



Simulação da Radiação Solar Incidente nos Edifícios em Ambiente CAD

RENATO GLIMARÃES CASTANHEIRA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO – FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO/FAU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA/PROARQ

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



UFRJ

Simulação da Radiação Solar Incidente nos Edifícios em Ambiente CAD

Renato Guimarães Castanheira

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Ciências em Arquitetura, área de concentração em Conforto Ambiental e Eficiência Energética.

Orientador: Prof.Dr. Oscar Daniel Corbella

Rio de Janeiro

Agosto de 2007

Simulação da Radiação Solar Incidente nos Edifícios Utilizando um Ambiente CAD

Renato Guimarães Castanheira

Orientador: Prof.Dr. Oscar Daniel Corbella

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Ciências em Arquitetura, área de concentração em Conforto Ambiental e Eficiência Energética.

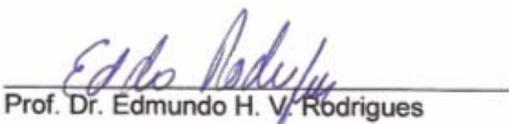
Aprovada por:



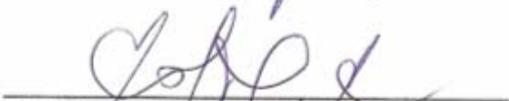
Presidente, Prof. Dr. Oscar D. Corbella



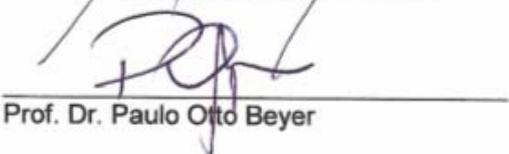
Prof.ª Dr.ª Claudia Barroso-Krause



Prof. Dr. Edmundo H. V. Rodrigues



Prof. Dr. Carlos Alberto N. Cosenza



Prof. Dr. Paulo Otto Beyer

Rio de Janeiro
Agosto de 2007

Castanheira, Renato Guimarães.

Simulação da Radiação Solar Incidente nos Edifícios em Ambiente CAD/ Renato Guimarães Castanheira. Rio de Janeiro: UFRJ/ FAU, 2007.

xx, 177f.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Oscar Daniel Corbella

Tese (doutorado) – UFRJ/ Faculdade de Arquitetura e Urbanismo/ Programa de Pós-graduação em Arquitetura, 2006.

Referências Bibliográficas: f. 130-133.

1. Radiação Solar. 2. Simulação. 3. Eficiência Energética. 4. Eficiência Energética. 5. Conforto Ambiental. 6. Ambiente CAD. I. Corbella, Oscar Daniel. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-graduação em Arquitetura. III. Título.

Dedico este trabalho aos meus pais, à minha esposa e a todos que contribuíram com seu incentivo durante esta árdua jornada.

*É justamente a possibilidade de
vencer os desafios que torna a
vida interessante.*

Agradecimentos

Agradeço ao Professor Oscar Daniel Corbella pela orientação e a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Simulação da Radiação Solar Incidente nos Edifícios Utilizando um Ambiente CAD

Renato Guimarães Castanheira

Orientador: Prof.Dr. Oscar Daniel Corbella

Resumo da Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Ciências em Arquitetura.

Esta Tese tem como cenário a viabilidade de se realizar procedimentos de simulação destinados às análises das condições internas de conforto e eficiência energética no próprio ambiente CAD, onde normalmente são desenvolvidos os projetos dos edifícios.

Com objetivo de investigar a validade da hipótese adotada, no que tange à estimativa da quantidade de radiação solar incidente nas superfícies externas dos edifícios, foi proposto um método para analisar a radiação solar incidente no envelope utilizando o programa *AutoCAD* como ambiente de trabalho. Para implementar o método proposto e avaliar a sua viabilidade, foram desenvolvidas ferramentas destinadas ao cálculo da radiação solar incidente nas superfícies que definem o envelope dos edifícios. Codificadas em *AutoLISP*, operam como autênticos comandos residentes do programa *AutoCAD* e podem ser utilizadas, de forma rápida e prática, durante a fase de projeto do edifício.

Após a fase de desenvolvimento e testes preliminares, as ferramentas foram avaliadas em um estudo do comportamento da radiação solar incidente em função da forma geométrica do edifício e suas relações proporcionais. Foram determinadas, para as formas básicas estudadas, as relações proporcionais que conduzem aos edifícios que recebem as quantidades mínimas de radiação solar.

Após a realização de todas as etapas do trabalho, o método proposto e as ferramentas desenvolvidas mostraram-se eficientes e práticos nos estudos relativos à radiação solar incidente nos edifícios, comprovando a hipótese prevista.

Palavras-chave: Radiação Solar, Eficiência Energética, Conforto Ambiental, Simulação, Ambiente CAD.

ABSTRACT***Simulation of the Solar Radiation Incident in buildings
through a CAD Environment*****Renato Guimarães Castanheira**

Orientador: Prof.Dr. Oscar Daniel Corbella

Abstract da Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Ciências em Arquitetura.

This Thesis has as scenery the viability of execution of the procedures needed for the simulation of the behavior of variables that define the internal conditions of comfort and energetic efficiency in buildings in the CAD ambient (project ambient).

The aim of this research was to investigate the validity of the adopted hypothesis in relation to solar radiation. An alternative method of investigation was proposed and computer tools developed in order to analyze the solar radiation incident on the envelope of a building using the ambient of the program *AutoCAD*. Codified in *AutoLISP*, they operate as authentic resident commands of *AutoCAD*, making its use possible in a quick and practical way during the execution of the project.

After being developed and tested, the proposed method and the tools developed were evaluated in a case study, involving the study of the behavior of incident solar radiation in its relation to the geometrical form of a building and its

proportional relations. For the forms studied the proportional relations that minimize the amount of solar radiation received by those buildings were determined.

The method proposed showed to be practical and efficient. Using the developed tools and the sophisticated graphic interface of *AutoCAD*, the analysis of the incidence of solar radiation on a building has become easier and more agreeable when compared to methods used by simulation programs in use.

After the accomplishment of all of the stages of this research, the proposed method and the developed tools proved efficient and practical in the relative studies concerning solar radiation incident in buildings, being in agreement with the foreseen hypothesis.

Key-words: Solar radiation, Energy Efficiency, Environmental Comfort, Simulation, CAD Environment.

SUMÁRIO

Resumo	vii
Abstract	ix
Sumário	xi
Lista de símbolos	xiv
Lista de figuras	xvii
Lista de tabelas	xxi
Lista de quadros	xxii
CAPÍTULO 1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	23
1.1 Introdução	23
1.2 Hipótese e objetivo	30
1.2.1 Hipótese	30
1.2.2 Objetivo	30
1.2.3 Planejamento metodológico	30
1.3 Distribuição dos assuntos	31
CAPÍTULO 2 O PROCESSO DE SIMULAÇÃO	34
2.1 As ferramentas de simulação	34
2.2 A interface com o usuário	36
2.3 A geometria do edifício e o processo de simulação	37
2.4 As interfaces e as ferramentas desenvolvidas	41
2.5 A interoperabilidade	42
2.6 Soluções alternativas	46
2.7 Situação atual	47
CAPÍTULO 3 FERRAMENTAS I – Características básicas	50
3.1 Introdução	50
3.2 A linguagem <i>AutoLISP</i>	50
3.2.1 Como surgiu o <i>AutoLISP</i>	50
3.2.2 A história do <i>AutoLISP</i>	51
3.2.3 A natureza do <i>LISP</i>	51
3.2.4 O <i>AutoLISP</i> dentro do <i>AutoCAD</i>	53
3.2.5 O Visual <i>LISP</i>	54

3.3	Base teórica dos algoritmos.....	55
3.3.1	O azimute e a inclinação dos planos receptores	55
3.3.1.1	Modelos em três dimensões	55
3.3.1.2	Modelos em duas dimensões	62
3.3.2	Cálculo da radiação solar incidente nos planos receptores.....	65
3.4	As ferramentas <i>AutoLISP</i>	66
3.4.1	Considerações gerais	66
3.4.2	As ferramentas <i>Rad3P</i> , <i>RadV</i> e <i>RadG2</i>	68
CAPÍTULO 4 FERRAMENTAS II – Utilização.....		74
4.1	Funcionamento básico	74
4.1.1	Ferramenta <i>Rad3P</i>	74
4.1.2	Ferramenta <i>RadG2</i>	75
4.1.3	Ferramenta <i>RadV</i>	76
4.2	A forma e as proporções na geometria dos edifícios	77
4.2.1	Considerações gerais	77
4.2.2	Edifícios prismáticos (paralelepípedos)	78
4.2.3	Edifícios cilíndricos retos	87
4.2.4	Edifícios esféricos (calotas esféricas).....	97
4.2.5	As formas estudadas e a radiação incidente	107
4.2.6	Terreno em encosta (superfície topográfica)	107
CAPÍTULO 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES		113
5.1	Ferramentas desenvolvidas.....	113
5.1.1	Ferramenta <i>RadSol</i>	113
5.1.2	Ferramenta <i>RadV</i>	114
5.1.3	As ferramentas <i>RadG2</i> e <i>Rad3P</i>	114
5.1.4	Discussões gerais sobre as ferramentas desenvolvidas	115
5.2	Resultados obtidos nas simulações realizadas.....	118
5.2.1	Edifícios prismáticos (paralelepípedos)	119
5.2.2	Edifícios cilíndricos	123
5.2.3	Edifícios esféricos.....	124
5.2.4	Análises comparativas entre as formas analisadas	126
CAPÍTULO 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS		128
6.1	Conclusões	128
6.2	Sugestões	131

6.3 Expectativas.....	131
Referências bibliográficas	133
ANEXO A - Conceitos básicos	137
A.1. Medida do Tempo	137
A.1.1. Hora solar verdadeira local (TST – Local True Solar Time	137
A.1.2. Hora média local (LMT – Local Mean Time)	137
A.1.3. Hora universal (UT – Universal Time).....	137
A.1.4. Equação do tempo.....	137
A.1.5. Hora padrão local (LST – Local Standard Time).....	138
A.2. Elementos de geometria solar	139
A.2.1. Declinação solar	139
A.2.2. Ângulo horário.....	139
A.2.3. Altura solar.....	140
A.2.4. Azimute solar	140
A.2.5. Ângulo de Incidência.....	142
A.3. Períodos Ensolarados e Sombreados	143
A.3.1. Conceitos básicos.....	143
A.3.2. Insolação no plano horizontal (nascente, poente e duração do dia).....	144
A.3.3. Insolação nos planos genéricos (nascentes e poentes aparentes).....	145
A.3.3.1. Caso 1: não existem raízes reais no intervalo pesquisado (ω_N, ω_P)... 146	
A.3.3.2. Caso 2: existem duas raízes reais e distintas no intervalo (ω_N, ω_P) ... 147	
A.3.3.3. Caso 3: existe uma só raiz real no intervalo (ω_N, ω_P)	148
A.4. Radiação solar incidente em planos receptores genéricos.....	150
A.4.1. Radiação solar extraterrestre.....	150
A.4.2. Coeficiente de transparência da atmosfera (KT).....	151
A.4.3. Componente difusa da radiação solar global	153
A.4.4. Razão entre radiação direta nos planos inclinados e horizontal (Rb).	154
A.4.5. Componente refletida da radiação solar global	162
A.4.6. Radiação global média diária mensal incidente em um plano inclinado	163
ANEXO B – Código AutoLISP para o cálculo da inclinação.....	164
ANEXO C – Código <i>AutoLISP</i> para o cálculo do azimute	165

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{cobert}	área da cobertura dos edifícios	[m ²]
A_{esf}	área da superfície esférica	[m ²]
A_{cil}	área da superfície cilíndrica	[m ²]
A_{env}	área do envelope dos edifícios	[m ²]
C_p	comprimento da base retangular dos edifícios prismáticos	[m]
E	fator de correção para a equação do tempo	[minutos]
G_b	radiação direta incidente em um plano horizontal	[W/m ²]
G_{bt}	radiação direta incidente em um plano inclinado	[W/m ²]
G_{bn}	radiação direta em um plano perpendicular aos raios solares	[W/m ²]
\bar{H}_b	componente direta da radiação global	[kWh/m ² .dia]
\bar{H}_R	componente refletida da radiação global	[kWh/m ² .dia]
\bar{H}	radiação média diária mensal incidente no plano horizontal	[kWh/m ² .dia]
H_{cobert}	radiação solar incidente na cobertura dos edifícios	[kWh/dia]
h_{cil}	altura dos edifícios cilíndricos	[m]
h_{esf}	altura dos edifícios esféricos	[m]
\bar{H}_D	componente difusa da radiação global	[kWh/m ² .dia]
H_{cil}	radiação incidente nas fachadas dos edifícios cilíndricos	[kWh/dia]
H_{esf}	radiação incidente nas fachadas dos edifícios esféricos	[kWh/dia]
H_{lat}	radiação incidente nas fachadas dos edifícios prismáticos	[kWh/dia]
\bar{H}_T	radiação média diária mensal incidente no plano genérico	[kWh/m ² .dia]
H_{UAcil}	radiação média incidente na superfície cilíndrica	[kWh/m ² .dia]
H_{env}	radiação total incidente no envelope dos edifícios	[kWh/dia]
h_p	altura dos edifícios prismáticos	[m]

H_{UAesf}	radiação média incidente na superfície esférica	[kWh/m ² .dia]
\bar{H}_{bT}	radiação solar direta incidente no plano inclinado	[kWh/m ² .dia]
\bar{H}_0	radiação solar extraterrestre média diária mensal	[kWh/m ² .dia]
H_0	radiação solar média extraterrestre diária	[kWh/m ² .dia]
H_S	duração do dia	[horas]
K_T	coeficiente de transparência da atmosfera instantâneo	[-]
\bar{K}_T	coeficiente de transparência da atmosfera médio mensal	[-]
L_B	lado da base do prisma que aproxima os cilindros	[m]
L_p	lado da base retangular dos edifícios prismáticos	[m]
n	número de lados da base (cilindro aproximado)	[-]
nd	nº de dias entre o dia 1º de janeiro e o dia considerado	[dias]
R_b	fator de radiação direta instantâneo	[-]
r_b	raio da base da calota esférica	[m]
R_{cil}	raio da base do edifício cilíndrico	[m]
R_{esf}	raio da esfera suporte da calota esférica	[m]
\bar{R}_b	fator de radiação direta médio mensal	[-]
S_{RF}	soma da radiação média nas fachadas (ed. prismáticos)	[kWh/m ² .dia]
t	hora solar	[-]
t_N	hora solar relativa ao nascente	[-]
t_P	hora solar relativa ao poente	[-]
V_{cil}	volume contido no envelope do edifício cilíndrico	[m ³]
V_{esf}	volume contido no envelope do edifício esférico	[m ³]
V_p	volume contido no envelope do edifício prismático	[m ³]

CARACTERES GREGOS

α	altura solar	[°]
β	inclinação dos planos receptores genéricos	[°]
γ	azimute dos planos receptores genéricos	[°]
γ_s	azimute solar	[°]
δ	declinação solar	[°]
φ	relação proporcional entre o comprimento e o lado da base retangular	[-]
ϕ	latitude local	[°]
θ	ângulo de incidência	[°]
θ_z	ângulo zenital	[°]
λ_p	relação proporcional entre a altura e o lado da base	[-]
λ_{cil}	relação proporcional entre a altura e o raio da base	[-]
λ_{esf}	relação proporcional entre a altura e o raio da esfera suporte	[-]
ρ	albedo	[-]
ω_N	ângulo horário relativo ao nascente	[°]
ω_P	ângulo horário relativo ao poente	[°]
ω	ângulo horário	[°]

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Edifícios prismáticos baixos	27
Figura 1.2 Edifícios prismáticos esbeltos	28
Figura 1.3 Edifícios cilíndricos.....	28
Figura 1.4 Edifício esférico (calota esférica).....	29
Figura 2.1 Tempo gasto até as primeiras simulações executadas com sucesso	37
Figura 2.2 Tempo gasto na inserção da geometria de simulação	38
Figura 2.3 A entrada da geometria do edifício no programa <i>EnergyPlus</i>	39
Figura 2.4 Tempo em uma simulação funcionando sem problemas	40
Figura 2.5 Interação entre um programa CAD e um programa simulador.....	44
Figura 3.1 Plano definido por três pontos.....	56
Figura 3.2 Inclinação e azimute do plano receptor.....	57
Figura 3.3 Direção do vetor normal ao plano	57
Figura 3.4 Convenção adotada para o azimute dos planos	59
Figura 3.5 Tela inicial do programa <i>RadSOL</i>	60
Figura 3.6 Célula triangular analisada.....	60
Figura 3.7 Resultados obtidos com o programa <i>RadSOL</i>	61
Figura 3.8 Fachada com orientação genérica	62
Figura 3.9 Fachada orientada para o leste ou para o oeste.....	64
Figura 3.10 Fachada orientada para o norte ou para o sul	64
Figura 3.11 Menu e barra de ferramentas para o cálculo da radiação solar	66
Figura 3.12 Bloco Norte	67
Figura 3.13 Bloco Escala	67
Figura 3.14 Superfície topográfica	69
Figura 3.15 Superfície geométrica de revolução.....	69
Figura 3.16 Representação simplificada de edifícios em estruturas de arame	71
Figura 3.17 Fachadas com pé direito constante e variável	72

Figura 3.18 Vértices coincidentes ou colineares - <i>Rad3P</i> e <i>RadG2</i>	72
Figura 3.19 Problemas com os vértices inseridos - <i>Rad3P</i> e <i>RadG2</i>	72
Figura 3.20 Vértices coincidentes na ferramenta <i>RadV</i>	72
Figura 3.21 Polígonos convexo, aproximadamente convexo e não convexo.....	73
Figura 4.1 Telhado em forma de calota esférica	74
Figura 4.2 A radiação incidente no telhado esférico.....	74
Figura 4.3 Galpão analisado com a ferramenta <i>RadG2</i>	75
Figura 4.4 A radiação incidente no envelope do edifício	75
Figura 4.5 Edifício analisado com a ferramenta <i>RadV</i>	76
Figura 4.6 A radiação incidente em um edifício com uma fachada curva	76
Figura 4.7 Dimensões do edifício prismático.....	78
Figura 4.8 Tela do AutoCAD obtida após a utilização da ferramenta <i>RadV</i>	83
Figura 4.9 Aspecto dos edifícios prismáticos com a relação $\varphi = 1:1$	86
Figura 4.10 Cilindros aproximados por prismas regulares	87
Figura 4.11 Circunferência circunscrita à base do prisma.....	87
Figura 4.12 Edifício base para o estudo dos edifícios cilíndricos	88
Figura 4.13 Tela para o edifício da Série A	91
Figura 4.14 Tela para o edifício da Série B	91
Figura 4.15 Cilindro equilátero	95
Figura 4.16 Edifícios cilíndricos baixo e esbelto.....	96
Figura 4.17 Aspecto dos edifícios cilíndricos estudados	97
Figura 4.18 Dimensões das calotas esféricas	97
Figura 4.19 Edifícios esféricos construídos nas posições <i>normal</i> e <i>invertida</i>	97
Figura 4.20 Tela obtida na simulação do edifício esférico na posição <i>normal</i>	99
Figura 4.21 Tela obtida na simulação do edifício esférico na posição <i>invertida</i>	99
Figura 4.22 Curvas para H_{esf} e H_{cobert}	102
Figura 4.23 Calota semi-esférica.....	103
Figura 4.24 Edifício ideal - posição <i>normal</i> (75000 m ³).....	104

Figura 4.25 Edifícios esféricos com 75000 m ³	106
Figura 4.26 Encosta utilizada nas simulações.....	108
Figura 4.27 Planos definidos através de uma malha do AutoCAD.....	109
Figura 4.28 Tela obtida na simulação para fevereiro	109
Figura 4.29 Tela obtida na simulação para junho.....	110
Figura 4.30 Simulação com vértices definidos pelo usuário.....	112
Figura 5.1 Face exposta ao Sol.....	114
Figura 5.2 A vista apresenta superposições de células e vértices	116
Figura 5.3 Partes superior e inferior da superfície a ser analisada	116
Figura 5.4 Vistas utilizadas nas simulações.....	117
Figura 5.5 Radiação incidente nos edifícios prismáticos em função da relação φ .	119
Figura 5.6 Valor de φ correspondente à radiação incidente mínima	120
Figura 5.7 Evolução da radiação incidente em função da relação λ_p	120
Figura 5.8 Incrementos na radiação incidente nos edifícios baixos e esbeltos	121
Figura 5.9 Representação do edifício prismático <i>ideal</i>	121
Figura 5.10 Incrementos relativos para os edifícios cilíndricos	123
Figura 5.11 Incrementos para os edifícios esféricos analisados	125
Figura 5.12 Formas dos edifícios estudados.....	126
Figura A.1 A translação da Terra e a declinação solar.....	139
Figura A.2 Posição do Sol.....	140
Figura A.3 Convenção adotada para o azimute solar	141
Figura A.4 Ângulo de incidência.....	142
Figura A.5 Períodos sombreados e ensolarados	143
Figura A.6 Não existem raízes reais no intervalo (ω_N, ω_P)	146
Figura A.7 Duas raízes distintas no intervalo (ω_N, ω_P)	147
Figura A.8 Uma só raiz (caso prático) no intervalo (ω_N, ω_P)	148
Figura A.9 Instantes ensolarados e sombreados nas fachadas N e S	149

Figura A.10 Ângulos envolvidos na determinação do fator R_b	154
Figura A.11 Representação do fator R_b instantâneo	155
Figura A.12 Representação do fator R_b horário.....	156
Figura A.13 Representação geométrica do fator R_b médio	158
Figura A.14 Algoritmo utilizado para a estimativa do fator R_b médio	160
Figura A.15 Erros estimados no método numérico utilizado	162

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Valores para edifícios com a orientação N.....	81
Tabela 4.2 Edifícios <i>ideais</i> – parâmetros geométricos.....	82
Tabela 4.3 Edifícios <i>ideais</i> – parâmetros de radiação incidente.....	83
Tabela 4.4 Edifícios <i>baixos</i> (h=10m) – parâmetros geométricos.....	84
Tabela 4.5 Edifícios <i>baixos</i> – parâmetros de radiação incidente.....	84
Tabela 4.6 Edifícios <i>esbeltos</i> (h=90m) – parâmetros geométricos.....	85
Tabela 4.7 Edifícios <i>baixos</i> – parâmetros de radiação incidente.....	85
Tabela 4.8 Incrementos na radiação incidente, relativos ao edifício <i>ideal</i>	86
Tabela 4.9 Edifícios da Série A (R=35.3554m) - parâmetros geométricos.....	89
Tabela 4.10 Edifícios da Série B (h=30m) - parâmetros geométricos.....	89
Tabela 4.11 Edifícios da Série A – parâmetros de radiação.....	90
Tabela 4.12 Edifícios do Série B – parâmetros de radiação.....	90
Tabela 4.13 Comparação entre a ferramenta <i>RadV</i> e a equação 4.21.....	93
Tabela 4.14 A ferramenta <i>RadV</i> e a equação 4.21 (Séries A e B).....	93
Tabela 4.15 Resultados para os edifícios cilíndricos analisados (75000 m ³).....	96
Tabela 4.16 Elementos geométricos dos edifícios analisados.....	98
Tabela 4.17 Valores de radiação para os edifícios analisados.....	98
Tabela 4.18 Edifício ideal semi-esférico (75000 m ³).....	103
Tabela 4.19 Comparação entre as fórmulas práticas e <i>RadG2</i>	105
Tabela 4.20 Comparações entre edifícios esféricos (75000 m ³).....	106
Tabela 4.21 Resultados obtidos nas simulações para a encosta.....	110
Tabela A.1 Correção do Azimute Solar para a convenção adotada.....	142
Tabela A.2 Dia médio e radiação solar extraterrestre para o Rio de Janeiro.....	151
Tabela A.3 Valores para a transparência média mensal.....	152
Tabela A.4 Radiação solar diária média mensal no plano horizontal.....	153
Tabela A.5 Albedo dos solos mais comuns.....	163

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 Características básicas da ferramentas desenvolvidas.....	70
Quadro 4.1 Comparação entre os edificios ideais (75000m ³).....	107

CAPÍTULO 1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 INTRODUÇÃO

No início dos anos 70, a crise do petróleo desencadeou uma intensa busca por formas energéticas alternativas e novos métodos para economizar energia.

Para a arquitetura foram pesquisadas e desenvolvidas técnicas mais eficientes para o projeto de edifícios. Aliando o desenvolvimento dos computadores e a necessidade de se construir edifícios mais confortáveis e mais eficientes nos gastos de energia, incentivou-se o desenvolvimento de ferramentas computacionais destinadas à avaliação simultânea do comportamento das diversas variáveis envolvidas nos estudos das condições de conforto e desempenho energético nos edifícios.

Foram disponibilizadas aos arquitetos e engenheiros ferramentas computacionais para a simulação do desempenho energético e as condições de conforto no edifício ainda na fase de projeto, evitando, desta forma, intervenções no edifício depois de construído. As modificações realizadas posteriormente para correções de eventuais falhas no projeto original, normalmente demandam custos e não garantem bons resultados. A simulação computacional também pode ser aplicada em edifícios já construídos para validar as decisões já tomadas ou ainda orientar as intervenções a serem realizadas posteriormente visando melhorar o desempenho destes edifícios.

É importante ressaltar que, ao utilizar a simulação como ferramenta de projeto, os arquitetos e engenheiros também passaram a compartilhar dos problemas inerentes desta nova tecnologia (MORBITZER et al., 2001).

As trocas de energia entre os meios exterior e interior dos edifícios têm, como elemento central, o envelope construtivo que envolve os ocupantes de uma edificação. O estudo das condições internas de conforto e eficiência energética nos edifícios envolve um complexo e extenso conjunto de fenômenos e variáveis físicas e ambientais.

Durante muito tempo, os arquitetos e engenheiros brasileiros utilizaram diretrizes de projeto obtidas em uma literatura específica para as regiões tropicais, importada, na sua imensa maioria de países do hemisfério norte. Os estudos envolvendo as condições de conforto nos edifícios eram elaborados com base em textos clássicos como Olgyay (1963) e Koenigsberger et al. (1977). Em muitos casos, devido às dificuldades encontradas pelos projetistas brasileiros no acesso à literatura disponível, foram desenvolvidos projetos e construídos edifícios que dependiam de grandes quantidades de energia para proporcionarem aos ocupantes boas condições de conforto.

A necessidade de se economizar energia nos edifícios, seja para fomentar o crescimento do país ou para reduzir os danos ao meio ambiente, incentivou o desenvolvimento e a elaboração de um acervo bibliográfico nacional acessível aos arquitetos e engenheiros, destinado a orientar projetos de edifícios confortáveis e energeticamente eficientes para as regiões tropicais. Um exemplo deste acervo bibliográfico nacional é o texto apresentado em Corbella e Yannas (2003), que trata de uma arquitetura sustentável adaptada às regiões tropicais, exemplificando o uso de recursos naturais e o traçado de diretrizes destinadas a orientar a elaboração de projetos de edifícios que sejam confortáveis e energeticamente eficientes nas regiões tropicais.

A radiação solar é uma variável ambiental muito importante para os projetos de arquitetura, especialmente nas regiões tropicais. É responsável, em muitos casos, por situações de desconforto e incrementos nos gastos de energia nos edifícios. Deve merecer uma atenção especial da parte dos projetistas, pois da mesma forma que pode causar sérios comprometimentos nas condições de conforto e na eficiência energética de um edifício, se utilizada racionalmente, pode incrementar a eficiência energética do mesmo edifício.

A radiação solar representa uma forma limpa e renovável de energia que deve ser utilizada, sempre que possível, como uma alternativa ao uso da energia elétrica. Um caso simples é o aquecimento de água nos edifícios através de aquecedores solares, eliminando o uso dos chuveiros e aquecedores elétricos que consomem grandes quantidades de energia elétrica.

Ao analisar os efeitos da radiação solar incidente em um edifício, é importante considerar o comportamento distinto dos diversos materiais que constituem o envelope, normalmente constituído por dois tipos de fechamentos, os *opacos* e os *não opacos*. Ao estudá-los, observa-se que a diferença básica entre eles reside no modo pelo qual a radiação solar e seus efeitos atingem o interior do edifício.

Entre os fechamentos opacos, o telhado (cobertura) representa o elemento arquitetônico mais vulnerável à ação do Sol, particularmente no período mais quente nas regiões tropicais, quando recebe consideráveis quantidades de radiação solar (HERTZ, 1998). Neste período, é responsável por uma parcela significativa no valor total da carga térmica de resfriamento e, conseqüentemente, por consideráveis incrementos nos gastos de energia elétrica em sistemas mecânicos de ventilação e ar condicionado.

Estudos elaborados em Castanheira (2001) mostraram que nos edifícios baixos (um ou dois pavimentos) situados no Rio de Janeiro, no verão, os telhados podem receber até 80% do total de radiação solar incidente no edifício.

Nos períodos mais quentes, as fachadas além de contribuírem de forma bem mais discreta para o valor total da radiação solar incidente no envelope do edifício e conseqüentemente na carga térmica de resfriamento, são mais fáceis de serem protegidas da ação do Sol, através de elementos sombreadores.

As aberturas e as janelas devem ser tratadas de forma cautelosa pelos arquitetos e engenheiros, pois por onde penetra a radiação solar visível (luz), penetra também a radiação solar infravermelha de onda curta. É uma situação complexa, pois a mesma janela que permite uma boa entrada de luz natural, reduzindo o consumo de energia elétrica em iluminação artificial, pode causar um significativo aumento no consumo de energia elétrica no sistema de ar condicionado. Ghisi e Tinker (2001) mostraram que é possível reduzir o consumo de energia nos edifícios adotando uma relação otimizada entre a área das janelas e as dimensões dos ambientes.

É sempre importante não esquecer que as aberturas têm um significado especial para os ocupantes de um edifício, pois são responsáveis pela comunicação visual com meio exterior e, segundo Rivero (1985), podem ser consideradas a expressão exterior do volume.

Dados baseados no Atlas de Energia Elétrica (ANEEL, 2007), relativos ao ano de 2003, mostram que, do total de energia elétrica disponível no Brasil, 46% são consumidos nos edifícios (residenciais, comerciais e públicos), enquanto o setor industrial consome cerca de 41%. O restante é consumido na iluminação pública e nas áreas rurais.

O alto consumo de energia elétrica nos edifícios mostra, de forma clara, a importância dos arquitetos e engenheiros para a política energética e de conservação ambiental do país. Estes profissionais, através da elaboração de projetos de edifícios que ofereçam aos ocupantes boas condições de conforto e sejam eficientes em termos de consumo de energia elétrica, podem contribuir significativamente para a formulação de uma política energética mais eficiente para o país, propiciando um crescimento e um desenvolvimento sustentáveis e ainda uma redução significativa dos danos ao meio ambiente.

Segundo Castanheira (2001), os arquitetos e os engenheiros têm condições de intervir para minimizar os efeitos da radiação solar incidente nos edifícios, posicionando os fechamentos de forma correta, através da adoção de valores considerados ideais para a orientação e a inclinação destas superfícies.

Uma outra alternativa interessante, analisada posteriormente neste trabalho, é um estudo criterioso da forma do edifício e de suas relações proporcionais. As figuras 1.1 e 1.2 mostram variações nas relações proporcionais utilizadas pelos arquitetos para os edifícios na forma prismática de base retangular. Nos edifícios, cujas proporções são representadas pela figura 1.1 predominam as coberturas, enquanto nos edifícios que seguem o modelo mostrado na figura 1.2 predominam as fachadas.



Figura 1.1 Edifícios prismáticos baixos



Figura 1.2 Edifícios prismáticos esbeltos

As figuras 1.3 e 1.4 mostram variações na forma dos edifícios. Na figura 1.3 a forma geométrica primitiva utilizada é cilindro circular reto, enquanto na figura 1.4 é mostrado um edifício na forma aproximada de uma calota esférica. É importante ressaltar que, nas análises realizadas ao longo deste trabalho, os edifícios com a forma de uma calota esférica são tratados por edifícios esféricos.



Figura 1.3 Edifícios cilíndricos



Figura 1.4 Edifício esférico (calota esférica)

Ao estudar a radiação solar incidente em um edifício, seja para a estimativa das condições internas de conforto, redução no consumo de energia ou dimensionamento de sistemas artificiais de climatização, observa-se que um estudo individualizado da radiação solar incidente em cada superfície que compõe o envelope de um edifício não é o ideal. É necessário avaliar a ação da radiação solar incidente nas superfícies do edifício de uma forma global, analisando o envelope do edifício como um todo, tornando este procedimento uma tarefa exaustiva e propensa a erros. A solução mais indicada nestes casos é a utilização da simulação computacional, que pode ser implementada na prática através dos programas simuladores disponíveis, apesar de todos os problemas inerentes à utilização destas ferramentas.

É importante ressaltar que os programas simuladores disponíveis, em sua maioria, não são desenvolvidos especificamente para análises da radiação solar incidente nos edifícios e, portanto, não representam soluções práticas para este tipo de estudo, especialmente nos casos em que os edifícios possuem envelopes definidos por superfícies complexas.

1.2 HIPÓTESE E OBJETIVO

1.2.1 Hipótese

A hipótese adotada neste trabalho prevê a viabilidade de se estimar o comportamento de parâmetros importantes para as condições de conforto e a eficiência energética nos edifícios no próprio ambiente *CAD*, onde a grande maioria dos projetos é desenvolvida atualmente por arquitetos e engenheiros.

1.2.2 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é investigar a validade da hipótese adotada no que tange à radiação solar incidente e propor um método alternativo para implementar, através de ferramentas específicas, procedimentos destinados à análise da radiação solar incidente nos edifícios no ambiente do programa *AutoCAD*.

O *AutoCAD* foi escolhido por propiciar boas condições para o desenvolvimento de aplicativos residentes através das diversas linguagens disponíveis, entre elas, o *AutoLISP* e também por ser um dos ambientes *CAD* mais utilizados pelos arquitetos e engenheiros brasileiros.

O método proposto utiliza uma geometria de simulação concebida no próprio ambiente de projeto e facilmente obtida a partir da geometria original do edifício, através dos recursos para a modelagem em duas e três dimensões disponibilizados pelo *AutoCAD*. Facilita o processo de inserção da geometria de simulação nos programas simuladores e as complexas e instáveis trocas de dados entre aplicativos computacionais distintos.

1.2.3 Planejamento metodológico

Para que o objetivo deste trabalho pudesse ser alcançado, foram desenvolvidas ferramentas computacionais destinadas à simulação da radiação solar incidente no

envelope dos edifícios, que se comportam como autênticos comandos residentes do programa *AutoCAD*.

Permitem que a radiação solar seja analisada em todas as superfícies do envelope de forma simultânea e, ainda, podem ser utilizadas em análises envolvendo superfícies complexas, tais como as superfícies topográficas. Modelos matemáticos, linguagens utilizadas, virtudes e limitações são apresentados no Capítulo 3.

Após o desenvolvimento e avaliações preliminares, as ferramentas desenvolvidas foram avaliadas em um estudo de caso envolvendo a análise do comportamento da radiação solar incidente em edifícios prismáticos, cilíndricos e esféricos, onde foram estudadas e discutidas a influência da forma e das suas relações proporcionais nos ganhos solares nestes edifícios. Os procedimentos executados nesta etapa do trabalho são detalhados e apresentados no Capítulo 4.

1.3 DISTRIBUIÇÃO DOS ASSUNTOS

O texto completo deste trabalho é apresentado em seis capítulos e dois anexos, descritos resumidamente a seguir.

No Capítulo 1 são apresentados uma introdução ao tema, a hipótese adotada, o objetivo do trabalho e a metodologia aplicada.

No Capítulo 2 são apresentados os pontos fundamentais que incentivaram e justificaram a realização da pesquisa. Após um resumo histórico da evolução dos programas simuladores, são discutidos os principais problemas inerentes aos procedimentos de simulação encontrados pelos arquitetos e engenheiros, na sua adoção como ferramenta efetiva de projeto.

No Capítulo 3 são abordados aspectos básicos sobre as linguagens de programação utilizadas para o desenvolvimento de aplicativos para o ambiente do *AutoCAD*. São

apresentadas as ferramentas computacionais desenvolvidas com suas características básicas, virtudes e limitações.

No Capítulo 4 são apresentadas aplicações imediatas das ferramentas desenvolvidas. A seguir, é elaborada uma avaliação do método proposto, através de um conjunto de simulações utilizando os aplicativos desenvolvidos em uma situação real de trabalho. São investigadas as relações entre a radiação solar incidente e a forma e as proporções nos edifícios prismáticos (base retangular), cilíndricos (retos) e esféricos (calotas esféricas). As formas analisadas, apesar de simples, podem ser consideradas como integrantes na maioria dos projetos arquitetônicos. Os pontos mais importantes nas avaliações das ferramentas desenvolvidas foram o funcionamento, a estabilidade, a praticidade, a qualidade e a utilidade dos resultados obtidos. Os parâmetros considerados para a avaliação do método proposto foram a viabilidade, a implementação e a praticidade.

No Capítulo 5, tendo como base os resultados obtidos no capítulo anterior, são discutidos e analisados os principais pontos pertinentes ao desempenho das ferramentas desenvolvidas, destacando as suas virtudes e limitações. Foram elaboradas considerações quanto à viabilidade de se realizar simulações no ambiente CAD e analisados e discutidos os resultados obtidos nos estudos envolvendo o comportamento dos edifícios prismáticos, cilíndricos e esféricos, em relação à radiação solar incidente nos seus fechamentos.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas após a realização de todas as etapas do trabalho, considerando as ferramentas desenvolvidas, o método proposto, a hipótese adotada, o objetivo do trabalho e os resultados obtidos nas simulações. São também apresentadas algumas sugestões e expectativas resultantes da pesquisa realizada.

No Anexo A, são apresentados os principais conceitos e fundamentos teóricos que conduziram à elaboração do modelo matemático utilizado nas ferramentas computacionais desenvolvidas neste trabalho.

Nos Anexos B e C são apresentados os códigos em *AutoLISP* das funções utilizadas pela ferramenta *Rad3P* para os cálculos da inclinação e do azimute do plano receptor.

CAPÍTULO 2 O PROCESSO DE SIMULAÇÃO

2.1 AS FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO

Nos anos 70 e 80 foram desenvolvidos os primeiros programas simuladores capazes de reproduzir fenômenos físicos complexos pertinentes ao balanço energético em um edifício. Os programas desenvolvidos consideravam a geometria do edifício, o modo de utilização, o sistema de iluminação e ainda a possibilidade da utilização de sistemas artificiais para climatização. Segundo Mendes et al. (2001), entre os principais programas simuladores desenvolvidos neste período, encontram-se o *NBSLD*, o *HVACSIM*, o *DOE-2*, o *BLAST*, o *ESP-r*, o *RADIANCE* e o *TRNSYS*.

Com o incrível avanço do *hardware* dos computadores e das linguagens de programação, surgiram os programas simuladores do tipo *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*). Estes programas, através de algoritmos sofisticados, propiciam uma melhor compreensão do comportamento térmico dos edifícios, disponibilizando informações importantes para as análises, tais como a distribuição da temperatura do ar, fluxos de ar, campos de pressão, umidade e as condições de iluminação. Como exemplos de programas simuladores do tipo *CFD*, podem ser citados o *FLUENT*, o *CFX* e o *PHOENICS*.

Mais tarde surgiram os programas simuladores utilizando a técnica da geração automática de código (*Automatic Code Generation*) com comportamento dinâmico (*dynamic behavior*). Estes programas, por serem extremamente velozes, permitem realizar simulações em tempo real, o que os habilita também para as atividades de controle (ZIMMERMANN, 2002).

Segundo Mendes et al. (2001), o programa pioneiro a ser utilizado no Brasil, foi o *NBSLD*, adotado nos anos 80 no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), em São Paulo. No início dos anos 90, começam a ser utilizados no Brasil os programas *DOE-2*, *ESP-r*, *TRNSYS*, *BLAST*, *FLUENT*, *PHOENICS*, *RADIANCE* e *HVACSIM*.

Apesar dos computadores pessoais disponíveis na época não disponibilizarem a velocidade de processamento e a quantidade de memória requeridas para a execução dos programas simuladores mencionados anteriormente, foram desenvolvidas, para estas máquinas, algumas ferramentas computacionais para simulação do desempenho de edifícios. Utilizando algoritmos mais simples e modelos geométricos restritos surgiram os primeiros programas simuladores para os computadores pessoais. O *CASAMO-CLIM* (CENTRE d' ENERGETIQUE, 1989), codificado em *BASIC* para a plataforma *IBM-PC XT*, é um exemplo desta geração de programas simuladores.

Atualmente, com a rápida evolução dos micro-computadores, seja em termos de capacidade de processamento e quantidade de memória, estão sendo desenvolvidos e disponibilizados diversos programas simuladores de grande capacidade para estes equipamentos. Como representantes desta geração de simuladores, têm-se o *Energy-10* (NREL, 2006) e o *CoDyBa* (NOEL et al., 2001).

É importante ressaltar que estes programas, na sua maioria, não são distribuídos de forma isenta de custos, priorizam as condições climáticas e construtivas de seus países de origem e adotam de forma implícita conceitos e definições contidos em publicações de associações técnicas¹ que muitas vezes não estão disponíveis aos profissionais brasileiros de forma isenta de custos.

