

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS — UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA  
NÍVEL MESTRADO

IVAN ROGÉRIO DIESEL

SIMULAÇÃO DE ILUMINAÇÃO NATURAL EM PRÉDIOS PARA  
PLANEJAMENTO SUSTENTÁVEL DE CIDADES

SÃO LEOPOLDO  
2014



Ivan Rogério Diesel

SIMULAÇÃO DE ILUMINAÇÃO NATURAL EM PRÉDIOS PARA  
PLANEJAMENTO SUSTENTÁVEL DE CIDADES

Dissertação apresentada à Universidade de  
Rio dos Sinos - UNISINOS para a  
obtenção do grau de Mestre em  
Computação Aplicada

Orientador:  
Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Marta Becker Villamil

Co-orientador:  
Prof. Dr. Luiz Paulo Luna de Oliveira

São Leopoldo  
2014



Dedico este trabalho a minha esposa e a minhas filhas.

*Descobre, desenvolve, publica, redescobre ainda e  
progredir sempre, tal é a entusiasta da área.*



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha orientadora Dra Marta Becker Villamil e ao orientador Dr Luiz Paulo Luna de Oliveira pela oportunidade oferecida a mim e sua contribuição para meu aprendizado e desenvolvimento intelectual e humano.

Ao meu irmão Gerson pelo incentivo e pela revisão deste trabalho.

Às minhas intérpretes Celeste, Queltin, Adriana e Luciana pelo carinho, incentivo e tradução através da LIBRAS, ajudando, utilizando-se de um meio sistemático de comunicar ideias e sentimentos pelo uso de sinais.

Aos professores contemporâneos Jorge Luis Victoria Barbosa, Leonardo Dagnino Chiwiacowsky, Luiz Gonzaga da Silveira Junior e Sérgio Crespo pela organização e seriedade dos estudos das novas gerações.

Ao dr. Cristiano André da Costa, coordenador do programa de pós-graduação em Computação Aplicada, pela dedicação e condução do curso. Meus sinceros agradecimentos.

E agradeço a Deus, o Pai Maior, que me concedeu forças para nunca desistir desta dissertação, me asseverando esta missão e este dever.



## RESUMO

Contemporaneamente, com as cidades se tornando cada vez mais verticais, é difícil projetar espaços urbanos em que a iluminação e o calor do sol consigam atingir o solo e os andares inferiores dos prédios urbanos de maneira a não prejudicar a saúde da população. Diante das limitações físicas para a análise do grau de iluminação natural de um grande conjunto de prédios torna-se necessária a simulação através de modelos computacionais. Parâmetros como a localização geográfica, altura, número e distância entre os prédios são usados para a identificação dos níveis de radiação solar e os consequentes desafios ambientais e tecnológicos a serem superados visando a sustentabilidade. O objetivo deste trabalho é analisar o grau de iluminação natural externa em áreas urbanas para que se possa buscar uma solução técnica a fim de propiciar ao homem as condições prediais adequadas de iluminação e temperatura. Para tanto, é apresentado um modelo de iluminação de prédios que contempla simulações que permitem tanto a análise do grau de iluminação por prédio quanto a análise do grau de iluminação global em um grande conjunto de prédios em função do parâmetro através da técnica de PCA.

**Palavras-chave:** Computação gráfica. Simulação de nível de iluminação. Programação.



## **ABSTRACT**

Contemporaneously, cities are becoming more vertical, it is difficult to design urban spaces in which light and heat from the sun would attain the ground and lower floors of urban buildings in a way that does not harm the health of the population. Given the physical limitations to the analysis of the degree of natural lighting of a large number of buildings, it is necessary to simulate it by computer modeling. Parameters such as geographical location, height, number and distance between buildings are used to identify levels of solar radiation and the resulting environmental and technological challenges to be overcome for the sustainability. The objective of this work is to analyze the degree of outside natural lighting in urban areas to seek a technical solution in order to provide the suitable human conditions of lighting and temperature. For this, a model lighting of buildings that includes simulations that allow both the analysis of the degree of illumination building as the analysis of the degree of global illumination on a large set of buildings is presented. The result is presented using the technique of PCA.

**Keywords:** Computer Graphics. Simulation illumination level. Programming Technical.



## SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO</b>	<b>11</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>13</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>15</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1 Motivação	22
1.2 Objetivos	24
1.3 Contribuições do Trabalho	24
1.4 Organização	24
<b>2 CONCEITOS BÁSICOS</b>	<b>27</b>
2.1 Ray Tracing	27
2.2 A análise de componentes principais	29
2.2.1 Matriz de dados $X$	32
2.2.2 Matriz de covariância $S$	32
2.2.3 Determinação dos componentes principais	34
2.2.4 Contribuição de cada componente principal	35
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>39</b>
3.1 Comparativo entre os sistemas	48
<b>4 MODELO DE ILUMINAÇÃO DE PRÉDIOS</b>	<b>51</b>
4.1 Simulação do Grau de Iluminação por Prédio	51
4.1.1 Incidência de Iluminação Solar	51
4.1.2 Visualização por cores de incidência solar e temperatura	54
4.1.3 Funcionalidades da Ferramenta	57
4.1.3.1 Cenário da Simulação	57
4.1.3.2 Diagrama de atividades	59
4.2 Simulação do Grau de Iluminação Global	63
4.2.1 Modelo Bidimensional	63
4.2.2 Modelo Tridimensional e Configuração do Ambiente	68
<b>5 RESULTADOS</b>	<b>73</b>
5.1 Análise do Grau de Iluminação por Prédio	73
5.2 Análise do Grau de Iluminação Global	74
5.2.1 Análise em 2 dimensões	74
5.2.2 Análise em 3 dimensões	77
<b>6 CONCLUSÃO</b>	<b>81</b>

<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>83</b>
<b>7 ANEXO1</b> . . . . .	<b>87</b>
<b>7.1 Estudos com Reflexão</b> . . . . .	<b>87</b>
7.1.1 Algoritmo de <i>ray tracing</i> . . . . .	87

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Espelho em funcionamento na Viganella vista do local de instalação do espelho. . . . .	21
Figura 2:	Luz solar refletida pelo espelho instalado na encosta de uma das montanhas alpinas. . . . .	22
Figura 3:	Representação da iluminação através de reflexão de raio de luz sobre superfícies. . . . .	23
Figura 4:	geometria da reflexão repetida e cálculo do ângulo em relação à linha bidimensional. . . . .	27
Figura 5:	Linha vermelha representando o trajeto do feixe de luz refletindo nos objetos utilizando o conceito de <i>ray tracing</i> . . . . .	29
Figura 6:	Dispersão dos valores observados - Distribuição bidimensional de amostras e navegação no eixo de maior variância no subespaço gerado pelo PCA. . . . .	31
Figura 7:	Otimização da forma parametrizada pela otimização da incidência solar. . . . .	40
Figura 8:	Blockmagic na plana de urbanismo. . . . .	41
Figura 9:	Blockmagic na visualização em 3D. . . . .	42
Figura 10:	Blockmagic - simulação dos prédios. . . . .	42
Figura 11:	Mapa no AxiMagic. . . . .	43
Figura 12:	Mosaic: visão de terreno urbano. . . . .	44
Figura 13:	Software de Simulação Gráfica de Regimes Construtivos. . . . .	45
Figura 14:	Visualização de 4 prédios. Visão aérea. (PAGOT, 2012) . . . . .	46
Figura 15:	Visualização de 4 prédios. Visão lateral. (PAGOT, 2012) . . . . .	47
Figura 16:	Análise de incidência solar em prédios em um período. As frações dos paredes que recebem sombra são 5, 7 e 8. . . . .	52
Figura 17:	Análise de incidência solar em prédios no período de 4 horas do dia. . . . .	53
Figura 18:	Incidência de luz em determinada hora com representação da oclusão de luz no prédio anterior. . . . .	53
Figura 19:	Visualização total de um periodo de 12 horas. . . . .	55
Figura 20:	Simulação com dois prédios para observar a incidência solar. . . . .	55
Figura 21:	Visualização de incidência solar e sombra em faixa horária de $x$ hora até $y$ hora . . . . .	56
Figura 22:	Exemplos de formas geométricas . . . . .	58
Figura 23:	Formas geométricas na representação tridimensional. . . . .	58

Figura 24:	Software de Simulação de Iluminação em Prédios. Na área do terreno, as formas coloridas representam os prédios de formas diferentes, vistos de cima. . . . .	59
Figura 25:	Diagrama de Atividades . . . . .	61
Figura 26:	Resultado dos 3 quadros inferiores que analisam o quadro superior: Pontos, nível de iluminação dos prédios por hora e nível de iluminação de todas as horas por prédio. . . . .	65
Figura 27:	Visualização de distribuição . . . . .	66
Figura 28:	Painéis de alteração de parâmetros e análise dos graus de iluminação em prédios dispostos bidimensionalmente. . . . .	67
Figura 29:	Software de Cidade Unidimensional em 3 dimensões. . . . .	71
Figura 30:	área dos prédios em 2D e em 3D. . . . .	71
Figura 31:	QPS. . . . .	72
Figura 32:	40 partes por paredes e terraço . . . . .	74
Figura 33:	Observação 1: Situação ruim. . . . .	78
Figura 34:	Observação 2: Situação média. . . . .	79
Figura 35:	Observação 3: Situação boa. . . . .	79
Figura 36:	Equações de trajetória . . . . .	89
Figura 37:	Algoritmo de <i>ray tracing</i> em formas circulares . . . . .	90
Figura 38:	Parabólica espelhada permite a reflexão dos raios solares para alcançar as paredes dos dois prédios usando técnicas de <i>ray tracing</i> . . . . .	92
Figura 39:	Espelho plano permite a reflexão dos raios solares para enviar luz ao chão entre dois prédios. . . . .	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Comparação dos Softwares. . . . .	48
Tabela 2:	Resultado de 4 períodos. . . . .	54
Tabela 3:	Formas bidimensionais e seus respectivos tridimensionais. . . . .	57
Tabela 4:	Painel de Controle. . . . .	62
Tabela 5:	Lista de dados de QPS. . . . .	70
Tabela 6:	Simulação de nível de iluminação em 2 prédios durante 12 horas. . .	73
Tabela 7:	PCA de 3 quadros dos prédios. . . . .	75
Tabela 8:	PCA de 4 quadros dos prédios. . . . .	76
Tabela 9:	Relação cor/forma . . . . .	88
Tabela 10:	Comparação entre processos convergentes e divergentes. . . . .	90



## LISTA DE ABREVIATURAS

ASHRAE	<i>American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i>
BD	<i>Banco de Dados</i>
BEST	<i>Built Environment Simulation Tools</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design ou Desenho auxiliado por computador</i>
CG	<i>Computador Grafica</i>
DXF	<i>Drawing Exchange Format</i>
FLDV	<i>Fator de Luz Diurna Vertical</i>
GIS	<i>Geographic Information System ou Sistema de Informação Geográfica</i>
GLUT	<i>OpenGL Utility Toolkit</i>
IRT	<i>Interseção de Raio-Triângulo</i>
PC	<i>Componentes Principais</i>
PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
QPS	<i>Quantidade de Prédios Sombreados</i>
OpenGL	<i>Open Graphics Library</i>
SI	<i>Sistema Internacional de Unidades</i>
SimmLab	<i>Laboratório para Simulação e Modelagem em Arquitetura e Urbanismo</i>
SSGRC	<i>Sistema para Simulação Gráfica de Regimes Construtivos</i>
SSP	<i>Sistemas de Suporte à Decisão</i>
TUF-IOBEST	<i>Temperature of Urban Facets Indoor-Outdoor Building Energy Simulato</i>
VDF	<i>Vertical Daylight Factor</i>



## 1 INTRODUÇÃO

A luz natural apresenta reconhecidos efeitos benéficos à saúde e suporta uma série de atividades realizadas pelos seres humanos. Por esta razão, o acesso adequado a este recurso é requisito fundamental no desenvolvimento de projetos arquitetônicos: níveis insuficientes de iluminação natural em interiores são compensados através de iluminação artificial, gerando consumo de energia. Projetos de arquitetura devem conciliar o uso eficiente da energia com o acesso eficaz à luz natural, resultando em maior conforto, menor consumo energético e, conseqüentemente, menor ameaça ao ambiente natural (PAGOT, 2012).

A utilização da iluminação natural tem sua importância na redução do consumo energético nas edificações, segundo M. Bodart (M. BODART, 2002):

*Aprendemos que a iluminação natural pode reduzir o consumo de iluminação artificial de 50% a 80%. A economia de energia primária proveniente não só a partir da redução do consumo de iluminação, mas também a partir da redução de cargas de iluminação interna poderia atingir 40%, conforme o tipo de vidro utilizado em edifícios.*

Considerado a aspecto mutável da luz, a iluminação exterior depende de inúmeros fatores tais como localização geográfica, o nível do terreno, a estação do ano, mudança de ângulo solar durante o dia e a própria arquitetura dos prédios.

O presente estudo se dirige aos arquitetos, engenheiros, empresas de tecnologia e inovação, produtos e serviços, a prefeituras para planejamento urbano e, principalmente, ao usuário final e tem por objetivo oferecer aos nossos ambientes um melhor conforto luminoso, a um menor custo possível. Esta equação, que parece simples, depende de muitas variáveis. Uma delas é o conforto luminoso que refere-se às respostas diretas aos problemas dos usuários, seguindo, para tanto às hipóteses dos profissionais que se envolvem na resolução destes problemas. Um determinado ambiente provido de luz natural e/ou artificial produz estímulos ambientais, ou seja, certo resultado em termos de quantidade, qualidade da luz e sua distribuição, contrastes etc. O mesmo raciocínio serve para as outras áreas do conforto ambiental.

Para o desenvolvimento de algoritmos de iluminação, devemos considerar o

funcionamento da visão humana, onde o requisito essencial para se enxergar objetos é a existência da luz. Esta última, presente de várias formas, é necessária para que os objetos possam refletir e absorver seus raios, e então, serem percebidos pelo olho humano. Dessa forma, para gerar imagens por computação gráfica, é necessário inicialmente compreender a natureza das fontes de luz e suas interações com os objetos.

A seguir citamos o caso da cidade de Viganella para contextualizar a importância da luz natural em edificações.

Viganella é uma comuna<sup>1</sup> italiana da região de Piemonte. O vilarejo ganhou destaque na mídia internacional por conta do "projeto espelho". A localização geográfica da pequena vila faz com que ela nunca receba o sol durante o inverno entre os meses de novembro até fevereiro.

A pequena cidade de Viganella tem 185 habitantes e foi construída no fundo de um vale alpino muito íngreme, perto da fronteira com a Suíça. O lado sul do vale é tão escarpado que no dia 11 de novembro o sol desaparece e não vai reaparecer até o dia 2 de fevereiro, os meses de inverno no Hemisfério Norte. "É como a Sibéria", afirma uma das moradoras do vilarejo. Para os moradores da pequena cidade, ver o sol nesta época do ano é um acontecimento sem par. A cidade tem 800 anos de história e nunca viu sua catedral iluminada pelos raios solares durante o inverno. A história do espelho começou em 1999, quando o prefeito Franco Midali fez uma aposta com Giacomo Bonzani, arquiteto responsável pelo projeto. Na época, Midali desafiou Bonzani e disse que se o arquiteto conseguisse fazer o sol brilhar no inverno, se comprometeria a arrecadar o dinheiro para o projeto. Com 40 metros quadrados, o espelho indicado na Figura 2 é formado por 14 placas polidas de aço inoxidável, e foi instalado em uma altura de 500 metros sobre uma colina. Em dezembro, os primeiros raios de Sol começaram a ser refletidos pelo equipamento, mas só agora a totalidade do sol é desviada para dentro do vale onde se localiza a cidade, conforme mostrado na Figura 1. Para muitos moradores isso é um milagre que nunca pensaram que aconteceria. Depois de alguns anos e um custo de 120 mil dólares, o desenho saiu do papel e finalmente o sol banha a cidade. Atualmente o espelho tem posição fixa, mas está previsto um sistema de rastreamento que permitirá ao equipamento seguir o sol constantemente, iluminando por mais tempo a região turística de

---

<sup>1</sup>A comuna é a unidade básica de organização territorial da Itália, equivalente ao município no Brasil e ao concelho em Portugal.

**Figura 1:** Espelho em funcionamento na Viganella vista do local de instalação do espelho.

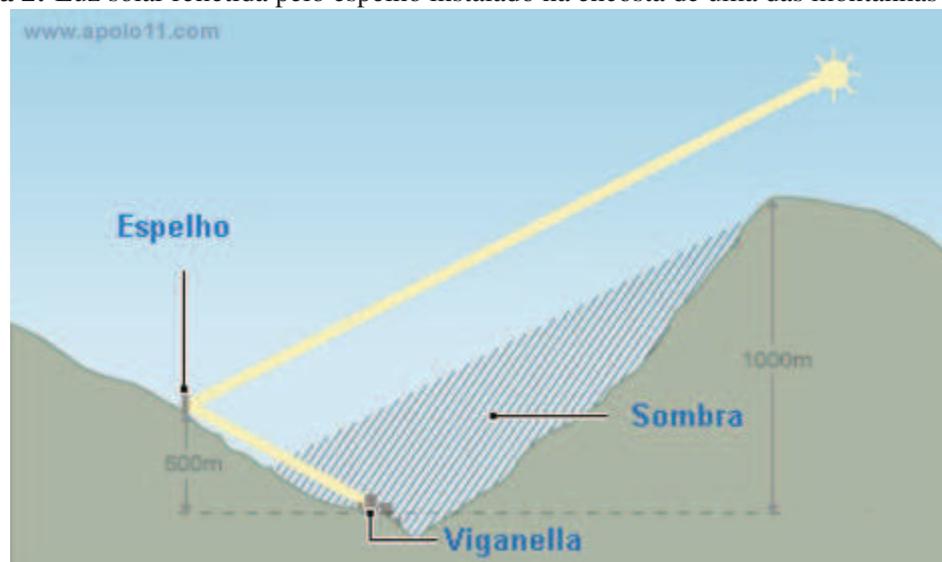


Fonte: VIGANELLA (2007)

Viganella. (VIGANELLA, 2007).

O trabalho aqui descrito iniciou dentro do projeto BEST (PAGOT, 2012). Com o desenvolvimento da pesquisa e a obtenção dos resultados previstos neste projeto, o Brasil estará dando um grande passo em direção a maior autonomia em relação a ferramentas computacionais de apoio ao planejamento sustentável de edifícios e cidades. Constitui verdadeiro paradoxo que nosso país, contando com recursos humanos de grande capacidade em áreas como arquitetura, urbanismo, ciência da computação e ciências geoespaciais não tenha ainda criado pontes para integrar conhecimentos destas áreas em benefício de uma maior qualidade de vida em nossas cidades. O projeto agrega diferentes laboratórios do Núcleo de Tecnologia Urbana da UFRGS (IPH, Engenharia Civil, Engenharia de Produção, Faculdade de Arquitetura e o LabCon da UFSC) e tem por objetivo o desenvolvimento de modelos computacionais voltados para a simulação e análise de desempenho de ambientes e infraestruturas urbanas. O projeto de investigação, impactos da Luz Natural sobre o Projeto de Edificações, abaixo descrito, integra o BEST e está sendo desenvolvido no SimmLab da Faculdade de Arquitetura.

**Figura 2:** Luz solar refletida pelo espelho instalado na encosta de uma das montanhas alpinas.



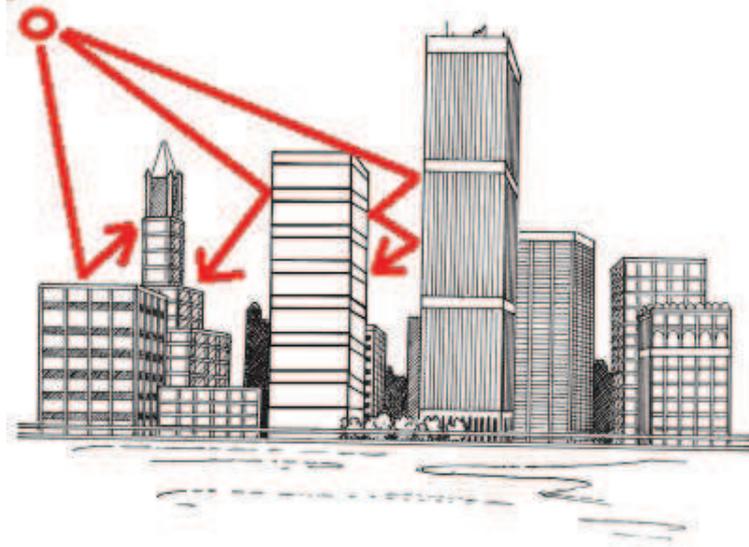
Fonte: VIGANELLA (2007)

## 1.1 Motivação

A preocupação de manter nossa vida passa necessariamente por questões de iluminação. Não há vida sem luz, como prova a Lei de Ciclo de Krebs (KREBS, 2013), os estudos de como evitar danos por conta do crescimento vertical das cidades vão em busca de alternativas que supram a necessidade de luz solar em abundância. Seja se tratando de energia solar ou luz artificial, a sombra por tempo indeterminado em um ambiente fechado, causa umidade, mofo, e uma série de complexos problemas ambientais decorrentes da falta de iluminação. Os engenheiros, ao gerarem esse tipo de problema, estão, mesmo que não percebam, cometendo um erro primário que ocasionará sérios danos aos seres vivos. Uma equivocada escolha do sistema de iluminação não só pode criar problemas com os equipamentos, instalações, manutenção das luminárias, mas também prejudicar a saúde de seres vivos.

