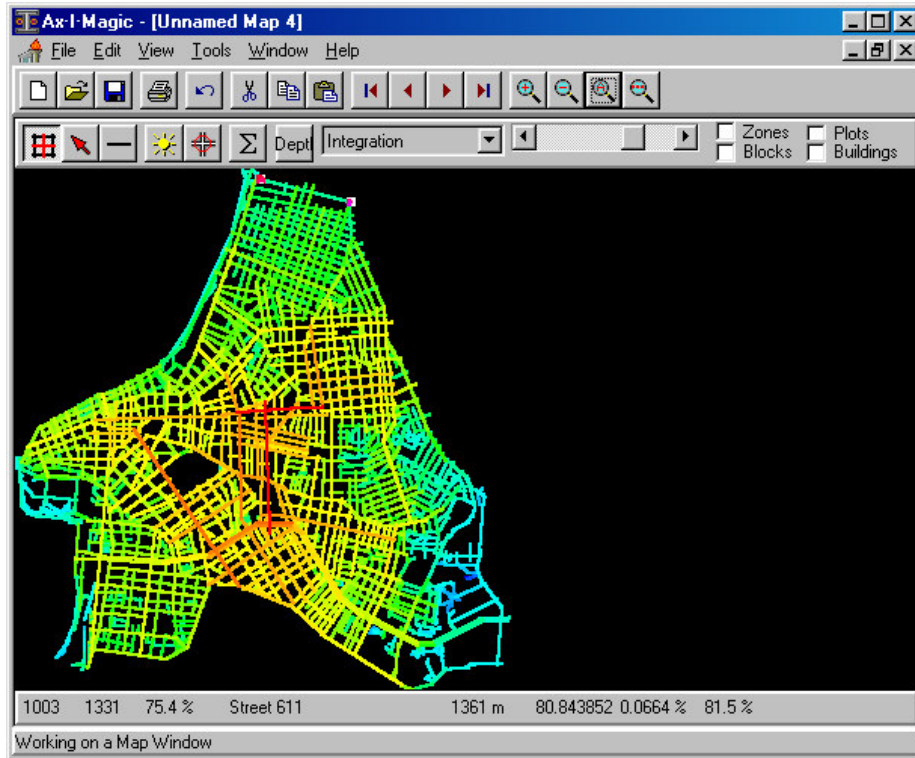


FIGURA 2.8 – Aximagic

Dados numéricos podem ser obtidos a partir de elementos geométricos que integram a cidade (por exemplo, a área de uma quadra) ou explicitamente associados a eles (por exemplo, população de um edifício) usando a ferramenta de projeto. Estes dados podem ser resgatados para toda a cidade ou apenas um conjunto de quadras, lotes ou edificações, e visualizados usando o módulo Visualizador de Resultados Numéricos (Figura 2.9). Alguns atributos de interesse são área total, área construída, taxa de ocupação (área da base por área do terreno), índice de aproveitamento (área construída por área do terreno) e altura média das edificações.

Seleccionador	Soma	Máximo	Saldo
Área	1666.67	-	-
Área Construída	2499.99	2500	1
Ocupação	0.3	0.67	0.45
Uso	1.5	1.5	1

FIGURA 2.9 – Visualizador de Resultados Numéricos



O módulo Mosaic (Figura 2.10) é uma ferramenta de Análise Espacial, capaz de gerar mapas de cores de duas maneiras. Os mapas *primitivos* são gerados diretamente a partir de dados da estrutura urbana, com informações como área construída das quadras ou altura das edificações, e os mapas *derivados* são gerados a partir de outros mapas, utilizando o conceito de Álgebra de Mapas.

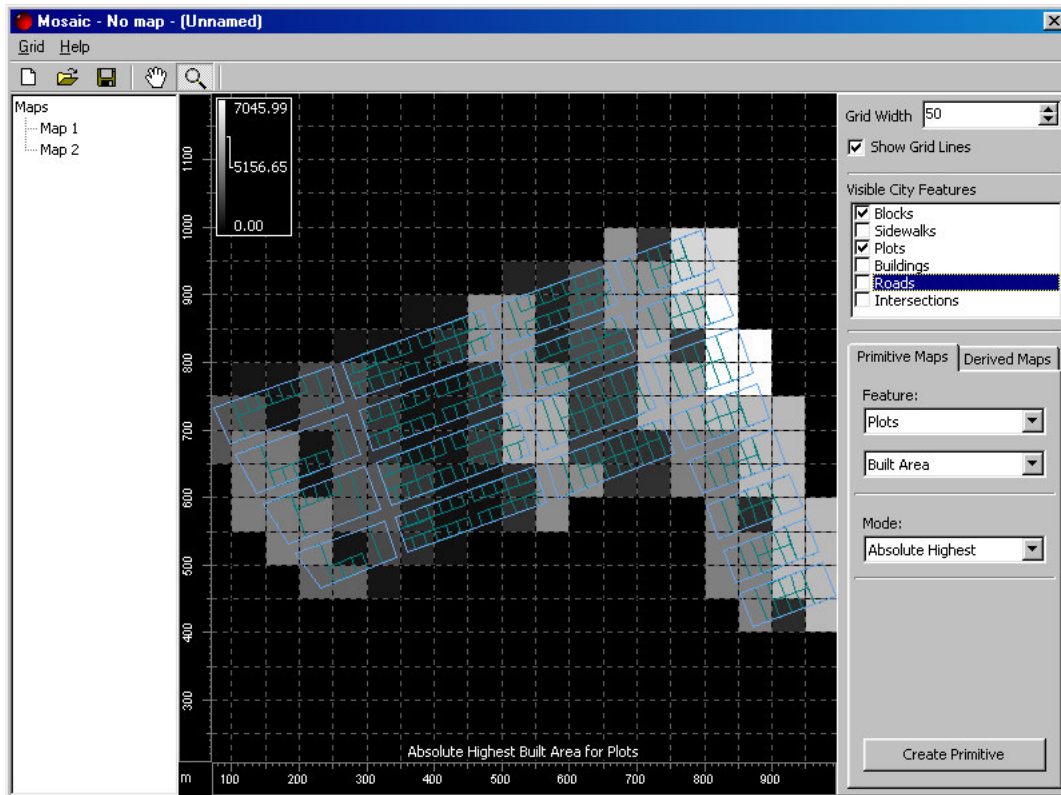


FIGURA 2.10 – Mosaic

BlockMagic [TUR99] é o modelo voltado à simulação de potencial construtivo de lotes a partir de Normativas Urbanísticas contidas em Planos Diretores de Desenvolvimento Urbano (PDDU). Esta ferramenta pode simular rapidamente um conjunto, mesmo que grande, dos mais diversos tipos de terrenos ou validar edificações construídas manualmente pelo usuário. O BlockMagic é implementado por diferentes módulos:

- **Editor de Normativas Urbanísticas:** Permite que qualquer usuário insira o conjunto de regras da cidade sobre a qual ele está trabalhando, modifique aquelas regras, ou crie seu próprio conjunto de regras (Figura 2.11). Estas regras servem como parâmetro para as simulações, sendo extremamente fácil verificar o impacto de diferentes regras sobre uma cidade.
- **Simulador de Edificações:** Módulo central do BlockMagic, capaz de realizar simulações de potencial construtivo de lotes urbanos. As simulações baseiam-se nas Normativas Urbanísticas, buscando maximizar os parâmetros dados pelo usuário (Figura 2.12), tais como Altura, Área da Laje, ou Índice de Aproveitamento.

- Visualizador 3D OpenGL: Permite navegação interativa por um cenário tridimensional correspondente à cidade sobre a qual se está trabalhando (Figura 2.13).

Floor	Front SetBack	Side SetBack	Rear SetBack	Max Projection
1	4	0	0	0.6667
2	4	0	0	0.6667
3	4	3	3	0.5
4	4	4	4	0.5
5	4	4	4	0.5
6	6	6	6	0.5
7	7	7	7	0.5
8	8	8	8	0.5

FIGURA 2.11 – Editor de Normativas Urbanísticas

FIGURA 2.12 – Interface do Simulador de Edificações

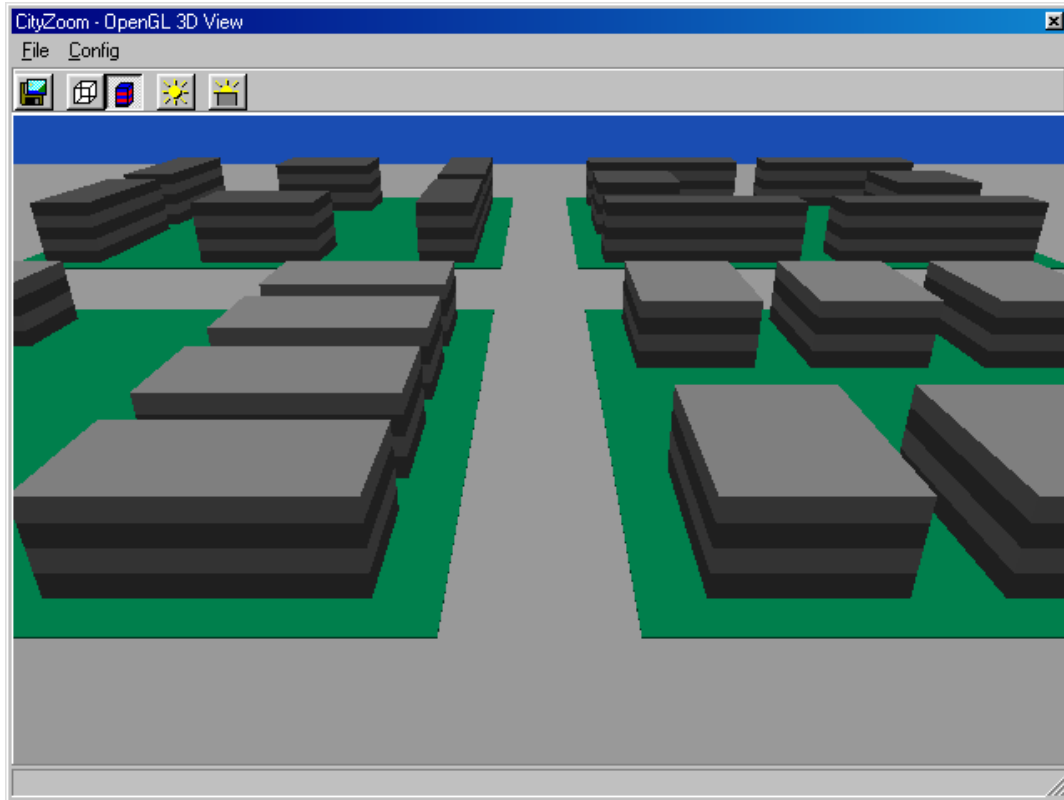


FIGURA 2.13 – Visualizador 3D OpenGL

Finalmente, o CityZoom provê não somente um ambiente de projeto e simulação, mas também uma ferramenta de visualização, permitindo análises tanto quantitativas como qualitativas de edificações existentes ou simuladas. Isto é possível através do Visualizador de Resultados Numéricos, capaz de buscar e calcular dados de diferentes elementos nos diversos níveis da hierarquia da cidade, e do Visualizador Tridimensional do BlockMagic, que permite navegação interativa em uma representação virtual do cenário sendo trabalhado. Conforme já mencionado, este visualizador sofreu modificações ao longo do presente trabalho, para incorporar novos aspectos à representação tridimensional das edificações planejadas.

## 2.6 Comentários Finais

Com exceção do CityZoom, as diversas ferramentas existentes são voltadas à simulação e avaliação de edificações sob o ponto de vista físico ou energético. Não consta na literatura consultada outra ferramenta capaz de realizar simulação do impacto de normativas urbanísticas.

Faltam, também, ferramentas que integrem, em um mesmo ambiente, dois ou mais aspectos urbanísticos (morfológicos, sociais, energéticos, climáticos, econômicos, etc.). Apesar de serem independentes, estes aspectos são fortemente correlacionados, e uma alteração visando melhorar um deles pode causar impacto negativo sobre os outros.

Por exemplo, uma modificação de projeto visando melhorias do ponto de vista energético poderia resultar em conseqüências estruturais negativas ou até mesmo em edificações que não respeitassem as Normativas Urbanísticas.

Dominique Gauzin-Müller [GAU2002] aponta como diversos fatores durante o planejamento urbano podem ajudar a reduzir o consumo energético, tais como:

- densidade urbana: um bloco compacto de casa usa aproximadamente 20% menos energia para o aquecimento por casa do que um terraço de cinco casas e aproximadamente 40% menos que uma casa isolada;
- projeto do local para fazer melhor uso de energia solar, limitando as sombras de edificações adjacentes;
- otimização da inclinação e orientação dos telhados para permitir melhor uso de coletores solares e painéis fotovoltaicos; e
- introdução de regulamentações para otimizar o *layout* de novas edificações para fazer melhor uso de energia solar ativa e passiva.

A Figura 2.14 mostra uma comparação da relação entre a área do envelope da edificação e o espaço utilizável, em função da forma da edificação. Quanto menor o valor, mais energeticamente eficiente é a edificação.

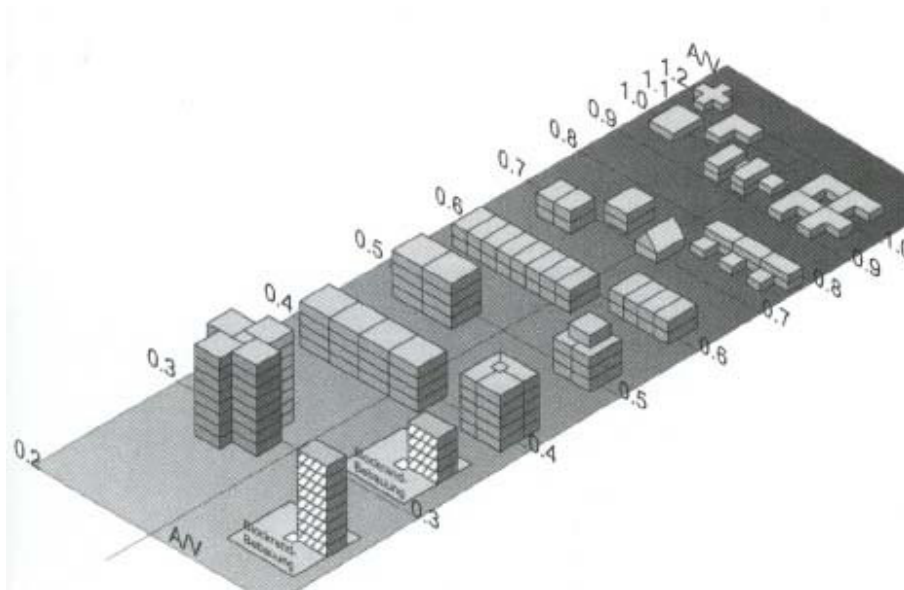


FIGURA 2.14 – Relação entre a área do envelope da edificação e o espaço utilizável, em função da forma da edificação. (Diagrama gerado pelo Solarbüro, Dr. Peter Goretzki, 1997, [GAU2002])

Um ambiente integrado de projeto seria de grande valia para arquitetos, construtores, conselheiros municipais, ou qualquer pessoa interessada no assunto. Associar a insolação e iluminação natural à simulação das Normativas Urbanísticas em um ambiente integrado, o CityZoom, obtendo uma ferramenta de simulação e visualização do impacto global destes elementos, é a principal motivação do presente trabalho.

## **3 Controle de Acesso à Luz Solar**

### **3.1 Introdução**

O sol é fundamental para tudo na vida: ele é a fonte de nossa visão, calor, energia e ritmo de vida. Seus movimentos provêm nossa percepção de tempo e espaço [KNO2000].

Acesso assegurado ao sol é, então, importante para a qualidade de nossas vidas. Sem acesso ao sol, nossas percepções do mundo e de nós mesmos são alteradas. Sem a segurança de acesso solar, enfrentamos incerteza e desorientação.

O conceito de acesso solar é uma abstração generalizada de observações particulares. A natureza conta com vários exemplos de disposições baseadas em alguma medida de exposição ao sol. Entretanto, as construções do mundo moderno parecem não seguir estes exemplos. As cidades não são direcionais e os edifícios não são diferenciados segundo a orientação do sol.

Nos Estados Unidos, o acesso ao sol entrou em discussão no início dos anos 70, primariamente vendo o sol como fonte de energia. Mais recentemente, com a deterioração do ambiente urbano, a ênfase foi mudada para qualidade de vida. Seja para energia ou qualidade de vida, é necessário controle visando regulamentar como e quando vizinhos podem fazer sombra uns nos outros.

O envelope solar é técnica para assegurar acesso solar tanto para energia quanto para qualidade de vida. Ele regulamenta o desenvolvimento dentro de bordas imaginárias derivadas do movimento aparente do sol. Edificações dentro destes contêineres não projetarão sombra excessiva sobre as redondezas durante períodos críticos do dia e ano. Se aplicado genericamente como instrumento de zoneamento, o envelope solar não apenas permite crescimento potencial, mas também abre novas possibilidades estéticas para a arquitetura e planejamento urbano. Essa abordagem mais geral do conceito de envelope solar, e seu uso no planejamento de edificações, é conhecida como abordagem de Knowles. A próxima seção discute as idéias de Knowles e o restante do capítulo apresenta duas outras abordagens ao conceito de envelope solar, uma das quais é a utilizada no presente trabalho.

### **3.2 A Abordagem de Knowles**

#### **3.2.1 Embasamento Legal**

O conceito de envelope solar surgiu em 1976, baseado nas relações críticas entre altura das edificações e área de sombra projetada. Mas por que usar envelope solar e não outros instrumentos legais?

Alguns especialistas nas leis dos Estados Unidos pediram por clarificações ou mudanças nas leis ou mesmo criação de novas leis se a garantia de acesso ao sol for necessária. Isso levanta uma interessante questão de precedentes legais.

A lei mais comumente citada fora dos Estados Unidos é a “Ancient Lights Doctrine”, contudo, existem problemas quanto a sua aplicação [THO76]. A grosso modo esta doutrina entende que se não houver lembrança viva que dita propriedade tenha sido sombreada por outra, ninguém agora pode fazê-lo. Entretanto esta doutrina tem sido, por repetidas vezes, repudiada nas cortes americanas.

Alguns especialistas na questão legal têm sugerido que a “American Water Law”, especialmente a doutrina de apropriação anterior, pode oferecer um melhor precedente para os direitos a luz solar [WHI76]. Eles apontam que tanto a luz solar como a água são usadas diretamente e não capturadas e vendidas; ambas são consumidas, mas ambas são renováveis. Além disso, existe uma equivalência entre fluxo ascendente e descendente da água e a geometria das sombras projetadas pela luz solar. Mas, assim como a “Ancient Lights Doctrine” existem problemas com a aplicação da “American Water Law”.

A doutrina de apropriação prévia (“Prior Appropriation Doctrine”) é uma formalização do que era a prática geral entre os primeiros colonizadores do oeste americano de se apropriarem dos recursos hídricos existentes segundo a ordem de quem primeiro lhes desse um uso benéfico. Simplificadamente: aquele que primeiro chegasse ficava com mais. Foi a resposta encontrada às exigências de colonizar o oeste americano.

A apropriação prévia não terá sua aplicação análoga em relação à luz solar de forma simples. Acesso futuro a luz solar não será garantido a uma propriedade que na atualidade não possui ou não faz uso de um sistema de conversão de energia. Muitas licenças dadas a propriedades diversas e adjacentes (e mesmo àquelas em regiões distantes) podem possivelmente agir de forma a impedir o desenvolvimento por completo em uma delas. Isto foi apontando por muitos especialistas que demonstram muitas falhas em qualquer tentativa de se evoluir diretamente do código de águas para o futuro código de luz solar.

As dificuldades em se aplicar o código de águas levaram a discussão de uma possível solução, a de uma divisão por zonas [HAY79]. Esta idéia oferece a possibilidade de uma administração mais local das regras que afetam a localização da luz solar. Além disso, a divisão por zonas é tradicionalmente aplicada a todas as propriedades num distrito, assim, assegurando acesso futuro e contornando os problemas de preferência em virtude de utilização prévia. Finalmente, a existência de zonas limitando altura e recuos já está baseada no conceito de envelope de volume construível. Estes motivos têm sido vistos como de grande valia e têm contribuído em muito para o desenvolvimento do envelope solar.

### 3.2.2 Estrutura Espaço-Temporal

O envelope solar é uma estrutura de espaço e tempo: as fronteiras físicas de propriedades adjacentes e o seu período assegurado de acesso à luz do sol. A forma como essas medidas são escolhidas determina o tamanho e forma final do envelope.

Primeiro, o envelope solar evita sombras indesejadas sobre as fronteiras determinadas nas propriedades vizinhas; essas fronteiras são chamadas *cercas de sombra*. A altura das cercas de sombra pode ser configurada de acordo com qualquer número de diferentes elementos existentes, tais como cercas para privacidade, janelas ou partidos. Sua altura pode também ser determinada pelo uso dos terrenos adjacentes, por exemplo, uso residencial demandando cercas de sombra menores do que o uso comercial ou industrial. Diferentes alturas de cercas de sombra influem na forma e tamanho do envelope solar.

Segundo, o envelope fornece o maior volume possível dentro das restrições de tempo, chamadas *horas de corte*. O envelope obtém isso definindo o maior contêiner teórico de espaço que não projetaria sombras indesejadas num intervalo entre horas especificadas do dia. Maiores períodos de acesso ao sol serão mais restritivos para o envelope solar. Tempos de corte especificados nas primeiras horas da manhã ou nas últimas horas da tarde resultarão em volumes menores do que os que resultariam de horas mais tarde na manhã ou mais cedo na tarde.

Um exemplo de como as cercas de sombra afetam o envelope solar pode ser visto nas regulamentações propostas em 1994 pela Agência de Re-desenvolvimento Comunitário de Los Angeles (L. A. Community Redevelopment Agency – CRA) (Figura 3.1). No exemplo, as cercas de sombra variam de acordo com a natureza das ruas segundo a proposta do CRA para o Plano Diretor do centro da cidade. A projeção de sombras permitida é de até  $10^\circ$  sobre vielas, até  $20^\circ$  sobre avenidas e até  $45^\circ$  sobre bulevares. Esta diferenciação antecipa os variados tipos de uso do solo e características das ruas.

