

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE
UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM MEIOS
URBANOS

por

Rafael Gerzson Torres

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Abril de 2015

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE
UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM MEIOS
URBANOS

por

Rafael Gerzson Torres
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do Título de:

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Arno Krenzinger

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Ricardo Rüther, PPGEC - UFSC.

Prof. Dr. Benamy Turkienicz, PROPAR - UFRGS.

Prof. Dr. Paulo Otto Beyer, PROMEC - UFRGS.

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 24 de Abril de 2015

Dedico o presente trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pelo ensino de excelência e busca pela qualidade em todas as dimensões.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC) por proporcionar instalações e infraestrutura para o desenvolvimento da pesquisa, pela qualidade de seus Professores, disciplinas e atendimento aos seus alunos.

Agradeço ao Laboratório de Energia Solar (LABSOL) pela oportunidade de fazer parte da rica história de pesquisa e trabalhos oriundos destas instalações. Também agradeço aos meus colegas de laboratório pela parceria e acolhida neste tempo.

Agradeço ao Professor Arno Krenzinger por todo período de orientação, confiança, conhecimentos e experiências transmitidas. Também agradeço pela cobrança, dedicação dispensada e paciência que teve com todos os obstáculos e mudanças de rumo que ocorreram durante o tempo no laboratório.

Aos meus familiares pelo apoio incondicional durante esta trajetória.

Aos meus amigos e colegas.

A minha namorada Fernanda pelo apoio, compreensão e carinho em todas as etapas desta pós-graduação.

A todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão desta jornada.

RESUMO

Este trabalho visa desenvolver uma metodologia, através de ferramentas computacionais de simulação, de avaliação de mapas solares para a análise de sombreamentos e da radiação solar incidente sobre as coberturas e telhados das edificações dentro do ambiente urbano e aplicá-la para a cidade de Porto Alegre. Desta forma é possível identificar os melhores espaços para alocar futuras instalações fotovoltaicas e evitar possíveis perdas por sombreamento ao longo do ano. Para tanto, foram selecionadas quatro regiões de estudo, cada uma representando uma tipologia de bairro e edificações. Os bairros Centro Histórico, São Geraldo, São Sebastião e Santana foram selecionados por representarem: edificações comerciais de escritórios, galpões comerciais (depósitos e oficinas), residencial de baixa altura e prédios residenciais, respectivamente. Após o desenvolvimento dos mapas solares, são realizadas estimativas para capacidade de instalação e produção de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos em cada edificação. O software EnergyPlus produziu modelos termoenergéticos para quatro edificações típicas representando cada uma das regiões de estudo e, assim, proceder um balanço de energia em escala anual para o consumo energético e a produção de energia. Considerando as hipóteses de simulação e premissas de cálculo utilizadas, verifica-se que existe potencial para a geração distribuída de energia em escala urbana para as regiões de estudo. Um resultado significativo ocorreu para a região do bairro São Geraldo, onde as dez maiores áreas de telhado equivalem a 53% do potencial total de instalação fotovoltaica aplicada a edificações da região de estudo. Ainda, realizado o balanço de energia, foram analisados os cenários de investimento para cada tipologia de edificação típica, resultando em um retorno sobre o investimento entre 9 e 13 anos, dependendo do tipo de edificação.

Palavras-chave: Mapas Solares, Sistemas Fotovoltaicos, Telhados e Coberturas Solares, Sombreamentos, Vasari, EnergyPlus.

ABSTRACT

This work aims to develop a methodology, through computer simulation tools, for evaluating solar maps for shading analysis and incident solar radiation on the building roofs within the urban environment. This methodology is applied in the city of Porto Alegre. Thus, it is possible to identify the best areas to allocate future photovoltaic systems and avoid possible shading losses throughout the year. Therefore were selected four study areas, each one representing one type of neighborhood and respective buildings. The neighborhoods Centro Histórico, São Geraldo, São Sebastião and Santana were selected because they represent: commercial/office buildings, warehouses/workshops, low-rise residential and residential buildings, respectively. After the development of solar maps, estimates were made for the capacity of installation and the electric energy produced by photovoltaic systems in each building roof. The EnergyPlus software produced an energy model for a typical building of each study area (neighborhood) and make an energy balance in annual scale for the energy consumption and energy production. Considering the simulation hypothesis and assumptions, it appears that there is potential for the distributed generation in urban scale for the four study areas. A significant result was found for the São Geraldo region, where only the top ten building roof areas equals to 53% of the total potential of building applied photovoltaic in the respective neighborhood region. Also, performing the energy balance, investment scenarios were analyzed for each typical building, resulting in a return on investment between 9 and 13 years, depending on the building type.

Keywords: Solar Maps, Photovoltaic Systems, Solar Roofs, Shading Effects, Vasari, EnergyPlus.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Justificativas para o Trabalho | 7 |
| 1.2 Objetivos | 8 |
| 1.3 Organização do Trabalho | 9 |
| 2 RECURSO SOLAR | 11 |
| 2.1 Radiação Solar Extraterrestre | 11 |
| 2.1.1 Componentes da Radiação Solar | 12 |
| 2.1.2 Irradiação Solar na Superfície Terrestre | 13 |
| 2.2 Geometria Sol-Terra | 15 |
| 2.2.1 Posição do Sol em Relação a uma Superfície Horizontal e Inclinada | 16 |
| 3 REVISÃO DE CONCEITOS | 21 |
| 3.1 Geração Distribuída | 21 |
| 3.2 Geração de Energia e Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede | 21 |
| 3.3 Aplicações em Edificações: BIPV e BAPV | 25 |
| 3.4 Curva Característica de uma Célula Fotovoltaica | 26 |
| 3.5 Efeitos de Sombreamento | 27 |
| 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 29 |
| 4.1 Conceitos e Tecnologias utilizadas | 29 |
| 4.2 Estado da Arte | 31 |
| 4.3 <i>Mapwell® Solar SystemTM</i> | 41 |
| 4.3.1 Exemplo de Cidades que Integram o <i>Mapdwell® Solar SystemTM</i> | 42 |
| 4.4 Atlas Solar da cidade de Berlim | 45 |
| 4.5 Mapa Solar da cidade de Nova York | 48 |
| 5 METODOLOGIA | 50 |
| 5.1 Seleção das Regiões e Tipologias de Estudo | 50 |
| 5.1.1 Bairro Centro Histórico | 52 |
| 5.1.2 Bairro São Geraldo | 52 |
| 5.1.3 Bairro São Sebastião | 53 |
| 5.1.4 Bairro Santana | 54 |
| 5.2 Compatibilização das áreas de projeção das edificações | 55 |
| 5.3 Softwares de Simulação e Modelamento Geométrico | 58 |
| 5.3.1 Arquivos Climáticos Disponíveis para Utilização | 59 |
| 5.3.2 Análise de Sombras e Radiação Solar Incidente | 61 |
| 5.3.3 Correção dos Valores de Irradiância no Software Utilizado | 64 |
| 5.4 Capacidade de Instalação e Produção de Energia | 65 |
| 5.5 Simulação Termoenergética para uma Edificação Média/Equivalente Típica | 67 |
| 5.6 Fluxo de Caixa para cada Edificação Média Típica | 68 |
| 5.7 Fluxograma da Metodologia Desenvolvida | 68 |
| 6 RESULTADOS | 69 |
| 6.1 Análise de Sombras | 69 |
| 6.1.1 Solstício de Verão | 69 |
| 6.1.2 Equinócio | 75 |
| 6.1.3 Solstício de Inverno | 80 |
| 6.2 Verificação da Radiação Solar Incidente | 85 |
| 6.2.1 Região do bairro Centro Histórico | 86 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.2.2 | Região do bairro São Geraldo | 89 |
| 6.2.3 | Região do bairro São Sebastião | 91 |
| 6.2.4 | Região do bairro Santana | 94 |
| 6.2.5 | Montagem de Mapas Solares em Meio Urbano..... | 97 |
| 6.3 | Capacidade de Instalação Fotovoltaica e Estimativa de Produção de Energia | 99 |
| 6.3.1 | Cenário para região do Centro Histórico | 99 |
| 6.3.2 | Cenário para região do São Geraldo | 100 |
| 6.3.3 | Cenário para região do São Sebastião..... | 101 |
| 6.3.4 | Cenário para região do Santana | 102 |
| 6.3.5 | Resumo Comparativo entre as Regiões de Estudo..... | 104 |
| 6.4 | Simulação Termoenergética para Edificações Típicas e Balanço de Energia..... | 104 |
| 6.4.1 | Simulação de uma Edificação Típica Comercial. | 105 |
| 6.4.2 | Simulação de uma Edificação Típica de Galpão Comercial..... | 107 |
| 6.4.3 | Simulação de uma Edificação Típica Residencial de Baixa Altura..... | 110 |
| 6.4.4 | Simulação de uma Edificação Típica Residencial. | 112 |
| 6.5 | Fluxo de Caixa para Sistemas Fotovoltaicos das Edificações Típicas..... | 115 |
| 7 | CONCLUSÕES..... | 117 |
| 7.1 | Limitações do Trabalho..... | 120 |
| 7.2 | Sugestões para trabalhos futuros | 121 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 123 |
| | APÊNDICE A – Mapas Urbanos das Regiões Selecionadas | 128 |
| | APÊNDICE B –Amostragem Utilizada como Premissa de Cálculo. | 132 |
| | APÊNDICE C – Cenários de Instalação e Produção de Energia..... | 133 |
| | APÊNDICE D – Dados de Entrada dos Modelos de Energéticos. | 144 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 - Histórico e projeção de crescimento populacional para 2050. | 1 |
| Figura 1.2 - Processo de metropolização no mundo..... | 2 |
| Figura 1.3 - Crescimento da Certificação LEED no Brasil. | 3 |
| Figura 1.4 - Oferta interna de energia elétrica por fonte. | 4 |
| Figura 1.5 - Evolução global da capacidade instalada de módulos fotovoltaicos (2000-2013). 6 | |
| Figura 2.1 - Gráfico dos espectros solares padrões extraterrestre (AM0) e terrestres (AM1.5) | 11 |
| Figura 2.2 - Componentes da Radiação Solar incidente em uma superfície inclinada. | 13 |
| Figura 2.3 - Mapa da irradiância solar em média anual. | 14 |
| Figura 2.4 - Radiação Solar Global em Médias Sazonais. | 15 |
| Figura 2.5 - (a) Órbita da Terra em torno do Sol indicando as estações do ano para o hemisfério sul; (b) Indicação da inclinação de 23,45° com relação ao eixo polar (norte- sul)..... | 16 |
| Figura 2.6 - Altura da posição solar para verão e inverno..... | 17 |
| Figura 2.7 - (a) Ilustração para os ângulos da posição do Sol com relação a uma superfície no plano horizontal; (b) Ilustração para os ângulos da posição do Sol com relação a uma superfície inclinada no mesmo plano horizontal. | 17 |
| Figura 2.8 - (a) Irradiância direta incidente sobre uma superfície horizontal; (b) Irradiância direta incidente sobre uma superfície inclinada. | 20 |
| Figura 3.1 - Diagrama conceitual para um sistema elétrico de potência, onde: T_G é a transformação de elevação de tensão entre os subsistemas de produção e transmissão; T_D é a transformação de redução de tensão entre os subsistemas de transmissão e distribuição; T são os transformadores do subsistema de distribuição..... | 22 |
| Figura 3.2 - (a) Medição bidirecional; (b) Medição unidirecional com dois instrumentos..... | 24 |
| Figura 3.3 - Módulos fotovoltaicos: (a) silício policristalino, (b) silício amorfo, (c) filme fino com encapsulamento flexível, (d) silício monocristalino com encapsulamento de vidro. Em detalhe, uma célula fotovoltaica de silício monocristalino. | 24 |
| Figura 3.4 - Aplicação de módulos fotovoltaicos nas edificações (BAPV): (a) e (b) são aplicações sobre a cobertura de edificações; (c) reforma no estádio Mineirão em Minas Gerais e a aplicação de módulos fotovoltaicos sobre a cobertura. | 25 |
| Figura 3.5 - Integração de módulos fotovoltaicos nas edificação (BIPV): (a) integração com a forma; (b) integração com forma, função e aparência; (c) integração com inclinação nas coberturas e função de sombreamento em fachadas..... | 26 |
| Figura 3.6 - Curva característica I-V e a sobreposição da curva P-V (potência gerada pelo módulo fotovoltaico). | 26 |
| Figura 3.7 - Curva I-V para 4 módulos conectados em série e 3 curvas representando situações distintas de sombreamento..... | 28 |
| Figura 4.1 - Distribuição da economia dos Estados Unidos utilizando o produto interno bruto e a atividade econômica diária como exemplo visual. | 29 |
| Figura 4.2 - Escaneamento por laser aerotransportado (<i>Airborne Laser Scanning</i>). | 30 |
| Figura 4.3 - Dados obtidos em um exemplo da aplicação de LiDAR. | 30 |
| Figura 4.4 - Mapa de produtividade fotovoltaica (Y_F) no estado do Rio Grande do Sul..... | 33 |
| Figura 4.5 - (a) Plano de voo sobre a cidade de Porto Alegre; (b) Sensor LASER ALS50-II; (c) Imagem hipsométrica de Porto Alegre (representação do terreno por escala de cores); (d) Detalhe de recorte em perspectiva do perfilamento LASER de uma área da cidade. 34 | |

| | |
|--|----|
| Figura 4.6 - Imagens do processo de criação do modelo 3D baseado em LiDAR e GIS. (a) Imagem obtida de satélite; (b) detecção de pontos através de sensoriamento LiDAR; (c) categorização de pontos para edificações e para terrenos através de GIS da cidade de Cambridge; (d) modelo tridimensional do contexto urbano..... | 38 |
| Figura 4.7 - Variação do método de cálculo e a irradiação solar nos telhados. | 39 |
| Figura 4.8 - Vista de topo e frontal das fachadas escaneadas..... | 41 |
| Figura 4.9 - Metodologia de criação dos mapas do <i>Mapdwell® Solar System™</i> . (a) Imagem de satélite da região de exemplo; (b) Conjunto de pontos LiDAR e polígonos identificando a projeção em terreno das edificações; (c) Simplificação e classificação dos pontos baseados em LiDAR; (d) Modelo geométrico tridimensional para simulação baseado em LiDAR; (e) Modelo combinado com a simulação anual de radiação solar; (f) Resultado do <i>Mapdwell® Solar System™</i> | 41 |
| Figura 4.10 - Detalhes do mapa solar da cidade de Cambridge | 43 |
| Figura 4.11 - Detalhes do mapa solar da cidade de Boston..... | 44 |
| Figura 4.12 - Detalhes do mapa solar da cidade de Vitacura | 45 |
| Figura 4.13 - Mapa solar para uma região da cidade de Berlin..... | 46 |
| Figura 4.14 - Potencial fotovoltaico para cada telhado na cidade de Berlim | 47 |
| Figura 4.15 - Estimativa de produção de energia a partir do potencial dos telhados. | 47 |
| Figura 4.16 - Mitigação de emissões de CO ₂ com a utilização de energia fotovoltaica..... | 48 |
| Figura 4.17 - Visualização da interface do <i>NYC Solar Map</i> | 49 |
| Figura 5.1 - Região selecionada no bairro Centro Histórico. | 52 |
| Figura 5.2 - Região selecionada no bairro São Geraldo. | 53 |
| Figura 5.3 - Região selecionada no bairro São Sebastião..... | 54 |
| Figura 5.4 - Região selecionada no bairro Santana. | 55 |
| Figura 5.5 - Metodologia de compatibilização das áreas de projeção das edificações: (a) Levantamento Planialtimétrico da cidade de Porto Alegre; (b) Seleção da tipologia de bairro; (c) Seleção da região de análise com as áreas de projeção das edificações compatibilizadas. | 57 |
| Figura 5.6 - Interface de usuário do software Autodesk Vasari. | 59 |
| Figura 5.7 - Dados climáticos disponíveis: (a) mundo; (b) cidade de Porto Alegre. | 60 |
| Figura 5.8 - Movimento aparente do Sol, sobre um volume genérico, durante os dias de solstício e equinócio, onde (a), (b) e (c) são: vista isométrica, de topo e lateral, respectivamente. | 63 |
| Figura 5.9 - Verificação dos valores de irradiação em diferentes períodos. | 65 |
| Figura 5.10 - Fluxograma para as atividades desenvolvidas | 68 |
| Figura 6.1 - Análise de sombras e percentual de telhados sombreados em 4 momentos do dia de solstício de verão para região do Centro Histórico..... | 70 |
| Figura 6.2 - Análise de sombras e percentual de telhados sombreados em 4 momentos do dia de solstício de verão para região do São Geraldo..... | 71 |
| Figura 6.3 - Análise de sombras e percentual de telhados sombreados em 4 momentos do dia de solstício de verão para região do São Sebastião. | 72 |
| Figura 6.4 - Análise de sombras e percentual de telhados sombreados em 4 momentos do dia de solstício de verão para região do Santana. | 73 |
| Figura 6.5 - Comparativo de superfícies sem sombreamentos para solstício de verão | 74 |
| Figura 6.6 - Análise de sombras e percentual de telhados sombreados em 4 momentos do dia de equinócio para região do Centro Histórico. | 76 |
| Figura 6.7 - Análise de sombras e percentual de telhados sombreados em 4 momentos do dia de equinócio para região do São Geraldo. | 77 |

| | |
|---|-----|
| Figura 6.8 - Análise de sombras e percentual de telhados sombreados em 4 momentos do dia de equinócio para região do São Sebastião. | 78 |
| Figura 6.9 - Análise de sombras e percentual de telhados sombreados em 4 momentos do dia de equinócio para região do Santana. | 79 |
| Figura 6.10 - Comparativo de superfícies sem sombreamentos para o equinócio (outono). ... | 80 |
| Figura 6.11 - Análise de sombras e percentual de telhados sombreados em 4 momentos do dia de solstício de inverno para região do Centro Histórico. | 81 |
| Figura 6.12 - Análise de sombras e percentual de telhados sombreados em 4 momentos do dia de solstício de inverno para região do São Geraldo. | 82 |
| Figura 6.13 - Análise de sombras e percentual de telhados sombreados em 4 momentos do dia de solstício de inverno para região do São Sebastião. | 83 |
| Figura 6.14 - Análise de sombras e percentual de telhados sombreados em 4 momentos do dia de solstício de inverno para região do Santana. | 84 |
| Figura 6.15 - Comparativo de superfícies sem sombreamentos para o solstício de inverno. | 85 |
| Figura 6.16 - Variação entre dados de irradiação diária do arquivo climático (linha tracejada) com o incidente em um telhado plano horizontal (linha contínua). | 86 |
| Figura 6.17 - Análise anual de radiação solar incidente para região do Centro Histórico. | 87 |
| Figura 6.18 - Irradiação solar sobre as coberturas de uma região do Centro Histórico durante as semanas de: (a) solstício de inverno; (b) equinócio de outono; (c) solstício de verão. | 88 |
| Figura 6.19 - Região do bairro Centro Histórico. | 88 |
| Figura 6.20 - Irradiação solar acumulada durante 1 ano sobre as coberturas/telhados de uma região do bairro Centro Histórico. | 89 |
| Figura 6.21 - Análise anual de radiação solar incidente para região do São Geraldo. | 90 |
| Figura 6.22 - Irradiação solar sobre as coberturas de uma região do São Geraldo durante as semanas de: (a) solstício de inverno; (b) equinócio de outono; (c) solstício de verão. | 90 |
| Figura 6.23 - Região do bairro São Geraldo. | 91 |
| Figura 6.24 - Irradiação solar acumulada durante 1 ano sobre as coberturas/telhados de uma região do bairro São Geraldo. | 91 |
| Figura 6.25 - Análise anual de radiação solar incidente para região do São Sebastião. | 92 |
| Figura 6.26 - Irradiação solar sobre as coberturas de uma região do São Sebastião durante as semanas de: (a) solstício de inverno; (b) equinócio de outono; (c) solstício de verão. | 93 |
| Figura 6.27 - Região do bairro São Sebastião. | 93 |
| Figura 6.28 - Irradiação solar acumulada durante 1 ano sobre as coberturas/telhados de uma região do bairro São Sebastião. | 94 |
| Figura 6.29 - Análise anual de radiação solar incidente para região do Santana. | 95 |
| Figura 6.30 - Irradiação solar sobre as coberturas de uma região do Santana durante as semanas de: (a) solstício de inverno; (b) equinócio de outono; (c) solstício de verão. | 95 |
| Figura 6.31 - Região do bairro Santana. | 96 |
| Figura 6.32 - Irradiação solar acumulada durante 1 ano sobre as coberturas/telhados de uma região do bairro Santana. | 97 |
| Figura 6.33 - Mapa solar em meio urbano para região do Centro Histórico. | 97 |
| Figura 6.34 - Mapa solar em meio urbano para região do São Geraldo. | 98 |
| Figura 6.35 - Mapa solar em meio urbano para região do São Sebastião. | 98 |
| Figura 6.36 - Mapa solar em meio urbano para região do Santana. | 99 |
| Figura 6.37 - Modelo de simulação para uma edificação típica comercial. (a) vista isométrica; (b) vista frontal; (c) vista de topo. | 105 |
| Figura 6.38 - Consumo energético anual para uma edificação típica comercial. | 106 |
| Figura 6.39 - Balanço de energia para edificação típica comercial de uso de escritórios. | 107 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6.40 - Modelo de simulação para uma edificação típica de galpão comercial. (a) vista isométrica; (b) vista frontal; (c) vista de topo..... | 108 |
| Figura 6.41 - Consumo energético anual para uma edificação típica de galpões comerciais. | 108 |
| Figura 6.42 - Balanço de energia para edificação típica de galpões comerciais. | 109 |
| Figura 6.43 - Modelo de simulação para uma edificação típica residencial de baixa altura. (a) vista isométrica; (b) vista frontal; (c) vista de topo. | 110 |
| Figura 6.44 - Consumo energético anual para uma edificação típica residencial de baixa altura. | 111 |
| Figura 6.45 - Balanço de energia para edificação típica residencial de baixa altura..... | 112 |
| Figura 6.46 - Modelo de simulação para uma edificação típica residencial. (a) vista isométrica; (b) vista frontal; (c) vista de topo..... | 113 |
| Figura 6.47 - Consumo energético anual para uma edificação típica residencial | 113 |
| Figura 6.48 - Balanço de energia para edificação típica residencial. | 114 |
| Figura 6.49 - Fluxo de caixa ao longo de um período de 15 anos..... | 116 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 2.1 - Valores típicos de albedo para diferentes tipos de superfícies..... | 13 |
| Tabela 4.1 - Levantamento de métodos dos mapas de potencial solar na América do Norte. . | 36 |
| Tabela 5.1 - Consumo de energia elétrica setorial no RS, em 2013..... | 50 |
| Tabela 5.2 - Comparação e correção dos valores de irradiação solar sobre uma superfície plana horizontal sem sombreamentos..... | 65 |
| Tabela 5.3 - Análise sobre amostra de módulos fotovoltaicos do PBE..... | 66 |
| Tabela 6.1 - Resumo das informações sobre os modelos das regiões de estudo selecionadas. | 69 |
| Tabela 6.2 - Distribuição de irradiação diária e acumulada em cada semana. | 86 |
| Tabela 6.3 - Cenário 1 para o Centro Histórico..... | 100 |
| Tabela 6.4 - Cenário 1 de potencial de instalação para as 10 maiores áreas de cobertura/telhados da região do Centro Histórico. | 100 |
| Tabela 6.5 - Cenário 1 para o São Geraldo..... | 101 |
| Tabela 6.6 - Cenário 1 de potencial de instalação para as 10 maiores áreas de cobertura/telhados da região do São Geraldo. | 101 |
| Tabela 6.7 - Cenário 1 para o São Sebastião. | 102 |
| Tabela 6.8 - Cenário 1 de potencial de instalação para as 10 maiores áreas de cobertura/telhados da região do São Sebastião..... | 102 |
| Tabela 6.9 - Cenário 1 para o Santana. | 103 |
| Tabela 6.10 - Cenário 1 de potencial de instalação para as 10 maiores áreas de cobertura/telhados da região do Santana. | 103 |
| Tabela 6.11 - Resumo comparativo entre as regiões para o cenário de 40% de área de aproveitamento. | 104 |
| Tabela 6.12 - Detalhamento do balanço de energia para a edificação típica comercial de escritórios | 107 |
| Tabela 6.13 - Detalhamento do balanço de energia para a edificação típica de galpões..... | 109 |
| Tabela 6.14 - Detalhamento do balanço de energia para a edificação típica residencial de baixa altura. | 112 |
| Tabela 6.15 - Detalhamento dos valores do balanço de energia para a edificação típica residencial..... | 115 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|-----------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ALS | <i>Airborne Laser Scanning</i> |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| ASHRAE | <i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i> |
| ASTM | <i>American Standard for Testing and Materials</i> |
| BEN | Balanco Energético Brasileiro |
| BERS | Balanco Energético do Estado do Rio Grande do Sul |
| BIM | <i>Building Information Modeling</i> |
| BIPV/BAPV | <i>Building-Integrated Photovoltaic / Building-Applied Photovoltaic</i> |
| CARSI | <i>Center for Advanced Research of Spatial Information</i> |
| CEEE | Companhia Estadual de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul |
| CUNY | <i>The City University of New York</i> |
| DEM | <i>Digital Elevation Model</i> |
| DOE | <i>United States Department of Energy</i> |
| EPIA | <i>European Photovoltaic Industry Association</i> |
| GD | Geração Distribuída |
| GIS | <i>Geographic Information System</i> |
| HVAC | <i>Heating, Ventilating and Air Conditioning</i> |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| INMETRO | Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia |
| LEED | <i>Leadership in Energy and Environmental Design</i> |
| LiDAR | <i>Light Detection and Ranging</i> |
| MCT | Ministério de Ciência e Tecnologia |
| MIT | <i>Massachusetts Institute of Technology</i> |
| MLS | <i>Mobile Laser Scanning</i> |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| NBIMS-US | The National BIM Standard - United States |
| NREL | National Renewable Energy Laboratory |
| PBE | Programa Brasileiro de Etiquetagem |
| PROCEL | Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica |
| PRODIST | Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional |
| PUCRS | Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul |
| SEP | Sistema Elétrico de Potência |
| SFCR | Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede |
| SODA | <i>Solar Radiation Data</i> |
| TMY | <i>Typical Meteorological Year</i> |
| UFRGS | Universidade Federal do Rio Grande do Sul |
| USGBC | <i>United States Greenbuilding Council</i> |
| WWF | <i>World Wide Fund for Nature</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|------------------|--|-------------------------|
| A | Área | [m ²] |
| c _p | Calor Específico | [J/kg.K] |
| d _n | Dia Juliano | - |
| G | Irradiância Global | [W/m ²] |
| G _B | Irradiância Direta | [W/m ²] |
| G _D | Irradiância Difusa | [W/m ²] |
| G _{d,h} | Irradiância Direta Incidente Normal num Plano Horizontal | [W/m ²] |
| G _{d,β} | Irradiância Direta Incidente num Plano Inclinado | [W/m ²] |
| G _R | Irradiância Refletida ou de Albedo | [W/m ²] |
| G _T | Irradiância Global no Plano Inclinado | [W/m ²] |
| H _S | Hora Angular | - |
| I | Irradiação Global Incidente em uma Superfície | [W/m ²] |
| I _b | Irradiação Solar Direta | [W/m ²] |
| I _d | Irradiação Difusa | [W/m ²] |
| I _{dh} | Irradiação Solar Difusa Horizontal | [W/m ²] |
| I _h | Irradiação Solar Global Horizontal | [W/m ²] |
| I _r | Irradiação Solar Refletida | [W/m ²] |
| I _s | Irradiação de Céu | [W/m ²] |
| I _{sc} | Corrente de Curto Circuito | [A] |
| k | Condutividade Térmica | [W/m.K] |
| L | Espessura | [m] |
| L _{loc} | Latitude Local | [°] |
| L _{st} | Latitude Padrão | [°] |
| N | Nº Teórico de Horas de Sol | - |
| P | Potência (módulo fotovoltaico) | [W _p] |
| P _{mp} | Ponto de Máxima Potência | [W] |
| R | Resistência Térmica | [m ² .K/W] |
| SHGC | <i>Solar Heat Gain Coefficient</i> | - |
| U | Coefficiente Global de Transferência de Calor | [W/m ² .K] |
| V | Volume | [m ³] |
| V _{oc} | Tensão de Circuito Aberto | [V] |
| Y _f | Produtividade Fotovoltaica | [kW.h/kW _p] |
| α | Altura ou Elevação Solar | [°] |
| β | Inclinação da Superfície (de captação) | [°] |
| γ | Ângulo Azimutal da Superfície | [°] |
| γ _s | Ângulo Azimutal do Sol | [°] |
| δ | Declinação Solar | [°] |
| η | Eficiência | - |
| θ | Ângulo de Incidência | [°] |
| θ _Z | Ângulo Zenital | [°] |

| | | |
|------------|------------------------------------|----------------------|
| ρ | Densidade | [kg/m ²] |
| ω | Ângulo Horário do Sol (Hora Solar) | [°] |
| ω_s | Ângulo Horário do Pôr do Sol | [°] |

1 INTRODUÇÃO

A busca pela eficiência energética e desenvolvimento da produção, transformação e distribuição de energia acompanha a evolução da sociedade e a maneira como se vive em comunidade nos dias atuais. As pessoas, as grandes cidades, os bens de consumo e recursos de sobrevivência necessitam de energia elétrica para existirem.

Constata-se que a demanda por energia elétrica aumenta conforme aumenta o desenvolvimento industrial, crescimento da economia, das cidades e o crescimento populacional. Esta expansão no consumo de energia, verificada de forma global, é um dos grandes desafios que a sociedade enfrentará nos próximos anos. Dentro deste contexto buscam-se alternativas para tornar mais eficiente este consumo energético, assim como a produção de energia. A mudança de mentalidade e cultura das pessoas, além da busca por fontes renováveis de energia, deverá ser um fator de importância para o futuro próximo.

Historicamente, o êxodo rural e o crescimento desordenado dos grandes centros urbanos tornou-se uma variável importante para os líderes mundiais no que diz respeito ao planejamento de infraestrutura e fornecimento de recursos básicos como alimento e energia. Em 2010, 84,35% da população no Brasil já vivia em territórios urbanos (IBGE 2010) e, segundo projeções da Organização das Nações Unidas, até 2050, este percentual poderá chegar a 93,6%. Estes indicadores podem ser vistos na Figura 1.1.