O projeto de iluminação natural compreende desde o planejamento da acessibilidade direta à luz solar até o projeto de forma e escala dos edifícios e o estudo da reflexão provocada pelos raios solares. Deve ser considerado também o tipo de clima e temperatura, o volume do prédio e a topografia do terreno, de forma a apurar a orientação solar mais favorável e prevenir sombreamentos indesejados.

**Figura 3:** Representação da iluminação através de reflexão de raio de luz sobre superfícies.



Fonte: autor.

A Figura 3 mostra que os materiais que revestem as superfícies exteriores influenciam a temperatura do raio de luz e como o uso estratégico de materiais com uma boa reflexão, em determinados prédios, proporciona luz gerada por várias reflexões até chão. A diminuição da energia do raio de luz pela reflexão depende do tipo de matéria reflexiva.

A luz do dia apóia as atividades com a energia e proporciona os efeitos positivos para a saúde humana. Em um ambiente urbano denso, garantir a incidência de luz adequada nas janelas é de extrema importância no projeto da forma de construção (H D CHEUNG; CHUNG, 2005).

A simulação de iluminação de ambientes por computação gráfica permite a avaliação qualitativa e quantitativa de elementos e soluções de iluminação natural do ambiente no projeto arquitetônico. Com a ajuda das simulações tridimensionais é possível testar os parâmetros levantados pelo projetista para obter a melhor solução, em curto espaço de tempo, considerando o equilíbrio entre as necessidades funcionais, humanas e ligadas à saúde.

## 1.2 Objetivos

O objetivo principal dessa dissertação é analisar soluções de iluminação natural exterior em modelos virtuais, por meio da criação de um modelo de iluminação para o estudo de posicionamento de prédios em relação à luz natural. Para este fim torna-se necessário:

- Estudar modelos de iluminação.
- Criar cenários de iluminação com cálculo de iluminação em prédios.
- Adaptar um modelo de iluminação que permita a visualização da luz incidente nos prédios.
- Analisar o grau de iluminação em prédios individuais e em conjunto

## 1.3 Contribuições do Trabalho

Pode-se destacar, como sendo as contribuições de cunho originais mais importantes apresentadas neste trabalho, as seguintes:

- Um modelo de visualização e quantificação da incidência de luz natural em paredes de prédios.
- Um modelo de medida de incidência de luz natural em um grande conjunto de prédios
- Análise por componentes principais entre a incidência de luz natural ideal e a incidência de luz natural atual em um conjunto qualquer de prédios.

## 1.4 Organização

O trabalho aqui apresentado se organiza da seguinte forma: a seguir são apresentados conceitos básicos necessários à construção do simulador e análise dos resultados. Na Seção subsequente são apresentados alguns trabalhos relacionados à área de simulação de iluminação de prédios, bem como um comparativo entre estes

trabalhos. A seção Modelo de Iluminação de Prédios explica detalhadamente o modelo individual e global aqui proposto. Finalmente são apresentados alguns resultados no que tange as simulações propostas.



## 2 CONCEITOS BÁSICOS

### 2.1 Ray Tracing

Os conceitos básicos na área de Computação Gráfica são usados para a simulação da trajetória que os raios de luz percorrem no espaço até os objetos, atingindo a reflexão, refração e sombra de acordo com as características do objeto, e, por fim, os olhos do observador.

O traçado de raios possui um ponto inicial e uma direção. No algoritmo do *ray tracing* a direção de um raio é calculada para cada pixel do plano de projeção. A partir disto desenvolveu-se uma metodologia para calcular de forma aproximada a função de iluminação.

Essa estratégia se traduz em duas classes de modelos para o cálculo da iluminação:

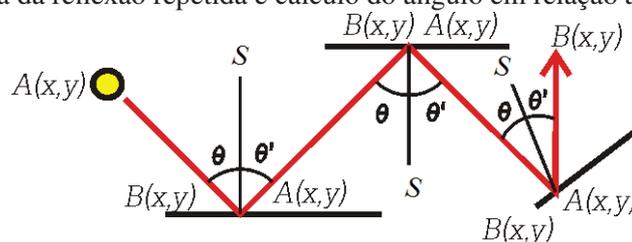
1. Modelos Locais: Somente a luz direta ou a primeira reflexão numa superfície são características geométricas, como distância e forma, para calcular medidas relativas entre componentes.
2. Modelos Globais: há contribuição direta das fontes de luz e indireto da reflexão das superfícies. As duas formas são necessárias: Traçado de raios e radiosidade<sup>2</sup>.

Por suas características, a função *ray tracing*  $f(x)$  pode ser obtida integrando-se as contribuições de todos os pontos  $y$  de todas as superfícies  $S$  da cena (Figura 4). Onde:

$R_u$ : a distância entre  $x$  e  $y$ .  $\theta$  e  $\theta'$ : são os ângulos  $\theta$  e  $\theta'$  com relação a  $y$ . Observamos que cada distância de  $x$  para  $y$  é idêntica àquela distância de  $y$  para  $x$ , portanto

<sup>2</sup>A radiosidade segue o modelo da natureza onde a reflexão do raio de luz salta de um objeto para o outro e em seguida ao olho do observador.

**Figura 4:** geometria da reflexão repetida e cálculo do ângulo em relação à linha bidimensional.



Fonte: autor.

$$L(x, \theta, \theta') = L(y, \theta, \theta')$$

Expressa-se o elemento diferencial de ângulo reto  $\theta'$  como

$$\begin{aligned} Rx &= Bx - Ax \\ Ry &= By - Ay \\ \text{if } (Ry > 0) &\text{ then } R = 180^\circ \text{ else } R = 0^\circ \\ \text{if } (ry = 0) \text{ and } (r = 0) \text{ and } (rx < 0) &\text{ then } \theta = 180^\circ \text{ else} \\ \text{if } (ry = 0) &\text{ then } \theta = 0^\circ \text{ else} \\ \theta &= \arctan\left(\frac{Rx}{Ry}\right) \frac{180^\circ}{\pi} + 90 \\ \theta' &= \theta + R; \end{aligned}$$

E continua com outra distância utilizando o mesmo cálculo anterior até atingir a parte externa da cena. Pode-se expressar a *ray tracing* incidente em  $x$  como uma integral das contribuições de todos os pontos  $y$ :

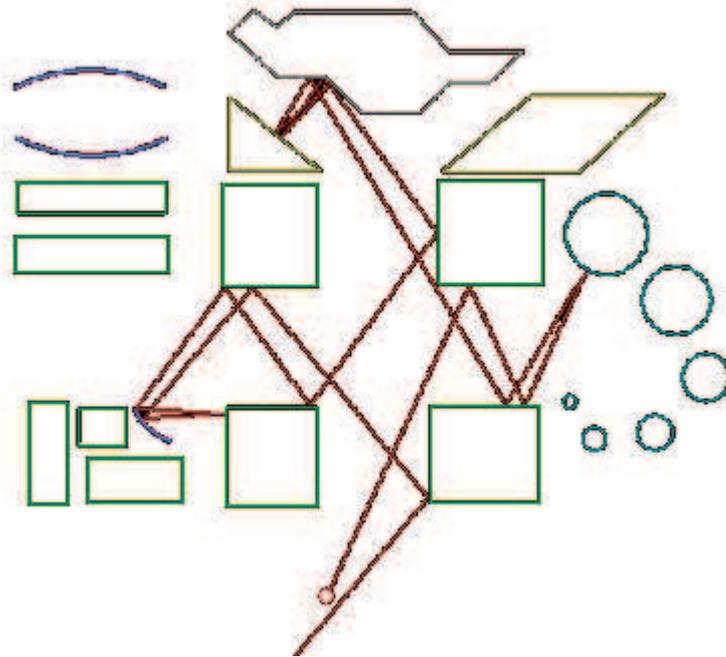
$$f(x) = \int_{y \in S} \frac{\cos\theta \cos\theta'}{\pi r^2}$$

Existem duas maneiras de computar o traçado dos raios: a maneira normal e a maneira inversa. Embora as duas tenham o mesmo princípio e finalidade - traçar o caminho dos raios para renderizar a imagem - as duas técnicas possuem uma grande diferença: o desempenho (GLASSNER, 1989).

A Figura 5 mostra que a técnica de *ray tracing* oferece uma ferramenta simples para aplicar e simular a iluminação em objetos. A simulação auxilia na verificação de quanto e onde a aplicação de luz é mais favorável. As técnicas de síntese de imagens obtêm resultados visuais mais próximo da realidade. Com isso pretende-se que o usuário observe a relativa simplicidade da técnica de *ray tracing*. Esta técnica está implementada com base em um conjunto de retas sobre uma forma plana normalmente retangular que, aplicando o algoritmo de angulação conforme a cor do objeto, obtém-se o resultado esperado.

Através da computação gráfica pode-se desenvolver modelos de plantas (ou arquiteturas) para várias aplicações. E para tal, é importante incluir o *ray tracing*: o tamanho do terreno deve ser equivalente ao tamanho do terreno real. A arquitetura deve levar em conta, em suas construções, o estudo de focos a partir do *ray tracing* de como calcular o alcance da luz e as interdependências de movimentos conforme a geometria

**Figura 5:** Linha vermelha representando o trajeto do feixe de luz refletindo nos objetos utilizando o conceito de *ray tracing*



Fonte: autor.

do sol ou das luzes artificiais. A posição da luz pode ser determinada através de posição inicial e final, enquanto a posição da luz pode ser decidida por processo computacional.

Durante a execução, ao verificar que um dado ponto é afetado pelo trajeto do algoritmo de *ray tracing*, calcula-se a origem e o destino de uma linha de dois pontos e verifica-se se o tipo de forma é compatível com o algoritmo. Como exemplo, a forma retangular é representada pela cor verde, então um algoritmo específico para as formas retangulares (definidos pela cor verde) é aplicada no cálculo de reflexão do *ray tracing*.

## 2.2 A análise de componentes principais

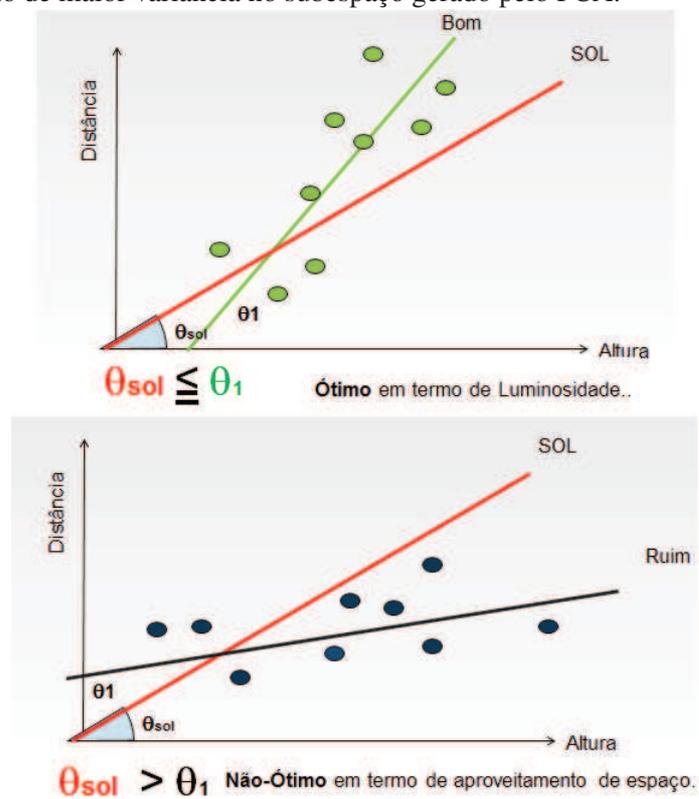
A análise de componentes principais ou *PCA* é uma técnica da estatística multivariada onde um grande número de variáveis relacionadas em um conjunto de variáveis não correlacionadas transformam-se em outro conjunto de variáveis, com a menor perda de informação possível, sendo que esta também busca eliminar algumas

variáveis originais que possuem pouca informação (VICINI, 2005). Basicamente consiste em uma técnica estatística que permite reduzir um modelo multivariado a um conjunto de poucas componentes, não correlacionadas, que carregam a maior parte da informação contida no modelo original. Atualmente, um dos principais usos da PCA vem sendo estudada por autores como (MORRISON, 1976), (SEBER, 1984), (REINEL, 1993), (JACKSON, 2012) e (WICHERN, 1989). Os aspectos teóricos dessa técnica foram adequadamente tratados em outros conjuntos de variáveis de dimensão equivalente denominadas de componentes principais. A PCA é suficiente para se referir a estes trabalhos, resultando nas informações disponíveis. Esse procedimento implica computacionalmente que toda a variância é comum ou não, mas ao longo do texto as referências indicarão trabalhos correlatos que complementam estas pesquisas. O objetivo da análise de componentes principais é abordar aspectos como a geração, a seleção e a interpretação dos componentes investigados (VICINI, 2005), que torna possível a interpretação ou análise da estrutura de autocorrelação dos dados observados. É possível aperfeiçoar os estudos futuros das técnicas utilizadas para a geração de relatórios baseados nos dados de níveis da iluminação e identificação de padrões, tais como tendência e periodicidade.

PCA, em termos matemáticos, realiza uma decomposição da matriz de dados nas variáveis originais no caso: altura ( $h$ ) e distância( $dx$ ) em novas variáveis decorrelacionadas que representa, respectivamente, as coordenadas das amostras e a contribuição de cada variável ao longo dos novos eixos que são chamados de componentes principais. Os valores de altura e distância representam respectivamente as alturas dos prédios e as distância entre dois prédios. A Figura 6 representa um quadro de posicionamento dos prédios, tabela da correlação linear entre os valores de distância e altura dos prédios em metros, e um quadro da visão intuitiva de PCA mostrando que a direção do eixo maior da forma elipse possui um poder explicativo máximo dos pontos observados. PCA converte a rotação dos pontos originais para as direções de maior variabilidade.

Desvio padrão, covariância, correlação, autovalor e autovetor são métodos necessários para se realizar uma PCA.

**Figura 6:** Dispersão dos valores observados - Distribuição bidimensional de amostras e navegação no eixo de maior variância no subespaço gerado pelo PCA.



Fonte: autor.

### 2.2.1 Matriz de dados $X$

Considere a situação em que observamos  $p$  características de  $n$  indivíduos de prédio. As características observadas são representadas pelas variáveis  $X_1 = h$  e  $X_2 = dx$ . A matriz de dados é de ordem  $n$  e  $p$  e normalmente denominada de matriz  $X$ .

$$X = \begin{bmatrix} h_1 & dx_1 \\ h_2 & dx_2 \\ h_3 & dx_3 \\ \vdots & \vdots \\ h_n & dx_n \end{bmatrix}$$

A estrutura de interdependência entre as variáveis da matriz de dados é representada pela matriz de covariância  $S$  ou pela matriz de correlação  $R$ . O entendimento dessa estrutura através das variáveis  $X_1 = h$  e  $X_2 = dx$ , pode ser na prática uma coisa complicada. Assim, o objetivo da análise de componentes principais é transformar essa estrutura complicada, representada pelas variáveis  $\mathbf{h} = (h_1, h_2, \dots, h_n)$ ,  $h_n$ , em uma outra estrutura representada pelas variáveis  $\mathbf{dx} = (dx_1, dx_2, \dots, dx_n)$ ,  $dx_n$  não correlacionadas e com variâncias ordenadas, para que seja possível comparar os indivíduos usando apenas as variáveis  $h_i$  que apresentam maior variância. A solução é dada a partir da matriz de covariância  $S$  ou da matriz de correlação  $R$ .

### 2.2.2 Matriz de covariância $S$

Covariância é uma medida bidimensional. A partir da matriz  $X$  de dados de ordem  $n$  e  $p$  podemos fazer uma estimativa da matriz de covariância  $\Sigma$  do prédio que representaremos por  $S$ . A matriz  $S$  é simétrica e de ordem  $p \times p$ . Verifica a dispersão, levando em consideração duas variáveis aleatórias. O que segue abaixo são as fórmulas da covariância e da matriz de covariâncias.

$$\hat{V}ar(\mathbf{h}) = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n}$$

$$\hat{C}ov(\mathbf{h}, \mathbf{dx}) = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})(dx_i - \bar{dx})}{n}$$

$$S = \begin{bmatrix} \hat{V}ar(\mathbf{h}) & \hat{C}ov(\mathbf{h}, \mathbf{dx}) \\ \hat{C}ov(\mathbf{h}, \mathbf{dx}) & \hat{V}ar(\mathbf{dx}) \end{bmatrix}$$

1.  $h$  e  $dx$  são listas de dados, onde  $h$  é a valor de altura e  $dx$  é valor da distância entre dois prédios.
2.  $\bar{h}$  e  $\bar{dx}$  são as médias das listas.  $h_i$  e  $dx_i$  representa cada um dos elementos das listas nas duas direções  $h$  e  $dx$ , na  $i$ -ésima posição.
3. A variável  $n$  representa o número de itens de dados obtidos. Se iniciar no índice zero, substituir por  $n - 1$  no denominador e no somatório.
4.  $\hat{V}ar(\mathbf{h})$  representa a variância que é a conjunto de altura x distância.
5.  $\hat{C}ov(\mathbf{h}, \mathbf{dx})$  representa a covariância que é a média do conjunto total de altura x distância.

Normalmente as características são observadas em unidades de medidas diferentes entre si, e neste caso, segundo (REGAZZI, 2000) é conveniente padronizar as variáveis  $X_j$  ( $j = 1, 2, 3, \dots, p$ ). A padronização pode ser feita com média zero e variância 1, ou com variância 1 e média qualquer.

Padronização com média zero e variância 1:

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}}{S(X_j)}, i = 1, 2, \dots, n \text{ e } j = 1 \text{ e } 2.$$

em que,  $\bar{X}$  e  $S(X_j)$  são, respectivamente, a estimativa da média e o desvio padrão da característica  $j$  que o desvio padrão de uma amostra de dados define o espalhamento desta amostra em torno da média. Calcula-se o desvio padrão da variável  $j$  através da equação abaixo,

$$s_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2}{n-1}}$$

onde  $s$  é o símbolo utilizado comumente para representar o desvio padrão de uma mostra,  $X$  é lista de dados, e  $\bar{X}$  é média da lista.

$$\bar{X}_j = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ij}}{n} \text{ e } s(x_j) = \sqrt{\hat{V}ar(x_j)}, j = 1 \text{ e } 2.$$

$$\sqrt{\hat{V}ar(X_j)} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2}{n-1} \text{ ou } \sqrt{\hat{V}ar(X_j)} = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ij}^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n X_{ij})^2}{n}}{n-1}$$

Após a padronização obtemos uma nova matriz de dados  $Z$  e  $R$ :

$$Z = \begin{bmatrix} h_1^* & dx_1^* \\ h_2^* & dx_2^* \\ h_3^* & dx_3^* \\ \vdots & \vdots \\ h_n^* & dx_n^* \end{bmatrix} = R$$

A matriz  $Z$  das variáveis padronizadas  $z_j$  é igual a matriz de correlação da matriz de dados  $X$ . Para determinar os componentes principais normalmente partimos da matriz de correlação  $R$ . É importante observar que o resultado encontrado para a análise a partir da matriz  $S$  pode ser diferente do resultado encontrado a partir da matriz  $R$ . A recomendação é que a padronização só deve ser feita quando as unidades de medidas das características observadas não forem as mesmas.