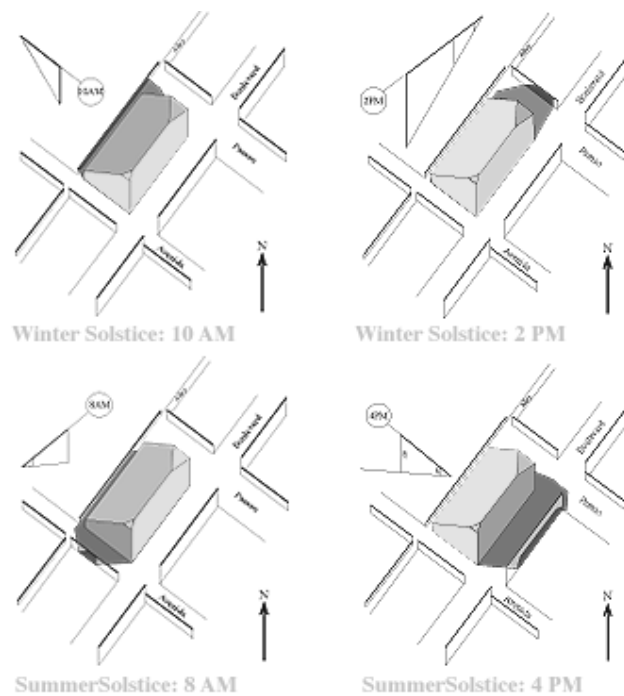


FIGURA 3.1 – Restrições espaço-temporais no envelope solar: o tamanho e a forma do envelope são determinados pelas sombras projetadas sobre as propriedades vizinhas em horas específicas. [KNO2000]

O mesmo exemplo mostra como as horas de corte influenciam o envelope solar. O inverno tem maior impacto sobre o volume, pois a altitude do sol é menor durante esta estação; as horas de corte são 10 da manhã e 2 da tarde, determinando quatro horas de acesso direto à luz do sol, o mínimo necessário para um bom projeto que considere energia solar passiva em Los Angeles. O verão tem menos impacto sobre o envelope, pois a altitude do sol é muito maior; as horas de corte são 8 da manhã e 4 da tarde, um período maior que o do inverno, mas considerado desejável em localidades com clima moderado onde as pessoas apreciam jardinagem e recreação ao ar livre.

O tamanho do envelope solar, e, por conseguinte, do potencial construtivo, varia também de acordo com a orientação das ruas. Isso ocorre devido às diferenças entre os tipos de ruas em cada estação. Ruas com orientação leste-oeste são muito escuras e frias no inverno, e muito claras e quentes no verão (Figura 3.2a). Ruas norte-sul, embora agradáveis no inverno, não têm sombras protetoras contra o sol do meio dia no verão (Figura 3.2a). Ruas com orientação nordeste-sudoeste recebem mais sol durante o inverno que as leste-oeste, por serem diagonais, e são sombreadas durante a maior parte do dia durante o verão (Figura 3.2b).

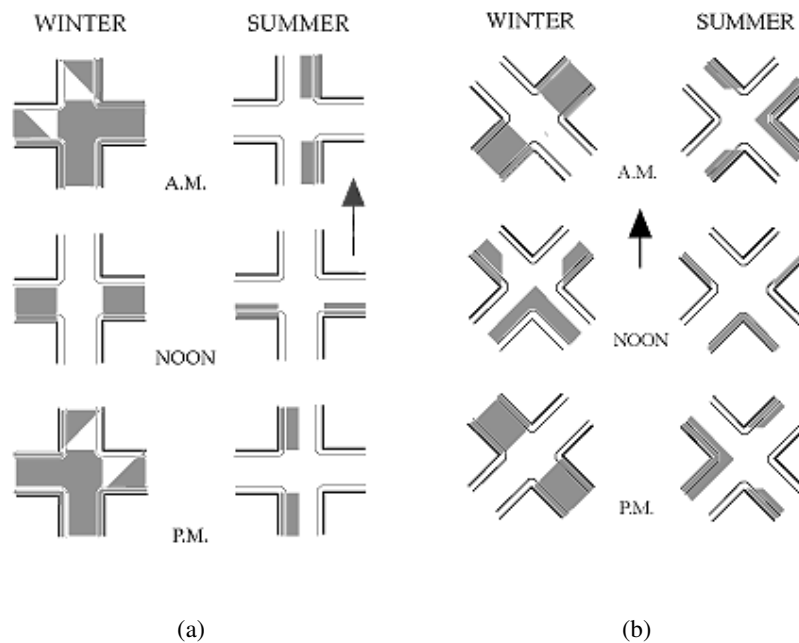


FIGURA 3.2 – Padrões de sombreamento para diferentes orientações de ruas: (a) Norte-Sul e Leste-Oeste e (b) Nordeste-Sudoeste [KNO2000]

Em geral, é possível obter uma maior altura no envelope se as quadras estão na orientação norte-sul ou leste-oeste, e menos volume na orientação nordeste-sudoeste (Figura 3.3). O ganho em qualidade, portanto, gera uma perda no volume construído.



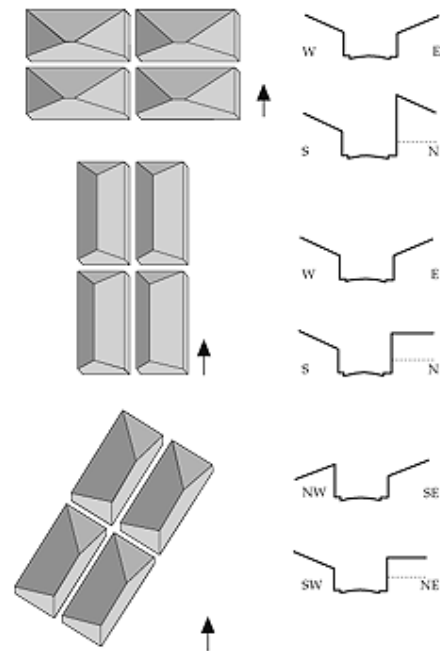


FIGURA 3.3 – Envelope Solar sobre quadras em três diferentes orientações [KNO2000]

### 3.3 A Abordagem de Shaviv

Durante o projeto conceitual de regiões urbanas, o projetista trabalha com características geométricas relacionadas à altura das edificações e sua relação com a orientação e largura das ruas e calçadas. Isso inclui a determinação das proporções dos edifícios, dos espaços abertos e das subdivisões dos terrenos [SHA2000]. Cada um destes tópicos é complexo e a determinação da melhor solução de projeto se torna especialmente complicada devido às influências mútuas. Por exemplo, a largura das ruas influencia a exposição das calçadas ao sol no inverno ou pode criar as sombras necessárias no verão. Claramente esta inter-relação depende da geometria dos edifícios ao longo da rua, tal como a orientação das fachadas principais, configuração dos edifícios e distância entre eles bem como a geometria da rua e os espaços abertos.

O objetivo é atingir um projeto que assegure a exposição das elevações dos edifícios e das calçadas ao sol durante um período desejado no inverno e que proteja do sol indesejável durante as horas críticas de dias de verão. O projeto de uma região urbana sem considerar desde o início estes aspectos pode causar, mais tarde, condições de desconforto dentro dos edifícios, nas ruas e nas áreas abertas.

#### 3.3.1 Envelopes Solares

Envelopes Solares são nomogramas que definem o espaço de soluções para a determinação de um projeto que considere insolação ou sombreamento. Esta abordagem trata da criação de dois tipos diferentes de envelopes solares: o Envelope de Direito Solar e o Envelope de Coleta Solar.

- Envelope de Direito Solar (EDS): apresenta as alturas máximas dos edifícios que não violam os direitos solares de nenhum dos edifícios existentes durante um dado período do ano (Figura 3.4a).
- Envelope de Coleta Solar (ECS): apresenta a superfície mais baixa onde é possível colocar janelas ou coletores solares de um edifício de forma que ele não receba sombra dos edifícios vizinhos existentes durante um dado período do ano (Figura 3.4b). Na verdade, este envelope representa os cones de sombra projetados pelos edifícios existentes que formam o ambiente construído durante todo o período definido pelo projetista. O tamanho destes cones de sombra depende do período de amostragem usado.

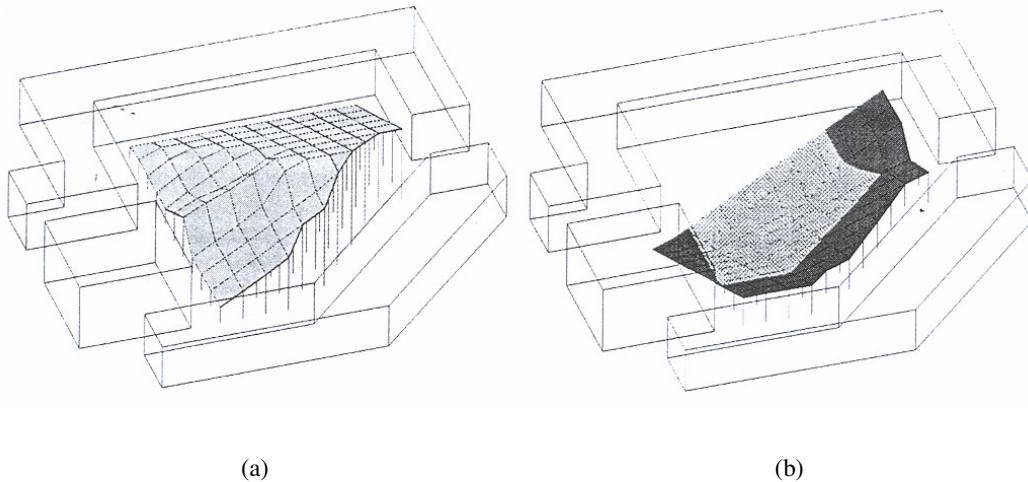


FIGURA 3.4 – Tipos de Envelope Solar: (a) Envelope de Direito Solar e (b) Envelope de Coleta Solar [SHA2000]

### 3.3.2 Volume Solar

Obviamente, é possível determinar o volume existente entre os dois envelopes citados. Este volume contém todas as alturas de edificações que permitem acesso solar a cada edifício da vizinhança e que ao mesmo tempo não recebem sombra dos mesmos edifícios da vizinhança (Figura 3.5). Este volume é chamado Volume Solar.

Não fica claro, a priori, que existe uma solução que satisfaça às duas condições. De fato, não há solução quando, para um ponto específico, a altura calculada para coleta de radiação solar é mais alta que a altura para garantia do direito solar. Entretanto, há a possibilidade de que apenas em partes da área examinada ambas as condições sejam satisfeitas. Um exemplo deste caso é mostrado na figura 4.5.

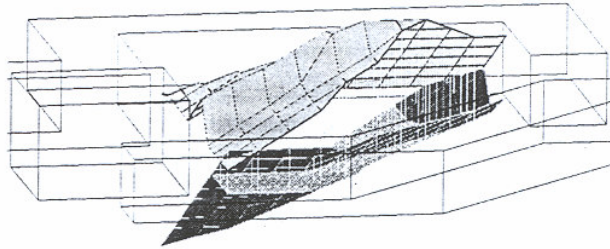


FIGURA 3.5 – Volume Solar é o volume gerado pela interseção dos dois envelopes [SHA2000]

Usando os nomogramas de Envelope de Direito Solar e Envelope de Coleta Solar o projetista pode determinar facilmente qual a geometria e orientações preferidas para a rua, calçadas, áreas abertas e configurações dos edifícios, para garantir sua exposição ao sol durante o período desejado no inverno, e para conseguir a proteção necessária do sol indesejável durante horas críticas no verão.

### 3.4 A Abordagem de Pereira

A consideração da insolação durante o planejamento de edificações é essencial para determinar os benefícios a serem obtidos do sol dentro e ao redor dos edifícios (conforto térmico). O processo requer conhecimento dos atributos urbanos e do local desejado que afetam como e onde a radiação solar pode ser usada [PER2001].

O primeiro passo para incluir a insolação numa estrutura integrada de planejamento é estabelecer objetivo de proteção e de planejamento e critérios de teste. O principal é assegurar que a luz do sol esteja presente ao redor e dentro dos edifícios da forma necessária. Objetivos de proteção ajudam a proteger edifícios e terrenos vizinhos [ROB86]. Estes objetivos podem ser introduzidos nos Planos Diretores de Desenvolvimento Urbano (PDDU) das cidades e deveriam ser parte dos objetivos gerais de planejamento em projetos urbanos.

O primeiro critério científico proposto para regular a insolação no ambiente construído foi a duração da insolação. Nos anos 50, considerava-se 1,5 a 2,2 horas de sol por dia suficiente para garantir o efeito bacteriológico da insolação. Entretanto, estudos e pesquisas posteriores demonstraram que este parâmetro não era um valor normativo adequado [OBO82].

Experimentos e simulação matemática confirmaram que a duração de insolação falha ao considerar a complexa e variável radiação incidente efetiva do sol, que é a responsável pela natureza e magnitude de efeitos biológicos e fisiológicos (conforto térmico). De acordo com a hora, dia e mês do ano, condições atmosféricas, orientação de fachada e janelas e obstruções nas vizinhanças, a mesma duração de insolação pode resultar em diferentes doses de radiação solar. De qualquer forma, reconhece-se que de uma a 2,5 horas de sol são importantes para satisfazer certas necessidades psicológicas humanas [NEE76, OBO82].

O principal critério usado na abordagem de Pereira é o balanço de diferentes necessidades de radiação solar ao longo do ano, traduzido no conceito de “radiação solar desejável ou indesejável”.

### 3.4.1 Metodologia Proposta

Os aspectos descritos anteriormente podem ser testados e analisados através de métodos gráficos que podem ser integrados com informações de necessidades biológicas. A aceitação (sol passivo) ou rejeição (sombra) de radiação solar é uma das principais estratégias de controle para adequação dos edifícios às condições climáticas locais. Para alcançar o objetivo de planejar a ocupação urbana considerando necessidades de insolação, princípios científicos são trazidos para um nível operacional simples. A solução consiste em relacionar 3 diferentes fontes de informação:

- *Condições climáticas*: representadas pela temperatura externa do ar e radiação solar em planos verticais;
- *Necessidades psico-fisiológicas* das pessoas sujeitas a condições climáticas variáveis;
- *Geometria existente*: representada pelas relações geométricas de insolação e ambiente construído.

#### Combinação das condições climáticas com as necessidades psico-fisiológicas

A satisfação/insatisfação do ser humano com a radiação solar incidente pode ser representada por um sistema de ponderação da radiação solar em função da diferença em magnitude entre a *temperatura externa do ar* e a *temperatura neutra* [PER96]. A temperatura neutra do mês pode ser calculada a partir da temperatura média do mês e da umidade relativa do mês (vide anexo 1). A diferença entre estas temperaturas é traduzida em *fatores de ponderação* (FP, vide anexo 2), que serão negativos (insolação é indesejável) quando a temperatura do ar é mais elevada que a neutra, ou positivos (insolação é desejável) no caso contrário.

A integração destas duas fontes de informação é obtida através do produto dos fatores de ponderação pelos valores de radiação solar (direta e difusa) em cada fachada ao longo do ano. Estes valores, chamados *radiação ponderada*, são projetados sobre o diagrama da trajetória aparente do sol para uma dada latitude (Figura 3.6).

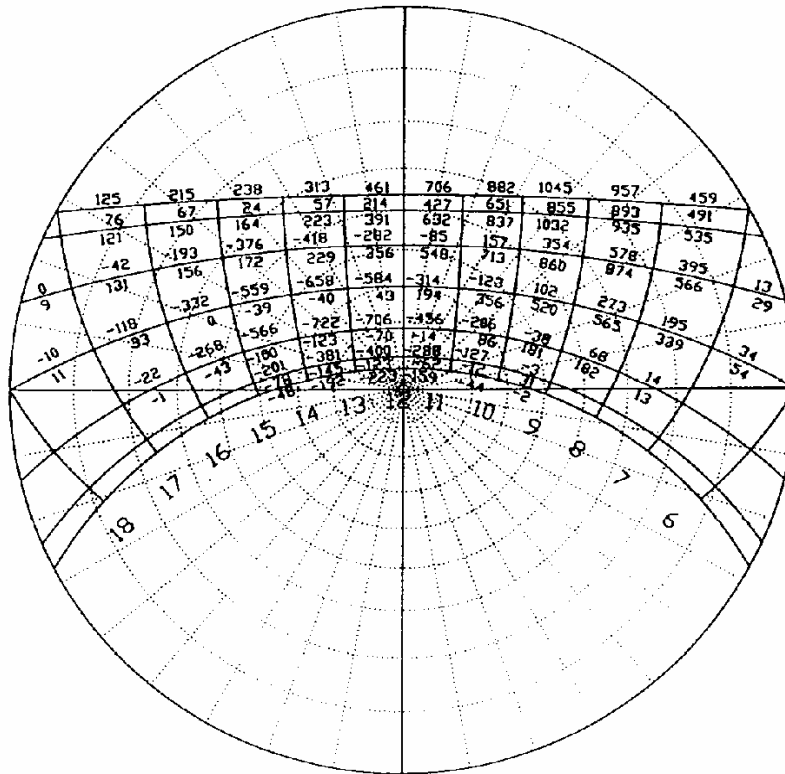


FIGURA 3.6 – Valores de Radiação Ponderada projetados no Diagrama da Trajetória Aparente do Sol na latitude 27,5°S, fachada com orientação Norte [PER2001]

### Integração da geometria

A obstrução da abóbada celeste produzida pelo ambiente em um ponto de referência pode ser projetada sobre o diagrama da trajetória solar (Figura 3.7). O método de projeção gráfica usado na abordagem é o estereográfico.

O próximo passo é expressar todas as informações relevantes de forma integrada. Para isto são construídos os diagramas de trajetória solar com os valores de *radiação ponderada* para um determinado número de orientações de fachadas verticais. A abordagem presente trata 8 orientações de fachadas e considera o ambiente construído como uma parede contínua de altura variável (ângulo de obstrução de 0° a 90°). A proposta então é fazer o somatório das *radiações ponderadas* para cada orientação de modo a estimar o grau de obstrução produzido pelas vizinhanças que fornecerá o melhor equilíbrio, isto é, o máximo de radiação desejada e o mínimo de radiação indesejada. Os valores finais das somas das radiações ponderadas para cada nível de obstrução expressam a qualidade da obstrução relacionada com sua performance térmica de acordo com a disponibilidade de radiação solar em uma dada condição climática.

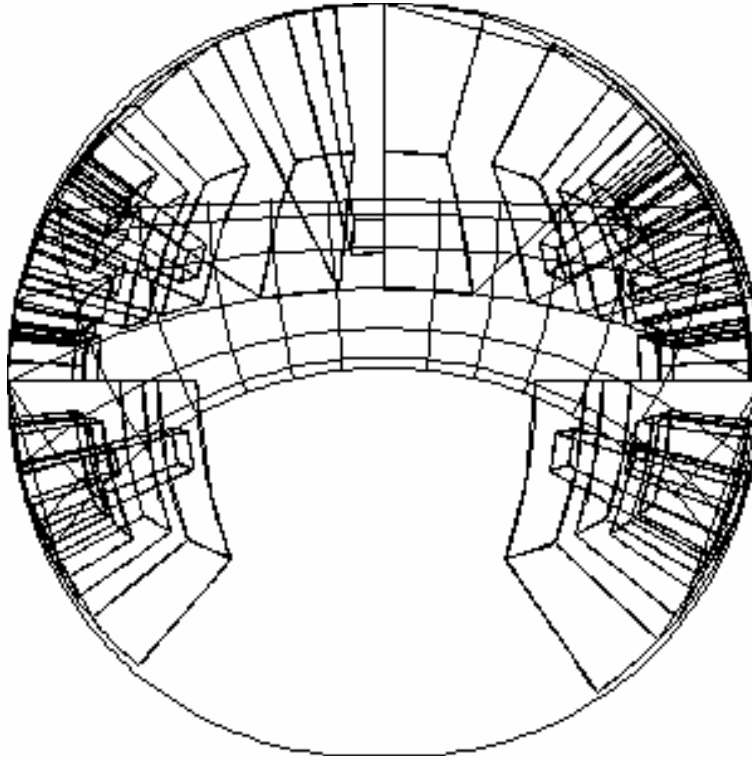


FIGURA 3.7 – Máscara da obstrução dos edifícios [PER2001]

### Resultados da integração

Teoricamente, o ideal é excluir do ambiente urbano a radiação indesejável e aceitar toda a parte desejável. Entretanto, é intuitivo que uma otimização completa é impossível. Por isso alguns critérios iniciais são usados para definir os ângulos a serem respeitados em cada orientação de cada terreno:

- equilíbrio positivo de radiação ponderada durante o ano todo;
- equilíbrio positivo nos equinócios (março e setembro);
- 1,5 a 2 horas por dia de duração de insolação durante o inverno.

Buscando satisfazer a pelo menos dois dos critérios iniciais, foram encontrados os ângulos de obstrução apresentados na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 – Ângulos de obstrução para cada orientação de fachada em Florianópolis/SC [PER2001]

Ângulo de Obstrução	Orientação							
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
	40-45	45-50	50-55	55-60	55-60	55-60	60-65	55-60

A aplicação destes ângulos nas bordas do terreno cria um conjunto de limites geométricos derivados da avaliação do equilíbrio de radiação ponderada (Figura 3.8). O volume resultante é definido como *envelope solar* – o maior volume que um edifício pode ocupar de modo a permitir acesso à insolação nas edificações adjacentes, segundo Pereira, Apud [KNO81].

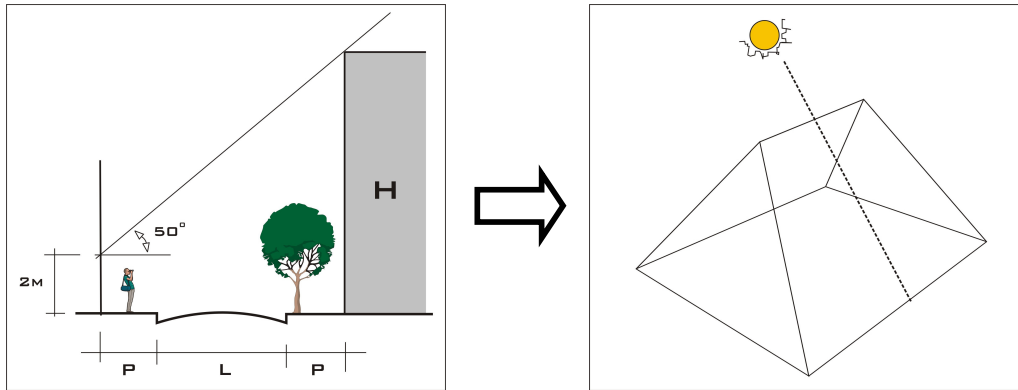


FIGURA 3.8 – Aplicação dos ângulos às bordas do terreno para definição do envelope solar.

### Implementação do envelope solar

O envelope solar pode ser estabelecido através dos seguintes passos:

- verificar a orientação das fachadas;
- escolher o ângulo de obstrução correspondente na tabela;
- definir a altura máxima da edificação sem recuos de acordo com a largura da rua, orientação das fachadas e respectivos ângulos de obstrução;
- fazer o mesmo para o interior das quadras.

Desta forma é possível obter os recuos para cada andar da edificação e construir o volume básico que lembra um prisma; o centro da quadra também fica sem obstrução como um prisma invertido (Figura 3.9). Este modelo formal é, então, usado para criar um modelo real adaptado não somente ao alinhamento das fachadas internas, dimensões do lote, altura dos edifícios existentes e recuos frontais, mas também a outros aspectos como o equilíbrio de ganhos e perdas de possível área construível (Figura 3.10).