¹ ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Para análises isoladas da radiação solar incidente em superfícies planas, foram desenvolvidos e disponibilizados vários aplicativos computacionais. Os programas *Radiação* (CASTANHEIRA,2001), *Radiasol* (GESTE, 2005) e o *RadSol²*, são boas opções para analisar individualmente as superfícies planas receptoras, mas não são recomendados para análises envolvendo edifícios.

Atualmente, o *EnergyPlus* (CRAWLEY et al., 2001), vem ganhando terreno entre os arquitetos e engenheiros brasileiros, especialmente entre os profissionais ligados às atividades de pesquisa e ensino nas universidades. Apesar de ser codificado em *FORTRAN*, o *EnergyPlus* pode ser utilizado a partir do *Windows*, através uma interface modesta, denominada *EP-Launch*, que disponibiliza um editor bastante simples destinado à criação do arquivo de entrada de dados (*Input Data File - IDF*).

Os usuários do *EnergyPlus* já podem utilizar em suas simulações dados climáticos, propriedades de materiais e construções que estão de acordo com as condições brasileiras, o que certamente é um ponto positivo para o programa. Um outro ponto positivo é que o *EnergyPlus* pode ser obtido sem quaisquer restrições e custos na página do Departamento de Energia do Governo Americano (EERE, 2007),

2.2 A INTERFACE COM O USUÁRIO

Um dos problemas mais complexos e de difícil solução no âmbito do desenvolvimento de ferramentas e aplicativos computacionais (softwares), independente da área de aplicação, é a elaboração de uma interface que propicie uma comunicação fácil e eficiente com o usuário. O sucesso de um aplicativo computacional está diretamente relacionado com a sua interface com o usuário.

² Desenvolvido pelo Autor para a elaboração deste trabalho

Segundo Taplin (1993), o problema da interface pode ser descrito como a *última fronteira da computação*. A elaboração de uma interface eficiente não é um problema que possa ser resolvido através de computadores mais avançados, pois na verdade a solução depende do entendimento de como as pessoas pensam e trabalham.

2.3 A GEOMETRIA DO EDIFÍCIO E O PROCESSO DE SIMULAÇÃO

Nos estudos das diversas etapas realizadas em um procedimento de simulação, é interessante distribuí-las segundo o tempo gasto para a sua execução. As análises apresentadas a seguir têm como base as figuras 2.1, 2.2 e 2.4, obtidas no estudo realizado por Bazjanac (2001).

A figura 2.1, mostra o tempo consumido nas diversas etapas executadas em um processo de simulação, quando após um considerável esforço, resultam as primeiras simulações realizadas com sucesso. Observa-se que a maior parcela do tempo é consumida na elaboração do arquivo de entrada de dados (IDF). Nesta etapa são definidos a geometria de simulação que representa o edifício, os materiais utilizados e as respectivas construções, detalhes de ocupação, utilização de equipamentos, iluminação, ventilação, climatização artificial e outros.

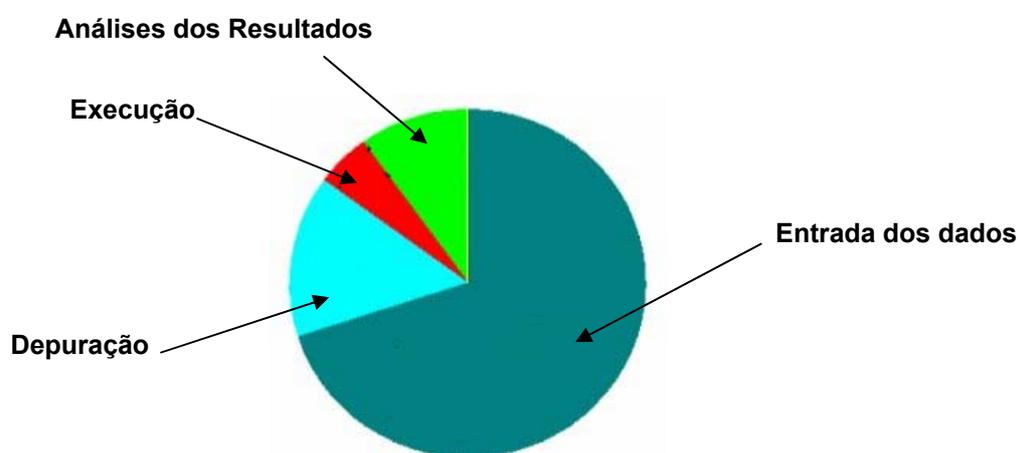


Figura 2.1 Tempo gasto até as primeiras simulações executadas com sucesso

A elaboração da geometria de simulação é obtida a partir da geometria de projeto do edifício, caracterizando-se as zonas térmicas e as inércias equivalentes. Conforme mostra a figura 2.2, a maior parte do tempo gasto na elaboração do arquivo de entrada de dados é consumida na inserção da geometria que representa o edifício no processo de simulação. Nesta etapa são definidos o posicionamento e as dimensões das paredes, fachadas, pisos, forros, tetos, janelas, portas, inércias, proteções solares e outras superfícies do edifício.



Figura 2.2 Tempo gasto na inserção da geometria de simulação

A inserção da geometria de simulação para um edifício é um processo iterativo que envolve um número bastante grande de operações manuais repetitivas. Além de exaustiva, é sujeita a erros, que aumentam proporcionalmente com a complexidade da geometria do edifício analisado. Em um processo envolvendo a simulação do desempenho energético de um edifício, dependendo do grau de complexidade do problema, mais de 80% do esforço total do trabalho pode ser consumido nesta etapa, pois normalmente é necessário inserir de forma manual as coordenadas cartesianas dos vértices que definem os fechamentos do edifício.

A figura 2.3 mostra um exemplo da entrada da geometria de um pequeno edifício no programa simulador *EnergyPlus*. Deve ser elaborada uma lista com todos os vértices que definem as superfícies planas do envelope do edifício e suas respectivas coordenadas cartesianas. Ao inserir as coordenadas dos vértices de uma superfície no programa, deve ser observado, de forma cuidadosa, o vértice de referência³ e o sentido apropriado⁴ para a inserção dos vértices, de modo a garantir a orientação correta da mesma.

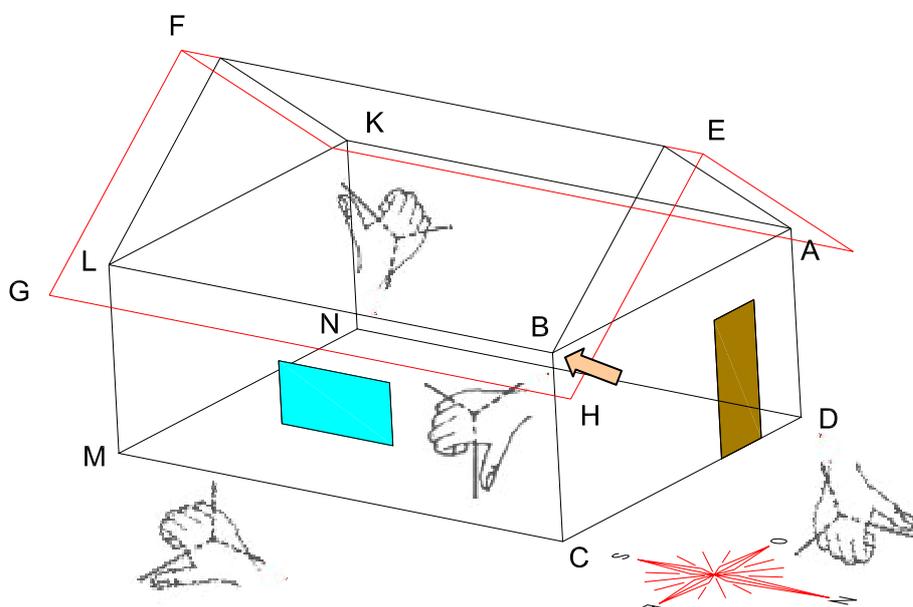


Figura 2.3 A entrada da geometria do edifício no programa *EnergyPlus*

A figura 2.4 mostra a distribuição do tempo para um procedimento de simulação concluído ou funcionando de maneira estável e sem problemas. Normalmente, esta etapa só é atingida após um esforço considerável para a solução de todos os problemas inerentes ao processo.

³ Uma das opções oferecidas é o canto superior esquerdo.

⁴ Pode ser adotado o sentido anti-horário, que corresponde à regra da mão direita, método utilizado para determinar o sentido do vetor resultante do produto vetorial entre dois vetores.

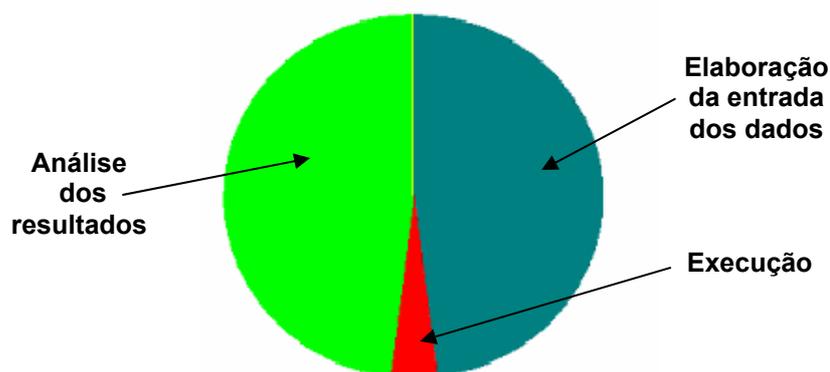


Figura 2.4 Tempo em uma simulação funcionando sem problemas

De acordo com a figura 2.4, cerca de 50% do tempo gasto em um procedimento de simulação é consumido na preparação do arquivo de entrada de dados (IDF), indicando que a elaboração do arquivo de entrada de dados representa um problema, cuja solução definitiva ainda não foi obtida. Este é um dos fatores mais importantes para que a simulação computacional ainda não tenha sido adotada como ferramenta efetiva de projeto nos escritórios de arquitetura e engenharia.

Um grande esforço tem sido feito no sentido de se utilizar nos programas simuladores um modelo geométrico para o edifício importado de um ambiente CAD. Vários estudos vêm sendo elaborados e apresentados sobre o assunto, entre eles, destacam-se Grau e Wittchen (1999) e Pelletret e Keilhoz (1999). Infelizmente, este é um procedimento bastante complexo, sem uma solução efetiva até o presente momento.

As principais dificuldades encontradas para a exportação da geometria do edifício de um ambiente CAD para um programa simulador são as seguintes:

- a grande quantidade de informações envolvidas em um processo de simulação;
- as diferenças estruturais existentes entre as linguagens utilizadas no desenvolvimento dos programas *CAD* e dos programas simuladores;

- a incompatibilidade existente entre as estruturas dos arquivos de dados utilizados pelos programas CAD e pelos programas simuladores.

2.4 AS INTERFACES E AS FERRAMENTAS DESENVOLVIDAS

No âmbito das soluções mais simples e específicas, foram desenvolvidas e comercializadas por empresas de desenvolvimento de softwares, várias ferramentas e interfaces para facilitar a elaboração dos arquivos com a entrada de dados (IDF), requeridos pelos programas simuladores.

Um exemplo clássico destas interfaces é o *VisualDOE-2*⁵ que gera um arquivo de entrada para o programa *PC DOE-2.1E-W83*⁶. Para os usuários do *EnergyPlus* estão disponíveis diversas ferramentas e interfaces, entre elas, podem-se citar: o *DesignBuilder*⁷, o *E+IEQ*⁸ e o *EFEN*⁹.

O principal problema relativo à maioria destas ferramentas e interfaces, é que além de não serem isentas de custo, não foram desenvolvidas de acordo com as condições relativas ao clima, aos materiais e às construções encontradas no Brasil e na maioria dos casos, não representam uma solução prática para os projetistas brasileiros.

Em 2005, foi apresentada a primeira interface nacional para os usuários do *EnergyPlus*. Denominada de *E2AC*¹⁰, foi desenvolvida no Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina (LABEEE).

⁵ www.archenergy.com

⁶ Variação do DOE-2.1E desenvolvida para plataformas UNIX.

⁷ www.designbuilder.co.uk

⁸ EPlusIEQ@taitem.com

⁹ www.designbuildersoftware.com

¹⁰ www.labeee.ufsc.br

Apresenta pequenos problemas de funcionamento e permite simulações restritas a um único ambiente com uma geometria extremamente simples. Sua principal virtude é a possibilidade de se utilizar arquivos contendo informações sobre dados climáticos, materiais e construções desenvolvidos para as condições brasileiras. Apesar de modesta, pode ser considerada um marco importante para a simulação utilizando o programa *EnergyPlus* no Brasil. Representa uma alternativa interessante para o ensino e o estudo do *EnergyPlus* nas escolas brasileiras.

2.5 A INTEROPERABILIDADE

Visando obter uma solução mais ampla e definitiva, foi criada a *Aliança Internacional para a Interoperabilidade*¹¹ (IAI) com a finalidade de efetivar as trocas de informações entre ferramentas computacionais distintas.

Segundo proposta da IAI, estas trocas devem ser realizadas através de arquivos chamados de *interoperáveis*, elaborados segundo um modelo padrão denominado de *IFC (Industry Foundation Classes)*.

O desenvolvimento do padrão *IFC* prevê a criação de novas possibilidades no sentido de se obter a interoperabilidade entre os ambientes de projeto (CAD) e as diversas ferramentas disponíveis para a simulação, facilitando a elaboração e a inserção da geometria de simulação.

Uma outra proposta interessante é a possibilidade de se utilizar a interoperabilidade no uso de ferramentas de simulação distintas em um único procedimento de simulação, com o objetivo de obter soluções mais precisas e refinadas.

¹¹ International Alliance for Interoperability (www.iai-na.org)

Várias empresas líderes em vendas de ferramentas de projeto para a arquitetura, tais como a *Autodesk (Architectural Desktop)*, a *Bentley (Microstation)* e a *Graphisoft (ArchiCAD)*, já disponibilizam o padrão *IFC* em seus produtos, mas é importante ressaltar que ainda ocorrem instabilidades e erros no processo envolvido na geração do modelo geométrico do edifício em um ambiente *CAD* e sua transposição para um programa simulador.

Um dos principais problemas para que os arquivos no padrão *IFC* sejam adotados pelos programas simuladores é a grande quantidade de informações a ser armazenada nestes arquivos, o que exige uma estrutura complexa e de difícil acesso.

O desenvolvimento de programas compatíveis com o padrão *IFC* é uma tarefa complicada para os programadores e projetistas de software que desenvolvem programas simuladores, na sua maioria, leigos no padrão *IFC*. O procedimento de se extrair de um arquivo *IFC* apenas as informações específicas requeridas por uma determinada ferramenta de simulação, bem como a necessidade de manter o arquivo corretamente atualizado com novas informações provenientes das simulações pode ser uma tarefa bastante complicada.

Para implementar a utilização dos arquivos *IFC*, foi desenvolvido um aplicativo computacional, do tipo ferramenta intermediária (*middleware software*), denominado de *BSPro COM-Server* (KAROLA et al., 2001).

Utilizando uma arquitetura de programação independente, *BSPro COM-Server* pode ser utilizada em qualquer ambiente de programação para Windows e através de métodos específicos, permite o acesso de forma simples às classes *IFC* e suas propriedades, sem exigir conhecimentos profundos do padrão.

Tem seu foco principal voltado para os estudos envolvendo os edifícios (*Building Services - BS*), tais como: os sistemas *HVAC* (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*), a manipulação dos elementos relativos à geometria do edifício e as informações relativas aos parâmetros térmicos. Para que seja utilizada, requer um módulo de serviços (espécie de interface), desenvolvido especialmente para cada ferramenta utilizada (*BSPro Client Module*).

A maioria dos programas simuladores não tem condições de interagir diretamente com o arquivo *IFC* gerado pelo ambiente *CAD* e também não dispõe de algoritmos para a conversão de arquivos *IFC* em *IDF*. Na prática, a interação com os arquivos *IFC* é proporcionada pela ferramenta *BSPro COM-Server* e a conversão do arquivo *IFC* em *IDF* é efetivada através do *Módulo BS*, conforme mostra a figura 2.5.

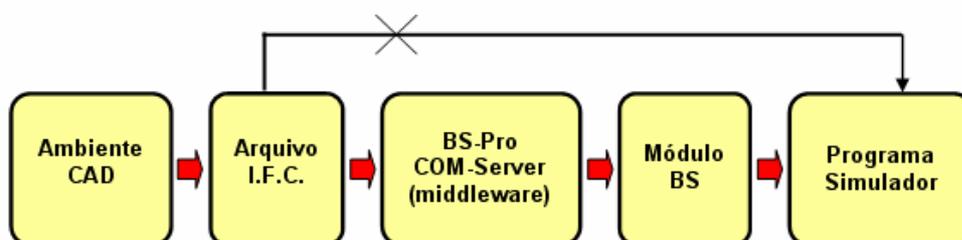


Figura 2.5 Interação entre um programa CAD e um programa simulador

Para os usuários do programa *EnergyPlus*, está em desenvolvimento no *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL) um módulo de serviço (BS), com o objetivo de implementar a técnica da interoperabilidade (padrão IFC) nos procedimentos de simulação.

Denominado de *IFCtoIDF*, importa dados a partir de um arquivo *IFC* e cria o correspondente arquivo *IDF*. A versão disponível atualmente é destinada apenas à extração dos elementos que representam a geometria do edifício, não incluindo as características e propriedades dos materiais e das construções no arquivo *IDF* gerado.

Codificado na linguagem *Visual C++*, requer para funcionar a instalação do pacote *BSPRO COM-Server*, disponibilizado gratuitamente aos usuários registrados do *EnergyPlus*.

Lamentavelmente, a utilização do módulo *IFCtoIDF* não significa que o processo de criação do arquivo de entrada de dados requerido pelo *EnergyPlus* (IDF) possa ser executado sem a intervenção manual do usuário. É importante considerar que a interoperabilidade baseada nos arquivos com padrão *IFC* ainda é uma tecnologia relativamente nova e segundo EERE (2007), mesmo a simples troca de informações a respeito da geometria de um edifício, representada pelos espaços definidos através das paredes, dos tetos e dos pisos, ainda pode resultar em um processo confuso, quando se utilizam diversas ferramentas em um mesmo processo de simulação.

Uma maior experiência envolvendo a troca de informações entre ferramentas distintas para simulação ainda é necessária para que esta tecnologia se torne madura o suficiente para ser considerada funcional e prática. Diversos trabalhos têm sido realizados no sentido de implementar os processos de simulação do desempenho de edifícios utilizando ferramentas distintas, trocando informações através de arquivos no padrão *IFC*.

Em Bazjanac (2003) foram integradas em um mesmo procedimento de simulação várias ferramentas distintas. A geometria do edifício foi criada no programa *ArchiCAD* e exportada para o programa *EnergyPlus* através da ferramenta *BSPRO COM-Server* e do módulo *IFCtoIDF*, onde foi dimensionado o sistema *HVAC*. Os resultados obtidos para o fluxo de ar entre as zonas foram exportados para uma ferramenta desenvolvida para o dimensionamento e a distribuição (layout) das tubulações, denominada *MagicCAD*, onde o sistema foi redimensionado.

Os resultados obtidos foram novamente exportados para *EnergyPlus*, via módulo de serviço desenvolvido para o *MagicCAD*, onde uma nova simulação foi realizada, produzindo resultados considerados de maior qualidade ao final de todo o processo.

Em Nytsch-Geusen et al. (2003), foi elaborado um ambiente para realizar simulações em edifícios, a partir de um conjunto de ferramentas distintas. A geometria do edifício é concebida em uma versão do aplicativo *Architectural Desktop* (ADT), denominada *CADKON-DT*, melhorado pela equipe de pesquisa para facilitar a troca de informações com arquivos *IFC*, através de aplicativos desenvolvidos em *Visual Basic* (VBA). A geometria de edificação e os dados necessários para as simulações foram exportados, através de arquivos *IFC*, para os programas *SMILE* (simulador térmico) e *KASKADE* (simulador *CFD*). As ferramentas *AMIRA* e *SimuVis* foram utilizadas na visualização dos resultados. Ao final do trabalho, foram relatadas deficiências no processo de geração do arquivo *IFC*, no ambiente de projeto do *Architectural Desktop* (ADT).

2.6 SOLUÇÕES ALTERNATIVAS

Apesar das condições necessárias para a realização de simulações das condições de conforto e desempenho energético dos edifícios no Brasil terem melhorado muito com a disponibilidade de arquivos climáticos para as principais regiões do país e o conhecimento das propriedades dos materiais e das construções utilizadas nos procedimentos de simulação, o processo ainda é complicado e os resultados obtidos nos programas simuladores têm que ser tratados de forma cautelosa.

Em muitos casos é preferível adotar algoritmos mais simples e conhecidos, para os quais existem condições de se fornecer informações confiáveis para os valores das variáveis envolvidas no processo, a utilizar os algoritmos sofisticados dos programas

simuladores disponíveis, às vezes alimentados com informações de procedência duvidosa. Nestes casos pode ser interessante utilizar alguns pacotes matemáticos disponíveis que permitem realizar simulações, tais como o ambiente *MATLAB* (*Simulink*).

A principal vantagem desta técnica é o fato do usuário conhecer bem o modelo matemático e o algoritmo utilizados nas simulações, com suas virtudes e limitações, descaracterizando um procedimento do tipo caixa-preta (ATHIENITIS, 1995).

Em Hudson e Underwood (1999) é apresentado um modelo matemático simples, representado por um circuito elétrico composto por resistores (resistências térmicas) e capacitores (inércias térmicas) para a simulação no ambiente *MATLAB*. Em Mendes et al. (2003) é apresentado o desenvolvimento de uma ferramenta para a análise do comportamento da temperatura nos edifícios, com diversas opções automáticas de controle utilizando o *MATLAB* como ambiente de simulação.

2.7 SITUAÇÃO ATUAL

Historicamente, o uso da simulação computacional para resolver problemas práticos tem sido uma atividade predominantemente restrita a grupos de pesquisa nas universidades e a poucos engenheiros e arquitetos e segundo McElroy (1999), os objetivos das simulações são normalmente específicos e voltados para as áreas ligadas às atividades de pesquisa.

Devido às dificuldades inerentes ao processo e à pouca conscientização dos projetistas e do mercado consumidor quanto à importância dos procedimentos de simulação para a elaboração de bons projetos, eles têm sido realizados, muitas vezes em caráter experimental, na fase final dos projetos, com objetivo de avaliar as decisões já tomadas.

As ferramentas de simulação devem ser utilizadas na fase de projeto do edifício, pois ao permitirem uma avaliação simultânea dos fenômenos e variáveis envolvidos no processo, os arquitetos e engenheiros podem estimar as condições internas de conforto e o consumo de energia no futuro edifício e se necessário, intervir para a correção de eventuais falhas.

A simulação computacional é uma ferramenta importante de projeto. Quando bem utilizada, pode conduzir a projetos de edifícios confortáveis e eficientes no consumo de energia, evitando a necessidade de intervenções corretivas no edifício depois de construído, as quais normalmente são de custo elevado e não produzem os resultados esperados.

Segundo Hobbs et al. (2003), as principais barreiras observadas pelos arquitetos e engenheiros para a implementação mais efetiva dos procedimentos de simulação como ferramenta de projeto foram as seguintes:

- o complexo processo envolvido na criação do modelo para simulação;
- as dificuldades no entendimento dos conceitos e definições envolvidos nos processos de simulação;
- o aumento na responsabilidade sobre os resultados obtidos nos projetos de arquitetura (redução na margem de erro);
- os métodos de trabalho pouco familiares (inércia tecnológica);
- o aumento da carga de trabalho na fase de projeto (aumento de custo).

A curto e a médio prazo podem ser implementadas as seguintes medidas para incentivar o uso da simulação computacional como ferramenta efetiva de projeto:

- o desenvolvimento de métodos e ferramentas computacionais para a simulação mais acessíveis;
- o treinamento para garantir aos projetistas um nível de conhecimento mínimo, necessário ao entendimento dos fenômenos envolvidos nos procedimentos de simulação (ensino nas escolas de arquitetura e engenharia).

CAPÍTULO 3 FERRAMENTAS I – Características básicas

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as ferramentas computacionais desenvolvidas neste trabalho. É importante ressaltar que estas ferramentas não foram desenvolvidas por profissionais da área de desenvolvimento de aplicativos para o *AutoCAD*, não são produtos acabados e não pretendem concorrer com quaisquer outras ferramentas existentes para simulação. Elas se destinam apenas a fornecer o suporte técnico necessário para que seja possível implementar a metodologia traçada para alcançar os objetivos deste trabalho.

3.2 A LINGUAGEM *AutoLISP*

Aqui são apresentados alguns pontos fundamentais sobre a linguagem *AutoLISP*, utilizada na codificação das ferramentas computacionais desenvolvidas.

3.2.1 Como surgiu o *AutoLISP*

O *AutoLISP* surgiu como uma linguagem experimental na versão 2.15 do *AutoCAD*, mas só foi documentado com o lançamento da versão 2.17. Até então, o nome *AutoLISP* não era usado e a *Autodesk* referia-se às funções *LISP* como um novo recurso para tratar variáveis e expressões. A pretensão inicial da *Autodesk* era que o *AutoLISP* fosse uma ferramenta de programação destinada apenas aos programadores mais experientes, mas o caráter de acessibilidade da linguagem desenvolvida surpreendeu a todos, permitindo a usuários menos experientes automatizar operações tediosas e repetitivas no *AutoCAD*.

3.2.2 A história do *AutoLISP*

O *AutoLISP* deriva da linguagem *LISP* (*LISt Processing*). Depois do *FORTTRAN*, o *LISP* é a linguagem de programação de alto nível mais antiga ainda usada nos computadores.

Segundo Matsumoto (2001), o primeiro interpretador *LISP* foi desenvolvido no final da década de 50 por *John McCarthy* e um grupo de pesquisadores em computação no *Massachusetts Institute of Technology* e devido às suas características de programação recursiva e manipulação de estruturas de dados genéricas logo se tornou a linguagem padrão no desenvolvimento de sistemas de inteligência artificial.

De acordo com a *Autodesk* (1993), o dialeto *AutoLISP* tem sua origem em uma variação experimental do *LISP*, conhecida por *XLISP* (*eXperimental LISP*), desenvolvida por *Davis Betts* em 1980. Para implementar o *AutoLISP* ao consagrado ambiente do *AutoCAD* era necessário criar uma ligação entre eles, o que foi possível através do desenvolvimento do *ADS* (*AutoCAD Development System*).

O *AutoCAD* pode ser considerado como o sistema operacional do *AutoLISP*, pois os programas escritos em *AutoLISP* são executados apenas no ambiente do *AutoCAD*, ou seja, os aplicativos escritos em *AutoLISP* podem ser movidos de uma plataforma de hardware para outra com extrema facilidade, mas só serão executados se o *AutoCAD* estiver disponível.

3.2.3 A natureza do *LISP*

O *LISP* difere da maior parte das linguagens de programação. Para os usuários familiarizados com outras linguagens, tais como *FORTTRAN*, *BASIC*, *PASCAL* e *C*, algumas de suas características serão familiares, enquanto outras serão completamente novas.

A linguagem *LISP* pode ser considerada básica para outras linguagens, pois é utilizada com freqüência para definir a gramática inicial dos sistemas de compiladores utilizados em implementações de outras linguagens tais como *C*, *ALGOL* e *PASCAL*.

O armazenamento de dados (*listas*) e programas na mesma área de memória do computador não é comum para a maioria das linguagens de programação. Isto se deve ao fato de que o código-fonte é compilado gerando um programa executável, o qual não pode ser modificado posteriormente. O *LISP* armazena todas as listas da mesma maneira. O fato dos programas serem simplesmente listas, permite manipulações únicas de programas e subprogramas dentro de um mesmo sistema.

A recursividade, que é um conceito básico e intuitivo, no qual uma sub-rotina chama a si própria é outra característica única do *LISP*. Esta capacidade é extremamente importante na manipulação de listas, já que podem ser escritos programas muito pequenos para manipular listas estruturadas de variáveis, embora a recursividade necessite de grandes quantidades de memória de pilha¹².

A estrutura de lista encadeada¹³ (*linked list*) é outro recurso especial do *LISP*. Por meio de uma série de ponteiros de dados, o formato de lista encadeada provê uma maneira de armazenar um conjunto seqüencial de dados em um computador. As listas encadeadas oferecem fácil controle sobre complexas listas de dados, embora normalmente também necessitem de quantidades maiores de memória do que as listas seqüenciais.

¹² Região da memória reservada na qual os programas armazenam dados como endereços de retorno de chamadas de procedimentos e funções, parâmetros passados e, às vezes, variáveis locais.

¹³ São listas que podem conter listas como elementos.

O exemplo a seguir mostra como uma simples seqüência de operações aritméticas é codificada através de listas no *AutoLISP*. A lista $(+ (/ 10 2) (* 4 3) 3)$, representa a codificação em *AutoLISP* da seqüência de operações $10 \div 2 + 4 \times 3 + 3$. No *AutoLISP*, as listas são conjuntos limitados por parênteses. Note-se que na lista principal encontram-se duas listas (listas secundárias) e um elemento isolado.

Os anexos A e B mostram dois exemplos de utilização da linguagem *AutoLISP*. São apresentados os códigos-fonte das funções desenvolvidas para os cálculos da inclinação e do azimute dos planos receptores, pertencentes ao algoritmo de cálculo da ferramenta *Rad3P*. As funções têm os seus algoritmos baseados no modelo matemático descrito no item 3.3, deste capítulo.

3.2.4 O *AutoLISP* dentro do *AutoCAD*

Uma observação adicional sobre o *LISP* deve ser feita para os já familiarizados com a natureza não-matemática da linguagem. As funções matemáticas foram bastante melhoradas no *AutoLISP*, pois a maioria das aplicações em *AutoLISP* requer cálculos.

Apesar do *AutoLISP* não ser como o *FORTRAN*, a implementação da *Autodesk* contém muitas extensões à linguagem *LISP*, projetadas para fazer fluir a execução de programas matematicamente intensivos. A evolução do *AutoLISP* dentro do ambiente *AutoCAD* foi largamente direcionada por pedidos de desenvolvedores de aplicativos e usuários do programa *AutoCAD*.

O *AutoLISP* tornou-se uma ferramenta valiosa para programação no ambiente do *AutoCAD*, sendo o método mais simples para a elaboração de aplicativos residentes destinados a atender às necessidades específicas dos usuários.

Os outros métodos disponíveis para o desenvolvimento de aplicativos para o ambiente do *AutoCAD* são o *ADS* (linguagem C), o *ARX*¹⁴ (linguagem C++) e *VBA*¹⁵ (linguagem *BASIC* da Microsoft).

Os programas desenvolvidos nestas linguagens são mais eficientes em termos de velocidade e utilização da memória e ainda podem acessar recursos de hardware que o *AutoLISP* não pode, mas exigem programadores mais qualificados e experientes e os aplicativos resultantes não têm a mesma portabilidade em termos de plataforma de hardware.

Quando não for possível resolver determinados problemas com a utilização pura e simples da linguagem *AutoLISP*, pode-se recorrer ao *ADS*, ao *VBA* ou ao *ARX*, que são ferramentas capazes de criar aplicativos mais poderosos.

3.2.5 O Visual LISP

Visual LISP é um ambiente de programação para o *AutoLISP*. Veio somente depois da versão 14 do *AutoCAD* (*AutoCAD R14*), quando ainda era vendido separadamente. Após a versão 2000 do *AutoCAD* (*AutoCAD 2000*), o *Visual LISP* tornou-se parte integrante do sistema.

Antes do *Visual LISP*, os programas eram codificados em textos do tipo *ASCII*¹⁶ em editores de texto externos ao ambiente do *AutoCAD*, tais como o Bloco de Notas (*NotePad*), *MS-Word* e outros. Os arquivos criados deveriam ser armazenados em arquivos de texto com a extensão *LSP*.

¹⁴ AutoCAD Runtime Extension.

¹⁵ Visual Basic for Applications.

¹⁶ American Standard Code for Information Interchange.

Com a criação do *Visual LISP*, o desenvolvimento de programas em *AutoLISP*, desde a fase da codificação até a penosa fase da depuração (*debug*), pode ser realizado no interior de um mesmo ambiente, utilizando todos recursos disponíveis nos ambientes de desenvolvimento profissionais.

3.3 BASE TEÓRICA DOS ALGORITMOS

Nesta etapa são apresentados os princípios teóricos que propiciaram a elaboração dos algoritmos de cálculo utilizados pelas ferramentas computacionais desenvolvidas.

3.3.1 O azimute e a inclinação dos planos receptores

A seguir são apresentados os fundamentos teóricos utilizados na elaboração dos algoritmos das ferramentas *RadSol*, *Rad3P*, *RadV* e *RadG2* para o cálculo do azimute e da inclinação dos planos receptores definidos por três de seus pontos, distintos e não colineares.

3.3.1.1 Modelos em três dimensões

As ferramentas *Rad3P* e *RadG2* utilizam modelos tridimensionais definidos por malhas ou estruturas de arame, conforme o caso a ser analisado.

3.3.1.1.1 Equação do plano definido por três pontos

O plano receptor, mostrado na figura 3.1, é definido pelos três pontos distintos e não colineares $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$, $P_2(X_2, Y_2, Z_2)$ e $P_3(X_3, Y_3, Z_3)$. Pode ser representado analiticamente através da equação 3.1, obtida em textos clássicos de geometria analítica.

$$\begin{vmatrix} x - X_1 & y - Y_1 & z - Z_1 \\ X_2 - X_1 & Y_2 - Y_1 & Z_2 - Z_1 \\ X_3 - X_1 & Y_3 - Y_1 & Z_3 - Z_1 \end{vmatrix} = 0 \quad [3.1]$$

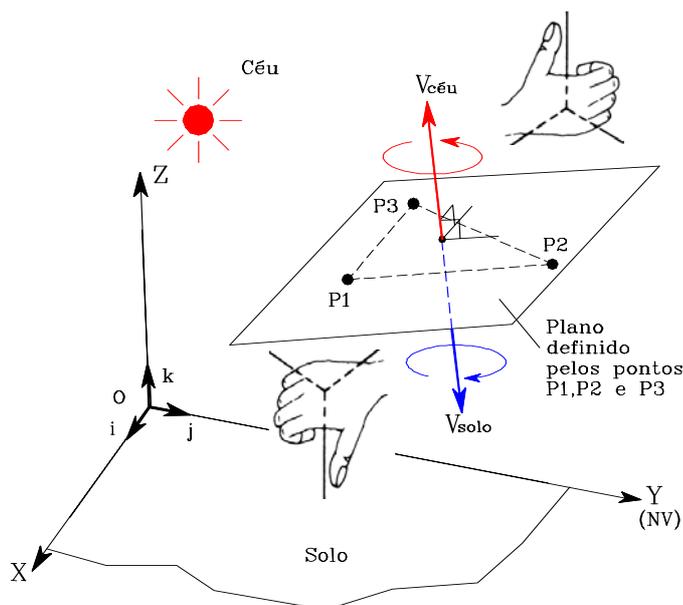


Figura 3.1 Plano definido por três pontos

3.3.1.1.2 Componentes cartesianas do vetor normal ao plano

A equação 3.1 pode ser reescrita na forma $ax + by + cz + d = 0$, onde:

$$a = (Y_2 - Y_1) \cdot (Z_3 - Z_1) - (Y_3 - Y_1) \cdot (Z_2 - Z_1) \quad [3.2]$$

$$b = -(X_2 - X_1) \cdot (Z_3 - Z_1) + (X_3 - X_1) \cdot (Z_2 - Z_1) \quad [3.3]$$

$$c = (X_2 - X_1) \cdot (Y_3 - Y_1) - (X_3 - X_1) \cdot (Y_2 - Y_1) \quad [3.4]$$

Os parâmetros a , b e c representam as componentes cartesianas de um vetor normal ao plano receptor. O sentido deste vetor é determinado pela ordem em que os pontos são considerados no cálculo (regra da mão direita).

Quando os pontos são considerados no sentido *anti-horário*, o vetor normal ao plano é representado pelo vetor $\vec{V}_{céu}$ (Fig. 3.1).

Quando os pontos são considerados no sentido *horário*, o vetor normal ao plano será representado pelo vetor \vec{V}_{solo} (Fig. 3.1).

Tem-se então: $\vec{V}_{céu} = a\hat{i} + b\hat{j} + c\hat{k} = -\vec{V}_{solo}$.

3.3.1.1.3 Cálculo da inclinação e do azimute do plano

A figura 3.2 mostra os ângulos β e γ que representam a inclinação e o azimute do plano em estudo.

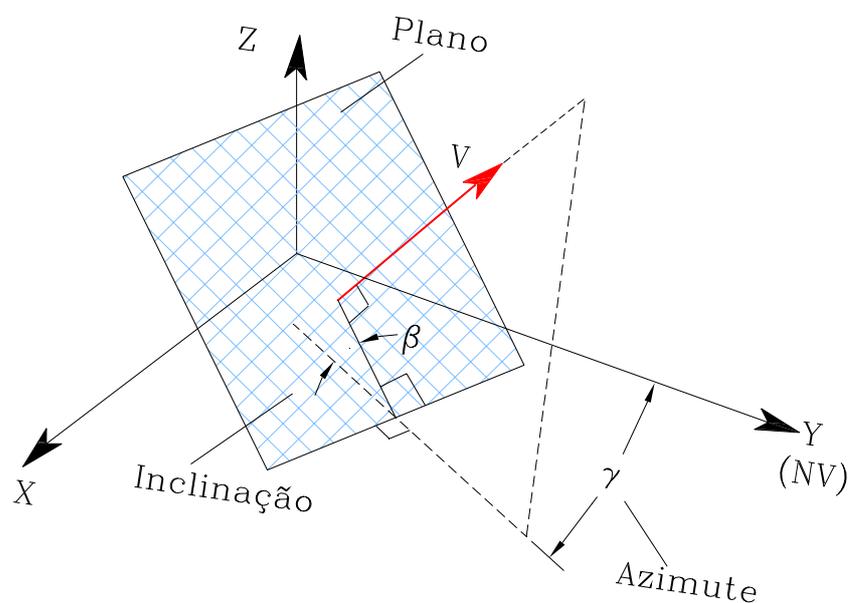


Figura 3.2 Inclinação e azimute do plano receptor

De acordo com a figura 3.3, os ângulos que o vetor \vec{V} , normal ao plano, forma com os eixos X, Y e Z são representados por ε , λ e φ , respectivamente.

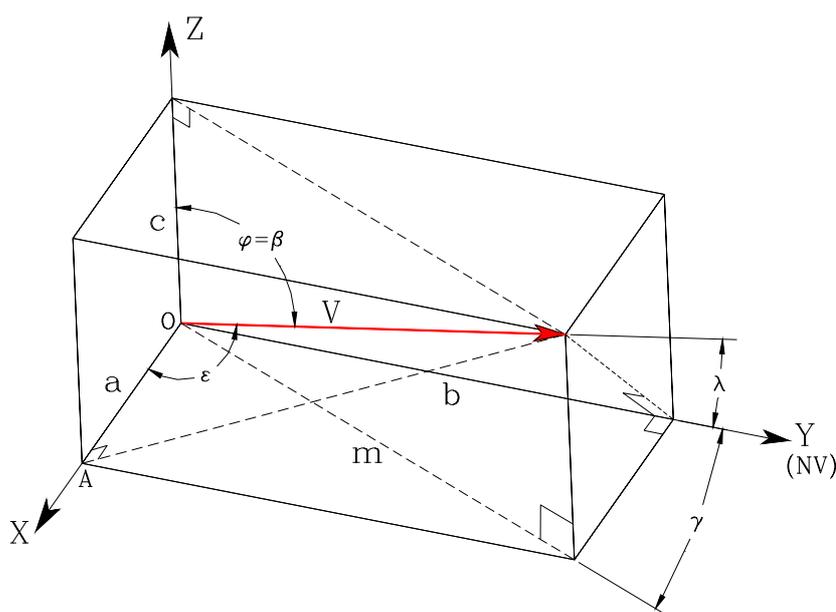


Figura 3.3 Direção do vetor normal ao plano

Os cosenos diretores do vetor \vec{V} podem ser calculados através das equações 3.5, 3.6 e 3.7.

$$\cos \varepsilon = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad [3.5]$$

$$\cos \lambda = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad [3.6]$$

$$\cos \varphi = \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad [3.7]$$

O ângulo β , definido entre o plano receptor e o plano horizontal, tem valor igual ao ângulo φ , definido entre a direção normal ao plano (vetor \vec{V}) e o eixo Z. A inclinação do plano receptor pode ser calculada através da equação 3.8.

$$\beta = \cos^{-1}(\varphi) \quad [3.8]$$

É importante ressaltar que valores de $\beta < 90^\circ$ representam um plano cujo vetor normal é $\vec{V}_{céu}$, enquanto valores de $\beta > 90^\circ$ representam um plano cujo vetor normal é \vec{V}_{solo} . Na figura 3.3, tem-se que:

$$m = \bar{V} \cdot \text{sen} \beta \quad [3.9]$$

$$b = m \cdot \cos \gamma \quad [3.10]$$

$$b = \bar{V} \cdot \cos \lambda \quad [3.11]$$

A partir das equações 3.9, 3.10 e 3.11, obtém-se a equação 3.12 que fornece o valor do ângulo que representa o azimute do plano.

$$\bar{V} \cdot \text{sen} \beta \cdot \cos \gamma = \bar{V} \cdot \cos \lambda \Rightarrow \cos \gamma = \frac{\cos \lambda}{\text{sen} \beta}$$

$$\gamma = \cos^{-1}\left(\frac{\cos \lambda}{\text{sen} \beta}\right) \quad [3.12]$$

A figura 3.4 mostra a convenção adotada neste trabalho para o azimute do plano.