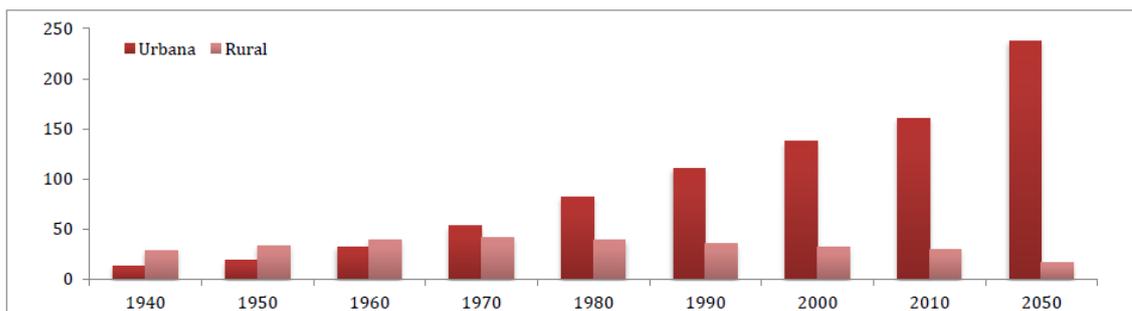


Figura 1.1 - Histórico e projeção de crescimento populacional para 2050.
Fonte: IBGE, 2010.

Este processo de crescimento dos centros urbanos é encontrado em todo o mundo, e está ilustrado pela Figura 1.2.

Ao longo do tempo a expressão "sustentável" destacou-se em diversos aspectos. Em muitas vezes escutou-se ou leu-se em algum lugar: "desenvolvimento sustentável"

"crescimento sustentável". Com o passar do tempo, este adjetivo se tornou substantivo: sustentabilidade.

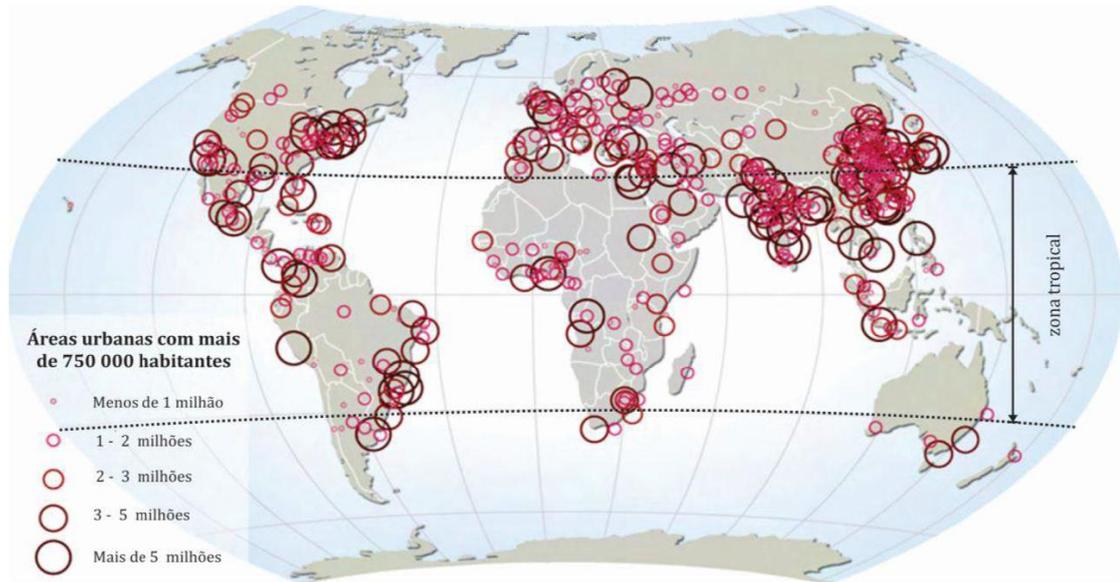


Figura 1.2 - Processo de metropolização no mundo.
Fonte: Martins, 2014.

Um das definições mais comuns para Desenvolvimento Sustentável é "o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das gerações futuras"; significa possibilitar que as pessoas, agora e no futuro, atinjam um nível satisfatório de desenvolvimento social, econômico, de realização humana e cultural, fazendo ao mesmo tempo, um uso razoável dos recursos da Terra e preservando as espécies e os habitats naturais (WWF, 2013). Esta questão, hoje em dia, está inserida em todos os aspectos da sociedade, no planejamento da infraestrutura, das cidades e matriz energética dos países.

Existem normas e códigos locais, além de certificações de sustentabilidade para diversos produtos, tais como: materiais reciclados, reutilizáveis/reutilizados, madeiras certificadas e etc. Ademais, são incentivados o consumo de bens e serviços sustentáveis e eficientes, existindo selos e certificados para: equipamentos elétricos/gás, automóveis e até edificações sustentáveis (*GreenBuildings*).

Atualmente, o LEED, *Leadership in Energy and Environmental Design*, (USGBC, 2014) é um sistema internacional de certificação e orientação ambiental para edificações, utilizado em diversos países ao redor do mundo, que tem como objetivo incentivar a transformação dos projetos, obra e operação das edificações, com o foco na sustentabilidade

(GBC Brasil, 2014). O sistema de avaliação desta certificação divide-se em 7 dimensões, cada uma com pré-requisitos obrigatórios e créditos que conferem pontuação à edificação, tais como: Espaços Sustentáveis, Eficiência no uso da Água, Energia e Atmosfera, Materiais e Recursos, Qualidade do Ambiente Interno, Inovação, Processos e Prioridade Regional. A categoria de Energia e Atmosfera promove a eficiência energética nas edificações por meio de estratégias simples e inovadoras, como por exemplo simulações termoenergéticas, medições e verificações, comissionamento de sistemas, utilização de equipamentos e sistemas eficientes e produção local de energia. Além de garantir pontuação pela produção de energia, esta pode ser contabilizada como recurso não utilizado da concessionária local, o que garante pontuação a mais para a edificação em certificação.

O LEED, certificação de edificações mais utilizada atualmente ao redor do mundo, é verificado também no mercado brasileiro, ilustrado pelo gráfico da Figura 1.3.

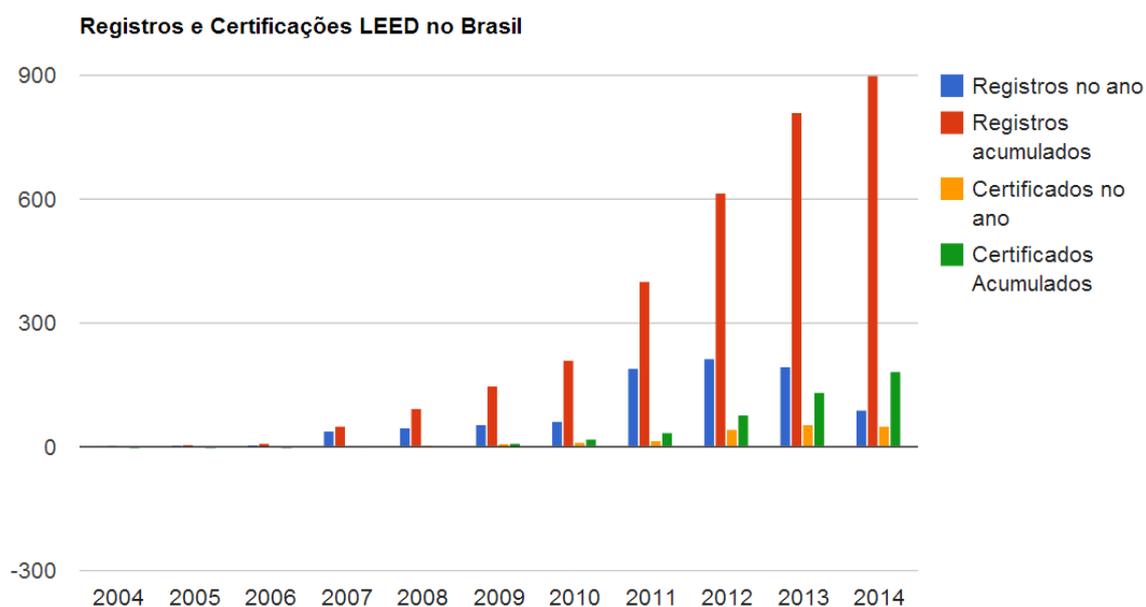


Figura 1.3 - Crescimento da Certificação LEED no Brasil.

Fonte: GBC Brasil, 2014.

A produção de energia na própria edificação tem sido incentivada por outros programas de certificação das edificações, como: Aqua, Programa Brasileiro de Etiquetagem do PROCEL, Selo Casa Azul da Caixa e o Living Building Challenge. Todos estes processos de certificação abordam diretrizes de eficiência energética, uma vez que aproximadamente 48% do consumo final energético é ocasionado pelas edificações dos setores público, comercial e residencial (BEN 2014).

Durante os últimos anos, os setores de energia de diferentes países estão sofrendo transformações e pressões políticas para mudarem suas matrizes energéticas, tornando-as mais sustentáveis. A diversificação das matrizes energéticas, através de fontes renováveis e também a descentralização da produção de energia, através da mini e microgeração, poderá ter benefícios no âmbito do mercado de produção e variação dos preços, menor suscetibilidade às influências de eventos globais que envolvam recursos primários e importância no aspecto ambiental de produção, com recursos renováveis e "ilimitados" sem prejudicar o meio em que se vive.

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) a matriz energética brasileira é fundamentalmente hidráulica e pode ser visualizada pelo gráfico na Figura 1.4.

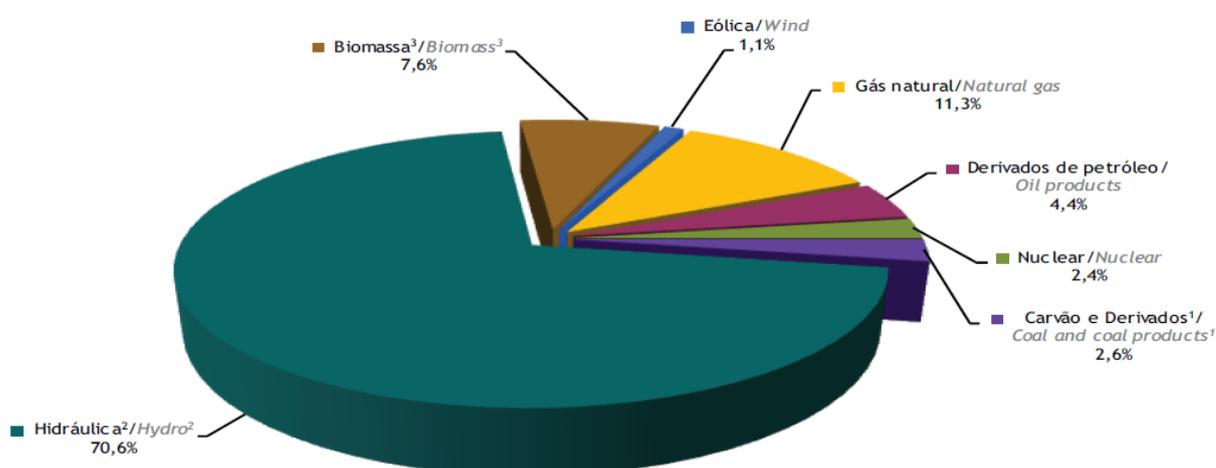


Figura 1.4 - Oferta interna de energia elétrica por fonte.
Fonte: BEN 2014.

Constata-se pelo gráfico da Figura 1.4 a quase dependência do Brasil por uma fonte de energia, a hidráulica, que depende de efeitos climáticos como a pluviosidade das regiões e de impactos ambientais através dos grandes reservatórios das barragens. O cenário brasileiro segue uma linha diferente do cenário global, basicamente de origem fóssil, uma vez que, juntas, as fontes renováveis de energia somam 79,3% do total (hidráulica, biomassa e eólica). Historicamente, constata-se a preferência pela energia hidráulica, entretanto, também observa-se um crescimento da geração de energia térmica nos últimos anos.

Entre as tecnologias de obtenção de energia elétrica de forma sustentável e "limpa" ao ambiente destaca-se a energia solar fotovoltaica. Esta é uma forma não poluente, silenciosa, eficiente e não prejudicial ao meio ambiente, que pode ser um novo e importante recurso dentro da matriz energética nacional. Basicamente o que se precisa para esta implantação é o

recurso solar (radiação solar), espaço para a instalação de usinas fotovoltaicas, conexão com o sistema de produção e transmissão de energia e desenvolvimento nos componentes que formam este sistema.

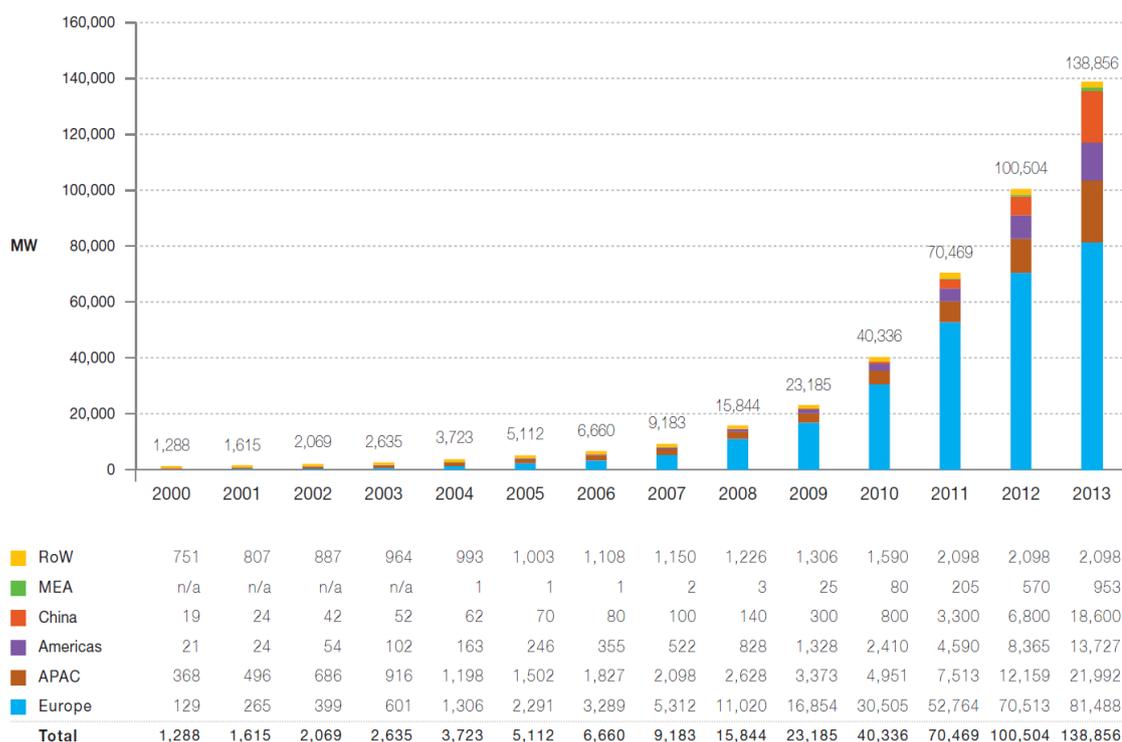
Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica podem ser integrados à edificação, posicionados e orientados para o melhor aproveitamento da radiação solar do local. Em países como a Alemanha, Japão, Estados Unidos e Espanha, os sistemas fotovoltaicos integrados à edificação têm auxiliado as fontes convencionais de energia na redução do pico de demanda e, além disso, a sua aplicação em grande escala tem contribuído de forma a equilibrar o sistema de geração nos períodos em que existe maior consumo de energia (Jardim, 2007).

A Alemanha, a partir de 1988, começou uma política de incentivos para a promoção da energia fotovoltaica. Em 1991 foi lançado o Programa 1000 telhados com o financiamento da instalação nas coberturas das edificações. Isto possibilitou a afirmação desta tecnologia no país. Para consolidar este recurso energético, anos mais tarde, foi lançado o Programa 100.000 Telhados, em 1999, o que garantiu a criação de um novo mercado de energia no país e assim fomentar este mercado em diversos outros centros. O Japão, em 1974, iniciou o *Sunshine Project*, um programa de incentivo às tecnologias fotovoltaicas. Por ser um país muito povoado, com grande demanda de energia elétrica e com escassez de áreas livres, o programa fez com que as edificações públicas fossem as primeiras com a integração de módulos fotovoltaicos na coberturas. A tecnologia fotovoltaica tem aumentado a sua representatividade no cenário energético mundial e a Figura 1.5 mostra o crescimento de instalações fotovoltaicas.

O Brasil apresenta níveis de incidência de radiação solar, na maior parte do território nacional, superior aos encontrados nos países da Europa, Japão e Estados Unidos, por exemplo. É por isto que o aproveitamento da energia proveniente do sol para a geração de energia elétrica torna-se uma das estratégias de desenvolvimento sustentável para o país.

Em agosto de 2011, a ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica tornou pública a chamada Nº. 013/2011 "Arranjos técnicos e comerciais para a inserção da geração fotovoltaica na matriz energética brasileira". Trata-se de uma chamada para projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) nesta área, incluída pela agência na lista de assuntos estratégicos. Os objetivos gerais buscados por este P&D são: facilitar a inserção fotovoltaica na matriz energética brasileira; viabilizar economicamente a produção, instalação e monitoramento da geração solar fotovoltaica para injeção de energia elétrica nos sistemas de distribuição e/ou transmissão; incentivar o desenvolvimento no país de toda a cadeia produtiva da indústria solar fotovoltaica com a nacionalização da tecnologia empregada;

fomentar o treinamento e a capacitação de técnicos especializados neste tema em universidades, escolas técnicas e empresas; estimular a redução de custos da geração solar fotovoltaica com vistas a promover a sua competição com as demais fontes de energia; propor e justificar aperfeiçoamentos regulatórios e/ou desonerações tributárias que favoreçam a viabilidade econômica da geração solar fotovoltaica, assim como o aumento da segurança e da confiabilidade do suprimento de energia.



RoW: Rest of the World. MEA: Middle East and Africa. APAC: Asia Pacific.

Figura 1.5 - Evolução global da capacidade instalada de módulos fotovoltaicos (2000-2013).
Fonte: EPIA, 2014.

Ainda nesta linha de planejamento, em abril de 2012, a ANEEL publicou a Resolução Normativa N^o. 482 que "Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências". Esta resolução permite que sistemas fotovoltaicos - e outras formas de geração de energia a partir de fontes renováveis com até 1 MW de potência instalados em residências, empresas e/ou terrenos se conectem a rede elétrica de forma simplificada, atendendo o consumo local e injetando o excedente na rede, ganhando créditos de energia. Desta forma pode-se zerar o custo com a energia elétrica através da geração de energia equivalente ao consumo. Ao final de um mês é realizado o balanço de energia, ou seja, o que foi produzido e injetado na rede e o que foi consumido.

Estes créditos podem ser utilizados em meses seguintes com validade de 36 meses. Além disto, os créditos poderão ser utilizados para compensar o consumo em outras unidades previamente cadastradas para este fim e atendidas pela mesma distribuidora, basta o titular da conexão com a concessionária possuir o mesmo CPF ou CNPJ da unidade com o sistema fotovoltaico conectado à rede.

O cenário atual de produção e transmissão de energia elétrica no Brasil pode tender à geração distribuída (GD), onde o uso integrado ou isolado de recursos modulares de pequeno porte por concessionárias, consumidores e terceiros beneficiam o sistema elétrico e ou consumidores específicos. Existem diversos planos de investimento em universidades, políticas de incentivo e subsídios para o desenvolvimento de tecnologias para tornar as fontes de energia renováveis mais acessíveis e competitivas no mercado nacional.

1.1 Justificativas para o Trabalho

Entre as diversas atividades propostas à ANEEL como parte do projeto "*Inserção da Geração Solar Fotovoltaica Urbana Conectada à Rede Elétrica em Porto Alegre*" consta "realizar um inventário de locais mais adequados à instalação de usinas solares urbanas em Porto Alegre". O projeto citado foi um dos selecionados na Chamada Pública nº 13/2011 da ANEEL e está em desenvolvimento com a participação de diversas empresas, onde se destacam: CEEE-GT, CEEE-D, Trensurb, e as universidades UFRGS e UFSM. A motivação para a realização desta dissertação foi desenvolver metodologia para a realização de tal inventário. Além disto, justificam este estudo:

- A predominância hidráulica na matriz energética brasileira causa consideráveis danos ambientais para a sua implantação, mesmo considerada uma fonte renovável, dada a deficiência na regularidade das chuvas, devem-se diversificar as fontes de energia no Brasil.
- A realização de estudos para a implantação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, integrados às edificações ou em usinas, classificando-se como mini ou microgeração dentro da Normativa N°. 482 da ANEEL e dentro do sistema de compensação de energia (*net metering*).
- A realização de estudos e simulações para diferentes fontes de energia para disseminar a utilização e desmistificar alguns conceitos de inviabilidades e/ou elevados investimentos para a aplicação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

- A integração de sistemas fotovoltaicos à arquitetura deve ser vista como uma prática para os novos edifícios, pois reduzirá a demanda por energia elétrica da rede.
- A integração de sistemas de energia renovável conectados à rede elétrica dentro do meio urbano, fazendo parte do sistema de transmissão e distribuição de energia e do contexto de geração distribuída.
- No Brasil, mais de 40% da energia elétrica é consumida por edificações residenciais, comerciais e públicas (BEN, 2014). Dentro do cenário urbano, a instalação de sistemas fotovoltaicos tem como objetivo reduzir a demanda por energia elétrica da rede de distribuição.
- Sistemas fotovoltaicos podem possuir diversas funções dentro do meio urbano: proteções solares em aberturas envidraçadas, coberturas para passagem de pedestres, coberturas em estacionamentos de veículos, redução de carga térmica com instalação sobre coberturas de edifícios e casas, disseminação de novas tecnologias para a população, fomentar a cultura de energias renováveis e eficiência energética.
- A energia solar ainda não tem papel relevante na matriz energética do Brasil.
- A elaboração de mapas solares para o meio urbano, com todas as condicionantes de sombreamentos do entorno, está sendo desenvolvidos para diversas cidades ao redor do mundo. As ferramentas de apoio ao usuário comum, para tomada de decisão sobre o investimento em sistemas fotovoltaicos, facilitam a disseminação da produção de energia por sistemas fotovoltaicos conectados à rede.
- A identificação das melhores áreas e espaços para instalação de módulos fotovoltaicos, sejam eles coberturas de edificações, fachadas ou coberturas em calçadas e demais estruturas do ambiente urbano, auxiliam e concorrem para a criação de mentalidade de consumo racional dos recursos e eficiência energética na sociedade.

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo estimar o potencial de geração de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos dentro do meio urbano tendo como cenário a cidade de Porto Alegre. Realizada através de softwares de modelagem tridimensional e de simulação computacional. Além disso, deverá servir de estímulo para a popularização deste tipo de sistema, bem como suas aplicações integradas à edificação. Para a realização deste trabalho foram realizadas algumas etapas, objetivos secundários, tais como:

- Selecionar regiões da cidade de mesmo perfil de uso e ocupação para a elaboração de mapas geométricos 3D com a volumetria das edificações: área de projeção das edificações e seus telhados e coberturas, alturas, elevações e a disponibilidade de espaço para instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede;
- Estudar os efeitos de sombreamentos em diferentes regiões a partir de software de modelamento tridimensional e volumes conceituais;
- Estimar a radiação solar incidente sobre as superfícies de telhados e coberturas em diferentes tipo de regiões;
- Estimar a produção de energia fotovoltaica na cidade de Porto Alegre para diferentes perfis de edificações;
- Estimar o consumo energético anual para cada tipo de edificação estudada a partir do desenvolvimento de modelos geométricos tridimensionais e a utilização de software de análise termoenergética de edificações;
- Realizar análise de balanço energético global em escala anual para cada tipo de edificação estudada e a análise financeira para cada caso de investimento;
- Montar mapas solares para cada região através dos resultados obtidos

1.3 Organização do Trabalho

Divide-se o presente trabalho em oito capítulos: Introdução; Recurso Solar; Revisão de Conceitos; Revisão Bibliográfica; Cenário Energético Local; Metodologia; Resultados e Conclusões.

A Introdução contextualiza o crescimento demográfico no mundo, a relação com crescimento das cidades e demanda por energia, as questões energéticas, além de abordar a eficiência energética em edificações.

O capítulo 2 retrata o Sol como recurso energético e o vasto potencial de aproveitamento da energia proveniente.

O capítulo 3 revisa o conceito sobre sistemas de potência e produção de energia, aplicações de sistemas fotovoltaicos em edificações e possíveis efeitos de sombreamento.

O capítulo 4, Revisão Bibliográfica, reúne a pesquisa sobre instalações fotovoltaicas, aplicadas ou integradas às edificações, em ambientes urbanos. Além disso, discorre sobre os mapas solares urbanos de diversas cidades ao redor do mundo e que servem como ferramentas para a tomada de decisão, por parte da população, no investimento em produção de energia

por sistemas fotovoltaicos. Ainda, retrata as tecnologias e ferramentas atuais de confecção dos mapas solares, como sensoriamento remoto, mapeamento e escaneamento de cidades por laser (LiDAR) e mapas com informações referenciadas e de fácil acesso (GIS).

O capítulo 5 apresenta a Metodologia desenvolvida para a criação de mapas de irradiação solar e estudo de projeção de sombreamentos para quatro tipologias básicas de bairros da cidade de Porto Alegre. Além disto, estima-se a capacidade de instalação e produção de energia e, através de várias simulações computacionais, estabelece-se um perfil de uso e consumo energético médio típico para cada região e os investimentos associados.

O capítulo 6 apresenta os resultados para as etapas da metodologia descrita. Os resultados envolvem análises solares para o ano todo e período críticos, estimativa de capacidade de instalação, perfil de consumo energético típico, produção de energia elétrica, balanço de energia e fluxo de caixa para cada tipologia de estudo.

O capítulo 7, Conclusões, apresenta as considerações finais sobre o trabalho desenvolvido, a relação do trabalho com o cenário energético atual, dificuldades encontradas, limitações aferidas ao longo do processo e, ainda, elenca uma série de sugestões para os próximos trabalhos que, porventura, possam ser inspirados e/ou melhorados.

2 RECURSO SOLAR

O Sol é a principal fonte de energia para a Terra. Além de ser responsável pela manutenção da vida no planeta, a radiação solar é uma inesgotável fonte energética, possuindo potencial de utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia, como por exemplo, a térmica e a elétrica. A energia solar é aproveitada por organismos vivos, é responsável por eventos meteorológicos e pelo clima na Terra. Estima-se que o Sol tenha reserva de hidrogênio suficiente para alimentar as reações termonucleares por mais 5 bilhões de anos (NASA, 2013)

2.1 Radiação Solar Extraterrestre

A norma ASTM E490 define qual a irradiância espectral extraterrestre, cuja integração da curva definida vale $1366,1 \text{ W/m}^2$. Além desta norma, outras duas irradiâncias espectrais considerando massas de ar (AM: *Air Mass*, em inglês) da atmosfera terrestre, são definidas pela ASTM G-173-03. As irradiâncias espectrais para estas 3 situações estão demonstradas no gráfico na Figura 2.1.

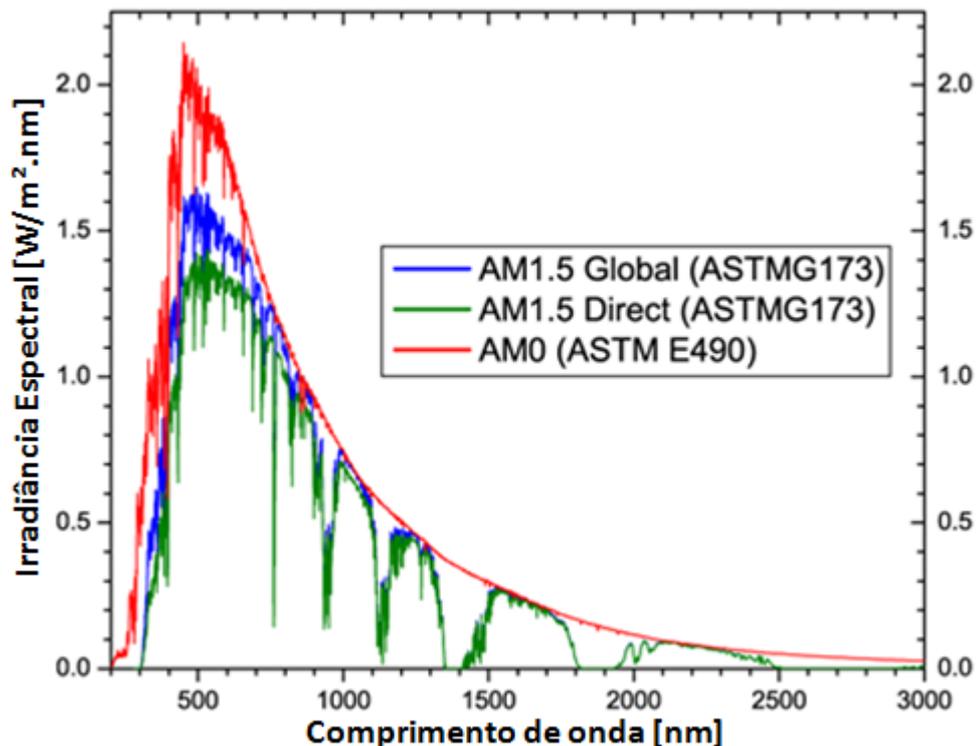


Figura 2.1 - Gráfico dos espectros solares padrões extraterrestre (AM0) e terrestres (AM1.5)
Fonte: Adaptado de ASTM, 2014.

A energia proveniente da radiação solar (irradiância solar) quando medida em um plano perpendicular à direção da propagação dos raios solares no topo da atmosfera recebe o nome de "Constante Solar" e corresponde ao valor de 1367 W/m^2 . Este valor pode ser adquirido com a integração, ao longo de todos os comprimentos de onda, da curva de Irradiância Espectral para AM0. A energia solar que incide na superfície terrestre é abundante e, considerando a área projetada do globo terrestre, num período de 1 hora, calcula-se que a potência total disponibilizada pelo Sol à Terra, no topo da atmosfera é de aproximadamente 174 mil TW e, incidente sobre a superfície terrestre, aproximadamente 94 mil TW. Levando em consideração que no ano de 2011 o consumo mundial de energia primária foi 143 mil TW.h, pode-se afirmar que em um intervalo de duas horas (188 mil TW.h), a energia solar é capaz de suprir toda demanda de energia.