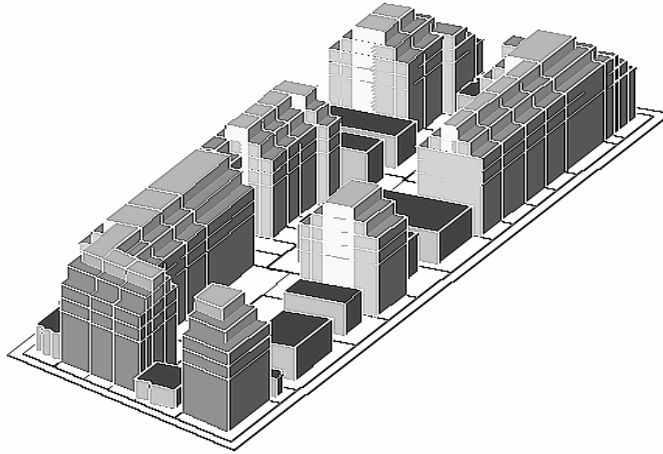


FIGURA 3.9 – Envelope solar inicial construído a partir dos ângulos de obstrução da Tabela 3.1 [PER2001]

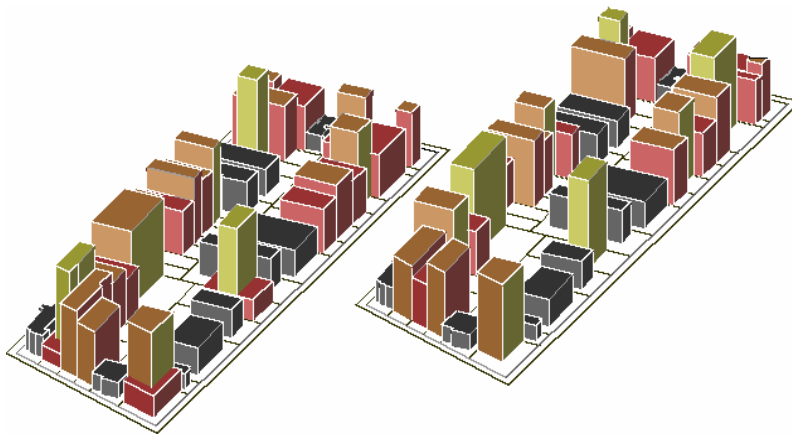


FIGURA 3.10 – Possíveis alternativas de forma da quadra respeitando o envelope solar inicial [PER2001]



## 4 Integração do conceito de Envelope Solar ao CityZoom

Este capítulo descreve a metodologia utilizada na implementação do Envelope Solar e sua integração ao CityZoom, assim como as ferramentas de visualização desenvolvidas. Para a integração do conceito de envelope solar à simulação de edificações no CityZoom, é necessário determinar a posição e a trajetória solar dada uma localização para a cidade e um determinado intervalo de tempo. A partir dessas informações, é possível determinar o envelope solar e, conseqüentemente, disponibilizar as visualizações correspondentes.

As seções a seguir detalham os métodos empregados, os quais foram integrados ao BlockMagic, conforme apresentado no diagrama da Figura 2.6.

### 4.1 Posição do Sol

#### 4.1.1 Determinação da Posição do Sol

A posição do sol no céu é dependente de espaço – latitude e longitude do local sendo trabalhado – e tempo – estação, dia do ano e hora. O cálculo não é trivial, dada a inclinação da Terra em relação ao Sol e a sua trajetória elíptica ao redor dele.

A posição do sol é normalmente dada como um valor de azimute e um valor de altitude. O azimute representa o ângulo do sol em relação ao Norte verdadeiro, variando entre  $-180^\circ$  e  $+180^\circ$ . Visto de cima, o ângulo é positivo no sentido horário a partir do norte e negativo no sentido anti-horário. A altitude corresponde ao ângulo do sol em relação ao plano que representa o solo, variando entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$  (Figura 4.1).

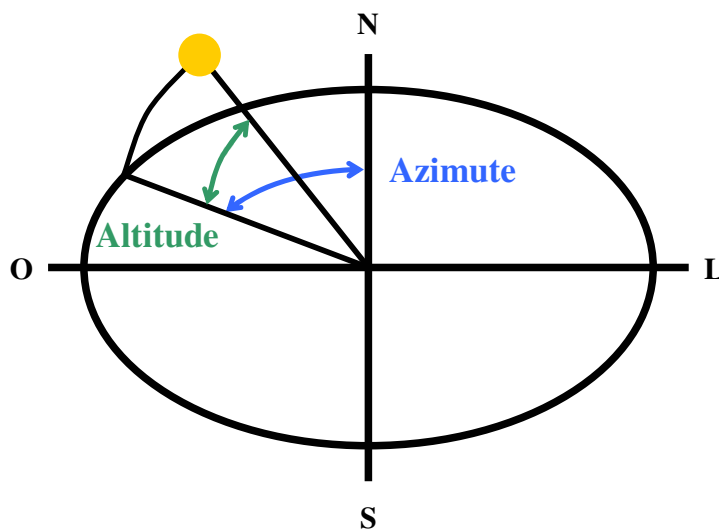


FIGURA 4.1 – Posição do Sol dada pelo Azimute e Altitude

A fim de calcular Azimute e Altitude, primeiro é necessário obter-se a Declinação da Terra com relação ao Sol. Declinação é a distância angular do sol a norte ou sul da linha do Equador (Figura 4.2).

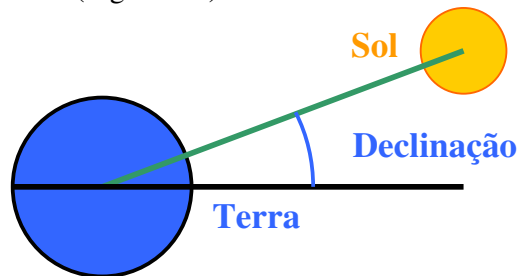


FIGURA 4.2 – Declinação do Sol

O Equador da Terra é inclinado  $23,45^\circ$  com relação ao plano da translação da Terra ao redor do Sol. Então, conforme a Terra percorre sua órbita ao redor do Sol durante o ano, a declinação varia de  $23,45^\circ$  Norte a  $23,45^\circ$  Sul. A Declinação pode ser calculada, segundo Carruthers *et al.* [CAR90], pela equação 4.1:

$$\begin{aligned}
 t &:= 2 * \text{PI} * ( (\text{JulianDate} - 1) / 365 ); \\
 \text{Declination} &:= 0.322003 - \\
 &\quad 22.9711 * \cos(t) - \\
 &\quad 0.357898 * \cos(2 * t) - \\
 &\quad 0.14398 * \cos(3 * t) + \\
 &\quad 3.94638 * \sin(t) + \\
 &\quad 0.019334 * \sin(2 * t) + \\
 &\quad 0.05928 * \sin(3 * t)
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 4.1}$$

JulianDate representa a data dada no formato Juliano. A Data Juliana representa o número de dias desde o meio-dia de 1º de janeiro de 4712 AC. Este sistema foi proposto em 1583 pelo estudioso francês Joseph Julius Scaliger, tendo seu nome derivado do nome de Julius Scaliger, e não de Júlio César. Uma data Gregoriana pode ser convertida em uma data Juliana através da equação 4.2:

$$\begin{aligned}
 \text{JD} &:= 367 * Y - \text{INT}(7 * (Y + \text{INT}((M + 9) / 12)) / 4) \\
 &\quad - \text{INT}(3 * \text{INT}((Y + (M - 9) / 7) / 100) + 1) / 4) \\
 &\quad - \text{INT}(275 * M / 9) + D + 1721028.5 + \text{UT} / 24
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 4.2}$$

onde JD = data Juliana,  
 Y = ano,  
 M = mês (1 = janeiro, 2 = fevereiro, etc.),  
 D = dia do mês,  
 UT = hora universal.

Várias simplificações são possíveis, aplicando-se restrições ao período de anos desejado, por exemplo, apenas anos positivos (DC). No caso das equações para cálculo da Declinação, o ano pode ser completamente eliminado, interessando somente o mês e dia. Então, a Data Juliana pode ser obtida simplesmente consultando a Tabela 4.1 proposta por Klein [KLE77] com o valor base de cada mês e adicionando o dia do mês.

TABELA 4.1 – Valor Base recomendado por mês para determinação da Data Juliana

Mês	Valor Base
Janeiro	0
Fevereiro	31
Março	59
Abril	90
Maio	120
Junho	151
Julho	181
Agosto	212
Setembro	243
Outubro	273
Novembro	304
Dezembro	334

Tendo a Declinação, o próximo passo é calcular a Hora Solar equivalente à Hora Local. Na maioria das localidades, estes dois valores são diferentes. A Hora Solar é determinada pela posição do sol; ao meio-dia ele está na sua posição mais alta no céu (exatamente a Norte para localidade no hemisfério Sul, ou exatamente a Sul caso contrário), com o nascer e pôr-do-sol ocorrendo em tempos simétricos com relação ao meio-dia. A Hora Local é determinada pela zona de hora na qual o lugar em questão está situado, representando normalmente a hora em uma longitude de referência. Por exemplo, Porto Alegre está situada a 51°13' Oeste, mas a hora local utilizada é a de Brasília, 47°55' Oeste. A conversão da Hora Local para a Hora Solar é calculada a partir da Equação de Tempo e da Diferença (Equação 4.3 e 4.4), da seguinte forma, sendo a Hora Solar a soma da Hora Local com a Equação de Tempo e a Diferença.

A Equação de Tempo é usada para compensar a órbita elíptica da Terra ao redor do Sol e sua inclinação axial. Este ajuste é necessário pois a Terra não se move em uma órbita perfeitamente circular. A Equação de Tempo pode ser calculada pela Equação 4.3 [CAR90].

$$t := ( 279.134 + 0.985647 * \text{JulianDate} ) * ( \text{PI} / 180.0 )$$

$$\begin{aligned} \text{Equation} := & 5.0323 - \\ & 100.976 * \sin( t ) + \\ & 595.275 * \sin( 2 * t ) + \\ & 3.6858 * \sin( 3 * t ) - \\ & 12.47 * \sin( 4 * t ) - \\ & 430.847 * \cos( t ) + \\ & 12.5024 * \cos( 2 * t ) + \\ & 18.25 * \cos( 3 * t ) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & //\text{Convert seconds to hours.} \\ \text{Equation} := & \text{Equation} / 3600.00; \end{aligned}$$

(Eq. 4.3)

A Diferença reflete a distância em minutos entre a longitude local e a longitude de referência. Para cada grau de diferença entre a longitude real e a longitude de referência, há uma diferença de tempo de 4 minutos. A Diferença pode ser calculada pela Equação 4.4.

$$\text{Difference} := \left( \frac{(\text{Longitude} - \text{ReferenceLongitude}) * 4}{180 / \text{PI}} \right) / 60.0 \quad (\text{Eq. 4.4})$$

A seguir, é calculado o Ângulo Horário para aquela Hora Solar. O Ângulo Horário descreve a diferença entre a Hora Solar e o Meio-Dia Solar. Apesar de ser calculado diretamente a partir de medidas de tempo, ele é expresso em unidades angulares (graus).

Cada 4 minutos antes do meio-dia solar representam 1 grau de ângulo solar. Após o meio-dia, o tempo é representado por valores negativos de ângulo solar. Então, três horas antes do meio-dia solar o ângulo horário é de 45 graus, e três horas após o meio-dia solar ele é de -30 graus. Sendo uma medida de tempo, o ângulo horário não representa a altitude do sol no céu; o sol nasce e se põe quando sua altitude é zero graus, não necessariamente quando seu ângulo horário é +/- 90 graus.

O Ângulo Horário é calculado pela Equação 4.5, e é utilizado juntamente com a Declinação e com a Latitude do local de interesse, para calcular a Altitude e Azimute do sol pelas Equações 4.6 e 4.7, respectivamente.

$$\text{HourAngle} := (15 * (\text{SolarTime} - 12)) * (\text{PI} / 180.0) \quad (\text{Eq. 4.5})$$

$$\begin{aligned} t &:= (\sin(\text{Declination}) * \sin(\text{Latitude})) + \\ &\quad (\cos(\text{Declination}) * \cos(\text{Latitude}) * \cos(\text{HourAngle})) \\ \text{Altitude} &:= \arcsin(t) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

$$\begin{aligned} t &:= (\cos(\text{Latitude}) * \sin(\text{Declination})) - \\ &\quad (\cos(\text{Declination}) * \sin(\text{Latitude}) * \cos(\text{HourAngle})) \\ \text{Azimuth} &:= \arccos(t / \cos(\text{Altitude})) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

#### 4.1.2 Diagrama da Trajetória do Sol

Calculando-se a altitude e o azimute do sol para cada dia do ano, obtém-se a trajetória aparente do sol. Estes valores podem ser representados em um único diagrama, chamado Diagrama da Trajetória Aparente do Sol. Este diagrama permite uma leitura direta da altitude e do azimute do sol para qualquer hora do dia e qualquer dia do ano. Existem diferentes tipos de diagramas da trajetória solar, sendo o cilíndrico e o estereográfico os principais.

O diagrama cilíndrico é simplesmente um gráfico bidimensional da posição do sol em coordenadas cartesianas. O azimute é plotado sobre o eixo das abscissas, enquanto a altitude é plotada sobre o eixo das ordenadas. A leitura da posição do sol é feita simplesmente verificando o valor dos dois eixos para a data e hora desejada.

O diagrama estereográfico é similar a uma fotografia do céu tirada utilizando uma lente olho-de-peixe de 180° e olhando exatamente para cima, em direção ao zênite. As trajetórias do sol em cada dia do ano podem ser então projetadas sobre a fotografia para qualquer localidade do globo.

A geração das linhas de altitude num diagrama estereográfico pode ser feita usando projeção ortográfica ou estereográfica. Utilizando uma projeção ortográfica, as linhas de altitude ao redor da abóbada celeste são projetadas diretamente (linearmente) em uma superfície plana. Na projeção estereográfica, as linhas de altitude são projetadas sobre um mesmo ponto, normalmente o pólo oposto da esfera. Utiliza-se então o valor da interseção daquela projeção sobre um plano arbitrário, normalmente o Equador. A diferença entre as duas formas de projeção pode ser vista na Figura 4.3.

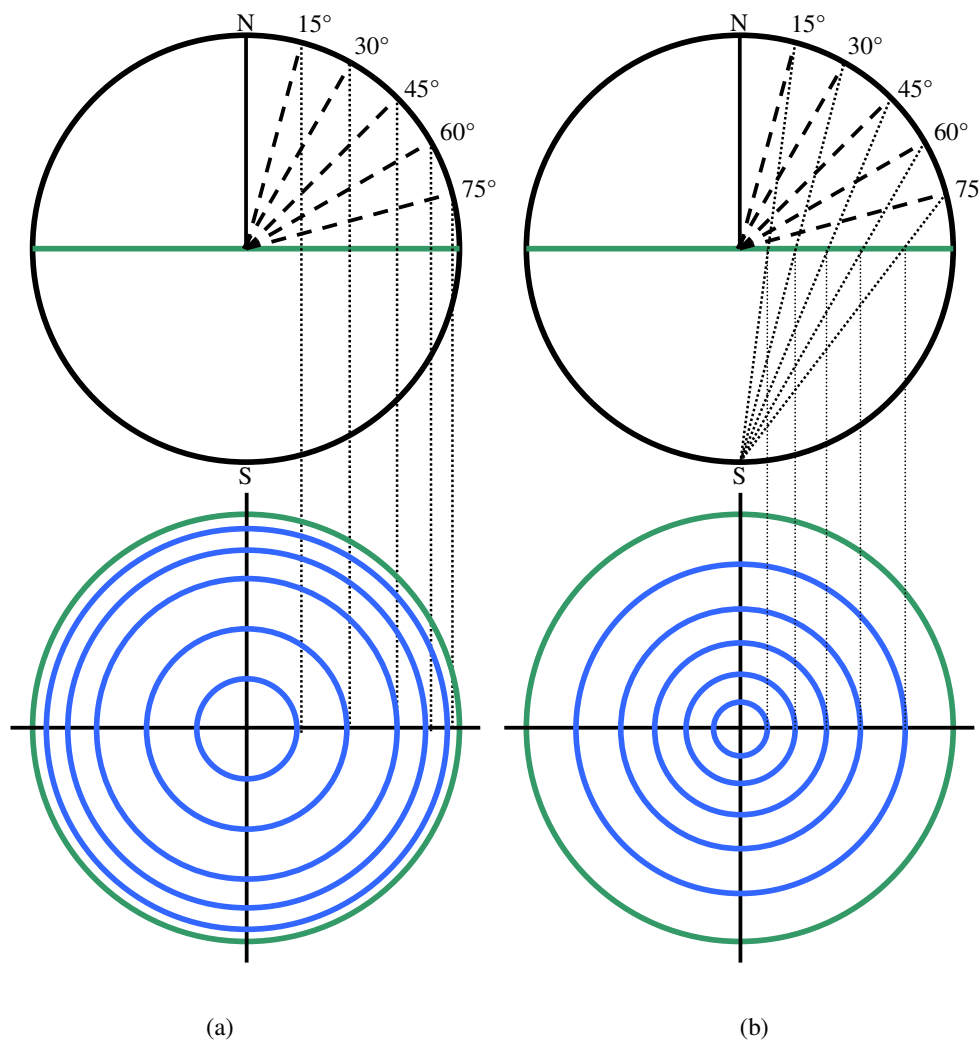


FIGURA 4.3 – Projeções (a) Ortográfica e (b) Estereográfica

A projeção ortográfica faz com que os ângulos próximos ao horizonte fiquem muito próximos, e os ângulos próximos ao zênite fiquem muito distantes. Já a projeção estereográfica dá mais ênfase ao horizonte e menos ao zênite, sendo mais interessante para o uso em projetos urbanos, já que a maior parte dos problemas de excesso de sombras ocorre nos períodos em que o sol está próximo ao horizonte.

A partir do cálculo da Altitude e do Azimute do sol, foi desenvolvida uma interface para visualização da trajetória aparente do sol (Figura 4.4). Foi escolhido o diagrama estereográfico com projeção estereográfica, por ser mais intuitivo e mais apropriado considerando o uso da ferramenta.

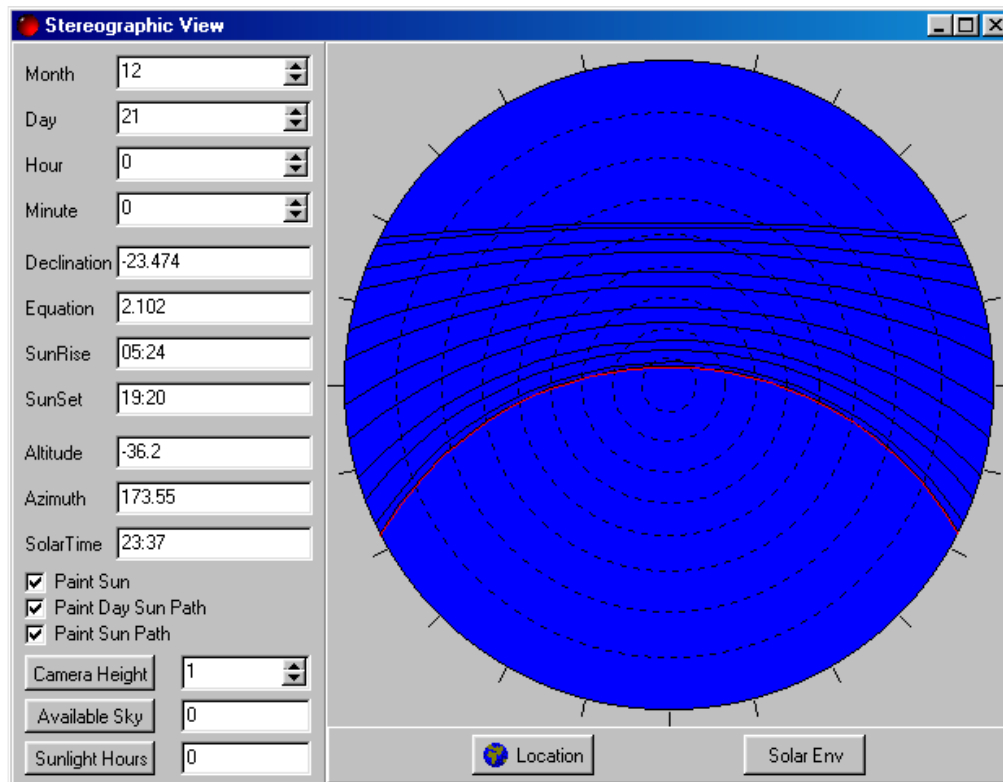


FIGURA 4.4 – Diagrama da Trajetória Aparente do Sol

Além disso, o diagrama estereográfico permite também a plotagem das edificações de modo a obter-se o diagrama da obstrução da abóbada celeste (Figura 4.5), ou seja, a quantidade de céu que é visível de um determinado ponto através de uma lente olho-de-peixe de 180° apontada para cima, em direção ao zênite de céu. Superpondo a projeção da trajetória solar à do ambiente ao redor é possível verificar os períodos do ano em que aquele dado ponto vai estar recebendo sol ou sombra, bastando determinar quando o sol é encoberto pelos objetos do ambiente.

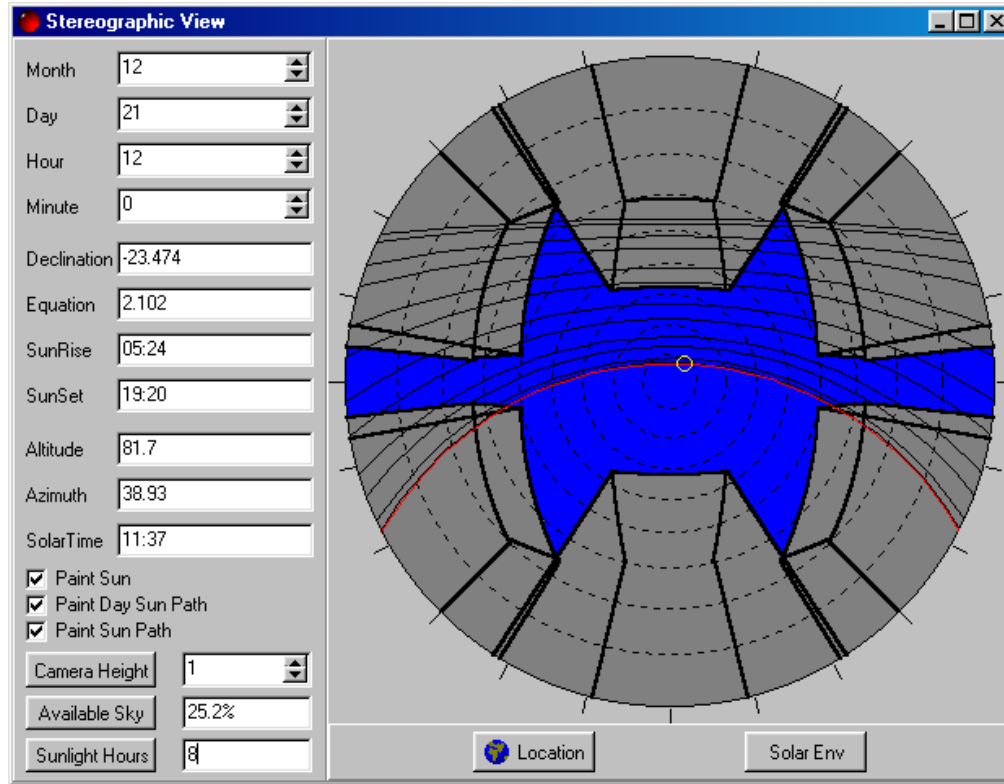


FIGURA 4.5 – Diagrama da Obstrução da Abóbada Celeste

Para construir este diagrama, considera-se um hemisfério imaginário ao redor do ponto de interesse. A seguir projetam-se linhas partindo daquele ponto até os vértices das edificações nas redondezas, determinando os pontos onde elas intersectam o hemisfério imaginário. As formas resultantes nesse hemisfério são, então, transferidas para o diagrama estereográfico.