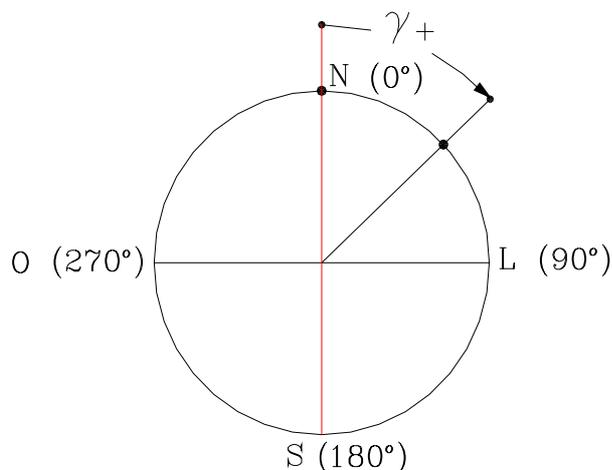


Figura 3.4 Convenção adotada para o azimute dos planos

Nos casos em que $\cos \varepsilon < 0$, o valor obtido para γ na equação 3.12 deve ser substituído pelo seu replemento ($360^\circ - \gamma$) para que seja compatível com a convenção adotada.

3.3.1.1.4 O programa RadSOL

O aplicativo *RadSOL* foi desenvolvido e codificado em *Object Pascal*, no ambiente *Delphi*, com o objetivo de avaliar a eficiência do modelo matemático adotado para o cálculo da radiação solar incidente em planos receptores genéricos.

Para os cálculos da inclinação e do azimute dos planos receptores é utilizado o modelo matemático apresentado no item 3.3.1. Os cálculos da transposição da radiação solar média diária mensal incidente no plano horizontal para um plano receptor genérico têm como base o modelo matemático utilizado em Castanheira (2001), cujos princípios teóricos e conceitos básicos são apresentados no Anexo A.

Ao longo do trabalho, o programa *RadSOL* foi utilizado para monitorar a qualidade dos resultados obtidos com as ferramentas *Rad3P* e *RadG2* durante a fase de desenvolvimento e no estudo dos edifícios prismáticos, na fase de simulações.

O programa é auto-explicativo e muito simples de ser utilizado. Além de servir aos propósitos deste trabalho é útil nas atividades de ensino. A principal diferença entre o programa *RadSOL* e os seus similares é a possibilidade de definir o plano receptor através de três pontos. A figura 3.5 mostra a única tela do programa *RadSOL*, onde são inseridos os dados e também são apresentados os resultados.

Figura 3.5 Tela inicial do programa *RadSOL*

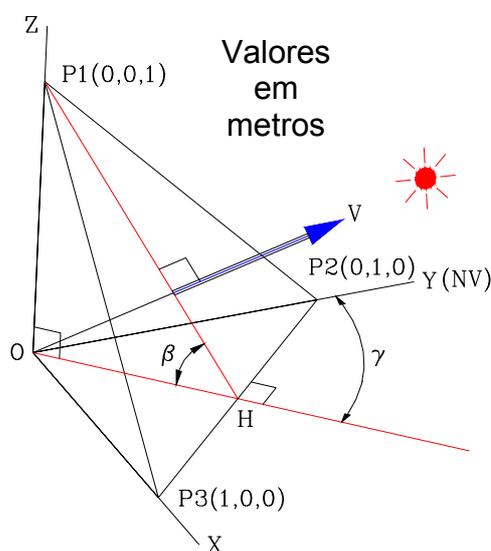


Figura 3.6 Célula triangular analisada

Com o objetivo de avaliar o algoritmo desenvolvido para os cálculos da inclinação e do azimute do plano receptor, partindo de três pontos distintos e não colineares, foram calculados manualmente os valores do azimute e da inclinação para um plano receptor definido pela célula triangular mostrada na figura 3.6.

Na figura 3.6, tem-se o triângulo eqüilátero $P_1P_2P_3$, cujos lados medem $\sqrt{2}$ m e a altura (P_1H) mede $\frac{\sqrt{6}}{2}$ m. O triângulo OP_2H é isósceles e o ângulo OP_2P_3 é reto (origem do referencial), de onde se pode concluir que o azimute do plano é igual a 45° , definindo uma superfície plana orientada para o nordeste, já que o eixo Y representa a direção do norte verdadeiro (NV).

No triângulo OP_1H (retângulo em O), tem-se que:

$$\text{sen } \beta = \frac{1}{\frac{\sqrt{6}}{2}} \Rightarrow \beta = \text{sen}^{-1}\left(\frac{\sqrt{6}}{3}\right) \Rightarrow \beta \cong 54,74^\circ \text{ (inclinação do plano receptor).}$$

Calculando a área da célula triangular, tem-se: $A = \frac{1}{2} \times \sqrt{2} \times \frac{\sqrt{6}}{2} \cong 0,87 \text{ m}^2$

RadSol v. 1.4- RC/2003

Dados Gerais
 Latitude: -22.91 (Norte + Sul -)
 Mês: Janeiro
 Radiação: 5.766 (kWh/m²)
 Albedo: 0.20

Resultados básicos
 Rb: 0.64 Kt: 0.50 Área: 0.87 (m²)
 H0: 11.62 fd: 0.46 Duracão: 31 (dias)
 Fatores de vista => Céu: 0.79 Solo: 0.21

Face exposta
 Céu Solo

Tipo de posicionamento do plano
 3 Pontos Azimute e Inclinação

3 Pontos

Ponto 1 (m)	Ponto 2 (m)	Ponto 3 (m)
X1: 1	X2: 0	X3: 0
Y1: 0	Y2: 1	Y3: 0
Z1: 0	Z2: 0	Z3: 1

Azimute e inclinação
 Azimute (°): 45.0 (0-N; 90-L; 180-S; 270-O)
 Inclinação (°): 54.74 (a 90°)

Ações

Área unitária

Valores diários(kWh/m²)
 Dir: 2.02
 Dif: 2.07
 Ref: 0.24
 Global: 4.33

Valores mensais(kWh/m²)
 Dir: 62.56
 Dif: 64.16
 Ref: 7.55
 Global: 134.28

Célula triangular

Valores diários(MWh)
 Dir: 0.00
 Dif: 0.00
 Ref: 0.00
 Global: 0.00

Valores mensais(MWh)
 Dir: 0.05
 Dif: 0.06
 Ref: 0.01
 Global: 0.12

Figura 3.7 Resultados obtidos com o programa RadSOL

Analisando no programa *RadSOL* a mesma célula triangular (voltada para o céu), obtêm-se os resultados mostrados na tela da figura 3.7. Os resultados obtidos $\gamma = 45^\circ$, $\beta = 54,74^\circ$ e $A = 0,87 \text{ m}^2$ são confirmados pelos resultados obtidos manualmente.

3.3.1.2 Modelos em duas dimensões

O modelo matemático apresentado a seguir é utilizado para o cálculo do azimute para planos verticais (fachadas) representados por seus traços¹⁷ no plano horizontal (XY). É utilizado na elaboração do algoritmo de cálculo da ferramenta *RadV*.

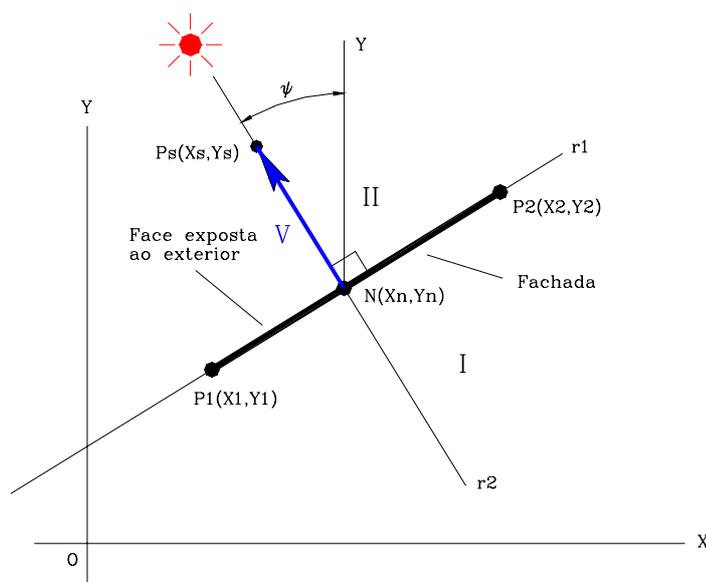


Figura 3.8 Fachada com orientação genérica

Na figura 3.8, $P_s(X_s, Y_s)$ é um ponto qualquer do semi-plano II. Sua finalidade no algoritmo utilizado é definir qual é a face do plano da fachada que está voltada para o Sol. A fachada é representada em planta através do traço de seu plano no plano XY e na figura 3.8 é representada pelo segmento P_1P_2 , cuja reta suporte é (r_1), definida pelos pontos $P_1(X_1, Y_1)$ e $P_2(X_2, Y_2)$.

¹⁷ Reta definida pela interseção entre o plano vertical (fachada) e o plano horizontal (plano XY).

Tem-se então:

$$\Delta_x = X_2 - X_1 \quad [3.12]$$

$$\Delta_y = Y_2 - Y_1 \quad [3.13]$$

A reta (r_1) pode ser representada pela equação 3.14.

$$Y = A_1 \cdot X + B_1 \quad [3.14]$$

Onde:

$$A_1 = \frac{\Delta_y}{\Delta_x} = \frac{(Y_2 - Y_1)}{(X_2 - X_1)} \quad [3.15]$$

$$B_1 = Y_1 - A_1 \cdot X_1 \quad [3.16]$$

A reta (r_2) que passa pelo ponto $P_s(X_s, Y_s)$ e é perpendicular à reta (r_1), pode ser representada pela equação 3.17.

$$Y = A_2 \cdot X + B_2 \quad [3.17]$$

$$A_2 = -\frac{1}{A_1} = -\frac{(X_2 - X_1)}{(Y_2 - Y_1)} \quad [3.18]$$

$$B_2 = Y_s - A_2 \cdot X_s \quad [3.19]$$

O ponto $N(X_n, Y_n)$ representa a interseção entre as retas (r_1) e (r_2). Suas coordenadas cartesianas podem ser calculadas por:

$$X_n = \frac{(B_2 - B_1)}{(A_1 - A_2)} \quad [3.20]$$

$$Y_n = B_1 + A_1 \cdot X_n \quad [3.21]$$

Os seguintes casos particulares devem ser observados:

- Traço perpendicular ao eixo X

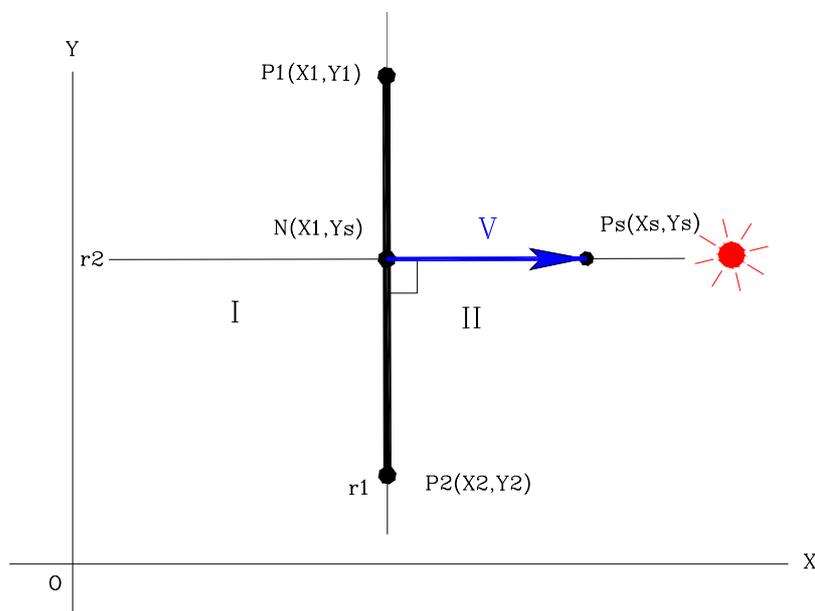


Figura 3.9 Fachada orientada para o leste ou para o oeste

Neste caso tem-se: $X_n = X_1$ e $Y_n = Y_s$.

- Traço perpendicular ao eixo Y

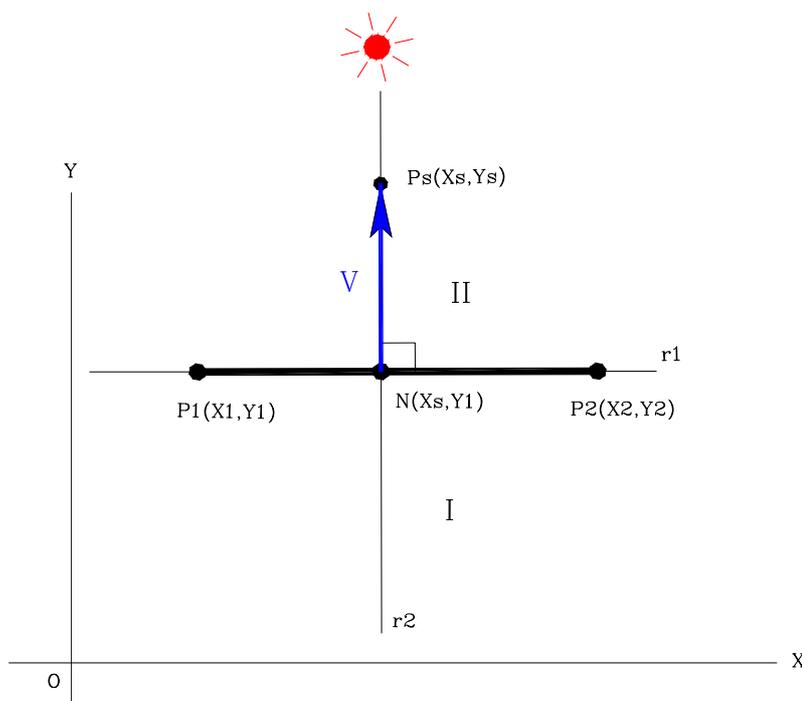


Figura 3.10 Fachada orientada para o norte ou para o sul

Neste caso tem-se: $X_n = X_s$ e $Y_n = Y_1$.

Retornando ao caso geral, tem-se:

As componentes cartesianas e o módulo do vetor \vec{V} são:

$$V_x = X_s - X_n \quad [3.22]$$

$$V_y = Y_s - Y_n \quad [3.23]$$

$$\vec{V} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad [3.24]$$

O ângulo ψ formado pelo vetor \vec{V} e o eixo Y (figura 3.8) pode ser calculado por:

$$\cos \psi = \frac{V_y}{\vec{V}} \Rightarrow \psi = \cos^{-1}\left(\frac{V_y}{\vec{V}}\right) \quad [3.25]$$

As equações 3.26 e 3.27 fornecem o valor do azimute do plano, de acordo com a convenção adotada neste trabalho:

$$\text{Se } \Delta_x \geq 0 \Rightarrow \gamma = \psi \quad [3.26]$$

$$\text{Se } \Delta_x < 0 \Rightarrow \gamma = 360^\circ - \psi \quad [3.27]$$

3.3.2 Cálculo da radiação solar incidente nos planos receptores

Para os cálculos da inclinação e do azimute dos planos receptores foi utilizado o modelo matemático apresentado no item 3.3.1. As ferramentas desenvolvidas em *AutoLISP* utilizam para a transposição da radiação solar média diária mensal incidente no plano horizontal para um plano receptor genérico o mesmo modelo matemático do programa *RadSOL*, comentado no item 3.3.1.1.4.

3.4 AS FERRAMENTAS *AutoLISP*

3.4.1 Considerações gerais

Nesta etapa são apresentadas as três ferramentas desenvolvidas em *AutoLISP* para o estudo do comportamento da radiação solar incidente em superfícies definidas por células planas.

Visando preservar a integridade do código fonte original, as ferramentas são apresentadas em versões binárias compiladas do arquivo de programa (*.LSP*), tratadas no ambiente do *Visual LISP* como arquivos de projeto (*.FAS*).

Depois de carregadas no ambiente do *AutoCAD*, as ferramentas se comportam como autênticos comandos do programa. Para sua utilização com sucesso e praticidade o usuário deve possuir conhecimentos básicos sobre o uso do *AutoCAD* em duas e três dimensões.

Os seguintes modos podem ser utilizados para carregar as ferramentas desenvolvidas:

- utilizando a linha de comando;
- utilizando o menu de opções;
- utilizando o menu ou a barra de ferramentas *Radiação*¹⁸.

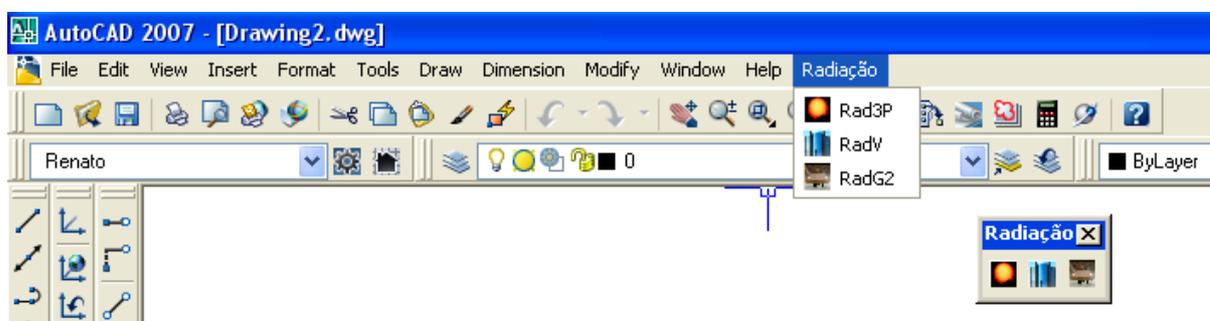


Figura 3.11 Menu e barra de ferramentas para o cálculo da radiação solar

¹⁸ Depende de configuração no *AutoCAD*

Para facilitar os trabalhos de simulação realizados com os aplicativos desenvolvidos, estão disponíveis para inserção os seguintes blocos:

Norte: representa a orientação do norte verdadeiro (Fig. 3.12).

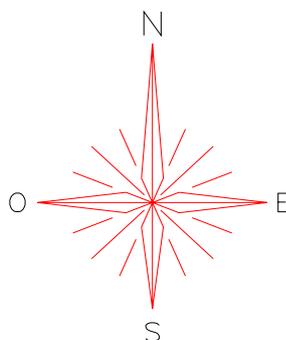


Figura 3.12 Bloco Norte

É disponibilizado através do arquivo *Norte.dwg* e deve ser inserido na perspectiva adotada para a visualização do modelo de superfície a ser estudada.

Escala: representa os valores da radiação solar média diária incidente por unidade de área ($\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$) através de uma escala de cores (Fig. 3.13). Está disponível no arquivo *Escala.dwg* e deve ser inserido no plano da tela do monitor.



Figura 3.13 Bloco Escala

Logo após a inserção deste bloco, é muito importante retornar ao sistema de coordenadas original utilizado na simulação, pois o eixo Y deve representar a orientação do norte verdadeiro.

Em todas as ferramentas desenvolvidas em *AutoLISP*, os vértices das células que compõem o modelo utilizado na simulação devem ser informados, de forma individual, ao aplicativo utilizando a ferramenta *OSNAP* (Object Snap) do *AutoCAD*. Também é possível a inserção destes vértices através da inserção numérica das suas coordenadas, mas isto não representa uma solução prática e, portanto, deve ser evitada sempre que possível.

3.4.2 As ferramentas *Rad3P*, *RadV* e *RadG2*

A *Rad3P* foi a primeira a ser elaborada e seu algoritmo representou um ponto de partida para o desenvolvimento das outras ferramentas. Nas suas versões iniciais, não permitia simular a radiação solar incidente nos planos verticais (fachadas), razão pela qual foi desenvolvida a ferramenta *RadV*, específica para esta finalidade.

Mais tarde foi desenvolvida a ferramenta *RadG2* destinada a simulações em edifícios ou superfícies representados por modelos tridimensionais do tipo estrutura de arame (wire frame). A ferramenta *RadG2* se mostrou eficiente também nos estudos das superfícies que podem ser representadas no *AutoCAD* por malhas definidas por células com os quatro vértices coplanares.

O conjunto de ferramentas desenvolvido representa variantes de um algoritmo básico e o quadro 3.1 resume as suas principais características.

No quadro 3.1, o objeto *Células (malhas) definidas por três pontos* representa as situações em que as células só podem ser definidas por três vértices. No *AutoCAD*, as células das malhas dos tipos *Ruled Mesh* (definidas entre duas curvas) e *Edge Mesh* (definidas entre quatro curvas), utilizadas para representar superfícies

topográficas¹⁹ (Fig.3.14), não possuem os quatro vértices coplanares, portanto devem ser divididas em duas células triangulares.

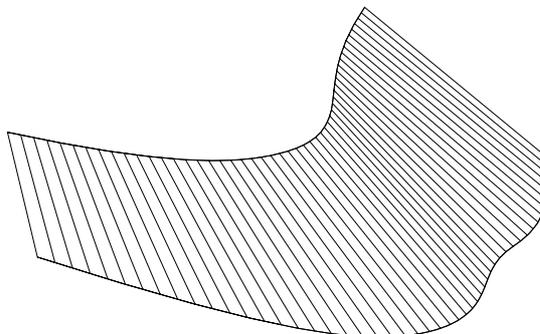


Figura 3.14 Superfície topográfica

No mesmo quadro, o objeto *Células (malhas) definidas por quatro ou cinco pontos* representa os casos em que as células podem ser definidas por três, quatro ou cinco vértices, garantida a coplanaridade.

No *AutoCAD*, as malhas do tipo *Revolved Mesh* (superfícies de revolução) e *Tabulated Mesh* (superfícies geradas por extrusão), utilizadas para representar as superfícies geométricas²⁰, possuem os quatro vértices coplanares (figura 3.15).

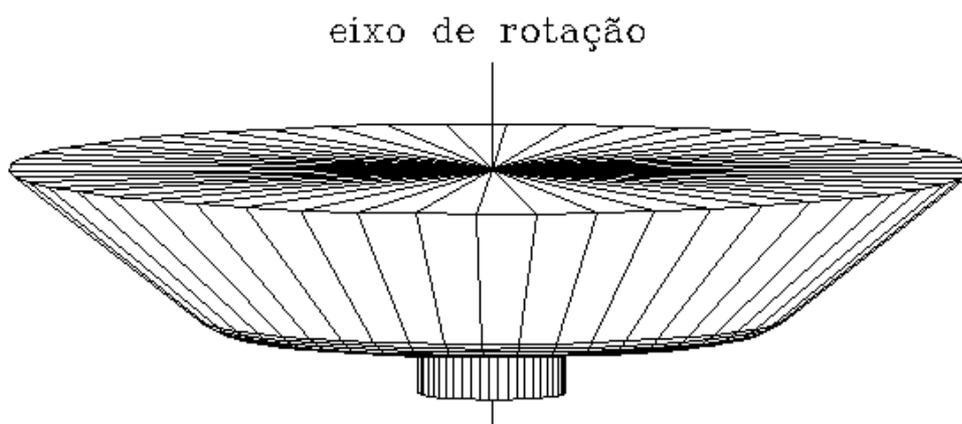


Figura 3.15 Superfície geométrica de revolução

¹⁹ Segundo RANGEL (1981), estas superfícies não possuem uma lei definida para sua geração.

²⁰ Segundo RANGEL (1981), estas superfícies seguem uma lei definida de geração.

Quadro 3.1 Características básicas da ferramentas desenvolvidas

Objeto de Análise	Ferramenta desenvolvida		
	<i>Rad3P</i>	<i>RadV</i>	<i>RadG2</i>
<i>Modelos tridimensionais</i>	sim	não	sim
<i>Modelos bidimensionais</i>	não	sim	não
<i>Células (malhas) definidas por três pontos.</i>	sim	não	sim
<i>Células (malhas) definidas por quatro ou cinco pontos.</i>	não	não	sim
<i>Regra da mão direita</i>	não	não	sim
<i>Verificação da coplanaridade</i>	sim	sim	sim
<i>Anular a última célula inserida (apenas)</i>	sim	sim	sim
<i>Nível de esforço exigido do usuário</i>	intenso	médio	intenso
<i>Sombreamento e auto-sombreamento</i>	não	não	não
<i>Inter-reflexões</i>	não	não	não
<i>Radiação em onda longa</i>	não	não	não

Nos estudos envolvendo os edifícios representados através de modelos de arame é comum se trabalhar com células definidas por três, quatro ou cinco vértices coplanares, conforme mostra a figura 3.16.

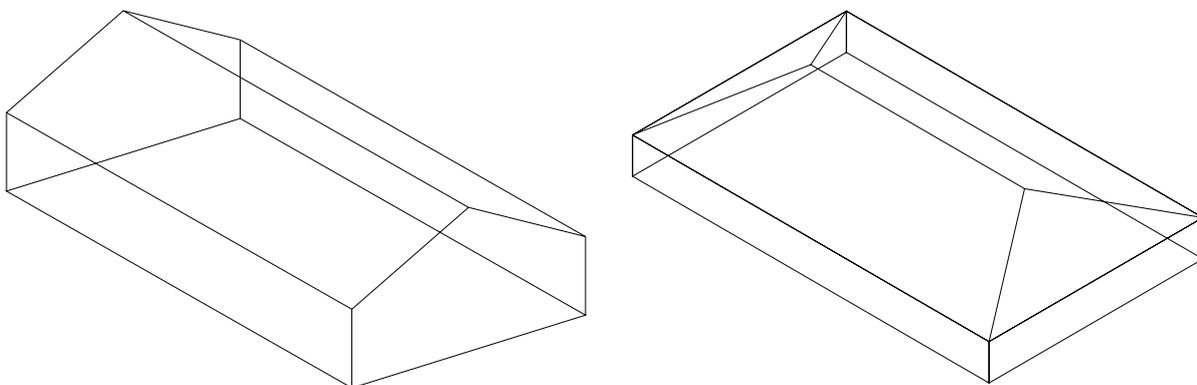


Figura 3.16 Representação simplificada de edifícios em estruturas de arame

Na prática, tudo que se pode simular com a ferramenta *Rad3P*, pode ser simulado com a ferramenta *RadG2*, variando apenas a praticidade e o esforço exigido.

A ferramenta *Rad3P* é limitada a células sempre triangulares, mas tem a virtude de permitir a definição prévia da orientação dos planos, evitando o uso da regra da mão direita (procedimento exaustivo), enquanto a ferramenta *RadG2* utiliza a regra da mão direita para orientar os planos receptores, mas permite a inserção de células com quatro ou cinco vértices coplanares, reduzindo o esforço do usuário e tornando o processo mais ágil e simples.

A ferramenta *RadV*, apesar de utilizar uma variante do algoritmo das ferramentas *Rad3P* e *RadG2*, pode ser considerada conceitualmente diferente das demais, pois utiliza um polígono (modelo bidimensional) para representar o edifício em planta. É específica para os estudos de planos receptores verticais (fachadas). Pode ser utilizada para fachadas retangulares (pé direito constante) ou trapezoidais (pé direito variável), conforme mostrado na figura 3.17.

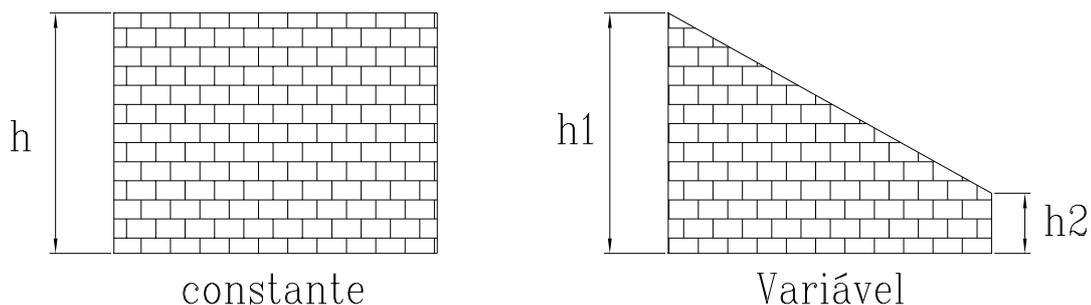


Figura 3.17 Fachadas com pé direito constante e variável

Quando, em um procedimento de simulação, ocorrem as condições de colinearidade ou coincidência dos vértices de definem a célula em processo de inserção, as ferramentas *Rad3P* e *RadG2* apresentam a seguinte mensagem de advertência.

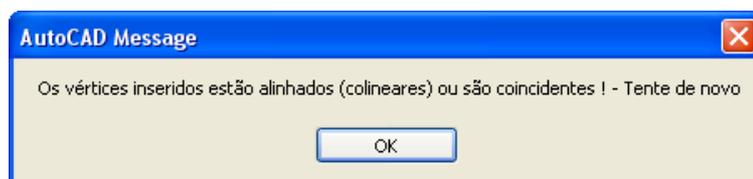


Figura 3.18 Vértices coincidentes ou colineares - *Rad3P* e *RadG2*

Para tentativas de inserção de células com quatro ou cinco vértices que não sejam coplanares ou definam um polígono estrelado (efeito borboleta), a ferramenta *RadG2* apresenta o seguinte aviso.



Figura 3.19 Problemas com os vértices inseridos - *Rad3P* e *RadG2*

Nos casos em que são inseridos dois vértices coincidentes na definição de uma fachada, a ferramenta *RadV* apresenta a seguinte mensagem:

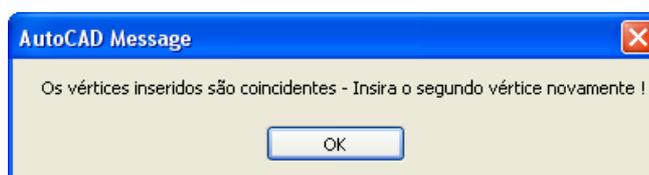


Figura 3.20 Vértices coincidentes na ferramenta *RadV*

As ferramentas desenvolvidas consideram somente a radiação solar refletida de forma isotrópica pelo solo (plano horizontal infinito). Não são ideais para análises que envolvam superfícies que apresentam concavidades pronunciadas (Fig. 3.21c), pois não consideram a possibilidade do *auto-sombreamento*²¹, mas podem ser utilizadas de forma cautelosa nos casos envolvendo pequenas concavidades, onde as *inter-reflexões*²² da radiação solar incidente e o *auto-sombreamento* na superfície estudada não são relevantes (Fig. 3.21b). Os resultados obtidos não consideram as emissões e trocas em onda longa. Estas possibilidades não foram consideradas na elaboração dos algoritmos utilizados, por serem de difícil implementação, exigindo soluções numéricas complexas que estão fora do escopo deste trabalho. A análise e implementação destas possibilidades deverão fazer parte de uma etapa mais avançada da pesquisa, a ser realizada posteriormente a este trabalho, conforme sugestão apresentada no Capítulo 6.

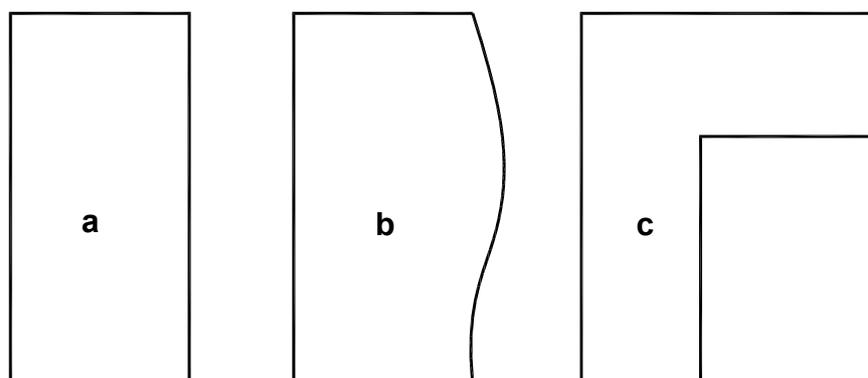


Figura 3.21 Polígonos convexo, aproximadamente convexo e não convexo.

²¹ A sombra projetada de uma parte da superfície sobre outra

²² Reflexão da radiação solar por uma parte da superfície sobre outra

CAPÍTULO 4 FERRAMENTAS II – Utilização

4.1 FUNCIONAMENTO BÁSICO

A seguir são apresentados exemplos simples com o objetivo de ilustrar os princípios básicos de funcionamento das ferramentas desenvolvidas.

4.1.1 Ferramenta *Rad3P*

Com o objetivo de ilustrar o funcionamento da ferramenta *Rad3P*, foi estimada no Rio de Janeiro, em fevereiro, a quantidade de radiação solar incidente em um telhado em forma de uma calota esférica de 50 m de diâmetro e 5 m de altura na parte central, conforme mostrado na figura 4.1.

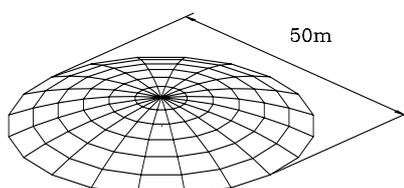


Figura 4.1 Telhado em forma de calota esférica

A figura 4.2 mostra a tela do *AutoCAD* após a inserção de todas as 360 células que definem a superfície esférica analisada.

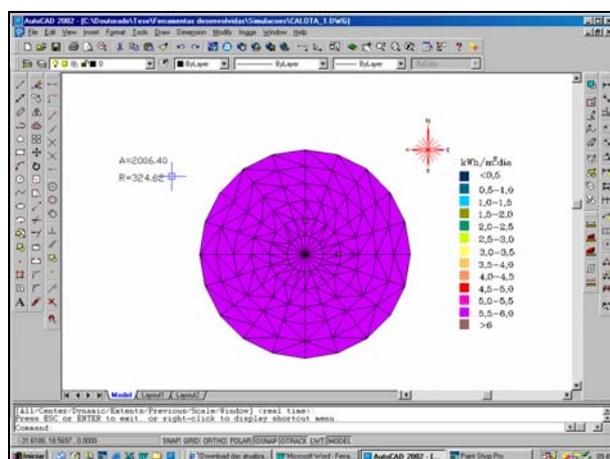


Figura 4.2 A radiação incidente no telhado esférico

Com base no histórico da simulação têm-se os seguintes resultados:

- área total aproximada da superfície $\Rightarrow 2006,94 \text{ m}^2$;
- total de radiação global incidente na superfície por dia $\Rightarrow 11529,0 \text{ kWh/dia}$;
- total de radiação global incidente na superfície no mês $\Rightarrow 322812,0 \text{ kWh/mês}$;
- a radiação global média mensal por unidade de área $\Rightarrow 160,85 \text{ kWh/m}^2.\text{mês}$;
- a radiação global média diária por unidade de área $\Rightarrow 5,74 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$.

4.1.2 Ferramenta *RadG2*

A ferramenta *RadG2* foi utilizada em uma simulação da radiação solar incidente no galpão mostrado na figura 4.3. O estudo considerou o Rio de Janeiro em fevereiro.

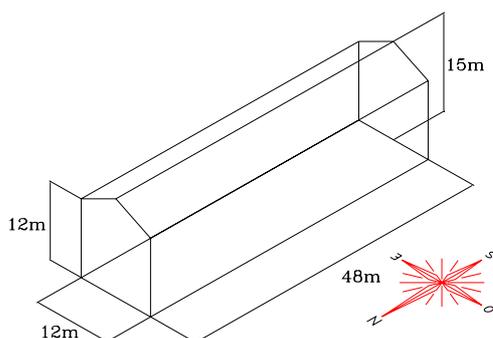


Figura 4.3 Galpão analisado com a ferramenta *RadG2*

A figura 4.3 mostra a tela obtida no *AutoCAD* para o caso analisado.

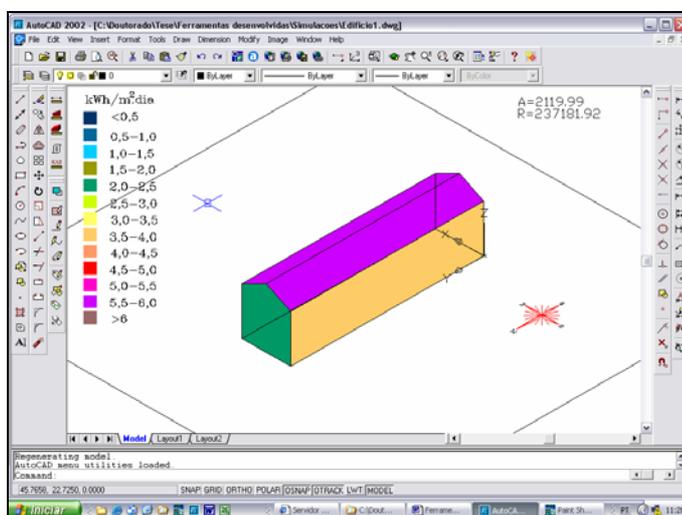


Figura 4.4 A radiação incidente no envelope do edifício

Com base no histórico da simulação, obtiveram-se os seguintes resultados:

- área total aproximada da superfície do edifício $\Rightarrow 2119,99 \text{ m}^2$
- total diário de radiação global incidente na superfície $\Rightarrow 8470,78 \text{ kWh/dia}$,
- total mensal de radiação global incidente na superfície $\Rightarrow 237182,0 \text{ kWh/mês}$,
- média mensal de radiação global por unidade de área $\Rightarrow 111,88 \text{ kWh/m}^2.\text{mês}$,
- média diária de radiação global por unidade de área $\Rightarrow 4,0 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$.

4.1.3 Ferramenta RadV

A ferramenta RadV foi utilizada na simulação da quantidade de radiação solar incidente nas fachadas do edifício mostrado na figura 4.5. A simulação foi realizada para o Rio de Janeiro no mês de fevereiro.

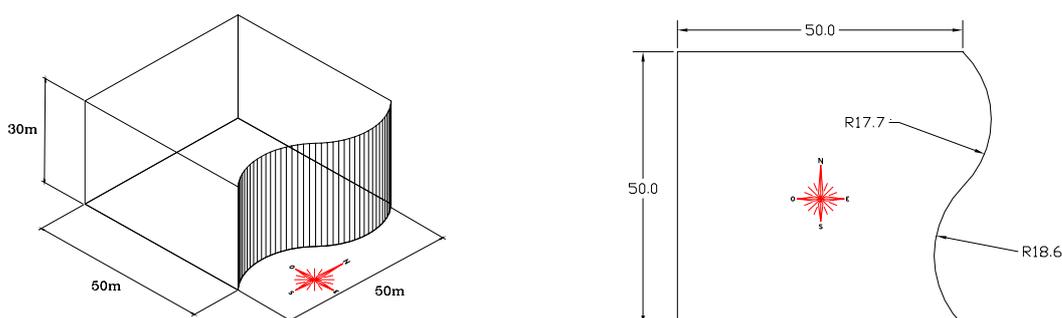


Figura 4.5 Edifício analisado com a ferramenta RadV

A figura 4.6 mostra a tela exibida pelo AutoCAD após a simulação.

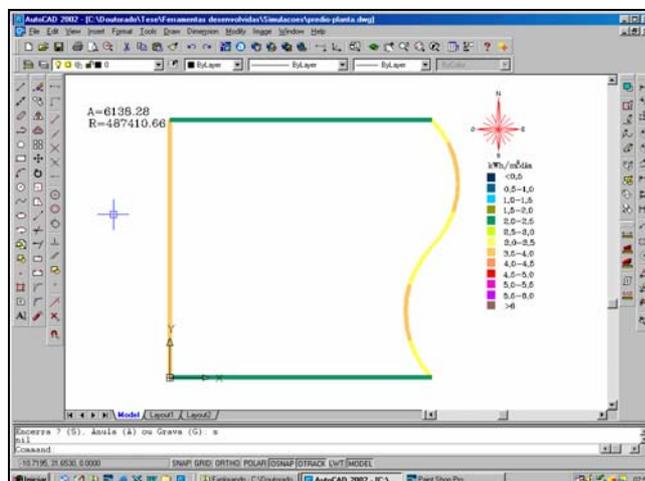


Figura 4.6 A radiação incidente em um edifício com uma fachada curva

Com base no histórico da simulação, foram obtidos os seguintes resultados:

- área total aproximada da superfície das fachadas do edifício $\Rightarrow 6138,28 \text{ m}^2$;
- total de radiação global incidente na superfície por dia $\Rightarrow 17407,5 \text{ kWh/dia}$;
- total de radiação global incidente na superfície no mês $\Rightarrow 487411,0 \text{ kWh/mês}$;
- média mensal de radiação global por unidade de área $\Rightarrow 79,41 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{mês}$;
- média diária de radiação global por unidade de área $\Rightarrow 2,84 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{dia}$.