2.1.1 Componentes da Radiação Solar

A Terra intercepta parte de toda radiação emitida pelo Sol e uma parcela desta radiação sofre alterações ao adentrar na atmosfera terrestre. A atmosfera é formada por uma mistura de gases, água e partículas suspensas. Em certos comprimentos de onda são observadas grandes atenuações devido à interação de algum componente da atmosfera sobre a radiação solar. Devido a este comportamento, consegue-se entender e decompor a radiação incidente na superfície terrestre, em um dado plano de observação, em duas componentes: direta e difusa.

Pode-se dizer que a Irradiância Direta (G_B) provém unicamente do disco solar, chegando ao solo ou superfícies sem ter sofrido mudança de direção, além da refração atmosférica. Já a componente de Irradiância Difusa (G_D), deriva da esfera celeste, sofrendo diversos espalhamentos e reflexões na atmosfera terrestre. Somando estas duas componentes obtém-se a Irradiância Global (G).

Verifica-se também que se uma superfície arbitrária estiver inclinada com relação a horizontal, existirá uma terceira componente, refletida pelo ambiente do entorno, chamada Irradiância de Albedo (G_R). Esta componente da Irradiância Global leva em consideração o índice de reflexão das superfícies como o solo, vegetação, obstáculos e terrenos rochosos por exemplo. Pode-se descrever a Irradiância Global em Plano Inclinado (G_T) através da Equação 2.1.

$$G_T = G_B + G_D + G_R \quad (2.1)$$

A Tabela 2.2 apresenta valores típicos de albedo para diferentes tipos de superfícies.

Tabela 2.1 - Valores típicos de albedo para diferentes tipos de superfícies.
Fonte: Markvart e Castañer, 2004.

| Superfície | Albedo |
|--|-------------|
| Gramado | 0,18 – 0,23 |
| Grama seca | 0,28 – 0,32 |
| Solo descampado | 0,17 |
| Asfalto | 0,15 |
| Concreto novo (sem ação de intempéries) | 0,55 |
| Concreto (em construção urbana) | 0,2 |
| Neve fresca | 0,8 – 0,9 |
| Água, para diferentes valores de altura solar: | |
| $\alpha > 45^\circ$ | 0,05 |
| $\alpha = 30^\circ$ | 0,08 |
| $\alpha = 20^\circ$ | 0,12 |
| $\alpha = 10^\circ$ | 0,22 |

A Figura 2.2 ilustra as 3 componentes de radiação solar incidente sobre uma superfície inclinada qualquer: direta, difusa e devido o albedo.

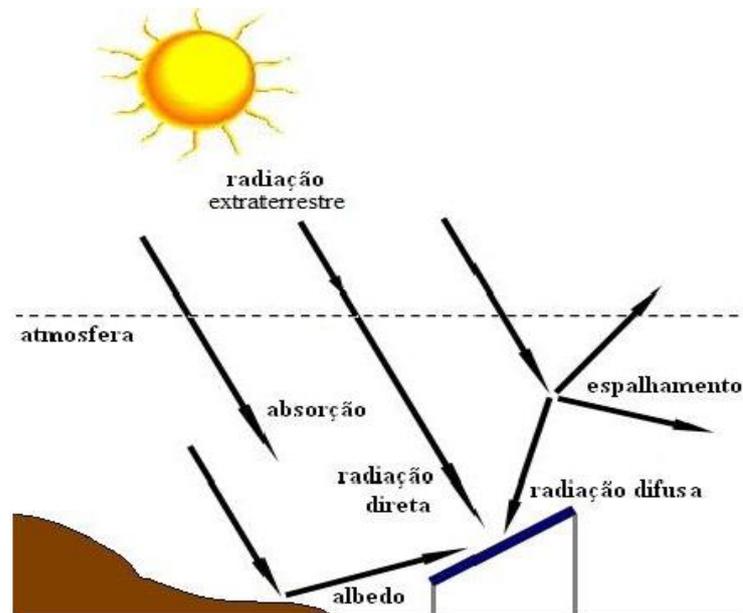


Figura 2.2 - Componentes da Radiação Solar incidente em uma superfície inclinada.
Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, 2014.

2.1.2 Irradiação Solar na Superfície Terrestre

A Figura 2.3 mostra a distribuição espacial da irradiância solar média (W/m^2) que incide sobre a superfície terrestre.

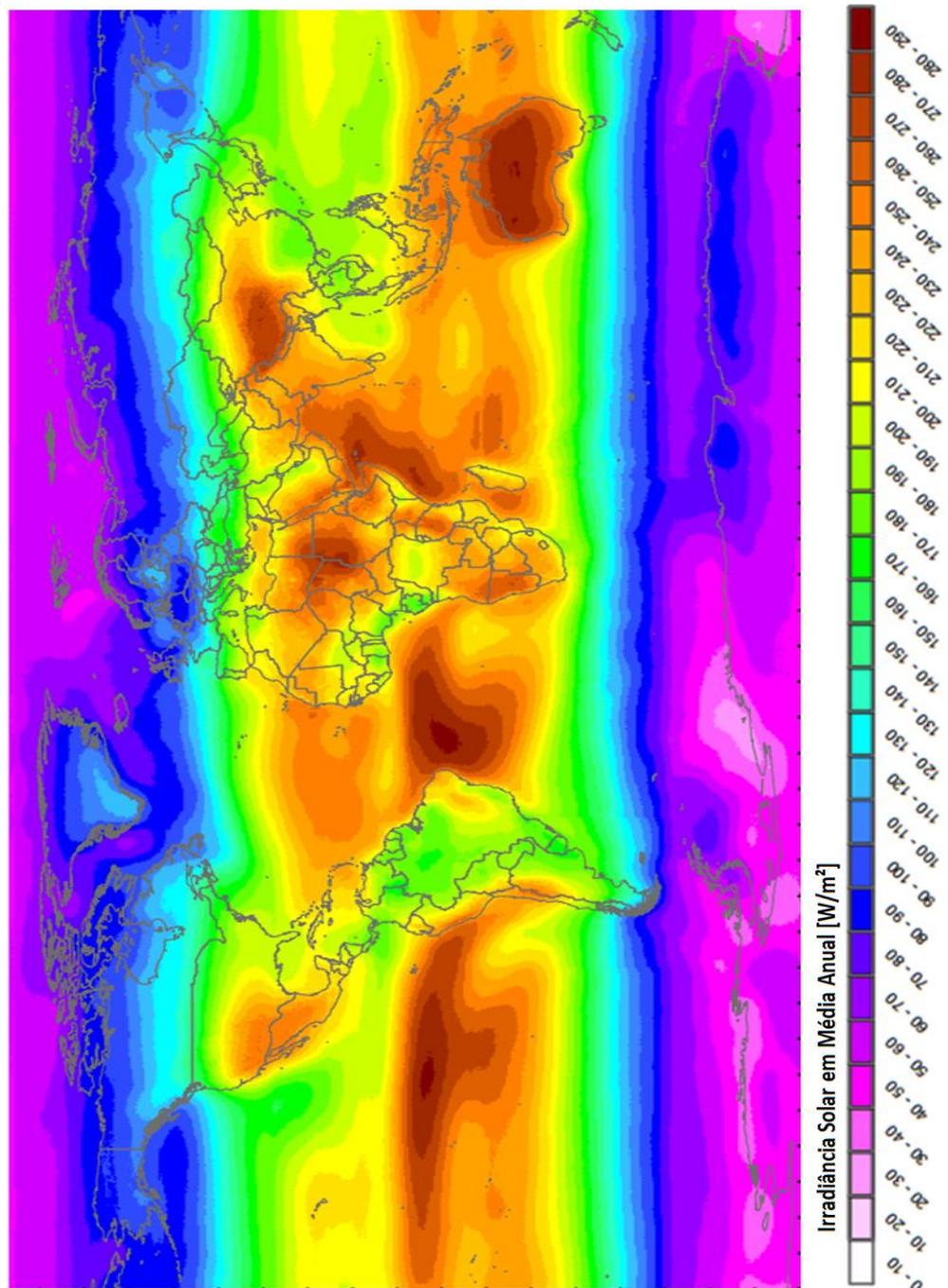


Figura 2.3 - Mapa da irradiação solar em média anual.
Fonte: Adaptado de SoDa, 2014.

Mapas de irradiação solar foram criados a partir de dados medidos na superfície terrestre e de imagens de satélites meteorológicos coletadas entre os anos de 1990 e 2004. No Brasil, o Atlas Brasileiro de Energia Solar (MCT, 2006) apresenta diversos mapas de irradiação solar para determinados períodos com médias mensais e anuais, visualizado na Figura 2.4.

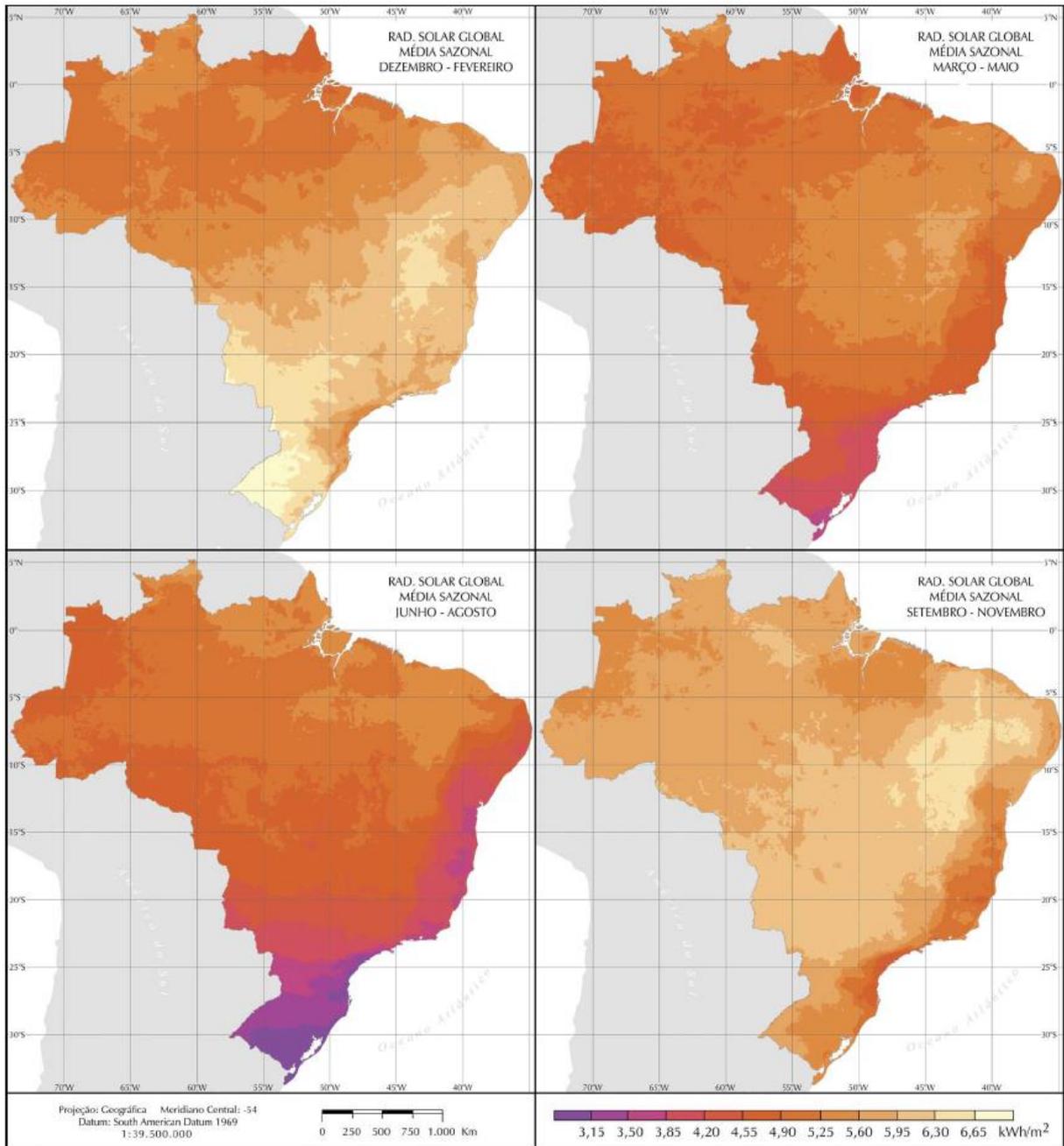


Figura 2.4 - Radiação Solar Global em Médias Sazonais.
 Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2006

2.2 Geometria Sol-Terra

A Terra descreve uma trajetória de forma elíptica em sua órbita ao redor do Sol. A excentricidade desta elipse é muito pequena e pode ser simplificada para uma trajetória circular com o Sol no centro desta órbita. O eixo de rotação da Terra com relação ao plano normal da órbita apresenta uma inclinação de aproximadamente $23,45^\circ$. A Terra, também gira

ao redor de um eixo central, chamado eixo polar e, este movimento, é responsável pela sucessão dos dias e noites. A Figura 2.5 esquematiza esta trajetória.

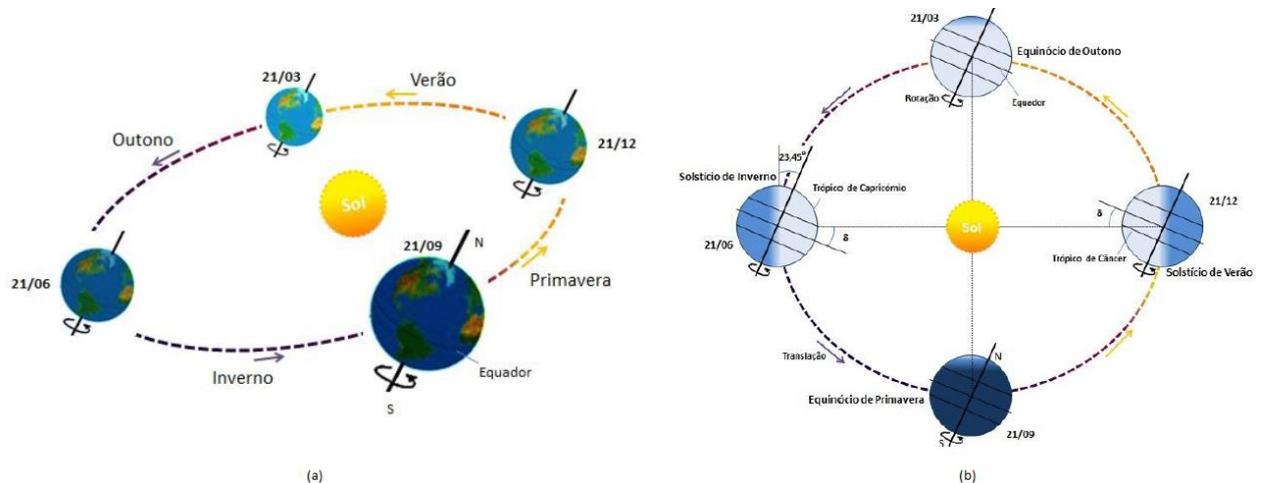


Figura 2.5 - (a) Órbita da Terra em torno do Sol indicando as estações do ano para o hemisfério sul; (b) Indicação da inclinação de 23,45° com relação ao eixo polar (norte-sul)
Adaptado de: Manual de Engenharia Fotovoltaica, 2014.

Verifica-se que o ângulo formado entre o plano equatorial e a linha que une os centros da Terra e do Sol muda continuamente, resultando nas estações do ano. Este ângulo é conhecido como Declinação Solar (δ), e pode ser estimado segundo a Equação 2.2.

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left[\frac{360}{365} (d_n + 284) \right] \quad (2.2)$$

onde d_n é o número do dia do ano no calendário Juliano, variando de 1 (1° de janeiro) até 365 (31 de dezembro); δ é dado em radianos. Este ângulo vale zero nos equinócios de primavera e outono e 23,45° no solstício de inverno e -23,45° no solstício de verão. Esta expressão considera que a velocidade angular da Terra em sua órbita é constante e que durante um dia a variação máxima da declinação é menor do que 0,5°, portanto, constante ao longo do dia.

2.2.1 Posição do Sol em Relação a uma Superfície Horizontal e Inclinada

É muito comum considerar, para verificações de posição solar, o céu como uma esfera e a Terra fixa em seu centro. Esta forma é chamada de esfera solar e pode representar o movimento aparente do Sol (Figura 2.6), ou seja, uma representação do Sol ao redor da Terra.

Assim, o Sol descreve diariamente um movimento circular ao redor da Terra, cujo diâmetro varia dia a dia, ocorrendo máximo no solstício de verão e mínimo no solstício de inverno.

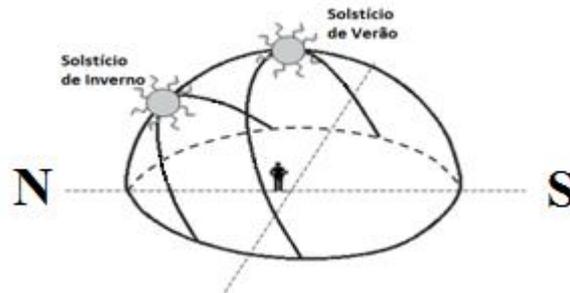


Figura 2.6 - Altura da posição solar para verão e inverno.
Adaptado de: Luque e Hegedus, 2011.

As relações geométricas entre os raios solares, são descritas através de alguns ângulos que podem ser visualizados na Figura 2.7.

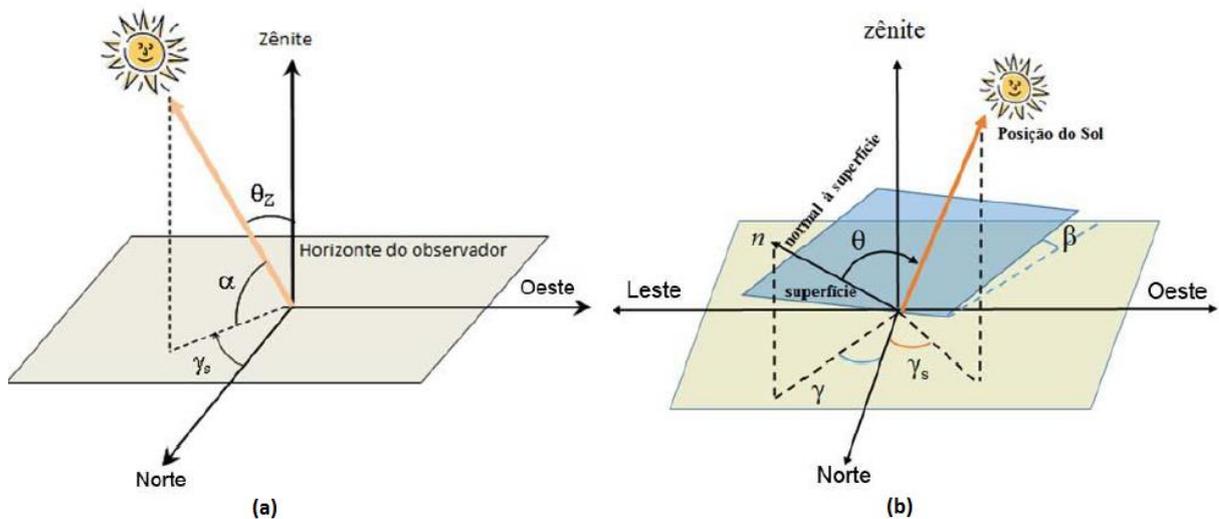


Figura 2.7 - (a) Ilustração para os ângulos da posição do Sol com relação a uma superfície no plano horizontal; (b) Ilustração para os ângulos da posição do Sol com relação a uma superfície inclinada no mesmo plano horizontal.

Adaptado de: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, 2014.

As relações e ângulos são determinados:

- Ângulo Zenital (θ_z): ângulo formado entre os raios do Sol e a vertical local (zênite);
- Altura ou Elevação Solar (α): ângulo entre os raios do Sol e a projeção dos mesmos sobre o plano horizontal (horizonte);

Através da Figura 2.7 (a) verifica-se a complementaridade dos ângulos mencionados, ou seja: $\theta_z + \alpha = 90^\circ$.

- Ângulo Azimutal do Sol (γ_s): é o ângulo entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção norte-sul (horizonte). O norte geográfico é a referência (0°) e, por convenção, positivo quando a projeção se encontrar a leste e negativo quando a oeste. ($-180^\circ \leq \gamma_s \leq +180^\circ$);
- Ângulo Azimutal da Superfície (γ): ângulo entre a projeção da normal à superfície no plano horizontal e a direção norte-sul. Este ângulo comporta-se com as mesmas orientações do ângulo azimutal do sol;
- Inclinação da superfície de captação (β): ângulo entre o plano da superfície em questão e o plano horizontal [$0^\circ, 90^\circ$];
- Ângulo de incidência (θ): ângulo formado entre os raios do sol e a normal à superfície de captação;
- Ângulo Horário do Sol ou Hora Angular (ω): deslocamento angular leste-oeste do meridiano do Sol, a partir do meridiano local, e consequência do movimento de rotação da Terra. Cada hora solar (H_s) corresponde a um deslocamento de 15° . Por convenção adota-se zero grau ao meio dia ($12h = 0^\circ$) e valores positivos para horários após e negativos para horários anteriores às 12h.

$$\omega = (H_s + 12) \cdot 15^\circ \quad (2.3)$$

A partir do ângulo horário, calcula-se o ângulo zenital (θ_z):

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \omega \cos \varphi + \sin \delta \sin \varphi \quad (2.4)$$

onde φ é a latitude local, δ é a declinação solar e ω é o ângulo horário. A partir desta equação chega-se ao cálculo da duração de um dia para um determinada localidade e época do ano. Para isto considera-se o ângulo zenital igual a 90° ($\theta_z = 90^\circ$) e calcula-se o ângulo horário, para este caso igual à hora angular do pôr do sol (ω_s). Como o dia varia de $-\omega_s$ até ω_s , basta duplicar o valor de ω_s e converter a hora angular para hora solar ($15^\circ = 1h$), obtendo-se assim o número teórico de horas de sol para o dia e local em estudo.

O ângulo horário do pôr do sol pode ser obtido através da Equação 2.5.

$$\omega_s = \cos^{-1} \left(-\frac{\sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta} \right) = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (2.5)$$

A partir disto, o Número Teórico de Horas de Sol (N) pode ser calculado conforme a Equação 2.6.

$$N = \frac{2}{15} \omega_s \quad (2.6)$$

A Hora Solar é baseada no movimento angular aparente do Sol através do céu e, as 12 horas solar é a hora em que o Sol cruza o meridiano do observador, entretanto, esta hora não coincide com a hora oficial da localidade (hora do relógio). A Equação 2.7 fornece a diferença entre a hora solar e a hora oficial (em minutos):

$$\text{Hora Solar} - \text{Hora Oficial} = 4.(L_{st} - L_{loc}) + E_t \quad (2.7)$$

onde: L_{st} é a longitude padrão (no caso do Brasil é Brasília); L_{loc} é a longitude local; e E_t é a equação do tempo (definida pela Equação 2.11).

$$E_t = (0.000075 + 0.001868 \cos \Gamma - 0.032077 \sin \Gamma - 0.014615 \cos 2\Gamma). 229,18 \quad (2.8)$$

onde: $\Gamma = 2\pi(n - 1)/365$, sendo n o dia Juliano, contado de 1 a 365 a partir de 01 de janeiro (n=1), 02 de janeiro (n=2) até 31 de dezembro (n=365).

O ângulo de incidência (θ), entre os raios de sol e uma superfície com orientação (γ) e inclinação (β) qualquer, pode ser encontrado utilizando-se a Equação 2.9.

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \cos \beta \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \cos \varphi + \cos \beta \cdot \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega + \\ & \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \sin \varphi - \sin \beta \cos \gamma \sin \delta \cos \varphi \end{aligned} \quad (2.9)$$

Os ângulos (θ_z) e (θ) possibilitam o cálculo da componente direta da irradiância que incide de forma normal a um plano horizontal ($G_{d,h}$) ou a qualquer superfície com inclinação ($G_{d,\beta}$), desde que conhecida a componente direta da irradiância incidente sobre a superfície, como mostra a Equação 2.10.

$$\frac{G_{d,\beta}}{G_{d,h}} = \frac{G_d \cos \theta}{G_d \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (2.10)$$

Esta informação é necessária para calcular a irradiância solar direta coletada por placas solares ou por módulos fotovoltaicos, por exemplo. A Figura 2.8 mostra a irradiância solar incidente sobre superfícies.

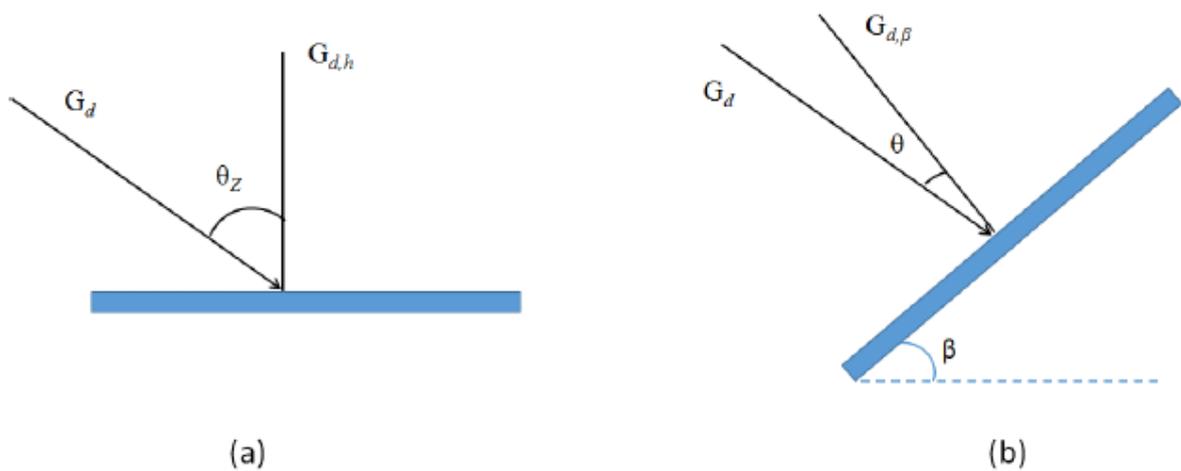


Figura 2.8 - (a) Irradiância direta incidente sobre uma superfície horizontal; (b) Irradiância direta incidente sobre uma superfície inclinada.

Adaptado de: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, 2014.

3 REVISÃO DE CONCEITOS

Os conceitos e terminologia sobre a tecnologia fotovoltaica e sistemas relacionados serão apresentados neste capítulo.

3.1 Geração Distribuída

A geração distribuída (GD) é definida como o uso integrado ou isolado de recursos modulares de pequeno porte por concessionárias, consumidores e terceiros em aplicações que beneficiam o sistema elétrico e ou consumidores específicos. O termo tem relação com outras expressões comumente utilizadas, tais como: autogeração, geração in situ, cogeração e geração exclusiva. Esse modelo de organização é diferente do que se conhece como geração centralizada ou tradicional, onde grandes centrais de geração e uma extensa rede de linhas de transmissão e de distribuição alimentam os diversos consumidores.

A capacidade dos consumidores, sejam eles residenciais, comerciais ou industriais, produzirem energia elétrica em suas próprias unidades consumidoras, ao invés de comprar de alguma concessionária ou sistema centralizado, poderá resultar em grandes mudanças nas tecnologias envolvidas e certamente na forma como são elaborados os negócios com a compra, venda e produção de energia elétrica. A geração distribuída não se limita em dimensões de geração (potência máxima ou mínima), podendo ser formada por unidades de baixa e alta potência.

A GD oferece inúmeras vantagens ao setor elétrico já que a disposição da unidade de geração próxima à carga permite a diminuição das perdas associadas ao transporte de energia elétrica, que advém do modelo tradicional de expansão do setor elétrico. Além disso, permite uma maior diversificação das tecnologias empregadas para produção de energia e, desta maneira, sua escolha pode ser feita em função dos requerimentos específicos da carga ou da disponibilidade dos recursos energéticos locais (Rodrigues, 2002).

3.2 Geração de Energia e Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Sistemas Elétricos de Potência (SEP) são grandes sistemas de energia que englobam a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. A ABNT NBR 5460 - Sistemas Elétricos de Potência (1992) apresenta uma definição mais geral e uma mais restrita. A definição mais ampla é: *"o conjunto de todas as instalações e equipamentos destinados à*

geração, transmissão e distribuição de energia elétrica". A segunda definição, mais particular, descreve a SEP como: "é um conjunto definido de linhas e subestações que assegura a transmissão e/ou a distribuição de energia, cujos limites são definidos por meio de critérios apropriados, tais como, localização geográfica, concessionária, tensão, etc.".

Normalmente, possui um fluxo de potência unidirecional, que se inicia na geração e passa pela transmissão até chegar nas cargas e consumidores finais, que seria a distribuição. A Figura 3.1 ilustra conceitualmente um SEP.