### 2.2.3 Determinação dos componentes principais

Os componentes principais são determinados resolvendo-se a equação característica da matriz  $S$  ou  $R$ , isto é:

$$\det[S - \lambda I] = 0$$

Sejam  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_p$  as raízes da equação característica da matriz  $S$ , então:

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 \dots \lambda_p - 1 > \lambda_p$$

Para cada autovalor  $\lambda_i$  existe um autovetor  $A$ :

$$A = \begin{bmatrix} a_{i1} \\ a_{i2} \\ \vdots \\ a_{ip} \end{bmatrix}$$

Sendo  $A$  o autovetor correspondente ao autovalor  $\lambda_i$ , então o  $i$ -ésimo componente principal é dado por:

$$Y_i = A_{i1}X_1 + A_{i2}X_2 + \dots + A_{ip}X_p$$

Os componentes principais apresentam as seguintes propriedades:

1. A variância do componente principal  $Y_i$  é igual ao valor do autovalor  $\lambda_i$

$$\hat{V}ar(Y_i) = \lambda_i$$

2. O primeiro componente é o que apresenta maior variância e assim por diante:

$$\hat{V}ar(Y_1) > \hat{V}ar(Y_2) > \dots > \hat{V}ar(Y_p)$$

3. O total de variância das variáveis originais é igual ao somatório dos autovalores que é igual ao total de variância dos componentes principais:

$$\sum \hat{V}ar(Y_1) = \sum \lambda_i = \sum \hat{V}ar(Y_i)$$

4. Os componentes principais não são correlacionados entre si:

$$\hat{C}ov(Y_i, Y_j) = 0$$

#### 2.2.4 Contribuição de cada componente principal

A contribuição  $C_i$  de cada componente principal  $Y_i$  é expressa em porcentagem. É calculada dividindo-se a variância de  $Y_i$  pela variância total. Representa a proporção de variância total explicada pelo componente principal  $Y_i$ .

$$C_i = \frac{\hat{V}ar(Y_i)}{\sum \hat{V}ar(Y_i)} 100 = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} 100 = \frac{\lambda_i}{\text{traço}(S)} 100$$

Correlação é construída usando os dados que foram padronizados para obter média e desvio padrão. É adequada quando as variáveis forem medidas em unidades diferentes ou quando a variância de cada variável é muito diferente das outras. Pode ser calculada com variâncias e covariâncias:

$$\hat{C}orr(i, j) = \frac{\hat{C}ov(\mathbf{h}, \mathbf{dx})}{\sqrt{V_i V_j}}$$

1.  $\hat{C}ov(\mathbf{h}, \mathbf{dx})$  representa a covariância.

2.  $V_i$  é variância de variável de  $i$  e  $V_j$  é variância de  $j$ .  $i$  e  $j$  são simplesmente índices nas direções  $X$  e  $Y$ .
3.  $\hat{C}orr(i, j)$  representa a correlação do conjunto total de  $h \times dx$ .

Um autovalor é uma escalar de um operador linear da matriz quadrada se existir um vetor diferente de zero tal que  $Sv = \lambda v$ . O vetor  $v$  é chamado autovetor. Um autovetor é uma direção que é preservada por um transformação linear associado ao autovalor  $\lambda$ .

Para calcular o autovalor de uma matriz  $S = \begin{bmatrix} \hat{V}ar(\mathbf{h}) & \hat{C}ov(\mathbf{h}, \mathbf{dx}) \\ \hat{C}ov(\mathbf{h}, \mathbf{dx}) & \hat{V}ar(\mathbf{h}) \end{bmatrix}$  e resolver a equação característica  $det(S - \lambda I) = 0$ :

$$S - \lambda I = \begin{bmatrix} \hat{V}ar(\mathbf{h}) & \hat{C}ov(\mathbf{h}, \mathbf{dx}) \\ \hat{C}ov(\mathbf{h}, \mathbf{dx}) & \hat{V}ar(\mathbf{h}) \end{bmatrix} - \lambda \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{V}ar(\mathbf{h}) - \lambda & \hat{C}ov(\mathbf{h}, \mathbf{dx}) \\ \hat{C}ov(\mathbf{h}, \mathbf{dx}) & \hat{V}ar(\mathbf{h}) - \lambda \end{bmatrix}$$

$$det(S - \lambda I) = (\hat{V}ar(\mathbf{h}) - \lambda)(\hat{V}ar(\mathbf{h}) - \lambda) - (\hat{C}ov(\mathbf{h}, \mathbf{dx})\hat{C}ov(\mathbf{h}, \mathbf{dx})) = 0$$

A importância de um componente principal é avaliada por meio de sua contribuição, isto é, pela proporção de variância total explicada pelo componente. A soma dos primeiros ( $k < p$ ) autovalores representa a proporção de informação retida na redução de  $p$  para  $k$  dimensões. Com essa informação podemos decidir quantos componente vamos usar na análise, isto é, quantos componentes serão utilizados para diferenciar os indivíduos. Não existe um modelo estatístico que ajude nesta decisão.

A reta que passo pelo ponto médio dos pontos  $(h_i, dx_i)$ , e que tem a direção do autovalor associado ou maior autovalor  $\lambda_1$  de  $S$ , é aquele que melhor aproxima aqueles pontos.

O objetivo é criar um gráfico de ordenação com a quantidade de objetos mais próximas e mais similares entre si, considerando as variáveis sintetizadas em cada eixo. O método garante que: o primeiro eixo de ordenação representa a maior variação nos dados (ou seja, ele maximiza a variação nos dados, ou possui as variáveis que mais diferenciam os dados); E os eixos de ordenação (ou componentes principais) são ortogonais. Autovalores são a porcentagem de explicação de cada eixo, ou a porcentagem de variação nos dados que o eixo explica. Já os autovetores são os coeficientes das combinações lineares produzidos a fim de maximizar a variância dos dados, e assim discriminar as unidades. Serão maiores para aquelas variáveis que foram mais importantes na formação do eixo.

Ao longo do desenvolvimento do texto, serão fornecidos trechos de pseudocódigos ou códigos em linguagem de programação DELPHI relativos às etapas de cálculo, geração de informações e exibição dos gráficos, com o intuito de facilitar a compreensão, e favorecer o desenvolvimento de novos trabalhos a partir das informações fornecidas. Espera-se deste modo reduzir o tempo de pesquisa das abordagens que já são consagradas e assim permitir uma concentração do estudo de simulação da iluminação que utilizando-se a biblioteca OpenGL. Uma vez que, em termos teóricos, já podemos calcular os componentes principais de dados funcionais, precisamos agora dispor de um método computacional capaz de lidar com esse tipo de informação.



### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo dos trabalhos existentes e relacionados ao tema da presente proposta demandou diversas etapas de trabalho ao longo do desenvolvimento da pesquisa, tendo sua busca direcionada aos trabalhos voltados às simulações de iluminação.

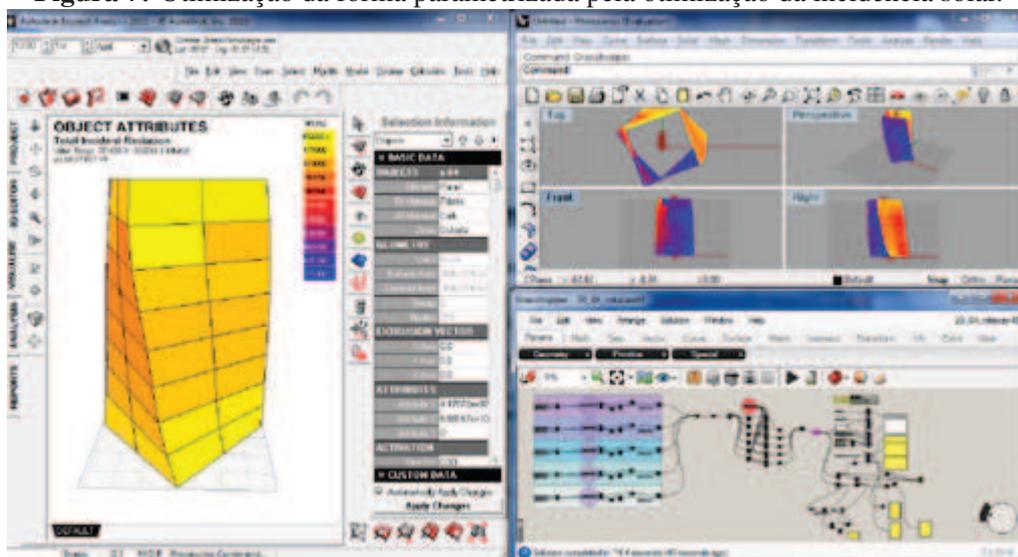
Algoritmos de simulação de iluminação tem beneficiado mutuamente duas áreas de desenvolvimento. A primeira, a renderização de imagens foto-realísticas (SHAKESPEARE, 2004), da área de produção de imagens. A segunda, a visualização de base física, também conhecida como "renderização preditiva"(SHAKESPEARE, 2004), que aborda a representação da realidade em condições determinadas que são exemplos de algoritmos utilizados para simulação de iluminação: cálculos diretos utilizados para a iluminação artificial, algoritmo de dependência de visão, algoritmo de dependência de cenário, abordagens integradoras (CARLOS E. OCHOA MYRIAM B.C. ARIES, 2010). Dentre as ferramentas de simulação existentes hoje, destaca-se o Radiance (G. WARD SHAKESPEARE, 1998), que continua a ser o mais influente e recebeu um extenso número de técnicas de integração e caracteriza-se como uma ferramenta para fins gerais, que resolve um grande número de problemas de simulação de iluminação. Tem sido extensivamente validado e incorporado em outras ferramentas. Contudo não tem muitas características relacionadas ao usuário porque faltou os especializados de iluminação mas existe o componentes de realidade das condições determinados por lei física, como uma boa interface, por exemplo. Outros softwares podem ser citados como ferramentas para design de iluminação: AGi32 (AGI 32, 2010), DIALux (DIPL.-ING. DIETER POLLE, 2010), e Relux (K.R SHAILESH, 2010). Estes suportam diversas formas geométricas para trabalhar com *ray tracing*, radiosidade e afins. Suas características incluem seus próprios sistemas CAD e um banco de dados que permite ao usuário selecionar componentes de iluminação. Outro aspecto é a capacidade de importar bibliotecas de modelos tridimensionais a partir de formatos padronizados, possibilitando a reutilização de modelos construídos para outros fins ou alguns modelos complexos desenvolvidos em ferramentas especializadas como pacotes CAD (ROY, 2000).

Vannini (VANNINI, 2011) explora a forma de planos de fachadas de edifícios vinculada a incidência solar, potencializando a aplicação de sistemas fotovoltaicos<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup>O efeito fotovoltaico é a criação de tensão elétrica ou de uma corrente elétrica correspondente num

**Figura 7:** Otimização da forma parametrizada pela otimização da incidência solar.



Fonte: Vannini (2011)

A proposta deste trabalho, diferente do trabalho de Vannini, explora diversas formas de fachadas de edifícios, sendo estas planas ou curvilíneas, para que sejam capazes de refletir a luz solar em diversos ângulos por sua própria estrutura fundamental ou com o auxílio de painéis refletores.

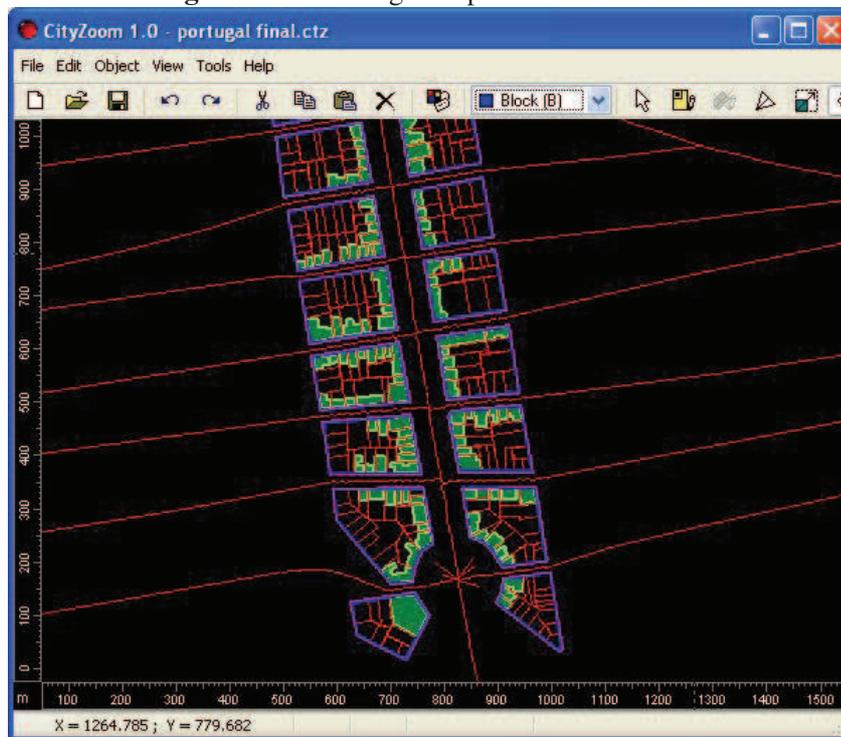
CityZoom(PAGOT, 2012) é um o software para simulação de arquitetura e urbanismo. Esse projeto vem desenvolvendo tecnologias de simulação envolvendo o acesso à luz (GRAZZIOTIN, 2003), Figura 7. A principal diferença do CityZoom se comparado a um CAD (LALIT NARAYAN, 2008) ou GIS (TOMLINSON, 2011) é que um modelo específico de cidade foi desenvolvido. Dados são representados em um modelo orientado a objeto que representa a estrutura urbana (cidades, quadras, ruas, lotes, prédios, etc.) de tal forma que a informação pode ser obtida em qualquer nível. Cada modelo de desempenho no ambiente CityZoom opera dentro de sua parte correspondente na estrutura computacional, afetando todos os objetos e modelos relacionados. Integração de modelos é possível, uma vez que a correlação entre cada parte é determinada pelo próprio modelo (exemplo: um prédio é contido por um lote, e um conjunto de lotes é contido por uma quadra).

O ambiente CityZoom é dividido de apresentar módulos como itens com bullets:

---

material, após a sua exposição à luz.

**Figura 8:** Blockmagic na plana de urbanismo.



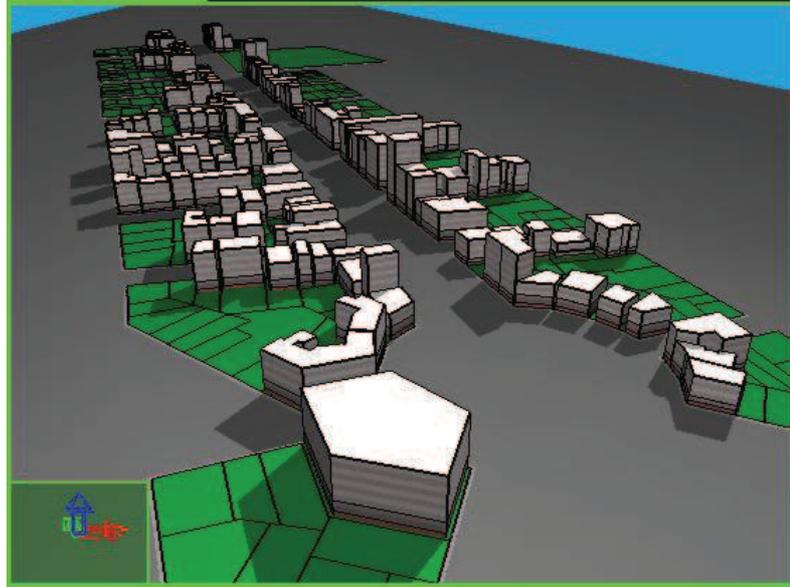
Fonte: Vannini (2011)

BlockMagic: o modelo para simulação do potencial construtivo de lotes urbanos, baseado nas Regras do Plano Diretor. Ele pode gerar rapidamente um grande conjunto de prédios nos mais diferentes cenários urbanos, ou validar edificações construídas pelo usuário nas Figuras 8, 9 e 10.

AxiMagic: a Figura 11 apresenta uma ferramenta para análise usando sintaxe espacial com características similares. Ele opera segundo dados axiais, e utiliza uma variedade de técnicas de Sintaxe Espacial e Teoria dos Grafos para prever o comportamento de certas variáveis envolvidas em simulação de tráfego urbano, como a integração espacial (ou sua inversa) de qualquer rua em relação demais.

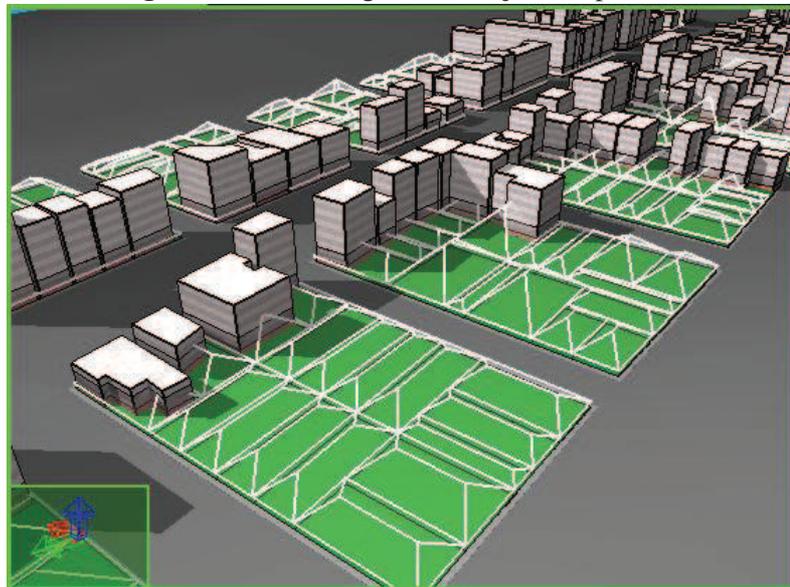
Mosaic: a Figura 12 apresenta uma ferramenta de correlação de modelos que faz parte do CityZoom. Esta ferramenta converte os dados existentes na estrutura da cidade (vetorial) para uma grade de células (bitmap). Esses dados podem ser inseridos pelo usuário ou resultantes de simulações. A grade obtida é uma malha regular sobre a cidade. A malha se torna uma imagem que pode ter uma resolução em pixels de tamanho

**Figura 9:** Blockmagic na visualização em 3D.



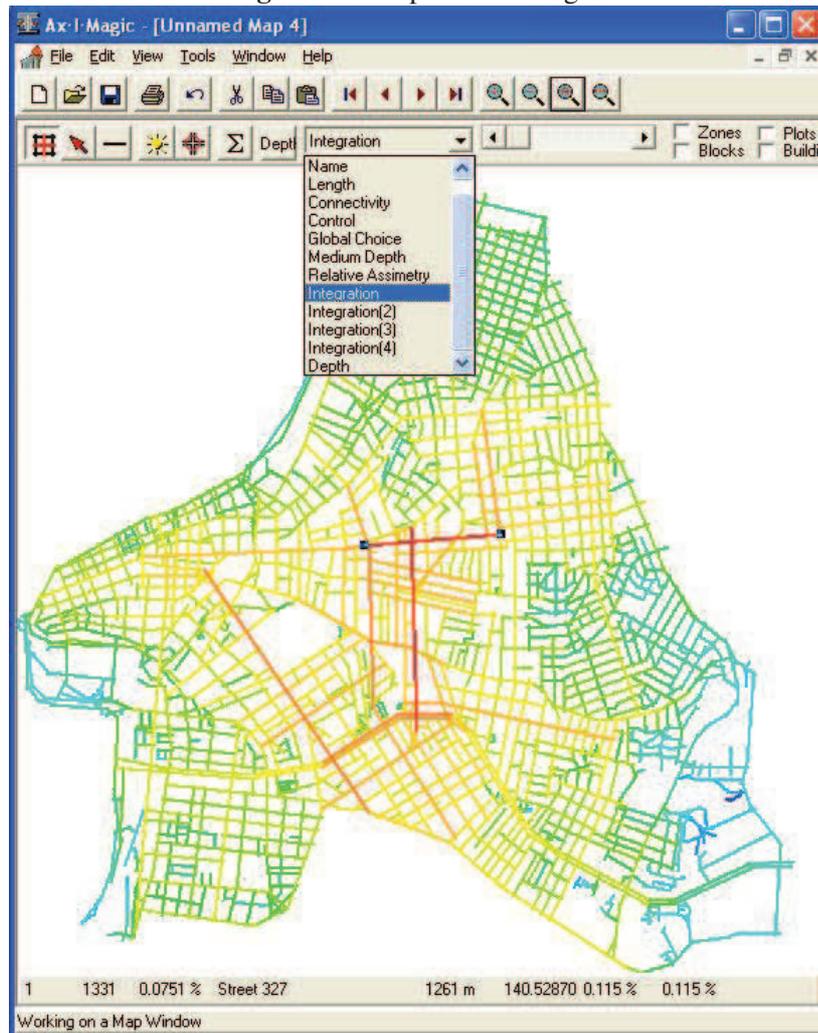
Fonte: Vannini (2011)

**Figura 10:** Blockmagic - simulação dos prédios.



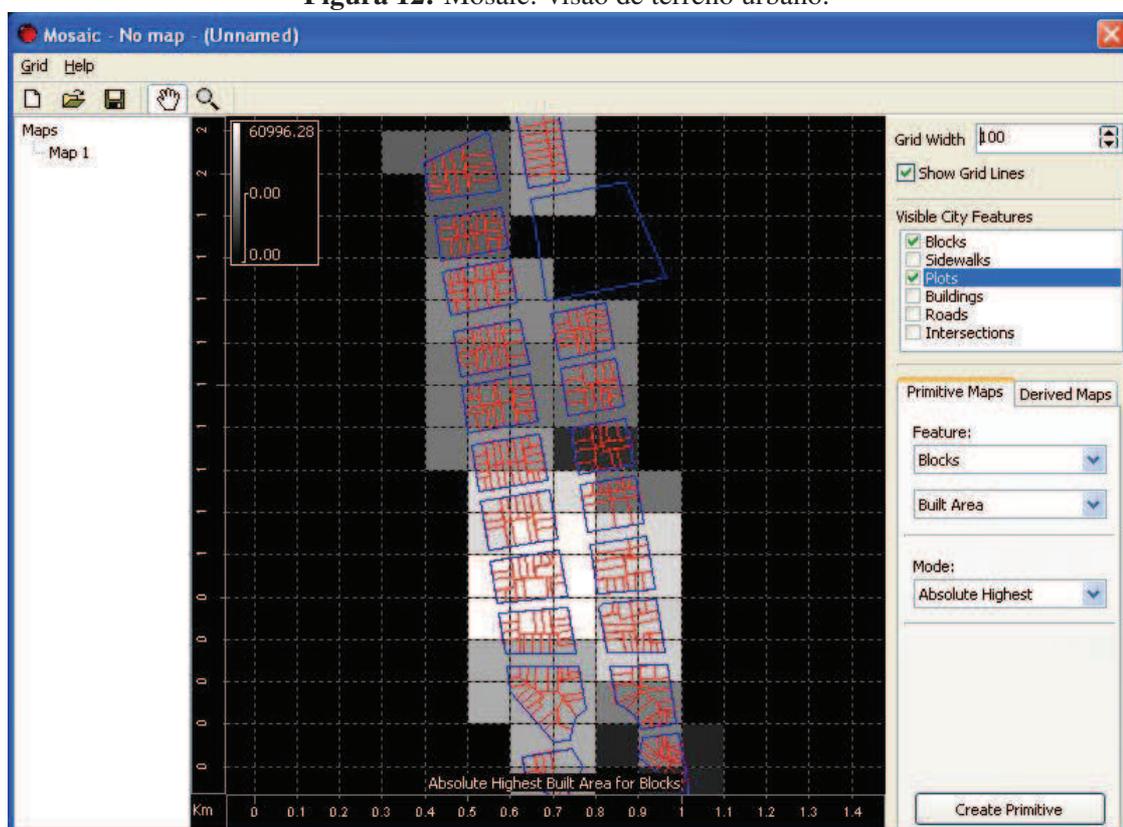
Fonte: Vannini (2011)

Figura 11: Mapa no AxiMagic.