4.2 A FORMA E AS PROPORÇÕES NA GEOMETRIA DOS EDIFÍCIOS

4.2.1 Considerações gerais

Para avaliar o método proposto e utilizar as ferramentas computacionais desenvolvidas em uma situação real de trabalho foram realizados diversos procedimentos de simulação, com o objetivo de investigar a maneira pela qual a forma dos edifícios e suas relações proporcionais influem nos valores da radiação solar incidente no envelope.

Foram estudados, no período de verão, os edifícios prismáticos de base retangular (paralelepípedos), cilíndricos (retos) e esféricos (calotas) com o *mesmo volume*.

Para cada forma analisada foi determinada a relação proporcional entre as principais dimensões, que minimiza a quantidade de radiação incidente no edifício, considerando um determinado volume fixo. Estes edifícios foram chamados de *edifícios ideais* e representam, para cada forma estudada, uma solução geométrica otimizada, quando o objetivo é reduzir os efeitos da radiação solar incidente no edifício.

Foi também analisada a radiação solar incidente, nos períodos de verão e inverno, em um pequeno terreno destinado à agricultura, situado em uma encosta representada por duas curvas de nível, visando futuros estudos na área agrícola.

Os estudos foram realizados para o Rio de Janeiro (23° S). Os períodos de verão e inverno foram representados pelos meses de fevereiro e junho. Os valores para a radiação solar média diária mensal incidente no plano horizontal adotados para estes períodos foram respectivamente 5,94 kWh/m².dia e 3,39 kWh/m².dia, obtidos em Corbella (1995). Foi considerado um solo com um albedo igual a 0,2.

4.2.2 Edifícios prismáticos (paralelepípedos)

Nesta etapa do estudo, além da ferramenta *RadV*, foi também utilizado o programa *RadSol* para calcular os valores da radiação solar incidente nas fachadas dos edifícios posicionados de modo que as menores fachadas estejam orientadas para o leste e oeste. Os valores obtidos são apresentados na tabela 4.1.

Com o objetivo de minimizar a quantidade de radiação solar incidente no envelope foram determinadas as dimensões do *edifício ideal* prismático. Em todos os estudos realizados, o volume do edifício foi considerado constante.

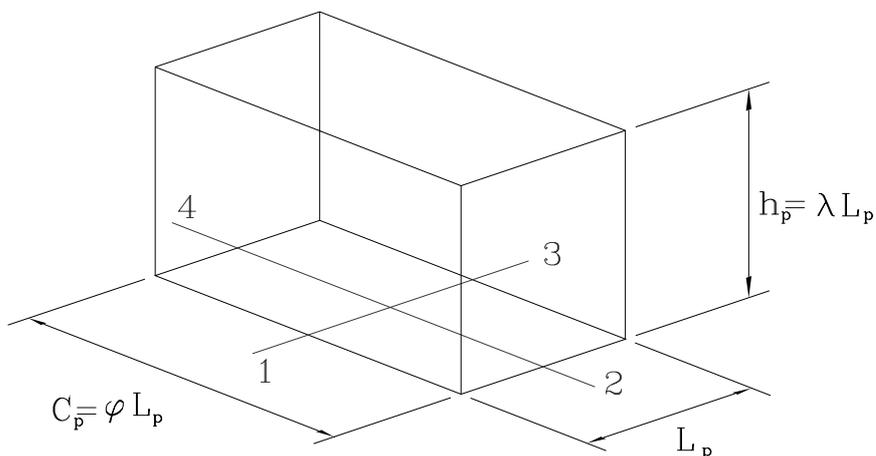


Figura 4.7 Dimensões do edifício prismático

Para a relação existente na base do edifício entre o comprimento (maior dimensão) e a largura (menor dimensão), tem-se:

$$\varphi = \frac{C_p}{L_p} \Rightarrow C_p = \varphi \cdot L_p \quad [4.1]$$

Para a relação existente entre a altura do paralelepípedo e a largura da base retangular, tem-se:

$$\lambda_p = \frac{h_p}{L_p} \Rightarrow h_p = \lambda_p \cdot L_p \quad [4.2]$$

Considerando que as fachadas do edifício estejam orientadas segundo as direções 1, 2, 3 e 4, (Fig. 4.7) e que recebam ao longo de um dia, quantidades médias de radiação solar incidente iguais a H_1 , H_2 , H_3 e H_4 .

O valor total da radiação solar diária incidente nas fachadas do edifício pode ser calculado através da equação 4.3.

$$H_{lat} = L_p \cdot h_p \cdot [\varphi \cdot (H_1 + H_3) + (H_2 + H_4)] \quad [4.3]$$

O somatório dos valores da radiação solar incidente média nas direções das fachadas do edifício pode ser calculado através da equação 4.4.

$$S_{RF} = \varphi \cdot (H_1 + H_3) + (H_2 + H_4) \quad [4.4]$$

Substituindo a equação 4.4 na equação 4.3, obtém-se o valor total da radiação solar incidente nas fachadas do edifício.

$$H_{lat} = S_{RF} \cdot L_p \cdot h_p \quad [4.5]$$

A quantidade de radiação solar incidente na cobertura do edifício pode ser calculada pela equação 4.6.

$$H_{cobert} = \varphi \cdot L_p^2 \cdot \bar{H} \quad [4.6]$$

A quantidade de radiação solar que incide no envelope do edifício ao longo de um dia pode ser calculada através da equação 4.7.

$$H_{env} = S_{RF} \cdot L_p \cdot h_p + \varphi \cdot L_p^2 \cdot \bar{H} \quad [4.7]$$

A equação 4.8 fornece o volume contido no envelope do edifício, considerado constante no estudo.

$$V_P = \varphi \cdot L_P^2 \cdot h_P \quad [4.8]$$

Explicitando o valor de h_P na equação 4.8 e substituindo na equação 4.7.

$$H_{env} = \frac{S_{RF} \cdot V_P}{\varphi \cdot L_P} + \varphi \cdot \bar{H} \cdot L_P^2 \quad [4.9]$$

Calculando a primeira derivada da equação 4.9 em relação a L_P .

$$\frac{dH_{env}}{dL_P} = \frac{-S_{RF} \cdot V_P}{\varphi \cdot L_P^2} + 2 \cdot \varphi \cdot \bar{H} \cdot L_P \quad [4.10]$$

Calculando a segunda derivada da equação 4.9 em relação a L_P .

$$\frac{d^2 H_{env}}{dL_P^2} = \frac{2 \cdot S_{RF} \cdot V_P}{\varphi \cdot L_P^3} + 2 \cdot \varphi \cdot \bar{H} \Rightarrow (L_P > 0 \Rightarrow \frac{d^2 H_{env}}{dL_P^2} > 0 \Rightarrow \text{mínimo}) \quad [4.11]$$

Anulando a equação 4.10, obtém-se:

$$2 \cdot \varphi \cdot \bar{H} \cdot L_P = \frac{S_{RF} \cdot V_P}{\varphi \cdot L_P^2} \quad [4.12]$$

Substituindo a equação 4.8 na equação 4.12 obtém-se a relação λ_P .

$$\lambda_P = \frac{h_P}{L_P} = \frac{2 \varphi \cdot \bar{H}}{S_{RF}} \quad [4.13]$$

O valor de λ_P varia em função da orientação do edifício, do local, da data e do tipo de solo no entorno.

Substituindo a equação 4.13 na equação 4.8, obtém-se equação 4.14 que fornece a largura da base do paralelepípedo para o *edifício ideal*.

$$L_P = \sqrt[3]{\frac{V_P}{\varphi \cdot \lambda_P}} \quad [4.14]$$

A altura do *edifício ideal* pode ser calculada através da equação 4.2.

Nos estudos elaborados, o eixo 1-3 representa o eixo norte-sul e o eixo 2-4 representa o eixo leste-oeste (Fig. 4.7). Este posicionamento representa a orientação ideal, ou seja, a posição em que o edifício recebe a menor quantidade de radiação incidente no envelope nas condições analisadas (CASTANHEIRA, 2001).

A tabela 4.1 apresenta valores calculados pelo programa *RadSOL* para a radiação solar média diária incidente nas fachadas do edifício para a posição analisada

Tabela 4.1 Valores para edifícios com a orientação N

Rio de Janeiro – fevereiro - $\bar{H} = 5,94$ kWh/m ² .dia (cobertura)	
Orientação da fachada	Radiação solar incidente (kWh/m ² .dia)
Norte	2,17
Sul	2,11
Leste	3,59
Oeste	3,59

Para as análises apresentadas no próximo capítulo, foram estudadas três séries de edifícios, considerando as seguintes condições gerais:

- orientação dos edifícios: norte;
- $H_1 = 2,17$ kWh/m².dia (fachada norte);
- $H_2 = 3,59$ kWh/m².dia (fachada oeste);
- $H_3 = 2,11$ kWh/m².dia (fachada sul);

- $H_4 = 3,59 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$ (fachada leste);
- $\bar{H} = 5,94 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$ (cobertura);
- valores para a relação φ : 1:1; 1,5:1; 1,7:1; 2:1; 3:1; 4:1; 5:1 e 6:1;
- todos os edifícios têm o volume constante e igual a 75000 m^3 .

A primeira série é constituída de uma seqüência de edifícios ditos “*ideais*”, ou seja, para cada valor considerado da relação φ , tem-se um edifício “*ideal*”.

É importante ressaltar que, nesta série, o verdadeiro edifício *ideal* prismático é aquele que recebe a menor quantidade de radiação entre os edifícios ditos “*ideais*” da série analisada.

A tabela 4.2 mostra os parâmetros geométricos dos edifícios desta série.

Tabela 4.2 Edifícios *ideais* – parâmetros geométricos

φ	S_{RF}	λ	L_p	C_p	h_p	Área da cobertura	Área das fachadas	Área do envelope
	kWh/m ² .dia		m	m	m	m ²	m ²	m ²
1:1	11,46	1,04	41,67	41,67	43,20	1736,3	7199,7	8935,9
1,5:1	13,60	1,31	33,67	50,50	44,11	1700,2	7425,7	9125,9
1,7:1	14,46	1,40	31,61	53,73	44,16	1698,4	7537,2	9235,6
2:1	15,74	1,51	29,18	58,36	44,05	1702,8	7711,2	9413,9
3:1	20,02	1,78	24,13	72,38	42,95	1746,2	8289,7	10036,0
4:1	24,30	1,96	21,24	84,98	41,54	1805,3	8825,9	10631,2
5:1	28,58	2,08	19,33	96,63	40,16	1867,3	9314,3	11181,6
6:1	32,86	2,17	17,93	107,57	38,89	1928,5	9761,2	11689,7

A tabela 4.3 mostra os parâmetros relativos à radiação solar incidente nos edifícios desta série, calculados com a ferramenta *RadV*.

Tabela 4.3 Edifícios *ideais* – parâmetros de radiação incidente

ϕ	Radiação incidente na cobertura	Radiação incidente nas fachadas	Radiação incidente no envelope
	kWh/dia	kWh/dia	kWh/dia
1:1	10313,5	20716,1	31029,6
1,5:1	10099,0	20266,1	30365,1
1,7:1	10088,6	20241,2	30329,8
2:1	10114,5	20288,8	30403,3
3:1	10372,5	20788,6	31161,1
4:1	10723,4	21476,2	32199,6
5:1	11091,8	22208,7	33300,5
6:1	11455,4	22932,0	34387,4

A figura 4.8 mostra a tela com os resultados das análises para o edifício ideal com a relação $\phi = 1,5:1$

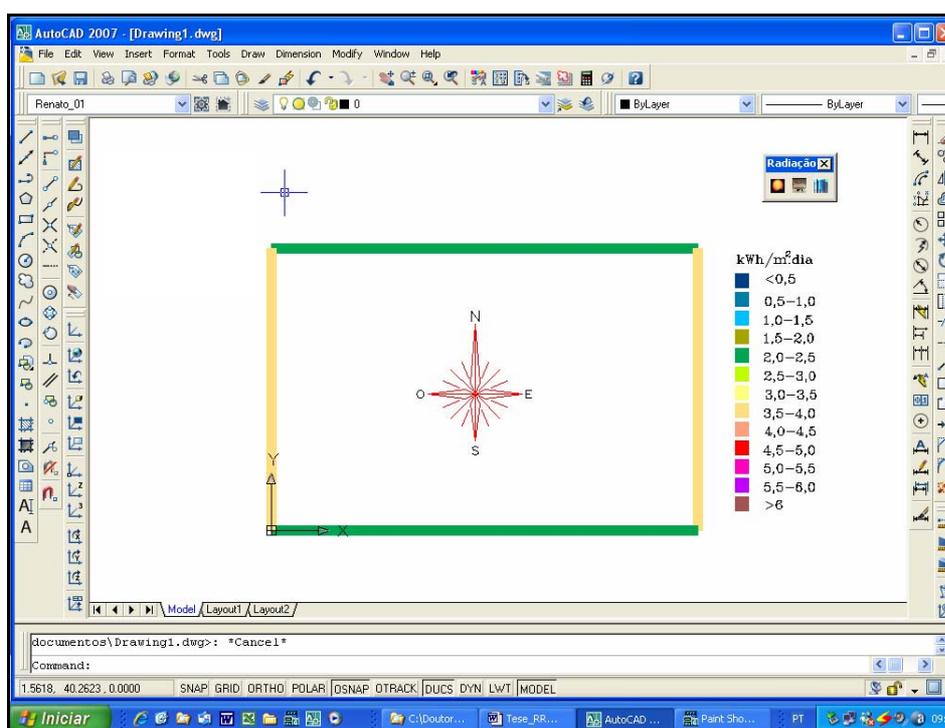


Figura 4.8 Tela do AutoCAD obtida após a utilização da ferramenta *RadV*

A segunda série de edifícios é constituída por uma seqüência de edifícios ditos “*baixos*”. Foram considerados edifícios *baixos*, aqueles com uma altura constante e igual a 10 m (aproximadamente três pavimentos). A tabela 4.4 mostra os parâmetros geométricos dos edifícios desta série.

Tabela 4.4 Edifícios *baixos* (h=10m) – parâmetros geométricos

φ	L_p	C_p	Área da cobertura	Área das fachadas	Área do envelope
	m	m	m ²	m ²	m ²
1:1	86,6	86,6	7500,0	1732,1	9232,1
1,5:1	70,7	106,1	7500,0	2121,3	9621,3
1,7:1	66,4	112,9	7500,0	2258,3	9758,3
2:1	61,2	122,5	7500,0	2449,5	9949,5
3:1	50,0	150,0	7500,0	3000,0	10500,0
4:1	43,3	173,2	7500,0	3464,1	10964,1
5:1	38,7	193,6	7500,0	3873,0	11373,0
6:1	35,4	212,1	7500,0	4242,6	11742,6

A tabela 4.5 mostra os parâmetros relativos à radiação solar incidente nesta série, calculados com a ferramenta *RadV*.

Tabela 4.5 Edifícios *baixos* – parâmetros de radiação incidente

φ	Radiação incidente na cobertura	Radiação incidente nas fachadas	Radiação incidente no envelope
	kWh/dia	kWh/dia	kWh/dia
1:1	44550,0	9966,0	54516,0
1,5:1	44550,0	9649,4	54199,4
1,7:1	44550,0	9629,8	54179,8
2:1	44550,0	9665,9	54215,9
3:1	44550,0	10030,3	54580,3
4:1	44550,0	10538,3	55088,3
5:1	44550,0	11081,9	55631,9
6:1	44550,0	11628,4	56178,4

A terceira série elaborada é um conjunto de paralelepípedos com uma altura constante e igual a 90 m (aproximadamente 30 pavimentos), denominados de “*esbeltos*” .

A tabela 4.6 mostra os parâmetros geométricos dos edifícios desta série.

Tabela 4.6 Edifícios *esbeltos* (h=90m) – parâmetros geométricos

φ	L_p	C_p	Área da cobertura	Área das fachadas	Área do envelope
	m	m	m ²	m ²	m ²
1:1	28,9	28,9	833,3	5196,2	6029,5
1,5:1	23,6	35,4	833,3	6364,0	7197,3
1,7:1	22,1	37,6	833,3	6775,0	7608,3
2:1	20,4	40,8	833,3	7348,5	8181,8
3:1	16,7	50,0	833,3	9000,0	9833,3
4:1	14,4	57,7	833,3	10392,3	11225,6
5:1	12,9	64,5	833,3	11618,9	12452,3
6:1	11,8	70,7	833,3	12727,9	13561,3

A tabela 4.7 mostra os parâmetros relativos à radiação solar incidente nesta série, calculados com a ferramenta *RadV*.

Tabela 4.7 Edifícios *baixos* – parâmetros de radiação incidente

φ	Radiação incidente na cobertura	Radiação incidente nas fachadas	Radiação incidente no envelope
	kWh/dia	kWh/dia	kWh/dia
1:1	4950,0	29901,3	34851,3
1,5:1	4950,0	28984,4	33934,4
1,7:1	4950,0	28854,9	33804,9
2:1	4950,0	28994,2	33944,2
3:1	4950,0	30093,0	35043,0
4:1	4950,0	31614,0	36564,0
5:1	4950,0	33245,6	38195,6
6:1	4950,0	34887,4	39837,4

Para os edifícios *baixos* e *esbeltos*, a tabela 4.8 apresenta, para cada relação φ , o incremento na radiação solar incidente relativo ao edifício “*ideal*” correspondente. Estes resultados são utilizados nas análises elaboradas posteriormente no próximo capítulo.

Tabela 4.8 Incrementos na radiação incidente, relativos ao edifício *ideal*

φ	Edifícios baixos (h=10m)	Edifícios esbeltos (h=90m)
1:1	75,7%	12,3%
1,5:1	78,5%	11,8%
1,7:1	78,6%	11,5%
2:1	78,3%	11,6%
3:1	75,2%	12,5%
4:1	71,1%	13,6%
5:1	67,1%	14,7%
6:1	63,4%	15,8%

A figura 4.9 mostra uma representação dos prismas que representam os edifícios com relação 1:1, *baixos*, *ideais* e *esbeltos* analisados anteriormente. Todos os edifícios têm o volume aproximadamente igual a 75000 m³.

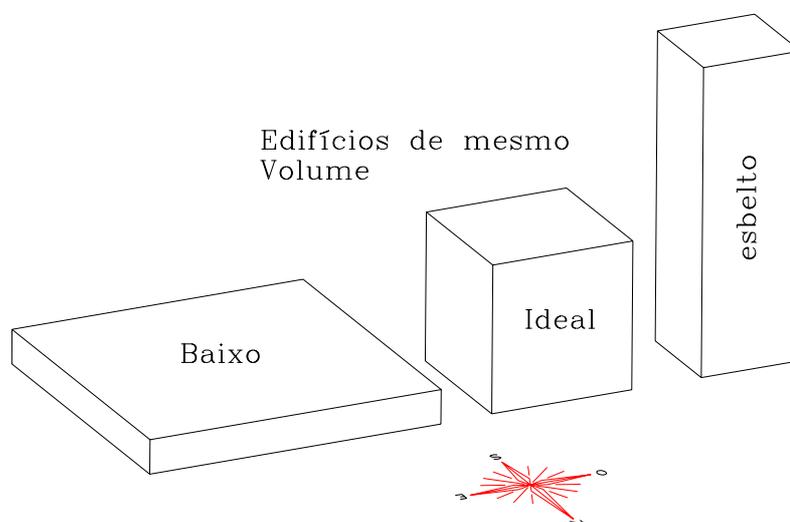


Figura 4.9 Aspecto dos edifícios prismáticos com a relação $\varphi = 1:1$

4.2.3 Edifícios cilíndricos retos

No estudo apresentado a seguir, os cilindros foram aproximados por prismas retos cujas bases são polígonos regulares (prismas regulares), conforme mostrado na figura 4.10.

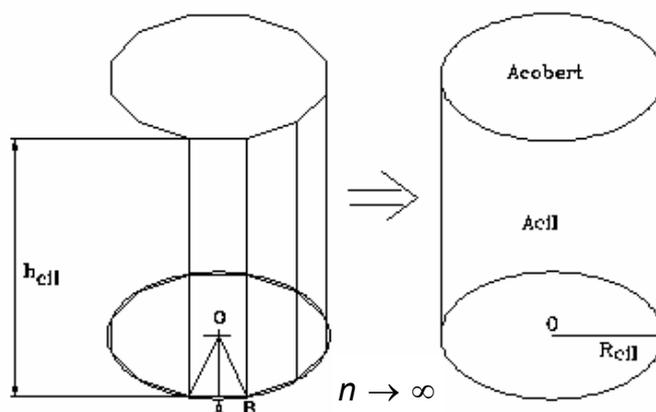


Figura 4.10 Cilindros aproximados por prismas regulares

A figura 4.11 mostra a circunferência circunscrita à base do prisma regular da figura 4.10 e destaca o triângulo OAB.

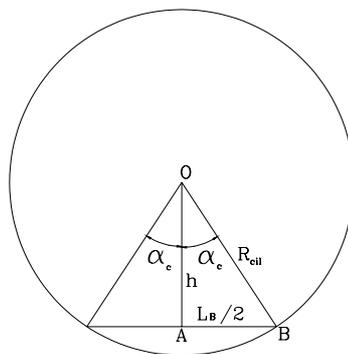


Figura 4.11 Circunferência circunscrita à base do prisma

A partir do triângulo OAB foram escritas as seguintes equações.

$$A_{cobert} = \frac{n \cdot R_{cil}^2}{2} \cdot \text{sen}\left[\frac{180^\circ}{n}\right] \quad [4.15]$$

$$A_{cil} = 2 \cdot n \cdot R_{cil} \cdot h_{cil} \cdot \text{sen}\left[\frac{180^\circ}{n}\right] \quad [4.16]$$

$$V_{cil} = \frac{h_{cil} \cdot n \cdot R_{cil}^2}{2} \cdot \text{sen}\left[\frac{180^\circ}{n}\right] \quad [4.17]$$

Com o objetivo de padronizar e facilitar a interpretação dos resultados obtidos foi considerado como padrão o volume do edifício prismático mostrado na figura 4.12, para o qual, tem-se: $V = 75000 \text{ m}^3$ (volume padrão) e $R \cong 35,3554 \text{ m}$.

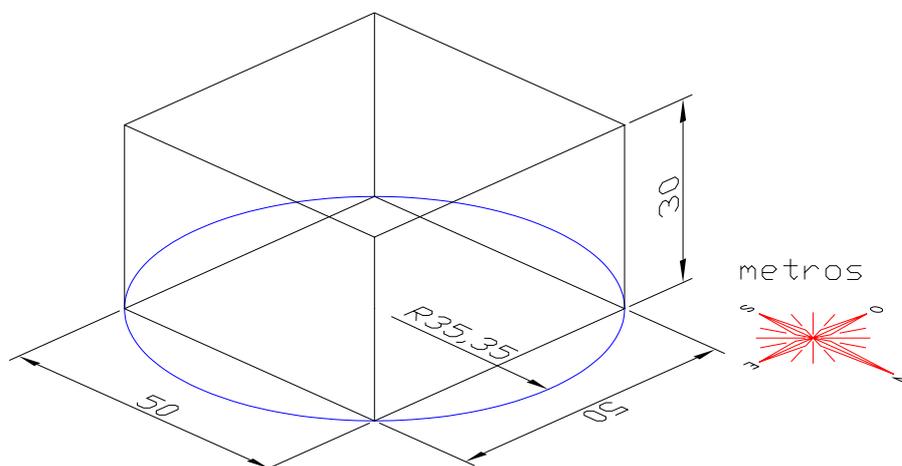


Figura 4.12 Edifício base para o estudo dos edifícios cilíndricos

Para avaliar o processo de convergência, a precisão nas aproximações realizadas e a relação proporcional entre o lado da base e a altura, foram analisadas duas séries de prismas regulares, denominadas Série A e Série B, com 4, 8, 16 e 32 faces. Todos os prismas analisados têm volume aproximadamente igual ao do edifício base (75000 m^3).

A Série A representa um conjunto de edifícios mais baixos, predominando alturas menores e bases maiores. Para estes edifícios, o raio da circunferência circunscrita à base foi mantido constante e igual a $35,3554 \text{ m}$ ($L_B \cong 50 \text{ m}$) e foram efetuadas reduções nos valores da altura para a manutenção do volume. Os valores corrigidos da altura foram calculados através da equação 4.18, obtida a partir da equação 4.17.

$$h_{cil} = \frac{2.V_{cil}}{n.R_{cil}^2 \cdot \text{sen}\left[\frac{180^\circ}{n}\right]} \quad [4.18]$$

A Série B representa um conjunto de edifícios mais esbeltos, onde predominam alturas maiores e bases menores. Para este conjunto de edifícios, a altura dos cilindros foi mantida constante e igual a 30 m, enquanto foram efetuadas reduções nos valores do raio da circunferência circunscrita à base para a manutenção do volume. Os valores corrigidos do raio foram calculados segundo a equação 4.19, obtida a partir da equação 4.17.

$$R_{cil} = \sqrt{\frac{2.V_{cil}}{n.h_{cil} \cdot \text{sen}\left[\frac{180^\circ}{n}\right]}} \quad [4.19]$$

Os resultados obtidos para os dois grupos de edifícios analisados estão resumidos nas tabelas 4.9 e 4.10.

Tabela 4.9 Edifícios da Série A (R=35.3554m) - parâmetros geométricos

Número de lados do polígono da base	Altura do edifício	Lado das fachadas	Área da cobertura	Área das fachadas
	m	m	m ²	m ²
4	30,00	50,00	2500	6000
8	21,21	27,06	3536	4592
16	19,60	13,79	3827	4326
32	19,22	6,93	3902	4263

Tabela 4.10 Edifícios da Série B (h=30m) - parâmetros geométricos

Número de lados do polígono da base	Raio da base	Lado das fachadas	Área da cobertura	Área das fachadas
	m	m	m ²	m ²
4	35,36	50,00	2500	6000
8	29,73	22,75	2500	5461
16	28,58	11,15	2500	5352
32	28,30	5,55	2500	5326

As tabelas 4.9 e 4.10 mostram que os edifícios da Série A são mais baixos e possuem coberturas (planos horizontais) com áreas maiores, quando comparados com os edifícios da Série B.

A ferramenta *RadV* foi utilizada para as simulações da radiação solar incidente nos edifícios e os resultados são resumidos e apresentados nas tabelas 4.11 e 4.12. Nas simulações foram utilizados os resultados apresentados nas tabelas 4.9 e 4.10.

Tabela 4.11 Edifícios da Série A – parâmetros de radiação

Número de lados	Radiação total incidente nas fachadas kWh/dia	Radiação total incidente na cobertura kWh/dia	Radiação total incidente no edifício kWh/dia	Radiação média incidente nas fachadas kWh/m ² .dia
4	17262	14850	32112	2,88
8	13646	21001	34647	2,97
16	12996	22731	35727	3,00
32	12805	23177	35982	3,00

Tabela 4.12 Edifícios do Série B – parâmetros de radiação

Número de lados	Radiação total incidente nas fachadas kWh/dia	Radiação total incidente na cobertura kWh/dia	Radiação total incidente no edifício kWh/dia	Radiação média incidente nas fachadas kWh/m ² .dia
4	17262	14850	32112	2,88
8	16333	14850	31183	2,99
16	16035	14850	30885	3,00
32	16007	14850	30857	3,00

A figura 4.13 mostra a tela obtida após a simulação de um edifício da Série A

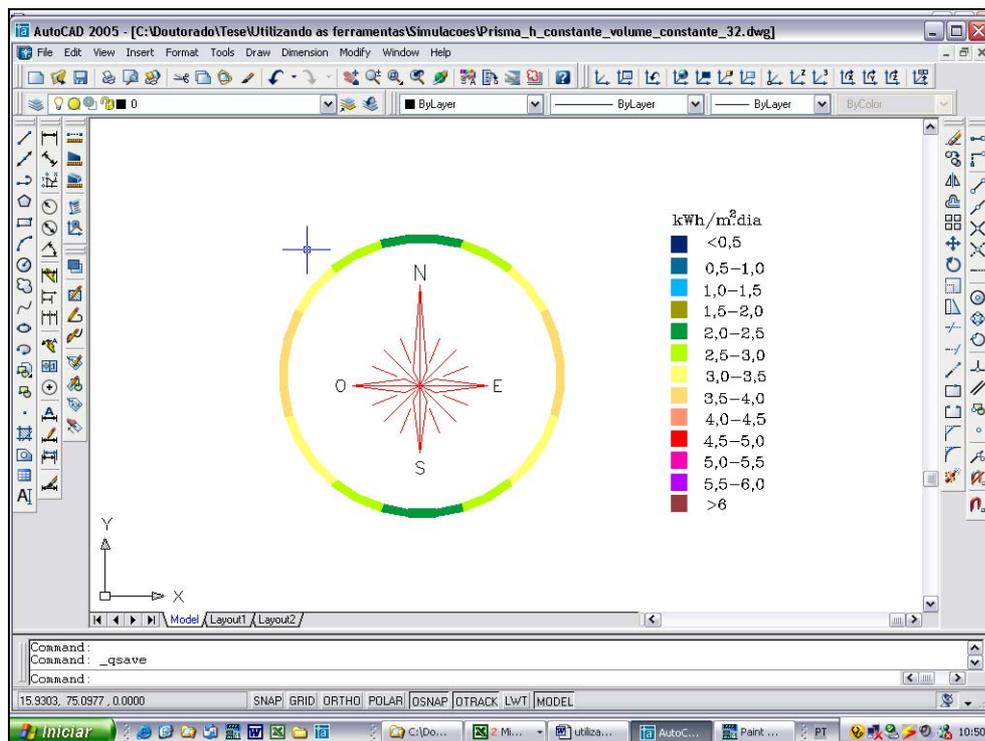


Figura 4.13 Tela para o edifício da Série A

A figura 4.14 mostra a tela obtida após a simulação de um edifício da Série B

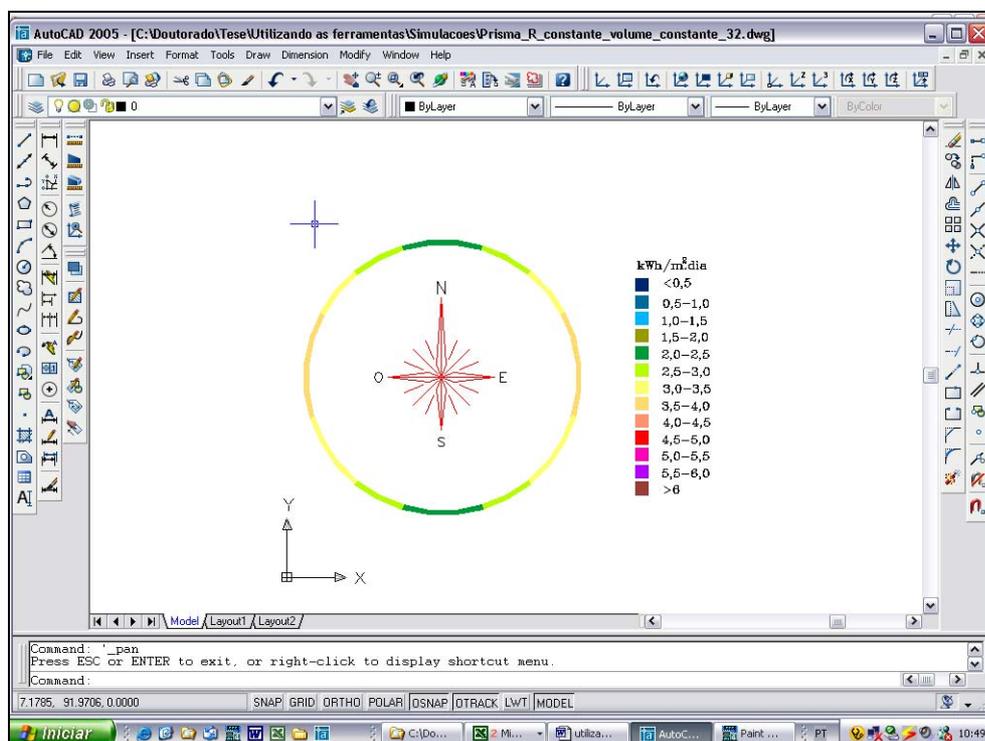


Figura 4.14 Tela para o edifício da Série B

As figuras 4.13 e 4.14 mostram uma distribuição idêntica para a radiação solar ao longo das duas superfícies cilíndricas analisadas e as tabelas 4.11 e 4.12 mostram que o valor da radiação solar média incidente na superfície cilíndrica dos edifícios é constante para uma determinada localidade, uma determinada data e um determinado tipo de solo. Esta é uma propriedade pertinente a um conjunto de edifícios que têm as suas fachadas com as mesmas inclinações e as mesmas orientações²³.

Com base nesta propriedade, é possível refinar as estimativas para a quantidade de radiação solar incidente no envelope de um edifício cilíndrico. Para uma determinada localidade, uma determinada data e um determinado tipo de solo, pode-se escrever a equação 4.20.

$$H_{env} = 2 \times \pi \times R_{cil} \times h_{cil} \times H_{UA_{cil}} + \pi \times R_{cil}^2 \times \bar{H} \quad [4.20]$$

O valor de $H_{UA_{cil}}$ é determinado através da ferramenta *RadV* e o valor de \bar{H} pode ser obtido em CORBELLA (1995), NASA (2004) ou CRESESB (2004).

Para o Rio de Janeiro em fevereiro: $H_{UA_{cil}} \cong 3 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{dia}$ (Tabelas 4.11 e 4.12)

Então:

$$H_{env} \cong 19 \times R \times (h + R) \quad (\text{kWh/dia}) \quad [4.21]$$

A tabela 4.13 mostra uma comparação entre os valores da radiação solar incidente obtidos com a ferramenta *RadV* (aproximação por prismas com 32 faces) e com a fórmula representada pela equação 4.21. Foram analisados dois edifícios cilíndricos, um esbelto e o outro baixo.

²³ Nos edifícios com a forma de cilindros retos, pode-se imaginar que todas as fachadas são verticais e têm as mesmas orientações.

Tabela 4.13 Comparação entre a ferramenta *RadV* e a equação 4.21

Edifício analisado	Raio	Altura	Volume	Equação 4.21	Ferramenta <i>RadV</i>	Diferença relativa à ferramenta <i>RadV</i>
	m	m	m ³	kWh/dia	kWh/dia	
esbelto	10	45	14137	10450	10334	+1,1%
baixo	80	20	402124	152000	148818	+2,1%

Os resultados obtidos com a equação 4.21 foram considerados bons e conforme esperado, discretamente maiores do que os valores obtidos com a ferramenta *RadV*.

A tabela 4.14 mostra uma comparação entre os valores para a radiação solar incidente no envelope dos edifícios da Série A e da Série B (mesmo volume) obtidos com ferramenta *RadV* e com a equação 4.21.

Tabela 4.14 A ferramenta *RadV* e a equação 4.21 (Séries A e B)

Edifício analisado	Raio	Altura	Equação 4.21	Ferramenta <i>RadV</i>	Diferença relativa ao edifício da Série A
	m	m	kWh/dia	kWh/dia	
Série A	35,35	19,22	36652	35982	0
Série B	28,30	30,00	31348	30857	-14%

Para determinar as dimensões do *edifício ideal* cilíndrico foram executados os procedimentos apresentados a seguir, considerando o volume constante.

Explicitando o valor de h_{cil} na equação $V_{cil} = \pi \cdot R_{cil}^2 \cdot h_{cil}$ e substituindo-o na equação 4.20, obtém-se

$$H_{env} = \frac{2 \cdot V_{cil} \cdot H_{UA_{cil}}}{R_{cil}} + \pi \cdot R_{cil}^2 \cdot \bar{H} \quad [4.22]$$

Calculando a primeira derivada da equação 4.22 em relação a R_{cil} .

$$\frac{dH_{env}}{dR_{cil}} = \frac{-2.V_{cil}.H_{UAcil}}{R_{cil}^2} + 2.\pi.\bar{H}.R_{cil} \quad [4.23]$$

Calculando a segunda derivada da equação 4.22 em relação a R_{cil} .

$$\frac{d^2H_{env}}{dR_{cil}^2} = \frac{4.V_{cil}H_{UAcil}}{R_{cil}^3} + 2.\pi.\bar{H} \Rightarrow (R_{cil} > 0 \Rightarrow \frac{d^2H_{env}}{dR_{cil}^2} > 0 \Rightarrow \text{mínimo}) \quad [4.24]$$

Anulando a equação 4.23 e explicitando R^3 .

$$R_{cil}^3 = \frac{V_{cil}.H_{UAcil}}{\pi.\bar{H}} \quad [4.25]$$

Substituindo a equação $V_{cil} = \pi.R_{cil}^2.h_{cil}$ na equação 4.25, obtém-se a relação λ_{cil} .

$$\lambda_{cil} = \frac{h_{cil}}{R_{cil}} = \frac{\bar{H}}{H_{UAcil}} \quad [4.26]$$

Substituindo a equação 4.26 na equação $V_{cil} = \pi.R_{cil}^2.h_{cil}$, obtém-se o valor de R_{cil} .

$$R_{cil} = \sqrt[3]{\frac{V_{cil}}{\pi.\lambda_{cil}}} \quad [4.27]$$

O valor da altura do edifício é obtido através da equação 4.28

$$h_{cil} = \lambda_{cil}.R_{cil} \quad [4.28]$$

Especificamente para o Rio de Janeiro em fevereiro, tem-se:

$$\lambda_{cil} = \frac{h_{cil}}{R_{cil}} = \frac{\bar{H}}{H_{UAcil}} \cong \frac{5,94}{3} \cong 1,98 \Rightarrow h_{cil} \cong 2.R_{cil} \quad [4.29]$$

O *edifício ideal* cilíndrico ($h_{cil} \cong 2.R_{cil}$) está próximo do cilindro equilátero, mostrado na figura 4.15.

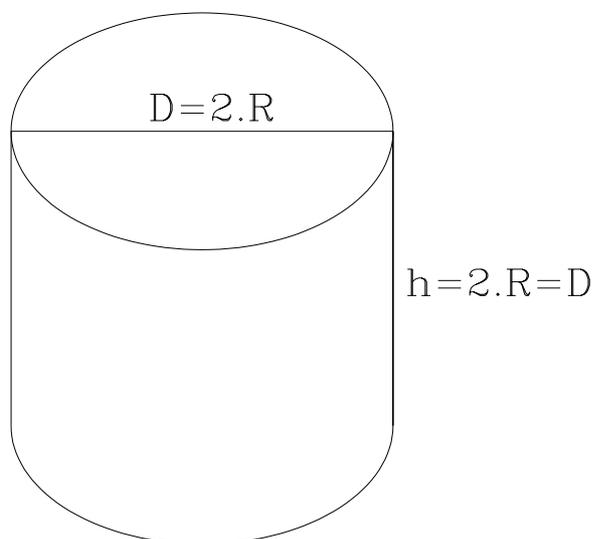


Figura 4.15 Cilindro equilátero

Substituindo a equação 4.29 na equação $V_{cil} = \pi.R_{cil}^2.h_{cil}$, obtém-se uma fórmula prática para estimar o valor do raio da base do edifício ideal.

$$R_{cil} \cong 0,544 \times \sqrt[3]{V_{cil}} \quad [4.30]$$

O valor da altura do edifício ideal pode ser estimado pela equação 4.31.

$$h_{cil} \cong 1,98 \times R_{cil} \quad [4.31]$$

Substituindo a equação 4.31 na equação 4.21, obtém-se uma fórmula para estimar o valor da radiação solar total incidente no envelope do *edifício ideal* cilíndrico.

$$H_{env} \cong 56,62 \times R_{cil}^2 \quad [4.32]$$

Utilizando a ferramenta *RadV*, foram simulados os valores da radiação solar incidente em três edifícios cilíndricos de mesmo volume. Foram analisados um cilindro esbelto, um cilindro baixo e o cilindro *ideal*.

As dimensões do cilindro esbelto e do cilindro baixo estão mostradas na figura 4.16 e os resultados são apresentados na tabela 4.15.

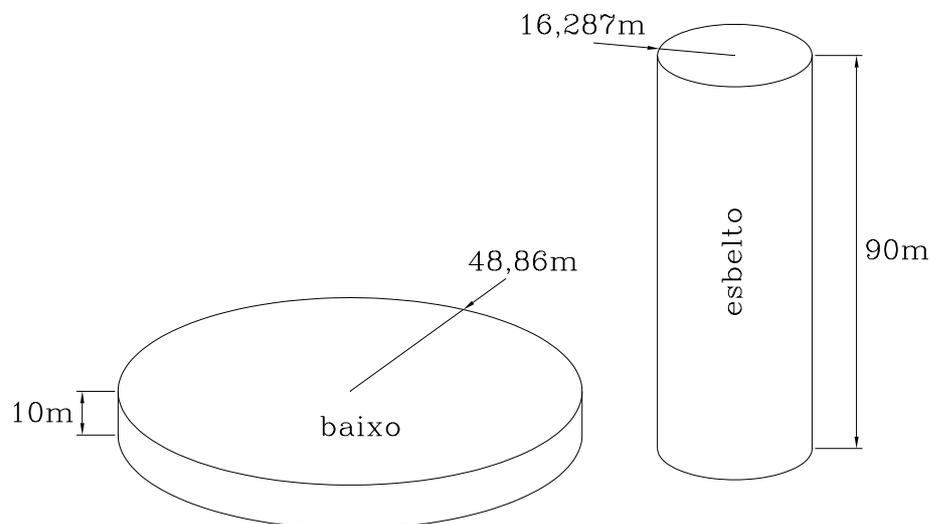


Figura 4.16 Edifícios cilíndricos baixo e esbelto

Volume do edifício baixo: $V_{cil} = \pi \times (48,86^2) \times 10 \cong 75000 \text{ m}^3$.