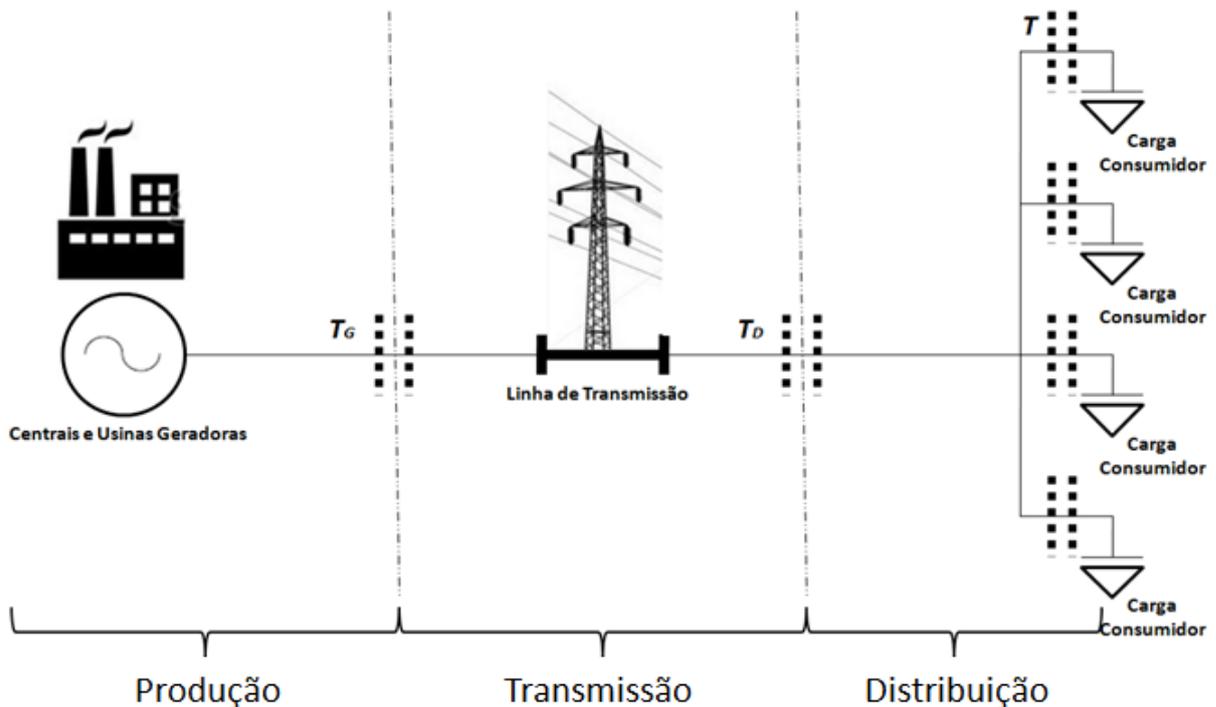


Figura 3.1 - Diagrama conceitual para um sistema elétrico de potência, onde: T_G é a transformação de elevação de tensão entre os subsistemas de produção e transmissão; T_D é a transformação de redução de tensão entre os subsistemas de transmissão e distribuição; T são os transformadores do subsistema de distribuição.

Adaptado de: Almeida, 2012.

Sistemas ou unidades de pequeno e médio porte também podem ser conectadas às redes de distribuição de baixa, média ou alta tensão, dependendo da sua capacidade, seguindo o conceito da geração distribuída (Prodist, 2011), que, hoje em dia, é muito utilizado no mundo. Um exemplo disto é uma unidade geradora de energia elétrica conectada à instalação elétrica de uma unidade consumidora que, após o balanço entre consumo e geração, se houver excedente este será injetado na rede.

Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFVR) dispensam o uso de acumuladores (baterias, por exemplo) porque a energia produzida pode ser injetada

diretamente na rede elétrica convencional ou consumida diretamente pela carga ligada. Normalmente neste tipo de sistema o gerador fotovoltaico atua como uma fonte complementar ao sistema elétrico ao qual está conectado.

A ANEEL, a partir da Resolução Normativa N° 482/2012, permite a partir de sistemas fotovoltaicos classificá-los como micro e minigeração e, ainda, participar do sistema de compensação de energia, que são definidos como:

- Microgeração distribuída: "central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras."
- Minigeração distribuída: "central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW para fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras."
- Sistema de compensação de energia elétrica: "sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração distribuída ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora ou de outra unidade consumidora de mesma titularidade da unidade consumidora onde os créditos foram gerados, desde que possua o mesmo Cadastro de Pessoa Física (CPF) ou Cadastro de Pessoa Jurídica (CNPJ) junto ao Ministério da Fazenda."

A ANEEL também estipulou a forma de medição para a participação no sistema de compensação de energia. A energia consumida e a injetada na rede de distribuição são medidas e registradas de forma separada por um medidor bidirecional ou por dois unidirecionais (um para cada "sentido" de energia). Desta maneira, a cada instante, somente um registro será realizado, após o balanço de energia entre a demanda (consumo) e a produção. A Figura 3.2 ilustra estas duas formas de medição. Um sistema fotovoltaico (FV) é um conversor da radiação solar em eletricidade. Tecnicamente corresponde às células fotovoltaicas, ou módulos fotovoltaicos ou a uma combinação elétrica entre eles. As células fotovoltaicas são associadas em série e/ou paralelo para, juntas, formarem um módulo

fotovoltaico. Dependendo do número de células associadas obtém-se um nível de tensão e corrente para o módulo, podendo atender a demanda de energia requerida. A Figura 3.3 ilustra a célula (em detalhe) e diferentes módulos fotovoltaicos.

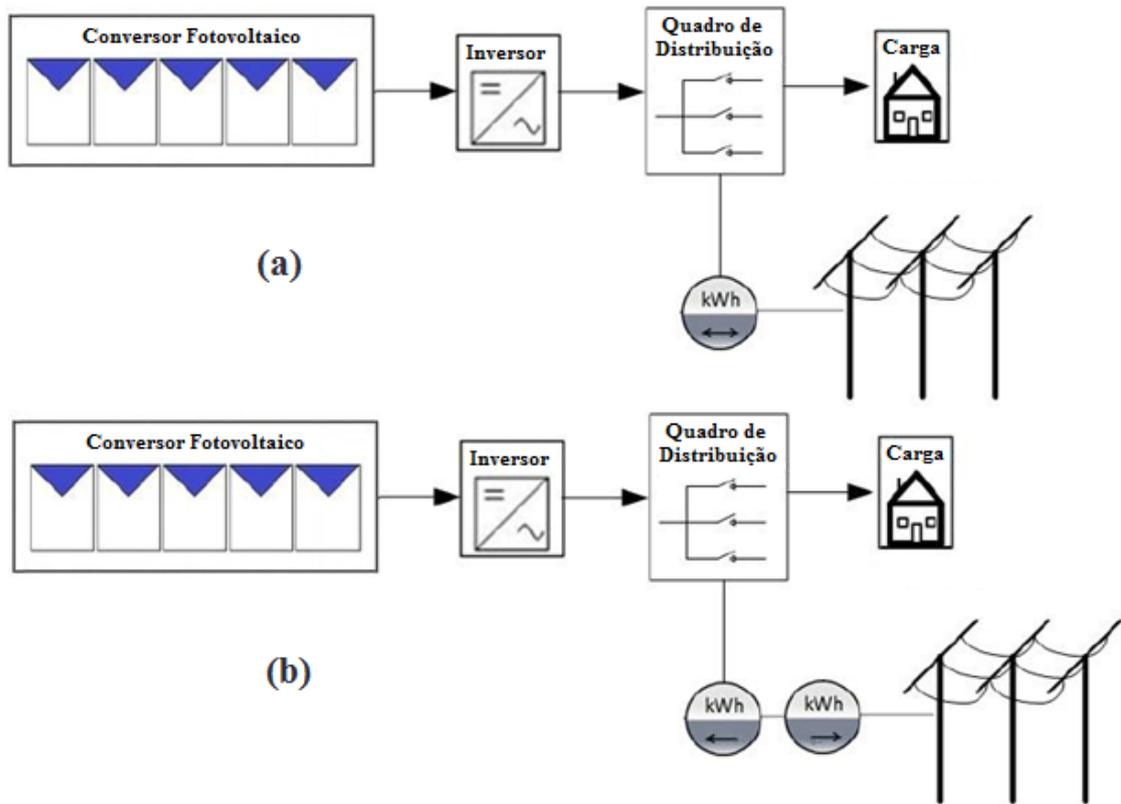


Figura 3.2 - (a) Medição bidirecional; (b) Medição unidirecional com dois instrumentos. Adaptado de: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, 2014.

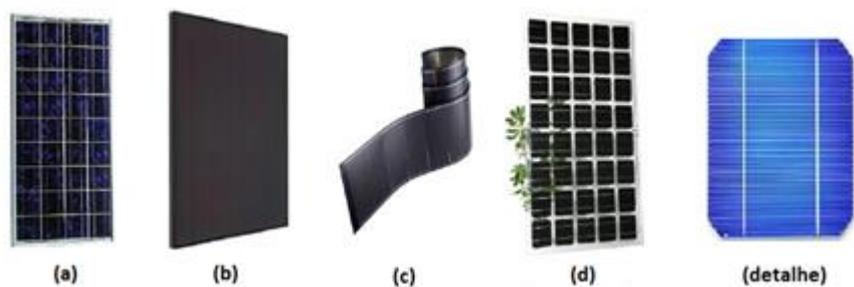


Figura 3.3 - Módulos fotovoltaicos: (a) silício policristalino, (b) silício amorfo, (c) filme fino com encapsulamento flexível, (d) silício monocristalino com encapsulamento de vidro. Em detalhe, uma célula fotovoltaica de silício monocristalino.

Adaptado de: Peraza, 2013

3.3 Aplicações em Edificações: BIPV e BAPV

Há muito tempo a aplicação de sistemas fotovoltaicos (SFV) nas edificações é estudada, seja para suprir a demanda de energia de um determinado equipamento, sistema ou, atualmente, diminuir o balanço de consumo energético e custos associados. A queda nos preços dos componentes de uma instalação fotovoltaica aliada à criação de novas pesquisas e mercados possibilita, cada vez mais, às pessoas utilizarem este tipo de tecnologia e fonte de energia elétrica.

Um sistema fotovoltaico quando é instalado em uma edificação, pode ser nomeado de duas formas: integrado ao edifício (BIPV - *Building-Integrated Photovoltaic*, em inglês) e anexado/aplicado na edificação (BAPV - *Building-Applied Photovoltaic*, em inglês).

Na utilização arquitetônica do tipo BAPV os módulos fotovoltaicos são instalados sobre partes da edificação como telhados, paredes e marquises e, normalmente sem as mesmas características como orientação, inclinação e aparência. Também são utilizados em retrofits, como investimento para redução de custos com eletricidade ou atuando como sombreamento de áreas envidraçadas. A Figura 3.4 ilustra este tipo de aplicação. Quando novas edificações são projetadas e construídas, os módulos fotovoltaicos podem ser instalados diretamente nas coberturas, fachadas e demais componentes arquitetônicos e, desta forma integrados, são denominados BIPV. A integração possibilita que a instalação fotovoltaica tenha a mesma orientação, inclinação, função e até mesmo aparência do que teria um outro material de fechamento, vedação ou da envoltória projetada (Figura 3.5). Hoje em dia até mesmo vidros fotovoltaicos são encontrados, possuindo boas propriedades térmicas e de controle da radiação transmitida para o interior dos espaços, além de produzir energia elétrica.

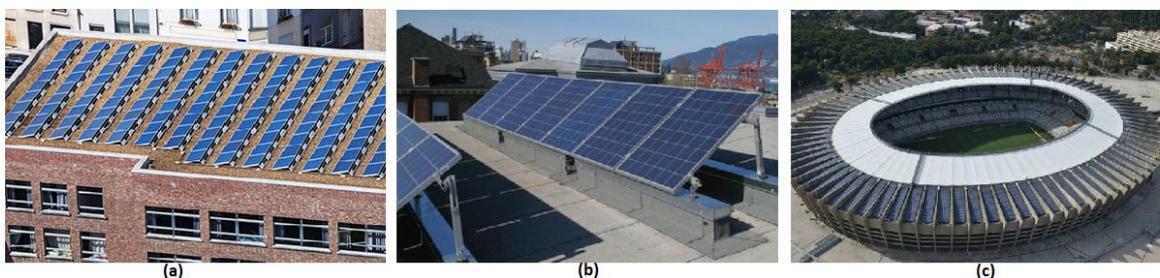


Figura 3.4 - Aplicação de módulos fotovoltaicos nas edificações (BAPV): (a) e (b) são aplicações sobre a cobertura de edificações; (c) reforma no estádio Mineirão em Minas Gerais e a aplicação de módulos fotovoltaicos sobre a cobertura.

Fonte: Google Imagens, 2015.

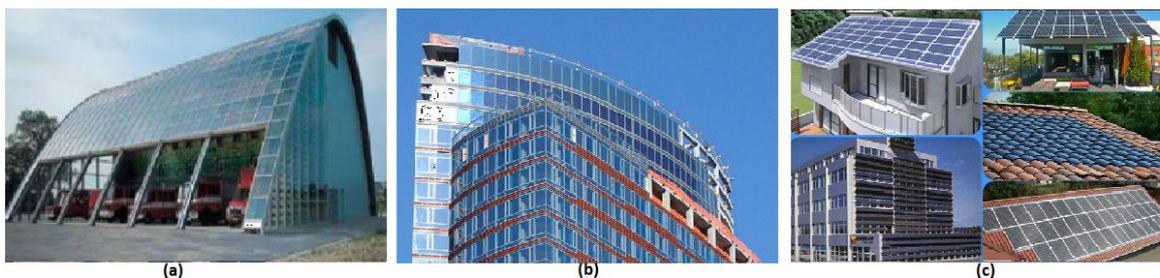


Figura 3.5 - Integração de módulos fotovoltaicos nas edificação (BIPV): (a) integração com a forma; (b) integração com forma, função e aparência; (c) integração com inclinação nas coberturas e função de sombreamento em fachadas.

Fonte: Google Imagens, 2015.

3.4 Curva Característica de uma Célula Fotovoltaica

A curva característica I-V (corrente x tensão) descreve o comportamento da corrente em função da tensão de uma célula, módulo ou arranjo fotovoltaico. A obtenção desta curva ocorre através da Equação 3.1 e do modelo matemático simplificado de um diodo.

Esta curva possui três pontos de importância: tensão de circuito aberto (V_{OC}), é a tensão na qual a corrente do módulo ou célula fotovoltaica é igual a zero; corrente de curto-circuito (I_{SC}) é a corrente obtida quando os terminais da célula são colocados em curto-circuito e, assim, a tensão será zero; ponto de máxima potência (PMP) é o ponto em que o produto da corrente pela tensão é máximo, onde cada ponto da curva é formado por um par I-V e os pontos I_{MP} e V_{MP} determinam o ponto de máxima potência. A Figura 3.6 mostra a curva característica I-V e a potência elétrica para uma célula fotovoltaica de silício cristalino sob condições padrão de ensaio.

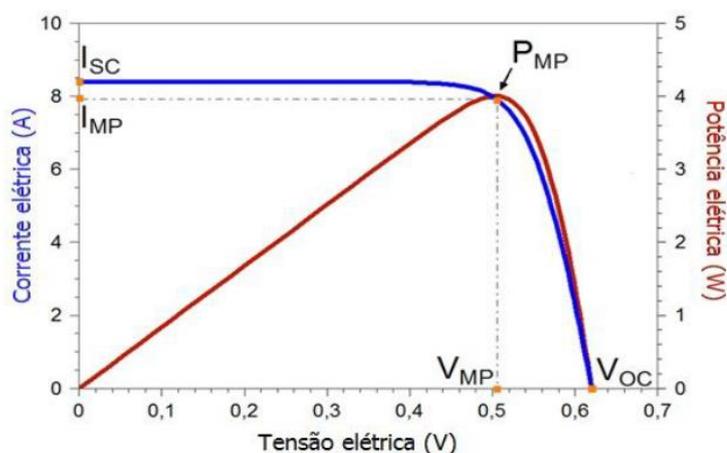


Figura 3.6 - Curva característica I-V e a sobreposição da curva P-V (potência gerada pelo módulo fotovoltaico).

Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, 2014.

A partir da curva I-V pode ser determinada a curva de potência onde destaca-se o ponto de máxima potência P_{MP} que estabelece o máximo de potência que a célula ou módulo fotovoltaico pode atingir para gerar energia. A eficiência de conversão da energia solar em energia elétrica pela célula fotovoltaica é a razão entre a potência elétrica produzida pela célula fotovoltaica e a potência de radiação solar incidente, de acordo com a Equação 3.1.

$$\eta = \frac{I_{SC} \cdot V_{OC} \cdot FF}{A \cdot G} \cdot 100\% = \frac{P_{MP}}{A \cdot G} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

onde η é a eficiência; P_{MP} é a potência entregue (W); A é a área da célula (m^2) e G é a irradiância solar (W/m^2).

3.5 Efeitos de Sombreamento

Sombreamentos podem ser causados por demais edificações, árvores, postes de luz, elementos de propagandas estáticas, e até mesmo autossombreamento da edificação na qual está instalado o sistema. A perda de capacidade de transformação de energia por parte do módulo sombreado afeta toda a instalação fotovoltaica, ou seja, todos os demais módulos instalados no mesmo circuito e mesmo inversor de corrente. As análises consequentes da aplicação do programa alemão de 1000 telhados fotovoltaicos identificaram que aproximadamente 50% dos sistemas instalados em ambiente urbano estariam sujeitos a projeções de sombreamentos e que estas perdas deveriam ser melhor observadas, podendo chegar a até 10% do total (DGS, 2008).

Um sombreamento parcial sobre um módulo fotovoltaico pode ser responsável pela incapacidade de produção de energia por parte deste módulo. Quando uma ou mais células de um módulo recebe menos radiação solar do que as outras da mesma associação, sua corrente fotogerada vai limitar a corrente de toda série do conjunto. Esta redução pode ocorrer por um sombreamento parcial ou sujeira sobre o módulo, por exemplo.

A Figura 3.7 ilustra o efeito de sombreamento em apenas uma célula de um módulo em um conjunto com 4 módulos fotovoltaicos em série. As ligações entre as células estão dispostas de tal modo que ao ocorrer o sombreamento a corrente deste módulo é reduzida pela metade e, portanto, reduzindo a corrente de todo o conjunto de módulos em série. Outro problema que pode acontecer, além da perda de potência, é o risco de danos às células e ao módulo, uma vez que a potência elétrica produzida não está sendo efetivamente entregue e

dissipada nos contatos e, algumas vezes, sobre alguma das células da série. Este fenômeno também é conhecido por pontos quentes.

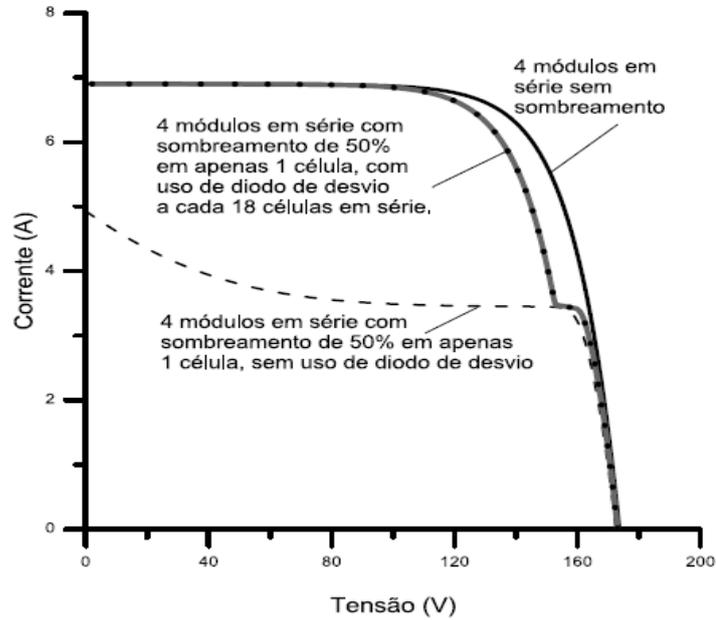


Figura 3.7 - Curva I-V para 4 módulos conectados em série e 3 curvas representando situações distintas de sombreamento.

Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, 2014.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O uso eficiente de energia e o desenvolvimento de fontes renováveis tornou-se um aspecto importante até mesmo no dia-a-dia das pessoas e no avanço das grandes cidades. Ao longo dos debates sobre mudanças climáticas e a criação de políticas ambientais, diversas cidades ao redor do mundo começaram a incentivar a utilização de fontes renováveis de energia e, acima de tudo, tornar mais fácil o acesso da população a este tipo de tecnologia. Atualmente é possível encontrar diversas referências para consulta sobre os melhores pontos para a instalação de sistemas fotovoltaicos nos meios urbanos, prevendo até mesmo cenários de investimento e estimativa de produção de energia elétrica. Estas referências são conhecidas como Mapas Solares ou Atlas Solares das cidades.

4.1 Conceitos e Tecnologias utilizadas

GIS (*Geographic Information System*, em inglês) é um sistema de informação espacial, procedimentos computacionais e recursos humanos que permite a análise, gestão ou representação do espaço e dos fenômenos que nele ocorrem. Compatibiliza a informação proveniente de diversas fontes como sensores espaciais (detecção e sensoriamento remoto), dados recolhidos de GPS ou através de topografia. Conforme o desenvolvimento tecnológico e o aumento no volume de conhecimento gerado pela humanidade, existe a necessidade de melhor representar estas informações, e através de um GIS é possível reduzir todos os registros (numéricos ou textos) em um único "mapa" que facilite a compreensão e associação de informações, como exemplifica a Figura 4.1.

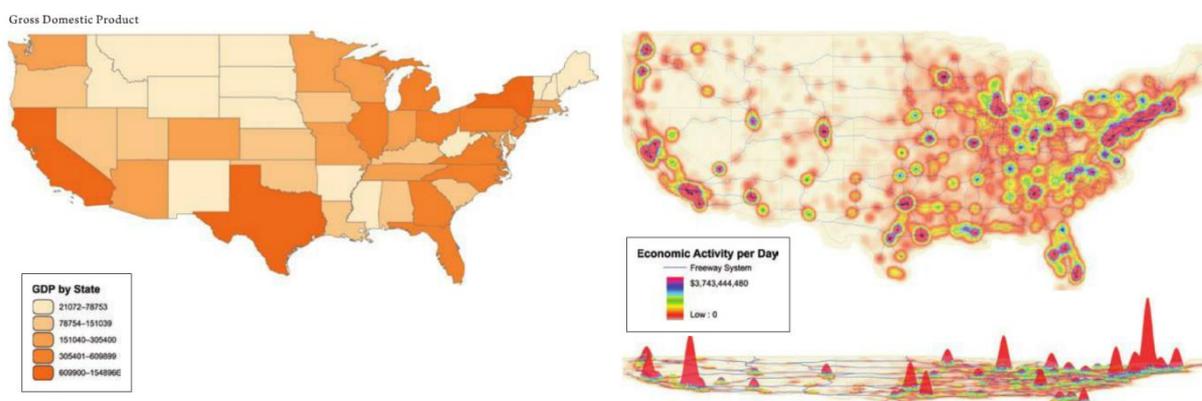


Figura 4.1 - Distribuição da economia dos Estados Unidos utilizando o produto interno bruto e a atividade econômica diária como exemplo visual.

Fonte: ESRI Map Book volume 24.

LiDAR é uma tecnologia de sensoriamento remoto que mede distâncias através da "iluminação" de alvos com um laser e analisando a luz refletida. Também é conhecido por perfilamento laser. É tipicamente utilizado como metodologia para a elaboração de mapas de alta resolução, com aplicações em geografia, arqueologia, geologia, geomorfologia, sismologia, física atmosférica e agricultura, por exemplo. Também pode ser um mapeamento através de laser aerotransportado, altimetrias e mapeamento de contorno. As Figuras 4.2 e 4.3 ilustram a medição, "nuvem de pontos", de uma construção em uma paisagem através deste método.

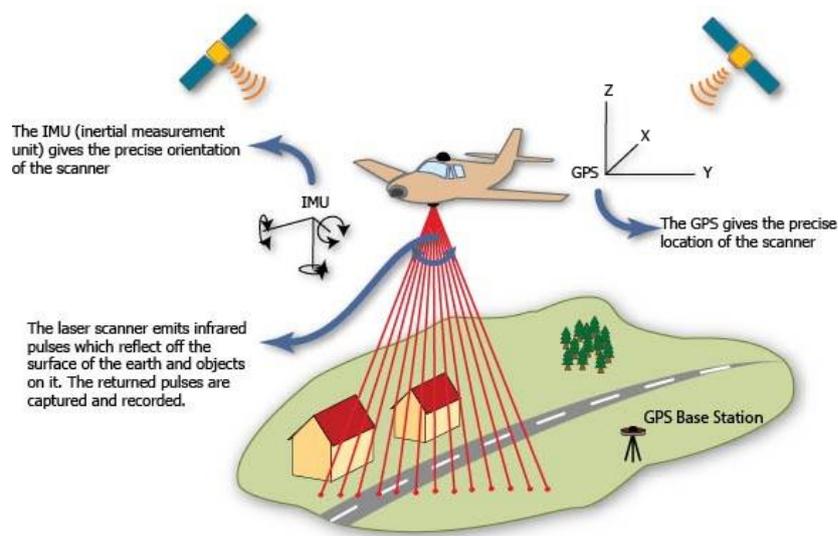


Figura 4.2 - Escaneamento por laser aerotransportado (*Airborne Laser Scanning*).

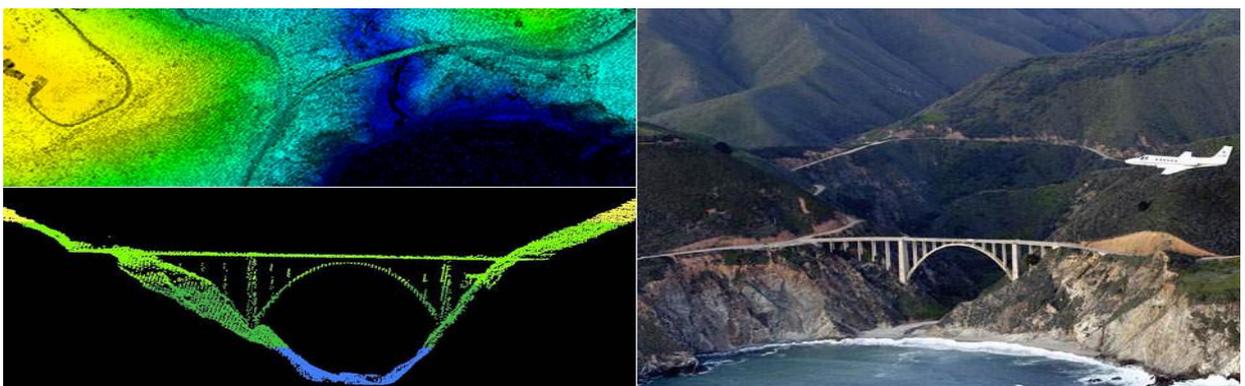


Figura 4.3 - Dados obtidos em um exemplo da aplicação de LiDAR.

Para o estudo e projeto de sistemas fotovoltaicos esta tecnologia pode auxiliar com a medição de elevações, efeitos de sombreamento e tamanho das superfícies dos telhados, por exemplo. Trabalhos mais recentes (descritos nas próximas seções) também estão contabilizando a área total das fachadas das edificações e área de superfícies envidraçadas

para incorporar módulos fotovoltaicos e estimar o potencial fotovoltaico considerando a influência de vegetação, sombreamentos, orientações distintas e o efeito das edificações e terrenos ao redor. Também pode ser referenciado como Escaneamento por Laser Aerotransportado (ALS - Airbone Laser Scanning, em inglês) para as aquisições feitas em larga escala, como bairros, cidades e florestas, por exemplo.

4.2 Estado da Arte

Freire (2013) propôs um método para o levantamento do potencial energético solar no campus universitário da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Neste método, foram definidos quais os melhores telhados dos prédios do campus a serem estudados e posicionados os painéis fotovoltaicos e qual a área disponível para isto. Através do software ArcGIS e mapas encontrados *online*, foram catalogados aproximadamente 44 mil m², proporcionando um potencial anual de 8 GW.h, o que, nas estimativas realizadas, abasteceria o consumo energético do campus em estudo.

Takenaka (2010) avaliou o potencial de geração e a viabilidade de implantação de um sistema fotovoltaico no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG - Campus I). Fizeram parte do trabalho a compilação de dados históricos de consumo de energia diário para um período de 16 anos do CEFET, um estudo do projetos arquitetônicos para a integração da tecnologia fotovoltaica e utilização de softwares de modelagem geométrica, como Ecotect, para avaliar as condições de sombreamento do entorno e autossombreamento nas edificações. O objeto de estudo apresenta uma área total aproximada de 30 mil m² e foram apresentados 4 cenários de avaliação de potencial fotovoltaico, com geração de energia e análise de investimento para cada um deles.

Vannini (2011) explorou como a volumetria das edificações e, principalmente, as formas e planos nas fachadas poderiam aproveitar melhor a radiação solar incidente para a produção de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos integrados nas edificações. Através da modelagem geométrica no software Ecotect, e de outras ferramentas computacionais, foram estudadas as rotações, giros, inclinações, torções, curvaturas e outras variantes nas formas e planos externos arquitetônicos em edificações. A partir de cada forma e volume diferente criado, identificou-se o acumulado de radiação solar incidente nas superfícies, além das zonas onde era maior o seu aproveitamento. Como conclusões, a viabilidade de projetos paramétricos sobre as fachadas, a integração dos planos arquitetônicos nas edificações aliada com a utilização de sistemas fotovoltaicos, mostrou-se uma

metodologia integrada entre o conceito arquitetônico e a eficiência energética através das formas.

Martins (2014) apresenta uma discussão sobre a energia consumida nas cidades, e principalmente nas edificações, em escala urbana local. É discutido que a morfologia urbana é considerada como um aspecto crítico para a transformação e eficiência energética das cidades e edificações. Através da análise de diversas formas urbanas, adensadas, verticais, aglomeradas, dispersas e mistas, verificam-se diferentes padrões de comportamento energético, consumo de energia e aproveitamento de energia solar nas fachadas das edificações. As análises foram realizadas a partir da modelagem geométrica tridimensional de diversas morfologias urbanas encontradas nas cidade de Maceió (AL), de clima tropical. Classificando cada morfologia, apresentando suas variáveis e um conjunto de indicadores, cada uma das 5 tipologias estudadas em mais de 80 mil configurações urbanas (com o auxílio de algoritmos genéticos), mostrou que *"há oculta uma grande oportunidade na procura para novas soluções que possibilitem uma revisão da Arquitetura da cidade."*

Barbosa et. al. (2010) apresenta uma metodologia para avaliar o potencial solar para geração de energia elétrica através da estimativa da área das superfícies disponíveis em telhados e coberturas. Através da metodologia proposta, que aborda o ambiente físico (localização, posição solar, radiação incidente...), ambiente técnico (equipamentos e modelos de simulação), ambiente geográfico (mapas, imagens de satélite, GIS...), ambiente econômico (custos, condições do mercado e fluxo de caixa) e ambiente analítico (resultados e programas aplicados) é possível estabelecer uma série de informações associadas e planejadas, criando um mapa de informações para a localidade em estudo, compilando uma metodologia nova, versátil, rápida, abrangente e até então não disponível no Brasil.