Fonte: Vannini (2011)

**Figura 12:** Mosaic: visão de terreno urbano.



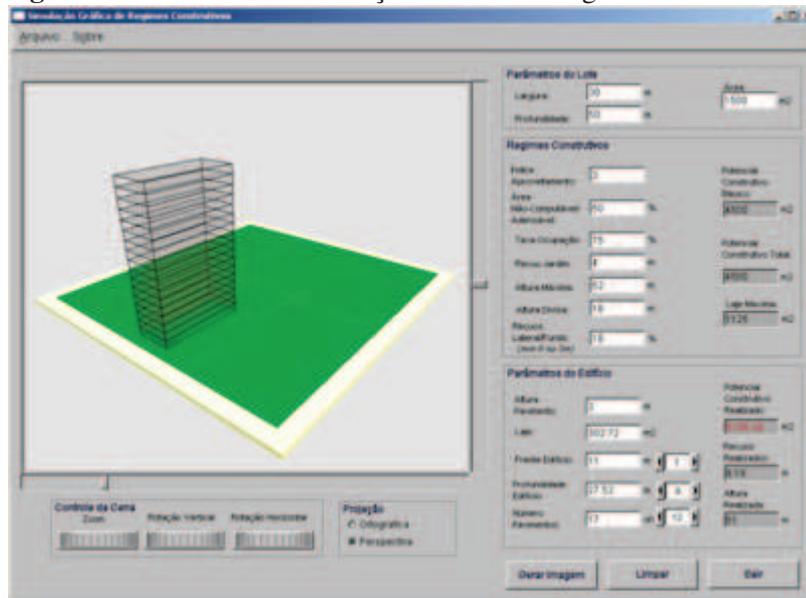
Fonte: Vannini (2011)

arbitrário, e técnicas de processamento de imagens podem ser usadas.

O estudo de Cheng e Chung (H D CHEUNG; CHUNG, 2005) explica que a iluminação natural proporciona efeitos positivos na saúde humana e na economia de energia. Foi sugerido que dependendo da densidade de um ambiente urbano, deve haver incidência de luz adequada no ambiente edificado. Esta relação entre incidência de luz no exterior e no interior chama-se Fator de Luz do Dia (VDF). No entanto, existe uma falta de método para o cálculo do VDF. Seus estudos contribuem para avaliar o melhor tipo de iluminação de ambientes dependendo das atividades realizadas neste, auxiliando na escolha do material utilizado em janelas e fachadas, além de fornecer resultados para comparação entre métodos de simulação de iluminação.

Júlio Vargas e Isabel Silva (SILVA, 2009) realizaram um trabalho de reflexão e ação da luz sobre a cidade e, especificamente, sobre a morfologia urbana, explorando as

**Figura 13:** Software de Simulação Gráfica de Regimes Construtivos.



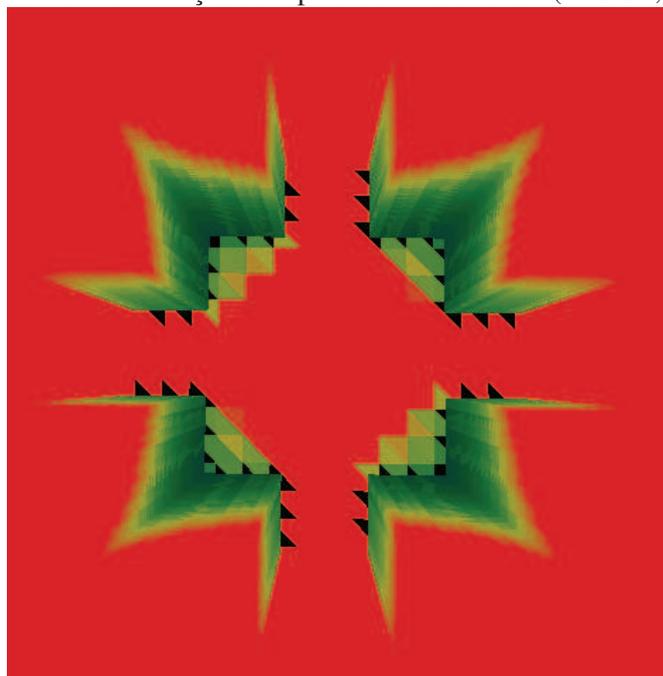
Fonte: Silva (2009)

potencialidades da computação gráfica e das novas tecnologias da informação, tendo em vista que o processo divisional do planejamento urbano demanda rapidez e precisão e exige dos agentes recursos de exposição de informações transparentes e confiáveis. Neste universo – dos chamados "Sistemas de Suporte à Decisão"(SSP) – apresenta-se como demanda recorrente a aplicação dos parâmetros normativos que traduzem as diretrizes da política urbana dos municípios – dentre os quais os mais importantes para a configuração da cidade são as chamadas Normas de Ocupação do Solo, mais comumente conhecidas como regimes construtivos. Estes, ao restringirem por força de lei o tamanho, o porte e a forma das edificações que podem ser erguidas sobre os lotes urbanos, definem os padrões de ocupação do território da cidade como um todo, constituindo o que se conhece por morfologia urbana.

Assim, o projeto proposto destina-se à apresentação gráfica e à simulação interativa de regimes urbanísticos através da utilização de técnicas da computação gráfica como a Figura 13 apresenta. Para tanto, foi desenvolvida uma ferramenta que permite a entrada de dados numéricos e a geração da representação visual correspondente, transformando a simbologia em geometria e topologia.

O trabalho de Christian Pagot (PAGOT, 2012) faz a análise da luz diurna e usa o

**Figura 14:** Visualização de 4 prédios. Visão aérea. (PAGOT, 2012)



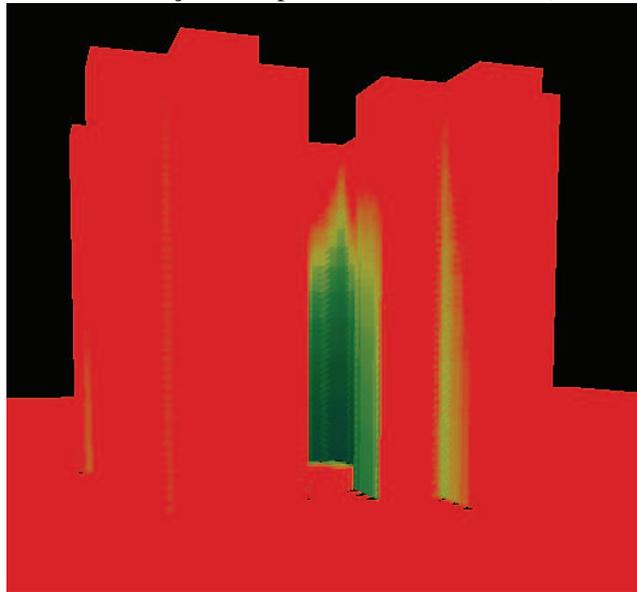
Fonte: Pagot (2012)

FLDV proposto por Cheung e Chung (H D CHEUNG; CHUNG, 2005) que informa a razão entre a iluminação incidente em um ponto localizado sobre uma superfície vertical como, por exemplo, a parede de um prédio, e a iluminância total disponibilizada por um céu sem obstruções.

As Figuras 14 e 15 demonstram a distribuição de luz e sombra em uma edificação de quatro prédios, sendo que o vermelho representa a parte que é mais atingida pela luz e o verde tem mais sombra. O resultado demonstra as cores de nível de iluminação das paredes ou janelas. A cor azul mostra a menos incidência solar; a cor verde mostra média, e a cor amarela mostra alto nível de incidência. A cor vermelha mostra 100% de incidência solar desde o amanhecer. O trabalho implementa basicamente a localização dimensional de pontos no espaço. Nesse contexto, dados uma forma e um ponto de consulta especificado por suas coordenadas, objetiva-se encontrar a região da forma que contém aquele ponto. Note-se que algumas formas são nada mais que uma subdivisão do plano em regiões, constituindo uma subdivisão planar.

O trabalho de Spyros Stravoravdis e Andrew Marsh (ANDREW

**Figura 15:** Visualização de 4 prédios. Visão lateral. (PAGOT, 2012)



Fonte: Pagot (2012)

MARSH STRAVORAVDIS, 2012) apresenta métodos para lidar com problemas de iluminação solar em ambientes urbanos densos, especialmente onde as edificações estão ficando cada vez mais altas, o que torna a iluminação natural uma comodidade cada vez mais escassa, transformando-se em um risco para a saúde de seus habitantes. Isto deve-se principalmente aos complexos e dinâmicos efeitos obscurecedores presentes nas superfícies dos edifícios. Quantificar a precisão desses efeitos é a chave para prever as reduções na disponibilidade solar, que por sua vez, pode afetar significativamente o comportamento térmico dos edifícios bem como aumentar o potencial de utilização de energias renováveis. Por conseguinte, é necessária a utilização de ferramentas de simulação para prever estes efeitos complexos.

Além disto, a legislação cada vez mais exigente requer planejadores, arquitetos e designers para cumprir os limites aceitáveis no acesso a luz solar e capazes de avaliar o impacto que novos edifícios têm em edifícios circundantes. Por isso, é necessário dispor da informação de disponibilidade solar e luz do dia para qualquer área urbana, de uma forma visual, de modo que uma avaliação pode ser feita em ambos os edifícios existentes e não-construídos.

Para abordar esta questão, (ANDREW MARSH STRAVORAVDIS, 2012) propõem

dois métodos para avaliar e visualizar, de uma forma significativa, a disponibilidade de luz solar nas cidades. A primeira parte de seu trabalho lida com o mapeamento da radiação solar e outras métricas nas superfícies dos edifícios, enquanto a segunda parte trata de calcular a variação espacial na disponibilidade de luz solar ao longo de toda uma região não construída de uma cidade.

### 3.1 Comparativo entre os sistemas

As comparações entre os sistemas são baseadas na interface e representação gráfica como mostra a Tabela 1.

O sistema CityZoom destaca-se por apresentar uma avançada estrutura de dados e aperfeiçoado ambiente gráfico e de animação, mas requer hardware gráfico potente e grande capacidade de armazenamento em disco. Incorporam-se neste as ferramentas Blockmagic, Mosaic e Aximagic. Já o sistema BEST apresenta baixa eficiência nos cálculos geométricos, completando as tarefas de cálculo em um espaço maior de tempo.

Enquanto o sistema SSGRC demonstra vários componentes mínimos de configuração e simulação, o sistema RADIANCE apresenta o algoritmo de *ray tracing* "BlackWard" e cenários de radiação de luz. Freeware e de código aberto, é utilizado para propósitos gerais.

O sistema AGi32 apresenta cálculos diretos, radiosidade e limites de *ray tracing*. Este software é pago, caracteriza-se como integração entre design e iluminação. E o sistema Relux apresenta os mesmos algoritmos do AGi32, porém é freeware e livre de propriedade de software.

**Tabela 1:** Comparação dos Softwares.

Descrição	Softwares					
	CityZoom	BEST	SSGRC	Radiance	AGi32	Relux
<i>Ray tracing</i> linear				X	X	X
Forma curvilíneas				X	X	X
Indicação da direção do Sol			X	X	X	X
Representação de sombra				X	X	X
Representação Térmica	X	X				
Iluminação artificial e posicionamento livre em 3D		X		X	X	

Este trabalho apresenta um método composto de um conjunto de regras para a geração de estruturas formais. Outro método visa a integração entre software de modelagem e simulação solar através de procedimentos de otimização geométrica de plano e curva com *ray tracing*. Tais métodos apoiam na otimização de ângulos estruturais de edificações que permitem ligar a luz solar considerando suas variações de incidência ao longo de um período de tempo.



## **4 MODELO DE ILUMINAÇÃO DE PRÉDIOS**

O modelo aqui proposto tem o objetivo de simular a quantidade de incidência de luz solar na parte exterior dos prédios considerando a altura e a proximidade dos prédios adjacentes, horário e localização geográfica. Este capítulo descreve, inicialmente, a simulação de iluminação em um conjunto de prédios, porém, com o objetivo específico de analisar a quantidade de iluminação diária, por prédio e por fachada. Em seguida, é apresentado uma simulação e análise global da iluminação de um conjunto de prédios distribuídos em espaços bidimensional e tridimensional. A última seção apresenta alguns estudos complementares realizados durante este trabalho relativos à reflexão da luz. Apesar do fruto destes estudos não se inserirem no objeto principal de estudo desta dissertação, eles servirão como ponto de partida para trabalhos futuros onde a componente de reflexão da luz entre os prédios será considerada. Neste caso, devem ser considerados parâmetros adicionais para as simulações como o grau de reflexibilidade dos materiais empregados na construção dos prédios.

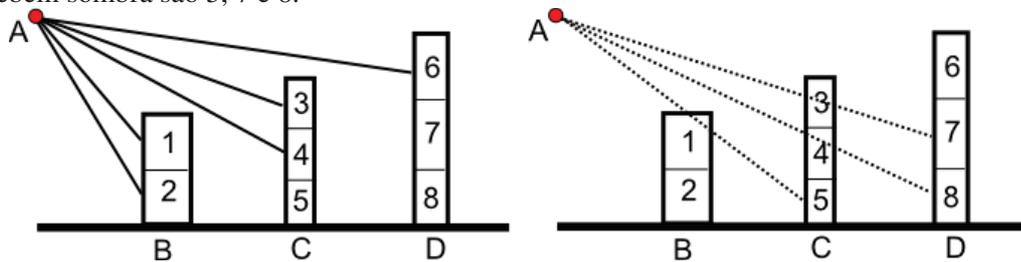
### **4.1 Simulação do Grau de Iluminação por Prédio**

Esta primeira simulação objetiva calcular e visualizar a quantidade de incidência de luz solar nas paredes de cada prédio em diferentes posições solares durante o dia. Inicialmente o usuário constrói o ambiente distribuindo os objetos que representam os prédios em uma planta urbana. Neste cenário tridimensional é possível determinar a angulação da posição solar conforme a longitude e latitude de onde se localiza o conjunto de prédios da simulação e o período do dia para visualização da incidência solar nos prédios.

#### **4.1.1 Incidência de Iluminação Solar**

Os paredes dos prédios são sub-divididos em partes para que se possa calcular e visualizar a incidência dos raios solares de maneira parcial. Desta maneira, por exemplo, um prédio em determinada hora do dia pode receber apenas luz solar em 1/3 de sua fachada devido a oclusão dos raios em função de outros prédios, enquanto que em um outro horário (próximo ao meio-dia, por exemplo) pode receber raios solares em toda

**Figura 16:** Análise de incidência solar em prédios em um período. As frações das paredes que recebem sombra são 5, 7 e 8.



Fonte: autor.

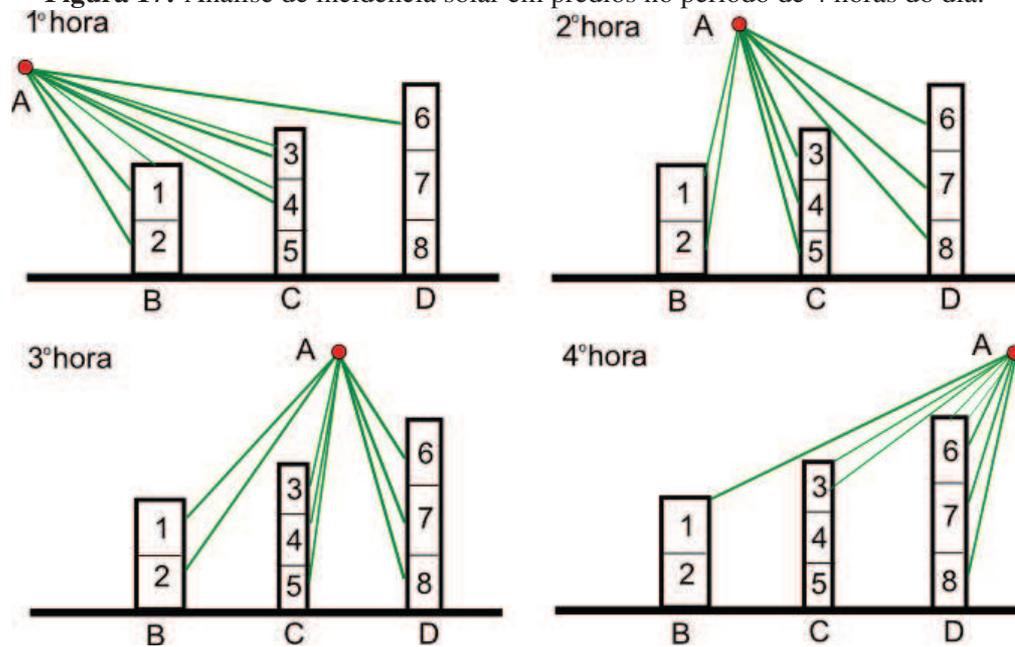
fachada. Para que se possa calcular os níveis de iluminação ou temperatura em cada fração das paredes de cada prédio são necessários calcular a intersecção entre raios solares e os prédios. Para isto se usou a técnica de ray-tracing com origem dos raios no sol e destino no meio de cada retângulo que subdivide o prédio.

A Figura 16 mostra um passo a passo desde a origem do raio solar e o destino na fração da parede em uma representação bidimensional. Na Figura 16 a letra A representa o sol; As letras B, C e D representam os prédios e os números 1 até 8 representam as frações das paredes. Observa-se que as linhas contínuas representam os raios onde não há obstrução e as linhas pontilhadas representam os raios que são obstruídos.

A Figura 17 mostra o tempo de quatro períodos e analisa o nível de iluminação. Nota-se que conforme o horário do dia a obstrução varia em função da angulação de incidência de luz solar e altura dos prédios próximos.