Como pode ser visto no diagrama da Figura 4.5, as linhas verticais dos edifícios resultam em linhas retas desenhadas radialmente da linha do horizonte até o centro do zênite do céu. Entretanto, as linhas horizontais que formam os topos dos edifícios resultam em linhas curvas. Isso ocorre porque o ângulo de altitude de cada ponto relativo ao ponto de interesse diminui com a distância. Pode-se verificar tal fato traçando uma linha horizontal infinita sobre o dado ponto; para cada ponto da linha mais afastado do ponto de interesse, o ângulo de altitude diminui, até a linha desaparecer no horizonte, quando sua altitude seria zero.

Computacionalmente, a geração do diagrama da obstrução da abóbada celeste é feita convertendo os valores das coordenadas XYZ das edificações existentes em ângulos de altitude e azimute relativos ao local onde o observador está posicionado e utilizando então a projeção estereográfica como descrito. As linhas verticais têm o mesmo azimute na base e no topo, e altitude zero na base, restando calcular o valor da altitude no topo e traçar uma linha reta entre os pontos obtidos. As linhas verticais têm altitude zero se formam a base da edificação, sendo projetadas exatamente sobre a linha do horizonte, ou altitude variável se formam o topo. A curvatura das linhas verticais do

topo das edificações é obtida através da interpolação das projeções resultantes do azimute e altitude dos dois pontos nas extremidades da linha e do ponto central da linha.

Este diagrama facilita o entendimento dos resultados da aplicação do Envelope Solar. Se as edificações estão fora dos limites do Envelope Solar, menores porções do céu estarão visíveis, significando que o sol estará encoberto durante a maior parte do dia.

## 4.2 Cálculo do Envelope Solar

A implementação computacional do cálculo do Envelope Solar foi feita segundo a metodologia proposta por Pereira [PER2001], correspondendo à seqüência de equações 4.8 a 4.11. Foi desenvolvida uma interface para entrada dos dados necessários para o cálculo do Envelope Solar, que pode ser vista na Figura 4.6.

Site Data				
Time Zone	[-3:00] Rio		Longitude	-51.2
Reflectance	0.6		Latitude	-30.05
Monthly Data				
	Jan	Feb	Mar	Apr
Radiation (Wh/m²)	11616	10797	9169	7467
Temperature (°C)	24.6	24.7	23.1	20.1
<input type="button" value="Open"/> <input type="button" value="Save"/> <input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/>				

FIGURA 4.6 – Interface para entrada de dados geográficos e climáticos

O primeiro passo é calcular a temperatura neutra mensal a partir da temperatura média mensal, segundo Humphreys [HUM78], sendo estas temperaturas médias obtidas de dados históricos. A seguir, são calculados os Fatores de Ponderação mensais a partir da temperatura neutra mensal e da temperatura externa do ar mensal, segundo Szokolay [SZO80].

O terceiro passo é calcular a radiação direta e difusa para cada fachada ao longo do ano, baseado na radiação média medida no plano horizontal, segundo Duffie [DUF91]. É, então, calculada a Radiação Ponderada para cada mês, produto dos Fatores de Ponderação pela radiação solar. Finalmente, é realizado o somatório das *radiações ponderadas* para cada orientação de modo a estimar o grau de obstrução produzido pelas vizinhanças que fornecerá o melhor equilíbrio, isto é, o máximo de radiação desejada e o mínimo de radiação indesejada, segundo os critérios propostos por [PER2001].



$$T_n = 11,9 + 0,543 \times T_m \quad (\text{Eq. 4.8 [HUM78]})$$

com  $T_n$  = Temperatura Neutra do mês [°C],  
 $T_m$  = Temperatura Média do mês [°C].

$$FP = \left| \frac{(T_{ar} - T_n)}{2} \right|^\alpha \quad (\text{Eq. 4.9 [SZO80]})$$

com  $FP$  = Fator de Ponderação para o mês,  
 $T_{ar}$  = Temperatura Externa do Ar do mês [°C],  
 $T_n$  = Temperatura Neutra do mês [°C],  
 $\alpha$  = Exponte, 1,6 para calor ( $T_{ar} > T_n$ ), 1,0 para frio ( $T_{ar} < T_n$ ).

$$I_t = I_b R_b + I_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (\text{Eq. 4.10 [DUF91]})$$

com  $I$  = Radiação horária total,  
 $I_t$  = Radiação horária na superfície inclinada,  
 $I_b$  = Componente direto (*beam*) da radiação horária,  
 $I_d$  = Componente difuso da radiação horária,  
 $\beta$  = Inclinação da superfície com relação ao plano horizontal,  
 $R_b$  = Taxa de radiação direta na superfície orientada com relação à radiação direta no plano horizontal,  
 $\rho_g$  = Fator de refletância difusa do solo nas redondezas.

$$RP = I_t \times FP \quad (\text{Eq. 4.11 [PER2001]})$$

com  $RP$  = Radiação ponderada recebida na fachada orientada.

O resultado é uma tabela de ângulos (Tabela 4.2), que, se aplicados a um terreno, irão delimitar o volume máximo que uma edificação pode ocupar sem projetar sombras indesejadas sobre a sua vizinhança.

TABELA 4.2 – Ângulos de obstrução para cada orientação de fachada

Ângulo de Obstrução	Orientação							
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
	40	45	50	55	55	55	60	55

Adicionalmente, foi implementada uma interface para permitir a visualização tridimensional destes ângulos, bem como sua edição manual (Figura 4.7).

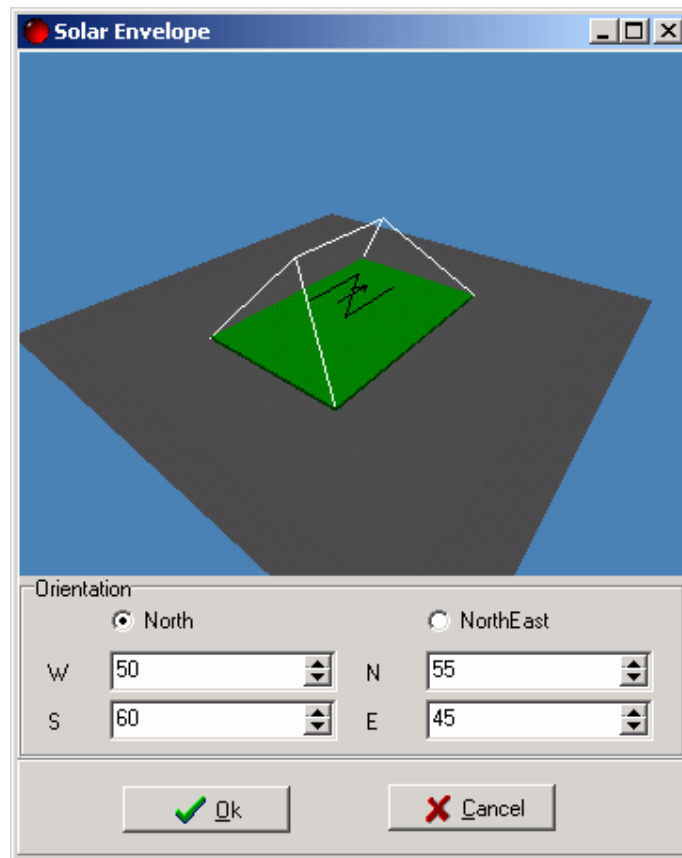


FIGURA 4.7 – Interface de Visualização e Edição do Envelope Solar

### 4.3 Integração do Envelope Solar à Simulação

Como já mencionado, a ferramenta BlockMagic do CityZoom (seção 2) utiliza as Normativas Urbanísticas contidas no Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano (PDDU) de uma cidade como parâmetros para simulação do potencial construtivo dos lotes daquela cidade. Tendo em vista que estas Normativas falham em considerar de maneira apropriada o acesso ao sol, o Envelope Solar é usado para aperfeiçoar as simulações.

Cada lote é simulado individualmente, definindo-se o número de andares desejado para a edificação, ou variando-se o número de andares de 1 até o máximo permitido pela Normativa Urbanística. Neste caso é realizada uma simulação para cada número possível de andares, ou seja, são feitas várias simulações para 1, 2, 3, etc. andares, armazenando os resultados ou parâmetros de comparação desejados. Se já foram feitas simulações para todos os números de andares possíveis, busca-se a melhor edificação que foi armazenada e esta é retornada como resultado final da simulação.

Diversos parâmetros podem ser simulados ou maximizados, tais como: área construída (índice de aproveitamento), área da laje (taxa de ocupação), número de andares, dimensão da fachada ou lado. Independente das características desejadas para a

edificação, o volume gerado sempre estará contido dentro do Envelope Solar, garantindo a não existência de sombras indesejáveis sobre a vizinhança.

As edificações simuladas são sempre retangulares, tendo suas dimensões iniciais definidas pelas dimensões e forma do lote. Se o lote é retangular, basta utilizar suas dimensões para a edificação e indicar como possíveis fachadas os lados que são coincidentes com as linhas que formam a quadra. Caso contrário, é necessário encontrar o maior retângulo dentro do lote e verificar quais lados podem ser usados como fachadas (Figura 4.8).

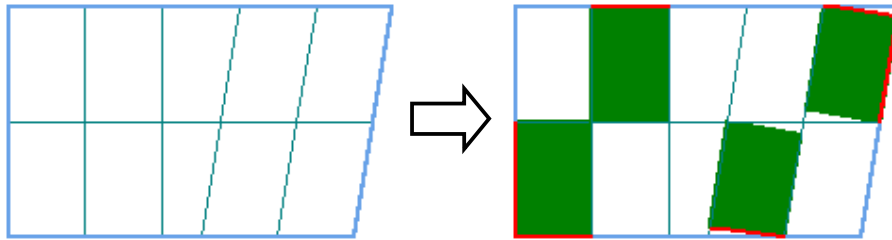


FIGURA 4.8 – Definição da largura e profundidade iniciais e possíveis fachadas da edificação simulada

A partir da tabela de ângulos de obstrução do Envelope Solar, da orientação das fachadas e da altura da edificação, um recuo mínimo é calculado para cada fachada do lote. Estes recuos são comparados aos recuos frontais, laterais e de fundos existentes na regra de Recuos Mínimos por andar da Normativa Urbanística. Para cada lado da edificação é aplicado o maior recuo entre os dois mencionados. Na Figura 4.9, as edificações têm o número de andares indicado, sendo que na Figura 4.9(a) foram aplicados somente os recuos obrigatórios da Normativa Urbanística, enquanto que na Figura 4.9(b) foram aplicados também os recuos gerados pelo envelope solar.

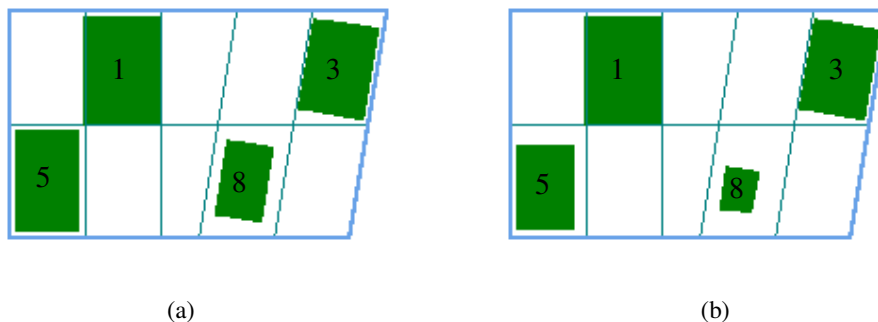


FIGURA 4.9 – Aplicações dos recuos às edificações iniciais

Tento em vista a aplicação dos recuos, devem ser verificadas a largura e a profundidade da base da edificação em relação ao valor mínimo definido pelo usuário, de forma a evitar edificações estreitas demais, o que não teria uso na prática. Caso a edificação não esteja dentro dos limites especificados, ela não é válida e a simulação é reiniciada incrementando-se o número de andares da edificação a ser simulada.

Caso a edificação seja válida, a regra de Taxa de Ocupação Máxima (área da laje por área do lote) da Normativa Urbanística é aplicada. Isso é feito recursivamente, reduzindo a largura e a profundidade do retângulo que representa a base da edificação

até que a taxa de ocupação daquela edificação seja igual ou menor que a Taxa de Ocupação Mínima da Normativa Urbanística. O valor de cada decremento a ser aplicado pode ser definido pelo usuário, permitindo maior precisão, caso sejam usados valores pequenos, ou simulações mais rápidas, utilizando valores maiores. A Figura 4.10 mostra as edificações obtidas a partir da aplicação da regra de ocupação às edificações da Figura 4.9(b), os números representam o número de andares de cada uma. A mesma verificação realizada anteriormente, relativa aos valores mínimos de largura e profundidade da base da edificação, é, então, efetuada.

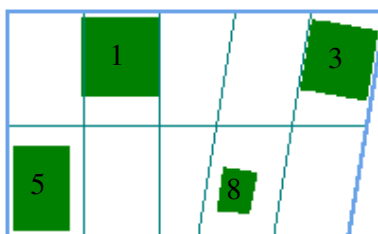


FIGURA 4.10 – Ocupação obtida para as edificações da figura 4.9(b)

A regra de Índice de Aproveitamento Máximo (área construída por área do lote, ou área da laje vezes número de andares por área do lote) da Normativa Urbanística é aplicada à edificação. Similarmente à aplicação da regra da Taxa de Ocupação Máxima, a largura e a profundidade da base da edificação são reduzidas recursivamente até que o índice de aproveitamento daquela edificação seja igual ou menor que o Índice de Aproveitamento Máximo da Normativa Urbanística. O valor de cada decremento é o mesmo usado no passo anterior, resultando nas configurações mostradas na Figura 4.11 para os números de andares indicados. Da mesma forma anterior, é verificada a validade da edificação quanto à largura e profundidade da base, em relação aos valores fixados pelo usuário.

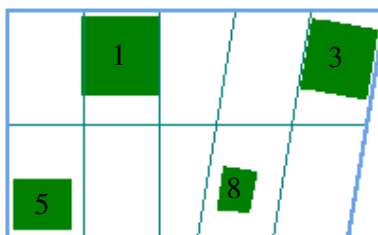


FIGURA 4.11 – Aproveitamento obtido para as edificações da figura 4.10

Obtida uma edificação válida, compara-se esta edificação à melhor edificação obtida para o lote até o momento, sendo o índice de aproveitamento o parâmetro mais comumente usado. Se esta foi a primeira edificação gerada, ou se ela é melhor do que a que estava armazenada, então se armazena esta como a nova melhor edificação.

#### 4.4 Interface de Visualização 3D

As edificações obtidas com a simulação são visualizadas através da interface de navegação tridimensional do BlockMagic, aprimorada com a geração de sombras realísticas e em tempo real.

A utilização de sombras é importante para dar realismo a uma cena. Existem diversas técnicas para criação de sombras [WAT90], cada uma com seus prós e contras. Similarmente ao uso de iluminação, é possível obter níveis progressivos de realismo, às custas da redução de performance no *rendering* da cena.

A técnica escolhida para ser implementada no presente trabalho foi a de Volumes de Sombra, que trata as sombras projetadas pelos objetos como volumes poligonais. O *stencil buffer* da biblioteca gráfica OpenGL é utilizado para encontrar a interseção entre os polígonos na cena e os volumes de sombra [HEI91, POR9000].

O algoritmo consiste de duas etapas, uma de pré-geração, feita conforme a estrutura da cidade é gerada ou alterada, e uma de visualização, feita em tempo real quando o usuário navega na cena. A etapa de pré-geração consiste dos seguintes passos:

- Inicialmente, são gerados os polígonos que representam a estrutura da cidade: quadras, calçadas, lotes, edifícios e andares, conforme desejado. Este passo é realizado sempre que ocorre uma alteração na cidade.
- É, então, calculada a conectividade entre as faces existentes na cena, armazenando-se as relações de vizinhança entre elas. Similarmente, este passo só é realizado quando é alterada a estrutura da cidade.
- Dada a posição da fonte de luz, são gerados os polígonos de sombra. Para cada face que está voltada para a fonte de luz, verificam-se suas arestas; se não há face vizinha naquela aresta, ou se a face vizinha não está voltada para a fonte de luz, então aquela aresta projeta uma sombra (Figura 4.12). O polígono de sombra é, então, definido por aquela aresta projetando uma sombra no infinito, isto é, ele contém quatro vértices:  $v_1$  e  $v_2$  são os vértices que formam a aresta,  $v_3$  e  $v_4$  são calculados como projeções no infinito da fonte de luz passando por  $v_1$  e  $v_2$  (Figura 4.13). O infinito é definido como um número muito grande, de forma que o polígono de sombra será recortado contra todos os polígonos que ele interseccionar. Para o caso específico da fonte de luz ser o sol, as sombras são geradas por raios projetados paralelamente. Isso é feito utilizando o mesmo vetor para a fonte de luz em todos os pontos, ao invés de utilizar a sua real posição e o vetor entre a fonte e aquele ponto (Figura 4.14). Este passo é realizado sempre que é alterada a estrutura da cidade ou a posição da fonte de luz.

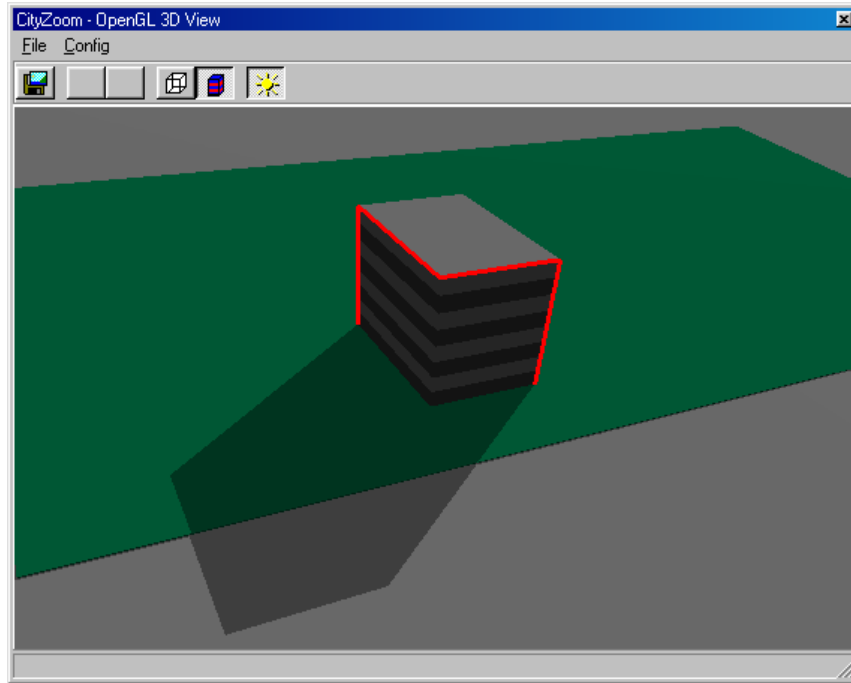


FIGURA 4.12 – Arestas (marcadas em vermelho) projetando sombras.

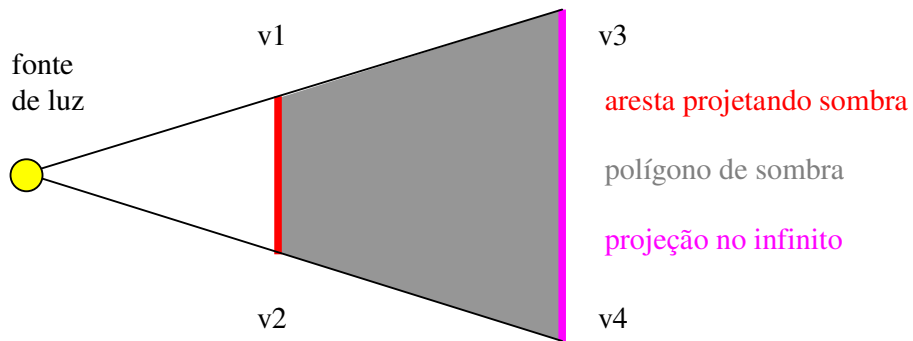


FIGURA 4.13 – Definição de um polígono de sombra em função da fonte de luz

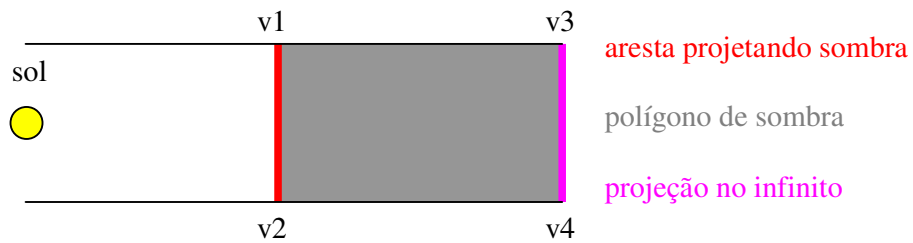


FIGURA 4.14 – Definição de um polígono de sombra quando a fonte de luz é o sol

Durante a etapa de visualização, a cena é desenhada da seguinte forma:

- Inicialmente, desenham-se todas as faces visíveis na cena.
- Desenham-se os polígonos de sombra, incrementando o *stencil buffer* com as faces frontais, projetando as sombras.
- Desenham-se novamente os polígonos de sombra, decrementando o *stencil buffer* com as faces traseiras, removendo as sombras entre o objeto e demais superfícies.

O resultado pode ser visto na Figura 4.15. É também possível sobrepor o Envelope Solar à vista tridimensional das edificações simuladas ou pré-existentes, como apresentado na Figura 4.16. Isto permite verificar a situação de uma edificação em relação ao envelope.