Braun-Grabolle (2010) desenvolveu um trabalho sobre integração de sistemas fotovoltaicos em larga escala no sistema elétrico de distribuição urbana. A metodologia apresentada prevê todos os critérios utilizados pelos órgão reguladores e normas técnicas de referência. Desta forma seria possível identificar o comportamento dos alimentadores da rede de distribuição com o aumento do nível de tensão e carregamento de cabos, proporcionando identificar, na rede elétrica, a localização dos sistemas fotovoltaicos conectados. Com a utilização do software ANAREDE - Programa de Análise de Redes e os dados do sistema de distribuição do ano de 2008 para a cidade de Florianópolis, foi possível identificar que *"a geração fotovoltaica mostrou ser capaz de oferecer benefícios ao sistema de distribuição, reduzindo picos de demanda, perdas de potência e melhora no perfil de tensão da rede"*.

Diversos mapas solares para o estado do Rio Grande do Sul (Brasil) foram desenvolvidos por Peraza (2013) com o objetivo de identificar as melhores regiões para o aproveitamento de energia solar e instalação de grandes usinas fotovoltaicas. Começando com uma análise do potencial solar brasileiro e de uma visão sobre o atual cenário do mercado nacional é apresentada uma metodologia alternativa para investimentos neste setor. Utilizando a malha elétrica do estado, linhas de transmissão e subestações de energia como expoentes de decisão de investimento, além das estimativas de irradiação solar, criou-se um "mapa-ferramenta" para a tomada de decisões. Além disto, também é realizado para cada região do estado um cálculo de produtividade fotovoltaica, ou seja, um indicador que relaciona a energia elétrica anual injetada na rede por unidade de potência nominal do gerador fotovoltaico, indicado na Figura 4.4. Os resultados são baseados em diversas premissas de cálculo e simulação, elencadas pela autora. Verifica-se que, para a capital Porto Alegre, a produtividade fotovoltaica equivale a, aproximadamente, 1380 kW.h/kW_p.

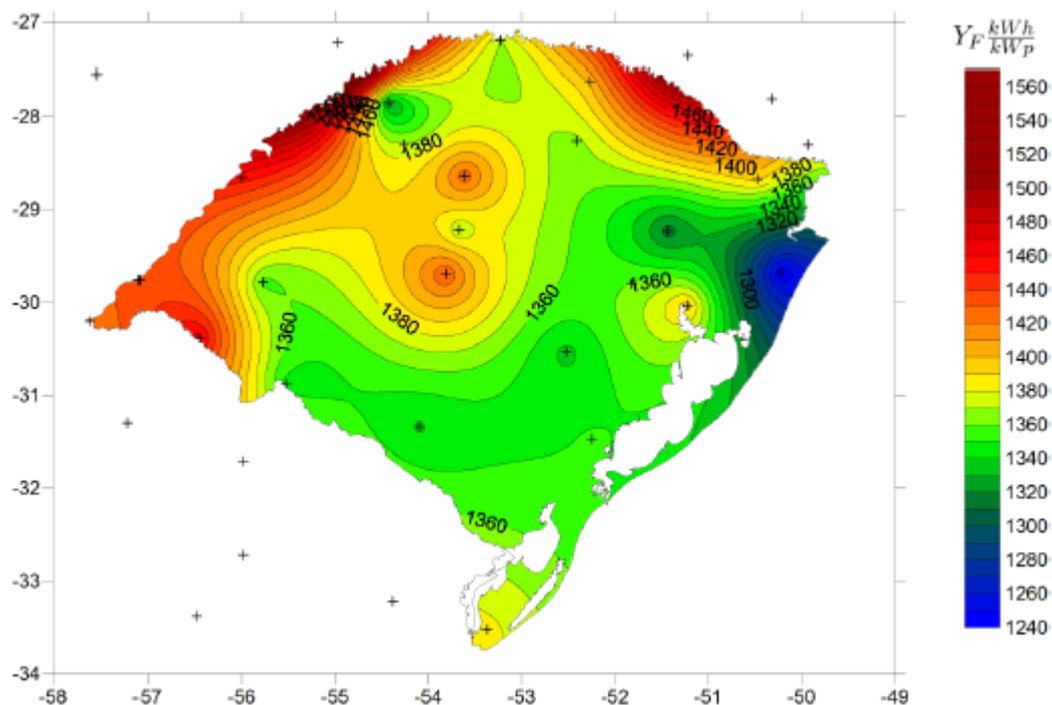


Figura 4.4 - Mapa de produtividade fotovoltaica (Y_F) no estado do Rio Grande do Sul
Fonte: Peraza, 2013.

Zanardi et. al (2013) comentam que apesar da importância estratégica dos dados espaciais para a gestão municipal, Porto Alegre se encontra defasada em algumas décadas em termos de atualização cartográfica. Os dados cartográficos disponíveis atualmente nos órgãos municipais são derivados sobre um mapeamento fotogramétrico realizado em 1982.

Verificando esta defasagem, é apresentada uma metodologia adotada para validar a qualidade planimétrica e altimétrica de um levantamento LiDAR contratado pelo governo municipal de Porto Alegre. A equipe para este trabalho era formada por empresa contratada, engenheiros da prefeitura e professores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). A metodologia prevê voos para execução do perfilamento laser, efetuados em agosto de 2010, obtendo 68 faixas na direção Norte-Sul com superposição lateral de 30%. A Figura 4.5 ilustra parte das etapas da metodologia aplicada.

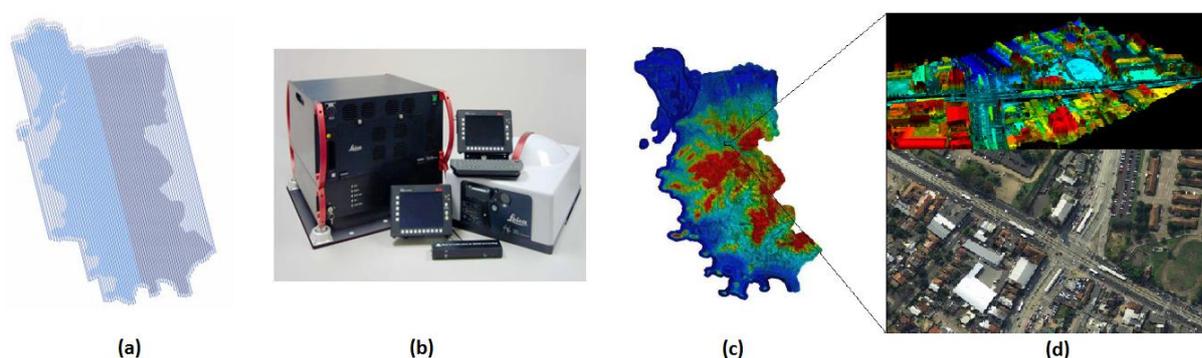


Figura 4.5 - (a) Plano de voo sobre a cidade de Porto Alegre; (b) Sensor LASER ALS50-II; (c) Imagem hipsométrica de Porto Alegre (representação do terreno por escala de cores); (d) Detalhe de recorte em perspectiva do perfilamento LASER de uma área da cidade.

Fonte: Zanardi et. al. 2013.

Utilizando pontos de amostras por GPS verificou-se a precisão altimétrica e fotogrametria para atestar a precisão planimétrica. Os resultados apresentaram uma precisão altimétrica de 7,5 cm, sem pontos rejeitados, e a análise de precisão planimétrica apresentaram um erro médio de 49,6 cm, com aceitação de mais de 90% dos pontos de amostragem. Os autores concluem que a tecnologia de perfilamento a laser aerotransportado mostrou ser adequada para a obtenção de dados de altimetria em áreas urbanas. Além disto, a identificação de pontos homólogos nas imagens do perfilamento com as de imagens fotogramétricas mostrou-se uma solução eficaz.

O estado de Pernambuco, através da Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE) lançou edital para a contratação de levantamento aerofotogramétrico para a elaboração de uma base cartográfica. A utilização de mapeamento a laser, usando LiDAR, tem como objetivo o levantamento de dados altimétricos para gerar um modelo digital do terreno, em alta definição, para todo o território estadual, trazendo benefícios e agilidade para diversos projetos de infra estrutura e engenharia. À medida que o trabalho for realizado, serão disponibilizados de forma pública os dados medidos (Fonte: SRHE, 2013).

Zandoná et. al. (2005) realizaram o levantamento de dados altimétricos, a partir de um sensor laser aerotransportado para uma área de aproximadamente 150.000 m² de uma região de Floresta Ombrófila Mista, também conhecida como floresta com araucárias. Os resultados do sensoriamento foram comparados com o levantamento de campo, onde através da interpolação de superfícies, os modelos gerados foram comparados estatisticamente, encontrando um erro médio de 10 cm e desvio padrão de 50 cm na altimetria. É comentada também a dificuldade do levantamento de dados nas condições de campo, vegetação rasteira por exemplo. Como comentários finais destacam-se o crescimento deste tipo de tecnologia e a possibilidade de oferecer melhores ferramentas para o estudo espacial dos ecossistemas, conservação e gerência dos recursos da floresta.

Mesmo com o desenvolvimento de tecnologias para prever a incidência e aproveitamento de radiação solar em escala urbana, no território nacional, diversas outras metodologias e ferramentas computacionais são aplicadas em outros países. O foco principal, na maioria dos trabalhos, é fornecer uma ferramenta de apoio a tomada de decisões por parte dos usuários e cidadãos de alguma localidade, como por exemplo os mapas solares, ou a análise e estimativa para investimento em determinada capacidade de produção de energia para vencer a demanda local.

Jakubiec e Reinhart (2013) demonstraram e validaram um método para a previsão de ganhos de produção de eletricidade através de módulos fotovoltaicos baseados em estudos de massas conceituais para modelos urbanos 3D, combinados com simulações horárias de irradiação solar para anos típicos (arquivos climáticos) e dados meteorológicos. Os resultados combinados, para esta metodologia, são uma série de mapas solares das cidades que permitem aos proprietários de edificações e aos usuários interessados saber o potencial solar em seu telhado, tamanho de instalação possível, estimativa de geração de eletricidade, custos de instalação e retorno sobre o investimento. Inicialmente, um mapa conceitual para a cidade de Cambridge, Massachusetts, foi disponibilizado contendo mais de 17 mil telhados (2012).

O método apresentado consiste na junção de dados urbanos disponíveis em GIS (*Geographic Information System*) e LiDAR (*Light Detection and Ranging*) com a construção de modelos de edificações através do software Daysim, anteriormente utilizados para simulações em menor escala para edificações individuais ou em pequenos bairros. Os autores também elaboraram uma revisão sobre os mapas solares disponíveis para as cidades norte americanas (Tabela 4.1). Foram encontrados 11 mapas solares em 2012 e 13 mapas em 2013. Na revisão foram constatadas a utilização de três metodologias distintas:

Tabela 4.1 - Levantamento de métodos dos mapas de potencial solar na América do Norte.

Fonte: Jakubiec e Reinhart, 2013.

| City | URL | Flat roof | Method (2012) | Method (2013) |
|----------------|---|-----------|---------------|-------------------------|
| Anaheim | http://anaheim.solarmap.org/ | No | Solar Analyst | Unknown |
| Berkeley | http://berkeley.solarmap.org/ | Yes | Constant | Unknown |
| Boston | http://gis.cityofboston.gov/SolarBoston/ | Yes | Solar Analyst | Solar Analyst |
| Denver | http://solarmap.drcog.org/ | No | Unknown | PVWatts |
| Los Angeles | http://solarmap.lacounty.gov/ | No | Unknown | Unknown |
| Madison | http://solarmap.cityofmadison.com/madisun/ | No | Constant | PVWatts |
| New York City | http://nycsolarmap.com/ | No | Solar Analyst | PVWatts |
| Portland | http://oregon.cleanenergymap.com/ | Yes | Constant | <i>No longer exists</i> |
| Salt Lake City | http://www.slcgovsolar.com/ | No | Solar Analyst | Unknown |
| San Diego | http://sd.solarmap.org/solar/index.php | ? | Unknown | Unknown |
| San Francisco | http://sf.solarmap.org/ | Yes | Constant | Constant |
| Sacramento | http://smud.solarmap.org/ | No | – | Unknown |
| Orlando | http://gis.ouc.com/solarmap/index.html | No | – | Unknown |
| Various | http://www.geostellar.com/ | No | – | Unknown |

(*) Título das colunas da tabela: 1) Cidade; 2) URL - endereço eletrônico; 3) Modelo com telhados planos; 4) Método de análise solar (2012); 5) Método de análise solar (2013).

1. Radiação Solar Constante (sobre os telhados): média da radiação solar anual para uma determinada região baseado nos arquivos climáticos e estações de monitoramento meteorológico. Este pressuposto prevê que em todos os pontos de um telhado recebe a mesma quantidade de radiação, independente da orientação, acarretando imprecisões quando um telhado possuir elevada inclinação e mais de uma orientação solar, por exemplo. Este método também não considera um contexto urbano local com sombreamentos e autossombreamentos. A determinação de área de telhado é estimada através de uma porcentagem constante ou com base em técnicas de análise de imagens.
2. *Solar Analyst*: é um *plugin* utilizado no software Esri ArcGIS. Este software possui uma série de capacidades através da utilização de mapas para análises locais e globais, fornece informações para usuários e comunidade em geral sobre análises geoespaciais, clima, demografia, comportamentos urbanos como tráfego e comércio, comportamentos globais como previsão de furacões, alastramento de doenças e questões territoriais. É um software de grande potencial que permite a produção de mapas com muita informação. O *plugin Solar Analyst* representa a cidade como um modelo de elevação digital (DEM - *Digital Elevation Model*). Através do rastreamento da geolocalização em que os valores de pixels individuais em uma imagem se encontram é elaborado um cálculo para aferir qual seria a medida de sua elevação e também com referência a todos os pixels ao redor. A estimativa de radiação direta e difusa da irradiação solar é calculada baseada no fator de visão que cada pixel possui

do céu. A radiação solar direta é calculada baseada na posição solar, inclinação e orientação do DEM, transmissividade do céu (valor constante) e a distância que o raio solar deverá percorrer através da atmosfera. A radiação difusa é calculada da mesma forma que a radiação direta, baseada num modelo de céu uniforme ou um modelo de céu nebuloso padrão. Este modelo não possui a capacidade para estimar a radiação refletida por outras superfícies do entorno. Mesmo possuindo diversas opções para a modelagem de céu, esta metodologia não consegue reproduzir variações diárias da nebulosidade, como por exemplo manhãs de céu claro e tarde de céu nebuloso, o que não favorece uma análise mais completa sobre a posição de instalação de um sistema fotovoltaico sobre um telhado.

3. PV Watts: Esta é uma ferramenta online do NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) que utiliza uma metodologia de irradiação solar em base horária distribuída sobre uma área de aproximadamente 40 km². Usa as informações contidas nos arquivos climáticos do tipo TMY (*typical meteorological year*) (Marion et al., 2001). O arquivo climático é combinado com uma série de informações manualmente inseridas (informações do usuário) para prever a produção de energia elétrica, como: potência instalada de FV, orientação solar e angulação, temperatura de operação e condições do céu. Enquanto a forma do telhado é bem definida e detalhada, comparando com o modelo de radiação solar constante, sombreamentos e reflexões de superfícies adjacentes não podem ser modeladas com esta metodologia. Este modelo foi validado por Cameron et. al. (2008) utilizando dados medidos de um sistema a pleno-sol montado em bancada. A partir disto verificou-se que esta metodologia possui uma média de incerteza entre 9,6% e 10,2%. Para toda uma cidade e todas superfícies de telhados é difícil estabelecer esta incerteza.

Em nenhum destes mapas solares e métodos de pesquisa utiliza algum procedimento para considerar as reflexões precisas entre superfícies de um contexto urbano.

Jakubiec e Reinhart, 2013, através dos dados de LiDAR do ano de 2010 para toda a cidade de Cambridge criaram os modelos 3D detalhados e validados com a utilização do *plugin* Radiance no software Daysim, que utiliza um método inverso para prever a trajetória dos raios solares (Ward, 1995; Reinhart e Walkenhorst, 2001). A Figura 4.6 ilustra a metodologia. Uma das vantagens da criação de modelos tridimensionais para as edificações, em comparação com metodologias DEM, é o maior detalhamento das superfícies de telhados,

ângulos e orientações, do que representações "pixeladas" sobre a informação de alturas e fator de visão para o céu. Com a criação de modelos 3D do contexto urbano, através da "nuvem de pontos LiDAR", os cálculos para a estimativa da radiação solar incidente nos telhados, através dos métodos inversos, são melhor contabilizados, além da correta verificação de sombreamentos adjacentes e autossombreamentos.

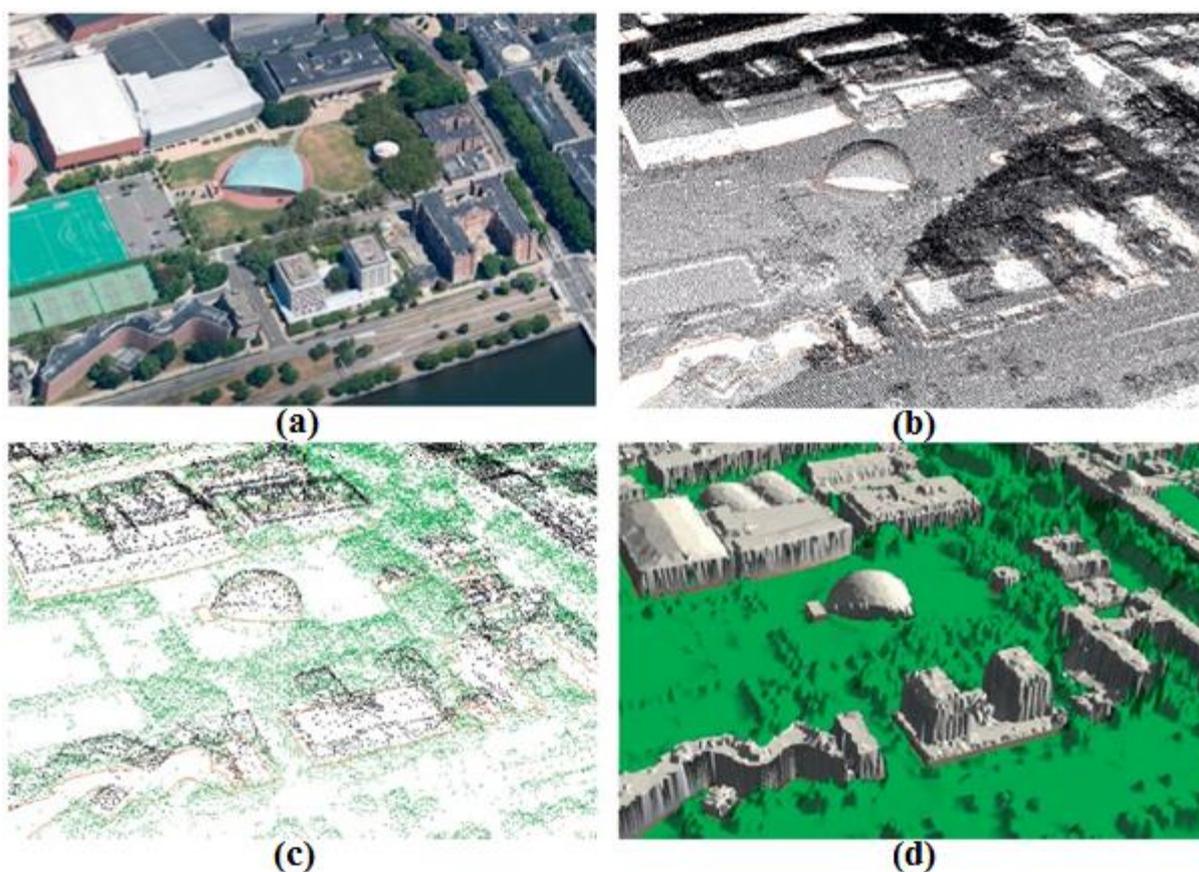


Figura 4.6 - Imagens do processo de criação do modelo 3D baseado em LiDAR e GIS. (a) Imagem obtida de satélite; (b) detecção de pontos através de sensoriamento LiDAR; (c) categorização de pontos para edificações e para terrenos através de GIS da cidade de Cambridge; (d) modelo tridimensional do contexto urbano.

Adaptado de: Jakubiec e Reinhart, 2013.

Com a definição de um modelo 3D, todas as superfícies foram convertidas para um modelo que interpretasse suas propriedades ópticas. As simulações anuais/horárias para a previsão de irradiação nas superfícies utilizou coeficientes aproximados para a iluminação natural, propostos por Mardaljevic (2000), e os modelos de previsão de céu e nebulosidade de Perez et. al. (1993), que prevêem iluminação e irradiação sobre as características climáticas específicas (arquivo climático).

Como validação dos modelos para os pontos de irradiação solar nos telhados, foram verificados diferentes métodos, a fim de consolidar a criação dos mapas solares, como podem ser visualizados na Figura 4.7.



Figura 4.7 - Variação do método de cálculo e a irradiação solar nos telhados.
Fonte: Jakubiec e Reinhart, 2013.

Súri e Hofierka (2004) desenvolveram a metodologia *R.sun* em um programa *open source* chamado GRASS GIS que resolve algumas das limitações encontradas na metodologia *Solar Analyst*. A maior diferença está na habilidade de modelar a radiação solar para grandes áreas e que transcendem diferentes zonas climáticas, através da criação de um percentual de irradiação direta e difusa como imagens espaciais aos modelos do que valores fixos. Outra diferença está na capacidade de considerar a radiação refletida do solo (albedo). Mesmo com estas melhorias na metodologia, o *R.sun* consegue simular apenas um único dia ou hora de irradiação de cada vez, significando que precisa de, no mínimo, 365 imagens de DEM criadas independentemente.

Súri et. al. (2005) desenvolveram uma ferramenta *web* PV-GIS similar ao PVWatts para regiões da África e Europa que utiliza os cálculos do *R.sun* modificados por medições das radiações diretas e difusas em médias mensais como fonte de dados em escala temporal.

Choi et. al. (2011) acoplaram as simulações para sistemas fotovoltaicos disponíveis no software TRNSYS com as ferramentas de DEM do software *Esri's ArcMap*. Este método depende do *Solar Analyst* para cálculos de sombras e do TRNSYS para irradiação solar, rendimento e operação dos painéis fotovoltaicos.

Outros trabalhos utilizaram as médias mensais anuais para a radiação direta e difusa para calcular o potencial fotovoltaico de pequenos empreendimentos em escala urbana, utilizando o *R.sun*. (Brito et. al, 2012; Nguyen e Pearce, 2010 e 2012). Entretanto, a aplicação do *R.sun* é geralmente para grandes escalas (regiões e países) por causa dos métodos de imagens utilizados como dados de entrada.

Ran Vardimon (2011) verificou em algumas cidades de Israel se era possível a instalação de módulos fotovoltaicos nas coberturas das edificações, porque seria uma alternativa mais simples de produção de energia elétrica, comparado com a instalação de grandes usinas solares de produção de eletricidade, adequação da malha de transmissão e distribuição de energia. A estimativa da área de telhados foi obtida com dados de GIS (imagens aéreas, fotos ortogonais e dados de elevação) coletados até 2007 e a cooperação do Departamento de Estatísticas e de Desenvolvimento Agrário. Foram gerados polígonos para cada edificação identificada e separadas por categorias de tipos de uso, tais como: residencial, comercial, industrial, serviços públicos e etc. Como resultados foram propostos dois cenários para o potencial de instalação de painéis fotovoltaicos em Israel: o primeiro seria a instalação em 30% da área de todas as coberturas identificadas, produzindo o equivalente a 32% da energia elétrica consumida; o segundo cenário, mais econômico, seria a instalação em 50% da área das coberturas que possuem mais de 800 m², acarretando uma produção de aproximadamente 7% do consumo de eletricidade.

Algumas outras aplicações de LiDAR com leitura e medições através de aviões foram utilizadas para, juntamente com a modelagem digital do terreno e das edificações (DTM - *Digital Terrain Model* e DSM - *Digital Surface Model*, em inglês), estimar área de telhados, possíveis sombreamentos e condições do entorno na cidade de Feldkirch, na Austria, no trabalho proposto por Jochem et. al. (2009). Em 2011, Jochem et. al. continuaram a pesquisa para a obtenção das "nuvens de pontos" medidos por LiDAR para a criação de modelos 3D das edificações e planos de telhados. Nessa ocasião as áreas a serem "medidas" foram as paredes das edificações, uma vez que também é possível montar instalações fotovoltaicas em superfícies verticais. Desta vez, ao invés de ser aerotransportado como no caso dos telhados, o método para a modelagem da incidência de radiação solar das fachadas foi adquirido através do Escaneamento Móvel (MLS - *Mobile Laser Scanning*, em inglês). A Figura 4.8 ilustra o processo de aquisição e tratamento de dados da "nuvem" de pontos adquirida. Parte desta nova metodologia também apresenta como classificar pontos internos e externos das superfícies e a forma como determinar os ângulos das mesmas, além da influência de sombreamentos do horizonte. As dificuldades encontradas estão na incompleta aquisição de dados e possíveis objetos temporários no horizonte. Esta metodologia, mesmo que complexa e diferente para cada edificação contribui para a variedade de aplicações utilizadas nas ciências espaciais de territórios e verificação de radiação incidente nas edificações.

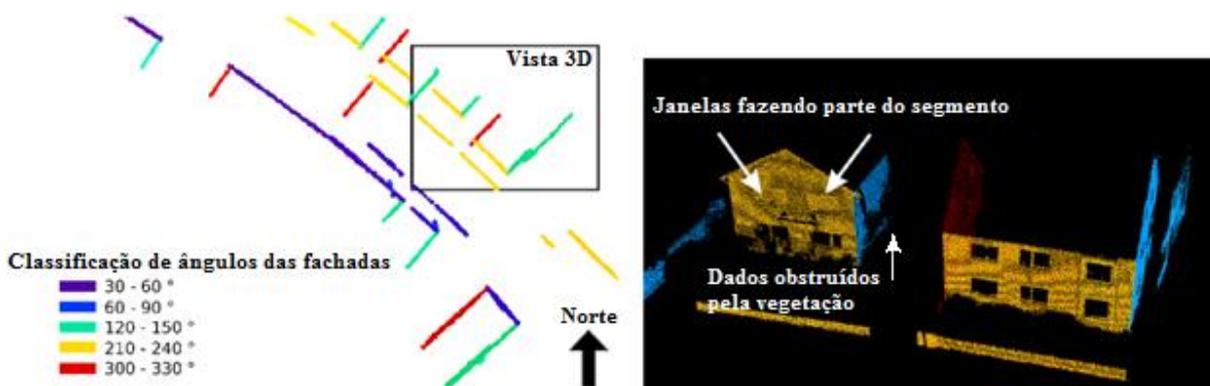


Figura 4.8 - Vista de topo e frontal das fachadas escaneadas.
Adaptado de: Jochem et. al., 2009.

4.3 Mapwell® Solar System™

O *Mapdwell® Solar System™* permite que as comunidades e as pessoas possam se conscientizar sobre práticas sustentáveis e eficiência energética em suas edificações. Desenvolvido por pesquisadores do MIT, Figura 4.9, é uma ferramenta que mapeia os telhados das cidades para o aproveitamento da energia solar, permitindo ao usuário estimar o potencial de geração de energia elétrica, mitigação de danos ambientais e custos associados.

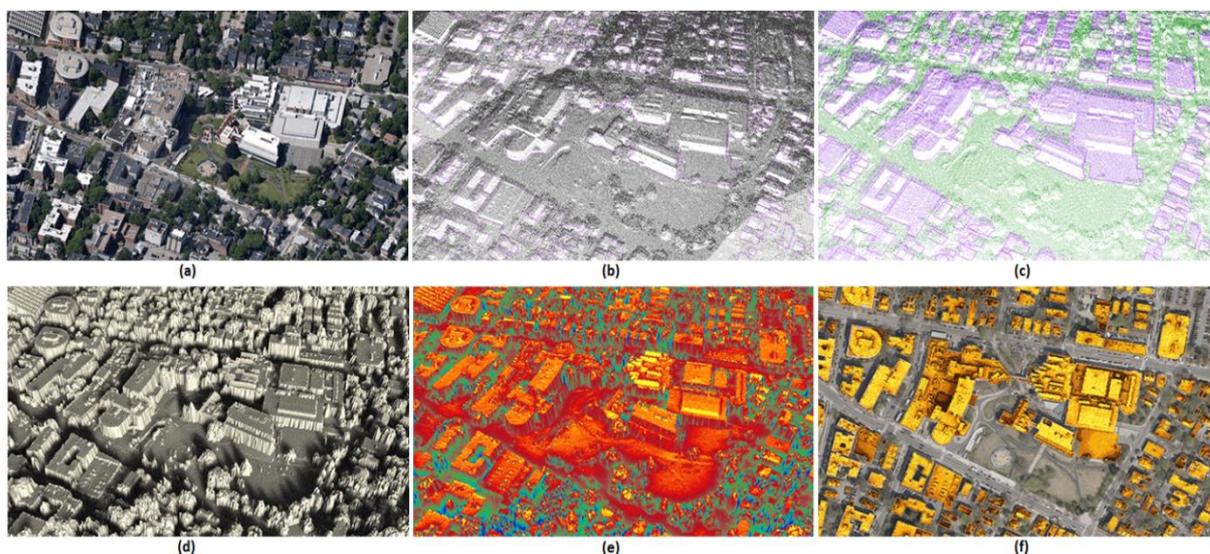


Figura 4.9 - Metodologia de criação dos mapas do *Mapdwell® Solar System™*. (a) Imagem de satélite da região de exemplo; (b) Conjunto de pontos LiDAR e polígonos identificando a projeção em terreno das edificações; (c) Simplificação e classificação dos pontos baseados em LiDAR; (d) Modelo geométrico tridimensional para simulação baseado em LiDAR; (e) Modelo combinado com a simulação anual de radiação solar; (f) Resultado do *Mapdwell® Solar System™*.

Através de tecnologia LiDAR para mapear toda a cidade, foi possível criar o modelo tridimensional das edificações e suas coberturas e telhados. A tecnologia de fundamentação matemática e cálculos de irradiação solar foi desenvolvida pelo Sustainable Design Lab do MIT. Os algoritmos foram testados e validados, apresentando uma margem de aproximadamente 5% de erro. Com esta ferramenta, acessível por pc's, tablets e celulares, os cidadãos de Boston, Cambridge, Washington County, Washington (DC) e Wellfleet (cidades dos Estados Unidos) e Vitacura (Chile) podem "descobrir" seu acesso a utilização de energia solar em suas regiões e terão auxílio das ferramentas para tomada de decisão e investimento.