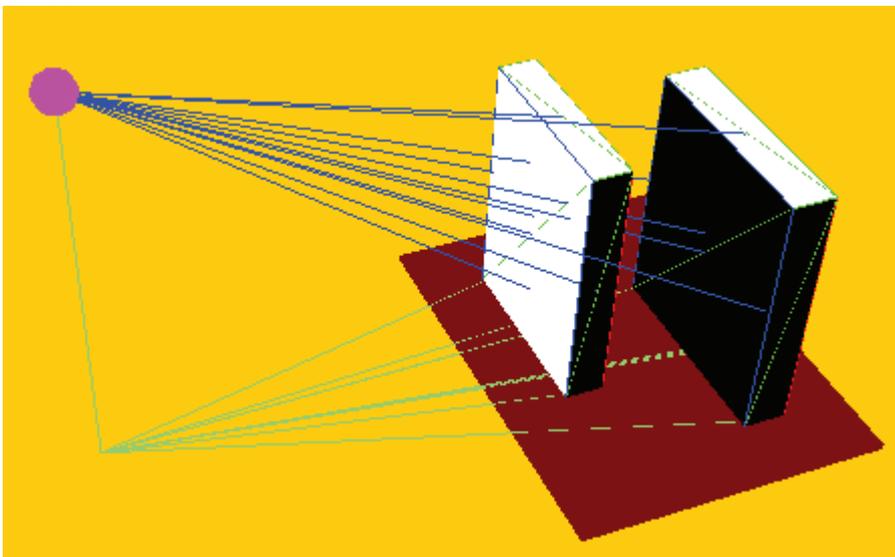
A Tabela 2 apresenta o resultado de tempo de quatro períodos de tempo relativo a Figura 17. A letra "v" representa verdadeiro quando há incidência de sol. As Figuras 18 e 19 representam a aplicação do cálculo de intersecção da luz solar em prédios tridimensionais. A primeira em apenas uma hora do dia e a segunda apresenta uma visualização de todos os raios que atingem o prédio no período de 12 horas.

**Figura 17:** Análise de incidência solar em prédios no período de 4 horas do dia.



Fonte: autor.

**Figura 18:** Incidência de luz em determinada hora com representação da intersecção de luz no prédio anterior.



Fonte: autor.

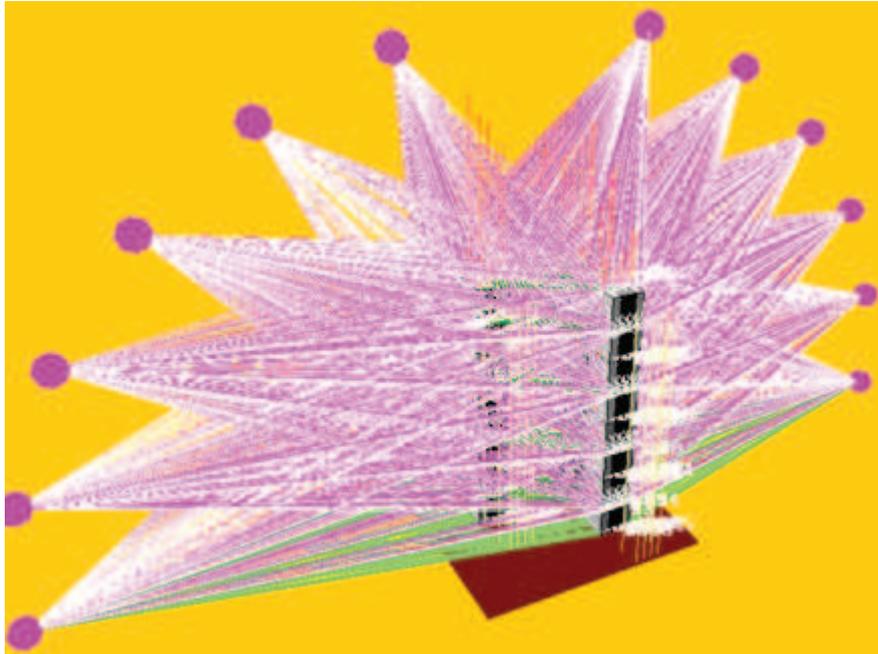
**Tabela 2:** Resultado de 4 períodos.

<b>Prédio</b>	<b>Lado</b>	<b>1 hora</b>	<b>2 hora</b>	<b>3 hora</b>	<b>4 hora</b>	<b>Total</b>	<b>Média</b>	
B	Parte 1	Direito	F	V	V	V	3	75%
	Parte 1	Esquerdo	V	F	F	F	1	25%
	Parte 2	Direito	F	V	V	F	2	50%
	Parte 2	Esquerdo	V	F	F	F	1	25%
C	Parte 3	Direito	F	F	V	V	2	50%
	Parte 3	Esquerdo	V	V	F	F	2	50%
	Parte 4	Direito	F	F	V	F	1	25%
	Parte 4	Esquerdo	V	V	F	F	2	50%
	Parte 5	Direito	F	F	V	F	1	25%
	Parte 5	Esquerdo	F	V	F	F	1	25%
D	Parte 6	Direito	F	F	F	V	1	25%
	Parte 6	Esquerdo	V	V	V	F	3	75%
	Parte 7	Direito	F	F	F	V	1	25%
	Parte 7	Esquerdo	F	V	V	F	2	50%
	Parte 8	Direito	F	F	F	V	1	25%
	Parte 8	Esquerdo	F	V	V	F	2	50%

#### 4.1.2 Visualização por cores de incidência solar e temperatura

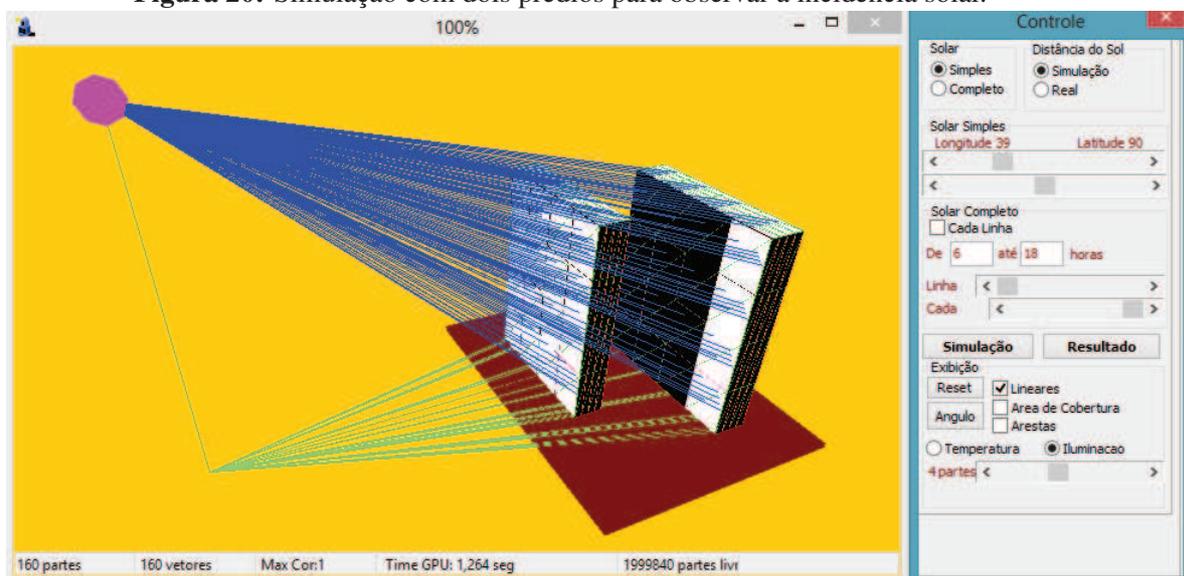
Conforme a quantidade de incidência de luz solar e estação do ano, a temperatura das paredes dos prédios pode variar. Na visualização aqui apresentada, a temperatura apresenta cores tendentes ao vermelho se esta for alta ou azul se for baixa, representando a temperatura média, calculada na razão entre o horário atual e o total de períodos (horas) determinados na simulação. No caso de incidência de raios solares, quando mais branca for a cor, mais raios recebeu o objeto, ou parte dele. Quando menos raios este tiver recebido a cor tenderá para o preto. Análogo à temperatura, a incidência de raios é calculada na razão entre o horário atual e o total de períodos (horas) determinados na simulação. A Figura 20 apresenta uma visualização da incidência dos raios solares em uma hora do dia com o painel de opções do usuário que será detalhado a seguir. Já Figura 21 apresenta o resultado de uma simulação de um intervalo pré-estabelecido de horas. Neste caso, a visualização não mostra os raios solares mas apenas as cores em escala de cinza representado a quantidade de incidência de luz no período pré-selecionado.

**Figura 19:** Visualização total de um período de 12 horas.



Fonte: autor.

**Figura 20:** Simulação com dois prédios para observar a incidência solar.



Fonte: autor.

**Figura 21:** Visualização de incidência solar e sombra em faixa horária.



Fonte: autor.

### 4.1.3 Funcionalidades da Ferramenta

#### 4.1.3.1 Cenário da Simulação

Para construção do cenário tridimensional, o usuário, inicialmente, escolhe formas geométricas que irão representar os prédios que compõem o cenário da simulação como as representadas na Figura 22. Quando o usuário clica nas figuras bidimensionais, ele tem a opção de escolher a altura ou o número de andares do prédio que será visualizado em três dimensões (Figuras 23 e 24 ). Cada andar é pré-definido com três metros de altura cada. Cada objeto possui um identificador e suas propriedades (posição, comprimento, largura, raio, etc). Exemplos de formas bidimensionais convertidas em tridimensionais estão representadas na Tabela 3. No ambiente existe ainda uma bússola para direcioná-lo nos pontos cardeais. O usuário poderá escolher, por exemplo, em que direção fica o norte em relação ao ambiente criado. Entre as funcionalidades do sistema para a criação do ambiente tridimensional encontram-se:

- Montar quais tipos de formas compõe o cenário;
- Criar, editar, excluir e alterar as formas;
- Determinar a orientação geográfica;
- Salvar o projeto;
- Executar a visualização tridimensional;
- Gerar o relatório de resultados.

**Tabela 3:** Formas bidimensionais e seus respectivos tridimensionais.

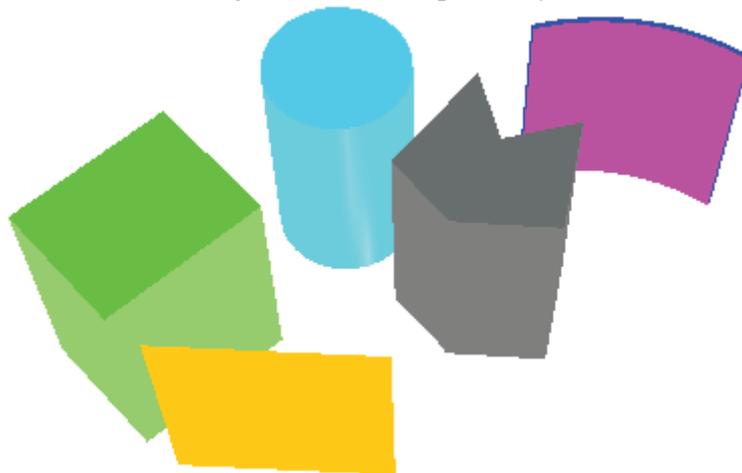
<b>Bidimensional</b>	<b>Tridimensional</b>
Reta	Cubo
Linha	Plana vertical
Circulo	Cilindro
Parabólica	Parabólica com plano vertical
Polígono	Polígono com plano vertical

**Figura 22:** Exemplos de formas geométricas



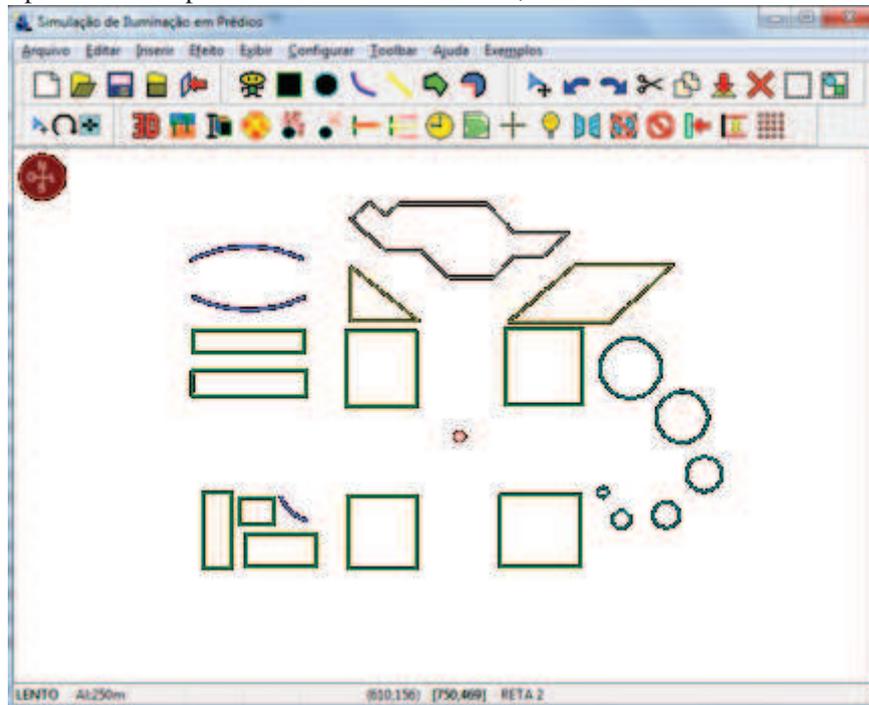
Fonte: autor.

**Figura 23:** Formas geométricas na representação tridimensional.



Fonte: autor.

**Figura 24:** Software de Simulação de Iluminação em Prédios. Na área do terreno, as formas coloridas representam os prédios de formas diferentes, vistos de cima.



Fonte: autor.

O ambiente tridimensional também pode ser criado automaticamente a partir de dados randômicos. Os dados dos prédios podem ser aleatórios por quantidade de prédios, posição, altura, distância, área, limite de distância entre prédios. Todos criados dentro de uma distribuição uniforme. Inicialmente são exibidos na tela em 2D e após transformados em 3D.

A navegação corresponde ao processo de movimentar o observador no ambiente tridimensional programado pelo usuário. O usuário pode interagir utilizando o mouse, clicando sobre a cena para realizar operações sobre os objetos. As operações podem ser realizadas tanto no ambiente 2D quanto no ambiente 3D.

#### 4.1.3.2 Diagrama de atividades

O diagrama de atividades representado na Figura 25 apresenta os fluxos para renderização da funcionalidade proposta. A modelagem de aspectos dinâmicos do

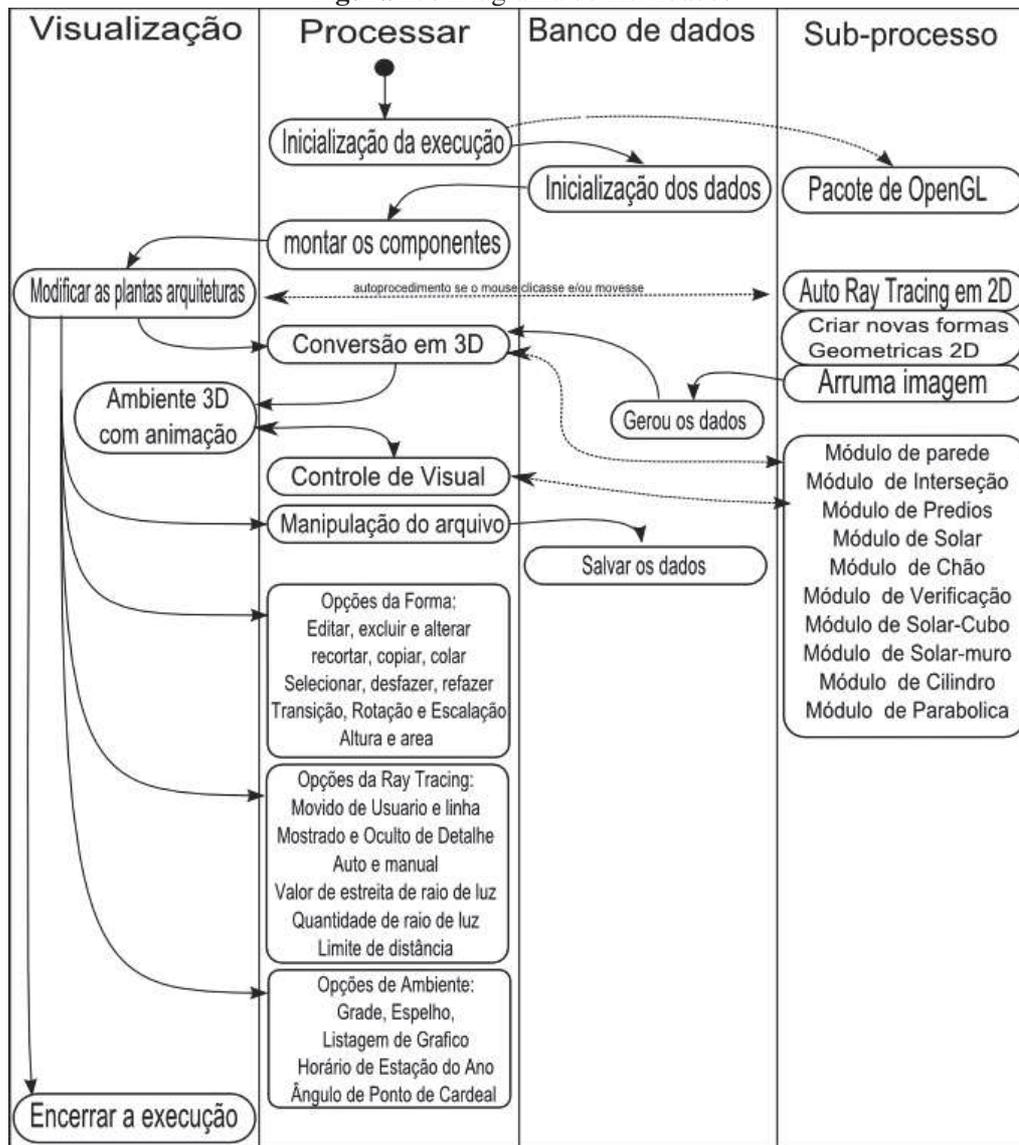
sistema engloba visualização, processamento, banco de dados e subprocesso.

Os módulos na camada subprocesso são construídos para garantir que o sistema atenda às funcionalidades previstas e às especificações de interface. Todos os módulos podem converter vários tipos de formas de dois eixos  $x$  e  $y$  sem qualquer restrição em um modelo em 3D. Há no entanto sistemas específicos para o 3D. Quando fazemos um modelo 3D temos necessariamente de usar a profundidade e esta é dada pelo eixo  $z$ . Os seguintes módulos fazem parte da criação do ambiente 3D:

- Módulo de parede: Faz a alteração de formas bidimensionais para tridimensionais.
- Módulo de Intersecção: Calcula a intersecção entre linhas e planos.
- Módulo de Prédios: Cria o conjunto de prédios a partir do módulo de paredes e adiciona o teto. Pode apresentar visualização *wireframe* se selecionado pelo usuário.
- Módulo de Solar: Coloca uma posição da luz solar sempre a partir de latitude zero.
- Módulo de Chão: Cria uma superfície para representar o chão na base dos objetos.
- Módulo de Verificação: Verifica o nível de incidência de luz solar nos prédios e resulta na coloração dos prédios em escala de cinza conforme a incidência de luz.
- Módulo de Solar-cubo: Cria as linhas entre a posição solar e a posição média de cada retângulo que subdivide os prédios.
- Módulo de Solar-muro: Cria as linhas entre a posição solar e a posição média do retângulo.
- Módulo de Solar-Cilindro: Procede igual ao solar-cubo mas a incidência é no meio de módulo da parede de superfície curva.
- Módulo de Solar-Parabólica: Procede igual ao solar-muro mas a incidência é no meio de módulo da parede na superfície em plano e curva.

A Tabela 4 apresenta o painel de controle de visualização de prédios e ambientes.

Figura 25: Diagrama de Atividades



Fonte: autor.