Volume do edifício esbelto: $V_{cil} = \pi \times (16,287^2) \times 90 \cong 75000 \text{ m}^3$.

Estimando os valores do raio da base e da altura para o edifício cilíndrico *ideal*:

$$R_{cil} \cong 0,544 \times \sqrt[3]{V_{cil}} \cong 0,544 \times \sqrt[3]{75000} \cong 22,941 \text{ m}$$

$$h_{cil} \cong 1,98 \times R_{cil} \cong 1,98 \times 22,941 \cong 45,424 \text{ m}$$

Tabela 4.15 Resultados para os edifícios cilíndricos analisados (75000 m³)

Edifício analisado	Radiação incidente na cobertura kWh/dia	Radiação incidente nas fachadas kWh/dia	Radiação incidente no envelope kWh/dia
baixo	44550	12092	54642
esbelto	4950	27940	32890
ideal	9821	19977	29798

A figura 4.17 mostra o aspecto dos três edifícios cilíndricos analisados .

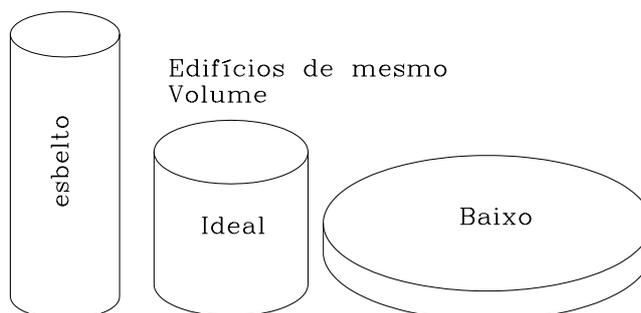


Figura 4.17 Aspecto dos edifícios cilíndricos estudados

4.2.4 Edifícios esféricos (calotas esféricas)

São tratados, neste trabalho, como edifícios esféricos, aqueles que possuem a forma de uma calota esférica e não de uma esfera. A ferramenta *RadG2* foi utilizada nos estudos envolvendo a radiação solar incidente nestes edifícios, cujas dimensões básicas estão mostradas na figura 4.18.

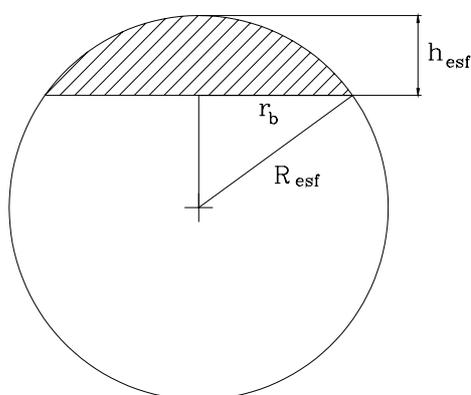


Figura 4.18 Dimensões das calotas esféricas

Os edifícios esféricos simulados inicialmente são mostrados na figura 4.19, cujas posições de construção foram denominadas por *normal* e *invertida*.

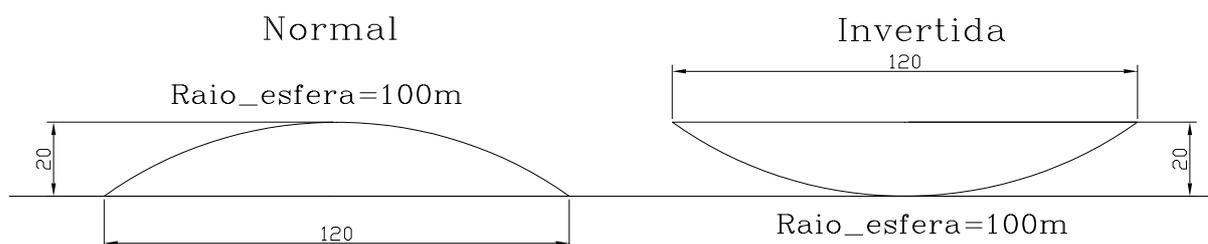


Figura 4.19 Edifícios esféricos construídos nas posições *normal* e *invertida*

Visando facilitar questões geométricas, foram adotadas as seguintes dimensões para os edifícios no exemplo estudado:

- raio (esfera suporte): $R_{esf} = 100$ m;
- raio da base (cobertura): $r_b = 60$ m;
- altura: $h_{esf} = 20$ m;
- área da superfície esférica (fachadas) : $A_{esf} = 2 \cdot \pi \cdot R_{esf} \cdot h_{esf} \cong 12566$ m²;
- área da cobertura (base): $A_{cobert} = \pi \cdot r_b^2 \cong 11310$ m²;
- volume: $V_{esf} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h_{esf}^2 \cdot (3 \cdot R_{esf} - h_{esf}) \cong 117286$ m³.

Nas simulações realizadas com a ferramenta *RadG2*, as superfícies esféricas foram aproximadas por malhas com 192 células (*Revolved Mesh*), o que acarreta um erro na área da superfície analisada de cerca de 1%. Os resultados numéricos obtidos estão apresentados nas tabelas 4.16 e 4.17.

Tabela 4.16 Elementos geométricos dos edifícios analisados

Posição do edifício analisado	Raio da esfera	Raio da base	Altura da calota	Área da superfície esférica	Área da cobertura	Área total do envelope
	m	m	m	m ²	m ²	m ²
normal	100	60	20	12566	0	12566
invertida	100	60	20	12566	11310	23876

Tabela 4.17 Valores de radiação para os edifícios analisados

Posição do edifício analisado	Radiação incidente na superfície esférica kWh/dia	Radiação média incidente na superfície esférica kWh/m ² .dia	Radiação total incidente na cobertura kWh/dia	Radiação total incidente no edifício kWh/dia
normal	69873	5,56	0	69873
invertida	16741	1,33	67180	83921

A figura 4.20 mostra a tela obtida após a simulação realizada para o edifício na posição *normal*.

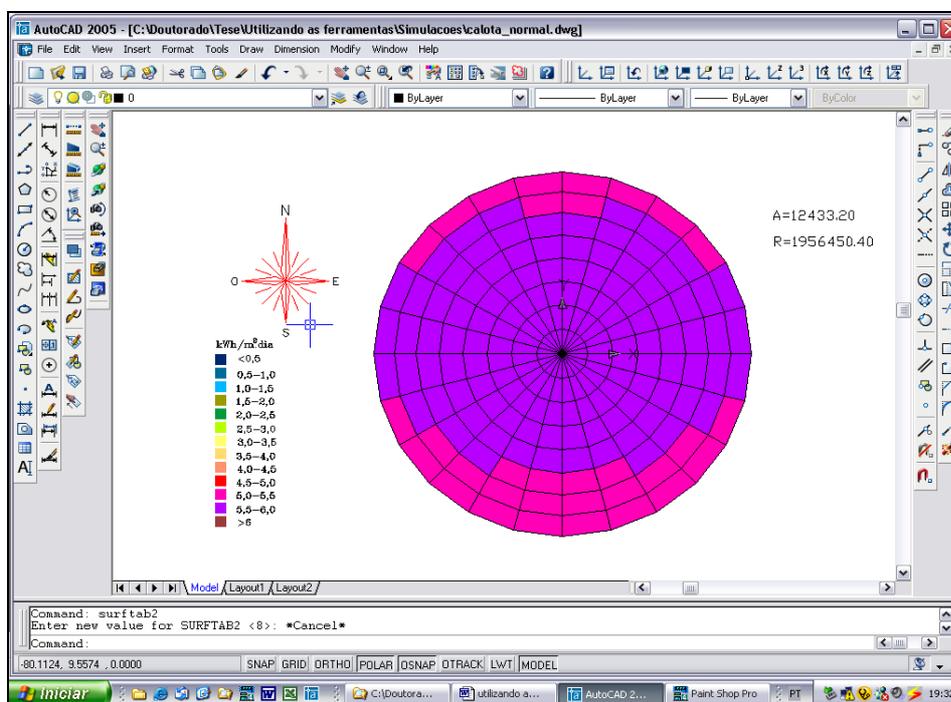


Figura 4.20 Tela obtida na simulação do edifício esférico na posição *normal*

A figura 4.21 mostra a tela obtida após a simulação realizada para o edifício na posição *invertida*.

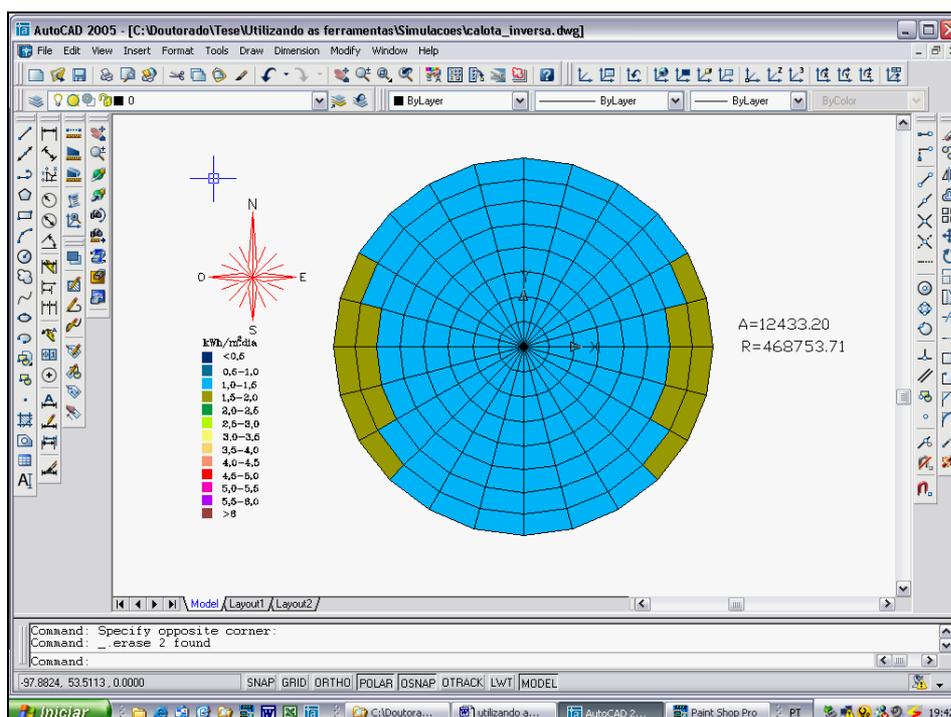


Figura 4.21 Tela obtida na simulação do edifício esférico na posição *invertida*

A condição necessária para que o valor da radiação solar média incidente em um conjunto de calotas esféricas seja constante é que a relação λ_{esf} , também seja constante. Nas calotas esféricas tem-se: $H_{UAesf} = f(\lambda_{esf}) = f(h, R)$.

A pesquisa do *edifício ideal* na forma de uma calota esférica é uma tarefa mais complexa do que nos casos analisados anteriormente.

Seja: $\lambda_{esf} = \frac{h_{esf}}{R_{esf}}$ válida no intervalo $(0 < \lambda \leq 1)$, onde H_{UAesf} foi considerada constante.

Tem-se que:
$$h_{esf} = \lambda_{esf} \cdot R_{esf} \quad [4.33]$$

A área das fachadas do edifício é calculada através da equação 4.34.

$$A_{esf} = 2 \cdot \pi \cdot R_{esf} \cdot h_{esf} \quad [4.34]$$

O volume do edifício, considerado constante, é calculado através da equação 4.35.

$$V_{esf} = \frac{\pi \cdot h_{esf}^2}{3} \cdot (3 \cdot R_{esf} - h_{esf}) \quad [4.35]$$

Substituindo a equação 4.33 na equação 4.35 e explicitando o valor de R_{esf}^2 .

$$R_{esf}^2 = \frac{(3 \cdot V_{esf})^{2/3}}{(3 \cdot \pi \cdot \lambda_{esf}^2 - \pi \cdot \lambda_{esf}^3)^{2/3}} \quad [4.36]$$

O valor da radiação solar incidente na superfície esférica do envelope pode ser calculado através da equação 4.37.

$$H_{esf} = 2 \cdot \pi \cdot R_{esf} \cdot h_{esf} \cdot H_{UAesf} \quad [4.37]$$

Substituindo as equações 4.33 e 4.36 na equação 4.37, tem-se:

$$H_{esf} = [2 \cdot \pi \cdot (3 \cdot V_{esf})^{2/3} \cdot H_{UAesf}] \cdot \frac{\lambda_{esf}}{(3 \cdot \pi \cdot \lambda_{esf}^2 - \pi \cdot \lambda_{esf}^3)^{2/3}} \quad [4.38]$$

Introduzindo o termo constante $A = 2 \cdot \pi \cdot (3 \cdot V_{esf})^{2/3} \cdot H_{UAesf}$, pode-se reescrever a equação 4.38.

$$H_{esf} = A \cdot \left(\frac{\lambda_{esf}}{(3 \cdot \pi \cdot \lambda_{esf}^2 - \pi \cdot \lambda_{esf}^3)^{2/3}} \right) \quad [4.39]$$

O valor da radiação solar incidente na área circular da cobertura nos edifícios construídos na posição invertida pode ser calculado pela equação 4.40.

$$H_{cobert} = \bar{H} \cdot \pi \cdot r_b^2 \quad [4.40]$$

O quadrado do raio do círculo da cobertura é obtido através da equação 4.41.

$$r_b^2 = 2 \cdot R_{esf} \cdot h_{esf} - h_{esf}^2 \quad [4.41]$$

Substituindo as equações 4.33, 4.36 e 4.41 na equação 4.40.

$$H_{cobert} = [\pi \cdot \bar{H} \cdot (3 \cdot V_{esf})^{2/3}] \cdot \frac{(2 \cdot \lambda_{esf} - \lambda_{esf}^2)}{(3 \cdot \pi \cdot \lambda_{esf}^2 - \pi \cdot \lambda_{esf}^3)^{2/3}} \quad [4.42]$$

Introduzindo o termo constante $B = \pi \cdot \bar{H} \cdot (3 \cdot V_{esf})^{2/3}$, reescreve-se a equação 4.42.

$$H_{cobert} = B \cdot \left[\frac{(2 \cdot \lambda_{esf} - \lambda_{esf}^2)}{(3 \cdot \pi \cdot \lambda_{esf}^2 - \pi \cdot \lambda_{esf}^3)^{2/3}} \right] \quad [4.43]$$

Para as análises das condições de máximo ou mínimo das funções representadas pelas equações 4.39 e 4.43 foi elaborado, utilizando o programa *MATLAB*, o gráfico exibido na figura 4.22.

O gráfico mostra a evolução dos valores da radiação solar incidente na superfície esférica e na superfície circular da cobertura para os edifícios esféricos, em função da relação λ_{esf} , considerando o intervalo válido: $0 < \lambda \leq 1$.

As constantes A e B não interferem na pesquisa dos valores que tornam mínimas as equações 4.39 e 4.43 e portanto foram consideradas iguais a 1 no traçado das curvas.

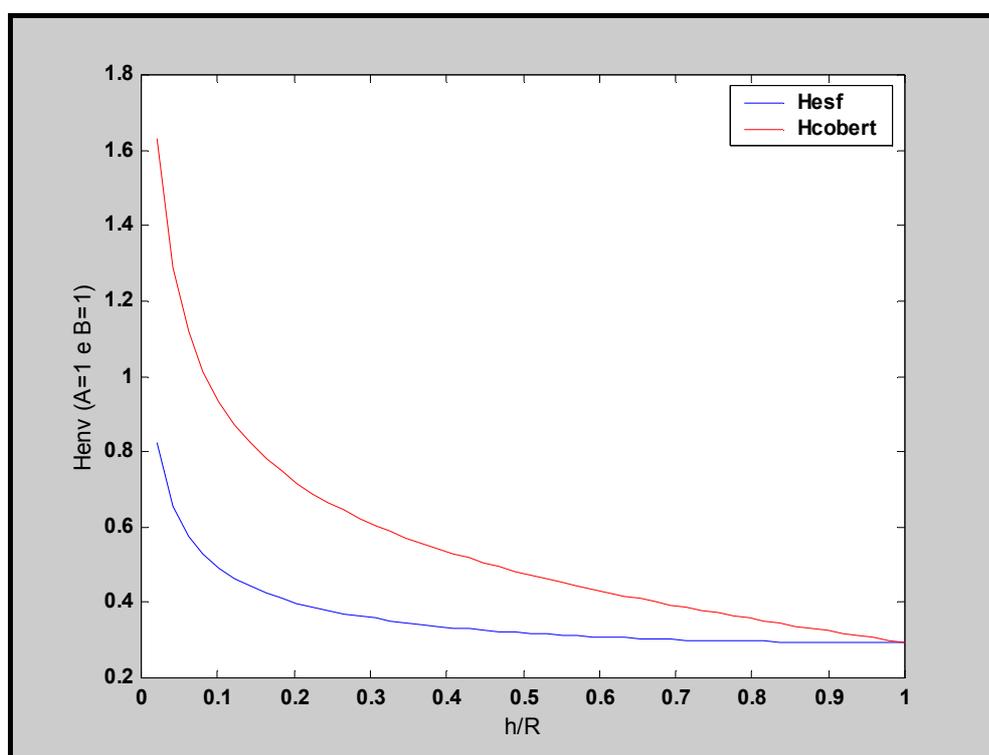


Figura 4.22 Curvas para H_{esf} e H_{cobert}

O gráfico obtido mostra, para ambas as superfícies analisadas, que o valor mínimo para a radiação solar incidente ocorre para a relação $\lambda_{esf} = 1$, ou seja:

$$\frac{h_{esf}}{R_{esf}} = 1 \Rightarrow h_{esf} = R_{esf} \quad [4.44]$$

Conclui-se que a forma para o *edifício ideal*, tanto na posição normal, quanto na posição invertida, é a de uma calota *semi-esférica*, conforme mostra a figura 4.23.

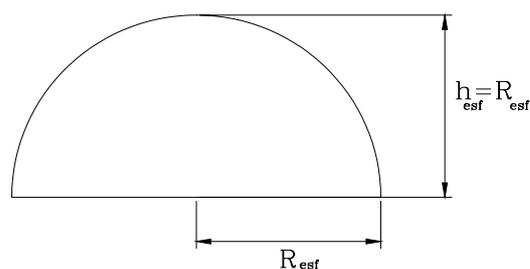


Figura 4.23 Calota semi-esférica

Substituindo a equação 4.44 na equação 4.35, obtêm-se os valores para o raio e a altura da semi-esfera (*edifício ideal*), para as posições *normal* e *invertida*.

$$R_{esf} = h_{esf} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_{esf}}{2 \cdot \pi}} \cong 0,782 \times \sqrt[3]{V_{esf}} \quad [4.45]$$

A tabela 4.18 apresenta os resultados obtidos com a ferramenta *RadG2* para a radiação solar incidente em um *edifício ideal* (semi-esférico) com volume igual a 75000 m³ (volume padrão) nas posições *normal* e *invertida*.

Tabela 4.18 Edifício ideal semi-esférico (75000 m³)

Posição do edifício ideal	Raio da esfera suporte (m)	Radiação incidente na superfície esférica (kWh/dia)	Radiação incidente na cobertura plana (kWh/dia)	Radiação incidente no envelope (kWh/dia)	Radiação média incidente na superfície esférica (kWh/m ² .dia)
normal	32,978	29784	0	29784	4,359
invertida	32,978	13732	20295	34027	2,010

A figura 4.24 mostra a tela obtida na simulação da radiação solar incidente utilizando a ferramenta *RadG2* para o *edifício ideal* construído na posição *normal* analisado na tabela 4.18.

Para o *edifício ideal* na posição *normal*, considerando uma determinada localidade, uma determinada data e um determinado tipo de solo, tem-se:

$$H_{esf} = H_{env} = H_{UAesf} \times A_{esf} \quad [4.46]$$

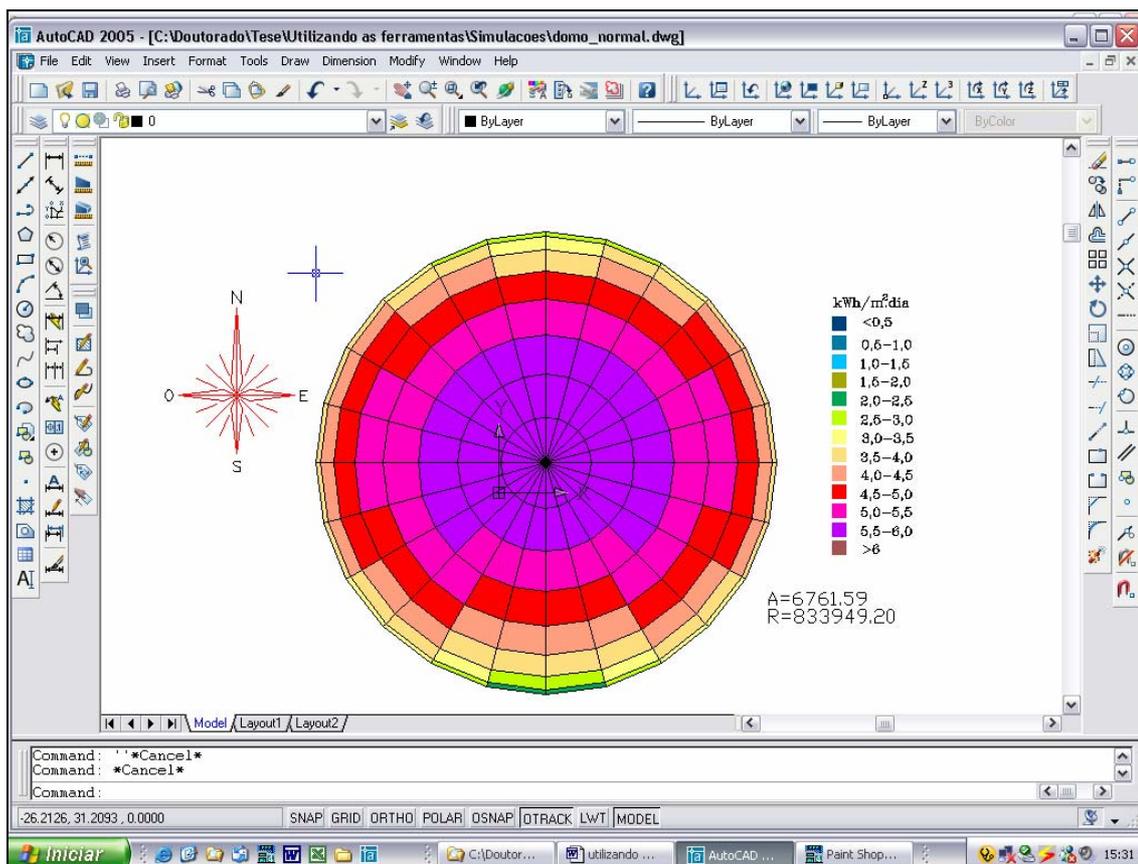


Figura 4.24 Edifício ideal - posição *normal* (75000 m³)

Para o edifício ideal na posição invertida nas mesmas condições:

$$H_{env} = H_{esf} + H_{cobert} = H_{UAesf} \times A_{esf} + \bar{H} \times A_{cobert} \quad [4.47]$$

O valor de H_{UAesf} pode ser determinado através da ferramenta *RadG2* e o valor de \bar{H} pode ser obtido em Corbella (1995), NASA (2004) ou CRESESB (2004).

Especificamente para Rio de Janeiro em fevereiro, o valor da radiação total incidente no envelope de um *edifício ideal* na posição *normal* pode ser estimado através da fórmula prática, representada pela equação 4.48.

$$H_{env} = H_{esf} \cong 4,359 \times 2 \times \pi \times R_{esf}^2, \text{ então:}$$

$$H_{env} \cong 27,4 \times R_{esf}^2 \quad [4.48]$$

Para o *edifício ideal* na posição *invertida*, nas mesmas condições:

$$H_{env} \cong 2 \times \pi \times R_{esf}^2 \times 2,01 + \pi \times r_b^2 \times 5,94, \text{ então:}$$

$$H_{env} \cong 31,3 \times R_{esf}^2 \quad [4.49]$$

Com objetivo de avaliar as fórmulas apresentadas, foram comparados os valores obtidos para a radiação solar incidente calculados utilizando as equações 4.48 e 4.49 e os valores obtidos utilizando a ferramenta *RadG2*, para um *edifício ideal* com 60 m de raio.

Os resultados obtidos são apresentados na tabela 4.19.

Tabela 4.19 Comparação entre as equações 4.48 e 4.49 e *RadG2*

Posição do edifício	Equações 4.48 e 4.49	Ferramenta <i>RadV</i>	Diferença relativa à ferramenta <i>RadG2</i>
	kWh/dia	kWh/dia	%
normal	98640	98485	+0,2
invertida	112680	112639	+0,03

Os valores estimados pelas equações 4.48 e 4.49 foram considerados bons e conforme esperado, discretamente superiores aos obtidos nas simulações utilizando a ferramenta *RadG2*.

Utilizando o método apresentado anteriormente podem ser estabelecidas fórmulas para estimar o valor da radiação solar incidente em edifícios esféricos genéricos com uma relação λ_{esf} constante. Considerando os valores para H_{UAesf} apresentados na tabela 4.17, para o Rio de Janeiro em fevereiro, foram elaboradas fórmulas específicas para a estimativa da radiação solar incidente em edifícios esféricos com $\lambda_{esf} \cong 1:5$.

• posição *normal*: $H_{env} \cong 7 \times R_{esf}^2$ [4.50]

• posição *invertida*: $H_{env} \cong 8,4 \times R_{esf}^2$ [4.51]

A tabela 4.20, elaborada com as equações 4.50 e 4.51, mostra uma comparação entre os diversos edifícios esféricos com o volume igual a 75000 m³ analisados.

Tabela 4.20 Comparações entre edifícios esféricos (75000 m³)

Edifício analisado	Radiação total incidente no edifício (kWh/dia)
edifício ideal – posição normal	29800
edifício (1:5) - posição normal	52037
edifício ideal – posição invertida	34041
edifício (1:5) - posição invertida	62445

A figura 4.25 mostra exemplos de edifícios estudados na tabela 4.20. Os edifícios têm o mesmo volume (75000 m³) e foram construídos na posição normal.

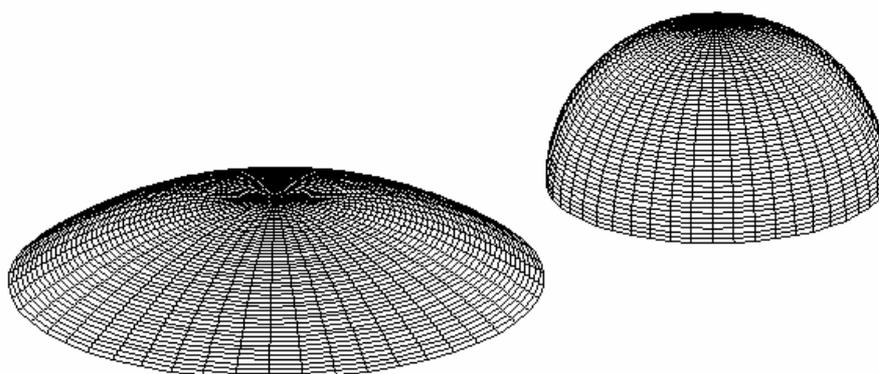


Figura 4.25 Edifícios esféricos com 75000 m³

4.2.5 As formas estudadas e a radiação incidente

O quadro 4.1 mostra a diferença relativa entre os valores da radiação solar incidente nos edifícios dispostos nas colunas e os edifícios dispostos nas linhas. Ao observar o quadro 4.1, verifica-se que um paralelepípedo *ideal* (coluna) recebe cerca de 11% menos radiação do que uma calota esférica *ideal* na posição *invertida* (linha) e uma calota esférica na posição invertida recebe cerca de 14% (coluna) mais radiação solar do que uma calota esférica na posição *normal* (linha).

Quadro 4.1 Comparação entre os edifícios ideais (75000m³)

Edifícios ideais - Rio de Janeiro – fevereiro – albedo = 0,2				
	Paralelepípedo ($\varphi = 1,7 : 1$)	Cilindro reto	Calota esférica na posição normal	Calota esférica na posição invertida
Paralelepípedo ($\varphi = 1,7 : 1$)	0%	- 2%	- 2%	+ 12%
Cilindro reto	+ 2%	0%	0%	+ 14%
Calota esférica na posição normal	+ 2%	0%	0%	+ 14%
Calota esférica na posição invertida	- 11%	- 12%	- 12%	0%

4.2.6 Terreno em encosta (superfície topográfica)

Na simulação dos valores da radiação solar incidente em um trecho fictício de terreno em encosta, situado entre as duas curvas de nível mostradas na figura 4.26 foi utilizada a ferramenta Rad3P, específica para modelos em três dimensões utilizando células triangulares.

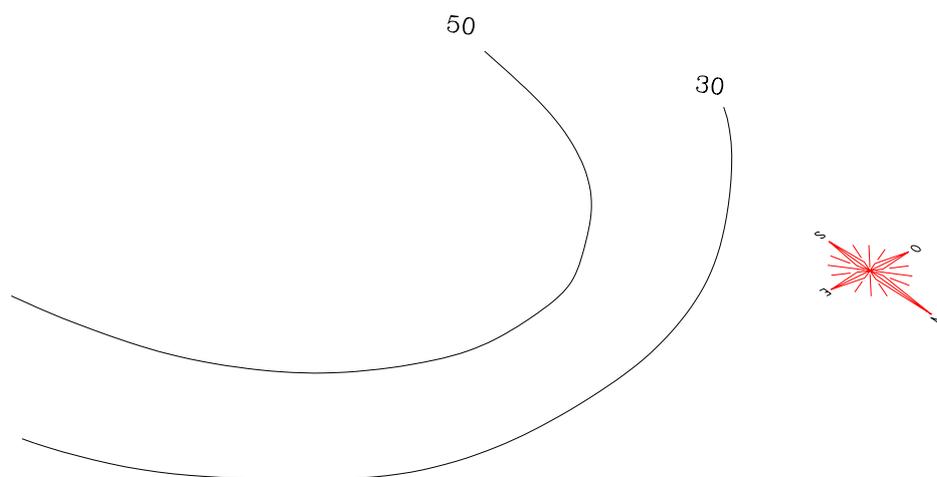


Figura 4.26 Encosta utilizada nas simulações

De acordo com as condições mencionadas anteriormente foram realizados dois tipos de simulação para os valores da radiação solar incidente no mesmo terreno.

No primeiro tipo, foi utilizada uma malha do tipo *Ruled Mesh*, disponível no *AutoCAD*. Neste caso, o usuário não tem o controle no processo de segmentação da superfície a ser analisada e dependendo das curvas que definem a geração da malha, o resultado pode ser imprevisível.

No segundo tipo foi utilizada uma malha triangular definida pelo usuário através das ferramentas *Osnap* do *AutoCAD*, onde o usuário define de acordo com a sua necessidade a maneira pela qual a superfície será dividida em células triangulares.

A figura 4.27 mostra a tela do *AutoCAD*, com a superfície do terreno, aproximada por uma malha com 30 células de 4 vértices não coplanares (*Ruled Mesh*). As células foram subdivididas em duas células triangulares para a garantia da coplanaridade, sendo utilizadas 60 células triangulares no estudo.

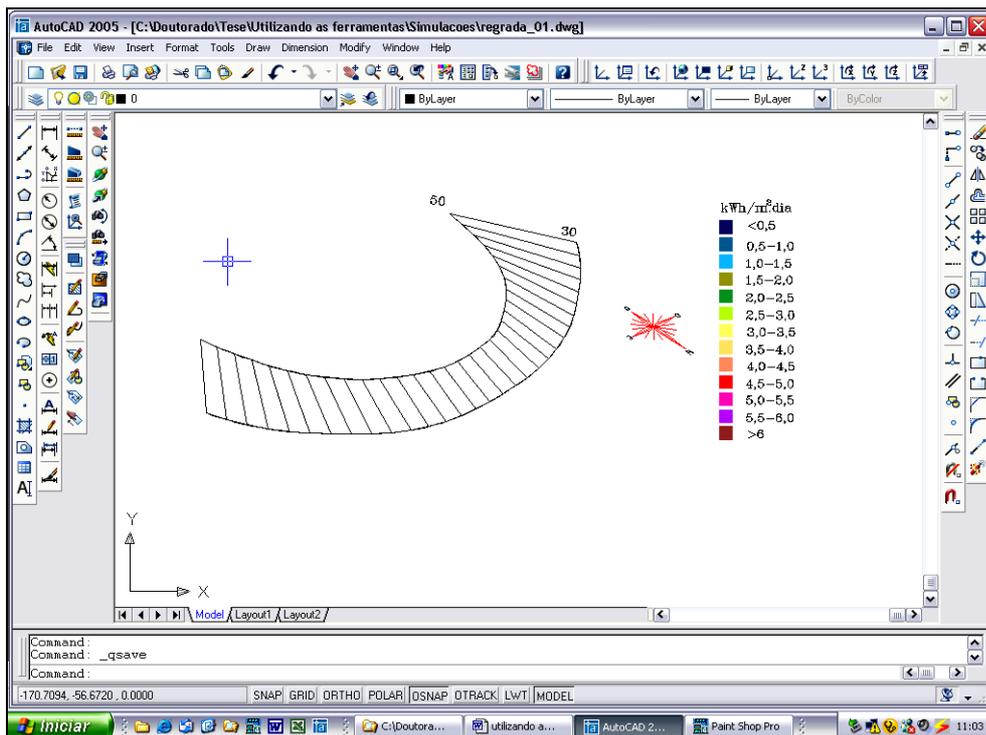


Figura 4.27 Planos definidos através de uma malha do AutoCAD

A tela apresentada na figura 4.28 mostra os resultados obtidos para o mês de fevereiro (condição de verão).

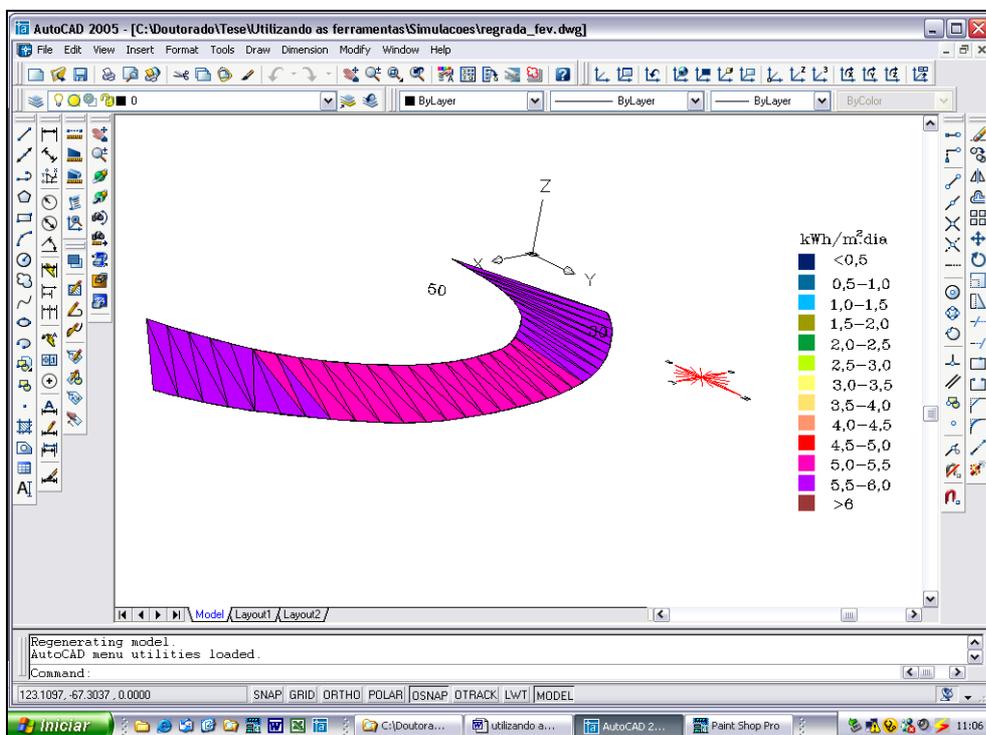


Figura 4.28 Tela obtida na simulação para fevereiro

A tela apresentada na figura 4.29 mostra os resultados obtidos para o mês de junho (condição de inverno).

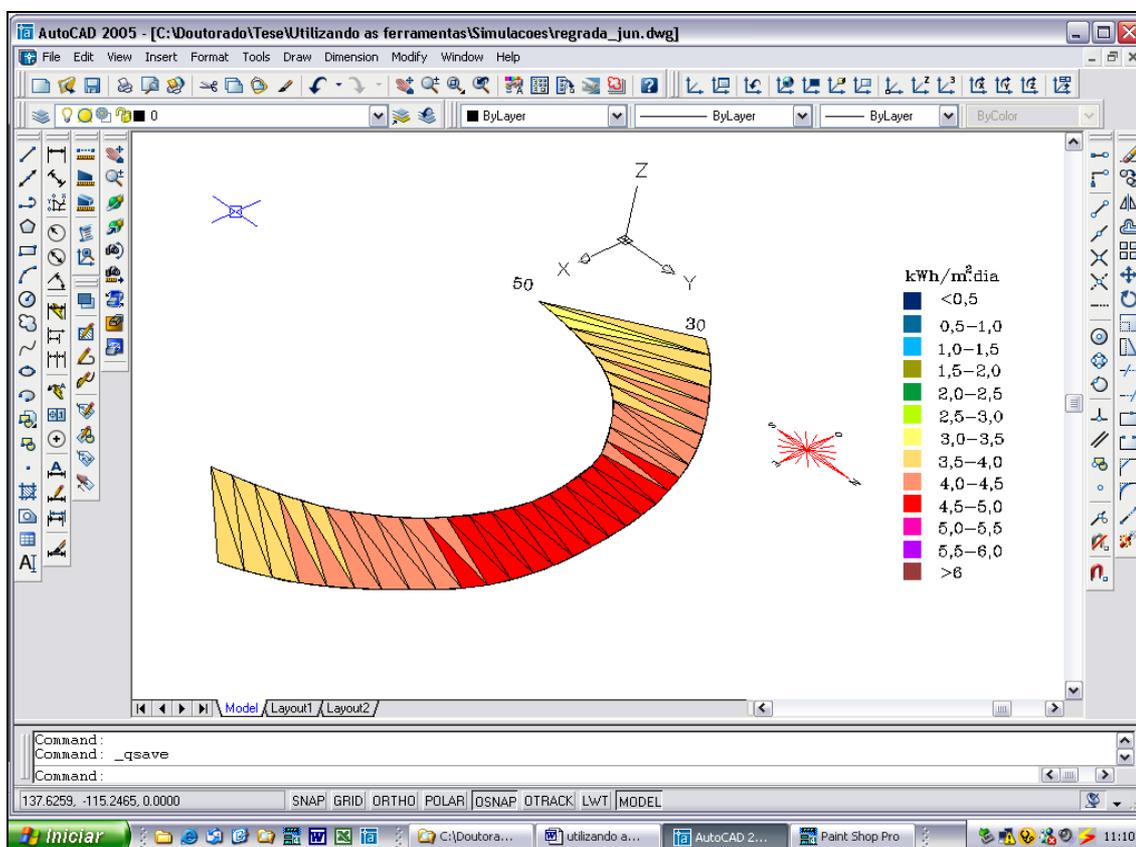


Figura 4.29 Tela obtida na simulação para junho

A tabela 4.21 mostra os resultados obtidos nas duas simulações realizadas

Tabela 4.21 Resultados obtidos nas simulações para a encosta

Período simulado	Radiação média incidente no terreno	Radiação média incidente no plano horizontal	Diferença relativa a radiação incidente no plano horizontal
	kWh/m ² .dia	kWh/m ² .dia	%
fevereiro (verão)	5,55	5,94	-6,5
junho (inverno)	4,21	3,39	+24,2

É importante ressaltar que este tipo de análise é importante nos projetos envolvendo as culturas irrigadas, onde a estimativa da quantidade de água a ser disponibilizada

pelos sistemas de irrigação, normalmente é calculada com base no processo de evapo-transpiração que ocorre nas plantas, onde a radiação solar pode ser considerada como um dos principais fatores de influência.

No dimensionamento da quantidade de água requerida dos sistemas de irrigação, utiliza-se o valor da radiação solar incidente no plano horizontal, desprezando-se a influência da orientação e da inclinação predominantes no terreno onde será implantada a cultura.

A quantidade de água necessária para as plantas pode ser considerada proporcional à quantidade de radiação solar incidente (CASTANHEIRA e CARVALHO, 2002). Ao observar a tabela 4.21, verificou-se, para a encosta estudada, que a quantidade de água requerida estaria subdimensionada em cerca de 24% no período de inverno. Para o período de verão os resultados poderiam ser considerados bons, apesar de discretamente superdimensionados em cerca de 6%. É possível aprimorar os sistemas de irrigação através de um dimensionamento mais preciso, no qual são consideradas a orientação e a inclinação predominantes no terreno, de acordo com a época do ano.

Em estudo elaborado sobre o assunto foi estabelecido um fator de correção para considerar as condições reais do terreno (CASTANHEIRA e CARVALHO, 2002).