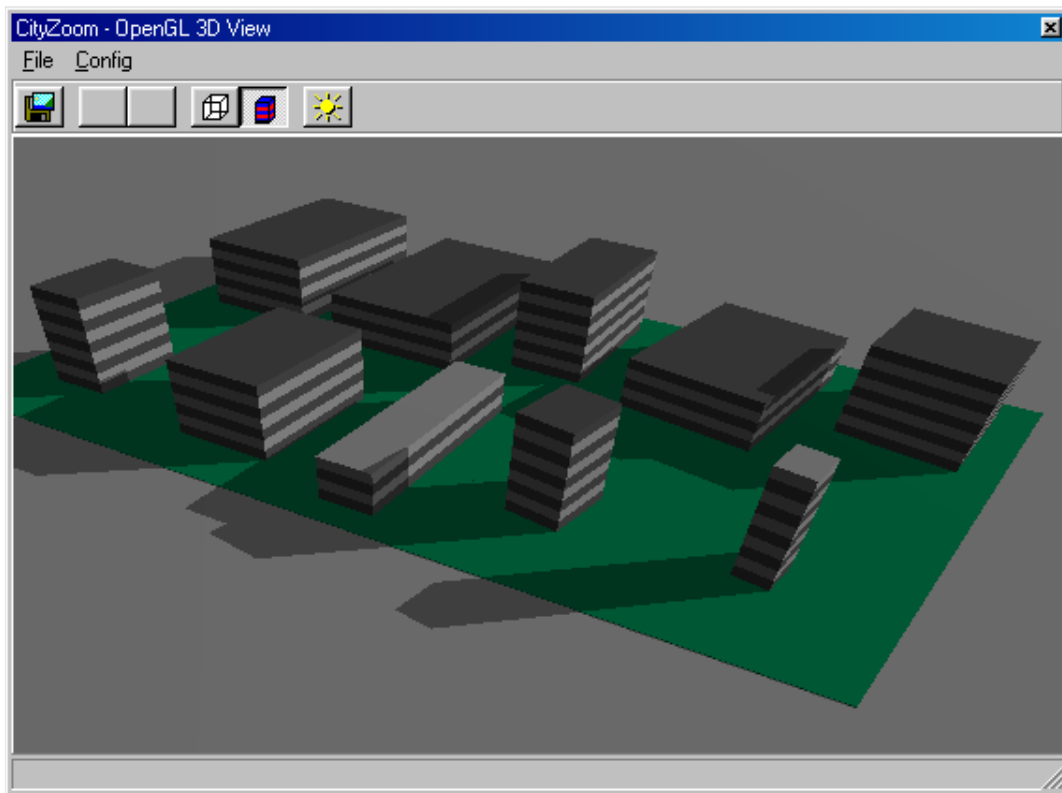


FIGURA 4.15 – Visualização das edificações com sombras geradas considerando o sol às 8 horas

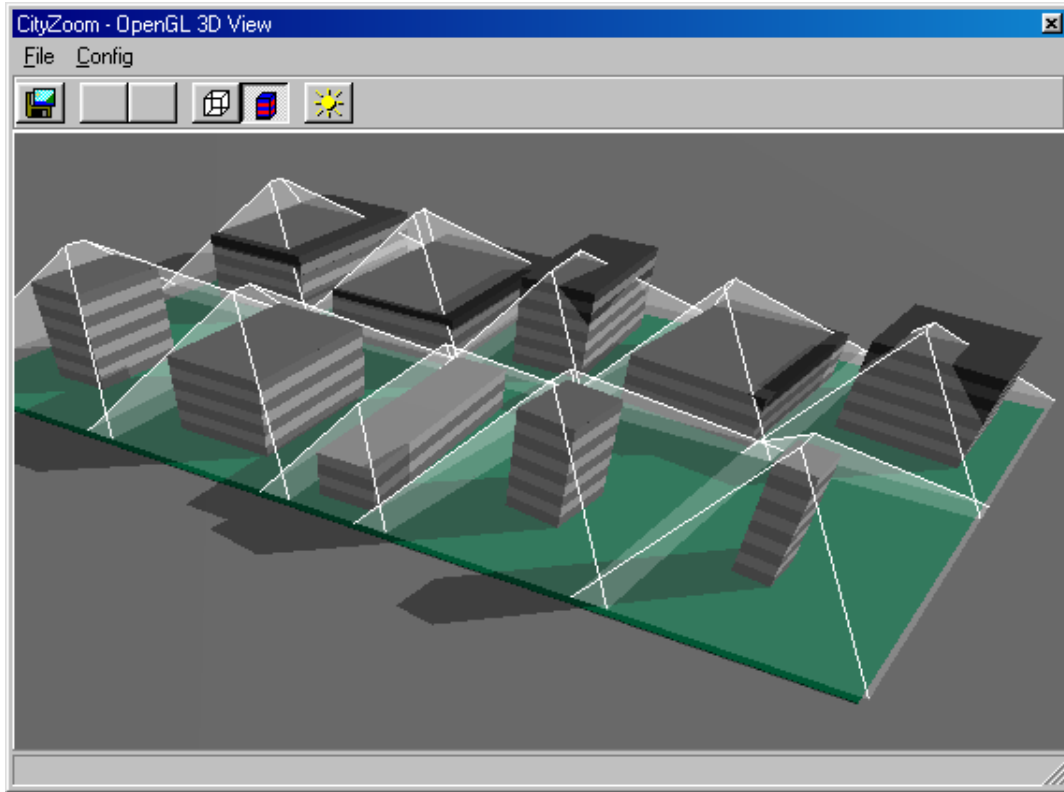


FIGURA 4.16 – Superposição do Envelope Solar às edificações no cenário 3D



## 5 Resultados

A integração de parâmetros de conforto ambiental a um simulador de potencial construtivo de lotes baseado em regras Normativas Urbanísticas resultou em uma ferramenta computacional capaz de simular alternativas de crescimento urbano e verificar o impacto destas sobre a qualidade de vida dentro e fora das edificações no que diz respeito à insolação e iluminação natural. Esta ferramenta, sendo extensão do CityZoom original, foi denominada CityZoom SE (CityZoom – Solar Envelope).

O CityZoom SE oferece recursos para diferentes classes de usuários, tais como planejadores urbanos, arquitetos, empreendedores, ou mesmo leigos. É possível realizar simulações do desempenho ambiental e do potencial construtivo de edificações inseridas no tecido urbano de maneira rápida e transparente. Este capítulo mostra diferentes aplicações da ferramenta.

### 5.1 Simulação de Normativas urbanísticas

Um dos principais benefícios da ferramenta, para planejadores urbanos, é a facilidade para alterar as Normativas Urbanísticas, gerar simulações para as novas regras e observar os resultados, tanto em forma de números como do impacto visual no cenário. A rapidez das simulações permite gerar diversas possibilidades a serem avaliadas, e as interfaces de visualização de resultados fornecem aos técnicos uma maneira de expor os dados de forma transparente (Figuras 5.1 e 5.2) para as demais partes interessadas, aumentando seu nível de participação em decisões estratégicas, tais como a formulação de um novo Plano Diretor, ou alteração de parte de um existente.

O método usual durante a proposição de um novo Plano Diretor é selecionar um conjunto de quadras da cidade e calcular, manualmente, as dimensões das edificações permitidas por aquele Plano. Este cálculo é realizado para cada lote do conjunto de quadras selecionado. A seguir, é feito um desenho ou maquete dos edifícios calculados, a fim de mostrar, de forma visual, as edificações que resultariam daquela proposta de Plano. Este processo pode levar até duas semanas para um conjunto não muito grande de quadras (aproximadamente dez). Alternativamente, pode-se utilizar o CityZoom e realizar a simulação de um número semelhante, ou mesmo maior, de quadras em questão de segundos (9 segundos para simular 906 lotes em 80 quadras de Porto Alegre, utilizando um computador Athlon 900MHz com 768MB RAM).

Para empreendedores urbanos, a simulação do potencial construtivo de um lote é uma maneira rápida e fácil de avaliar, financeiramente, aquele lote. Dado o lote em questão e as regras de construção da cidade (Normativa Urbanística), é possível determinar, em segundos, qual a sua área construída máxima. Aplicando o procedimento para um conjunto de lotes, o empreendedor pode classificá-los e escolher o lote ideal para seu projeto.

Arquitetos podem usar esta ferramenta para obter o volume básico (máximo) inicial para um projeto, evitando calcular manualmente se sua edificação está respeitando as Normativas Urbanísticas. A ferramenta pode também validar volumes

criados ou alterados pelo projetista, verificando se eles estão em conformidade com a Normativa, ou indicando quaisquer violações.

## **5.2 Cálculo e Aplicação do Envelope Solar**

Como já foi mencionado, os Normativas Urbanísticas contidas nos Planos Diretores não consideram de forma adequada o acesso ao sol. Foi também mostrado como o Envelope Solar pode ser aplicado em conjunção com as Normativas Urbanísticas, auxiliando na garantia de acesso ao sol. Dadas a latitude, longitude, temperatura mensal média, radiação mensal média no plano horizontal e refletância das redondezas (Figura 4.6), o CityZoom SE pode calcular o Envelope Solar ideal para as edificações de uma cidade.

O Envelope Solar pode ser utilizado juntamente com as Normativas Urbanísticas em simulações urbanas, tanto na concepção de novas regras por planejadores, como no projeto de edificações por arquitetos.

O impacto do uso do Envelope Solar pode ser visualizado na Figura 5.3. É também possível superpor o Envelope Solar às edificações simuladas ou reais (Figura 5.4).

## **5.3 Informações sobre Luz Solar Direta Recebida**

O CityZoom permite verificar o nível de obstrução da abóbada celeste, ou seja, porcentagem do céu que está ou não obstruída, e quantidade de horas de luz solar direta em um dado ponto (Figuras 5.5 e 5.6). Este recurso pode ser usado para verificar o impacto que uma alteração nas Normativas Urbanísticas ou a construção de um (ou vários) novo edifício teria sobre o passeio público ou parques e praças.

Definindo o ponto de interesse na fachada de uma edificação (Figura 5.7), é possível, mesmo para usuários leigos, verificar quantas horas de sol aquela fachada recebe (Figura 5.8), ou se a fachada recebe sol durante a manhã ou à tarde. Esta verificação pode ser feita para diferentes épocas do ano, ou para diferentes alturas (andares) naquela fachada (Figura 5.9 e 5.10).

## **5.4 Visualização de Sombras**

Para uma dada latitude, data e hora é possível verificar a posição do sol e visualizar a projeção de sombras equivalente no cenário tridimensional. Variando a hora, temos o conjunto de imagens 5.11 a 5.16, para as 09, 17 e 12 horas do dia 21 de dezembro. Variando o mês (e, conseqüentemente, a estação), temos as imagens 5.15 a 5.20, para as 12 horas dos dias 21 de dezembro (solstício de verão), 21 de março (equinócio) e 21 de junho (solstício de inverno).

Também é possível comparar as sombras para edificações simuladas utilizando ou não o Envelope Solar, como pode ser visto nas figuras 5.21 a 5.26, para as 09, 12, e 17 horas do dia 21 de março.

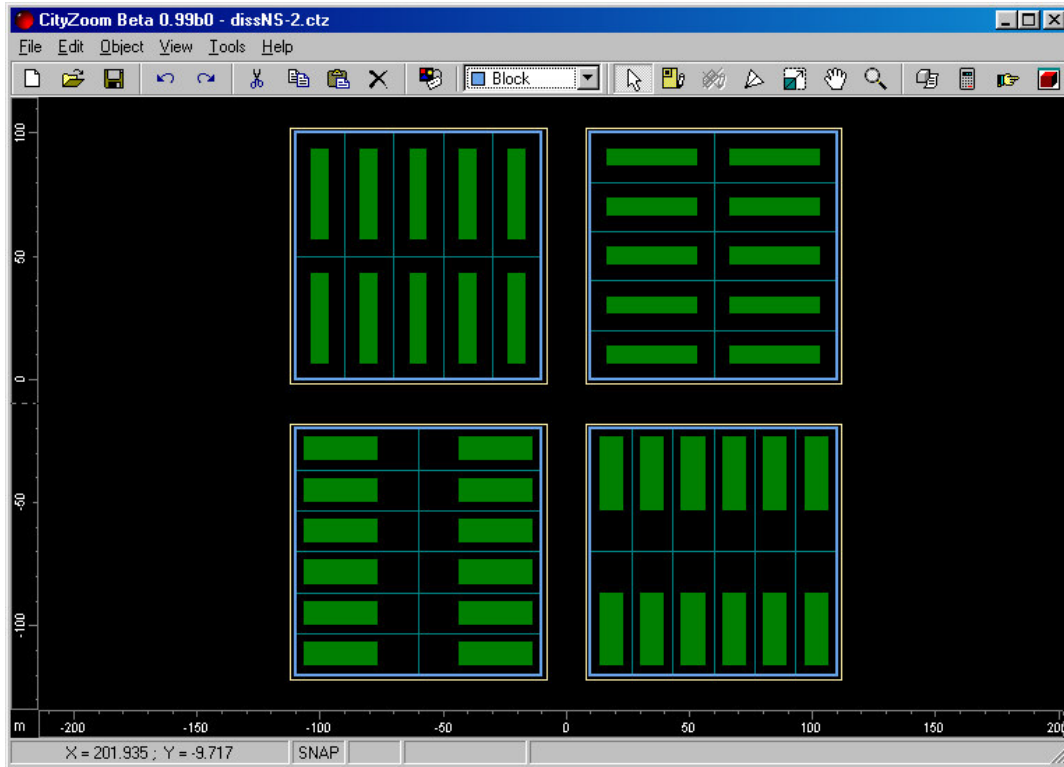


FIGURA 5.1 – Simulação de edificações sem uso do envelope solar

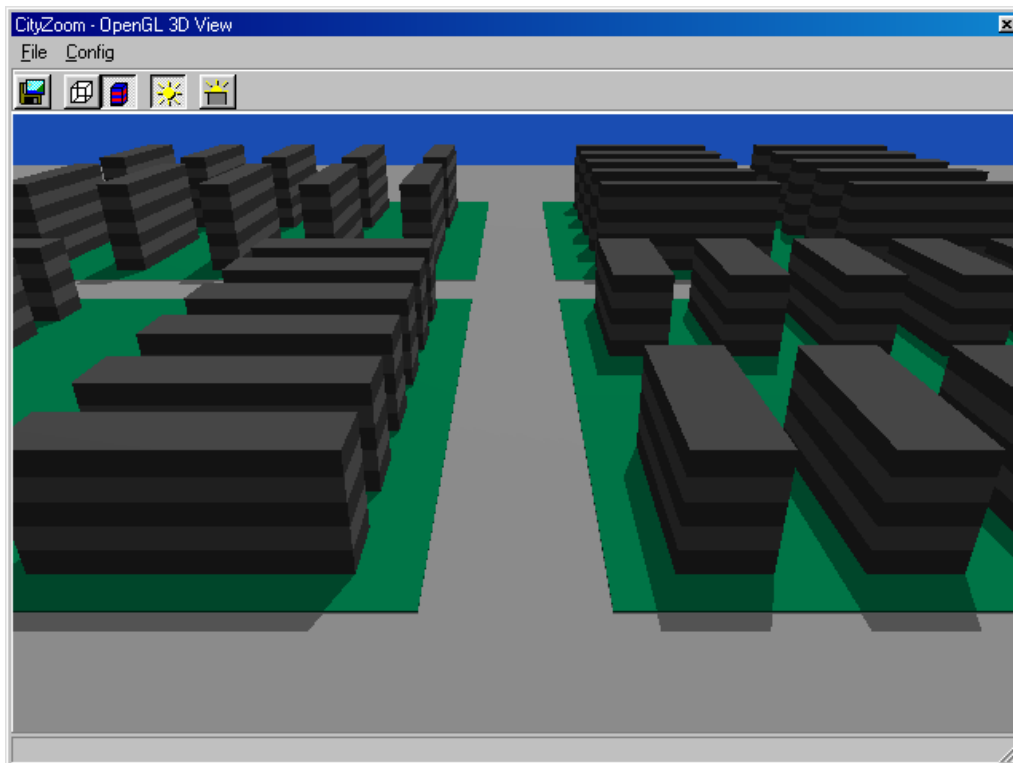


FIGURA 5.2 – Simulação de edificações sem uso do envelope solar, vista 3D – 21/3, 12:00

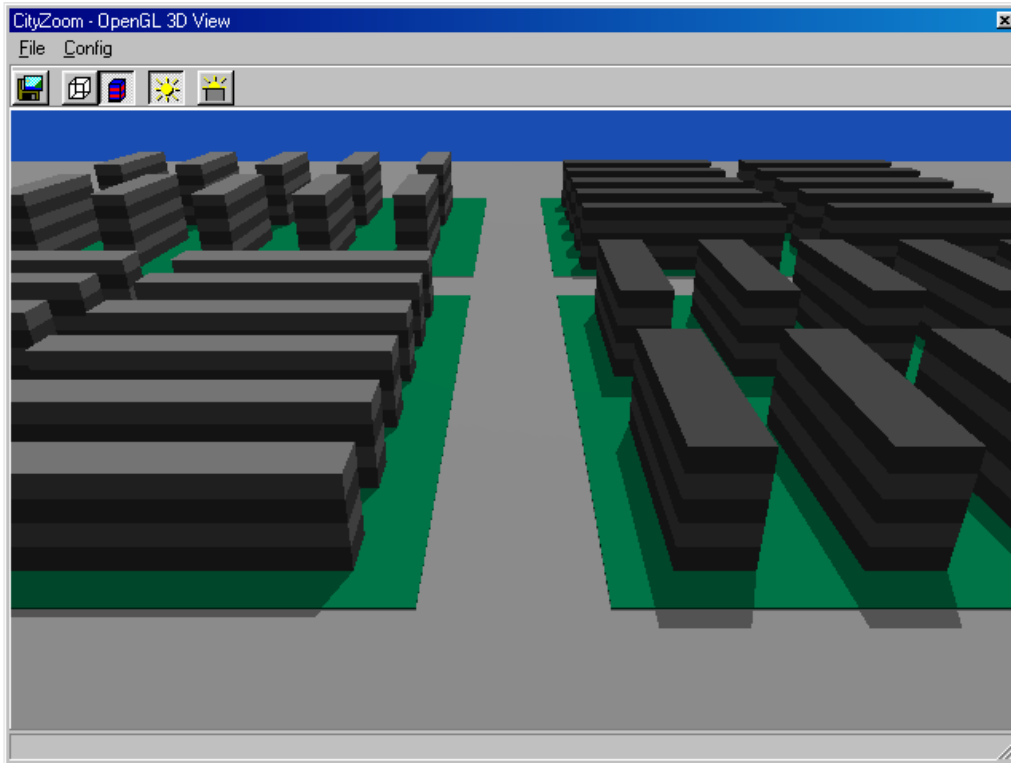


FIGURA 5.3 – Simulação de edificações com uso do envelope solar, vista 3D – 21/3, 12:00