**Tabela 4: Painel de Controle.**

<p>Painel "Distância do Sol":  opção "Simulação": a distância será apenas 1 km para facilitar a visualização.  opção "Real": ativa a distância de sol real.</p>	
<p>Painel de "Solar":  opção "Simples": Só um raio solar.  opção "Completo": todos os raios em intervalos de tempo.</p>	
<p>Painel de "Solar Simples":  Longitude: de -90 a 90 graus.  Latitude: de -90 a 90 graus.</p>	
<p>Painel de "Solar Completo": visualizar completamente a origem no leste e destino no oeste.  opção "cada linha": exibir cada linha.  De: horário do amanhecer (início do sol).  Até: horário do anoitecer (final do sol).  Linha: quantidade de fila de linha  Cada: quantidade de minutos. O padrão é 60 minutos (uma hora).</p>	
<p>Botão "Simulação": inicia processo de simulação na tela.  Botão "Resultado": gerar um relatório.</p>	
<p>Painel de "Exibição":  botão "Reset": inicialização as padrões.  botão "Angulo": exibiu os dados de angulos entre sol e prédios.  opção "Lineares": Ativa ou desativa exibição das linhas.  opção "Area da Cobertura": Ativa ou desativa a área da Cobertura dos objetos.  opção "Arestas": Ativa ou desativa as arestas.  opção "Temperatura": mostra as cores conforme variação de temperatura. Cor Azul é mais fria e cor vermelha é mais quente; A temperatura normal é de cor branca.  opção "Iluminação": mostra as cores de iluminação; cor Preta é mais escura e cor branca é mais clara. A iluminação normal é de cor cinza.  opção "Parte": quantidade de divisões (frações) da parede de cada lado da prédios.</p>	

## 4.2 Simulação do Grau de Iluminação Global

Nesta seção são apresentados dois modelos para análise global do grau de incidência dos raios solares em um conjunto de prédios. O primeiro apresenta uma cidade bidimensional em que são consideradas as alturas e distâncias entre os prédios dispostos apenas em uma linha reta. No segundo modelo são consideradas as alturas e prédios dispostos em um plano. Todos os dois modelos preveem a análise do grau de iluminação usando a técnica análise por componentes principais (PCA) (JACKSON, 2012).

### 4.2.1 Modelo Bidimensional

Neste modelo os prédios são dispostos em linha reta com diferentes alturas. Neste caso, a luz solar é simplificada para apenas um raio que incide sobre esta linha. Como os prédios dispostos sobre esta linha possuem diferentes alturas, um prédio pode obstruir que o raio solar chegue a outro (Figura 28).

Para análise do grau de iluminação, é montado um gráfico bidimensional das distâncias entre os prédios pelas alturas dos mesmos. Cada ponto do gráfico representa um prédio. A partir destes pontos são geradas duas componentes principais.

Parâmetros da simulação conforme Figura 28 que podem ser alterados incluem:

- *Num Prédio*: Quantidade de prédios.
- *Largura prédio Max*: O valor de largura máximo de cada prédio.
- *Altura Max*: O valor de altura máximo de cada prédio.
- *Altura Min*: O valor de altura mínimo de cada prédio.
- *Dist. Max*: O valor de distância máximo entre 2 prédios.
- *Dist. Min*: O valor de distância mínimo entre 2 prédios.
- *Tempo Inicial*: O valor do tempo inicial em horas.
- *Tempo Final*: O valor do tempo final em horas.

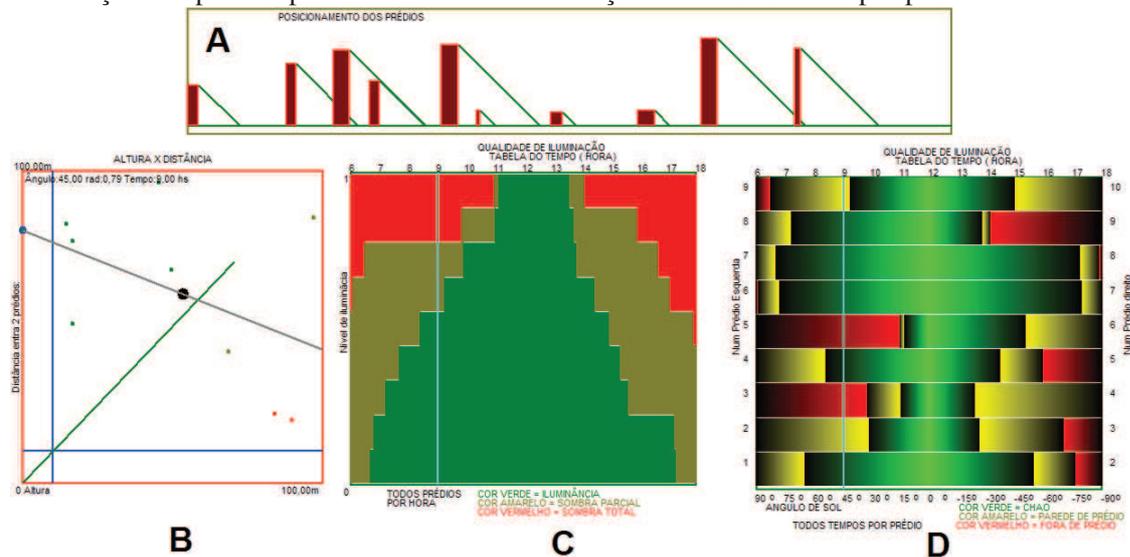
A disposição dos prédios e alturas podem variar conforme lista abaixo e Figura 27:

1. *PER*: Perfeitos pois não apresenta sombra em nenhum prédio considerado o horário.
2. *IMP*: Imperfeitos pois apresentam sombra em todos os prédios.
3. *HOM*: Os prédios possuem a mesma altura e distância entre eles.
4. *RND*: Os prédios são criados com diferentes alturas e distâncias entre eles.
5. *RND2*: Os prédios possuem altura diferentes entre si e a distância entre eles é a mesma da altura.
6. *CRE*: Os prédios possuem altura crescentes e assim como o *RND2*, a distância entre eles é a mesma do prédio da esquerda.
7. *DEC*: Os prédios possuem altura decrescentes e assim como o *RND2*, a distância entre eles é a mesma do prédio da esquerda.
8. *OND*: A linha que perpassa as alturas dos prédios forma ondas com comprimentos iguais.
9. *IOND*: A linha que perpassa as altura dos prédios forma ondas com comprimento diferentes.
10. *ESPI*: Os prédios possuem o comportamento de espiral.

Quanto a visualização dos resultados, estes são apresentados através de 3 quadros:

- Quadro *posicionamento dos prédios*: visualização da distribuição dos prédios de acordo com alturas e distâncias pré-selecionadas. Formas retangulares vermelhas representam os prédios; linhas verdes representam o ângulo de horário da incidência solar. (Indicado por "A" na Figura 26).
- Quadro *altura x distância do prédios*: gráfico de nuvem dos prédios de acordo com o seu posicionamento e alturas. Os pontos verdes representam nenhuma sombra; Os pontos amarelos representam sombras parciais; e os pontos vermelhos representam sombra total. Uma linha verde representa o ângulo de horário (9 horas que mesmo o ângulo 45 graus). A linha azul e vertical representa o valor

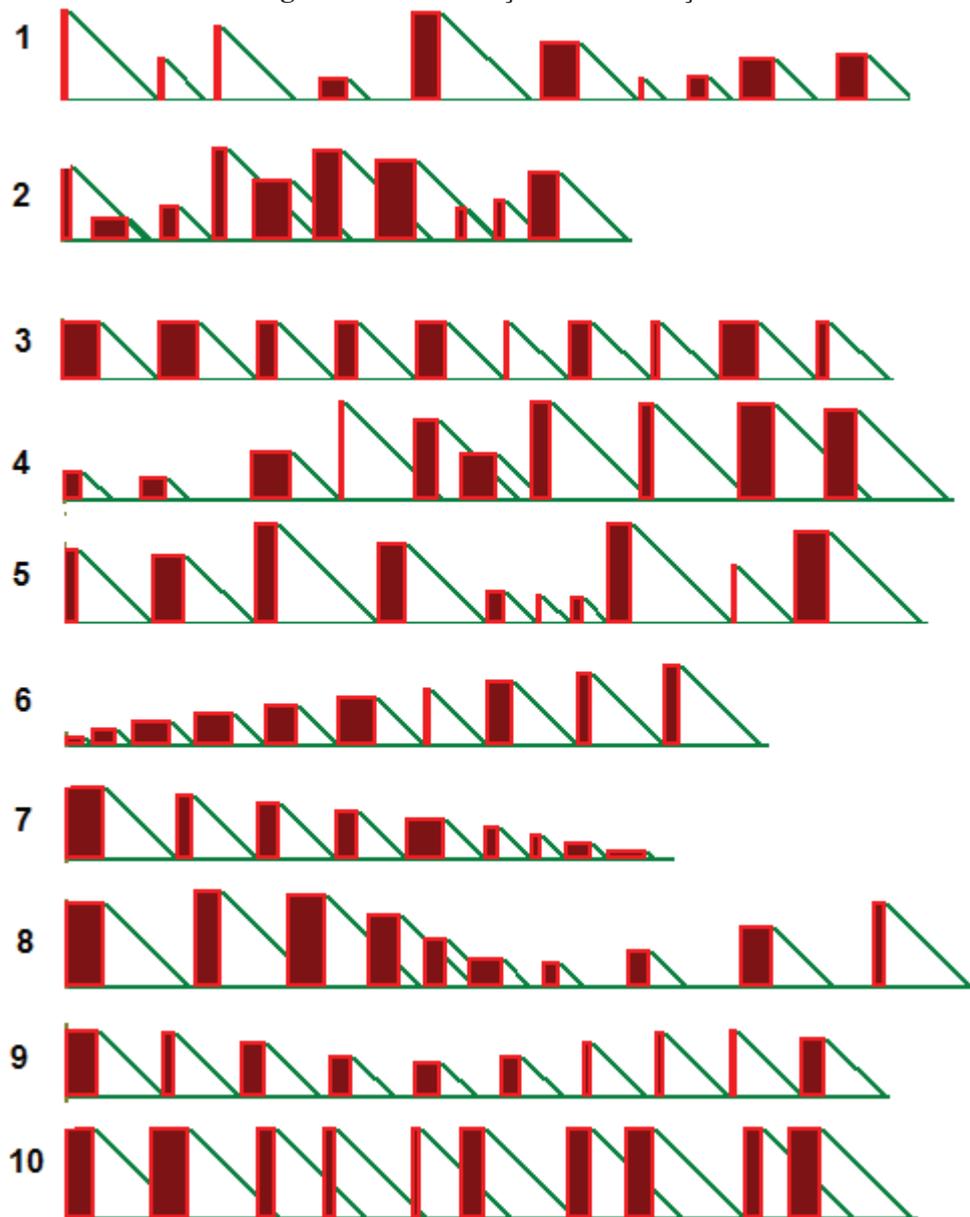
**Figura 26:** Resultado dos 3 quadros inferiores que analisam o quadro superior: Pontos, nível de iluminação dos prédios por hora e nível de iluminação de todas as horas por prédio.



Fonte: autor.

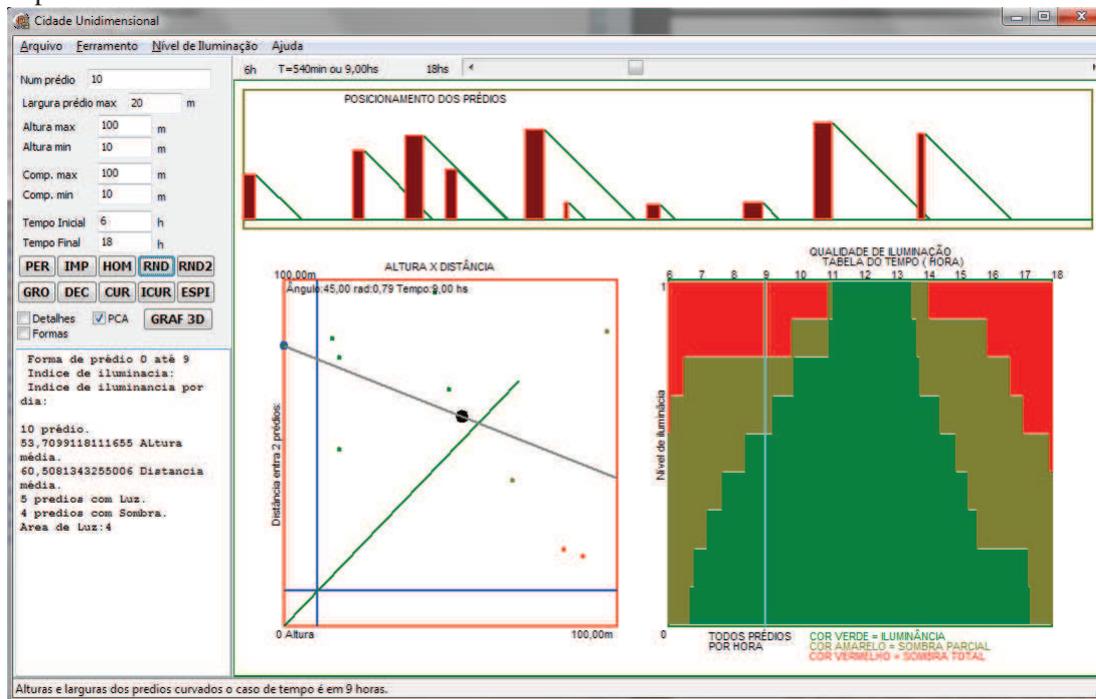
mínimo de comprimento entre 2 prédios. A linha azul e horizontal representa o valor mínimo de altura de prédio. A legenda *ângulo* é o valor do ângulo; *Rad* é o valor em radianos; e *Tempo* é o tempo atual. No caso do PCA, um ponto branco representa o centro do pontos da nuvem, a linha cinza representa a distribuição principal dos dados da nuvem no espaço, que é o arranjo que melhor representa a distribuição dos dados. Indicado por "B" na Figura 26.

- Quadro *qualidade de iluminação*: resultado da quantidade de níveis de iluminação dos prédios com todos tempos do início ao fim. Se subdivide em dois tipos:
  - *Nível de iluminação de todos os prédios por hora*: área verde representa nenhuma sombra; Amarelo representa sombra parcial; Vermelho representa sombra total. Linha azul-marinho e vertical representa o horário atual. A legenda dos números superiores representa o horário, e legenda ao lado esquerdo representa o nível de iluminação em 0(Sombra) ou 1(iluminação). O valor zero é sombra total, e o valor 1 é iluminação total. Indicado por "C" na Figura 26.

**Figura 27:** Visualização de distribuição

Fonte: autor.

**Figura 28:** Painéis de alteração de parâmetros e análise dos graus de iluminação em prédios dispostos bidimensionalmente.



Fonte: autor.

- *Nível de iluminação de todas as horas por prédio:* Barra verde representa o nível de iluminação no terreno; barra amarela representa o nível de iluminação na parede do prédio; Barra vermelha representa acima do prédio até o pôr do sol. Cada cor tem tom de cinza entre 0% (escuro) e 100% (claro). Indicado por "D" na Figura 26.

Além da quantidade de prédios, altura e distância entre eles, o horário de iluminação também configura um parâmetro da simulação.

Alguns detalhes da Análise por Componentes Principais também são mostrados na interface como covariâncias, correlação, autovalores e autovetores e regressão linear.

#### 4.2.2 Modelo Tridimensional e Configuração do Ambiente

O modelo tridimensional incrementa o modo de duas dimensões, e oportuniza a ampliação de volumes 3D para aproximarem-se das características de um ambiente real.

Na Figura 29 à direita é apresentada dos prédios virtuais representados em cenários 3D construídos com as coordenadas cartesianas - eixos X (comprimento), Y (largura) e Z (altura) - para estabelecer as dimensões do espaço a ser reproduzido.

A direção do sol é representada por uma bússola no painel a esquerda com uma reta de linhas azuis (sentido leste) e vermelhas (sentido oeste). A Latitude é medida referente ao sul do equador, entre 90 graus no pólo sul e 90 graus no pólo norte, e o objetivo é servir de apoio para gerar as sombras dos prédios. Mede-se o zero grau no leste (nascente) e 180 graus no oeste (poente), e também tem a função de auxiliar na geração das sombras dos prédios.

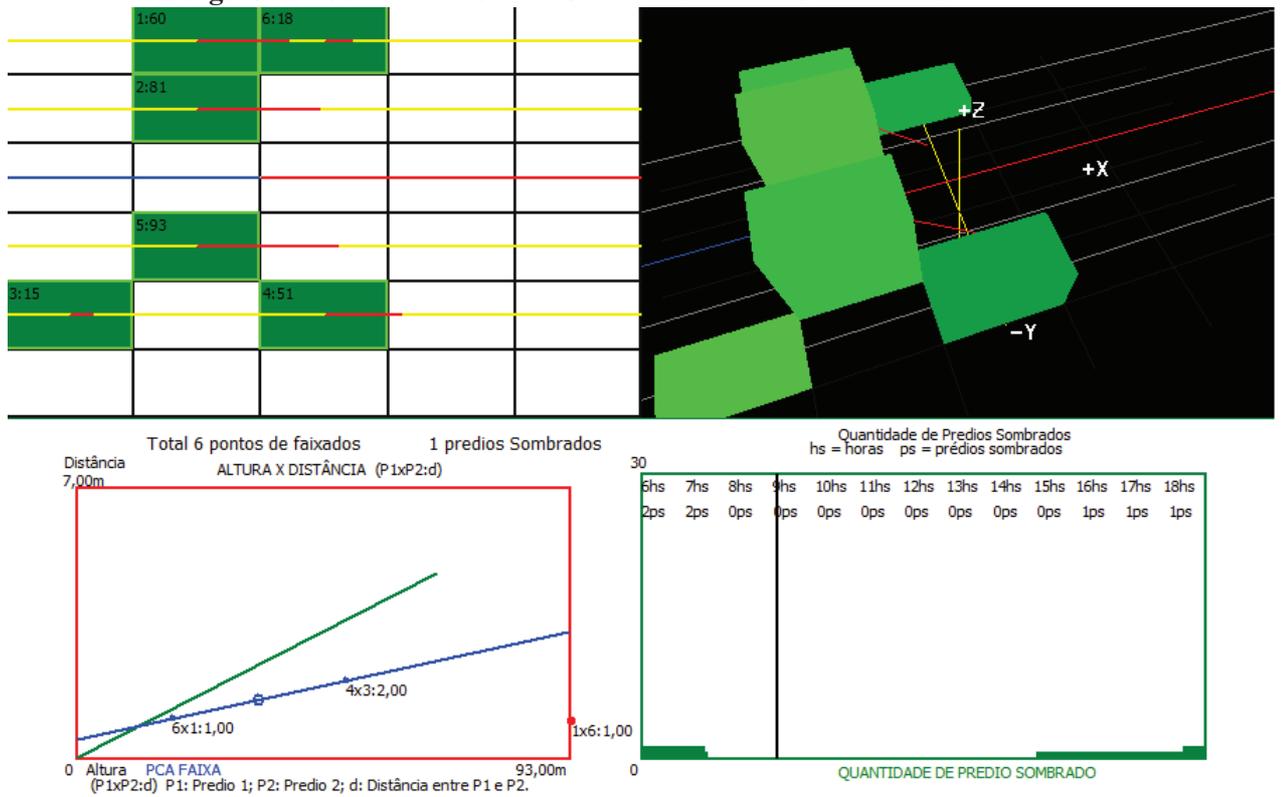
No mesmo painel, a escolha da quantidade e a posição de faixas (linhas auxiliares) passam os dados da localização e altura dos prédios para o PCA. A divisão de faixa distribui uma quantidade de faixas (linhas referenciais) com a função de detectar os prédios. A posição de faixa mede cada área dos prédios. É possível ativar a animação da bússola no ambiente 3D para observar o comportamento das sombras e os cálculos realizados durante um período de tempo. Existem duas opções de objetos para dispor no ambiente: colunas e prédios. As colunas não têm tamanho de área definida, somente altura. Pode-se colocar colunas individuais ou coletivas em qualquer local. Consideramos a criação de um ambiente com cem posições vagas para colunas padronizadas (cinco posições na largura e seis posições no comprimento), com altura mínima e máxima definidos. O sol está em uma posição inicial com ângulo de 90 graus representada pela bússola e latitude zerada. As divisões e posições das faixas para PCA estão zeradas. Inicia-se a distribuição das colunas na área clicando nos quadrados definidos para tal. Um quadrado verde indica uma coluna colocada. Girando o scroll do mouse é possível definir a altura da coluna. Dois números separados por dois pontos aparecem em cada quadrado. O número a esquerda representa a identificação do objeto e o número a direita representa a altura. Um quadrado amarelo representa a posição do cursor (mouse). Ao clicar em uma posição com objeto (verde), a seleção do mesmo fica representada pela cor vermelha. Clica-se com o botão direito do mouse para remover um objeto. Configura-se em grau o ângulo da bússola, o ângulo da latitude e o ângulo da rotação do sol. A divisão de faixas para PCA configura-se em quantidade e a posição em metros. Um círculo plano amarelo com borda vermelha representa o sol. A linha representando a bússola (azul e vermelha) muda de ângulo visualmente conforme o utilizador altera o parâmetro de ângulo da mesma. Mudando-se a latitude percebe-se

uma linha verde e um círculo que a representa o sol e sua posição, e uma linha vermelha em cada objeto representa a projeção da sombra. As configurações de posição e divisão des faixas permitem inserir linhas que detectam as condições do ambiente e auxiliam nos cálculos do PCA. Após configurar o ambiente, é possível visualizá-lo em 3D. Para exibir os dados do PCA, altera-se o modo de visualização clicando no botão "Divisão", quando a tela divide-se em quatro quadros Figura 29, com as seguintes informações:

1. Ambiente 2D: superior esquerdo, com os dados originais de posição e altura (os dados p x a) das colunas.
2. Ambiente 3D: superior direito, com os dados convertidos do ambiente 2D para 3D.
3. PCA: inferior esquerdo, com os dados dos objetos para análise do PCA.
4. QPS: inferior direito, com a faixa de horário desde o ângulo zero do sol até o ângulo de 180 graus (nascente ao poente) e quantidade de objetos que fazem intersecção com as sombras de análise do PCA.