A tela da figura 4.30 mostra o resultado obtido para o mês de junho, no qual a malha foi definida de acordo com a decisão do usuário utilizando as ferramentas *Osnap* do *AutoCAD*. O objetivo, neste caso, foi apenas avaliar a influência da forma pela qual os planos das células são definidos. O histórico da simulação mostra um valor igual a 4,17 kWh/m².dia para a radiação média diária incidente no terreno, indicando uma diferença inferior a 1%, quando comparado com o valor obtido na simulação utilizando a malha *Ruled Mesh* do *AutoCAD* para representar a superfície.

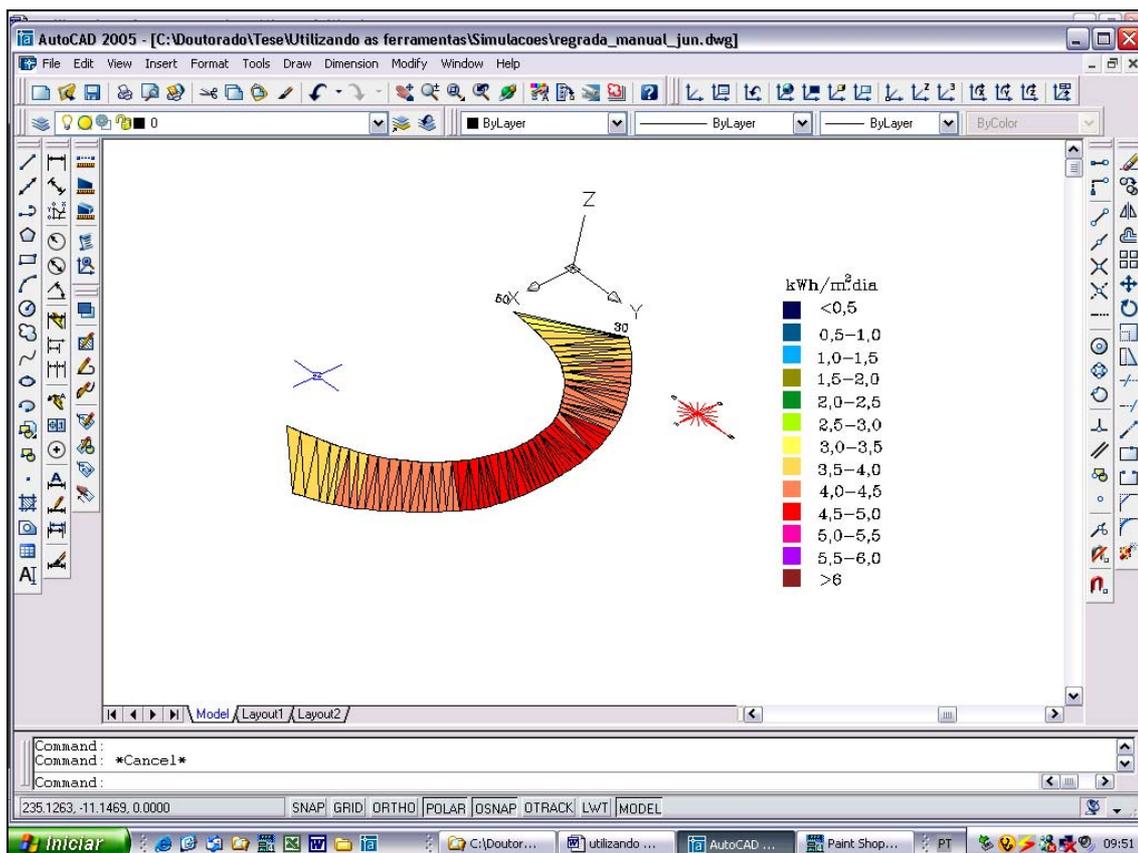


Figura 4.30 Simulação com vértices definidos pelo usuário

É importante ressaltar que em muitas simulações envolvendo estas superfícies é mais interessante o usuário definir sua própria malha, pois propicia ao usuário um maior controle na segmentação da superfície estudada, conduzindo a condições de trabalho mais estáveis.

CAPÍTULO 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são analisadas as ferramentas desenvolvidas e discutidos os resultados obtidos, após a elaboração dos procedimentos de simulação descritos no capítulo anterior.

5.1 FERRAMENTAS DESENVOLVIDAS

A seguir são apresentados os resultados das avaliações das ferramentas *RadSol*, *RadV*, *RadG2* e *Rad3P*.

5.1.1 Ferramenta *RadSol*

Entre as ferramentas computacionais desenvolvidas ao longo deste trabalho, *RadSol* é a única que pode ser utilizada de forma independente do *AutoCAD*. Mostrou-se eficiente no desenvolvimento das ferramentas *RadV*, *RadG2* e *Rad3P* e no estudo dos edifícios prismáticos de base retangular.

O programa *RadSol* foi desenvolvido para calcular a radiação solar incidente em um plano receptor definido através de três pontos distintos e não colineares, mas aceita também entradas numéricas para o azimute e a inclinação do plano receptor a ser analisado.

É uma ferramenta bastante útil nas atividades de ensino, pois fornece os valores de parâmetros fundamentais para o estudo da radiação solar incidente em planos receptores genéricos, mas não é recomendável para análises da radiação incidente no envelope dos edifícios, pois não permite analisar simultaneamente a radiação solar incidente em vários planos receptores distintos.

5.1.2 Ferramenta *RadV*

A ferramenta *RadV* mostrou-se prática e fácil de ser utilizada nas simulações realizadas para os valores da radiação solar incidente nas fachadas dos edifícios com pé-direito constante. Para os edifícios com fachadas com pé-direito variável, esta ferramenta não representa uma solução prática. Nestes casos a ferramenta *RadG2* é uma solução mais indicada.

Após diversas simulações utilizando esta ferramenta em fachadas com pé direito constante, não foram observados problemas relativos a instabilidades ou erros de processamento e os resultados foram obtidos de forma rápida e prática.

5.1.3 As ferramentas *RadG2* e *Rad3P*

A ferramenta *Rad3P* foi desenvolvida especificamente para estimar os valores da radiação solar incidente em células planas, sempre definidas por três pontos distintos e não colineares, o que representa um ponto negativo para a ferramenta, pois exige maior esforço do usuário durante a inserção da geometria da superfície estudada.

Um ponto positivo observado nesta ferramenta é a possibilidade de se definir, logo no início da simulação, a orientação correta das faces expostas ao Sol (Fig. 5.1), através das opções *Céu* e *Solo*, evitando a utilização da regra da mão direita para orientar as superfícies analisadas.

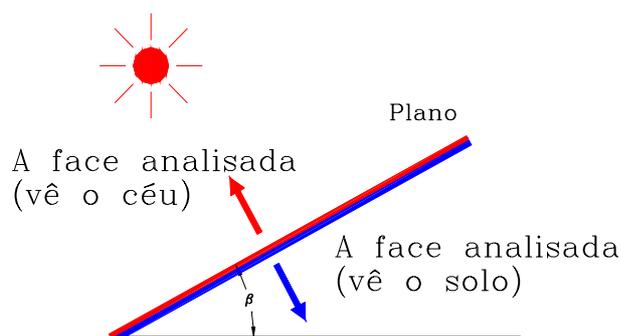


Figura 5.1 Face exposta ao Sol

A ferramenta *RadG2* inicialmente foi desenvolvida para a estimativa da radiação solar incidente em edifícios representados por modelos em três dimensões do tipo estrutura de arame, mas se mostrou também eficiente nos estudos envolvendo superfícies, quando estas podem ser representadas por malhas com quatro vértices coplanares.

Um ponto negativo observado nesta ferramenta é a utilização da regra da mão direita para a orientação correta das superfícies a serem analisadas. É importante destacar que a utilização da regra da mão direita para a orientação dos planos receptores é um processo exaustivo e bastante sujeito a erros.

A principal virtude desta ferramenta é permitir a possibilidade da inserção de células com três, quatro ou cinco vértices coplanares. Esta possibilidade representa uma vantagem significativa sobre a ferramenta *Rad3P*, pois reduz consideravelmente o esforço do usuário na definição da geometria da superfície a ser analisada.

De uma forma geral, a ferramenta *RadG2* conduz a soluções mais simples do que a ferramenta *Rad3P*, exigindo menor esforço do usuário.

5.1.4 Discussões gerais sobre as ferramentas desenvolvidas

Após a intensa utilização das ferramentas *RadV*, *RadG2* e *Rad3P* em diversos processos de simulação para a radiação solar incidente em vários tipos de superfícies, foram observados pequenos problemas, que foram prontamente corrigidos através do reinício da simulação, utilizando os valores das variáveis obtidos no histórico da simulação.

Recomenda-se sempre utilizar nas simulações com estas ferramentas, uma vista da superfície a ser analisada que mostre de forma clara todos os vértices das células que a definem, evitando células invisíveis ou superpostas.

Nos casos em que é impossível exibir a superfície nestas condições, a solução a ser adotada depende muito da criatividade do usuário na subdivisão da superfície estudada em elementos que facilitem a aplicação das ferramentas e do seu conhecimento e experiência na utilização do *AutoCAD* em três dimensões.

A figura 5.2 ilustra um destes casos.

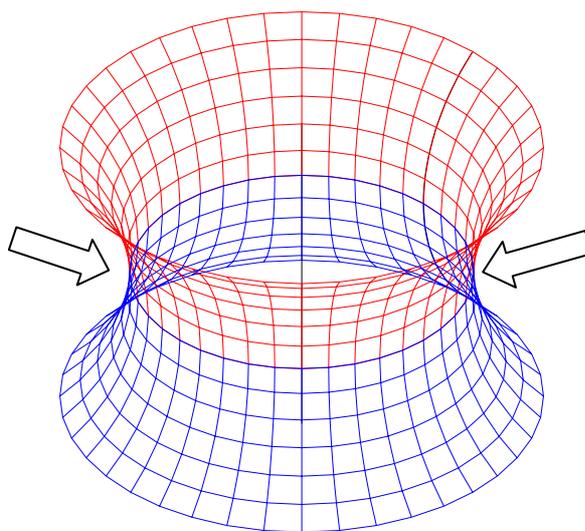


Figura 5.2 A vista apresenta superposições de células e vértices

Como um exemplo de solução, neste caso, para criar as condições necessárias à aplicação das ferramentas *RadG2* ou *Rad3P*, a superfície foi dividida em duas partes: a superior (vermelho) e a inferior (azul), conforme mostrado na figura 5.3.

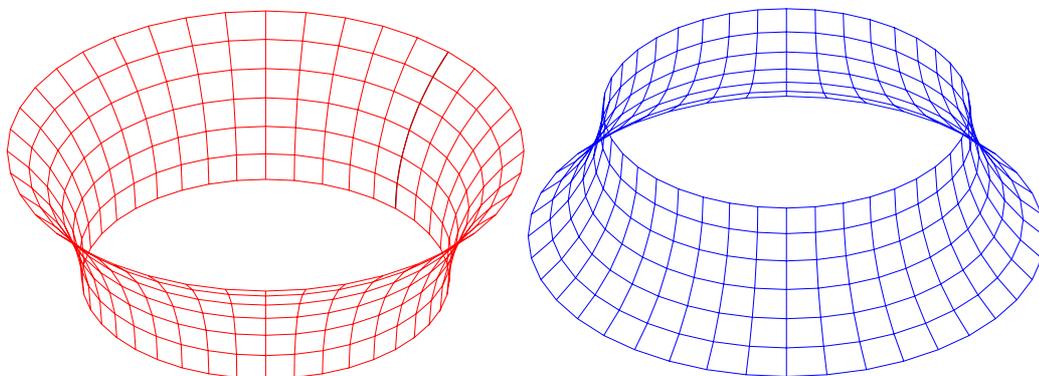


Figura 5.3 Partes superior e inferior da superfície a ser analisada

Para a aplicação das ferramentas, utilizou-se uma vista de topo das partes superior e inferior, conforme mostrado na figura 5.4.

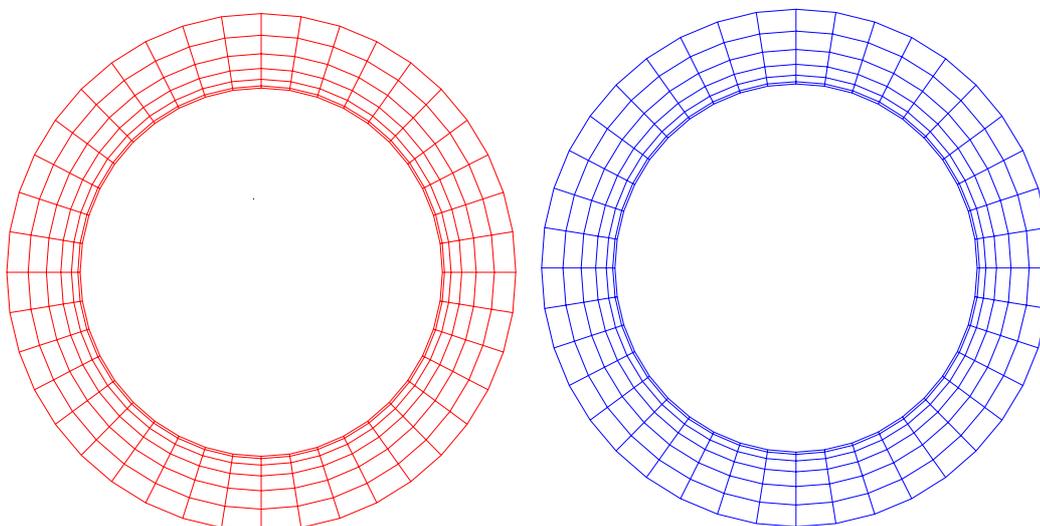


Figura 5.4 Vistas utilizadas nas simulações

Nestas vistas todas as células são visíveis e não existe superposição, portanto as ferramentas podem ser aplicadas de forma direta e prática com o auxílio do comando *ZOOM* disponível no *AutoCAD*. O resultado final é obtido através da soma dos resultados parciais obtidos para cada vista.

Um ponto negativo importante observado nas ferramentas *RadV*, *RadG2* e *Rad3P* é a restrição imposta ao usuário para anular as inserções de dados erradas. Visando otimizar e economizar memória durante o processamento, só é possível anular a entrada da última célula inserida, o que em certos casos pode ser fatal, comprometendo todo o processo de simulação.

É importante utilizar estas ferramentas de forma cuidadosa em superfícies com elementos sombreadores e/ou concavidades significativas, pois o *sombreamento*, o *auto-sombreamento*, as *inter-reflexões* e as emissões de radiação em onda longa não foram considerados nos algoritmos de cálculo.

Em todos os processos de simulação utilizando as ferramentas elaboradas, o usuário interage na definição da geometria da superfície estudada. Em determinados casos, este processo pode ser exaustivo, mas é importante ressaltar que o esforço exigido do usuário no processo da definição da geometria das superfícies analisadas, utilizando o método proposto neste trabalho e as ferramentas apresentadas, é muito menor do que o exigido pela maioria dos programas simuladores disponíveis, pois as coordenadas dos vértices que definem a superfície estudada são inseridas de forma gráfica através da ferramenta *OSNAP*.

Visando facilitar os processos de simulação foram realizadas inúmeras tentativas para o desenvolvimento de algoritmos mais independentes do usuário para automatizar ou pelo menos reduzir o esforço na definição da geometria das superfícies a serem estudadas. Infelizmente, os resultados obtidos sempre foram algoritmos de uso muito restrito e específico, acompanhados de freqüentes problemas de instabilidade computacional, gerando resultados imprevisíveis e muitas vezes estranhos e inconsistentes.

Provavelmente a solução deste problema exigirá programadores mais experientes no ambiente CAD e o desenvolvimento de procedimentos mais sofisticados. A pesquisa e elaboração destes procedimentos e de novas ferramentas para a realização dos procedimentos de simulação no ambiente do *AutoCAD*, certamente constitui um terreno fértil para os pesquisadores e para os profissionais da área de desenvolvimento de aplicativos para o *AutoCAD*.

5.2 RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES REALIZADAS

Os resultados obtidos durante a fase de avaliação das ferramentas desenvolvidas e do método proposto são discutidos a seguir.

Os estudos realizados para os edifícios consideraram o período de verão no Rio de Janeiro, quando são registrados os maiores valores para a radiação solar e a incidência de radiação solar nos planos receptores com pequenas inclinações (coberturas) é bem maior do que nos planos verticais (fachadas).

Devido ao enfoque distinto dado no estudo realizado para os terrenos destinados à agricultura, foram analisados os períodos de verão e inverno.

5.2.1 Edifícios prismáticos (paralelepípedos)

As análises do comportamento da radiação solar incidente nos edifícios prismáticos de base retangular apresentadas têm como base o conjunto de gráficos apresentados a seguir.

O gráfico da figura 5.5 foi elaborado com base nas tabelas 4.3, 4.5 e 4.7 e mostra a evolução da radiação solar incidente nos edifícios *ideais*, *baixos* e *esbeltos* em função da relação existente entre o comprimento e a largura da base retangular.

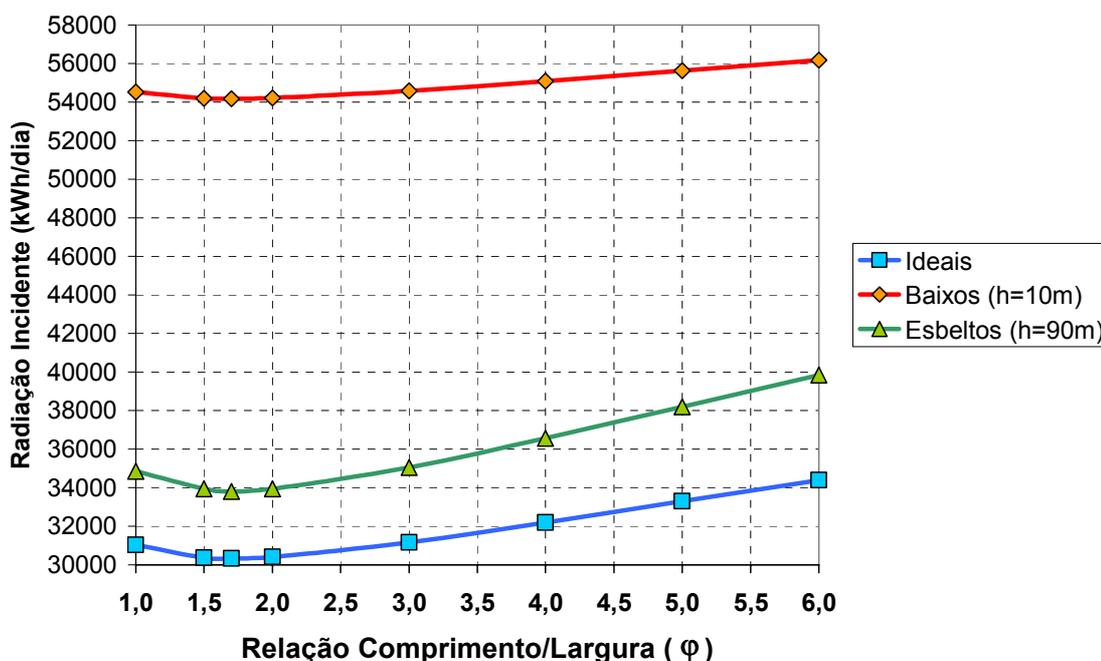


Figura 5.5 Radiação incidente nos edifícios prismáticos em função da relação ϕ

O gráfico da figura 5.6 mostra o trecho da curva relativa aos edifícios *ideais* (Fig. 5.5) considerando o intervalo $1 \leq \varphi \leq 2$. Tem como função permitir a identificação mais precisa do valor da relação φ correspondente à radiação incidente mínima.

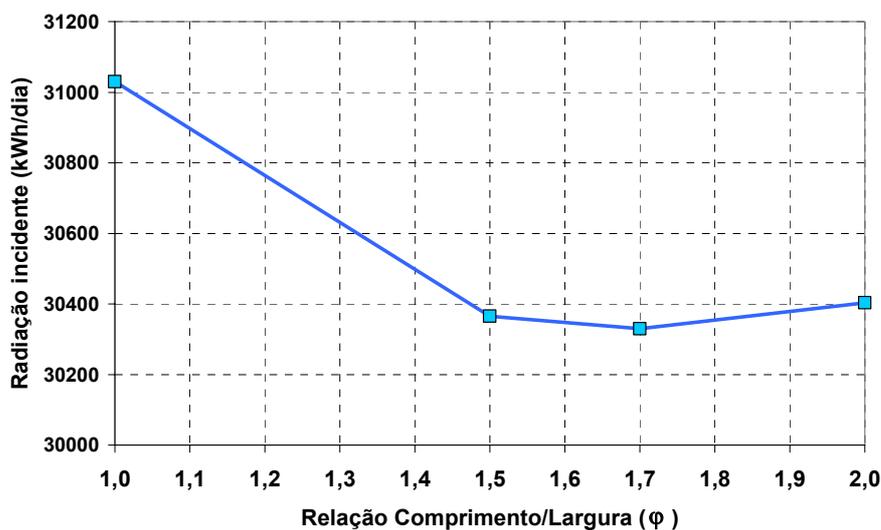


Figura 5.6 Valor de φ correspondente à radiação incidente mínima

O gráfico da figura 5.7 foi elaborado a partir das tabelas 4.2 e 4.3 e mostra o comportamento da radiação solar incidente nos edifícios *ideais* prismáticos em função da relação existente entre a largura da base retangular e a altura do edifício.

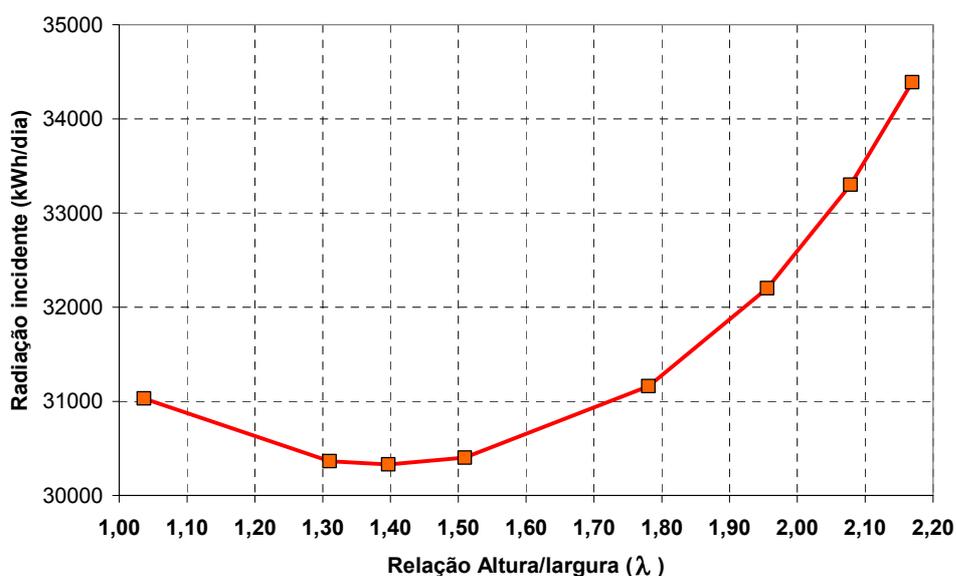


Figura 5.7 Evolução da radiação incidente em função da relação λ_p

O gráfico apresentado na figura 5.8 foi elaborado com valores obtidos na tabela 4.8 e mostra os incrementos percentuais nos valores da radiação solar incidente nos edifícios *baixos* e *esbeltos* analisados. Os incrementos mostrados são relativos ao edifício *ideal* correspondente para cada valor da relação φ . É sempre importante ressaltar que, em todas as análises realizadas, o volume dos edifícios foi considerado constante.

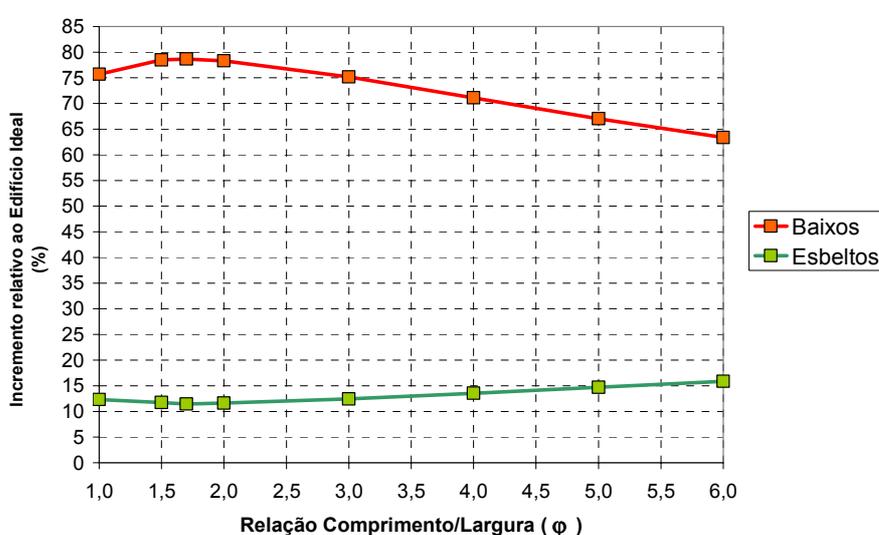


Figura 5.8 Incrementos na radiação incidente nos edifícios baixos e esbeltos

Os gráficos apresentados mostram que um paralelepípedo orientado para o norte, com as relações $\varphi \cong 1,7:1$ e $\lambda_p \cong 1,4:1$ (Fig. 5.9) representa o edifício *ideal* prismático nas condições analisadas, ou seja, aquele edifício que recebe a quantidade mínima de radiação solar incidente em seu envelope.

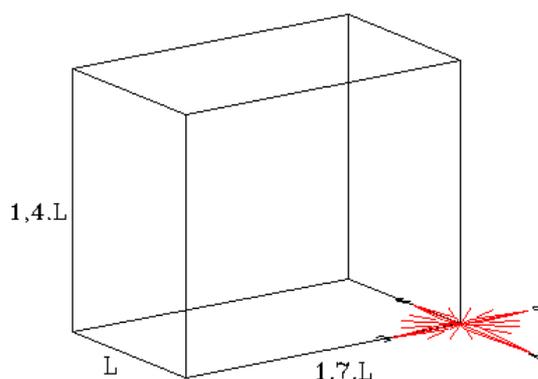


Figura 5.9 Representação do edifício prismático *ideal*

Observa-se que os resultados obtidos nas análises realizadas estão de acordo com os apresentados em Olgyay (1963), para as regiões tropicais úmidas dos Estados Unidos (Flórida - Lat. $\cong 25^\circ$ N).

Este edifício representa um parâmetro de referência para os projetistas, mas é importante ressaltar que o valor da relação λ_p para o *edifício ideal* não é uma constante, varia em função da orientação do edifício, da localidade, da data e do tipo de solo no entorno.

Nos casos em que é necessário utilizar valores específicos para a orientação do edifício e para a relação φ , seja por questões relativas à ventilação, problemas acústicos ou até mesmo para privilegiar uma determinada vista, os projetistas podem considerar um edifício dito "*ideal*" para estas condições e estimar suas dimensões através das equações 4.13 e 4.14, para minimizar a radiação solar incidente.

Observa-se uma importante influência da relação λ_p no comportamento dos edifícios prismáticos de base retangular quando se trata da radiação solar incidente. Os edifícios prismáticos *baixos*, onde as coberturas são maiores (tabela 4.4) e os valores de λ_p são menores, recebem quantidades de radiação solar significativamente maiores em seus envelopes, quando comparados com os edifícios mais altos (*esbeltos*), onde as coberturas são menores (tabela 4.6) e os valores de λ_p são maiores. Nos casos estudados, os edifícios baixos com $\varphi = 1.7 : 1$ orientados para o norte recebem cerca de 78% mais radiação solar do que o *edifício ideal* na mesma orientação (Fig.5.8). Para os edifícios esbeltos, o incremento na quantidade de radiação solar incidente está próximo a 12%, considerando a mesma referência.

A importância das relações φ e λ_p , em termos de radiação solar incidente, fica evidente quando se analisa a influência da orientação do edifício nos valores da radiação solar incidente no envelope. Segundo Castanheira (2001), no Rio de Janeiro, no período de verão, a diferença máxima nos valores da radiação solar recebida pelos edifícios *baixos*, considerando as variações da orientação, pode chegar a 8%, enquanto para os edifícios *esbeltos* esta variação pode chegar a um pouco mais de 20%.

5.2.2 Edifícios cilíndricos

Os estudos mostram que o *edifício ideal* cilíndrico, nas condições analisadas, deve ter o aspecto aproximado de um cilindro equilátero ($\lambda_{cil} \cong 2:1$) e de maneira semelhante ao observado para os edifícios prismáticos, os edifícios cilíndricos baixos, com grandes coberturas e valores menores para λ_{cil} , recebem mais radiação solar do que os edifícios cilíndricos esbeltos, com coberturas menores e maiores valores para λ_{cil} .

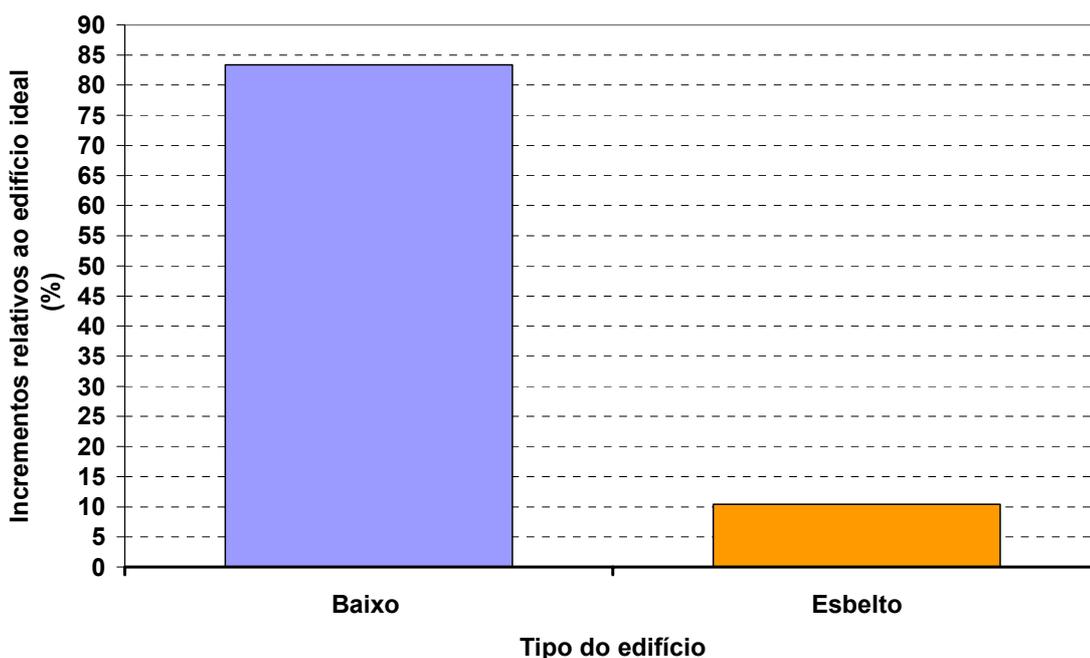


Figura 5.10 Incrementos relativos para os edifícios cilíndricos

O gráfico apresentado na figura 5.10 foi elaborado com valores obtidos na tabela 4.15 e mostra incrementos percentuais dos valores da radiação solar incidente nos edifícios cilíndricos baixos ($\lambda_{cil} \cong 1:5$) e esbeltos ($\lambda_{cil} \cong 6:1$) relativos ao *edifício ideal*, considerando-se o volume constante.

O fato da orientação do edifício não representar uma variável a ser considerada nos projetos envolvendo os edifícios cilíndricos, torna a relação λ_{cil} muito importante para os projetistas, quando o objetivo é minimizar a carga térmica proveniente da radiação solar. Nas condições analisadas, os edifícios baixos recebem cerca de 83% mais radiação solar do que o *edifício ideal*, enquanto os edifícios esbeltos recebem cerca de 10% mais radiação solar, quando comparados com o mesmo edifício.

Considerando que, nos edifícios cilíndricos, a radiação solar média incidente na superfície das fachadas (superfície cilíndrica) é constante para um mesmo local, uma mesma data e um mesmo albedo, podem ser determinadas fórmulas práticas para facilitar as estimativas da radiação solar incidente nestes edifícios. Nos estudos onde o conhecimento da distribuição da radiação solar nas fachadas do edifício seja importante deve ser utilizada a ferramenta *RadV*.

5.2.3 Edifícios esféricos

Nas análises apresentadas a seguir, o volume dos edifícios foi considerado constante e igual a 75000 m³. A pesquisa do *edifício ideal* esférico mostrou que, tanto para os edifícios construídos na posição *normal*, como para os edifícios construídos na posição *invertida*, a forma *ideal* para um edifício esférico é a de uma calota semi-esférica ($\lambda_{esf} = 1:1$).

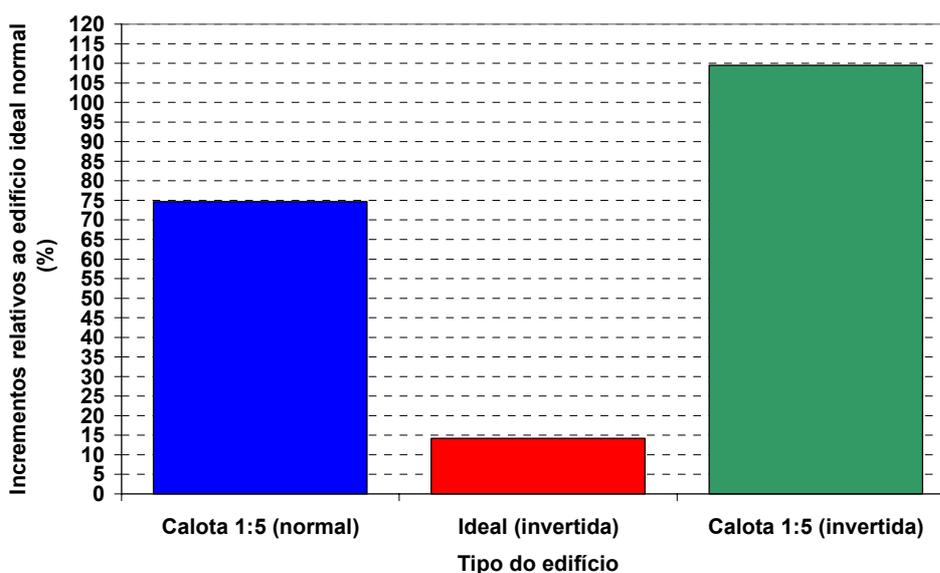


Figura 5.11 Incrementos para os edifícios esféricos analisados

O gráfico elaborado com valores obtidos na tabela 4.20 e exibido na figura 5.11, mostra os incrementos percentuais dos valores da radiação solar incidente nos edifícios esféricos construídos na posição *normal* ($\lambda_{esf} \cong 1:5$) e nos edifícios esféricos construídos na posição *invertida* ($\lambda_{esf} \cong 1:5$ e $\lambda_{esf} \cong 1:1$), relativos ao *edifício ideal* na posição *normal*.

De maneira semelhante aos edifícios cilíndricos, nos edifícios esféricos, a orientação não é uma variável a ser considerada nas análises envolvendo os ganhos solares, o que confere à relação λ_{esf} uma importância significativa na quantidade de radiação solar incidente no envelope.

Observou-se que, quanto menor o valor da relação λ_{esf} , maiores serão os valores da radiação solar recebida, independente da posição de construção ser a *normal* ou a *invertida*. Os resultados numéricos obtidos mostram que, nas condições analisadas, o edifício esférico com uma relação $\lambda_{esf} \cong 1:5$ construído na posição *normal* recebe cerca de 75% mais radiação solar em seu envelope do que o edifício *ideal* construído na mesma posição.

Independentemente dos valores da relação λ_{esf} , os edifícios construídos na posição *invertida* recebem mais radiação do que os edifícios construídos na posição *normal*, devido à influência da cobertura plana circular. Observou-se que o edifício esférico *ideal* construído na posição *invertida* recebe cerca de 14% mais radiação do que o *edifício ideal* construído na posição *normal* (referência), enquanto o edifício esférico com uma relação $\lambda_{esf} \cong 1:5$, construído na posição *invertida*, recebe uma quantidade de radiação cerca de 110% maior.

Nos edifícios esféricos, o valor da radiação solar média incidente na área da superfície esférica não é constante, varia em função da relação λ_{esf} . Quaisquer fórmulas práticas que venham a ser desenvolvidas para facilitar as estimativas da radiação incidente deverão ser específicas para uma determinada relação λ_{esf} .

Quando a distribuição da radiação solar incidente na superfície esférica for importante devem-se usar as ferramentas *Rad3P* ou *RadG2*.

5.2.4 Análises comparativas entre as formas analisadas

As análises a serem elaboradas e apresentadas a seguir têm como base o gráfico mostrado na figura 5.12.

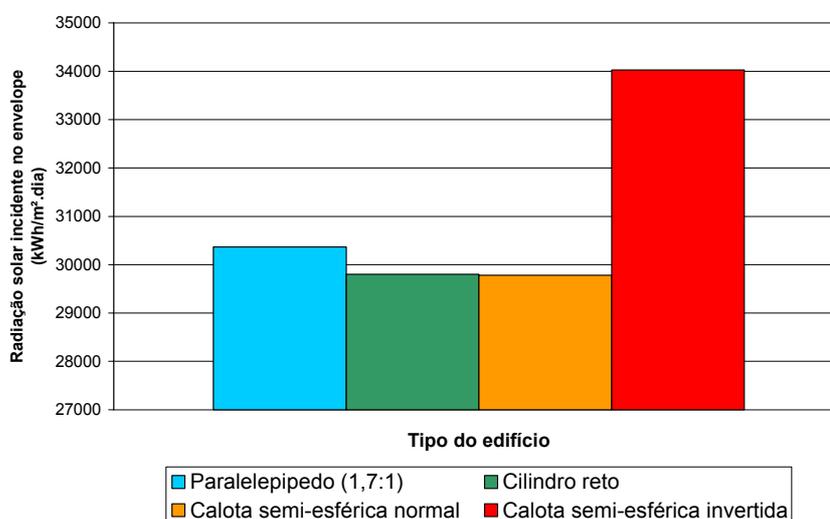


Figura 5.12 Formas dos edifícios estudados

O gráfico apresentado na figura 5.12 tem como base as informações obtidas no quadro 4.1, onde foram comparados os resultados obtidos nos estudos realizados para a radiação solar incidente nos edifícios *ideais* prismáticos (paralelepípedos), nos edifícios *ideais* cilíndricos (cilindros retos) e nos edifícios *ideais* esféricos (semi-esferas) com um volume de aproximadamente 75000 m³.

Nas condições analisadas, os edifícios *ideais* cilíndricos e esféricos construídos na posição *normal* são os que recebem as menores quantidades de radiação solar incidente em seus envelopes, quando comparados aos demais analisados. Os resultados numéricos obtidos nas simulações mostram que a diferença na quantidade de radiação solar recebida por estes edifícios é muito pequena, o que permite considerar para efeitos práticos, que estes edifícios recebam a mesma quantidade de radiação solar em seus envelopes.

Quando se comparam os edifícios *ideais* prismáticos com os cilíndricos e esféricos construídos na posição *normal*, constata-se uma pequena diferença nos valores da radiação solar recebida em seus envelopes. Nas condições analisadas, os edifícios *ideais* prismáticos recebem cerca de 2% mais radiação solar do que os cilíndricos e esféricos construídos na posição *normal*.

Entre as diversas formas estudadas, os edifícios *ideais* esféricos construídos na posição *invertida* são os que mais recebem radiação solar. Quando se comparam estes edifícios com os demais tipos estudados, os estudos realizados mostram que eles recebem cerca de 14% mais radiação solar do que os edifícios *ideais* nas formas cilíndrica e esférica na posição *normal*. Quando comparados com os edifícios *ideais* prismáticos, observa-se que eles recebem uma quantidade de radiação solar cerca de 10% maior. É necessário que os projetistas estejam cercados de bons motivos para utilizá-los em seus projetos.

CAPÍTULO 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

Após a elaboração de todas as fases deste trabalho, desde a sua etapa inicial com a pesquisa e compilação dos fundamentos teóricos pertinentes ao cálculo da radiação solar em planos genéricos e estudo da linguagem *AutoLISP*, passando pelo desenvolvimento das ferramentas computacionais para a análise da radiação solar no ambiente do *AutoCAD*, até a etapa final com a avaliação das ferramentas e da viabilidade do método proposto através de um estudo de caso, foi possível elaborar as considerações apresentadas a seguir.

Quanto às ferramentas desenvolvidas:

- podem ser úteis para os arquitetos e os engenheiros nas análises dos problemas pertinentes ao estudo da radiação solar incidente nas superfícies dos edifícios;
- no universo da arquitetura, podem ser utilizadas nos estudos relativos ao conforto térmico, ao conforto lumínico e à eficiência energética nos edifícios;
- além da arquitetura e da engenharia civil, podem ser úteis em estudos relativos à captação de energia solar, ao urbanismo, à engenharia agrícola e à agricultura;
- podem ser utilizadas nas atividades de ensino e pesquisa nas áreas envolvidas com a radiação solar incidente;
- ao integrar o conjunto de comandos residentes do *AutoCAD*, poderão ser agrupadas em barras de ferramentas específicas para as atividades de simulação, podendo ser ativadas em tempo real durante a fase de projeto do edifício.