A ferramenta apresenta ao usuário o conceito de Índice de Acesso Solar (SAI: *Solar Access Index*) como a capacidade de produção de energia elétrica fotovoltaica de qualquer superfície em relação ao melhor rendimento possível dentro de uma dada amostra. É uma escala específica do local que varia de zero (0) para o máximo possível definido como um (1). As imagens dos mapas apresentam uma escala gradual de tonalidades que funcionam como um limiar da viabilidade para a instalação fotovoltaica. O valor mínimo é definido como 0,4 (menor viabilidade possível) e a partir de 0,7 ou mais, como de alta viabilidade de instalação fotovoltaica. O SAI compara a melhor situação possível para uma dada área de telhado, com a melhor orientação e angulação solar, sem nenhuma obstrução e efeitos de sombreamento num plano campal e fixo dentro da mesma região geográfica e climática. Além disto, o Mapdwell® Solar System™ fornece diversas informações financeiras para avaliar investimento e retorno sobre o investimento, informações ambientais para avaliar mitigação de gases e premissas para avaliar eficiência energética e redução de consumo de energia elétrica das edificações.

4.3.1 Exemplo de Cidades que Integram o Mapdwell® Solar System™

Cambridge, cidade da área metropolitana de Boston, capital do estado de Massachusetts, possui uma população de aproximadamente 106 mil pessoas e 47 mil residências. Os mapas solares produzidos por pesquisadores do MIT e profissionais da área iniciaram por algumas regiões desta cidade. A Figura 4.10 ilustra informações sobre o mapa.

Boston, a capital do estado de Massachusetts, possui uma população de aproximadamente 650 mil pessoas. É um grande pólo comercial, industrial e universitário. O mapa solar desenvolvido pelo MIT cobriu toda a área metropolitana da capital, ilustrado pela Figura 4.11.



Figura 4.10 - Detalhes do mapa solar da cidade de Cambridge

Primeira cidade fora dos Estados Unidos, o município de Vitacura é uma das 32 cidades da região metropolitana de Santiago, capital do Chile. O desenvolvimento deste mapa foi concluído no ano de 2014. É uma cidade que se posiciona como líder em eficiência energética e sustentabilidade e a parceria com o *Mapdwell*® tem como objetivo incentivar a população local para estas práticas e alcançar o fornecimento de até 60% da demanda de eletricidade da cidade através da energia solar. A Figura 4.12 mostra o mapa para esta cidade.

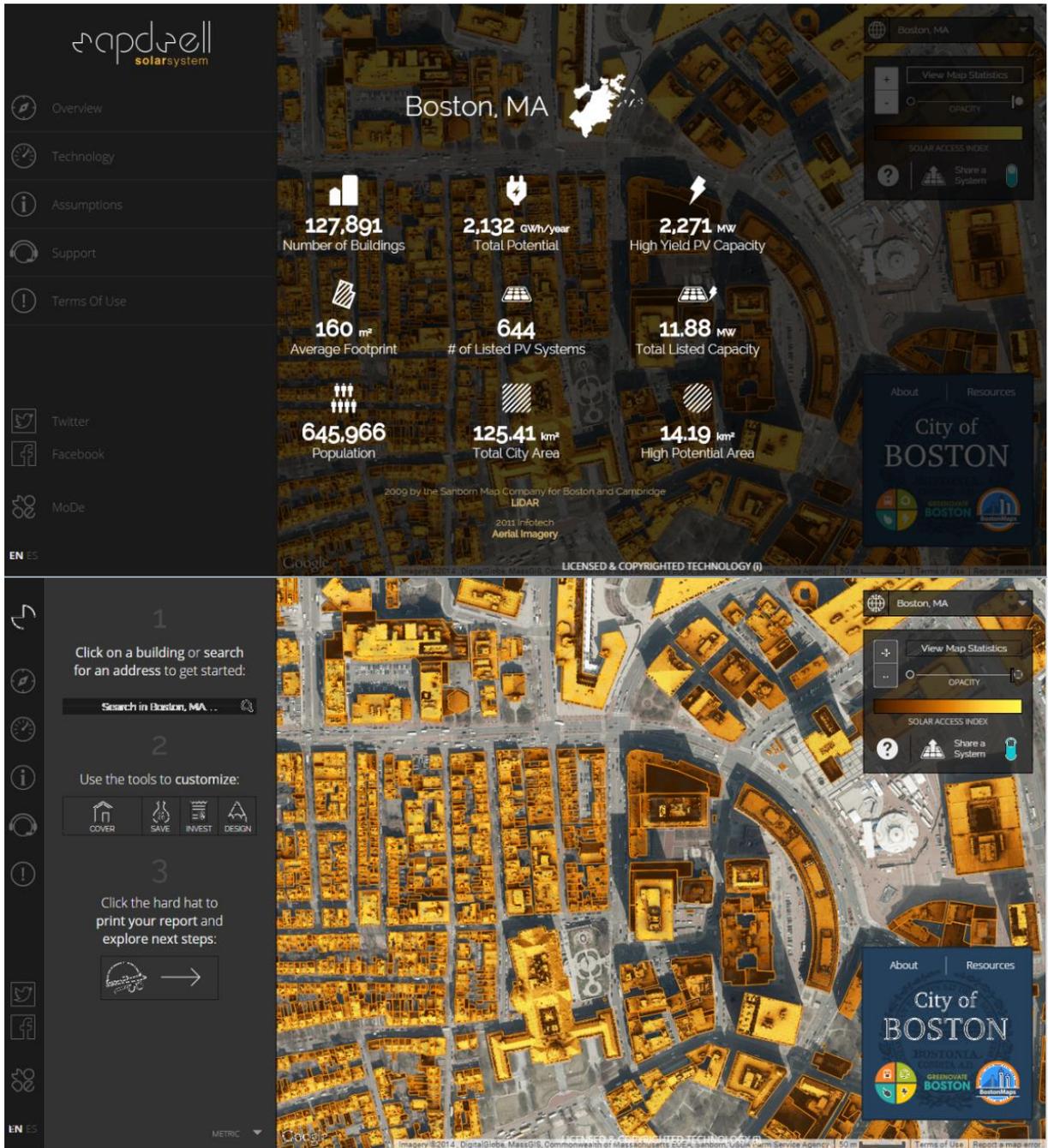


Figura 4.11 - Detalhes do mapa solar da cidade de Boston

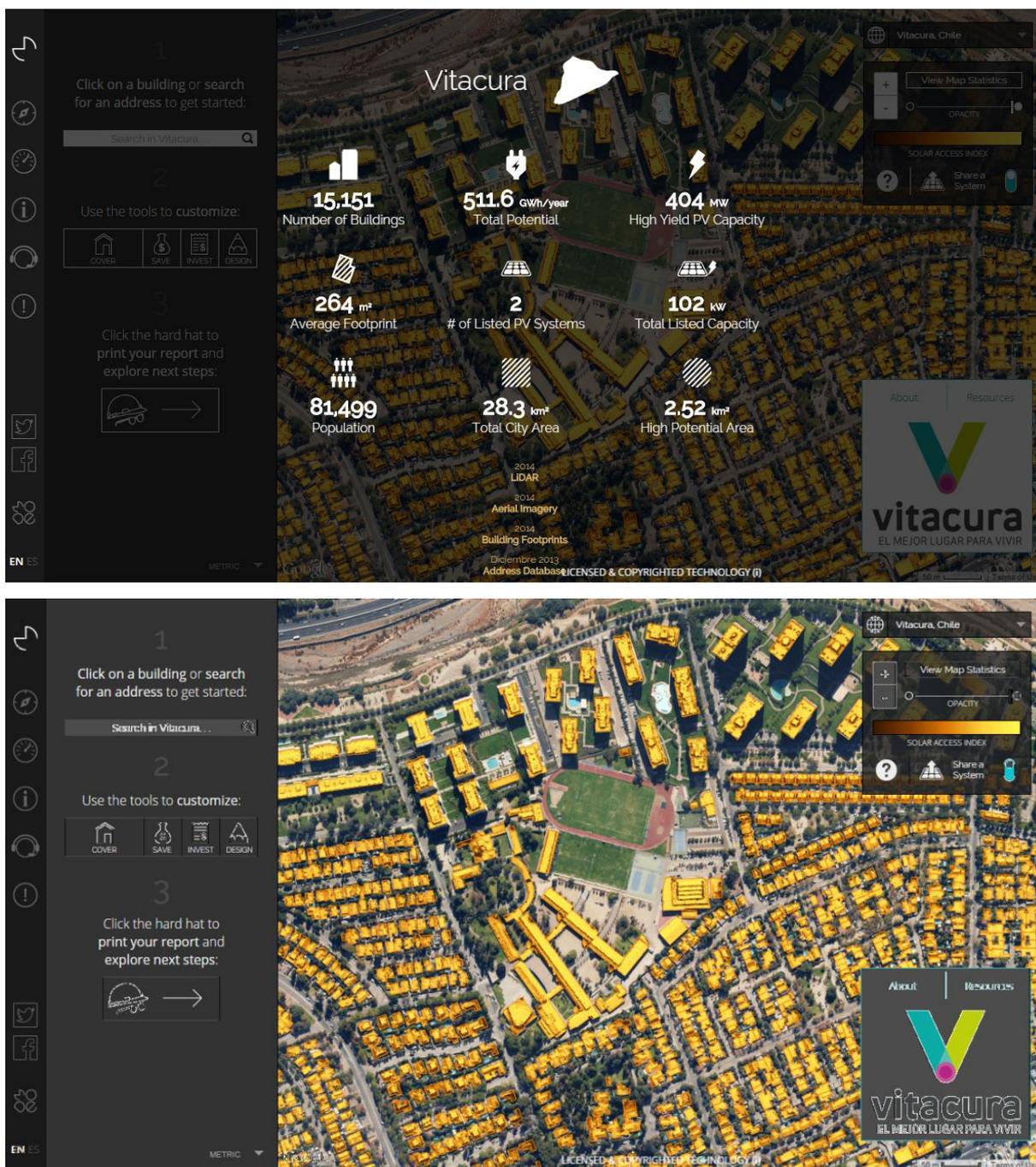


Figura 4.12 - Detalhes do mapa solar da cidade de Vitacura

4.4 Atlas Solar da cidade de Berlim

A cidade de Berlim, na Alemanha, assumiu mundialmente o compromisso de reduzir em 40% suas emissões de CO₂ até 2020 com relação aos níveis de 1990. (Fonte: *City Climate Leadership Awards*). Para atingir esta meta, entre outras providências, foi desenvolvido o Atlas Solar de Berlim, Figura 4.13. Baseado em variáveis como incidência de radiação, número de horas de sol, inclinação nas superfícies, áreas e momentos de sombreamento e a

área de telhado disponível, é estimado o potencial de produção de energia solar para cada cobertura, além dos custos de investimento com o sistema e o índice de redução de emissões que acarretaria. Tudo isto remotamente, através da tecnologia LiDAR.



Figura 4.13 - Mapa solar para uma região da cidade de Berlim

Este projeto foi desenvolvido por uma equipe de pesquisadores da Universidade de Ciências Aplicadas em Osnabrück e foi implementado pela primeira vez em duas áreas piloto com uma área total de 19 km² e aproximadamente 14.300 telhados. Parte do programa "Sun-Area", as cidades de Osnabruck, Gelsenkirchen e Braunschweig foram alvo de sensoriamento remoto e determinação de área de telhados (projeção das edificações) para estimar de potencial fotovoltaico e determinar como o uso de energia solar pode ser aproveitado em diversas áreas urbanas utilizando módulos fotovoltaicos. Os cálculos iniciais para a cidade de Berlim sugeriram que cerca de dois terços de todo o consumo de energia das famílias e empresas de pequeno porte poderiam ser gerados através de módulos fotovoltaicos instalados em seus telhados.

A técnica empregada permite, também, que sejam analisadas as situações de sombreamento durante todo o ano, provenientes de: vegetação, edifícios mais altos e postes ou chaminés. Após os cálculos e localização de pontos de radiação nos telhados, são gerados polígonos representando áreas homogêneas de telhados com a previsão de radiação incidente por área. Além disto, este projeto também modelou grande parte da cidade em 3D, atuando juntamente com o mapeamento de telhados e estimativa de potencial solar.

A implementação do Atlas Solar de Berlim, ilustrado nas Figuras 4.14 e 4.15, como uma ferramenta Web-GIS tem três objetivos principais: mostrar a localização de instalações solares na cidade (fotovoltaicas e térmicas), visualizar o potencial do setor de energia solar no ambiente urbano de Berlim e destacar os telhados mais adequados para novas instalações.

O objetivo principal é tornar-se uma cidade neutra em carbono até 2050. Como resultados desta política, até 2010 a cidade já reduziu 25% das emissões com relação aos níveis de 1990. A Figura 4.16 ilustra a ferramenta de mitigação de emissões de CO₂ na cidade de Berlim.



Figura 4.14 - Potencial fotovoltaico para cada telhado na cidade de Berlim

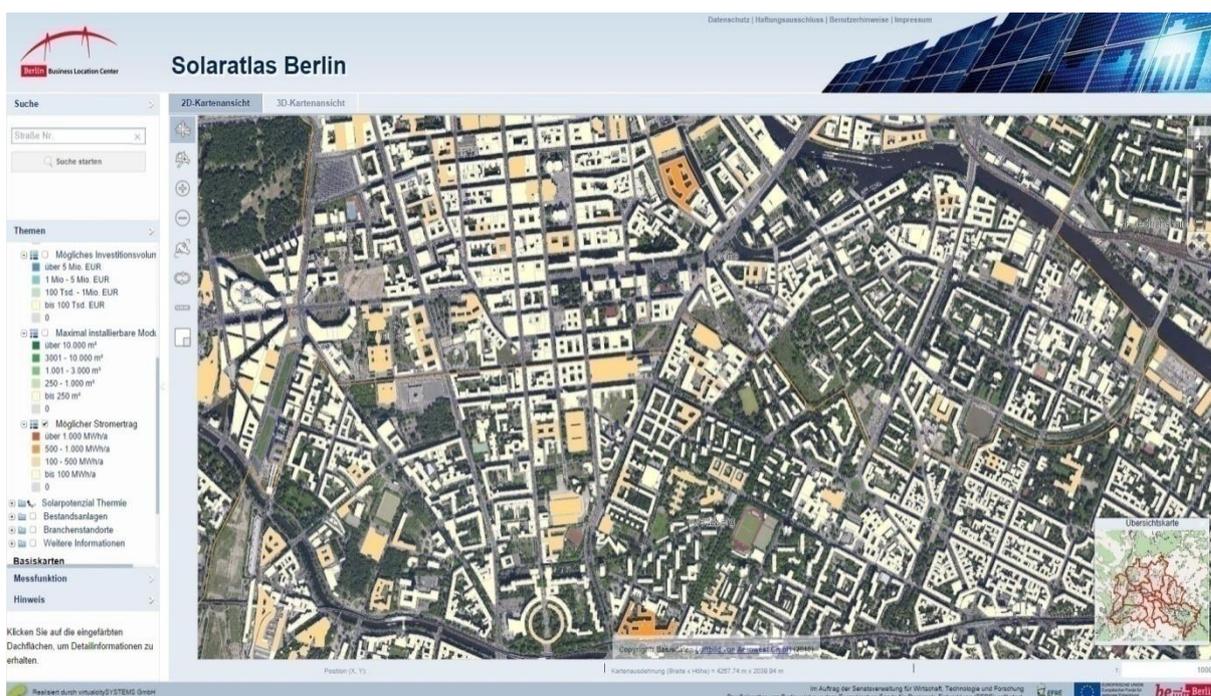


Figura 4.15 - Estimativa de produção de energia a partir do potencial dos telhados.



Figura 4.16 - Mitigação de emissões de CO₂ com a utilização de energia fotovoltaica.

4.5 Mapa Solar da cidade de Nova York

Financiado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE - Department of Energy) o mapa da cidade de Nova York fez parte do programa "Cidades Solares da América". Com a parceria do Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL - *National Renewable Energy Laboratory*) o mapa foi criado pelo Centro de Pesquisas Avançadas de Informação Geográfica (CARSI) da *Hunter College* da CUNY. O NYC Solar Map (Figura 4.17) estima o potencial solar em cada cobertura das edificações, utilizando modelos computacionais para calcular a radiação solar direta e difusa incidente para cada metro quadrado da cidade. O modelo baseia-se na posição do sol, condições atmosféricas em geral e sombreamentos. Para a estimativa dos efeitos de sombreamentos nas coberturas foi utilizado o sensoriamento remoto através de LiDAR para a criação de um modelo digital, capturando a elevação das superfícies da terra, edifícios e demais obstáculos. A aplicação web foi construída utilizando GIS, mapas topográficos e mundiais através de ferramentas de sites de busca, além da compatibilização de dados dos departamentos de loteamentos, TI e telecomunicações da prefeitura de Nova York.

A área de telhado utilizável dentro de cada cobertura é estimada com base no declive, rugosidade/aspereza da superfície, luz solar disponível e a forma da construção. Quando o sistema calcula o potencial de energia solar de um polígono arbitrário, a área deste polígono é

tratada como utilizável. Os efeitos de azimute e ângulos de inclinação são estimados utilizando o modelo solar encontrado na ferramenta PVWatts (NREL). Os modelos solares foram calibrados utilizando medições disponíveis em terra, incluindo dados das estações meteorológicas próximas e da própria *Hunter College*. Também são fornecidas alternativas de incentivos para financiamentos e cenários de investimento e fluxo de caixa.

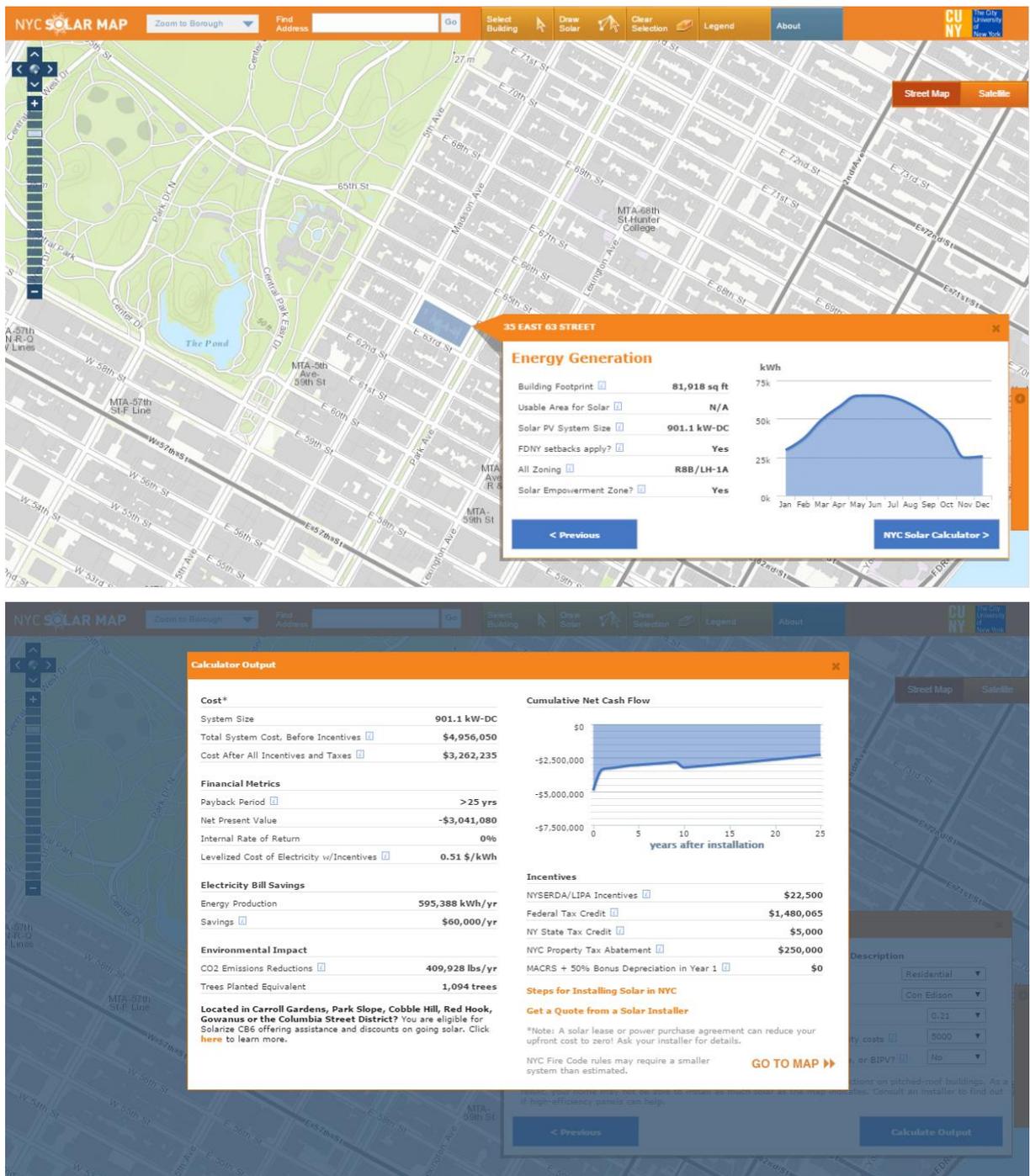


Figura 4.17 - Visualização da interface do *NYC Solar Map*.

5 METODOLOGIA

A cidade de Porto Alegre é a capital do estado do Rio Grande do Sul (RS). Localizada a 30° Sul e a 51° oeste (latitude/longitude) possui uma área aproximada de 497 mil km² e uma população aproximada de 1,5 milhão de pessoas. O clima de Porto Alegre é subtropical úmido, apresentando, bem definidas, as quatro estações do ano e grande variabilidade dos elementos do tempo meteorológico (Fonte: PMPA,2015). A concessionária de energia elétrica para a cidade de Porto Alegre é a CEEE-D e, dentro deste contexto, 60% do consumo de energia é realizado pelos setores residencial e comercial juntos, ilustrado pela Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Consumo de energia elétrica setorial no RS, em 2013.
Fonte: BERS, 2014.

| Concessionárias | Residencial % | Rural % | Comercial % | Industrial % | Outros % |
|--------------------------------------|------------------|--------------|----------------|-----------------|--------------|
| CEEE-D | 32,51% | 7,04% | 27,49% | 24,24% | 8,72% |
| AES Sul | 29,34% | 10,37% | 15,17% | 37,39% | 7,72% |
| RGE | 25,94% | 8,06% | 16,33% | 42,07% | 7,59% |
| Total Grandes Concessionárias | 29,27% | 8,49% | 19,66% | 34,57% | 8,01% |

Uma vez que os dois setores, residencial e comercial, são os mais representativos dentro da cidade, torna-se de fundamental importância executar políticas que busquem a eficiência energética, redução de consumo e demanda de energia, além de soluções para desperdícios energéticos nas linhas de transmissão e, também, novas soluções para diminuir a dependência pela energia da rede. Alternativas como a geração distribuída e sistemas de energias renováveis nas edificações possuem grande atrativo neste sentido. Para tanto, ferramentas computacionais para criação de modelos geométricos e análises climáticas e de estimativa de instalação e produção de energia nas edificações serão apresentadas, tendo como cenário a cidade de Porto Alegre.

5.1 Seleção das Regiões e Tipologias de Estudo

O presente trabalho apresentará a análise de sombras e radiação solar incidente nas coberturas das edificações de quatro regiões diferentes na cidade de Porto Alegre. As regiões escolhidas representam diferentes tipologias de edificações e perfis de utilização. As tipologias de estudo são:

- 1) Edificações Comerciais como escritórios, serviços públicos e privado;
- 2) Galpões Comerciais como oficinas, depósitos, estoques e serviços técnicos;
- 3) Edificações Residenciais em regiões de baixa densidade ocupacional;
- 4) Edificações Residenciais em regiões de alta densidade ocupacional;

Estes tipos de edificações foram selecionadas por representarem as mais presentes dentro do ambiente urbano e, assim, possuir relação com outras edificações de mesma tipologia e perfil de uso, contudo, em outros bairros não verificados neste trabalho.

A seleção das regiões de estudo, dentro dos bairros selecionados, foi determinada a partir das seguintes premissas:

- Localização do bairro dentro da cidade de Porto Alegre;
- Funcionalidade básica do bairro: comercial, industrial, residencial ou mista;
- Similaridade entre as edificações da região: área de projeção e alturas;
- Elevação: sem diferenças de cota, presença de morros, aclives ou declives;
- Morfologia da cobertura: telhados, lajes de cobertura, inclinações e espaços técnicos;
- Fácil identificação dos limites construtivos das edificações: determinação das áreas de projeção;
- Modelamento geométrico tridimensional independente de demais condições do entorno: edificações do entorno sem muita influência sobre a região selecionada (aspectos de sombreamentos e interferência na radiação solar incidente);
- Compatibilização com documento "Planialtimétrico da cidade de Porto Alegre" (datado da década de 80).

Considerando as premissas citadas, as quatro regiões selecionadas são:

- 1) Centro Histórico: prédios comerciais de escritórios e serviços público/privado;
- 2) São Geraldo: galpões comerciais, depósitos e oficinas;
- 3) São Sebastião: bairro residencial de baixa altura e densidade ocupacional;
- 4) Santana: bairro residencial em região central de maior densidade ocupacional;

5.1.1 Bairro Centro Histórico

Este bairro possui aproximadamente 39 mil moradores em uma área de 228 ha (Fonte: PMPA, 2015). A Figura 5.1 indica o bairro e a região selecionada. No Apêndice A encontra-se a planta de projeções das edificações da região selecionada com a identificação dos logradouros limítrofes.

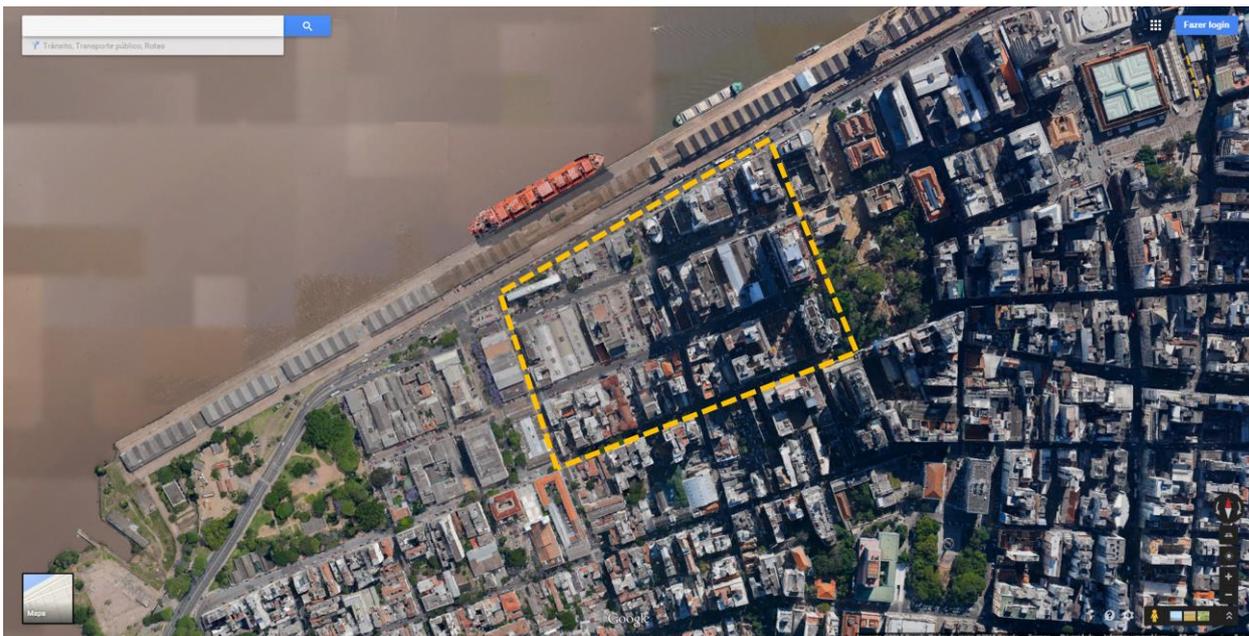


Figura 5.1 - Região selecionada no bairro Centro Histórico.
Imagem: Google Maps, 2014.

Esta é uma região próxima do cais do porto, sem variar sua elevação e tipicamente com edificações comerciais. O limite norte, Av. Mauá, não possui obstruções nem sombreamentos; o limite Sul possui edificações mais baixas e no máximo de mesma altura; o limite oeste encontra-se a Praça da Alfândega, sem interferir em sombreamentos; e o limite leste possui edificações de menor altura. Desta forma pode-se isolar esta região para o modelamento geométrico 3D dos volumes prediais.

5.1.2 Bairro São Geraldo

Este bairro possui aproximadamente 8 mil moradores em uma área de 144 ha (Fonte: PMPA, 2015). A Figura 5.2 indica o bairro e a região selecionada: No Apêndice A encontra-

se a planta de projeções das edificações da região selecionada com a identificação dos logradouros limítrofes.