Exemplo de utilização da divisão da tela em quatro quadros. Primeiramente, distribuem-se seis colunas com fila e altura (Figura 29) no ambiente em 2D. Configura-se a latitude com 51 graus norte e divisão de faixa em 5 partes. Após concluída esta configuração, é gerado três novos quadros de visualização (ambiente 3D, PCA e QPS). O quadro de análise PCA indica duas colunas pares vermelhos que possuem intersecção com as sombras. A indicação de uma das colunas é representado pelo código "4 x 3 : 2,00". Os números 4 e 3 são a identificação dos colunas e o número 2,00 representa a distância entre os mesmos. O círculo vermelho representa a média de nuvens das colunas e a reta vermelha representa linha de PCA. Outros 2 colunas pares azuis estão em intersecção com as faixas. O cálculo de faixas são os mesmos do anterior. O quadro de QPS resulta em um gráfico de dados das colunas sombreadas em uma faixa horária das 6 as 17 horas (demonstrado na tabela 5. O quadro do ambiente 3D facilita a visualização da cena.

**Figura 29:** Software de Cidade Unidimensional em 3 dimensões.



Fonte: autor.

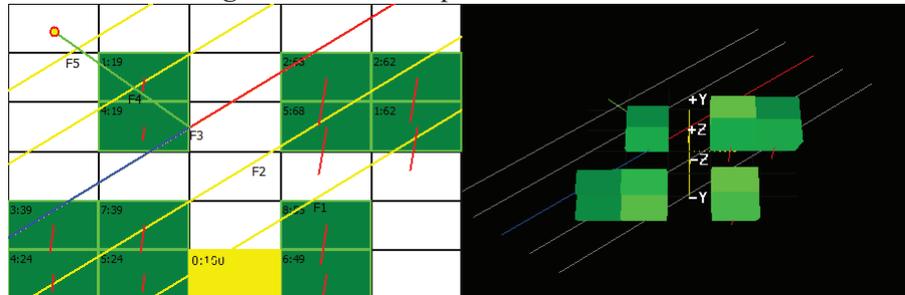
**Tabela 5:** Lista de dados de QPS.

Horário	QPS em coluna
6:00	2
7:00	2
8:00	0
9:00	0
10:00	0
11:00	0
12:00	0
13:00	0
14:00	0
15:00	1
16:00	1
17:00	1
18:00	2

É possível ter densidades com colunas de alturas diferentes, contanto que as áreas liberadas nos terrenos sejam diferentes. É possível ter colunas mais altas e finas em uma área e colunas mais robustas e baixas em outras, e a finalização da densidade ser a mesma, chamado prédios, isto é, o conjunto dos vários colunas juntas. A Figura 30 mostra à esquerda a área dos prédios em 2D e à direita em 3D, ambos com detalhes. Percebe-se prédios mais volumosos com menor área liberada no terreno; e outro temos prédios menos volumosos com maior área liberada no terreno. Ainda assim, as densidades são equivalentes. O resultado em ocupações distintas de mesmo volume poderia ser posicionado de formas diferentes sobre o terreno, mas equivalentes em termos de número de área criada.

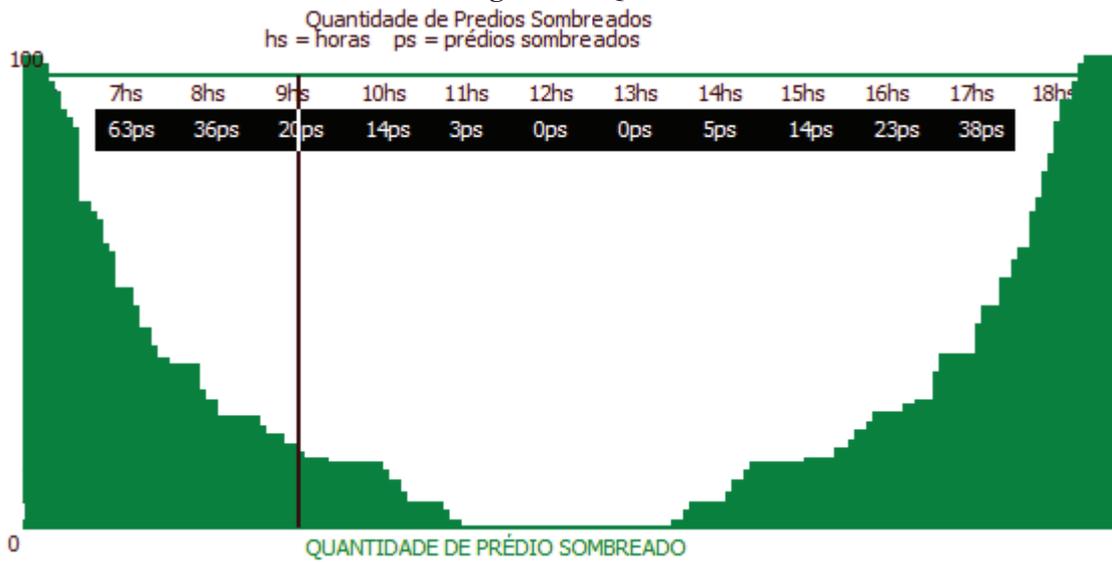
A oportunidade dos prédios verticais como os que estão sendo construídos de alcançar densidades afetam a desvantagem das sombras e das visuais. O sentido na Figura 31, no quadro de QPS prova que facilita a solução de problemas na definição do número máximo de altura de prédios que não afetam os aspectos urbanísticos, mas os aspectos de saúde dos humanos e natureza. Destes casos, apresentaram 20 colunas sombreados e 5 prédios sombreados em 9 horas.

**Figura 30:** área dos prédios em 2D e em 3D.



Fonte: autor.

**Figura 31:** QPS.



Fonte: autor.

## 5 RESULTADOS

A seguir são apresentados alguns resultados no que concerne ao quantidade de iluminação em um conjunto pequeno e específico de prédio e os resultados do grau de iluminação global em um grande conjunto de prédios.

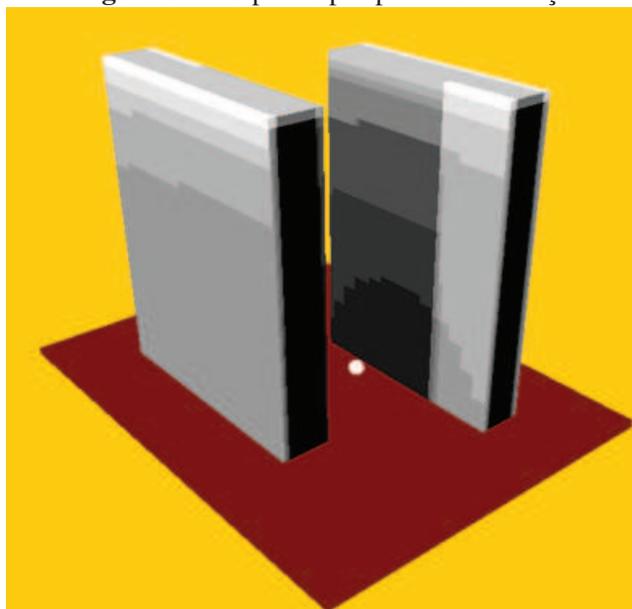
### 5.1 Análise do Grau de Iluminação por Prédio

A análise aqui proposta permite que se visualize a iluminação em partes das paredes dos prédios conforme a hora do dia. Permite ainda que se faça uma média do grau de iluminação diária levando em conta as partes das paredes que foram iluminadas durante o dia e em que período de tempo. Para exemplificar, a Figura 32 e a Tabela 6 demonstram alguns dados relativos a iluminação de dois prédios no período de 12 horas. A Tabela 6 apresenta os mesmo dois prédios da Figura 32 mas com diferentes tipos de subdivisões por parede (de 1 a 40). Apesar do custo computacional aumentar proporcionalmente ao número de subdivisões das paredes dos prédios, a precisão da simulação também aumenta. São apresentadas faixas de percentagem da quantidade de iluminação dos dois prédios. Cabe ressaltar que o simulador permite que se simule qualquer quantidade de prédios com qualquer disposição dos mesmos.

**Tabela 6:** Simulação de nível de iluminação em 2 prédios durante 12 horas.

Subdivisões por parede	Total subdivisões	Tempo de CPU (seg.)	Máximo de cor	Número de Raios	0% a 20%	20% a 40%	40% a 60%	60% a 80%	80% a 100%
1	10	0	8	120	5	0	0	2	4
2	40	0,015	8	480	17	1	1	2	20
3	90	0,047	9	1080	28	12	5	0	46
4	160	0,124	10	1920	45	26	18	34	38
5	250	0,546	10	3000	75	22	39	50	65
10	1000	3,214	10	12000	319	130	58	262	232
20	4000	76,643	10	48000	1297	423	290	1031	960
40	16000	1157,2	10	192000	5009	1741	1267	4059	3925

**Figura 32:** 40 partes por paredes e terraço



Fonte: autor.

## 5.2 Análise do Grau de Iluminação Global

Inicialmente, se avaliou o grau de Iluminação de um conjunto de prédios por componentes principais a partir de uma simulação 2D onde os prédios foram alinhados em linha reta e representavam colunas. Para que a simulação ficasse mais realista os prédios foram dispostos em uma área qualquer podendo estes ter qualquer volume.

### 5.2.1 Análise em 2 dimensões

A Tabela 7 representa 3 casos de simulação para diferentes disposições de prédios. Uma boa onde todos os prédios estão acima da linha de inclinação do sol, uma ruim ou imperfeita, onde os prédios se situam abaixo da referida e outra randômica.

A Tabela 8 representa a análise por componentes principais foi usada a análise macroscópica de um grande conjunto de prédios. Para exemplificar o uso da técnica foi usada a distribuição randômica de prédios (RND) descrita na Seção 4.2 com a configuração da 100 metros de altura e da 100 metros de distância.

<p>Distância entre prédios baixos:  1000 prédios.  55,92m de altura média.  15,02m de distância média.  60 prédios com iluminação.  940 prédios com sombra.</p>	
<p>Distância entre prédios médios:  1000 prédios.  56,29m de altura média.  55,55m de distância média.  483 prédios com iluminação.  517 prédios com sombra.</p>	
<p>Distância entre prédios altos:  1000 prédios.  54,70m de altura média.  76,14m de distância média.  1000 prédios com iluminação.  0 prédios com sombra.</p>	

**Tabela 7:** PCA de 3 quadros dos prédios.

Ao analisar o gráfico das situações dos prédios, que expressa a importância e a correlação entre as variáveis da distância e altura, notou-se que as variáveis de menor área para a classificação das amostras foram iluminação na ambiente. A informação da variação existente na amostra anterior cria covariâncias e as correlações entre as variáveis originais da quantidade de prédios para análise da redução e melhora no desempenho da iluminação.

### 5.2.2 Análise em 3 dimensões

A técnica PCA e o gráfico QPS foram utilizadas para fazer uma análise macroscópica de um grande conjunto de prédios. Para gerar o ambiente foi utilizada a distribuição randômica de colunas (RND). Algumas características da localização da cidade de Porto Alegre - RS - Brasil foram utilizadas para configuração do ambiente:

- Bussola: 0 grau.
- Latitude: -30 graus de acordo com dados de estações meteorológicas do site APOLO11 (APOLO11, 2013).
- Rotação do Sol: 30 graus (em 8 horas).
- Posição da faixa: 0 (centro).
- Divisão da faixa: 10 partes (cobertura total da area na horizontal).

A seguir são analisadas três situações com diferentes disposições e densidades de prédios. Observe a relação da linha PCA com a linha da orientação solar. É através desta relação que podemos dizer que uma disposição de um conjunto de situação dos prédios.

- Figura 33: indica a razão de prédios sombreados estarem mais longe do que divisões de faixas. O QPS indica que há muitos prédios sombreados e prédios faixados que afetam o aumento da sombra.

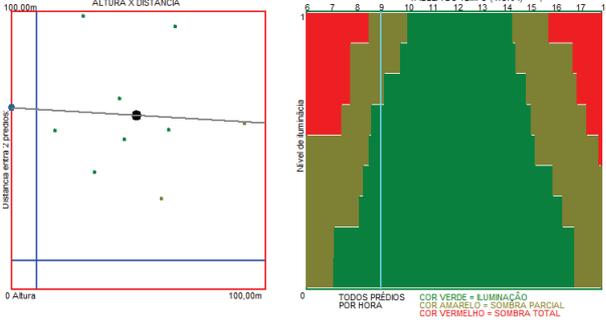
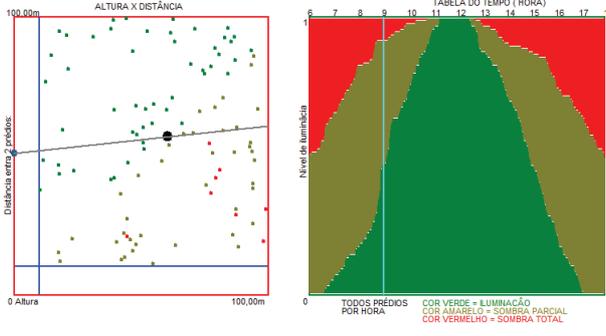
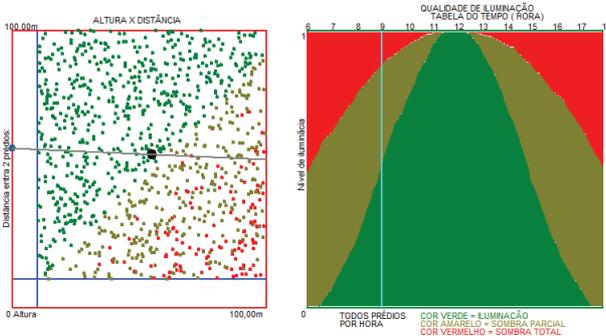
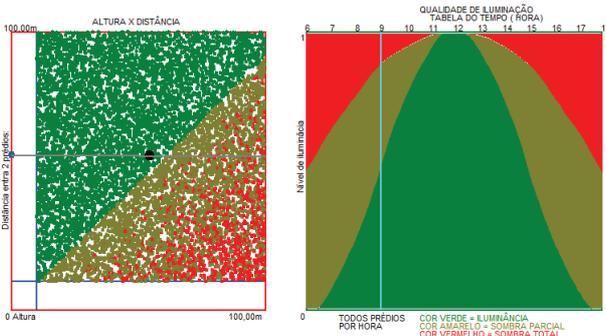
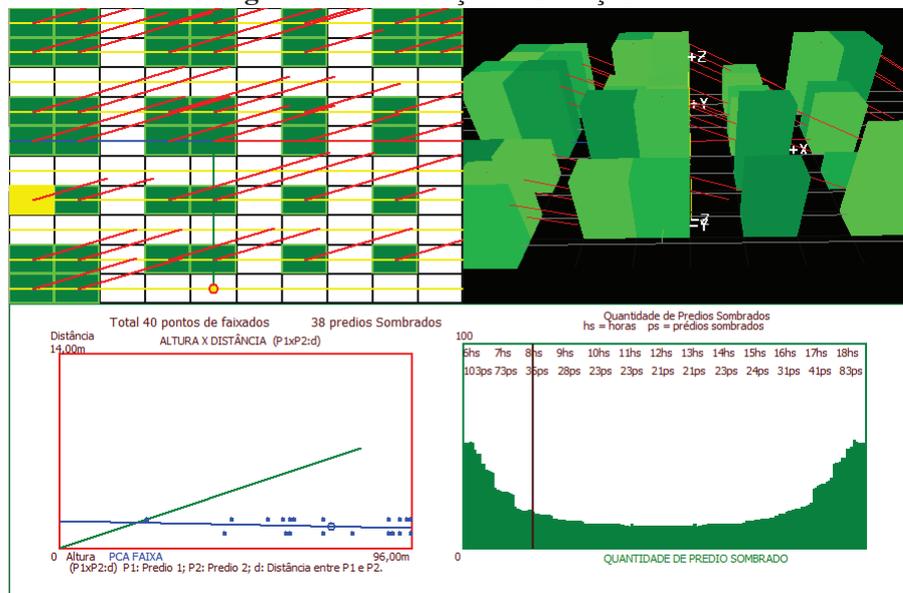
<p>Matriz de 10 prédios:</p> $T = \begin{pmatrix} 515,16 & -28,32 \\ -28,32 & 476,01 \end{pmatrix}$ <p>Covariância de <math>T = -28,32</math>  Correlação de <math>T = -0,06</math>  Regressão Linear de <math>T</math>:  <math>f(x) = -0,05x + 65,27</math>  AutoValor <math>\lambda_1 = 461,16</math> e  AutoVetor <math>\begin{pmatrix} 0,52 \\ 1,00 \end{pmatrix}</math>  AutoValor <math>\lambda_2 = 530,01</math> e  AutoVetor <math>\begin{pmatrix} -1,91 \\ 1,00 \end{pmatrix}</math></p>	
<p>Matriz de 100 prédios:</p> $T = \begin{pmatrix} 637,95 & 61,57 \\ 61,57 & 701,08 \end{pmatrix}$ <p>Covariância <math>T = 61,57</math>  Correlação de <math>T = 0,09</math>  Regressão de Linear de <math>T</math>:  <math>f(x) = 0,10x + 50,98</math>  AutoValor <math>\lambda_1 = 600,32</math> e  AutoVetor <math>\begin{pmatrix} -1,64 \\ 1,00 \end{pmatrix}</math>  AutoValor <math>\lambda_2 = 738,70</math> e  AutoVetor <math>\begin{pmatrix} 0,61 \\ 1,00 \end{pmatrix}</math></p>	
<p>Matriz de 1000 prédios:</p> $T = \begin{pmatrix} 681,37 & -28,74 \\ -28,742 & 675,31 \end{pmatrix}$ <p>Covariância de <math>T = -28,74</math>  Correlação de <math>T = -0,04</math>  Regressão Linear de <math>T</math>:  <math>f(x) = -0,04x + 57,56</math>  AutoValor <math>\lambda_1 = 649,44</math> e  AutoVetor <math>\begin{pmatrix} 0,90 \\ 1,00 \end{pmatrix}</math>  AutoValor <math>\lambda_2 = 707,24</math> e  AutoVetor <math>\begin{pmatrix} -1,11 \\ 1,00 \end{pmatrix}</math></p>	
<p>Matriz de 10000 prédios:</p> $T = \begin{pmatrix} 681,77 & -4,21 \\ -4,21 & 674,81 \end{pmatrix}$ <p>Covariância de <math>T = -4,21</math>  Correlação de <math>T = -0,01</math>  Regressão Linear de <math>T</math>:  <math>f(x) = -0,01x + 55,70</math>  AutoValor <math>\lambda_1 = 672,83</math> e  AutoVetor <math>\begin{pmatrix} 0,47 \\ 1,00 \end{pmatrix}</math>  AutoValor <math>\lambda_2 = 683,75</math> e  AutoVetor <math>\begin{pmatrix} -2,13 \\ 1,00 \end{pmatrix}</math></p>	

Tabela 8: PCA de 4 quadros dos prédios.

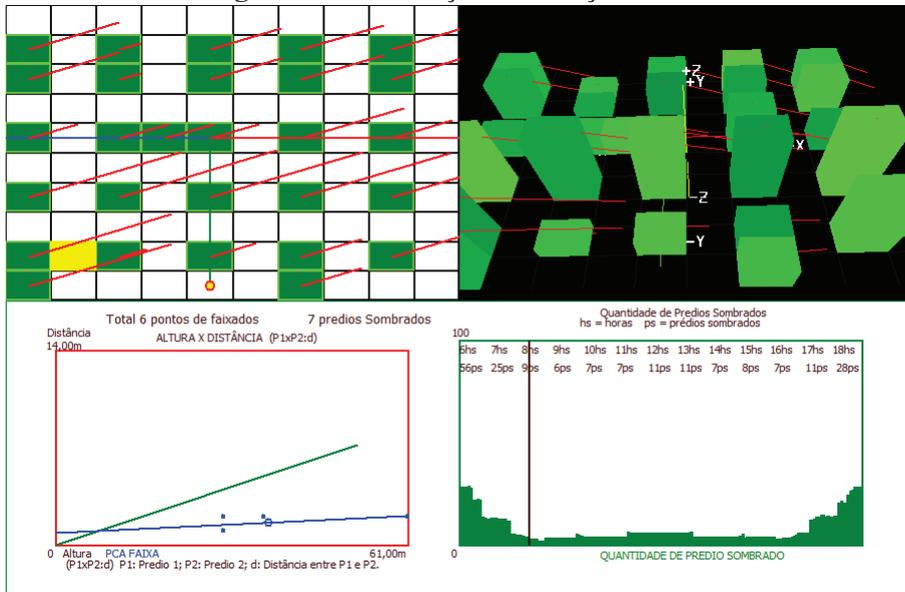
**Figura 33: Observação 1: Situação ruim.**



Fonte: autor.