Quanto ao método proposto:

- mostrou-se eficiente e viável. A elaboração da geometria que representa o edifício no ambiente gráfico do *AutoCAD* torna o processo de simulação uma tarefa mais simples e prática, quando comparada com os métodos utilizados nos procedimentos de simulação com a maioria dos programas simuladores disponíveis;
- possibilita análises em edifícios com envelopes mais complexos e relevos topográficos, o que normalmente não é uma tarefa simples utilizando os programas simuladores disponíveis;
- elimina a necessidade de se utilizar programas distintos para elaborar a geometria do edifício no processo de simulação, evitando a utilização de arquivos específicos para troca de informações.

Quanto aos resultados obtidos nas simulações realizadas:

- os estudos realizados no verão para os edifícios prismáticos, cilíndricos e esféricos no Rio de Janeiro, mostraram que os arquitetos e os engenheiros devem ter uma preocupação especial com as proporções da geometria do envelope. Por exemplo, quando o objetivo for minimizar a radiação solar incidente nos edifícios prismáticos de base retangular, as relações entre a largura, o comprimento e a altura podem ser tão importantes quanto a orientação do edifício;
- devido à orientação não ser uma variável a ser considerada nos estudos envolvendo os edifícios cilíndricos e esféricos, a adoção de valores apropriados para as relações λ_{cil} ou λ_{esf} , conforme o caso, pode representar uma alternativa importante para reduzir os efeitos da radiação solar nestes edifícios;

- quanto à forma dos edifícios, não foram observadas diferenças significativas nos valores da radiação solar incidente, entre as formas com volume constante estudadas. A exceção ficou por conta dos edifícios esféricos construídos na posição *invertida*, para os quais foram verificados valores para a radiação solar significativamente maiores do que nos demais;
- a determinação do edifício *ideal* representa um parâmetro interessante de projeto, pois limita os estudos e a pesquisa para a redução da radiação solar incidente no edifício. É importante não confundir o processo de minimizar a radiação incidente no envelope de um edifício nos períodos quentes com a melhoria das condições de conforto térmico, com a minimização da carga térmica e com a redução no consumo de energia, pois estes estudos envolvem outros conjuntos de variáveis e fenômenos a serem considerados e analisados;
- permitiram esclarecer alguns problemas enfrentados pelos engenheiros da área agrícola, na elaboração do projeto e na operação dos sistemas de irrigação, em determinadas regiões e determinados meses do ano. O estudo realizado mostrou os erros cometidos pelos engenheiros da área agrícola no dimensionamento da quantidade de água requerida nos sistemas de irrigação, ao desprezarem a influência da orientação e da inclinação predominantes dos terrenos a serem cultivados.

Quanto à hipótese adotada:

- os estudos realizados utilizando as ferramentas desenvolvidas comprovaram a hipótese adotada nesta pesquisa. É possível e viável realizar simulações e análises do comportamento da radiação solar incidente nas superfícies dos edifícios no ambiente CAD, onde normalmente é desenvolvido o projeto do edifício.

6.2 SUGESTÕES

Ao final deste trabalho, são apresentadas as seguintes sugestões:

Relativa às ferramentas desenvolvidas:

- que as ferramentas apresentadas possam ser aprimoradas, através da implementação de algoritmos mais elaborados, permitindo reduzir as limitações existentes nas versões desenvolvidas neste trabalho, tais como problemas relativos ao sombreamento e inter-reflexões.

Relativa ao método proposto:

- a implementação nas universidades, institutos de pesquisa e entidades privadas, de uma linha de pesquisa para o desenvolvimento de ferramentas destinadas à simulação de outros parâmetros importantes para as condições de conforto e eficiência energética nos edifícios, utilizando ambientes de projeto (CAD).

Relativa aos resultados obtidos nas simulações:

- estudar as relações proporcionais para outras formas de edifícios e caracterizar os edifícios *ideais* para outros períodos do ano e outras regiões.

6.3 EXPECTATIVAS

As expectativas mais importantes são as seguintes:

- tornar o processo de simulação no ambiente CAD mais abrangente;
- tornar o uso da simulação uma ferramenta de projeto realmente acessível aos arquitetos e aos engenheiros, possibilitando projetos de edifícios mais confortáveis e mais eficientes nos gastos de energia; através da utilização do método proposto e do desenvolvimento de ferramentas para simulação no ambiente CAD;

- colaborar com os arquitetos e os engenheiros, no sentido de facilitar as análises da radiação solar incidente nos edifícios, dando continuidade ao trabalho iniciado pelo Autor em 2001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 30/08/2007.

ATHIENITIS, A.K. Building Simulation in Mathematical Programming Environment. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE 1995, Madison. **Anais...** IBPSA: International Building Performance Simulation Association, 1995 p. 71-76.

AUTODESK. **AutoLISP Reference**. New York: Autodesk, 1993. 266p.

BAZJANAC, W. Acquisition of Building Geometry in the Simulation of Energy Performance. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE 2001, Rio de Janeiro. **Anais...** IBPSA: International Building Performance Simulation Association, 2001 p. 305-311.

BAZJANAC, W. Improving Building Energy Performance Simulation With Software Interoperability. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE 2003, Eindhoven. **Anais...** IBPSA: International Building Performance Simulation Association, 2003 p. 87-92.

CASTANHEIRA, R.G. **Radiação Solar Incidente em Planos Inclinados, Fachadas e Telhados no Rio de Janeiro**. 2001. 153f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CASTANHEIRA, R.G.; CARVALHO, D.F. Análise da Influência da Inclinação e da Orientação do Terreno na Estimativa da Evapotranspiração. In: XXXI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Salvador. **Anais...** Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2002, CD.

CASTANHEIRA, R.G.; COSTA, C.E.S; ADEGAS, M.G.; KRAUSE, C.B. Evaluation of sunny and shaded periods on tilted surfaces Through a computer program. In: PLEA 2002, Toulouse. **Anais...** Toulouse: Groupe de Recherche Environment Conception, 2002a. p. 131-134.

CENTRE D'ENERGETIQUE – CASAMO CLIM . Manuel d'utilisation 1989, IBM et Compatibles. Paris: École des Mines de Paris, 1980. 75p.

COLLARES-PEREIRA, M., RABL, A. The average distribution of solar radiation correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. **Solar Energy** n.22, p.155-164, 1979.

CORBELLA, O.D. Dados Consolidados de Energia Solar Global Diária em Plano Horizontal, para a cidade do Rio de Janeiro. **Cadernos de Geociências do IBGE**, Rio de Janeiro, n.16, p. 131-168, out. /dez. 1995.

CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em Busca de uma Arquitetura Sustentável para os Trópicos** . Rio de Janeiro: Editora Revan, 2003. 286p.

COSTA, M. A. F. **Cálculo Numérico com Pascal**. Lisboa: Escobar Editora, 1993. 404p.

CRAWLEY, D. et al. ENERGYPLUS, a New Generation Building Energy Simulation Program. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE 1999, Kyoto. **Anais...** IBPSA: International Building Performance Simulation Association, 1999.

CRESESB. Disponível em: < www.cresesb.cepel.br/sundatn.htm>. Acesso em 30/06/2004.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A.. **Solar Engineering of Thermal Processes**. New York: John Wiley & Sons, 1980. 761p.

EERE - U.S. Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy Disponível em: <<http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus>>. Acesso em 10/02/2007.

GESTE, Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos – U.F.R.G.S. Disponível em: <<http://www.solar.ufrgs.br/>>. Acesso em 20/09/2005.

GHISI, E.; TINKER, J. Optimizing Energy Consumption as a Function of Window Area and Room Size. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE 2001, Rio de Janeiro. **Anais...** IBPSA: International Building Performance Simulation Association, 2001 p. 13-14.

GRAU, K., WITTCHEN, K.B. Building Design and CAD Integration. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE 1999, Kyoto. **Anais...** IBPSA: International Building Performance Simulation Association, 1999 p. 1157-1164.

HERTZ, J. B. **Ecotécnicas em Arquitetura – Como Projetar nos Trópicos Úmidos do Brasil**. São Paulo: Pioneira, 1998. 125p.

HOBBS, D., MORBITZER, C., SPIRES, B., STRACHAM, P., WEBSTER, J. Experience of Using Building Simulation Within the Design Process of an Architectural Practice. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE 2003, Eindhoven. **Anais...** IBPSA: International Building Performance Simulation Association, 2003 p. 481-498.

HUDSON G., UNDERWOOD C.P. A simple building modeling procedure for Matlab/Simulink. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE 1999, Kyoto. **Anais...** IBPSA: International Building Performance Simulation Association, 1999 p. 262-268. In: International IBPSA Conference 1999, Kyoto. **Anais...** IBPSA: International Building Performance Simulation Association, 1999 p. 777-783.

KAROLA, A., LAHTELA, H., HÄNNINEN, R., HITCHCOCK, R., Chen, Q., DAJKA S., HAGSTRÖM, K. BPro COM -Server – Interoperability Between Software Tools Using Industry Foundation Classes. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE 2001, Rio de Janeiro. **Anais...** IBPSA: International Building Performance Simulation Association, 2001 p. 747-753.

KOENIGSBERGER, O.H.; INGERSOL, T.G.; MAYHEW, A.; SZOKOLAY, S.V. **Viviendas y Edificios em Zonas Cálidas y Tropicales**. Madri: Paraninfo, 1997. 328p.

MATSUMOTO, E. Y. **AutoLISP 2002 Linguagem de Programação do AutoCAD**. São Paulo: Editora Érica, 2001. 180p.

McELROY L., CLARKE J. A. Embedding Simulation Within Energy Sector Business. . In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE 1999, Kyoto. **Anais...** IBPSA: International Building Performance Simulation Association, 1999 p. 262-268. In: International IBPSA Conference 1999, Kyoto. **Anais...** IBPSA: International Building Performance Simulation Association, 1999 p. 1197-1202.

MENDES N., OLIVEIRA, G. H. C., ARAÚJO H. X., COELHO L S. A MATLAB-Based Simulation Tool for Building Thermal Performance Analysis. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE 2003, Eindhoven. **Anais...** IBPSA: International Building Performance Simulation Association, 2003 p. 855-862.

MENDES, N. LAMBERTS, R. NETO, J.A.C. Building Simulation in Brazil. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE 2001, Rio de Janeiro. **Anais...** IBPSA: International Building Performance Simulation Association, 2001 p. 3-14.

MORBITZER, C., STRACHAM, P., WEBSTER, J., SPIRES, B., CAFFERTY, D. Integration of Building Simulation into the Design Process of an Architecture Practice. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE 2001, Rio de Janeiro. **Anais...** IBPSA: International Building Performance Simulation Association, 2001 p. 697-704.

NASA-EARTH SCIENCE ENTERPRISE PROGRAM. Surface meteorology and solar data set. Disponível em: <<http://shire.larc.nasa.gov/sse>>. Acesso em 30/06/2004.

NOEL, J., ROUX, J.J., SCHNEIDER, P.S. CODYBA a Design Tool for Buildings Performance Simulation. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE 2001, Rio de Janeiro. **Anais...** IBPSA: International Building Performance Simulation Association, 2001 p.13-15.

NREL-National Renewable Energy Laboratory. *Energy -10*. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/buildings/energy10.html>>. Acesso em 20/06/2006.

NYTSCH-GEUSEN, C., KLEMPIN, C., VOIGT, J. N. V., RÄDLER J. Integration of CAAD, Thermal Building Simulation and CFD by Using the IFC Data Exchange Format. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE 2003, Eindhoven. **Anais...** IBPSA: International Building Performance Simulation Association, 2003 p. 967-973.

OLGYAY, V. **Design With Climate**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1963. 190p.

PELLETRET, R, KEILHOZ. W. Coupling CAD Tools and Buildings Simulation Evaluators. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE 1999, Kyoto. **Anais...** IBPSA: International Building Performance Simulation Association, 1999 p. 1197-1202.

RANGEL, A.P. **Projeções Cotadas**. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1981. 154p.

RIVERO, R. **Arquitetura e Clima: acondicionamento térmico natural**. Porto Alegre: D.C. Luzatto Editores, 1985. 232p.

SZOKOLAY, S.V. **Solar Geometry**. Queensland: The University of Queensland Printery, 1996. 56p.

TAPLIN, P. Putting Interactive CAD Systems in Perspective. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE 1993, Adelaide. **Anais...** IBPSA: International Building Performance Simulation Association, 1993 p. 63-69.

ZIMMERMANN, G. Efficient Creation of Building Performance Simulators Using Automatic Code Generation. **Energy and Buildings**, v. 1, n. 34, p. 973-983, 2002.

ANEXO A - Conceitos Básicos

Neste anexo são apresentados os princípios teóricos e conceitos utilizados na elaboração dos algoritmos utilizados nas ferramentas computacionais desenvolvidas para a realização deste trabalho.

A.1. MEDIDA DO TEMPO

A.1.1. Hora solar verdadeira local (TST – Local True Solar Time)

É definida através do posicionamento real do Sol. O meio-dia solar ou meio-dia no horário solar verdadeiro local corresponde ao momento da passagem do Sol sobre o meridiano local do observador.

A.1.2. Hora média local (LMT – Local Mean Time)

É definida para fins práticos. Considera um Sol fictício e um dia solar médio dividido perfeitamente em 24 horas. O meio-dia no horário médio local corresponde à passagem deste Sol fictício no meridiano local. Devido ao fato de que uma rotação completa da Terra deve corresponder a um período de 24 horas, a hora média local aumenta uma hora a cada 15° de longitude leste e diminui de uma hora a cada 15° de longitude oeste.

A.1.3. Hora universal (UT – Universal Time)

Conhecida por hora média de Greenwich (*GMT- Greenwich Mean Time*). Também é tratada por *Hora Zulu (Z)*. É a hora média local medida no meridiano de *Greenwich*.

A.1.4. Equação do tempo

A equação do tempo fornece um fator de correção (*E*) para as perturbações que ocorrem na taxa de rotação da Terra.

Pode ser estimado através das equações A.1 e A.2, propostas por *Whillier* e obtidas em Duffie e Beckman (1980).

$$E = 9,87.\text{sen}(2B) - 7,53.\text{cos}(B) - 1,5.\text{sen}B \quad [\text{A.1}]$$

$$B = \frac{360^\circ(nd - 81)}{364} \quad [\text{A.2}]$$

A.1.5. Hora padrão local (LST – Local Standard Time)

É a hora fornecida pelo relógio, tratada por *Hora Civil Local (HCL)* ou *Hora Legal*. Em princípio, é a hora média local tomada no meridiano que define a hora padrão para o local do estudo. Este meridiano que define a chamada *zona do tempo* ou *fuso horário local* está distante de um valor inteiro e múltiplo de 15° do meridiano de Greenwich. Não esquecer de considerar o horário de verão local.

A relação existente entre a hora fornecida pelo relógio e a hora solar pode ser estimada pela equação A.3, obtida em Duffie e Beckman (1980).

$$\text{Solar} = \text{Padrão} + 4.(\text{LongitudePadrão} - \text{LongitudeLocal}) + E \quad [\text{A.3}]$$

O cálculo da relação entre a hora solar e a hora do relógio pode ser realizado utilizando o programa *Sol* (CASTANHEIRA et al., 2002).

Para o Brasil, devem ser considerados os seguintes valores para a *longitude padrão da hora* (zona do tempo):

- Fernando de Noronha => -30° (zona do tempo= -2);
- Regiões Nordeste, Sudeste e Sul, estados de Goiás e Amapá e parte leste do estado do Pará => -45° (zona do tempo= -3);
- Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Rondônia, Amazônia, Roraima e a região oeste do Pará => -60° (zona do tempo= -4);
- Acre => -75° (zona do tempo= -5).

A.2. ELEMENTOS DE GEOMETRIA SOLAR

A.2.1. Declinação solar

A declinação mostrada na figura A.1, representa o ângulo definido entre plano do equador e o plano de translação da terra (*eclíptica*). Pode ser calculada através da equação A.4, proposta por Cooper e obtida em Duffie e Beckman (1980).

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \text{sen}\left[360^\circ \cdot \left(\frac{284 + nd}{365}\right)\right] \quad [\text{A.4}]$$

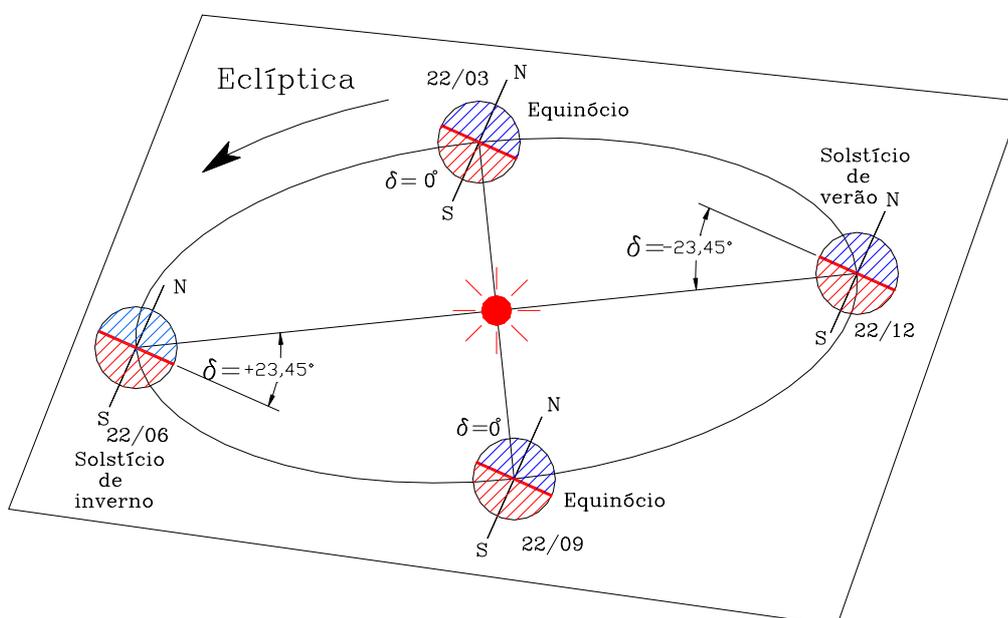


Figura A.1 A translação da Terra e a declinação solar

A.2.2. Ângulo horário

É o ângulo definido pelo raio solar em um determinado instante e no instante em que passa sobre o meridiano local (*meio-dia solar*). É considerado *positivo* no período da tarde e *negativo* no período da manhã (figura A.2). Considerando que a velocidade angular do Sol no movimento sobre a sua trajetória seja: $\frac{360^\circ}{24 \text{ horas}} = \frac{15^\circ}{\text{hora}}$, o valor do ângulo horário pode ser calculado através da equação A.5.

$$\omega = (t - 12) \times 15^\circ \quad [\text{A.5}]$$

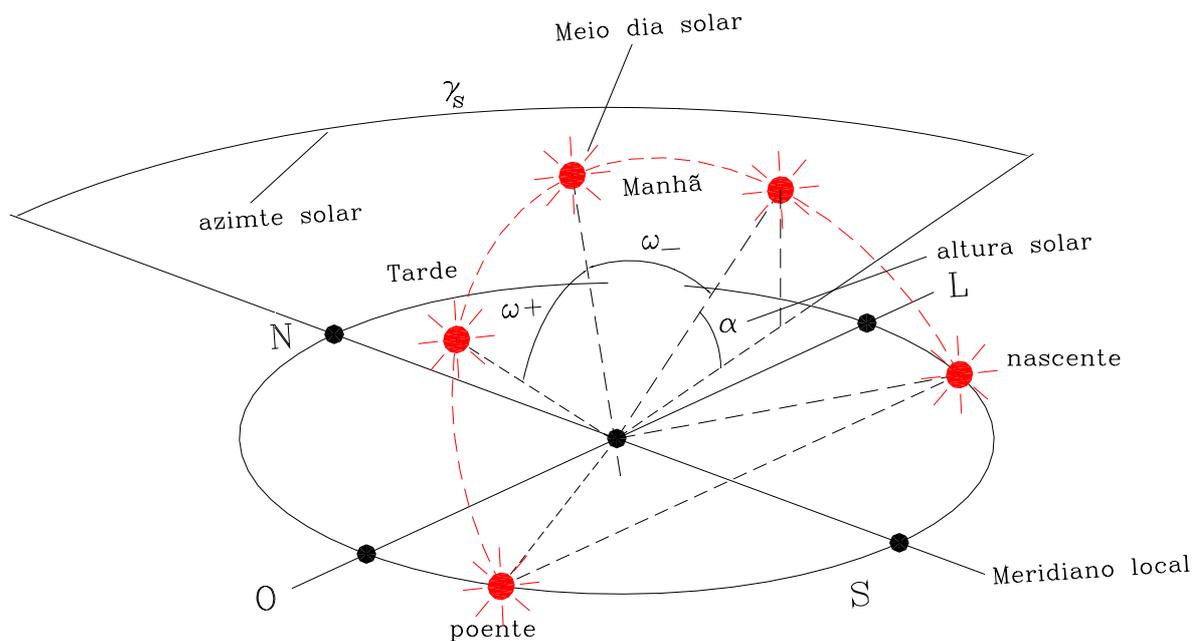


Figura A.2 Posição do Sol

A.2.3. Altura solar

Tratada também por elevação do Sol, é o ângulo definido entre o raio solar e sua projeção ortogonal no plano horizontal (figura A.2). Pode ser calculada através da equação A.6, obtida em Szokolay (1996).

$$\text{sen } \alpha = \text{sen } \delta . \text{sen } \phi + \text{cos } \delta . \text{cos } \phi . \text{cos } \omega \quad [\text{A.6}]$$

O valor da altura solar pode ser calculado com o programa *Sol*.

A.2.4. Azimute solar

É definido como o ângulo formado pela projeção do raio solar sobre o plano horizontal e o eixo norte-sul (figura A.2).

A convenção adotada neste trabalho tem como origem o norte verdadeiro e considera o sentido *horário* como *positivo* (figura A.3).

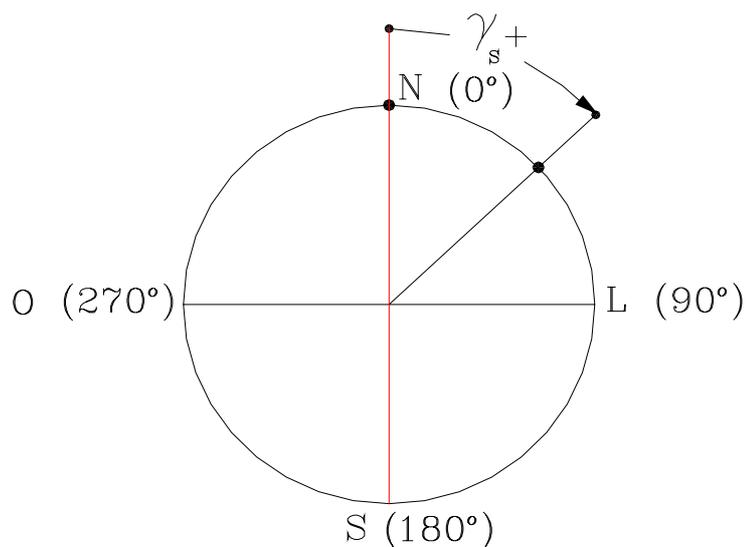


Figura A.3 Convenção adotada para o azimute solar

O azimute solar pode ser determinado através das equações A.7 e A.8, obtidas em Szokolay (1996).

$$\text{sen} \gamma_S = \frac{\cos \delta \cdot \text{sen} \omega}{\cos \alpha} \quad [\text{A.7}]$$

$$\cos \gamma_S = \frac{\text{sen} \alpha \cdot \text{sen} \phi - \text{sen} \delta}{\cos \alpha \cdot \cos \phi} \quad [\text{A.8}]$$

As equações A.7 e A.8 não fornecem valores numéricos para o azimute solar compatíveis com a convenção adotada neste trabalho (figura A.3). Para o cálculo do azimute solar e a sua adequação à convenção adotada, deve-se proceder da seguinte forma:

- através da equação A.7, obtém-se o sinal do $\text{sen} \gamma_S$ e o valor numérico de γ_S ;
- através da equação A.8, obtém-se o sinal do $\cos \gamma_S$;
- o valor de γ_S , obtido através da equação A.7, deve ser corrigido para a convenção adotada, utilizando-se a tabela A.1.

Tabela A.1 Correção do Azimute Solar para a convenção adotada

$\text{sen } \gamma_s$	$\text{cos } \gamma_s$	correção adotada
+	+	$180^\circ + \gamma_s$
-	-	$ \gamma_s $
+	-	$360^\circ - \gamma_s$
-	+	$180^\circ + \gamma_s$

O valor do azimute solar, na convenção adotada, pode ser calculado utilizando o programa *Sol*.

A.2.5. Ângulo de Incidência

É definido como o ângulo subentendido entre o raio solar e a direção normal ao plano considerado (figura A.4). É calculado através das equações A.9, A.10, A.11 e A.12, obtidas a partir da equação proposta por *Bendford* e *Block*, apresentada em *Duffie e Beckman* (1980).

$$\cos \theta = A + B \cdot \cos \omega + C \cdot \text{sen } \omega \quad [\text{A.9}]$$

$$A = \text{sen } \delta \cdot \text{sen } \phi \cdot \text{cos } \beta - \text{sen } \delta \cdot \text{cos } \phi \cdot \text{sen } \beta \cdot \text{cos } \gamma \quad [\text{A.10}]$$

$$B = \text{cos } \delta \cdot \text{cos } \phi \cdot \text{cos } \beta + \text{cos } \delta \cdot \text{sen } \phi \cdot \text{sen } \beta \cdot \text{cos } \gamma \quad [\text{A.11}]$$

$$C = \text{cos } \delta \cdot \text{sen } \beta \cdot \text{sen } \gamma \quad [\text{A.12}]$$

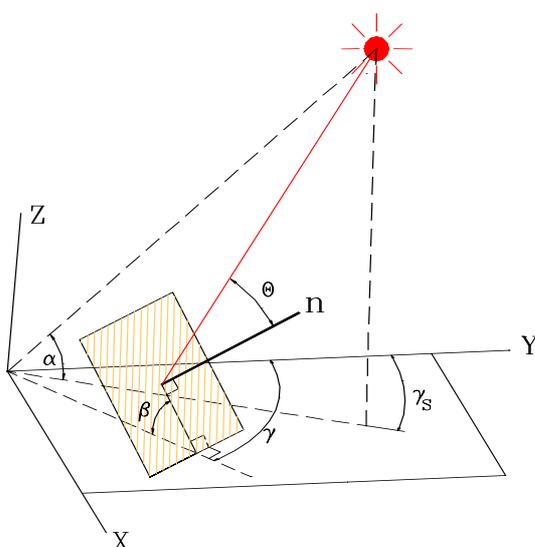


Figura A.4 Ângulo de incidência

O ângulo de incidência pode ser calculado através da utilização do programa *Sol*.

O ângulo de incidência tem grande importância nos estudos envolvendo os seguintes tópicos:

- cálculo do valor da radiação solar direta incidente nas superfícies;
- estudos das propriedades óticas das superfícies;
- estudos dos períodos ensolarados e sombreados nas superfícies.

A.3. PERÍODOS ENSOLARADOS E SOMBREADOS

A.3.1. Conceitos básicos

Entende-se por período *ensolarado* em um plano, o período em que o mesmo recebe radiação solar *direta* na face considerada. Chama-se *transição*, o instante em que ocorre a troca de um período sombreado por um ensolarado ou vice-versa.

A figura A.5 mostra a correlação existente entre estes períodos e o ângulo de incidência.

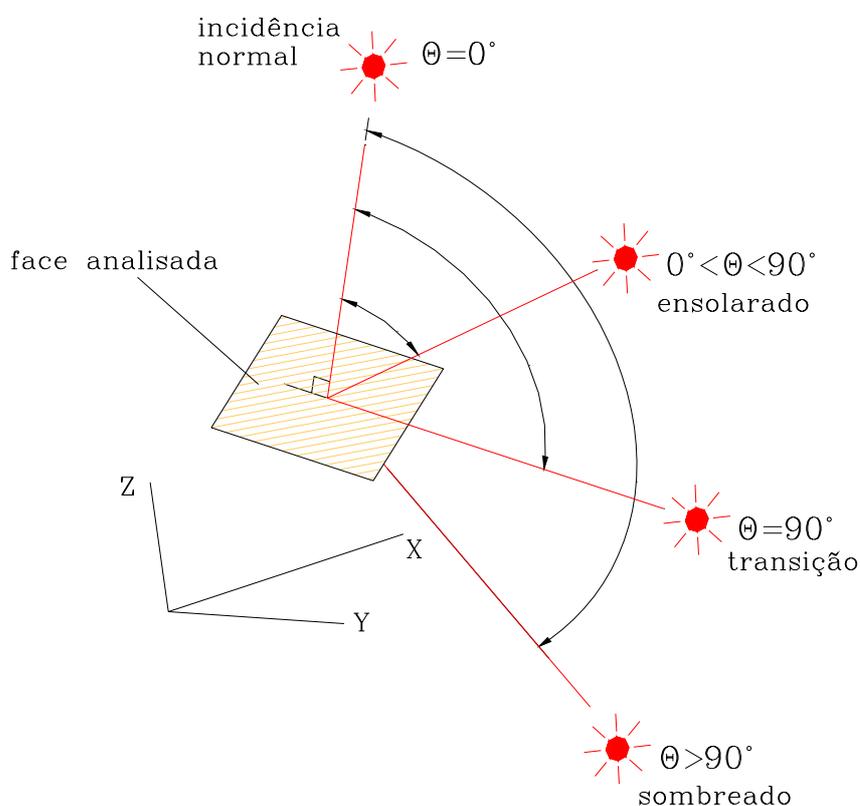


Figura A.5 Períodos sombreados e ensolarados

Com base na figura A.5, pode-se concluir que:

- nos períodos ensolarados, o ângulo de incidência varia de 0° a 90° .

Tem-se: $\cos \theta > 0 \Rightarrow A + B \cdot \cos \omega + C \cdot \sin \omega > 0$;

- nos períodos sombreados, o ângulo de incidência varia de 90° a 180°

Tem-se: $\cos \theta < 0 \Rightarrow A + B \cdot \cos \omega + C \cdot \sin \omega < 0$;

- quando o ângulo de incidência é igual 0° , tem-se a *incidência normal*, situação especialmente importante nos estudos envolvendo a incidência de radiação solar;
- os períodos de transição no plano horizontal, são tratados por *nascente* e *poente* e definem o período de duração do dia. Nos planos receptores genéricos estes períodos são tratados por *nascentes* e *poentes aparentes*. Em ambos os casos, podem ser determinados através do cálculo das raízes da equação A.13.

$$A + B \cdot \cos \omega + C \cdot \sin \omega = 0 \quad [\text{A.13}]$$

A.3.2. Insolação no plano horizontal (nascente, poente e duração do dia)

Para o plano horizontal, a equação A.13 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega = 0 \quad [\text{A.14}]$$

Resolvendo a equação A.14, tem-se: $\cos \omega = -\tan \phi \cdot \tan \delta$, então:

$$\omega = \cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad [\text{A.15}]$$

Como o ângulo horário deve ser positivo no período da tarde, o ângulo horário relativo ao poente pode ser calculado através da equação A.16.

$$\omega_P = +\omega = \cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad [\text{A.16}]$$

O ângulo horário no período da manhã é considerado negativo, então o ângulo horário relativo ao nascente pode ser calculado através da equação A.17.

$$\omega_N = -\omega = -\omega_P = -\cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad [\text{A.17}]$$

A *hora solar* correspondente ao nascente é calculada através da equação A.18.

$$t_N = 12 - \frac{\omega_P}{15^\circ} \quad [\text{A.18}]$$

A hora solar correspondente ao poente é calculada através da equação A.19.

$$t_P = 12 + \frac{\omega_P}{15^\circ} \quad [\text{A.19}]$$

O número de horas do período ensolarado no plano horizontal (duração do dia) é calculado pela equação A.20.

$$H_S = t_P - t_N = \frac{2}{15^\circ} \cdot \cos^{-1}(-\text{tg}\phi \cdot \text{tg}\delta) \quad [\text{A.20}]$$

As horas correspondentes ao nascente e ao poente e a duração do dia podem ser calculadas utilizando o programa *Sol*.

A.3.3. Insolação nos planos genéricos (nascentes e poentes aparentes)

Na maioria dos casos envolvendo planos receptores com inclinações e orientações genéricas, o início e o fim dos períodos de insolação não estão de acordo com os conceitos de nascente e o poente relativos ao plano horizontal.

A determinação dos limites que definem o início e o fim de um período ensolarado na face do plano receptor é realizada determinando as raízes da equação A.13. A solução analítica desta equação trigonométrica não é uma tarefa simples, razão pela qual recorre-se à uma solução numérica²⁴, na qual o objetivo é pesquisar as raízes da equação no intervalo (ω_N, ω_P) , definido pelos ângulos horários correspondentes ao nascente e ao poente do dia. A matemática mostra que três casos distintos devem ser analisados.

²⁴ O método utilizado no programa *Sol* é o da bisseção numérica (COSTA, 1993).

A.3.3.1. Caso 1: não existem raízes reais no intervalo pesquisado (ω_N, ω_P)

Neste caso não ocorrem *nascentes e poentes aparentes* no intervalo pesquisado e duas situações devem ser analisadas:

- se $A + B \cdot \cos \omega_N + C \cdot \sin \omega_N > 0$, o plano receptor estará ensolarado durante o dia inteiro (100% de insolação);
- se $A + B \cdot \cos \omega_N + C \cdot \sin \omega_N < 0$, o plano receptor estará na sombra durante o dia inteiro (100 % de sombra).

A figura A.6 mostra os resultados obtidos para um estudo realizado no Rio de Janeiro, no dia 15 de junho. As fachadas estão orientadas para o norte e para o sul. Os resultados foram obtidos através da utilização do programa *Aparentes* (CASTANHEIRA, 2001).

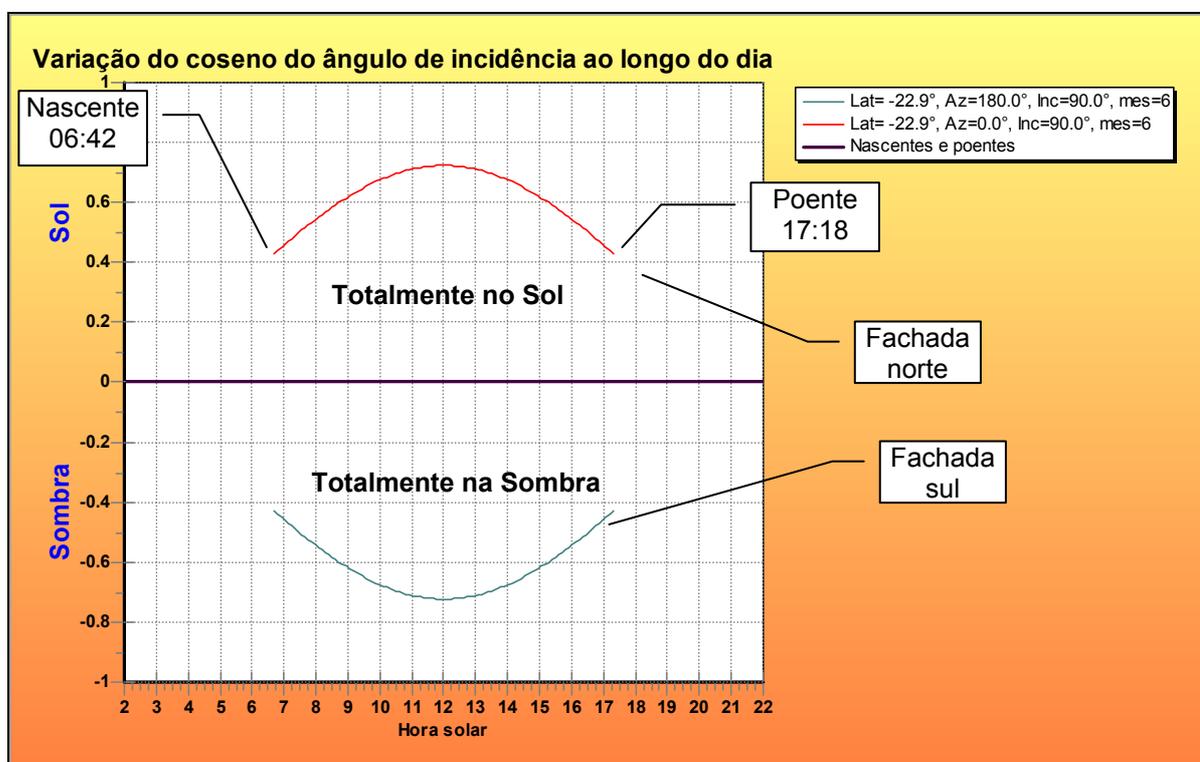


Figura A.6 Não existem raízes reais no intervalo (ω_N, ω_P)

A.3.3.2. Caso 2: existem duas raízes reais e distintas no intervalo (ω_N, ω_P)

Neste caso ocorrem nascentes e poentes aparentes no dia do estudo e duas situações devem ser analisadas:

- se $A + B \cdot \cos \omega_N + C \cdot \sin \omega_N > 0$, o plano receptor estará ensolarado e a primeira raiz definirá o início de um período sombreado (*poente aparente*). Durante o intervalo interno definido pelas raízes, o plano estará sombreado e a segunda raiz definirá o início de um segundo período ensolarado (*nascente aparente*);
- se $A + B \cdot \cos \omega_N + C \cdot \sin \omega_N < 0$, o plano receptor estará na sombra e a primeira raiz definirá o início de um período ensolarado (*nascente aparente*). Durante o intervalo interno definido pelas raízes, o plano estará ensolarado e a segunda raiz definirá o início de um segundo período de sombra (*poente aparente*).

A figura A.7 mostra os resultados obtidos em um estudo de duas fachadas orientadas para norte e para o sul. O estudo foi realizado no Rio de Janeiro, no dia 15 de fevereiro, utilizando o programa *Aparentes*.

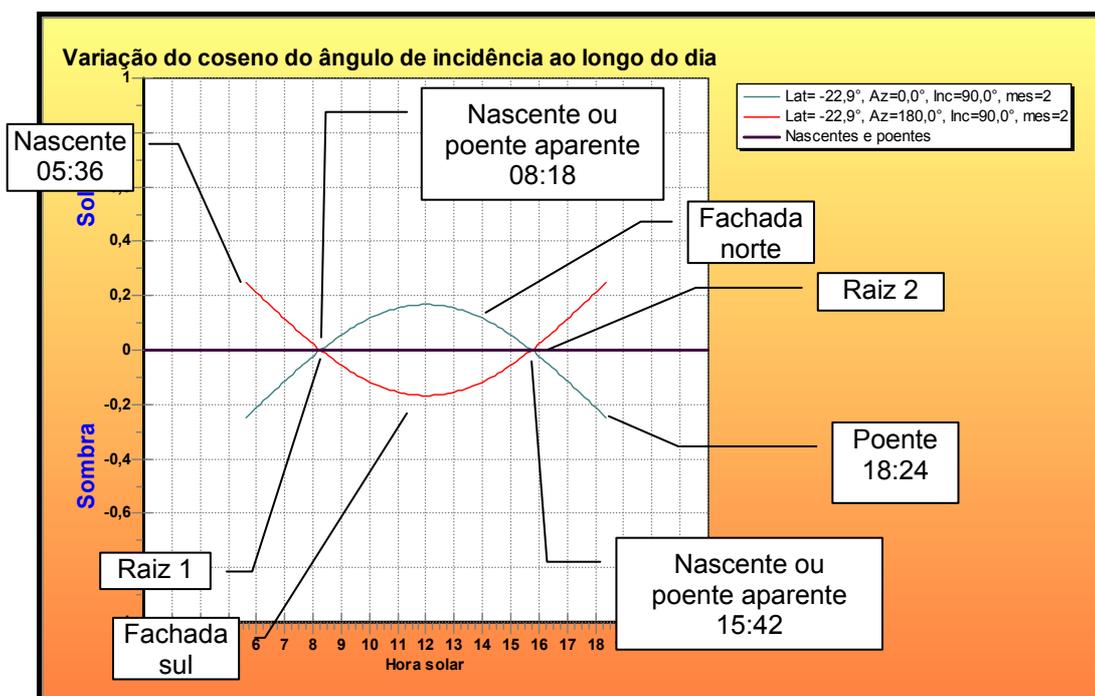


Figura A.7 Duas raízes distintas no intervalo (ω_N, ω_P)

A.3.3.3. Caso 3: existe uma só raiz real no intervalo (ω_N, ω_P)

Sob o ponto de vista prático, existirá somente um nascente ou um poente aparente no intervalo analisado e duas situações devem ser consideradas:

- se $A + B \cdot \cos \omega_N + C \cdot \sin \omega_N > 0$, o plano estará em um período ensolarado e a raiz obtida definirá o início de um período sombreado (*poente aparente*). O plano permanecerá sombreado até o final do dia;
- se $A + B \cdot \cos \omega_N + C \cdot \sin \omega_N < 0$, o plano estará na sombra e a raiz definirá o início de um período ensolarado (*nascente aparente*). O plano permanecerá ensolarado até o fim do dia.

A figura A.8 mostra o resultado de um estudo realizado no Rio de Janeiro, em 22 de março, para duas fachadas orientadas para o leste e para o oeste. Foi utilizado o programa computacional *Aparentes*.