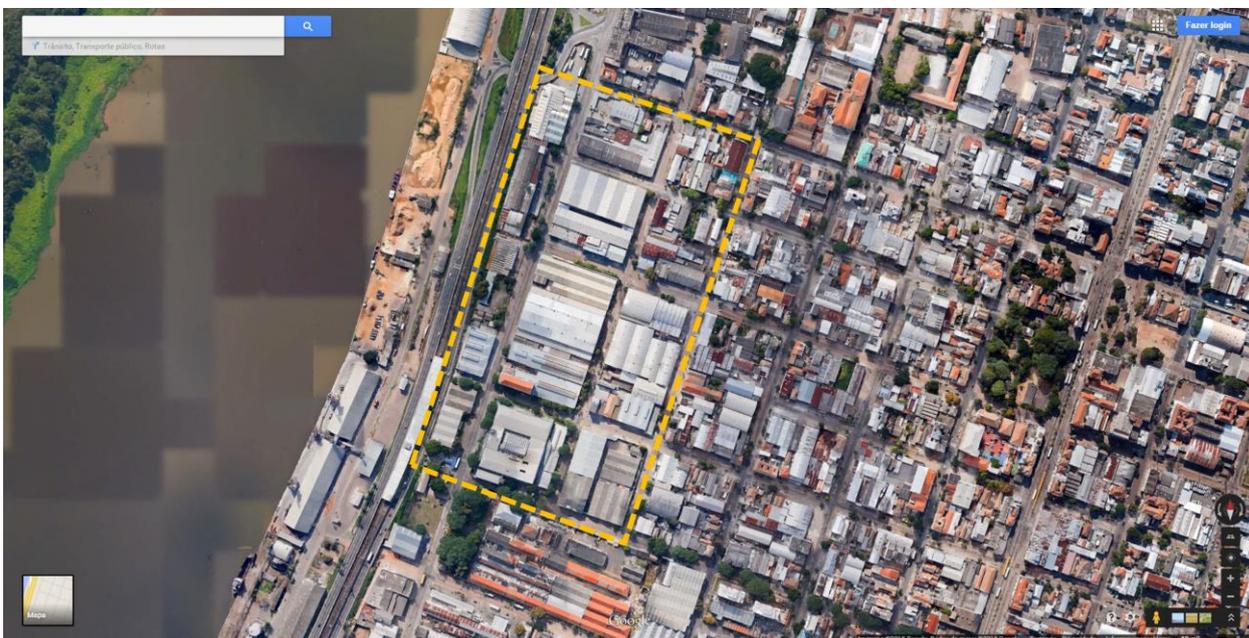


Figura 5.2 - Região selecionada no bairro São Geraldo.
Imagem: Google Maps, 2014.

Esta é uma região entre o centro da cidade e o aeroporto, costeira ao Rio Jacuí. Região plana com edificações comerciais com tipologia de galpões, depósitos e oficinas. Os limites norte e leste, Rua Cairú e Av. Rio Grande, respectivamente, não possuem edificações nem elementos de maior altura, comparado com a região selecionada. O limite sul possui 2 grandes edificações residenciais, entretanto não afetam com relação a algum tipo de sombreamento e nem fazem parte do tipo e perfil de uso desta região. O limite oeste é a Avenida da Legalidade e o Rio Jacuí. Assim posto os limites da região, pode-se partir para o modelamento geométrico.

5.1.3 Bairro São Sebastião

O bairro possui aproximadamente 7 mil moradores em uma área de 70 ha (Fonte: PMPA, 2015). A Figura 5.3 mostra o bairro e a região selecionada. No Apêndice A encontra-se a planta de projeções das edificações da região selecionada com a identificação dos logradouros limítrofes.

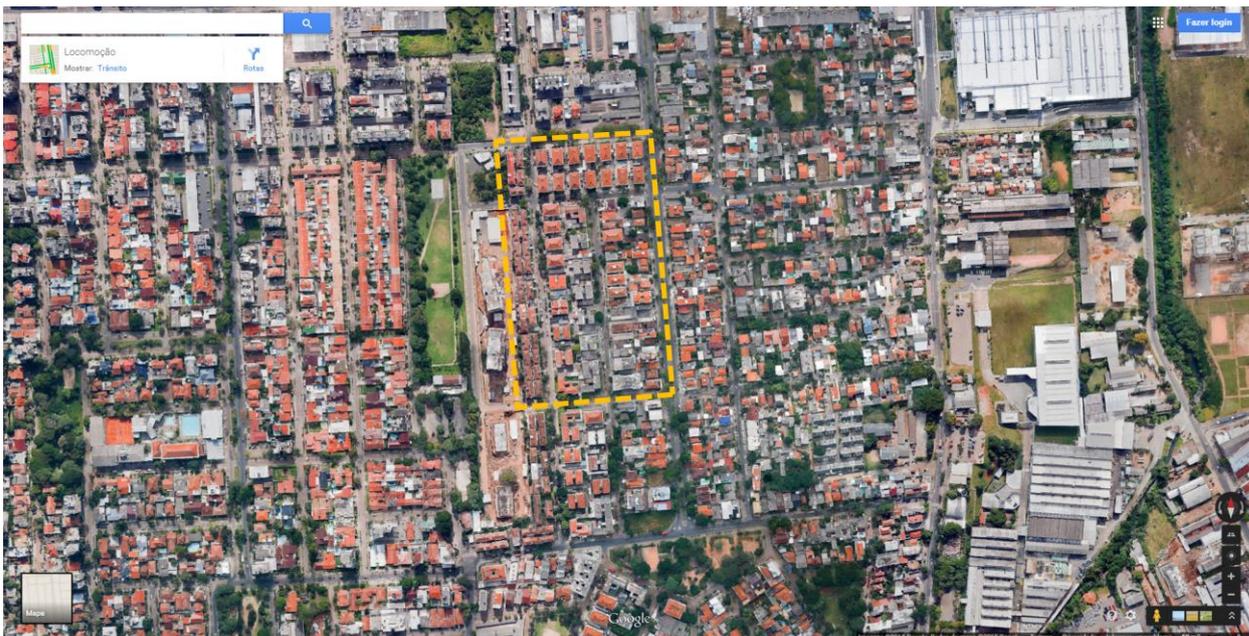


Figura 5.3 - Região selecionada no bairro São Sebastião.
Imagem: Google Maps, 2014.

Esta região da cidade é tipicamente residencial. Embora encontra-se entre duas grandes avenidas de alto tráfego (Av. Assis Brasil e Av. Sertório), possui grande parte do território ocupado por edificações residenciais de baixa altura e de mesmo perfil, além de diversas casas e pequeno comércio local. Os limites norte e leste possuem edificações de pequeno porte e altura, sem influenciar em sombreamentos para as edificações da região selecionada, assim como o limite sul. Já o limite oeste, possui duas grandes edificações residenciais de grande altura (não visualizadas nesta imagem) e, por consequência, acarretando em grande sombreamento na região em estudo. Estas edificações serão contabilizadas no estudo de sombras e incidência solar, entretanto, não estarão contabilizadas como parte da área total de projeção de coberturas e análises subsequentes por diferirem da tipologia e perfil de uso das edificações em contexto.

5.1.4 Bairro Santana

Este bairro possui aproximadamente 21 mil moradores em uma área de 149 ha (Fonte: PMPA, 2015). A Figura 5.4 mostra o bairro e a região selecionada. No Apêndice A encontra-se a planta de projeções das edificações da região selecionada com a identificação dos logradouros limítrofes.

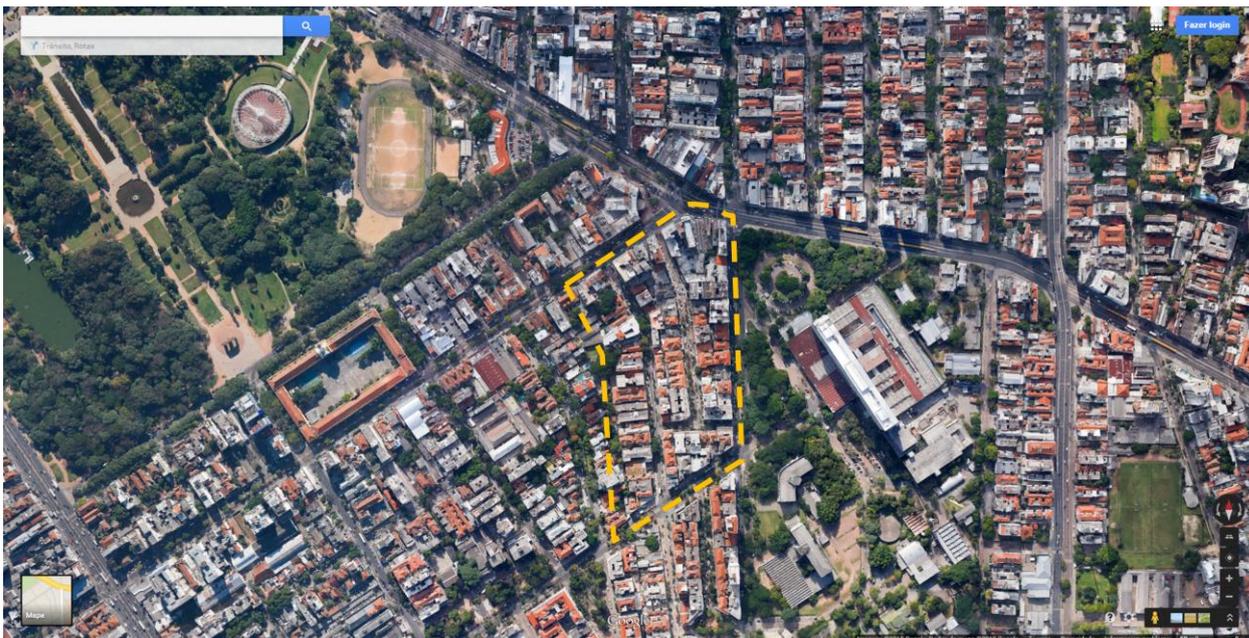


Figura 5.4 - Região selecionada no bairro Santana.
Imagem: Google Maps, 2014.

Esta é uma região de grande fluxo de pessoas e tráfego. É uma mistura de edificações residenciais e comerciais, além de serviços públicos para a sociedade, como universidades, escolas, hospitais públicos e parques. Ainda assim, a região selecionada possui praticamente o mesmo perfil residencial, de média altura e de grande densidade de ocupação, com as edificações próximas umas das outras. O limite leste possui um grande espaço ocupado por árvores e o estacionamento de um hospital, não interferindo no aspecto de sombras e obstáculos à radiação solar. O limite norte é composto pelas ruas Protásio Alves e Venâncio Aires, onde, ou as edificações próximas são de mesma altura ou inferior, ou estão longe demais para causar qualquer impacto no aspecto de possíveis sombreamentos às coberturas das edificações da região selecionada. O limite oeste possui, em sua maioria, edificações mais baixas e, portanto, sem consequência para as análises de radiação solar. Entretanto, apenas uma edificação de maior altura estará ocasionando algum sombreamento nas edificações da região selecionada.

5.2 Compatibilização das áreas de projeção das edificações

A partir da seleção das regiões de estudo, a identificação das edificações e respectivas coberturas/telhados foi realizada. Utilizando como ponto de partida o documento em Autocad para o "Levantamento Planialtimétrico da cidade de Porto Alegre", foram identificadas as

regiões selecionadas e isoladas as áreas de projeção das edificações. As etapas de desenvolvimento dos mapas urbanos com as áreas de projeção das edificações está descrita pela Figura 5.5.

A verificação das áreas de projeção baseou-se em três diferentes referências:

1. Levantamento Planialtimétrico: arquivo autocad continha uma "*polyline*" para cada área de projeção de edificação e/ou demais estrutura/superfície. Desta forma, com uma superfície fechada, era possível extrair a área estipulada por este polígono;
2. Google Maps: a partir da escala informada a cada elevação de imagem, durante a exibição, é possível estipular uma área aproximada e comparar resultados;
3. Google Earth Pro: a partir dos comandos "Régua" e "Polígono" é possível determinar limites para as edificações em vista e determinar a área de projeção.

A Figura 5.5 (c) mostra as áreas confirmadas e planta compatibilizada com as imagens de satélite informadas pelos softwares Google Earth e Google Maps de datas mais recentes.

Para estimar a altura das edificações foi utilizado como hipótese de modelagem a altura de pé-direito igual a 3 m. A quantidade de pavimentos das edificações é multiplicada por este valor para estimar o volume e a cota do telhado/cobertura da edificação. Em alguns casos particulares, onde pudesse ocorrer uma variação intermediária de altura entre os pavimentos, foi utilizado um valor de altura de pé-direito igual a 1,5 m. Assim foi possível manter a relação de alturas entre as edificações e os possíveis efeitos de sombreamento, verificados nas ferramentas Google Earth e Google Maps.

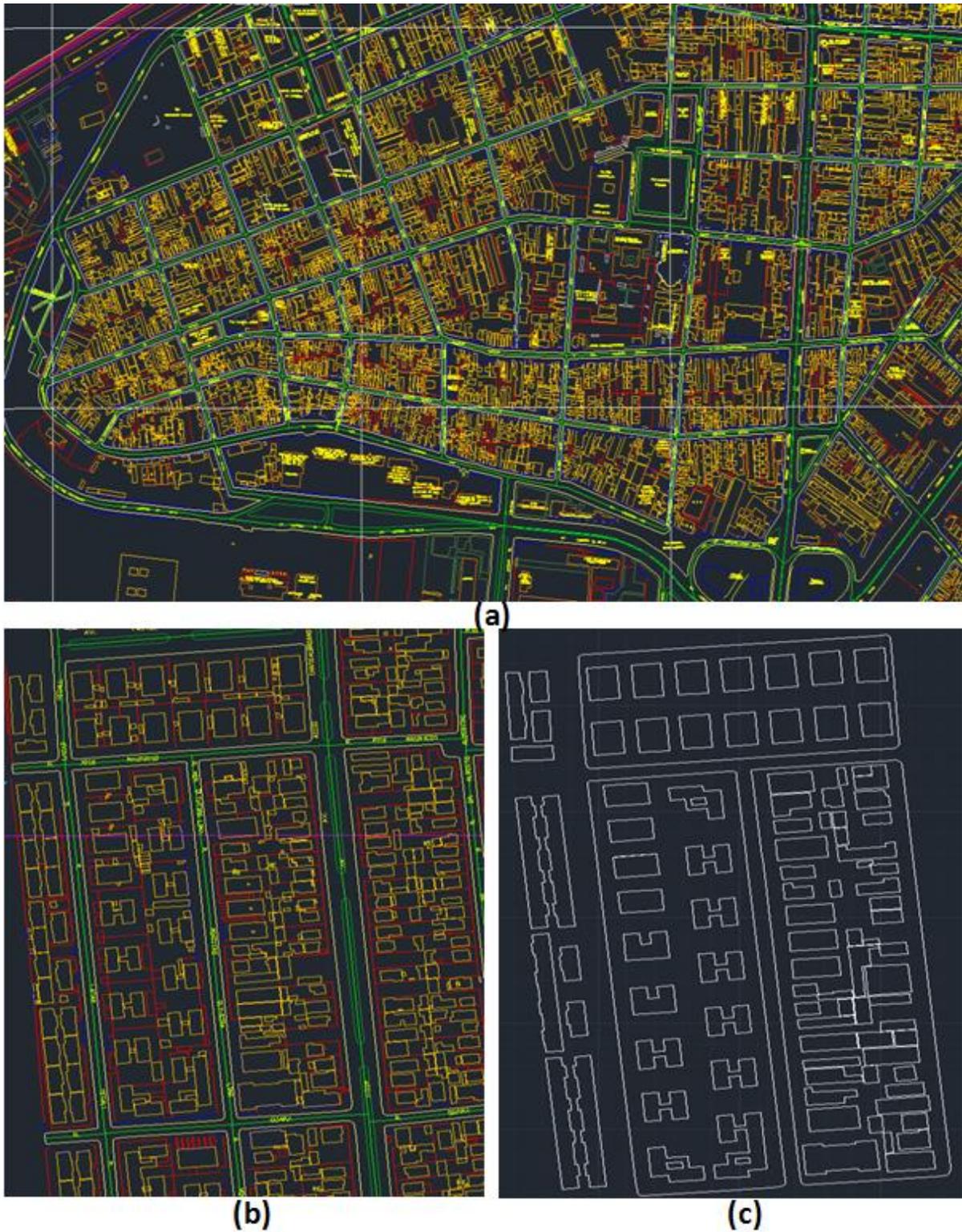


Figura 5.5 - Metodologia de compatibilização das áreas de projeção das edificações: (a) Levantamento Planialtimétrico da cidade de Porto Alegre; (b) Seleção da tipologia de bairro; (c) Seleção da região de análise com as áreas de projeção das edificações compatibilizadas.

5.3 Softwares de Simulação e Modelamento Geométrico

Para o modelamento geométrico tridimensional (3D) dos bairros selecionados foi utilizado um software de *Building Information Modeling* (BIM), que é uma representação digital das características físicas e funcionais de uma edificação. É um recurso para o conhecimento compartilhado das informações sobre a construção e uma base confiável para as decisões sobre o ciclo de vida de uma edificação, definida desde a sua concepção até sua demolição. Uma premissa básica deste tipo de ferramenta é a elaboração de diferentes autores e projetistas em diferentes fases de projeto (Fonte: NBIMS-US, 2015). O software selecionado foi o Autodesk Vasari, uma variação do software Autodesk Revit e utilizado para definições conceituais de projetos de edificações.

Autodesk Revit é um software de projeto e construção desenvolvido para a Modelagem de Informação da Construção (BIM), o que possibilita um fluxo linear de concepção de ideias e conceitos sobre uma edificação até a sua construção e devida finalização e entrega. Possui ferramentas e capacidades para quase todas as dimensões de projeto envolvidas em uma construção, como: arquitetura, obra e construção, estrutural, projetos mecânicos, elétricos e hidráulicos. Tem a capacidade de integração e trabalho em conjunto de diversos profissionais.

Autodesk Vasari é uma ferramenta que auxilia arquitetos, engenheiros, projetistas e profissionais em geral para desenvolver construções mais eficientes e sustentáveis, com capacidades de análise climática, efeitos da radiação solar e dos ventos sobre as edificações. As análises envolvidas focam no desenvolvimento conceitual e paramétrico das edificações, etapa anterior à construção, possibilitando diversas análises comparativas para as tomadas de decisões e também suporta análises modelagem 3D e de desempenho energético de edificações. Software de fácil uso e acesso que possui compatibilidade com a plataforma Autodesk Revit para aplicação BIM, que garante uma melhor execução do projeto em desenvolvimento. O software está na versão beta 3.

A escolha por este software ocorreu pelo fato de ser compatível com um software mais robusto e com maior número de capacidades como o Revit, possuir as capacidades de modelagem 3D, análise climática, análise da radiação solar sobre massas e volumes genéricos e não necessitar grande potencial computacional de processamento e espaço em disco.

A Figura 5.6 mostra a interface do usuário do software.

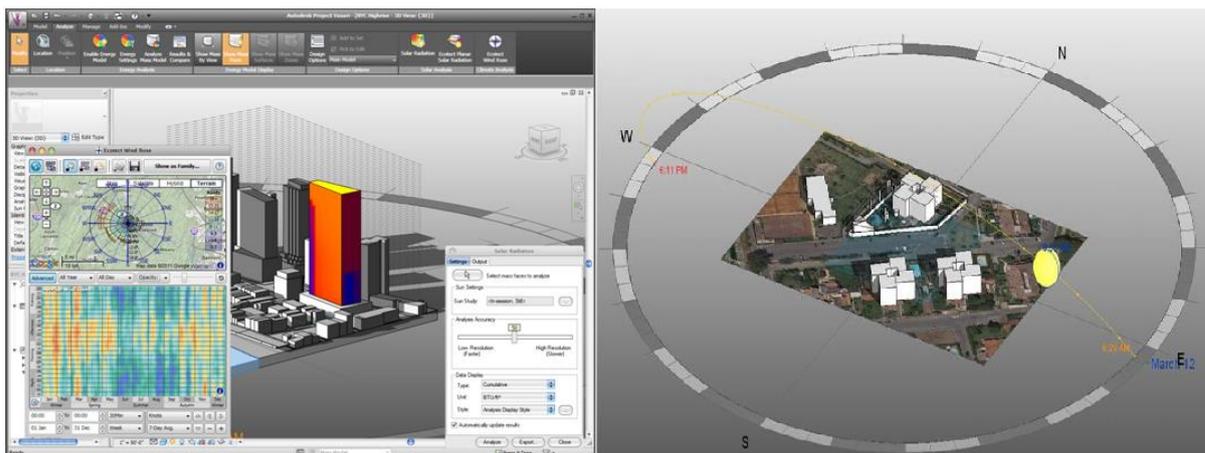


Figura 5.6 - Interface de usuário do software Autodesk Vasari.
Fonte: Autodesk Vasari.

5.3.1 Arquivos Climáticos Disponíveis para Utilização

Um insumo básico para análise de energia em edificações são dados climáticos confiáveis. A Autodesk *Climate Server* oferece acesso para uma vasta quantidade de dados dentro dos softwares GreenBuilding Studio, Vasari e Revit. A maioria dos dados vem de estações meteorológicas físicas, situadas em grandes aeroportos ou perto deles, laboratórios e etc. O *Climate Server* também possui 1,6 milhões de estações meteorológicas virtuais baseadas em simulações meteorológicas para diversas localidades no mundo, significando que é possível encontrar dados climáticos úteis a menos de 14 km de distância de qualquer localidade. Estas estações climáticas consideram para uma determinada localidade a distância para o local de projeto escolhido (microclimas locais), elevação da localidade, e geografia do entorno como montanhas, lagos e outras formas que possam influenciar o clima local. Considerando estas variáveis são criadas as diferentes estações meteorológicas locais virtuais (Fonte: Autodesk *Building Performance Analysis*). No entanto é necessário tomar um cuidado extra ao utilizar as estações virtuais, pois erros graves podem levar a projetos bastante afastados da realidade, como será mostrado mais adiante nesta dissertação.

As Figuras 5.7 (a) e (b) mostram a disponibilidade de dados climáticos e o posicionamento das estações climáticas em determinada localidade selecionada. Os dados meteorológicos são convertidos, normalmente, em arquivos climáticos com duração de um ano e através de incrementos de hora em hora e, nesta ferramenta, podem ser encontrados nos seguintes tipos de arquivos:

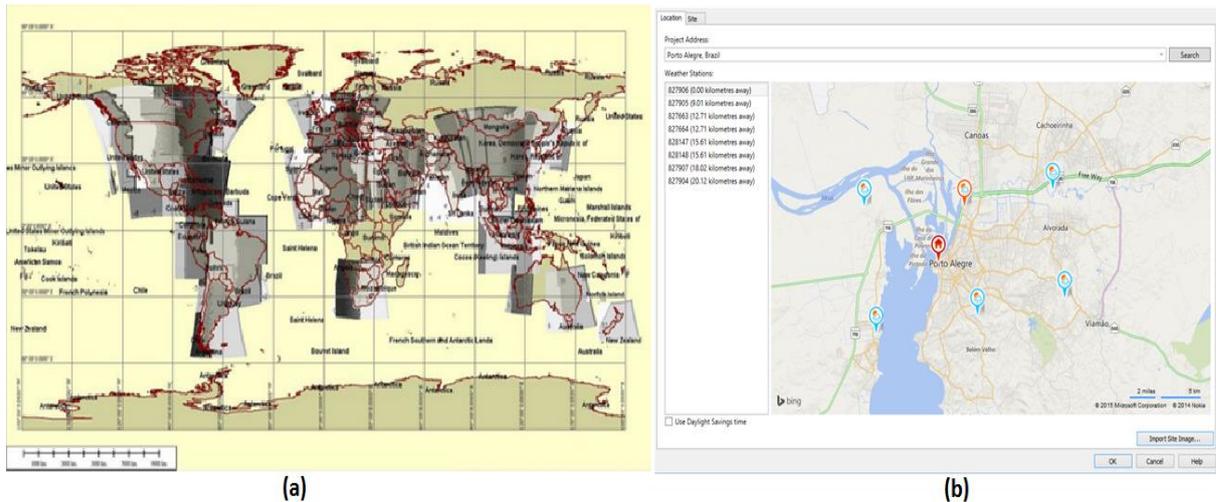


Figura 5.7 - Dados climáticos disponíveis: (a) mundo; (b) cidade de Porto Alegre.

1) *Typical Meteorological Year (TMY2) Weather Data:*

Esta é uma metodologia comum para a criação de arquivos climáticos e não necessariamente é uma média verdadeira para um determinado clima local pois é baseada somente em 12 meses individuais observados, selecionados e agrupados para formar um ano completo. Mesmo assim, apresenta picos e oscilações típicas do clima, importante para as análises climáticas e de energia em edificações. Dados TMY2 são uma compilação dos dados de tempo selecionados para um local específicos gerados a partir do Banco de Dados Nacional para Radiação Solar (*National Solar Radiation Data Base, 1961-1990*).

2) *California Title 24 Weather Data (CTZ2)*

Estes dados meteorológicos abrangem as 16 zonas climáticas do estado da Califórnia, nos Estados Unidos. Os dados são disponibilizados pela Comissão de Energia da Califórnia (*California Energy Commission*).

3) *Autodesk Climate Server Weather Data*

O *GreenBuilding Studio* possui dados meteorológicos para mais de 1 milhão de localidades ao redor do mundo para uma resolução espacial de aproximadamente 20 km. Alguns arquivos climáticos gerados a partir desta metodologia podem diferir dos arquivos TMY2, compilados de uma base de tempo que abrange 30 anos.

4) *3TIER® Weather Data*

3TIER® é uma empresa fornecedora de dados meteorológicos que incorporam uma reanálise de todo o mundo com modelos de mesoescala de previsão numérica de tempo (NWP

- *numerical weather prediction*). Estes modelos podem simular períodos passados de tempo para criar um completo cenário climático da localidade.

O modelo NWP é baseado na física da atmosfera e projeta as variáveis meteorológicas de interesse. Uma localidade de análise de várias centenas de quilômetros quadrados é dividida em uma grade de 10 a 20 segmentos de km² e, desta forma, são realizadas simulações dentro de cada segmento da grade. As simulações são inicializadas com dados meteorológicos assimilados a partir de uma variedade de fontes, incluindo: estações meteorológicas de superfície, relatório de bóias, aviões comerciais, sistemas de sondagem rádio-acústicas (RASS - *Radio Acoustic Sounding System*), radar de ventos por doppler, GPS e satélite, por exemplo.

Os modelos de previsão de tempo utilizados apresentam alta habilidade na previsão do tempo para as primeiras 48 horas do período de simulação. Conforme o tempo de simulação cresce, diferenças mínimas entre a realidade e as condições iniciais do modelo são ampliadas. Estes valores são gravados e também farão parte do arquivo de dados para um ano, quando o modelo é reinicializado com um novo conjunto de observações (dados assimilados).

As estações meteorológicas virtuais utilizadas pelo *GreenBuilding Studio* utilizam os seguintes modelos: Ciclo de atualização rápida (RUC - *Rapid Cycle Update*, em inglês) e Modelo Meteorológico de Mesoescala versão 5 (MM5 - *Meteorological Model version 5*). RUC foi utilizado para a maioria dos dados (conjuntos de dados climáticos do ano de 2004), entretanto ocorriam algumas lacunas de dados nestes arquivos. As simulações MM5 foram então utilizadas para preencher estas lacunas do conjunto de dados (base de dados de 2006).

5.3.2 Análise de Sombras e Radiação Solar Incidente

O estudo de sombreamentos para cada uma das regiões selecionadas verifica como será o comportamento dos efeitos de sombreamento, de acordo com o movimento aparente do Sol, nas coberturas das edificações. A partir destas verificações é possível determinar as áreas de melhor aproveitamento da radiação solar para sistemas fotovoltaicos. Além disto, a análise de sombreamento está diretamente relacionada com a verificação de radiação solar incidente ao longo de um ano, ou seja, quanto mais sombreamentos, provavelmente menor será a irradiância na superfície, validando a análise para o melhor posicionamento de sistemas fotovoltaicos nestas coberturas.

Antes de se instalar qualquer sistema fotovoltaico deve ser estudado o comportamento dos sombreamentos. Um ambiente urbano com diversas superfícies podendo produzir algum

tipo de sombreamento pode ser de importante verificação. Entretanto, muitas vezes a área disponível para uma instalação será quase sempre sombreada, caso onde não é recomendada a instalação.

As verificações de sombreamentos têm como cenário os dias de: solstício de verão (21 de dezembro), pelo fato de ser o dia com maior número de horas de sol e no qual o movimento aparente do sol percorre uma trajetória de maior elevação; solstício de inverno (21 de junho), pelo fato de ser o dia com menor número de horas de sol e no qual o movimento aparente do sol percorre uma trajetória de menor elevação; e o equinócio de outono (21 de março). A Figura 5.8 ilustra este tipo de estudo, que representa o movimento aparente do sol com relação a um objeto qualquer, para a cidade de Porto Alegre. A cidade está localizada a uma latitude de 30° (Sul) e a combinação entre a excentricidade do eixo polar da Terra, o movimento de translação ao redor do Sol e a declinação solar (δ) (Equação 2.2) ocasiona os deslocamentos de 23,5° para norte e para sul do movimento aparente do Sol, formando os dias de solstício de verão e inverno.

O estudo de radiação solar, incidente sobre uma edificação, possui grande importância quando se busca a eficiência energética e uma boa relação entre a arquitetura e os sistemas prediais propostos. Compreender esta variável ajuda a melhor orientar sua edificação e aberturas a fim de melhor aproveitar, através de painéis solares, fotovoltaicos ou arquitetura passiva, ou evitar a energia solar para reduzir a carga térmica da edificação, manchas de sol e ofuscamento por iluminação natural, por exemplo. A intensidade do sol varia de acordo com a claridade da atmosfera e o ângulo em que os "raios de sol" incidem sobre uma superfície, chamado ângulo de incidência. Quanto mais perpendicular for este ângulo, maior será a energia transmitida.

Os valores de irradiação solar podem ser baseados em duas componentes principais: radiação direta e radiação difusa. As condições de nebulosidade do céu irão afetar a intensidade e distribuição da radiação solar. Um céu nublado reduz a quantidade de radiação solar direta e aumenta a componente de radiação difusa; entretanto, um céu claro permitirá a incidência de radiação solar diretamente nas superfícies de uma construção.