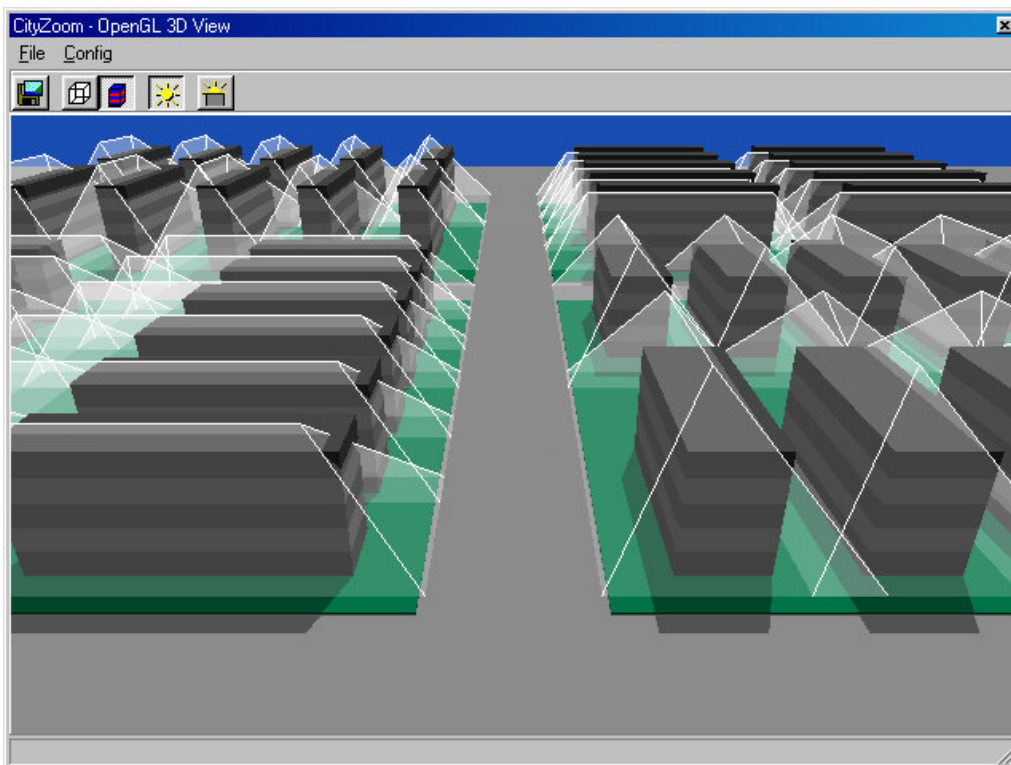


FIGURA 5.4 – Superposição do Envelope Solar às edificações da figura 5.2

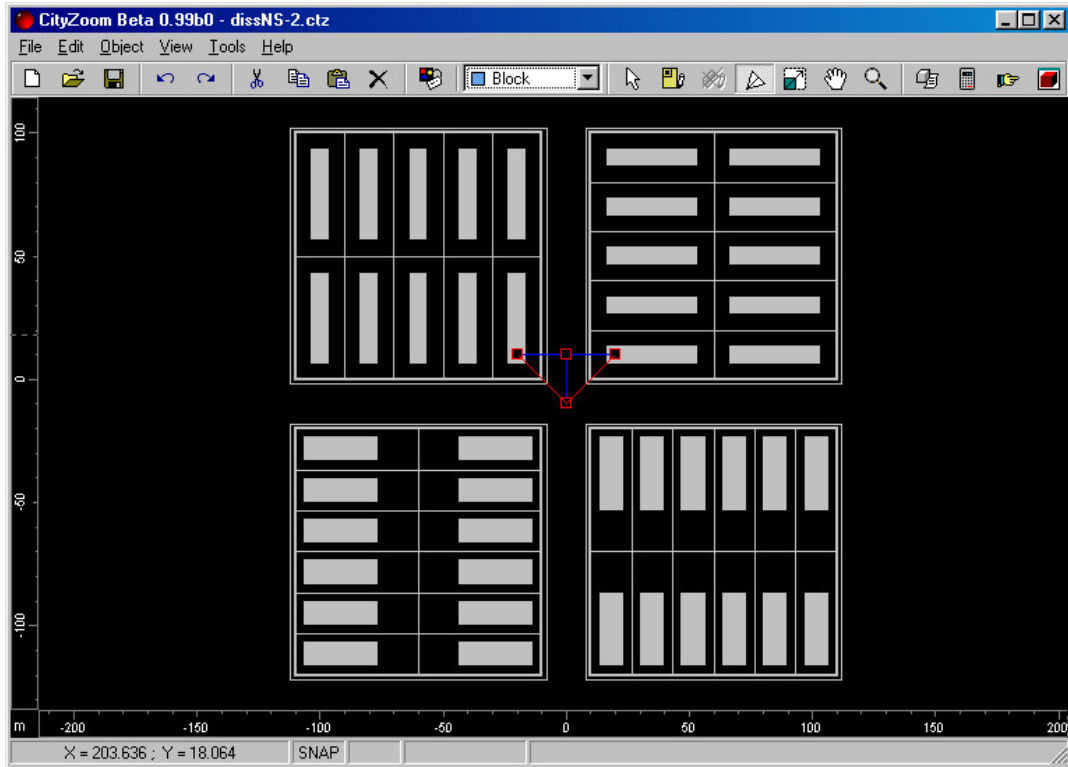


FIGURA 5.5 – Posicionamento do observador

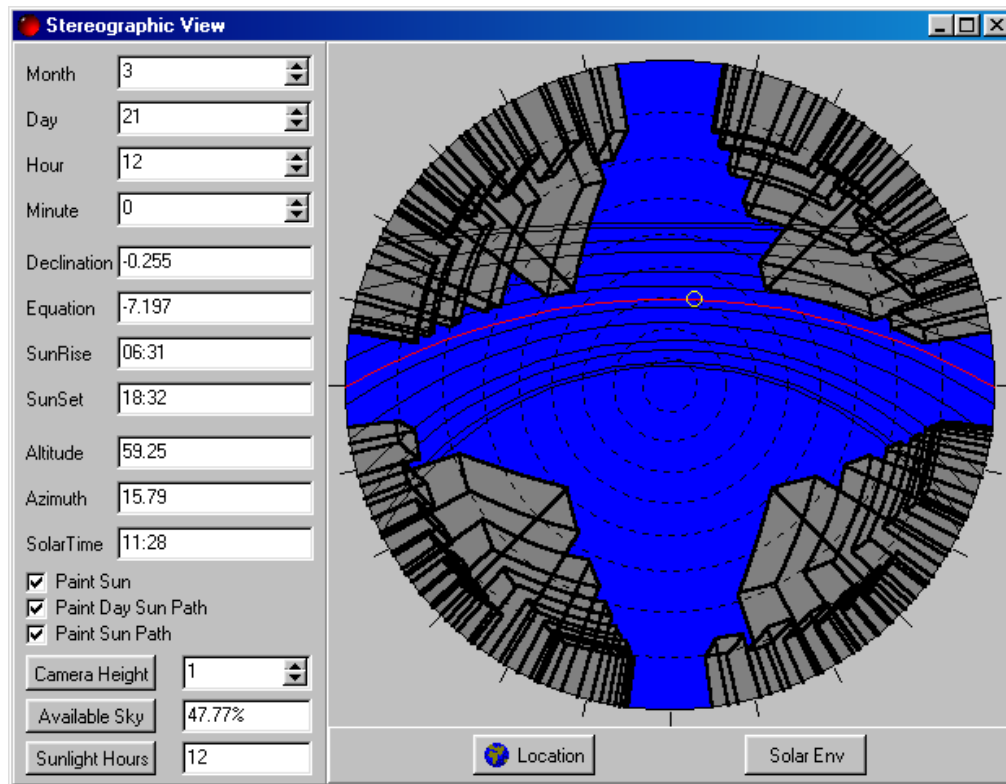


FIGURA 5.6 – Visualização da obstrução da abóbada celeste, observador na posição da Figura 5.5

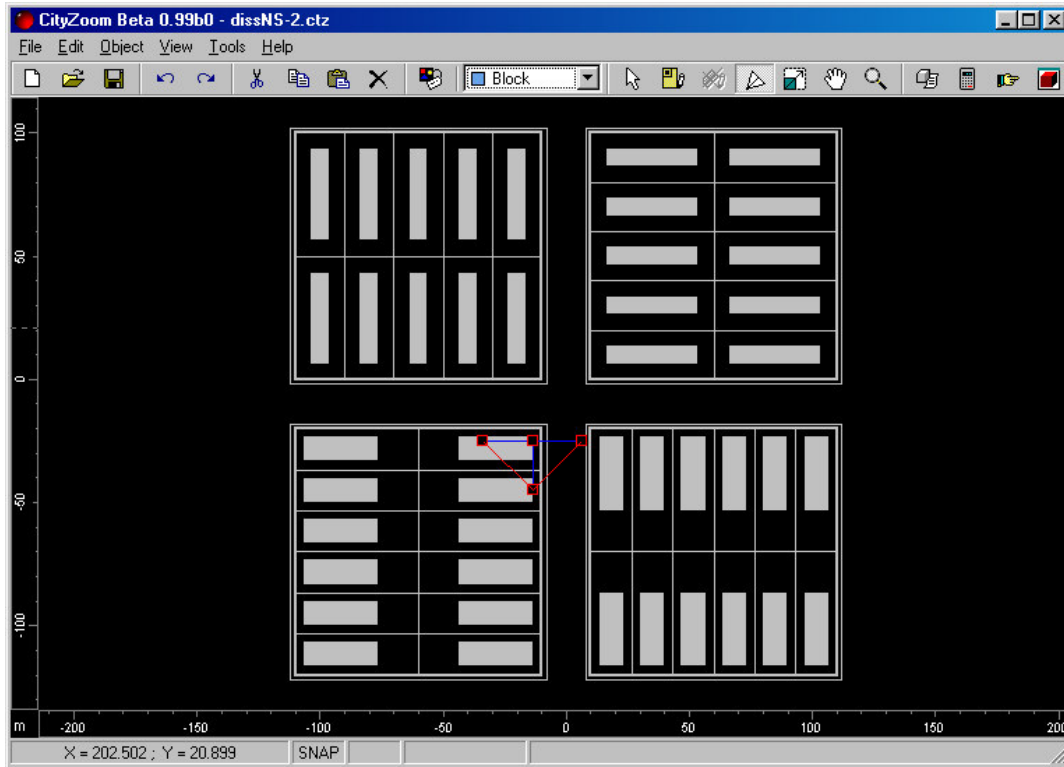


FIGURA 5.7 – Posicionamento do observador próximo à fachada de interesse

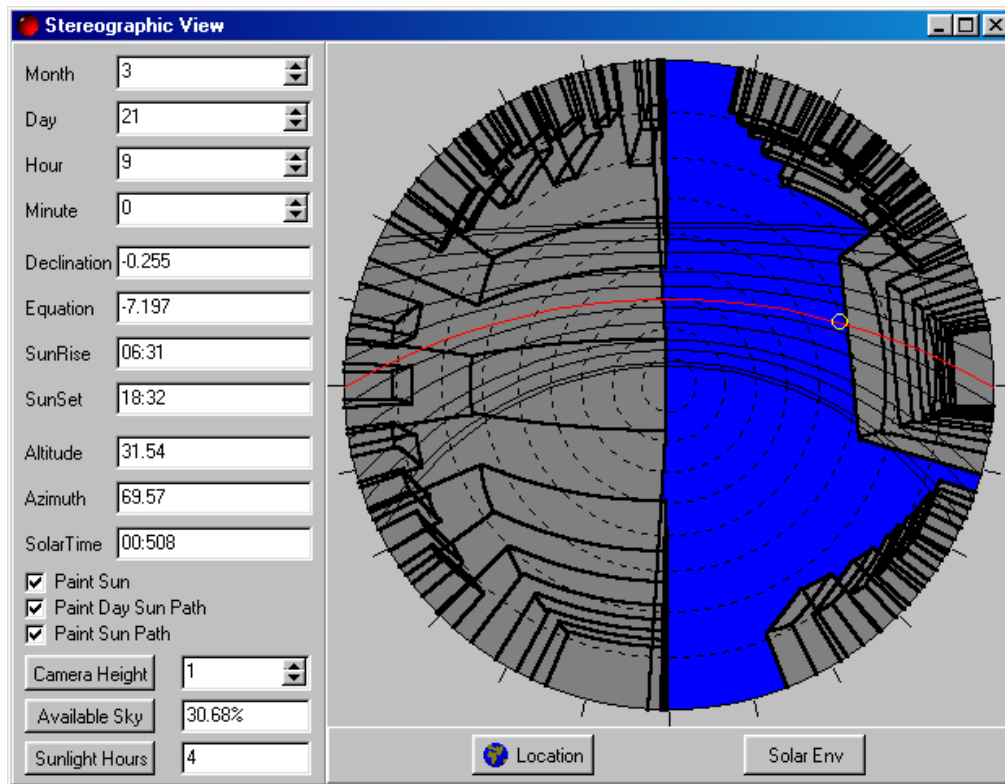


FIGURA 5.8 – Obstrução da abóbada celeste e horas de sol direto na fachada indicada na Figura 5.7

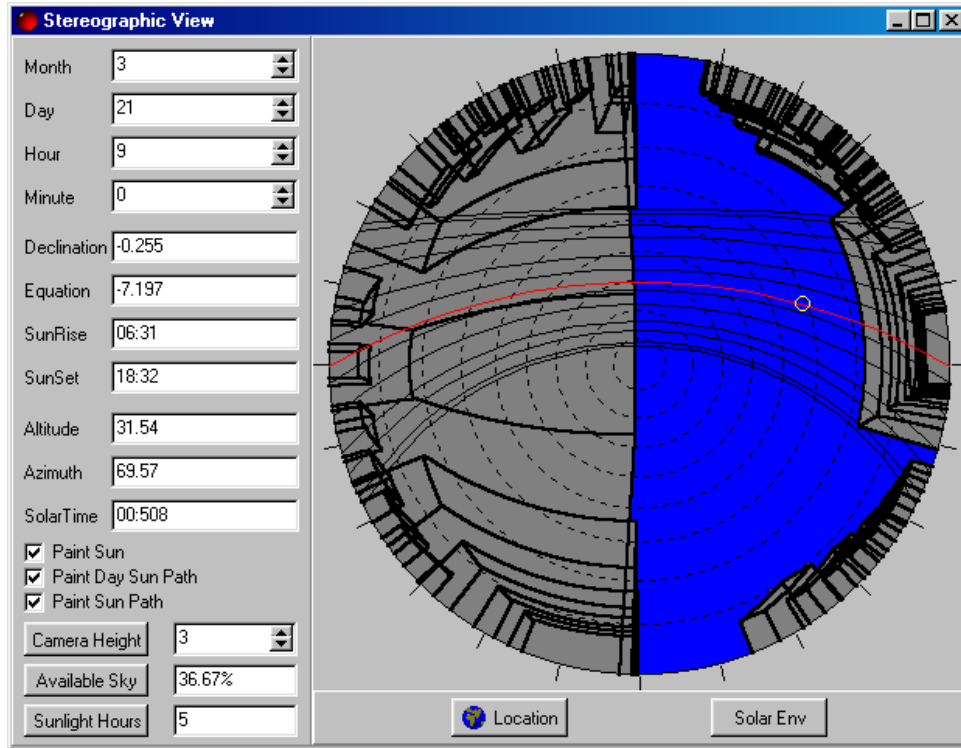


FIGURA 5.9 – Obstrução da abóbada celeste e horas de sol direto na fachada indicada na Figura 5.7, ponto de interesse deslocado para o 3º andar

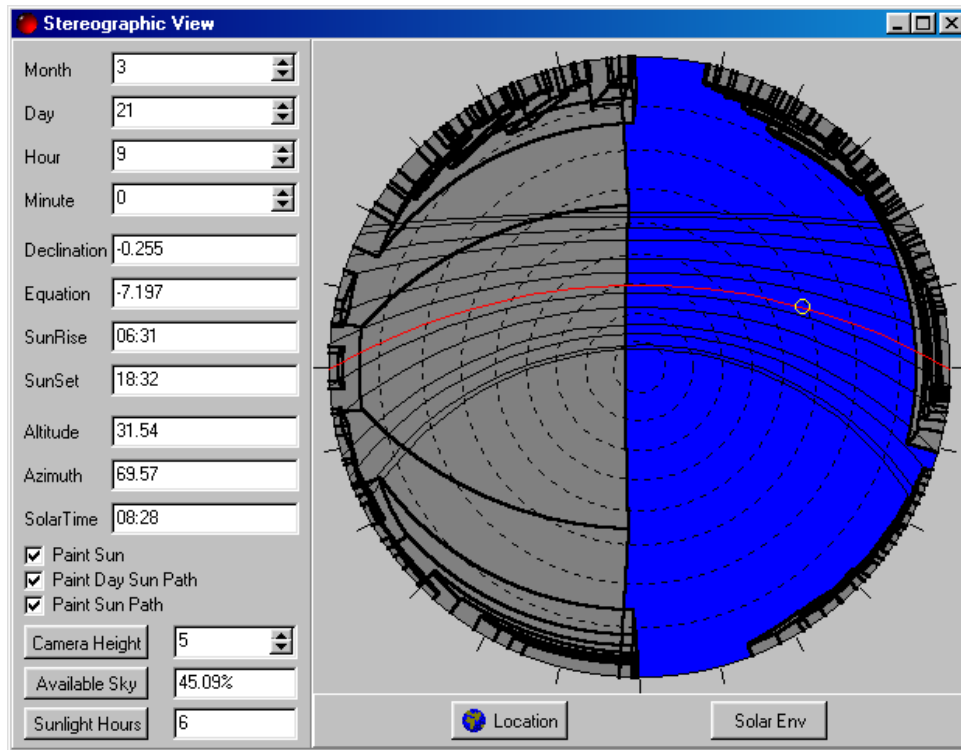


FIGURA 5.10 – Obstrução da abóbada celeste e horas de sol direto na fachada indicada na Figura 5.7, ponto de interesse deslocado para o 5º andar