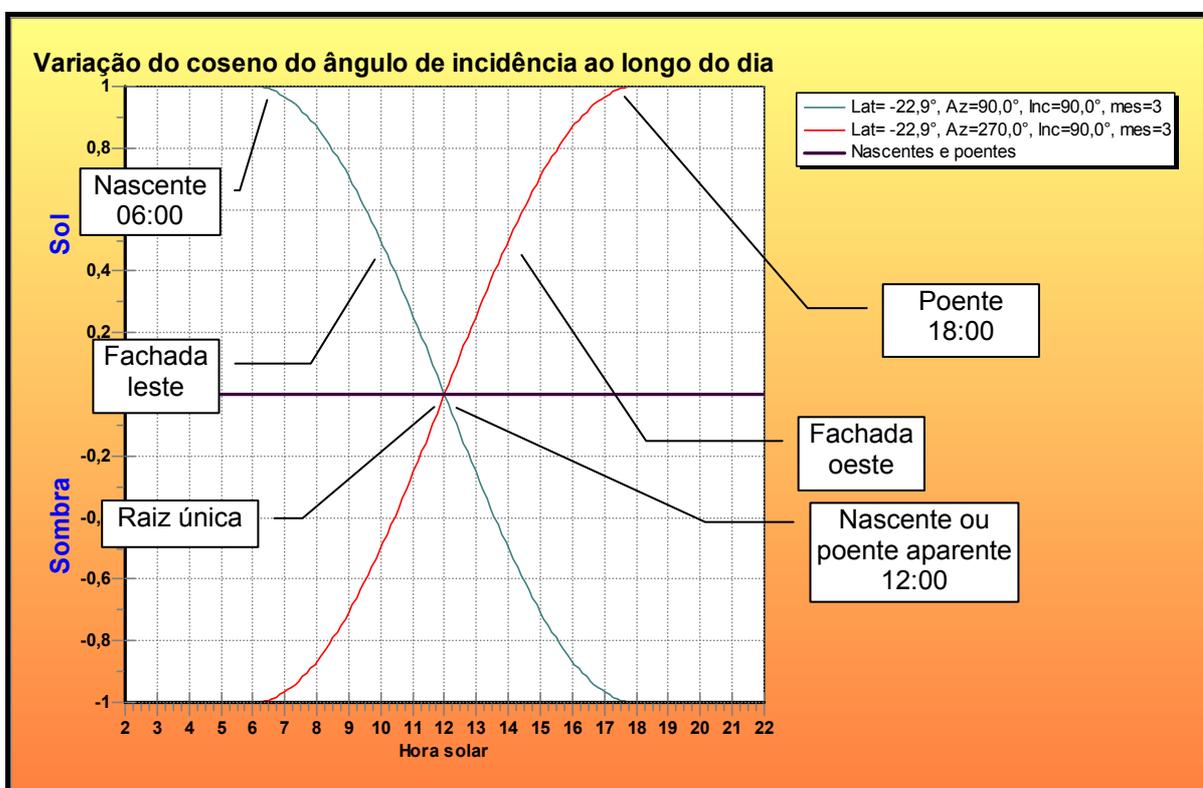


Figura A.8 Uma só raiz (caso prático) no intervalo (ω_N, ω_P)

Sob o ponto de vista matemático ocorre um caso interessante nas fachadas orientadas para o sul e para o norte. Nestas fachadas podem ocorrer *instantes ensolarados* ou *sombreados* em dias *equidistantes* em relação ao *solstício de verão*.

A figura A.9 mostra o resultado de um estudo realizado para duas fachadas orientadas para o norte e para o sul. O estudo foi realizado no Rio de Janeiro, nos dias 12 de dezembro e 1 de janeiro, equidistantes em relação ao dia 22 de dezembro. Conforme mostra a figura A.9, nestes dias, ao *meio-dia solar*, as fachadas orientadas para o sul experimentam um instante sombreado enquanto as fachadas orientadas para o norte experimentam um instante ensolarado.

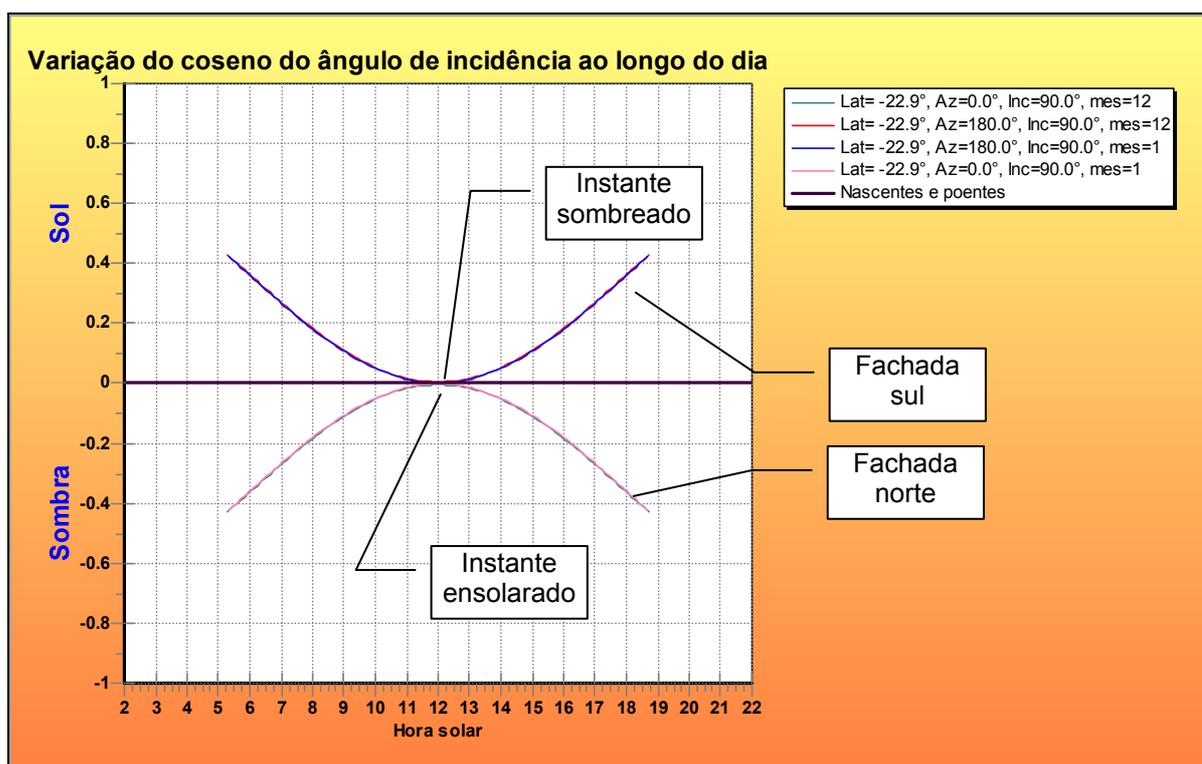


Figura A.9 Instantes ensolarados e sombreados nas fachadas N e S

As horas correspondentes aos nascentes e aos poentes aparentes para os planos genéricos e a duração dos períodos ensolarados e sombreados ao longo do dia do estudo podem ser determinadas utilizando o programa *Sol*.

A.4. RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE EM PLANOS RECEPTORES GENÉRICOS

Nesta etapa serão apresentados os princípios teóricos que conduzem à transposição dos valores da radiação solar incidente no plano *horizontal* para os planos receptores com orientações e inclinações *genéricas*. A teoria adotada foi proposta por *Hottler* e apresentada em Duffie e Beckman (1980).

A.4.1. Radiação solar extraterrestre

A radiação solar extraterrestre é a quantidade de energia incidente sobre um plano horizontal situado fora da atmosfera terrestre, paralelo ao plano horizontal situado na superfície terrestre, onde se encontra o observador.

O valor da radiação solar extraterrestre depende do intervalo de tempo considerado, do dia do ano e da latitude do local do estudo. Para os intervalos de uma hora, é denominada *horária*. Ao longo de um dia, é denominada *diária*.

A radiação solar extraterrestre *diária* pode ser estimada, através da equação A.21, obtida em Duffie e Beckman (1980).

$$H_0 = \frac{24}{\pi} \cdot 1,353 \cdot [1 + 0,033 \cdot \cos(\frac{360^\circ \cdot n}{365})] \cdot (\frac{2 \cdot \pi \cdot \omega_p}{360^\circ} \cdot \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \text{sen} \omega_p)$$

[A.21]

Para os períodos mensais é freqüente se utilizar a *radiação média diária mensal*, que representa a média dos valores da radiação solar extraterrestre diária no mês considerado.

Adota-se, como *dia médio* do mês, o dia no qual a radiação extraterrestre diária mais se aproxima da radiação extraterrestre média diária mensal ($H_0 \cong \bar{H}_0$). Na prática, calcula-se a radiação solar extraterrestre média diária mensal utilizando a equação A.21 com parâmetros geométricos relativos ao dia médio do mês.

Os valores para a radiação solar extraterrestre média diária mensal também podem ser obtidos diretamente através de medições.

A tabela A.2 apresenta os valores para o dia médio de cada mês e os valores para a radiação solar extraterrestre média diária mensal para uma latitude igual a $-22,91^\circ$ e longitude $-43,2^\circ$ (Rio de Janeiro).

Tabela A.2 Dia médio e radiação solar extraterrestre para o Rio de Janeiro

Mês	Dia médio (DUFFIE e BECKMAN,1980)	Radiação solar extraterrestre média diária mensal (NASA, 2004) (kWh/m ² .dia)
Janeiro	17	11,60
Fevereiro	16	11,00
Março	16	9,88
Abril	15	8,36
Maio	15	7,00
Junho	11	6,31
Julho	17	6,57
Agosto	16	7,68
Setembro	15	9,14
Outubro	15	10,40
Novembro	14	11,30
Dezembro	10	11,70

A.4.2. Coeficiente de transparência da atmosfera (KT).

O coeficiente de transparência atmosférica, também conhecido por índice de claridade, é definido como a razão entre a radiação total ou global incidente em um plano horizontal na superfície da terra e a radiação incidente em um plano paralelo situado fora da atmosfera (extraterrestre). Conforme o estudo, pode ser tratado por instantâneo, horário, diário ou mensal.

Valores para K_T próximos de 0 (zero) indicam uma atmosfera exercendo um forte bloqueio à radiação solar, enquanto valores próximos a 1 (um) representam uma atmosfera que atenua muito pouco a radiação solar

Os valores instantâneos e horários de K_T são muito influenciados pelo estado da atmosfera. A tarefa de representá-los nos modelos matemáticos não é simples e para minimizar a influência das variações atmosféricas, adota-se um coeficiente de transparência médio mensal, calculado ou obtido através de medições.

A tabela A.3 mostra os valores do coeficiente de transparência médio mensal para o Rio de Janeiro (NASA, 2004).

Tabela A. 3 Valores para a transparência média mensal

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média anual
0,45	0,48	0,49	0,50	0,49	0,54	0,52	0,52	0,42	0,43	0,45	0,42	0,47

Para calcular o coeficiente de transparência médio mensal utiliza-se a equação A.22, obtida em Duffie e Beckman (1980).

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad [A.22]$$

Os valores da radiação solar média diária mensal incidente no plano horizontal podem ser obtidos, a partir de informações provenientes de institutos de pesquisa (CRESESB, 2004), de estações meteorológicas e satélites (NASA, 2004) ou ainda estimados através de fórmulas e correlações empíricas.

A tabela A.4 apresenta os valores da radiação solar média diária mensal incidente no plano horizontal para o Rio de Janeiro obtidos em Corbella (1995).

Tabela A.4 Radiação solar diária média mensal no plano horizontal

Mês	Radiação solar média diária incidente no plano horizontal (\bar{H})
Janeiro	5,766
Fevereiro	5,937
Março	5,304
Abril	4,244
Mai	3,629
Junho	3,386
Julho	3,525
Agosto	3,911
Setembro	4,015
Outubro	4,851
Novembro	5,407
Dezembro	5,276

A.4.3. Componente difusa da radiação solar global

A radiação solar difusa é aquela que chega ao plano receptor após um processo de espalhamento. Predomina nas áreas sombreadas e nos períodos com céu encoberto, apesar de estar presente nos dias claros.

Com o objetivo de simplificar o modelo matemático para o cálculo da radiação solar incidente nos planos receptores genéricos e os algoritmos utilizados nas ferramentas computacionais desenvolvidas, foi adotado o modelo *isotrópico* proposto por Collares-Pereira e Rabl (1979). O modelo considera a radiação solar difusa oriunda de todo o hemisfério celeste de maneira uniforme, independentemente da nebulosidade do dia e da posição do Sol. Segundo o modelo adotado, a radiação difusa incidente em um plano inclinado pode ser determinada em função do campo de visão desta superfície em relação ao hemisfério celeste (fator de vista do céu).

Para a estimativa da fração de radiação solar difusa contida na radiação solar global incidente em um plano horizontal foi utilizada a equação A.23, apresentada em Duffie e Beckman (1980) e proposta por *Collares-Pereira e Rabl*.

$$\frac{\bar{H}_D}{\bar{H}} \cong 0,775 + 0,00653 \cdot (\omega_p - 90^\circ) - [0,505 + 0,00455 \cdot (\omega_p - 90^\circ)] \cdot \cos(115 \cdot \bar{K}_T - 103) \quad [\text{A.23}]$$

A.4.4. Razão entre radiação direta nos planos inclinados e horizontal (R_b).

Radiação solar direta é a parcela da radiação total incidente que chega diretamente do Sol ao plano receptor sem sofrer qualquer desvio. É responsável pela geração de sombras e pode ser considerada incidente em raios praticamente paralelos.

Em muitos estudos, torna-se necessário avaliar a radiação solar direta incidente em planos receptores com orientação e inclinação genéricas, partindo de informações disponíveis para o plano horizontal. Para isso é definido o *fator de radiação direta*, que representa, em um determinado instante, a razão existente entre a radiação solar direta incidente no plano receptor genérico e a radiação solar direta incidente no plano horizontal. Dependendo da situação, pode ser considerado *instantâneo*, *horário* ou *diário*.

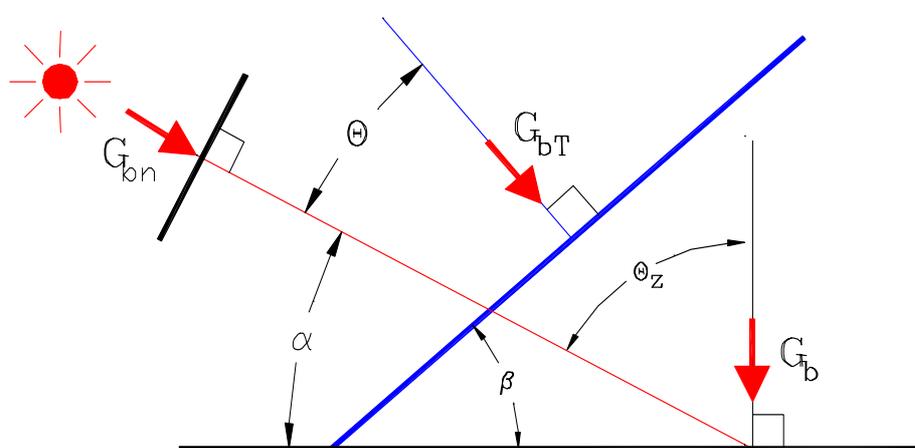


Figura A.10 Ângulos envolvidos na determinação do fator R_b

Com base na figura A.10, obtém-se a equação A.24, que fornece um valor instantâneo para R_b .

$$R_b = \frac{G_{bT}}{G_b} = \frac{G_{bn} \cdot \cos \theta}{G_{bn} \cdot \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad [A.24]$$

O ângulo θ_z (zenital) é o ângulo de incidência considerando o plano horizontal, cujo valor é igual ao complemento da altura solar. Pode ser calculado através da equação A.25.

$$\text{sen} \alpha = \cos \theta_z = \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega \quad [A.25]$$

A figura A.11, ilustra o fator R_b instantâneo determinado em um instante situado entre 9:00 e 10:00. Na figura é representado geometricamente através da razão existente entre os segmentos **G** (vermelho) e **H** (verde). No estudo apresentado foi utilizado o programa *Aparentes* considerando o Rio de Janeiro em fevereiro.

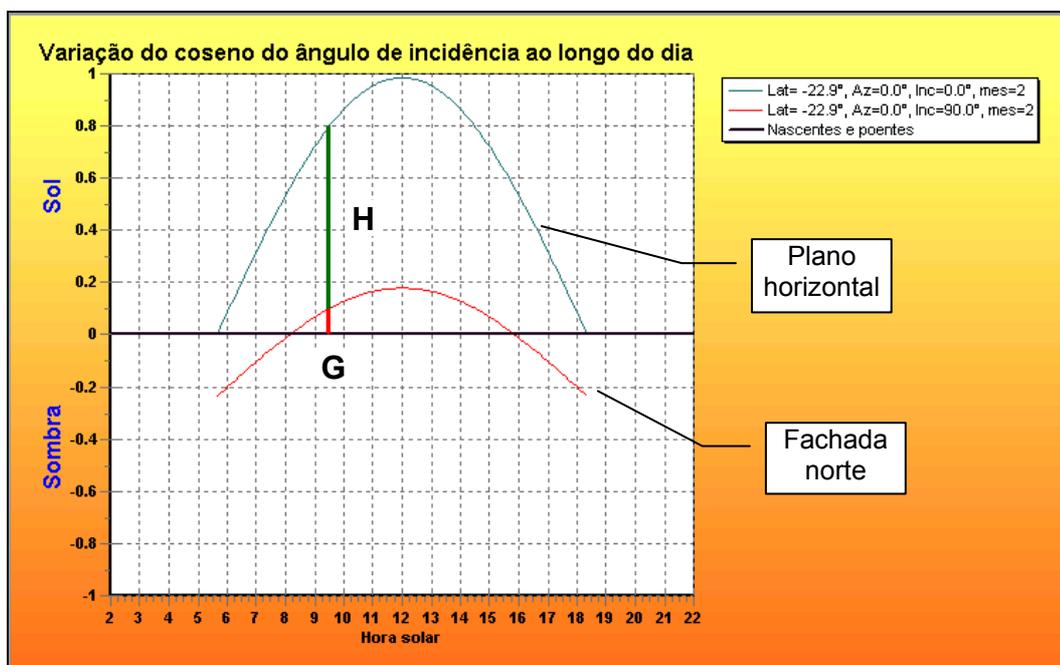


Figura A.11 Representação do fator R_b instantâneo

A figura A.12 ilustra a representação geométrica do fator R_b horário considerando o período compreendido entre 10:00 e 11:00. O fator R_b horário é obtido através da integração do fator R_b instantâneo ao longo da hora considerada. É representado na figura pela razão existente entre as áreas **G** (vermelha) e **H** (verde). No estudo apresentado foi utilizado o programa *Aparentes* considerando o Rio de Janeiro em fevereiro.

Nos cálculos práticos utiliza-se, para o fator R_b horário, o valor do fator R_b instantâneo calculado no intervalo médio da hora considerada (meia hora).

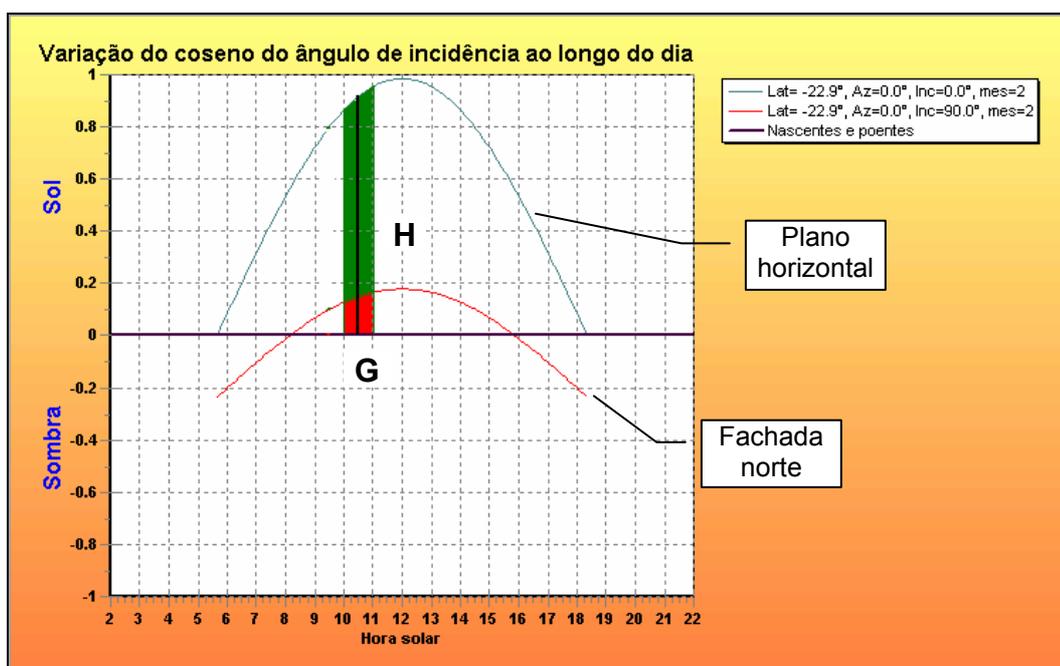


Figura A.12 Representação do fator R_b horário

Para os problemas envolvendo a radiação solar média diária mensal, considera-se um fator R_b médio mensal. Segundo Duffie e Beckman (1980), este fator pode ser definido como a razão existente entre as médias da radiação solar incidente nos planos receptores genérico e horizontal, avaliadas no dia médio do mês do estudo.

O fator R_b médio mensal pode ser representado através da equação A.26.

$$\bar{R}_b = \frac{\bar{H}_{bT}}{\bar{H}_b} \quad [\text{A.26}]$$

Os cálculos realizados neste trabalho para o valor do fator \bar{R}_b seguem a sugestão proposta por *Liu e Jordan*, apresentada em Duffie e Beckman (1980).

Diferenciando a equação A.5 em relação a t , obtém-se: $dt = \frac{1}{15} \cdot d\omega$.

Integrando o numerador e o denominador da equação A.24 ao longo do dia médio do mês, tem-se:

$$\bar{R}_b = \frac{\int_{Sol} G_{bn} \cdot \cos \theta \cdot dt}{\int_{Sol} G_{bn} \cdot \cos \theta_z \cdot dt} = \frac{\int_{Sol} \cos \theta \cdot dt}{\int_{Sol} \cos \theta_z \cdot dt} = \frac{\frac{1}{15} \cdot \int_{Sol} \cos \theta \cdot d\omega}{\frac{1}{15} \cdot \int_{Sol} \cos \theta_z \cdot d\omega}$$

Então:

$$\bar{R}_b = \frac{\int_{Sol} \cos \theta \cdot dt}{\int_{Sol} \cos \theta_z \cdot dt} = \frac{\int_{Sol} \cos \theta \cdot d\omega}{\int_{Sol} \cos \theta_z \cdot d\omega} \quad [\text{A.27}]$$

Sol - significa que integral deve ser avaliada durante os períodos de insolação (radiação solar direta).

A figura A.13 ilustra a representação geométrica do fator R_b médio mensal para um estudo realizado em uma fachada orientada para o sul no Rio de Janeiro. O estudo foi realizado no dia 16/02 (dia médio do mês) utilizando o programa *Aparentes*.

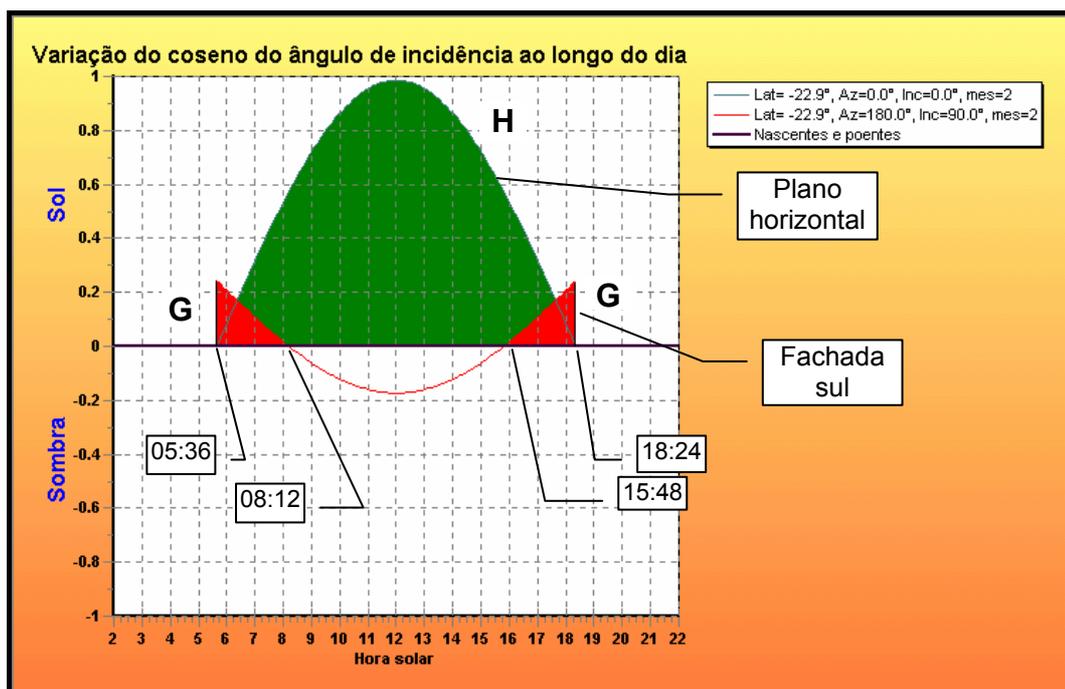


Figura A.13 Representação geométrica do fator R_b médio

O fator médio mensal é obtido através da integração do fator R_b instantâneo ao longo do dia médio do mês e é representado geometricamente na figura A.13 pela razão existente entre as áreas **G** (vermelha) e **H** (verde).

Como os planos inclinados estão sujeitos à ocorrência de períodos ensolarados e sombreados durante o mesmo dia, torna-se difícil a determinação dos limites para a integração (numerador da equação A.27). Durante os períodos de sombreamento não existe a radiação direta sobre a superfície, conseqüentemente o fator \bar{R}_b terá valor *nulo* e a não observação deste fato, conduz a resultados errados.

Para o plano horizontal não existe problema relativo aos limites de integração, pois ocorre a incidência de radiação solar direta desde o nascente até o poente do Sol.

Considerando os valores obtidos no programa *Sol* para o estudo representado na figura A.13, tem-se que:

Nascente (plano horizontal): 05:36;

Poente (plano horizontal): 18:24;

Início do primeiro período ensolarado (nasc. aparente) na fachada sul (t_1): 05:36;

Fim do primeiro período ensolarado (poente aparente) na fachada sul (t_2): 08:12;

Início do segundo período ensolarado (nasc. aparente) na fachada sul (t_3): 15:48;

Fim do segundo período ensolarado (poente aparente) na fachada sul (t_4): 18:24.

Neste caso específico tem-se:

$$\text{Para o plano horizontal: } \int_{Sol} \cos \theta_Z . dt = \int_{05:36}^{18:24} \cos \theta_Z . dt \quad (\cos \theta \geq 0) \text{ (ensolarado)}$$

$$\text{Para a fachada: } \int_{Sol} \cos \theta . dt = \int_{05:36}^{08:12} \cos \theta . dt + \int_{15:48}^{18:24} \cos \theta . dt \quad (\cos \theta \geq 0) \text{ (ensolarado)}$$

$$\text{Repare que: } \int_{08:12}^{15:48} \cos \theta . dt = 0 \quad (\cos \theta < 0) \text{ (sombreado)}$$

Observa-se que só existe radiação solar direta incidindo sobre o plano quando $\cos \theta \geq 0$ e que não existe radiação solar direta sobre o plano quando $\cos \theta < 0$.

$$\text{Tem-se então: } \cos \theta < 0 \Rightarrow \bar{R}_b = 0$$

Generalizando:

$$\text{Para o plano horizontal: } \int_{Sol} \cos \theta_Z . d\omega = \int_{\omega_N}^{\omega_P} \cos \theta_Z . d\omega . \quad [\text{A.28}]$$

$$\text{Para o plano genérico: } \int_{t_N}^{t_P} \cos \theta . dt = \int_{\omega_N}^{\omega_P} \cos \theta . d\omega = 0 , \text{ quando } \cos \theta < 0 \quad [\text{A.29}]$$

Os valores (t_1, ω_1) , (t_2, ω_2) , (t_3, ω_3) e (t_4, ω_4) são obtidos analiticamente através da determinação das raízes da equação A.13, considerando o intervalo de pesquisa (ω_N, ω_P) .

É possível obter os limites das integrais envolvidas no cálculo do fator \bar{R}_b através de métodos numéricos, envolvendo uma série complexa de operações matemáticas e lógicas.

Com o objetivo de simplificar os algoritmos das ferramentas computacionais desenvolvidas neste trabalho foi utilizado o método numérico simples, desenvolvido em Castanheira (2001), que requer pouco esforço computacional e fornece resultados satisfatórios.

A figura A.14 mostra um resumo do princípio básico dos procedimentos de integração utilizados.

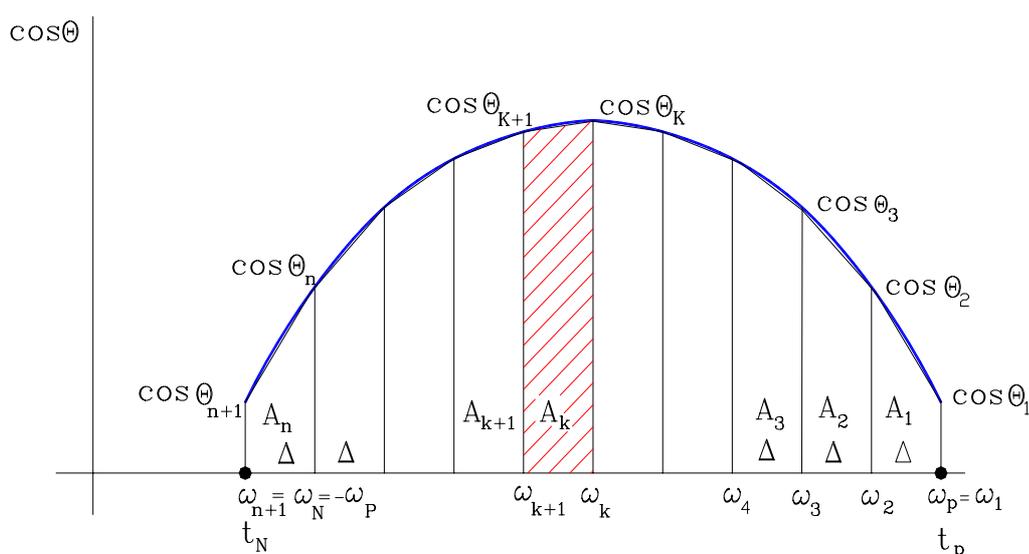


Figura A.14 Algoritmo utilizado para a estimativa do fator R_b médio

O intervalo de tempo decorrido entre a hora do nascente e a hora do poente é dividido em n intervalos iguais a Δ . Calculando o tamanho do intervalo em função de ω_p , tem-se:

$$\Delta = \frac{\omega_p - \omega_N}{n} = \frac{\omega_p - (-\omega_p)}{n} = \frac{2\omega_p}{n} \quad [\text{A.30}]$$

Representando os valores de ω , em termos de ω_P e Δ , tem-se:

Primeiro termo: $\omega_1 = \omega_P - (1-1).\Delta;$

Segundo termo: $\omega_2 = \omega_P - (2-1).\Delta;$

Terceiro termo: $\omega_3 = \omega_P - (3-1).\Delta;$

Termo de ordem k:: $\omega_k = \omega_P - (k-1).\Delta;$

Termo de ordem k+1: $\omega_{k+1} = \omega_P - k.\Delta;$

O último termo pode ser escrito: $\omega_{n+1} = \omega_N = \omega_P - n.\Delta .$

Substituindo-se a variável contínua ω por intervalos discretos na equação A.9:

$$\cos \theta_k = A + B.\cos[\omega_P - (k-1).\Delta] + C.\sen[\omega_P - (k-1).\Delta] \quad [\text{A.31}]$$

$$\cos \theta_{k+1} = A + B.\cos[\omega_P - k.\Delta] + C.\sen[\omega_P - k.\Delta] \quad [\text{A.32}]$$

Calculando as áreas dos trapézios, tem-se:

Área do primeiro trapézio: $A_1 = \frac{\cos \theta_1 + \cos \theta_2}{2} .\Delta;$

Área do segundo trapézio: $A_2 = \frac{\cos \theta_2 + \cos \theta_3}{2} .\Delta;$

Área do k-ésimo trapézio: $A_k = \frac{\cos \theta_k + \cos \theta_{k+1}}{2} .\Delta.$

A integral será aproximada pela soma das áreas dos trapézios, então:

$$\int_{Sol} \cos \theta .d\omega = \int_{Sol} \cos \theta .dt \cong \sum_{k=1}^n A_k \quad [\text{A.33}]$$

As seguintes condições devem ser respeitadas para que os valores da integral sejam nulos nos períodos de sombreamento ($\bar{R}_b = 0$), onde o $\cos \theta < 0$.

Se $\cos \theta_k \geq 0$ e $\cos \theta_{k+1} \geq 0 \Rightarrow A_k = \left(\frac{\cos \theta_k + \cos \theta_{k+1}}{2} \right) \cdot \Delta$, ao contrário $\Rightarrow A_k = 0$.

Os erros tornam-se pequenos à medida que o número de intervalos considerados aumenta. Pode-se estimar com base em 1.000.000 intervalos, que para 10, 100 e 1000 intervalos, os erros cometidos são inferiores a 0,1%, 0,01% e 0,001%.

Neste trabalho são considerados 1000 intervalos, de maneira que o erro cometido satisfaz plenamente os níveis de precisão exigidos.

A figura A.15 mostra os erros cometidos, destacando-os em negro.

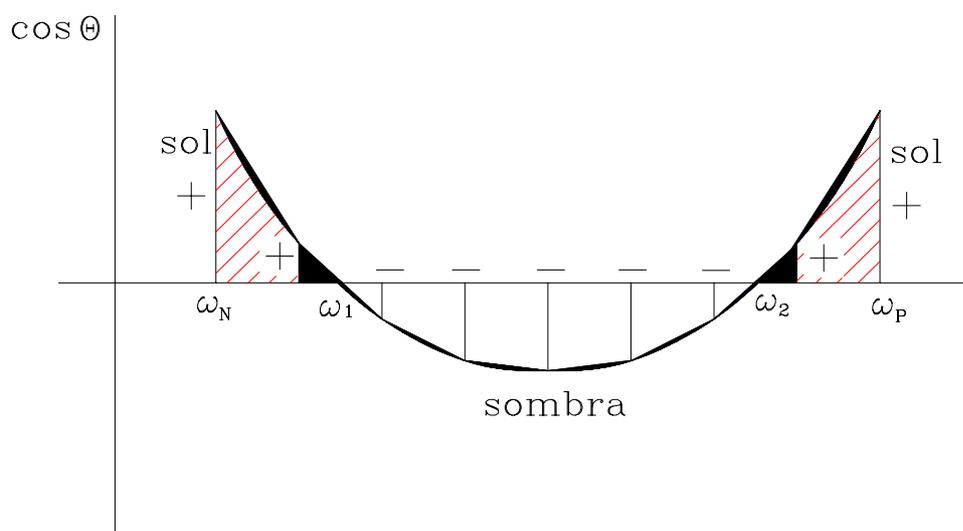


Figura A.15 Erros estimados no método numérico utilizado

A.4.5. Componente refletida da radiação solar global .

A radiação refletida é a parcela da radiação solar global que, após sofrer reflexões nas superfícies do entorno, atinge o plano receptor. Os algoritmos utilizados nas ferramentas desenvolvidas consideram somente a radiação refletida pelo solo próximo ao plano receptor.

O albedo do solo é a razão existente entre a radiação solar refletida e a radiação solar global incidente, considerando o solo situado no entorno do plano receptor. A tabela A.5 mostra valores para o albedo do solo obtidos no programa Radiasol GESTE (2005).

Tabela A.5 Albedo dos solos mais comuns

Valores para o albedo do solo	
Solo comum – terra marrom seca	0,2
Terra preta seca	0,13
Terra preta úmida	0,08
Gramma	0,15 – 0,30
Asfalto novo	0,09
Areia branca	0,6
Areia molhada	0,09
Espelho de água no verão	0,05
Espelho de água no inverno	0,12

Tendo por objetivo simplificar os algoritmos desenvolvidos, o solo foi considerado como um plano horizontal infinito, com albedo isotrópico e constante.

A.4.6. Radiação global média diária mensal incidente em um plano inclinado

Radiação solar total ou global é definida pela soma de suas componentes *direta*, *difusa* e *refletida*. Para transposição dos valores da radiação global média diária mensal incidente em um plano horizontal, para um plano receptor com orientação e inclinação genéricas, as ferramentas computacionais desenvolvidas ao longo do trabalho utilizam a equação A.34, que representa os resultados obtidos por *Liu* e *Jordan* e aprimorados por *Klein*, apresentados em Duffie e Beckman (1980). Estes resultados estão expressos na equação A.34.

$$\bar{H}_T = \bar{H} \cdot \left(1 - \frac{\bar{H}_D}{\bar{H}}\right) \cdot \bar{R}_b + \bar{H}_D \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + \bar{H} \cdot \rho_s \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad [\text{A.34}]$$

ANEXO B – Código AutoLISP para o cálculo da inclinação

A inclinação do plano receptor é calculada na ferramenta *Rad3P*, utilizando o modelo matemático apresentado no item 3.3.1, codificado em *AutoLISP* segundo a listagem apresentada a seguir.

```
; Cálculo da inclinação do plano receptor
(defun INCLIN (P1 P2 P3 vista / a b c M X1 Y1 Z1 X2 Y2 Z2 X3 Y3 Z3 cosG inc )
  (setq X1 (car P1))
  (setq Y1 (cadr P1))
  (setq Z1 (caddr P1))
  (setq X2 (car P2))
  (setq Y2 (cadr P2))
  (setq Z2 (caddr P2))
  (setq X3 (car P3))
  (setq Y3 (cadr P3))
  (setq Z3 (caddr P3))
  (setq a (- (* (- Y2 Y1) (- Z3 Z1)) (* (- Z2 Z1) (- Y3 Y1))))
  (setq b (- (* (- Z2 Z1) (- X3 X1)) (* (- X2 X1) (- Z3 Z1))))
  (setq c (- (* (- X2 X1) (- Y3 Y1)) (* (- Y2 Y1) (- X3 X1))))
  (if (or (and (or (= vista "C") (= vista "c")) (<= c 0)) (and (or (= vista "S") (= vista "s"))
  (> c 0))) (setq a (* -1 a) b (* -1 b) c (* -1 c)))
  (setq M (sqrt( + (* a a) (* b b) (* c c))))
  (if (equal M 0 0.001)(alert "Erro na definição do plano"))
  (setq cosG (/ c M))
  (setq inc (ACOS cosG))
  (* inc 1)
)
```

ANEXO C – Código *AutoLISP* para o cálculo do azimute

O código *AutoLISP* apresentado a seguir foi elaborado com o modelo matemático descrito no item 3.3.1. É utilizado na ferramenta *Rad3P* para o cálculo do azimute do plano receptor, partindo de 3 pontos distintos e não colineares.

```

;**Cálculo do azimute do plano receptor**
(defun AZIM (P1 P2 P3 vista / a b c M X1 Y1 Z1 X2 Y2 Z2 X3 Y3 Z3 cosA cosB
cosG Gam senG Az cosAZ )
  (setq X1 (car P1))
  (setq Y1 (cadr P1))
  (setq Z1 (caddr P1))
  (setq X2 (car P2))
  (setq Y2 (cadr P2))
  (setq Z2 (caddr P2))
  (setq X3 (car P3))
  (setq Y3 (cadr P3))
  (setq Z3 (caddr P3))
  (setq a (- (* (- Y2 Y1) (- Z3 Z1)) (* (- Z2 Z1) (- Y3 Y1))))
  (setq b (- (* (- Z2 Z1) (- X3 X1)) (* (- X2 X1) (- Z3 Z1))))
  (setq c (- (* (- X2 X1) (- Y3 Y1)) (* (- Y2 Y1) (- X3 X1))))
  (if (or (and (or (= vista "C") (= vista "c")) (<= c 0)) (and (or (= vista "S") (= vista "s"))
(> c 0))) (setq a (* -1 a) b (* -1 b) c (* -1 c)))
  (setq M (sqrt( + (* a a) (* b b) (* c c))))
  (if (equal M 0 0.001)(alert "Erro na definição do plano"))
  (setq cosA (/ a M) cosB (/ b M) cosG (/ c M))
  (setq Gam (ACOS cosG))
  (setq senG (sin Gam))
  (if (= senG 0) (setq Az 0)
    (progn
      (setq cosAz (/ cosB senG))
      (setq Az (ACOS cosAz))
    )
  )
  (if (< cosA 0) (setq Az (- (* pi 2) Az)))
  (if (equal Az (* 2 pi) 0.001) (setq Az 0))
  (* Az 1)
)

```

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)