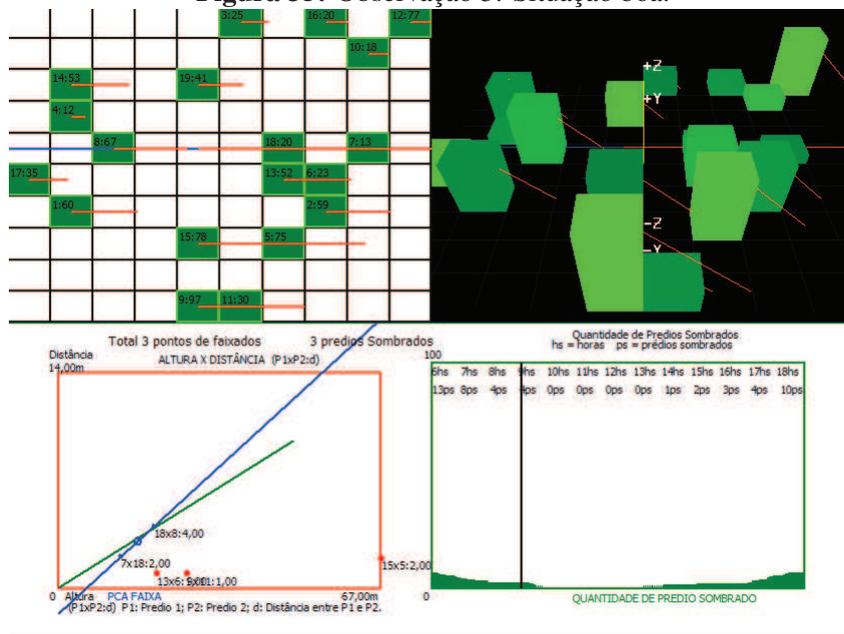
- Figura 34: justifica a razão prédios parcialmente não têm vizinhos ou sejam juntos dos outros prédios. A sombra pode afetar parcialmente alguns prédios. O QPS justifica que a situação dos prédios é normal.
- Figura 35: justifica a redução de unidades de prédios sombreados. O QPS indica que há poucos prédios sombreados e os prédios faixados são constantes.

**Figura 34: Observação 2: Situação média.**



Fonte: autor.

**Figura 35: Observação 3: Situação boa.**



Fonte: autor.



## 6 CONCLUSÃO

O trabalho aqui apresentado analisou a quantidade diária de luz natural incidente sobre as paredes de prédios justapostos e a quantidade global de luz incidente sobre um conjunto de prédios. Através da técnica de PCA foi possível encontrar a disposição ideal de qualquer conjunto de prédios considerando o sua quantidade e alturas. Apesar de terem sido feitos alguns estudos com reflexão demonstrados no Anexo 1, não foram feitas simulações considerando a reflexão entre os prédios. Sabe-se que este parâmetro influencia bastante o grau de iluminação dos prédios vizinhos dependendo do material reflexivo com que estes são construídos. Outro trabalho futuro que pode ser considerado como extensão do simulador aqui proposto seria implementar o desnivelamento do terreno, além da variação de alturas já contempladas. A construção de um simulador como este permite o auxílio à arquitetos e urbanistas no planejamento urbano, no sentido de construir prédios levando em consideração a saúde das pessoas que os habitarão e o consumo racional de energia. Preocupações como esta, estão cada vez mais atuais e se inserem no planejamento de cidades inteligentes.



## REFERÊNCIAS

- AGI 32. **Analista de Iluminação**. Inc, USA, 2010. consulta de site de documentação de Agi32.
- ANDREW MARSH STRAVORAVDIS, S. e. **Solar Availability in Cities: a design approach**. New York, NY, USA: [s.n.], 2012. n. 6.
- APOLO11. **Latitude e Longitude das cidades Brasileiras**. Disponível em: <http://www.apolo11.com/latlon.php?uf=rs&cityid=23>. Consulta em 9 de dezembro de 2013.
- CARLOS E. OCHOA MYRIAM B.C. ARIES, e. J. L. H. **Current perspectives on lighting simulation for building science**. Netherlands: Eindhoven, 2010.
- DIPL.-ING. DIETER POLLE. **An evolutionary step in the development of DIALux: dialux evo 1**. Inc, USA, 2010. consulta de site de documentação de Agi32.
- G. WARD SHAKESPEARE, R. **Rendering with Radiance. The Art and Science of Lighting Visualization**. San Francisco, California, USA: Morgan Kaufmann, 1998.
- GLASSNER, A. S. An Overview of Ray Tracing. In: AN INTRODUCTION TO RAY TRACING, 1989, London, UK: Academic Press Limited. **Anais...** [S.l.: s.n.], 1989.
- GRAZZIOTIN, P. C. **Técnicas de Incorporação de Controle de Acesso à Luz Solar em Modelos Computacionais de Edificações**. 2003. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — PPGC de UFRGS, Porto Alegre, 2003.
- H D CHEUNG; CHUNG, T. M. **Calculation of the Vertical Daylight Factor on Window Façades in a Dense Urban Environment**. Edition ELSEVIER. ed. [S.l.]: Earthscan, 2005. 81-92(12) p. v. 48, n. 1.
- JACKSON, J. E. **Aspects of Multivariate Analysis. Principal components and factor analysis**. Disponível em: [http://www.ltu.se/cms\\_fs/1.51590!/pca\\_part%201\\_jackson\\_1980.pdf](http://www.ltu.se/cms_fs/1.51590!/pca_part%201_jackson_1980.pdf). Consulta em 30/11/2012.
- K.R SHAILESH, e. T. S. R. **Application of RELUX software in simulation and analysis of an energy efficient lighting scheme**. [S.l.: s.n.], 2010. 118-141 p. v. 11(02).
- KREBS, W. P. **Krebs' citric acid cycle: half a century and still turning**. London: Research Books, 2013.

LALIT NARAYAN, M. S. e. K. M. R. **Computer Aided Design and Manufacturing**. Rekha Printers Provate Limited, New Delhi: Prentice-Hall of India Pvt.Ltd, 2008.

M. BODART, e. A. d. H. **Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting**. Edition ELSEVIER. ed. [S.l.]: Energy and Buildings, 2002. 421-429 p. v. 34.

MORPHOLOGICAL ENVELOPES SIMULATION: A SOFTWARE AND THE ARCHITECT IN THE TYPOLOGICAL SPECULATION, 2009, Sao Paulo, Brazil. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2009.

MORRISON, D. **Multivariate statistical methods**. Edition ELSEVIER. ed. New York, NY, USA: [s.n.], 1976. 415 p.

PAGOT, C. **Projeto BEST - Built Environment Simulation Technologies**. UFRGS, Brasil: [s.n.], 2012.

REGAZZI, A. **Análise multivariada**. notas de aula INF 766.

REINEL, G. C. **Elements of multivariate time series analysis**. Springer-Verlag Edition, New York, 263, USA: [s.n.], 1993. 163 p.

ROY, G. G. **A comparative study of lighting simulation packages suitable for use in architectural design**. School of Engineering, Murdoch University, Australia: technical, 2000.

SEBER, G. A. F. **Wiley Series in Probability and Statistics**. New York, NY, USA: [s.n.], 1984.

SHAKESPEARE, G. W. L. S. R. A. **Rendering with Radiance. The Art and Science of Lighting Visualization**. Morgan Kaufmann Publishers. ed. [S.l.: s.n.], 2004. 690 p.

TOMLINSON, R. **Thinking About GIS: geographic information system planning for managers**. Esri's GIS Bookstore, USA: [s.n.], 2011.

VANNINI, V. C. **Otimização da forma para captação da radiação solar sobre superfícies de edifícios** : um exercício de integração entre os programas rhinoceros e ecotect. 2011. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — LUME Repositório Digital, UFRGS, Porto Alegre, 2011.

VICINI, L. **Análise multivariada da teoria à prática**. CCNE-UFSM, Santa Maria, RS, Brasil: Elsevier Ltd, 2005. 28 p.

VIGANELLA. **Espelho solar começa a operar em vila italiana**. Disponível em: <<http://www.apolo11.com/>>. Consulta em 13 de novembro de 2012.

WICHERN, R. A. J. D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. 6th Englewood Cliffs: Prentice Hall. ed. [S.l.: s.n.], 1989. 800 p.



## 7 ANEXO1

### 7.1 Estudos com Reflexão

Apesar do foco deste trabalho não ser a implementação da reflexão da luz solar na superfície dos prédios, foram feitos alguns tipos de estudos com a implementação do algoritmo de *ray tracing* na sua forma bidimensional. Neste estudo, não foi variado o tipo de material reflexivo da superfície dos prédios, mas apenas a forma da superfície reflexiva que reflete os raios solares em sua totalidade.

#### 7.1.1 Algoritmo de *ray tracing*

O feixe de luz percorre pixel a pixel desde sua origem até o objeto onde será refletido. Este caminho segue inalterável enquanto a cor de fundo for preta, mudando somente quando uma cor diferente for encontrada. Neste momento as posições  $x$  e/ou  $y$  são alteradas conforme o algoritmo específico da forma do objeto (retangular, circular, parabólica, etc). Este processo se repete até que a borda da tela seja encontrada.

Para maior precisão e fidelidade de representação, os pontos  $x$  e  $y$  são números de ponto flutuante, representado por variáveis do tipo DOUBLE.

Para calcular um trajeto de feixe em *ray tracing* são utilizados no mínimo trinta e sete variáveis, devido às múltiplas regras e formas de objetos diferentes, tais como retas, círculos (elipses), retângulos e parabólicas. Não são necessários algoritmos específicos para formas poligonais e fração de círculo porque ambos podem ser considerados um conjunto de retas.

Em segmentos de retas de objetos de formas lineares não retangulares e não paralelos ou perpendiculares ao eixo  $x$ , toda vez que uma colisão (reflexão) é detectada (encontro do feixe de luz com o objeto), é calculado o ângulo da origem do feixe em relação ao eixo das abscissas  $x$  e a distância da origem até o objeto colidido. Após, utilizando cálculos trigonométricos, verifica-se o ângulo do cateto adjacente para que este, somado (e invertido  $180^\circ$ , dependendo da direção do feixe e inclinação do objeto) ao primeiro ângulo detectado, resultem na trajetória que o feixe irá tomar após refletir no objeto.

A Tabela 9 mostra a correspondência entre a cor e a forma representada:

**Tabela 9:** Relação cor/forma

<b>COR</b>	<b>FORMA</b>
Verde	Reta
Amarelo	Linha
Azul marinho	Círculo
Roxo e azul	Parabólica
Cinza	Polígono

Em colisões (reflexão) com segmentos de retas que estão a  $90^\circ$  ou  $270^\circ$  em relação ao eixo  $x$  (abscissas) o cálculo é simplificado: inverte-se a posição de  $x$  e mantém-se a posição de  $y$ .

Análogo ocorre com segmentos de retas que estão a  $0^\circ$  ou  $180^\circ$ : mantém-se a posição de  $x$  e inverte-se a posição de  $y$ .

Em outras situações, em se tratando de objetos de linhas retas de ângulos não retos em relação ao eixo  $x$ , são exigidos cálculos trigonométricos e três funções básicas (seno, cosseno e arco tangente) para calcular a nova trajetória do feixe de luz. A Figura 36 representa estes casos.

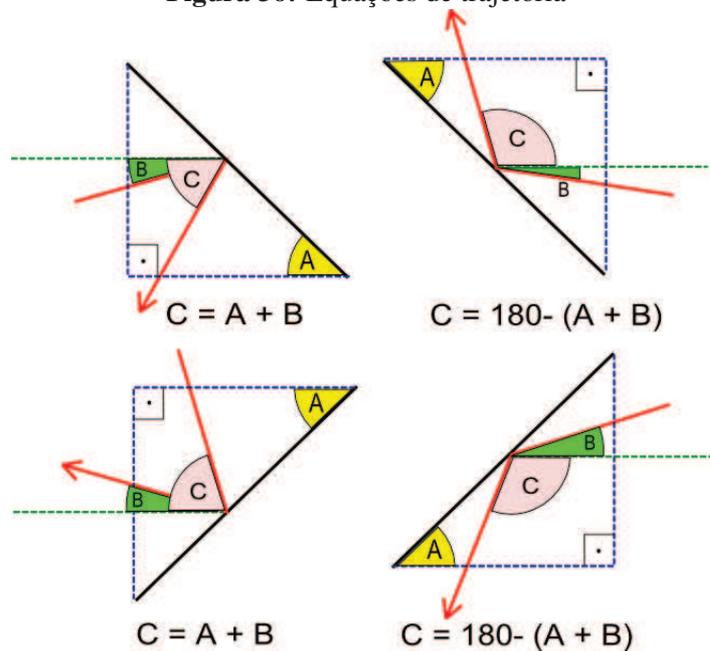
A seguir os passos necessários para determinar a nova trajetória de um feixe refletido:

Se o feixe colide na parte inferior e esquerda de uma reta de  $135^\circ$  ou  $315^\circ$  ou então na parte superior e esquerda de uma reta de  $45^\circ$  ou  $225^\circ$ , a equação para determinar o ângulo da nova trajetória é  $C = A + B$ .

Se o feixe colide na parte superior e direita de uma reta de  $135^\circ$  ou  $315^\circ$  ou então na parte inferior e direita de uma reta de  $45^\circ$  ou  $225^\circ$ , a equação para determinar o ângulo da nova trajetória é  $C = 180 - (A + B)$ .

Em objetos de forma circular, o cálculo é mais simples, representado pelo gráfico da Figura 37 e procedimento do Algoritmo 1.

**Figura 36:** Equações de trajetória



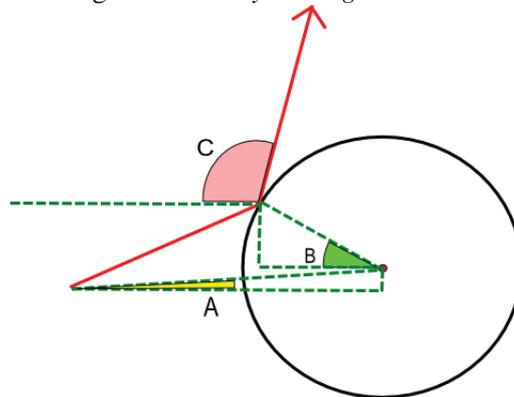
Fonte: autor.

```
// ix: inicial; x: colisão e x1: centro do círculo
ai=135-graus(x1,y1,ix,iy)/2;
ci= graus(x1,y1,x,y);
ce=(ci+ai)*2;
gx=-sind(ce);
gy=-cosd(ce);
```

**Algoritmo 1:** Algoritmo de trajetória em formas circulares

O cálculo de trajetória em objetos parabólicos abrange os dois lados destas formas (convergente e divergente), contudo pode resultar em percepções e condutas bastante diferentes diante de uma mesma situação. A Tabela 10 mostra a situação envolvendo os dois lados. Frente a isso gerou-se um algoritmo que divide os lados em ângulos e distância através da aplicação do método de Equações Parabólicas escalar bidimensional e *ray tracing* propagada em um linha curva centrada em uma direção focada.

Os Algoritmos 2 e 3 apresentam uma equação de parabólica que determina a trajetória de reflexão.

**Figura 37:** Algoritmo de *ray tracing* em formas circulares

Fonte: autor.

```

mx= (x1+x2) /2;
my= (y1+y2) /2;
di=distancia (x1, y1, x2, y2);
ai=graus (x1, y1, x2, y2);
cx=mx+di*sind(ai);
cy=my+di*cosd(ai);

```

**Algoritmo 2:** reflexão em objetos parabólicos

**Tabela 10:** Comparação entre processos convergentes e divergentes.

Formula e Significado	Convergente	Divergente
Posições $ix_1$ e $iy_1$ : Centro da parabólica Variável $f$ : raio do círculo relativo. Posições $x$ e $y$ : onde ocorre a colisão entre feixe e objeto (reflexão). Posições $ix$ e $iy$ : origem do feixe.	$ix_1 = x - (ix - x)$ ; $iy_1 = y - (iy - y)$ ; $f = 1$ ;	$ix_1 = ix$ ; $iy_1 = iy$ ; $f = -1$ ;

```

ai = 135-graus(x1, y1, ix, iy) / 2
ci = graus(x1, y1, x, y)
ce = (ci+ai) * 2
gx = -sind(ce)
gy = -cosd(ce)

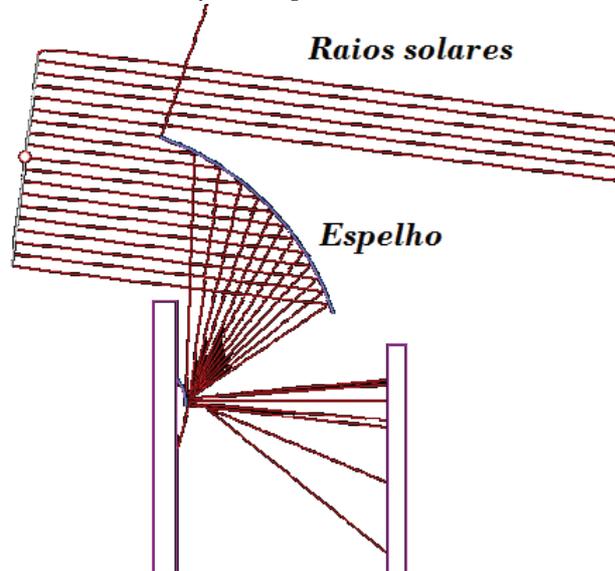
```

**Algoritmo 3:** processo de cálculo do ângulo do círculo relativo.

Após finalizar o algoritmo de reflexão em um objeto, o traçado do trajeto segue continuamente em linha reta até encontrar outro objeto (quando novo cálculo de reflexão será realizado) ou até alcançar os limites do desenho (borda da tela).

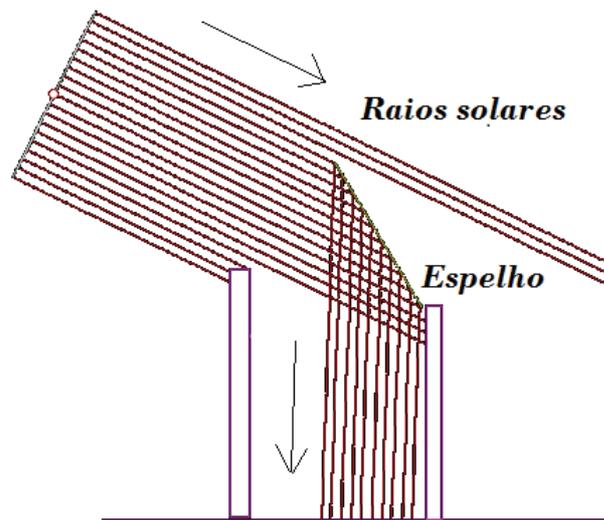
As Figuras 38 e 39 mostram objetivamente como fazer uma reflexão do sol que alcance o chão. Um pequeno círculo de contorno vermelho e preenchimento branco representa o sol; as linhas vermelhas são raios solares; a parabólica azul-rosa representa a parabólica espelhada; retas roxas são prédio sem o espelho e uma linha amarela é um espelho plano. Observa-se que o sol atinge o prédio com os raios e, quase paralelamente, estes fazem a reflexão pelo espelho plano e rebatem direto no chão. Para essa simulação, é preciso ter a posição inicial do sol. Calcula-se o ângulo que contém a quantidade de raios solares perpendiculares, fazendo o cálculo a cada posição dos raios até a cor amarela, e detecta-se qual tipo de cor para calcular o ângulo de reflexão e assim sucessivamente a cada mudança de posição dos raios. Se um raio de sol encontrar a cor roxa, o mecanismo é finalizado porque não tem reflexão. Se em determinada posição a cor rosa for encontrada (uma parábola divergente), é preciso calcular o ângulo de reflexão utilizando algoritmo de parabólica para encontrar a nova direção. Se o raio encontrar a cor azul-marinho (uma parabólica convergente), é preciso aplicar o cálculo de ângulo de reflexão de parabólica convergente para determinar o novo caminho.

**Figura 38:** Parabólica espelhada permite a reflexão dos raios solares para alcançar as paredes dos dois prédios usando técnicas de *ray tracing*.



Fonte: autor.

**Figura 39:** Espelho plano permite a reflexão dos raios solares para enviar luz ao chão entre dois prédios.



Fonte: autor.