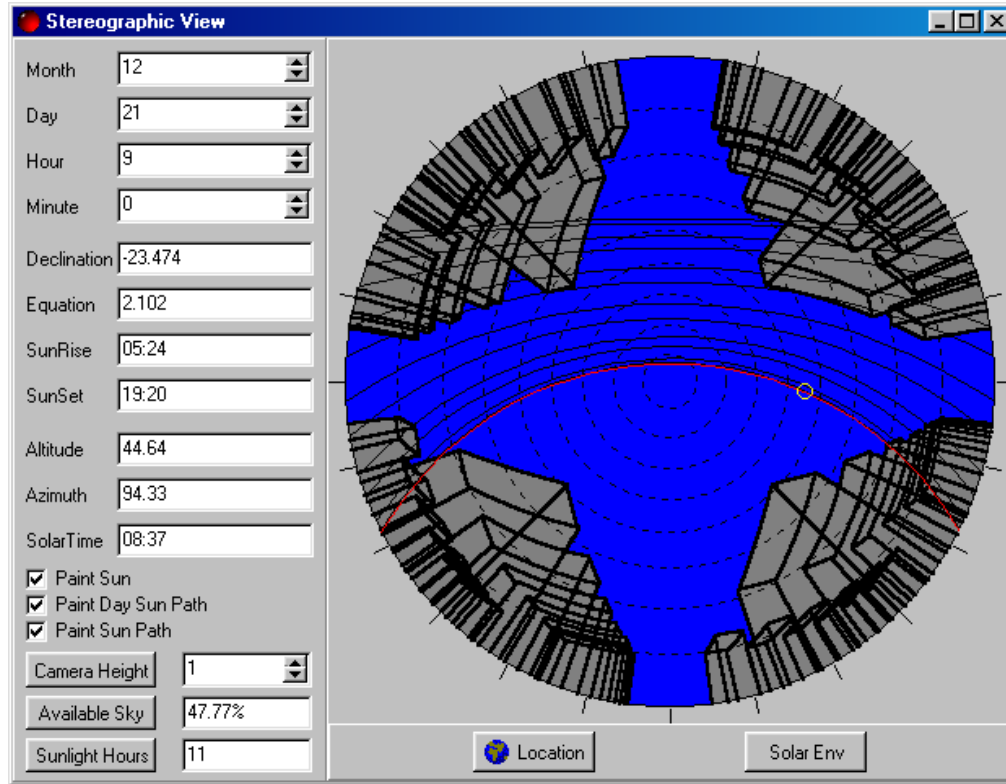


FIGURA 5.11 – Posição do sol e obstrução da abóbada celeste – 21/12, 9:00

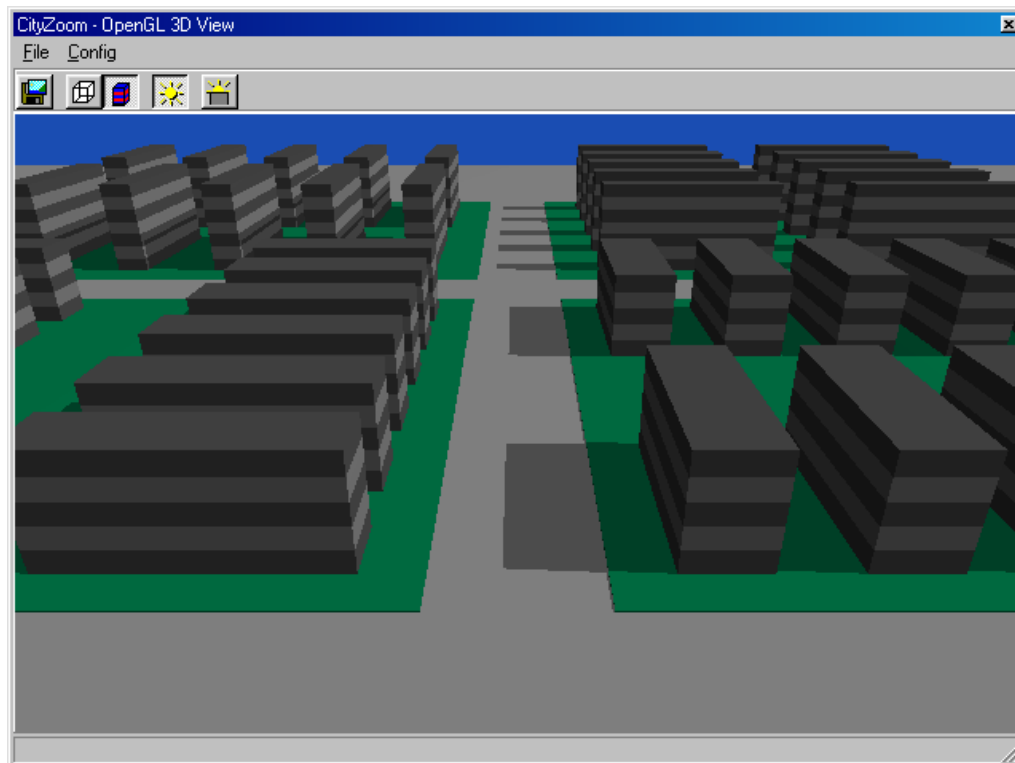


FIGURA 5.12 – Sombras projetadas – 21/12, 9:00



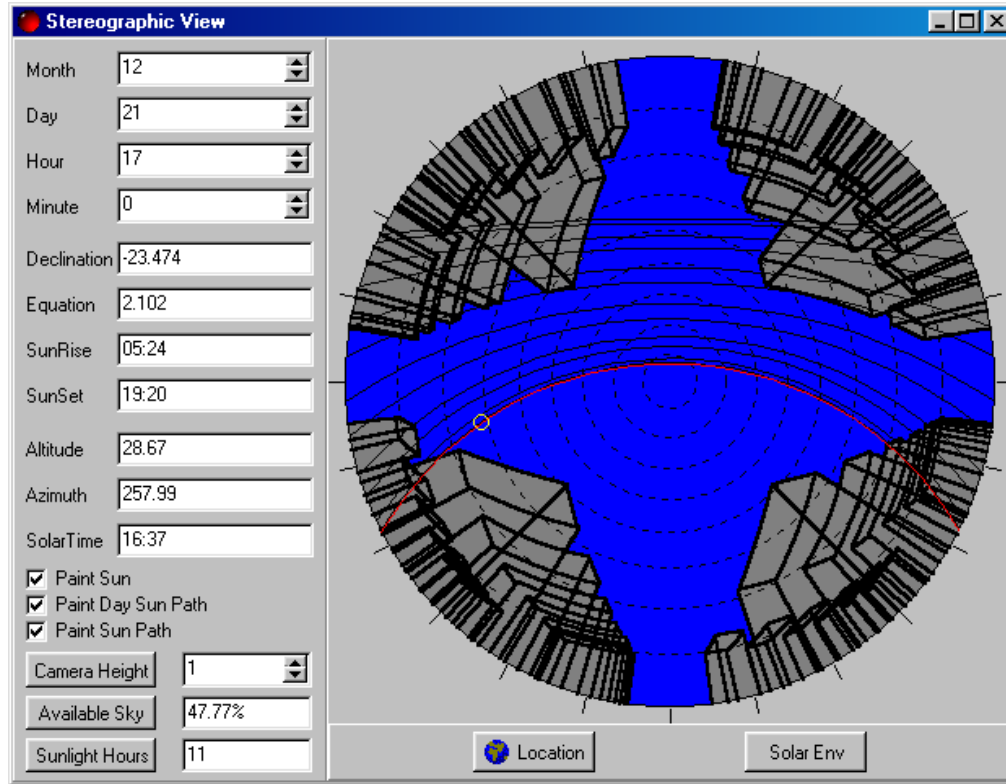


FIGURA 5.13 – Posição do sol e obstrução da abóbada celeste – 21/12, 17:00

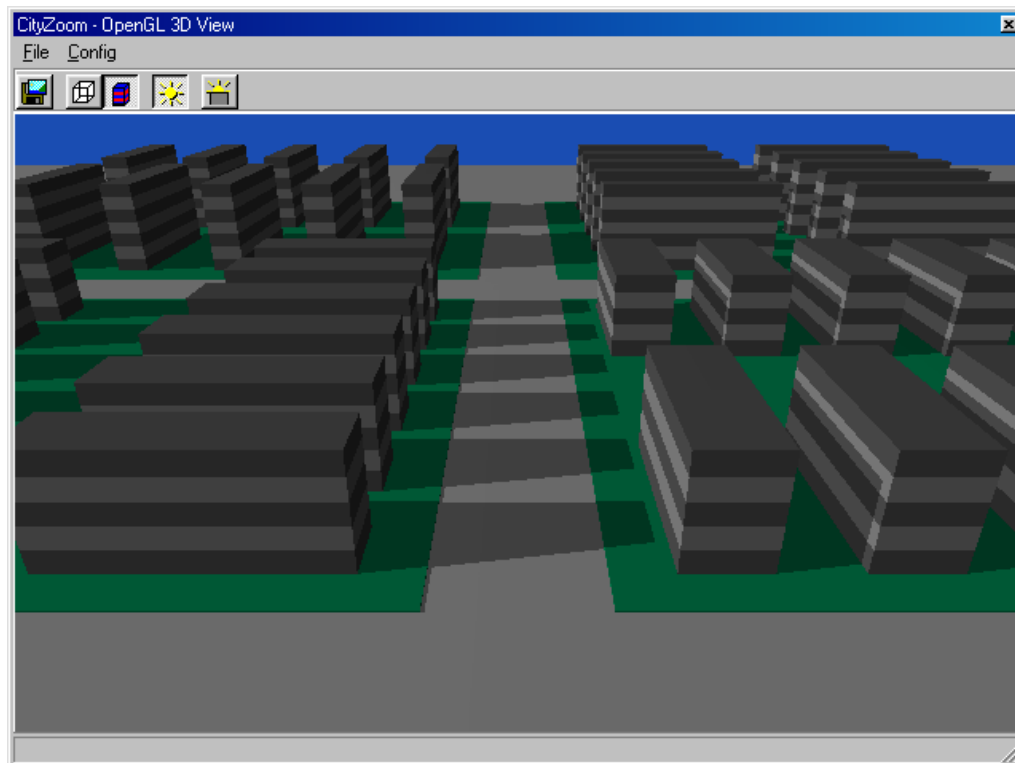


FIGURA 5.14 – Sombras projetadas – 21/12, 17:00

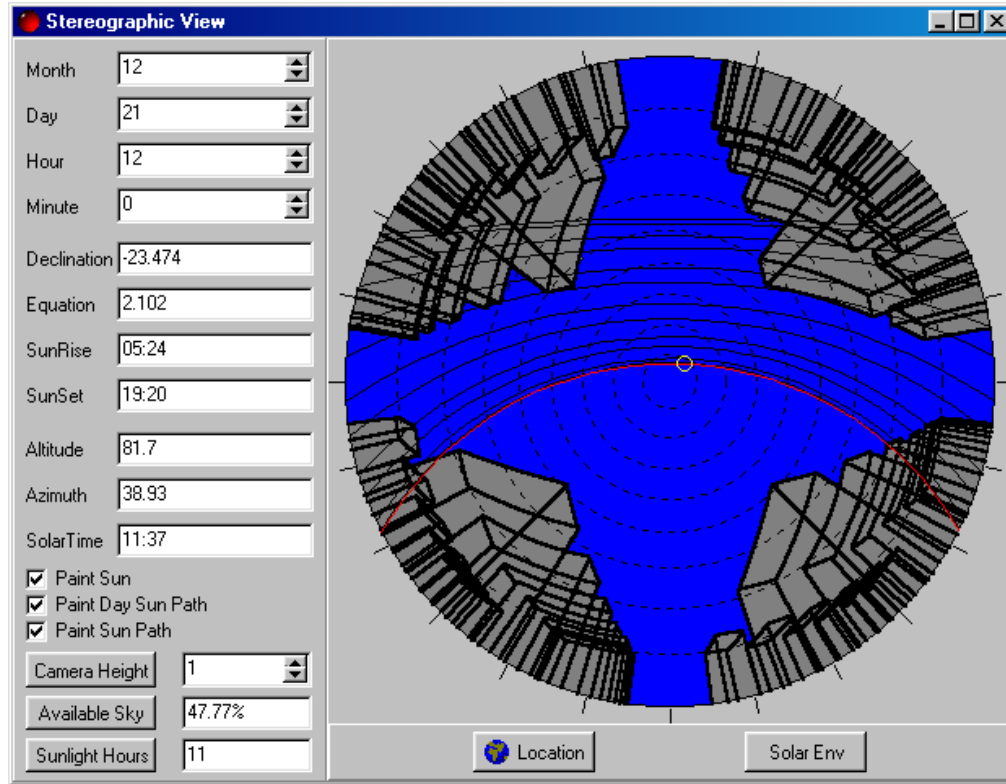


FIGURA 5.15 – Posição do sol e obstrução da abóbada celeste – 21/12, 12:00

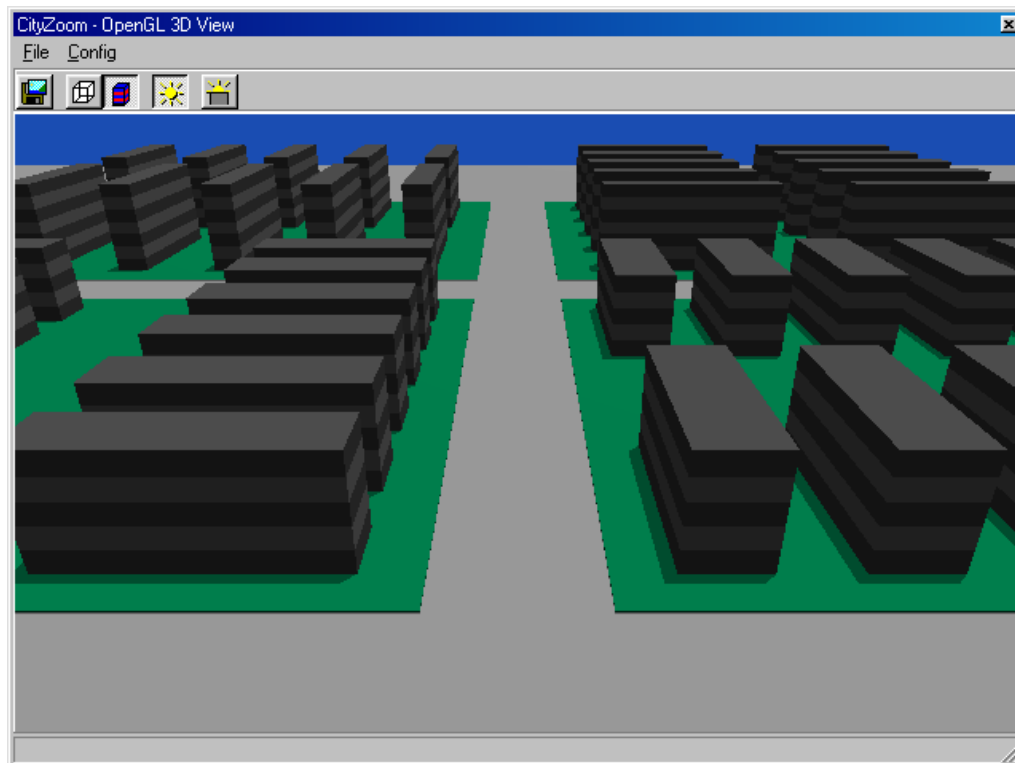


FIGURA 5.16 – Sombras projetadas – 21/12, 12:00

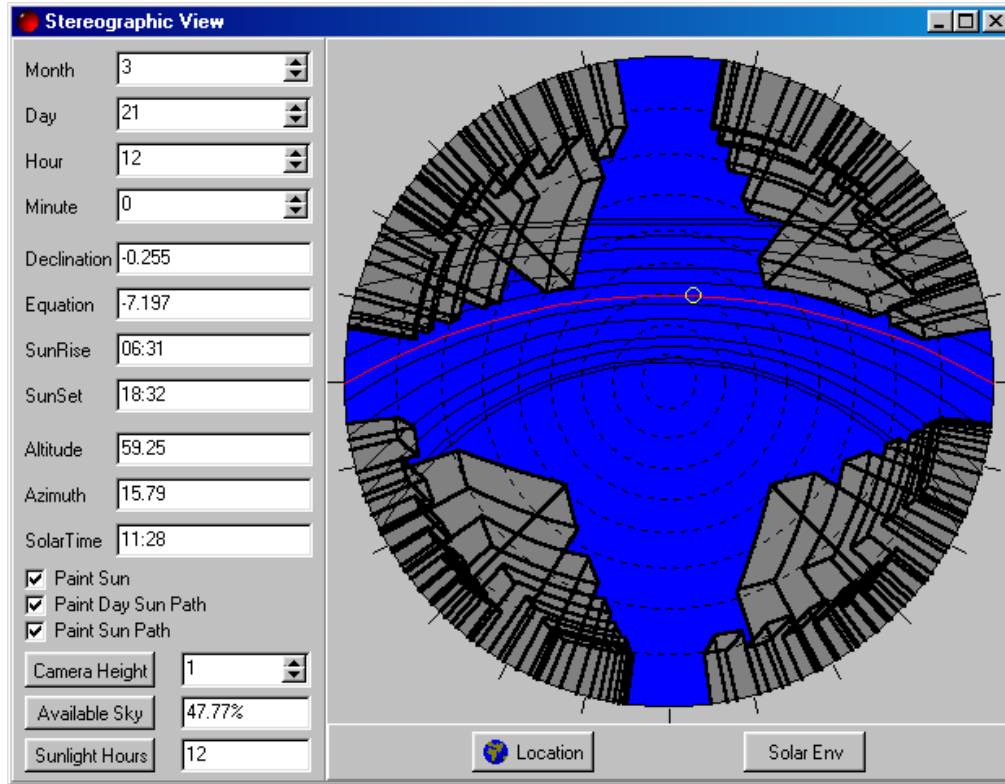


FIGURA 5.17 – Posição do sol e obstrução da abóbada celeste – 21/3, 12:00

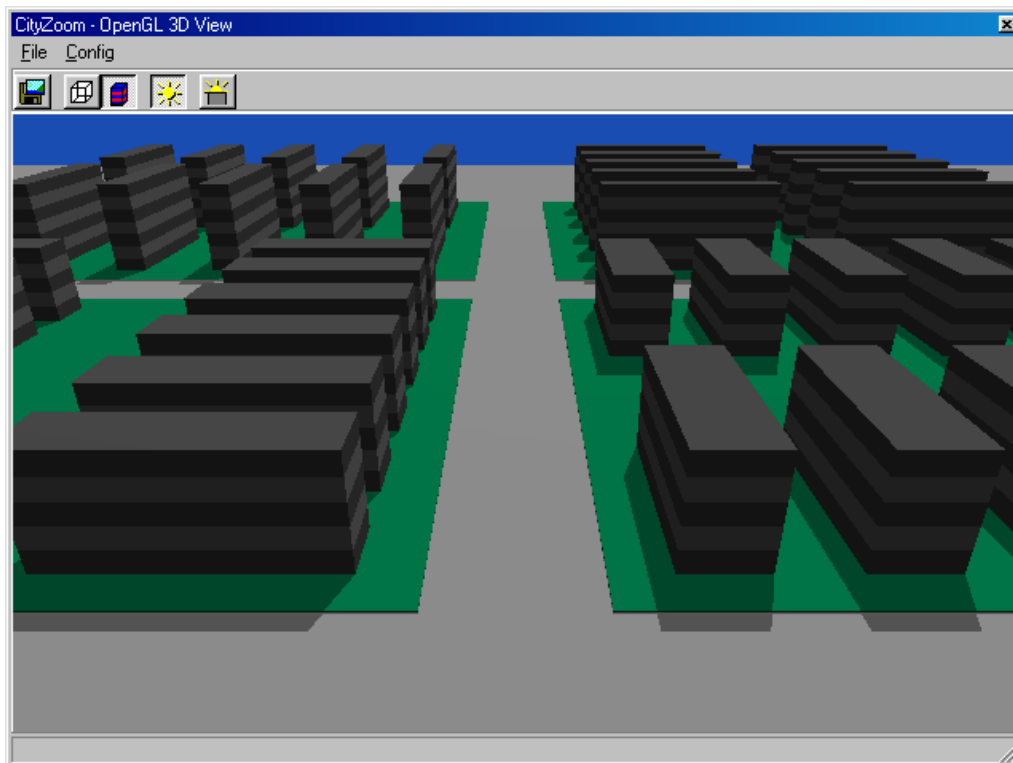


FIGURA 5.18 – Sombras projetadas – 21/3, 12:00

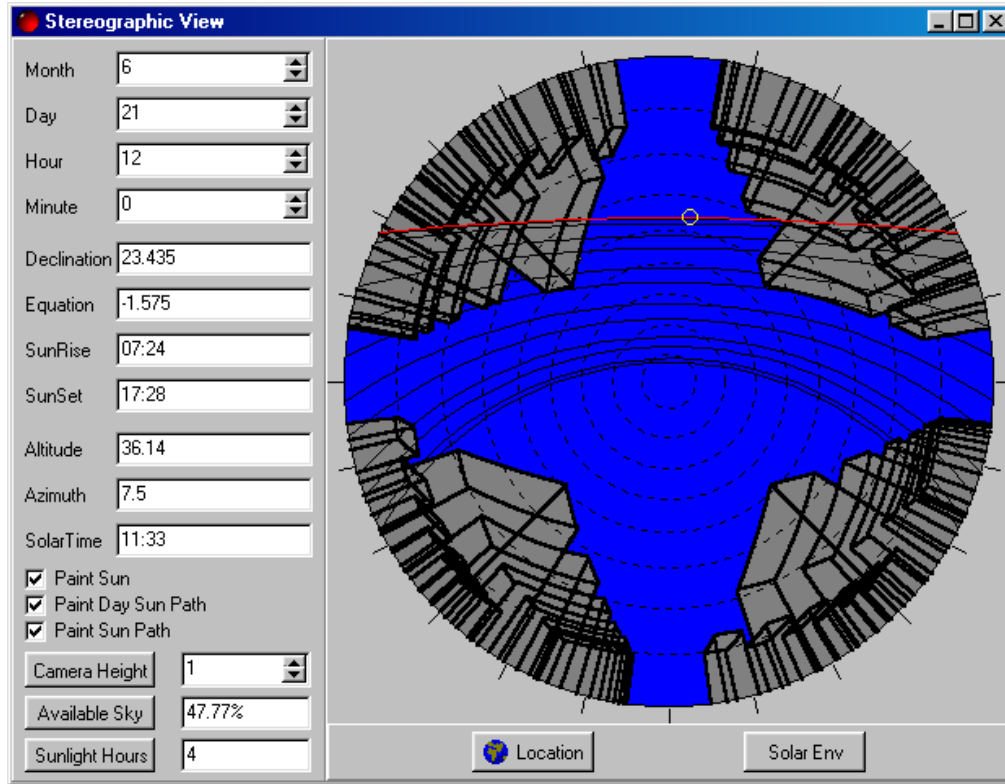


FIGURA 5.19 – Posição do sol e obstrução da abóbada celeste – 21/6, 12:00

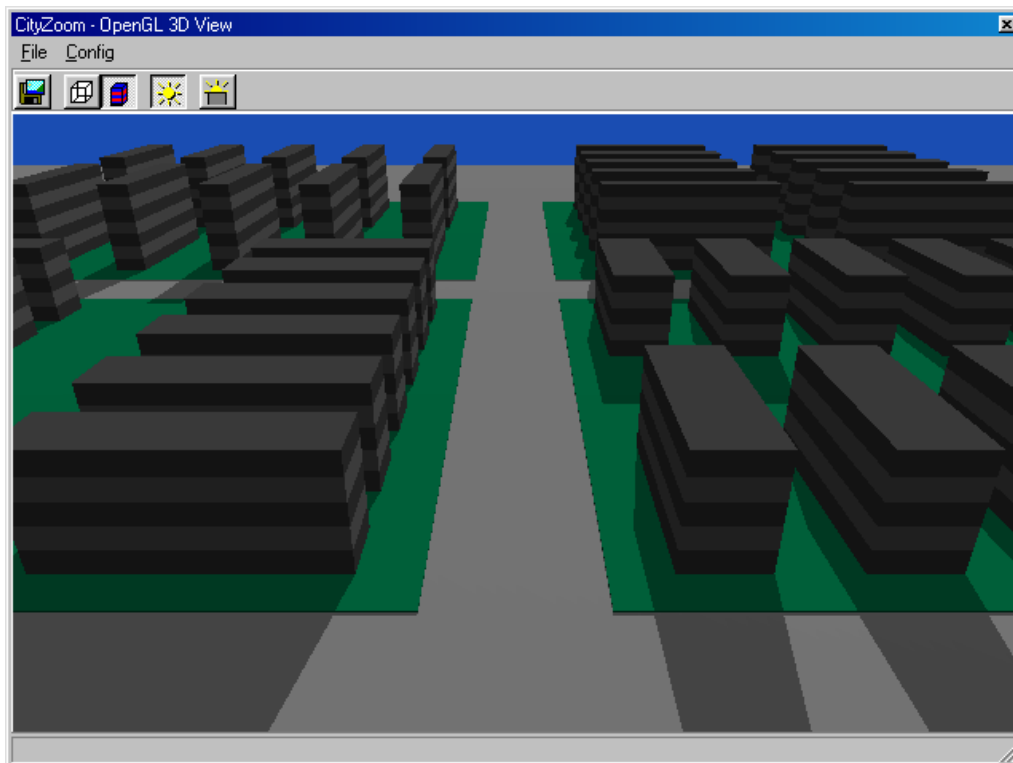


FIGURA 5.20 – Sombras projetadas – 21/6, 12:00

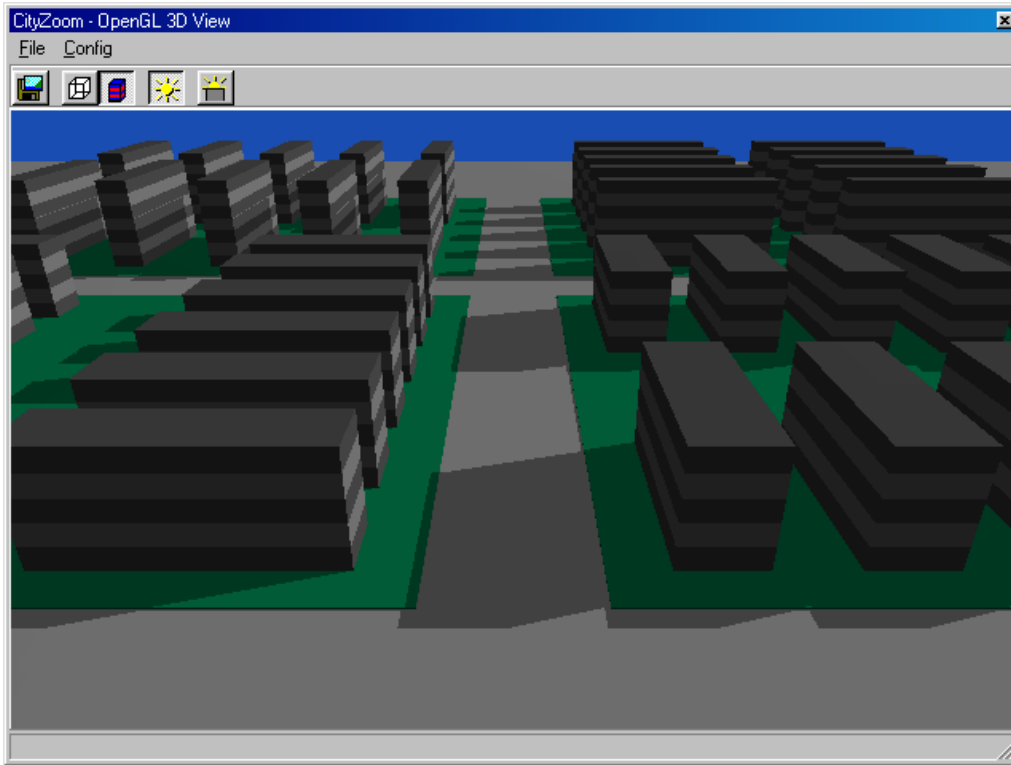


FIGURA 5.21 – Sombras projetadas para simulação sem Envelope Solar – 21/3, 9:00

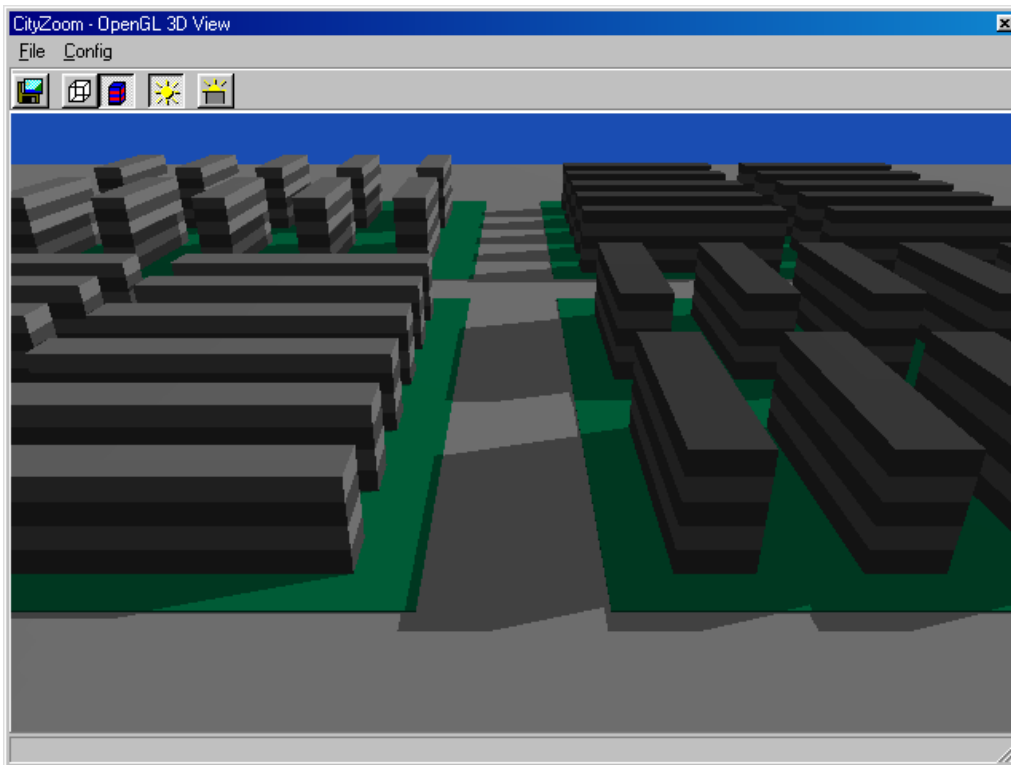


FIGURA 5.22 – Sombras projetadas para simulação com Envelope Solar – 21/3, 9:00

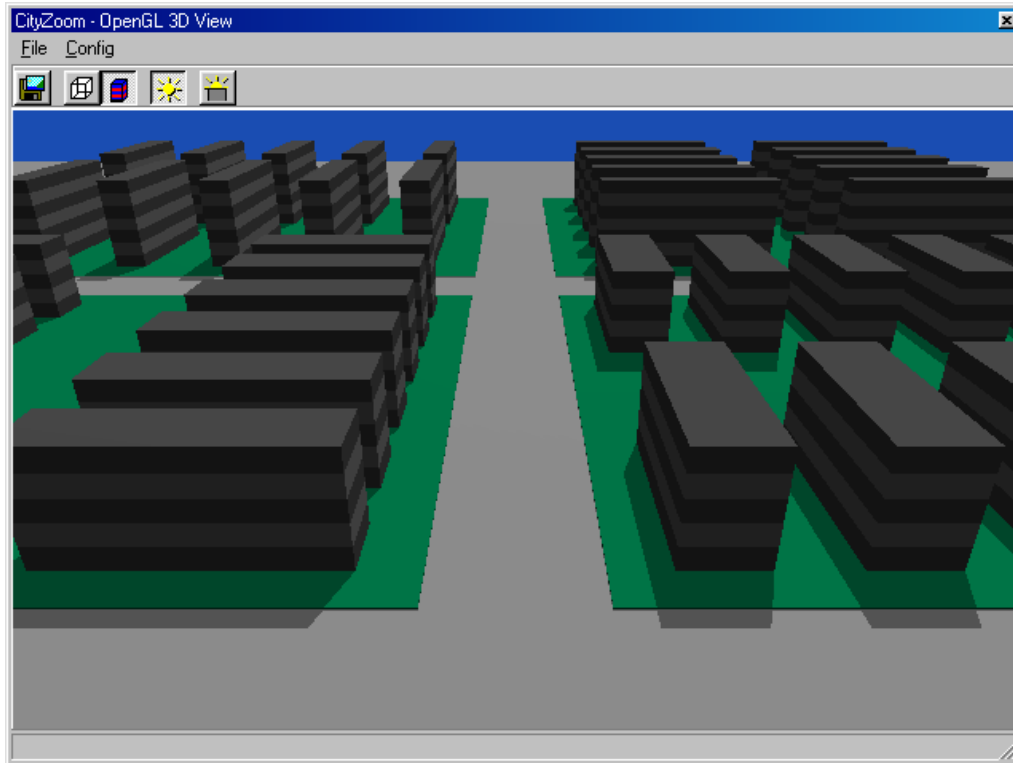


FIGURA 5.23 – Sombras projetadas para simulação sem Envelope Solar – 21/3, 12:00

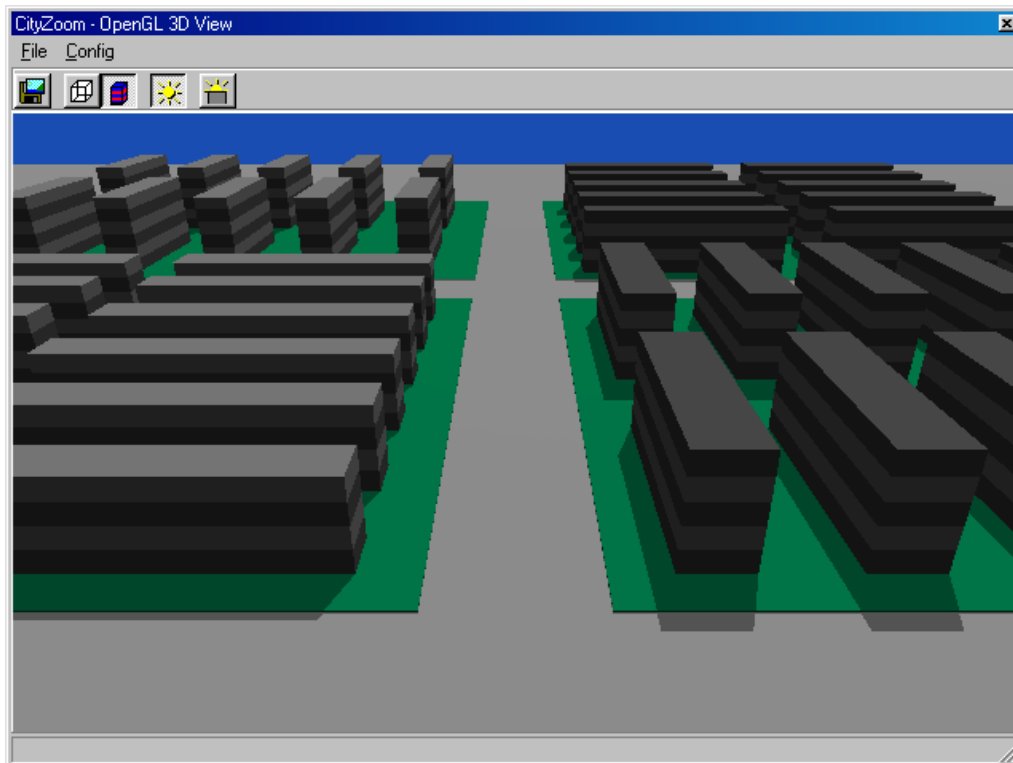


FIGURA 5.24 – Sombras projetadas para simulação com Envelope Solar – 21/3, 12:00

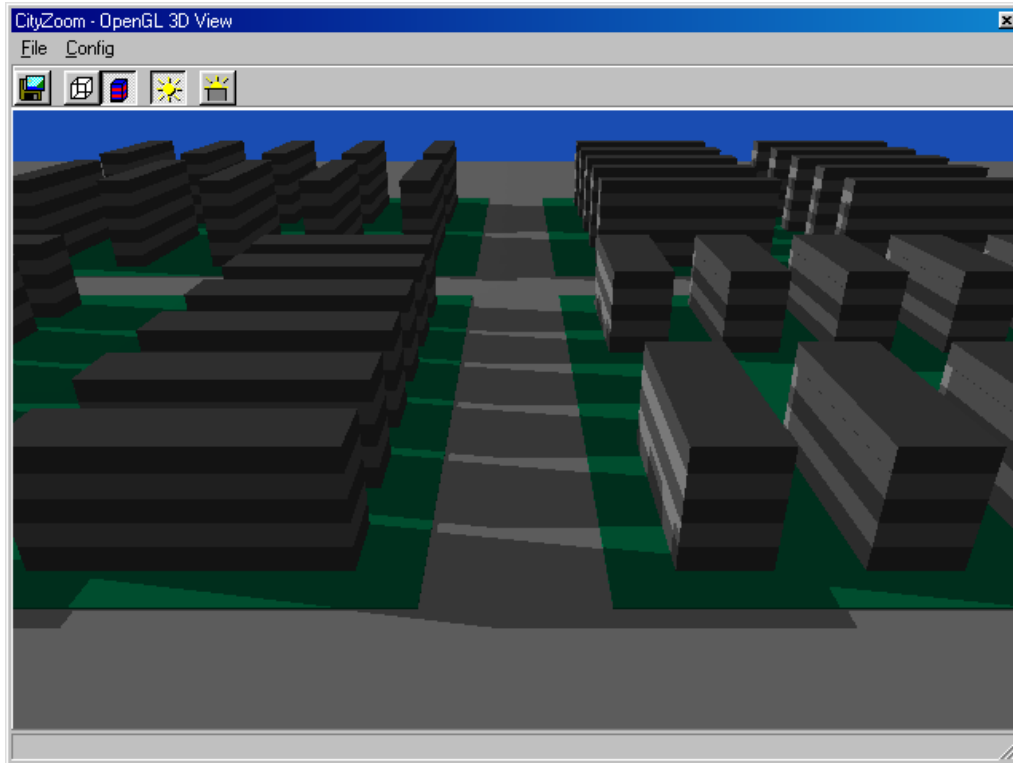


FIGURA 5.25 – Sombras projetadas para simulação sem Envelope Solar – 21/3, 17:00

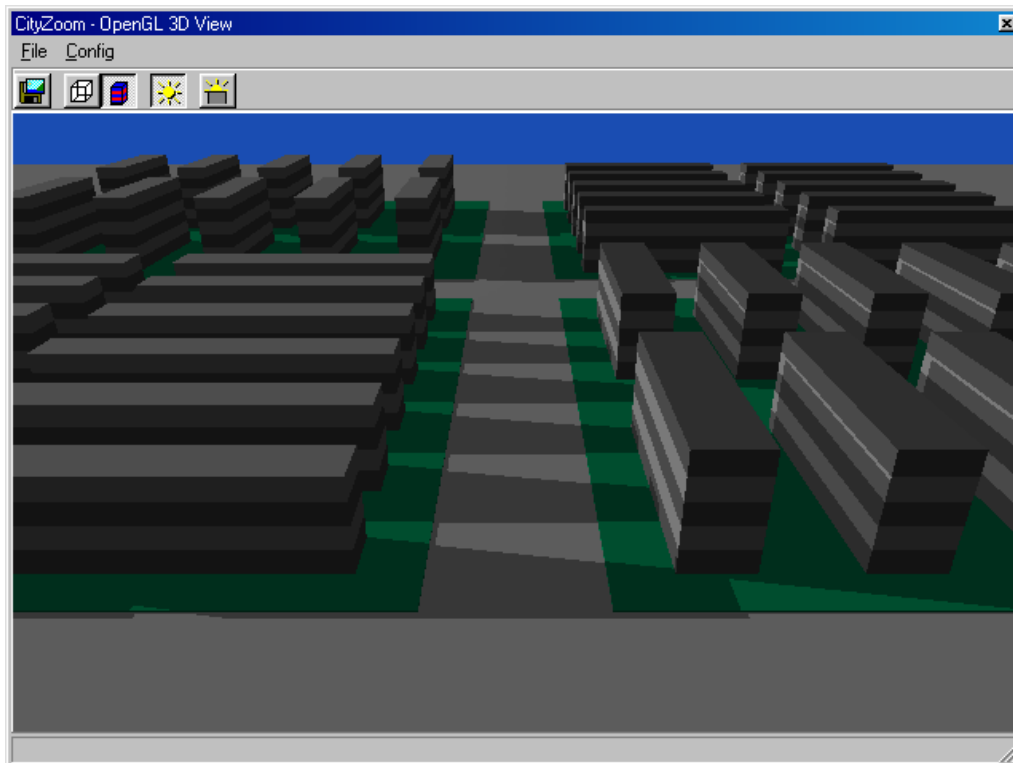


FIGURA 5.26 – Sombras projetadas para simulação com Envelope Solar – 21/3, 17:00

## 5.5 Comentários Finais

A introdução de parâmetros de iluminação natural e conforto ambiental ao CityZoom o aproximou das demais ferramentas de simulação de edificações, mas mantendo sua proposta de simular Normativas Urbanísticas. O resultado é um ambiente único, onde é possível, de forma rápida e intuitiva, correlacionar o potencial construtivo e o desempenho ambiental de edificações, através de simulações e métodos de visualização 2D e 3D.

A Tabela 5.1 compara as novas características do CityZoom (CityZoom SE) aos ambientes que foram apresentados no Capítulo 2.

TABELA 5.1 – Comparação dos ambientes estudados com o CityZoom SE. As células hachuradas ressaltam as alterações em relação ao CityZoom.

	Radiance	ADELINÉ	Ecotect	Virtual Env.	DOE	VisualDOE	CityZoom
Entrada de Dados							
Ambiente de Modelagem		X	X	X		X	X
Arquivos CAD	X	X	X	X	X	X	X
Fatores Analisados							
Normativas Urbanísticas							X
Iluminação Natural	X	X	X	X			
Iluminação Elétrica	X	X	X	X			
Radiação Solar			X		X	X	X
Conforto Térmico			X	X			
Conforto Acústico			X				
Consumo Energético			X	X	X	X	
Ventilação			X	X	X	X	
Resultados							
Vistas Fotorealísticas	X	X					
Visualização 3D			X	X		X	X
Sombras Interativas			X	X			X
Diagrama Trajetória Solar			X				X
Relatórios Textuais	X	X	X	X	X	X	X
Arquivo	X	X	X	X	X	X	X



## 6 Conclusão

### 6.1 Avaliação Geral

Neste trabalho foi realizada a integração de parâmetros de controle de acesso à luz solar a um simulador de potencial construtivo de lotes urbanos e foram desenvolvidos métodos de visualização 2D e 3D das informações relevantes e resultados desse processo.

A consideração da insolação no processo de planejamento tem significativo impacto sobre o uso do solo, densidade de construção, valorização do solo urbano, conforto térmico e economia de energia. A implementação de regulamentos climáticos e energéticos na França, Estados Unidos, e mesmo no Brasil, na cidade de Florianópolis, mostrou resultados positivos sobre diferentes aspectos, tais como economia de energia, elevação dos níveis de conforto no interior dos edifícios e melhoria no nível de ocupação urbana da cidade, inclusive sob o ponto de vista da Saúde Pública.

O Envelope Solar é uma proposta de método de controle de acesso à luz solar baseado em limites derivados do movimento aparente do sol. Edificações dentro destes limites não projetam sombras excessivas sobre as propriedades vizinhas durante períodos críticos do dia e do ano. Como a solução final não é única, a liberdade do projetista não fica limitada.

A ferramenta BlockMagic do CityZoom utiliza as Normativas Urbanísticas contidas em Planos Diretores de Desenvolvimento Urbano de uma cidade como parâmetro para simulação do potencial construtivo dos lotes daquela cidade. Diferentes parâmetros podem ser simulados ou maximizados, tais como área construída, área da laje, número de andares e dimensão da fachada.

Integrando o Envelope Solar ao BlockMagic, obtivemos uma ferramenta capaz de simular edificações cujo volume obedece às Normativas Urbanísticas e está contido dentro do Envelope Solar, minimizando as sombras indesejáveis sobre a vizinhança.

O resultado destas simulações pode ser analisado de diversas maneiras, tanto de forma numérica como visual. É possível resgatar valores como área construída, índice de aproveitamento, taxa de ocupação e dimensões das edificações, horas de sol direto sobre uma dada fachada e percentual do céu visível para um dado ponto.

Estas mesmas informações podem ser visualizadas de forma 2D ou 3D. Técnicas de visualização 2D são utilizadas para mostrar a obstrução da abóbada celeste, bem como a trajetória aparente do sol e sua posição em um dado dia e hora. Baseado no resultado da simulação e na posição do sol, sombras realísticas podem ser geradas em um ambiente 3D, pelo qual o usuário pode navegar.

Os resultados do presente trabalho encontram-se operacionais no ambiente CityZoom e estão sendo utilizados em pesquisas em andamento no SIMMLAB/UFRGS.

Além disso, já foram publicados em duas conferências [GRA2001] [GRA2002]; a reprodução dos trabalhos encontra-se em anexo.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Os próximos passos no desenvolvimento do projeto CityZoom incluem melhorias na interface de navegação 3D e implementação do cálculo e visualização de valores de radiação para cada fachada de uma edificação.

Entre as possibilidades de melhorias para a interface 3D estão a implementação de um *walkthrough* mais realista, a adição de elementos como árvores, janelas e portas ao cenário e a aplicação de texturas às edificações.

Os valores de radiação para cada fachada poderiam ser estimados para uma data e hora específicas ou para um intervalo de tempo. Estes valores poderiam então ser mapeados para um espectro de cores e aplicados às fachadas equivalentes no cenário 3D. Outra possibilidade seria utilizar o módulo Mosaic (descrito no Cap. 2) para gerar mapas de cores baseados nos valores de radiação.

Ambas as idéias iriam aperfeiçoar o ambiente CityZoom, fornecendo ainda mais ferramentas para o suporte a tomada de decisões.

Adicionalmente, toda a interface do ambiente está sendo reformulada. Serão realizados testes com usuários a fim de verificar as dificuldades na operação do programa e buscar sugestões de modificações que tornariam a interface mais amigável e intuitiva.

## Anexo 1 Temperatura Neutra do Mês

$$T_{nm} = T_n - [(W - W_s / 2) * 0,025 * (0,543 * t_m - 2,1)]$$

ou

$$T_n = 11,9 + 0,543 * t_m$$

onde:  $T_{nm}$  é a temperatura neutra do mês [°C]

$T_n$  é a temperatura neutra sem considerar a umidade relativa [°C]

$t_m$  é a temperatura média do mês [°C]

$W$  é a quantidade absoluta de água no ar na  $T_n$  [g/kg]

$W_s$  é a quantidade absoluta de água no ar na  $T_n$  em saturação [g/kg]

## Anexo 2 Fator de Ponderação

$$FP = |(T_{ar} - T_{nm}) / 2|^{\infty}$$

onde:  $T_{ar}$  é a temperatura externa do ar  
expoente  $\infty = 1,6$  para calor,  $1,0$  para frio

**Anexo 3 Trabalho Publicado no SIBGRAPI 2001**



**Anexo 4 Trabalho Publicado no SIACG 2002**



















## Referências

- [ADE96] ADELIN 2.0 – Advanced Daylighting and Electric Lighting Integrated New Environment – Predicting Daylighting and Lightning Performance in Complex Building Spaces. 1996. Disponível em: <<http://radsite.lbl.gov/adeline/HOME.html>>. Acesso em: 2002.
- [CAR90] CARRUTHERS, D. D.; ROY, G. G.; ULOTH, C. J. **An evaluation of formulae for solar declination and the equation of time**. Austrália: School of Architecture, University of Western Australia, 1990. Research report.
- [CIT99] CITYZOOM: Ambiente de Apoio a Decisão em Projetos de Arquitetura e Urbanismo. 1999. Disponível em: <<http://www.cityzoom.net>>. Acesso em: 2002.
- [DOE95] DOE-2. 1995. Disponível em: <<http://gundog.lbl.gov/dirsoft/d2whatis.html>>. Acesso em: 2002.
- [DUF91] DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 2nd ed. New York, N.Y.: J. Wiley, 1991.
- [ECO2002] ECOTECT 5.0. 2002. Disponível em: <<http://www.squ1.com/ecotect/ecotect-home.html>>. Acesso em: 2002.
- [ERH97] ERHORN, H.; BOER, J.; DIRKSMÖLLER, M. ADELIN – An Integrated Approach to Lighting Simulation. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 5., 1997, Prague. **Building Simulation'97: proceedings**. [S. l.: s. n.], 1997. v. 1, p. 79-85.
- [GAU2002] GAUZIN-MÜLLER, D. **Sustainable Architecture and Urbanism**. Berlin: Birkhäuser, 2002.
- [GRA2001] GRAZZIOTIN, P. C.; FREITAS, C. M. D. S.; TURKIENICZ, B.; PEREIRA, F. O. R. Visualization Techniques in a Building Potential Simulator Using Sunlight Access Control. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON COMPUTER GRAPHICS AND IMAGE PROCESSING, SIBGRAPI, 14., 2001, Florianópolis. **Proceedings...** Los Alamitos: IEEE, Computer Society, 2001.
- [GRA2002] GRAZZIOTIN, P. C.; FREITAS, C. M. D. S.; TURKIENICZ, B. Integration of Sunlight Access Control to Building Potential Simulator. In: IBERO AMERICAN SYMPOSIUM ON COMPUTER GRAPHICS, SIACG, 1., 2002, Guimarães. **Proceedings...** [S. l.: s. n.], 2002. p. 209-215.
- [HAY79] HAYES, G. B. **Solar Access Law**. Cambridge, Massachusetts: Ballinger Press, 1979.
- [HEI91] HEIDMANN, TIM. Real shadows, real time. **Iris Universe**, [S.l.], n. 18, p. 23-31, Nov. 1991.



- [HIL94] HILLIER, B.; PENN, A. Virtuous Circles, Building Sciences and the science of buildings: using computers to integrate product and process in the built environment. **Design Studies**, [S.l.], v. 15, n. 3, p. 332-365, 1994.
- [HUM78] HUMPHREYS, M. **Outdoor temperatures and comfort indoors**. UK: Building Research and Practice, 1978.
- [INS95] INSOLAÇÃO e Ventilação. In: BELO HORIZONTE. **Plano Diretor: Lei de Uso e Ocupação do Solo: Estudo Básico**. Belo Horizonte, 1995. p. 201-207.
- [KLE77] KLEIN, S. A. Calculation of monthly average insolation of tilted surfaces. **Solar Energy Journal**, [S.l.], v. 19, n. 4, p. 325-329, 1977.
- [KNO81] KNOWLES, R. L. **Sun Rhythm Form**. Cambridge, Massachusetts and London, UK: MIT Press, 1981.
- [KNO2000] KNOWLES, R. L. The Solar Envelope: Its meaning for urban growth and form. In: PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE CONFERENCE, PLEA, 17., 2000. **Proceedings...** Cambridge, UK: James & James, 2000. p. 649-654.
- [MAR96] MARSH, A. **Performance Modelling and Conceptual Design**. Paper apresentado durante a IBPSA Conference, Sydney, dezembro de 1996. Disponível em: <[http://www.squ1.com/research/papers/1996/IBPSA\\_1996.htm](http://www.squ1.com/research/papers/1996/IBPSA_1996.htm)>. Acesso em: 2002.
- [OBO82] BOLENSKY, N. V.; KORZIN, O. A. Insolation and Sun Control in the Field of Construction: The Progressive Ways of Their Normalisation and Regulation. In: SYMPOSIUM IN BUILDING CLIMATOLOGY, CIB, 1982. **Proceedings...** Moscou, União Soviética: [s.n.], 1982.
- [PER2001] PEREIRA, F. O. R.; SILVA, C. A. N.; TURKIENICZ, B. A Methodology for Sunlight Urban Planning: A Computer-Based Solar and Sky Vault Obstruction Analysis. **Solar Energy Journal**, [S.l.], v. 70, n. 3, p. 217-226, 2000.
- [POR2000] PORTER, B.; COSMIN, B. **Shadow Generation Tutorial (Stencil Buffer)**. 2000. Disponível em: <<http://nehe.gamedev.net/tutorials/lesson.asp?I=27>>. Acesso em: 2001.
- [RAD97] RADIANCE – Syntetic Imaging System. 1997. Disponível em: <<http://radsite.lbl.gov/radiance/HOME.html>>. Acesso em: 2002.
- [ROB86] ROBINS, C. L. **Daylighting: Design and Analisis**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1986.
- [SHA2000] SHAVIV, E.; CAPELUTO I. G. Sustarc: a model for the design of the urban fabric with solar rights considerations. In: PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE CONFERENCE, PLEA, 17., 2000. **Proceedings...** Cambridge, UK: James & James, 2000. p. 655-659.
- [SZO80] SZOKOLAY, S. V. **Environmental Science Handbook for Architects and Builders**. Lancaster: The Construction Press, 1980.

- [THO76] THOMAS, W. Access to Sunlight. In: SOLAR RADIATION CONSIDERATIONS IN BUILDING PLANNING AND DESIGN, 1996. **Proceedings...** Washington, D.C.:[s.n.], 1976.
- [TUR99] TURKIENICZ, B.; SCLOVSKY, L.; MITTMANN, M. A.; PEREIRA, F. O. R. Block.I.Magic. Simulation of building regulations in a computational environment. In: COMPUTERS IN URBAN PLANNING & URBAN MANAGEMENT, CUPUM, 5., 1999. **Proceedings.** [S.l.: s.n.], 1999.
- [VIR2002] VIRTUAL Environment – Building Design Software for Architects, Engineers and Building Managers. 2002. Disponível em: <<http://www.ies4d.com>>. Acesso em: 2002.
- [VIS2002] VISUALDOE 3.1 – A New Tool for Green Building Design. 2002. Disponível em: <<http://www.eley.com/gdt/visualdoe>>. Acesso em: 2002.
- [WAR94] WARD, G. J. The RADIANCE Lighting Simulation and Rendering System. **Computer Graphics**, New York, p. 459-472, July 1994. Trabalho apresentado na SIGGRAPH Conference, 1994.
- [WAT90] WATT, A. **Fundamentals of Three-Dimensional Compute Graphics.** Workingham, UK: Addisson-Wesley, 1990.
- [WHI76] WHITE, M. R. The Allocation of Sunlight: Solar Rights and the Prior Appropriation Doctrine. **Collorado Law Review**, [S.l.], v. 47, p. 421-427, 1976.