Os valores de radiação solar incidente calculados e visualizados são baseados na geometria das edificações e nos dados horários de irradiação do arquivo climático. O cálculo inclui sombreamentos de objetos ao redor, a porção de céu visível pela superfície e o ângulo de incidência. A irradiação global incidente sobre uma superfície (I) é dada pela Equação 5.1 na sequência:

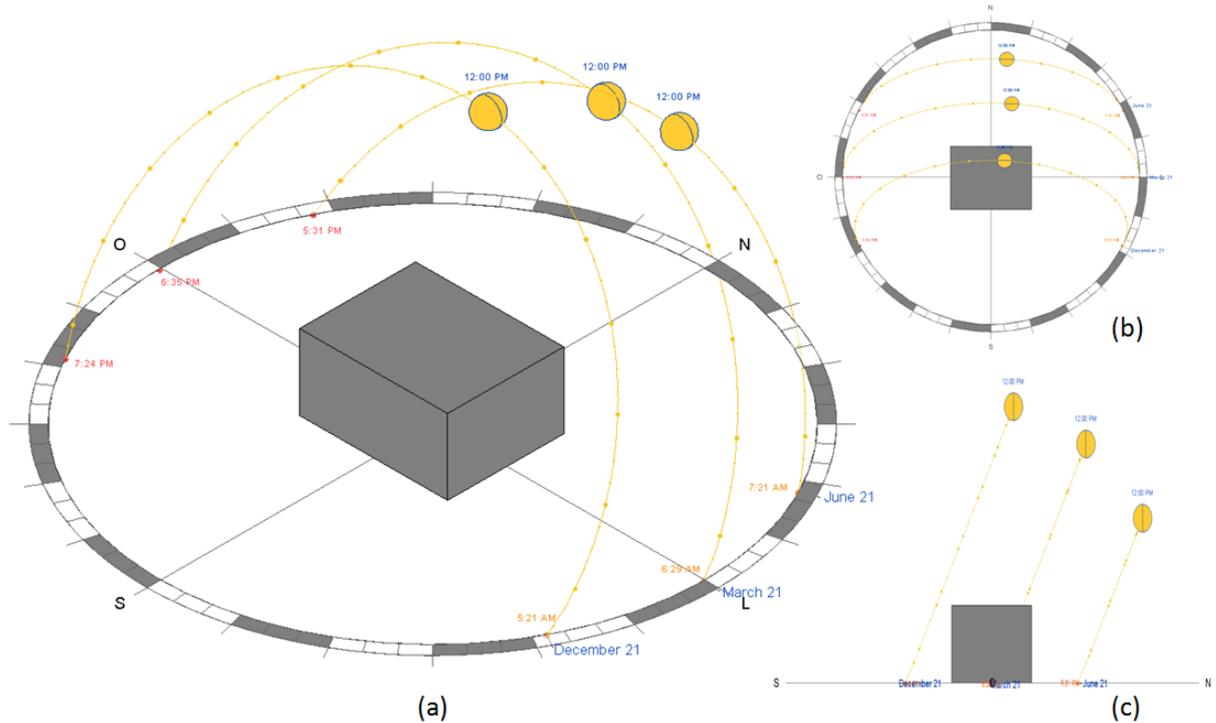


Figura 5.8 - Movimento aparente do Sol, sobre um volume genérico, durante os dias de solstício e equinócio, onde (a), (b) e (c) são: vista isométrica, de topo e lateral, respectivamente.

$$I = I_b \cos \theta + I_S + I_r \quad (5.1)$$

onde: I_b é a irradiação direta; I_S é a irradiação de céu; I_r é a irradiação refletida pelo terreno; e θ é o ângulo de incidência dos raios de sol na superfície para a hora considerada. A radiação de céu, Equação 5.2, é calculada através do modelo de radiação difusa anisotrópica desenvolvido por Perez et al., 1990.

$$I_S = I_{dh} \left[0,5(1 - F_1)(1 + \cos \beta) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin \beta \right] \quad (5.2)$$

onde: I_{dh} é a irradiação solar difusa horizontal horária; F_1 é o coeficiente circumsolar anisotrópico (função da condição do céu); F_2 é o coeficiente anisotrópico horizontal/zenital (função da condição do céu); β é o ângulo de inclinação da superfície com relação ao plano horizontal; a é igual a zero ou ao cosseno do ângulo de incidência, o que for maior; b é igual a 0,087 ou ao cosseno do ângulo de zênite, o que for maior. Os coeficientes a e b são dados como um arranjo de valores que dependem do ângulo de zênite, claridade e brilho do céu. A radiação refletida pelo terreno é dada pela Equação 5.3.

$$I_r = 0,5\rho I_h(1 - \cos \beta) \quad (5.3)$$

onde: I_h é a irradiação global horizontal horária; e ρ é a refletividade do terreno ou albedo. A irradiação difusa é a soma da irradiação de céu com a irradiação refletida de albedo, dada pela Equação 5.4.

$$I_d = I_s + I_r \quad (5.4)$$

5.3.3 Correção dos Valores de Irradiância no Software Utilizado

As simulações de radiação solar incidente nas superfícies ao longo das semanas que contém dos dias de solstício de verão, solstício de inverno e equinócio de outono, além da simulação contabilizando um ano inteiro, estão descritos na Figura 5.9. Verifica-se que ao longo de 1 ano, em uma superfície de cobertura sem obstruções ou sombreamentos, a irradiação solar possui um valor de aproximadamente 1100 kW.h/m². Este valor está diferente do que geralmente é encontrado de radiação global horizontal nos atlas solares e arquivos climáticos para a cidade de Porto Alegre, entre 1700 e 1500 kW.h/m². O arquivo climático utilizado pelo software Vasari possui um valor de 1452 kW.h/m²/ano. Utilizando um outro arquivo climático disponível para a cidade de Porto Alegre (TRY em formato .epw) e o software EnergyPlus, para simular uma superfície plana horizontal, foi possível elaborar uma comparação entre os valores de irradiação.

Simulando um volume genérico, no EnergyPlus, com as informações do arquivo climático disponibilizado pelo Vasari (Autodesk GreenBuilding Studio) constata-se uma irradiação de 1424 kW.h/m²/ano, valor que representa 98% da radiação solar global horizontal do arquivo climático, e aproxima-se dos valores geralmente encontrados.

Utilizando os valores máximos como referência para as 3 semanas de estudo e para o ano todo, fez-se uso de um fator de correção para ajustar os valores indicados, como informa a Tabela 5.2. Assim, desta forma, corrige-se os dados de saída das simulações solares do software Vasari para valores coerentes e próximos daqueles geralmente encontrados nos arquivos climáticos e já estabelecidos.

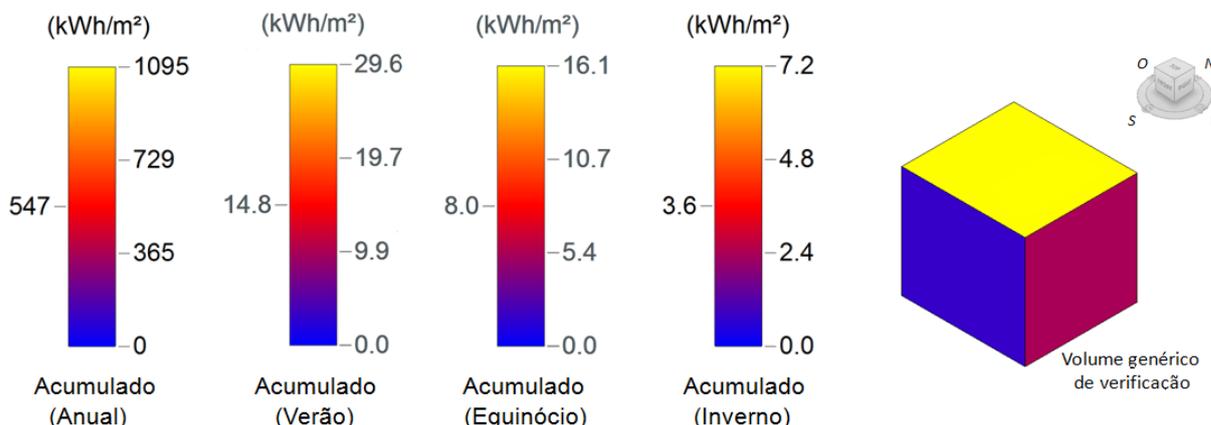


Figura 5.9 - Verificação dos valores de irradiação em diferentes períodos.

Tabela 5.2 - Comparação e correção dos valores de irradiação solar sobre uma superfície plana horizontal sem sombreamentos.

| Período de Estudo | Irradiação (Vasari) | Irradiação (EnergyPlus) | Fator de Correção |
|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|
| Ano Inteiro | 1095 kW.h/m ² | 1424 kW.h/m ² | 1,3005 |
| Semana do Solstício de Inverno | 7,2 kW.h/m ² | 10,7 kW.h/m ² | 1,5970 |
| Semana do Equinócio de Outono | 16,1 kW.h/m ² | 21,2 kW.h/m ² | 1,3168 |
| Semana do Solstício de Verão | 29,6 kW.h/m ² | 35,3 kW.h/m ² | 1,1926 |

5.4 Capacidade de Instalação e Produção de Energia

A partir do levantamento das áreas de projeção das edificações das regiões selecionadas pode-se estimar a potência de instalação fotovoltaica em cada uma delas. Para isto foram determinadas algumas hipóteses, tais quais:

- Considerar todos os telhados planos, ou seja, desconsiderar angulações de telhados ou demais estruturas, assim como em alguns mapas solares ou versões de mapas solares descritos anteriormente;
- Desconsiderar possíveis estruturas técnicas como casa de máquinas, caixa de água e peitoris que causam autossombreamento nas coberturas, assim como sombreamentos oriundos de outras edificações para a estimativa de produção de energia;
- O potencial teórico de instalação seria de 100% da área das coberturas, entretanto, para as análises serão verificadas instalações para 40% (assim como o *Mapdwell® Solar SystemTM* indica para instalação mínima com possível retorno de investimento)

e 70% (cenário mais otimista para potencial de instalação) da área das mesmas. Esta fração da área está relacionada com possíveis limitações técnicas de montagem dos sistemas nas coberturas, os espaços ocupados por possíveis estruturas técnicas e peitoris, além da possibilidade de coberturas possuírem alguma inclinação com relação ao plano horizontal.

O INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) realiza através do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) a verificação da eficiência energética de módulos fotovoltaicos. O documento do INMETRO 01/2013 informa os resultados para os testes de verificação e etiquetagem de aproximadamente 279 modelos de 48 marcas. A partir deste documento foi realizada uma análise com uma amostra de 50 modelos de 14 marcas (silício mono ou policristalino), todos níveis de eficiência A, resultando na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Análise sobre amostra de módulos fotovoltaicos do PBE.

| Característica | Valor Mínimo | Valor Máximo | Valor Médio |
|---|---------------------|---------------------|--------------------|
| Área [m²] | 0,357 | 2,194 | 1,537 |
| Potência [W_p] | 50,0 | 315,0 | 227,2 |
| Produção de Energia [kW.h/mês] | 6,24 | 39,4 | 28,4 |
| Potência Normalizada [W_p/m²] | 135,1 | 175,2 | 147,8 |

Considerando estas informações, foram utilizados os valores de 1,6 m² de área e 148 W_p/m² para a relação de potência sobre a área, como referência para instalações de sistemas fotovoltaicos. Assim sendo, em uma área hipotética de 100 m², seria possível realizar uma instalação de até 14.800 W_p, num total de 62 módulos fotovoltaicos. A estimativa para a produção de energia a partir de uma instalação fotovoltaica utilizará como premissa de cálculo o valor de 1380 kW.h/kW_p produtividade descrito para a cidade de Porto Alegre, em escala anual (Peraza, 2013). A capacidade de instalação (kW_p) será estimada e a partir disto será aferido o potencial de geração de energia. Além disto, a simulação termoenergética realizará, também, uma simulação de produção de energia elétrica a partir de sistema fotovoltaico para uma edificação média/equivalente típica.

5.5 Simulação Termoenergética para uma Edificação Média/Equivalente Típica

Após as análises de sombreamentos e irradiação nas regiões em estudo, propõe-se a criação de edificações típicas médias para cada tipologia e perfil de uso já descrito. O desenvolvimento de quatro modelos de edificações típicas tem como objetivo estabelecer um padrão de consumo energético para cada região de estudo e, desta forma, realizar um balanço de energia global, em escala anual, que compara a energia elétrica consumida em uma edificação com a energia elétrica produzida por uma instalação fotovoltaica, na cobertura desta edificação.

As edificações típicas são criadas no software Google Sketchup que, juntamente com o *plugin OpenStudio*, convertem as informações geométricas tridimensionais e de zonas térmicas para um arquivo do tipo *.idf* (*input data file*, em inglês), que é o arquivo de entrada de informações utilizado pelo software *EnergyPlus*. O software *EnergyPlus* [DOE, 2014] foi utilizado por ser, atualmente, o mais robusto para a modelagem computacional de edificações e todos os seus sistemas. O software *Vasari* possui capacidade para realizar simulações das edificações, entretanto, utiliza o software DOE-2 como "*engine*" para realizar as simulações, de boas capacidades e recursos mas sem possibilidades de muitas edições nos dados de entrada.

O software *EnergyPlus* é uma ferramenta para a análise termoenergética de edificações, ou seja, possui capacidade para simular o comportamento e variações térmicas de ambientes, além de simular consumos energéticos, de recursos e sistemas prediais, além de sistemas de geração de energia, por exemplo. Ele é capaz de simular a operação de uma edificação ou sistema durante as 8760 horas de um ano.

Ao final das simulações termoenergéticas serão quantificados os consumos energéticos e os custos energéticos associados para diversos usos finais, tais como: iluminação interna dos ambientes, equipamentos internos, ar condicionado (resfriamento, aquecimento e ventiladores), ventilação, chuveiros elétricos e elevadores. Dependendo da edificação, cada tipo de consumo energético poderá ter maior ou menor representatividade e, desta forma, pode-se avaliar se um sistema fotovoltaico, mesmo que não seja capaz suprir todo o consumo energético, pelo menos possa ser capaz de igualar algum tipo de consumo, como estratégia de eficiência energética para as edificações. O Apêndice D descreve o software *EnergyPlus*, os modelos termoenergéticos das quatro edificações equivalentes, dados de entrada para construções e demais características de cargas internas e sistemas consumidores de energia, por exemplo.

5.6 Fluxo de Caixa para cada Edificação Média Típica

A análise de instalação de sistemas fotovoltaicos aplicados nas edificações pode ser apreciada com relação a sua viabilidade financeira e, após o mapeamento dos consumos energéticos associados de cada tipologia de edificação em estudo e da estimativa de capacidade de instalação fotovoltaica, fez-se o cálculo do fluxo de caixa para um período de 15 anos, considerando o tempo de meia vida para um sistema de 30 anos de operação.

Atualmente, os custos da energia elétrica para o consumidor estão em elevação, o sistema tarifário de bandeiras proposto está no maior dos níveis, ou seja, de maior custo para o consumidor. As simulações utilizaram o valor de 0,5772 R\$/kW.h de tarifa da bandeira vermelha para os meses de Janeiro e Fevereiro de 2015 (CEEE, 2015) e uma previsão de 10% de aumento anual com uma taxa de juros de 7% ao ano. Estes valores foram utilizados como premissa para as análises e utilizados para todas as tipologias em estudo. O preço para o Watt-pico instalado, hoje em dia no Brasil, encontra-se na faixa de R\$ 5,00 a R\$ 10,00 (Portal Solar, 2015). A tipologia comercial custa, em média 9,00 R\$/W_p; a tipologia de galpões/industrial utilizará a taxa de 7,00 R\$/W_p; o setor residencial 10,00 R\$/W_p.

5.7 Fluxograma da Metodologia Desenvolvida

A Figura 5.10 apresenta o fluxograma de atividades do presente trabalho por envolver diferentes ferramentas e etapas.

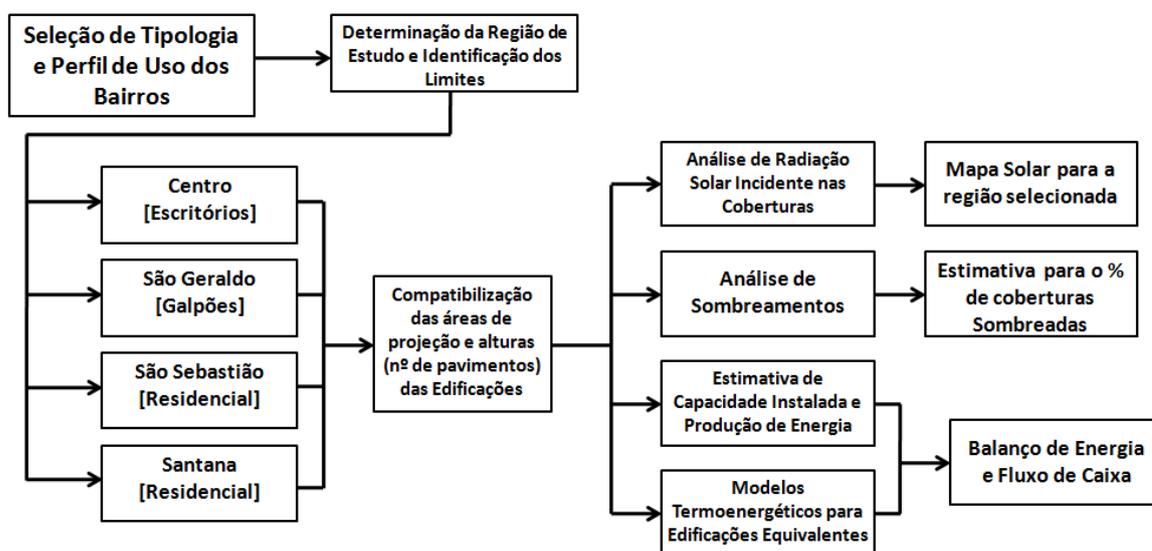


Figura 5.10 - Fluxograma para as atividades desenvolvidas

6 RESULTADOS

A realização deste trabalho passou por diversas etapas e cada uma delas apresenta um determinado resultado. Seja um resultado gráfico com análises qualitativas ou um resultado analítico, através de diversas simulações que apresentam um resultado, quantitativo, para a verificação desejada. A Tabela 6.1 resume as informações sobre cada uma das regiões de estudo selecionadas. Nas seções em sequência, os resultados estão divididos para cada tipologia de região selecionada.

Tabela 6.1 - Resumo das informações sobre os modelos das regiões de estudo selecionadas

| Região | Centro Histórico | São Geraldo | São Sebastião | Santana |
|---|------------------|--------------|----------------|---------------|
| Tipologia | Escritórios | Galpões | Residencial | Residencial |
| Nº Edificações | 100 | 83 | 97 | 106 |
| Área Total de Coberturas [m²] | 44.534 | 81.770 | 19.055 | 24.948 |
| Menor Área [m²] | 39 | 60 | 22 | 55 |
| Maior Área [m²] | 2689 | 7871 | 578 | 728 |
| Área Média [m²] | 445 | 985 | 196 | 235 |
| Menor Altura [pav.] | 1 Pavimento | 1 Pavimento | 1 Pavimento | 1 Pavimento |
| Maior Altura [pav.] | 23 Pavimentos | 4 Pavimentos | 4 Pavimentos | 15 Pavimentos |
| Altura Média [pav.] | 8 Pavimentos | 2 Pavimentos | 2,5 Pavimentos | 5 Pavimentos |

6.1 Análise de Sombras

Os efeitos de sombreamento, em escala urbana, podem ser significativos dependendo da época do ano e da altitude solar, desfavorecendo um melhor aproveitamento de radiação solar nas coberturas das edificações, através de painéis fotovoltaicos. Quanto mais baixa for a altitude e trajetória solar, maiores serão as projeções dos sombreamentos de uma edificação sobre a outra, por exemplo. Os resultados ilustram o perfil de sombreamentos às 9h, 12h, 15h e 18h, respectivamente

6.1.1 Solstício de Verão

As análises para o dia de solstício, para cada uma das tipologias, são ilustradas pelas Figuras 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4, representando as regiões do Centro Histórico, São Geraldo, São Sebastião e Santana, respectivamente.

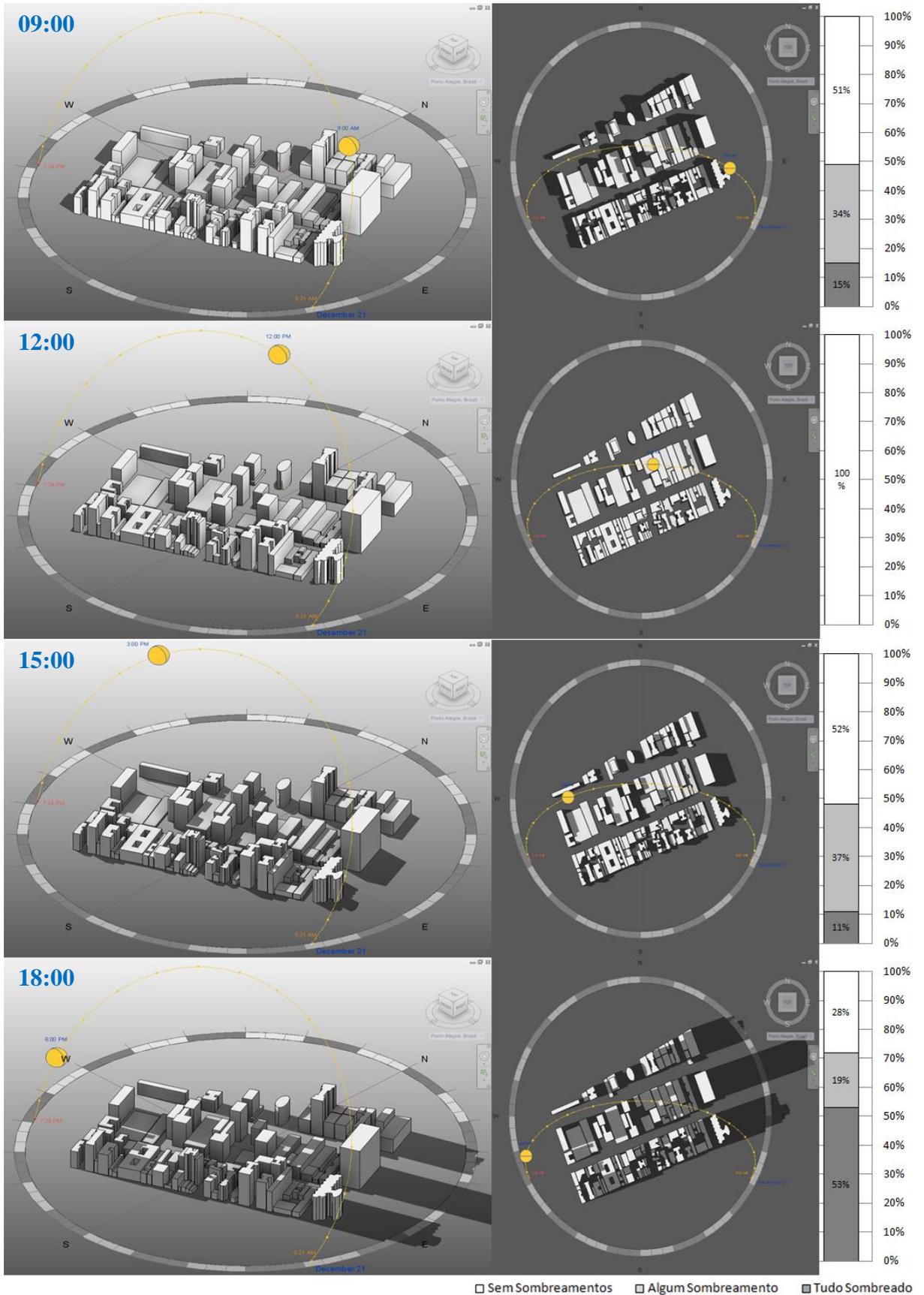


Figura 6.1 - Análise de sombras e percentual de telhados sombreados em 4 momentos do dia de solstício de verão para região do Centro Histórico

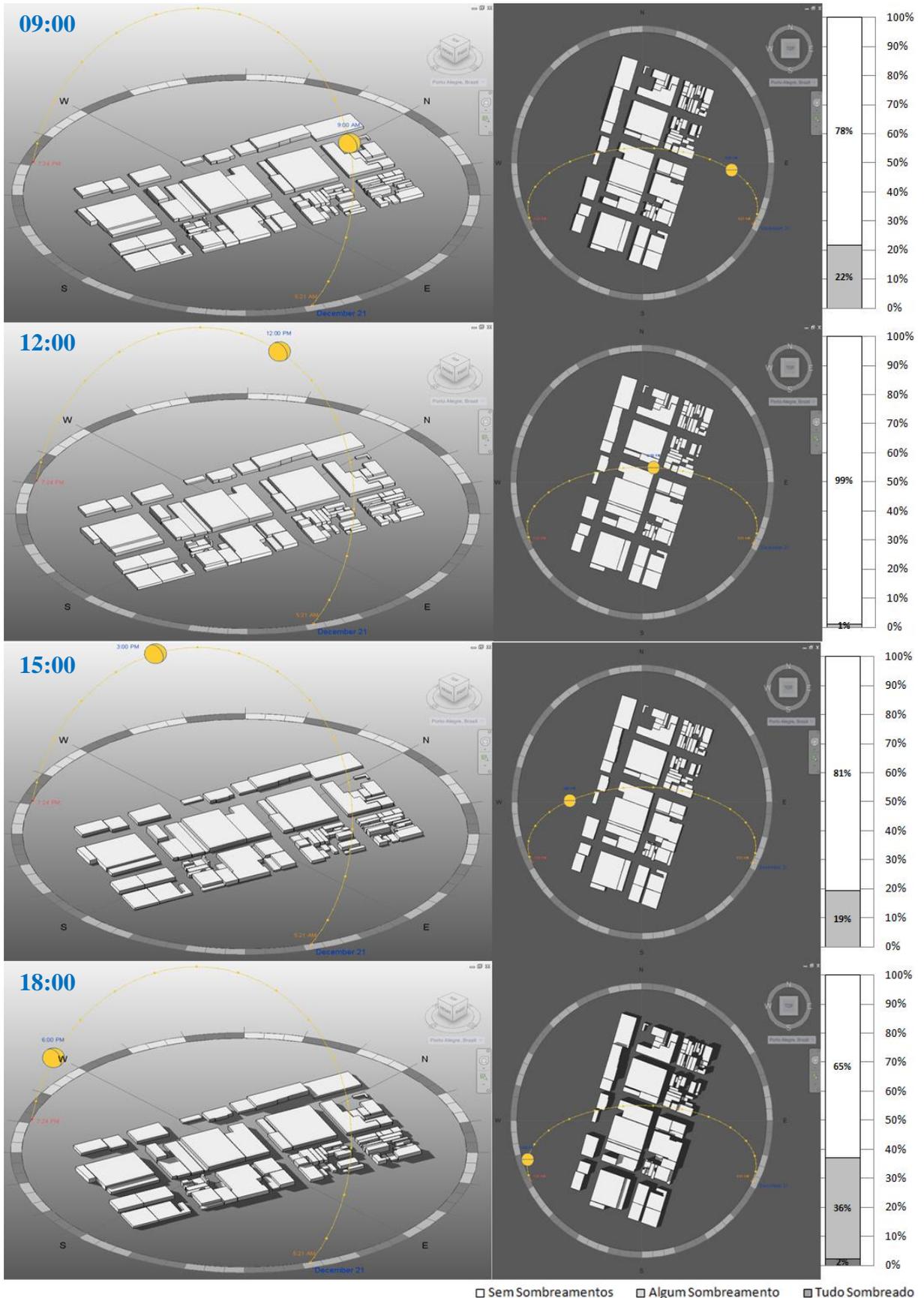
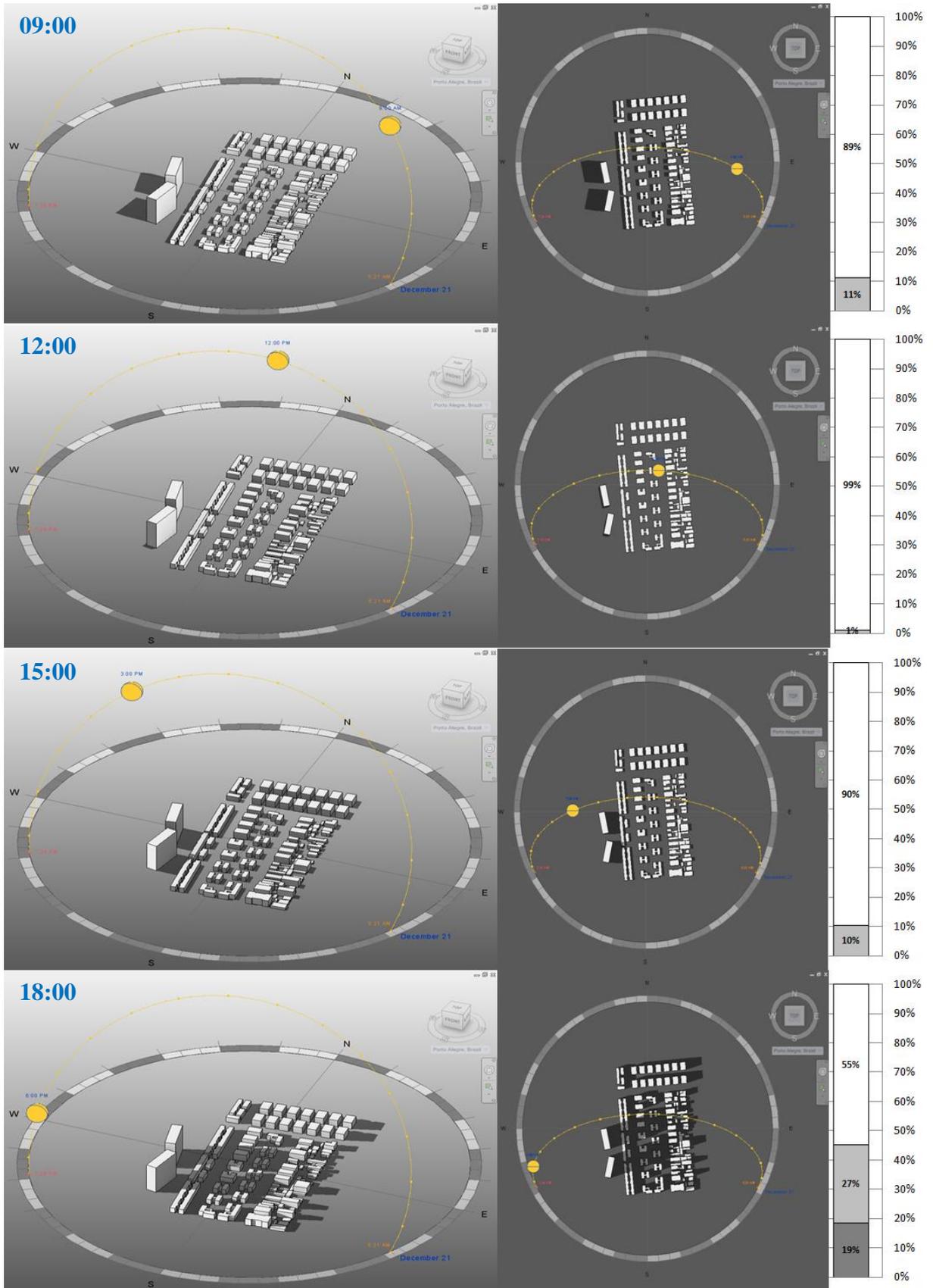
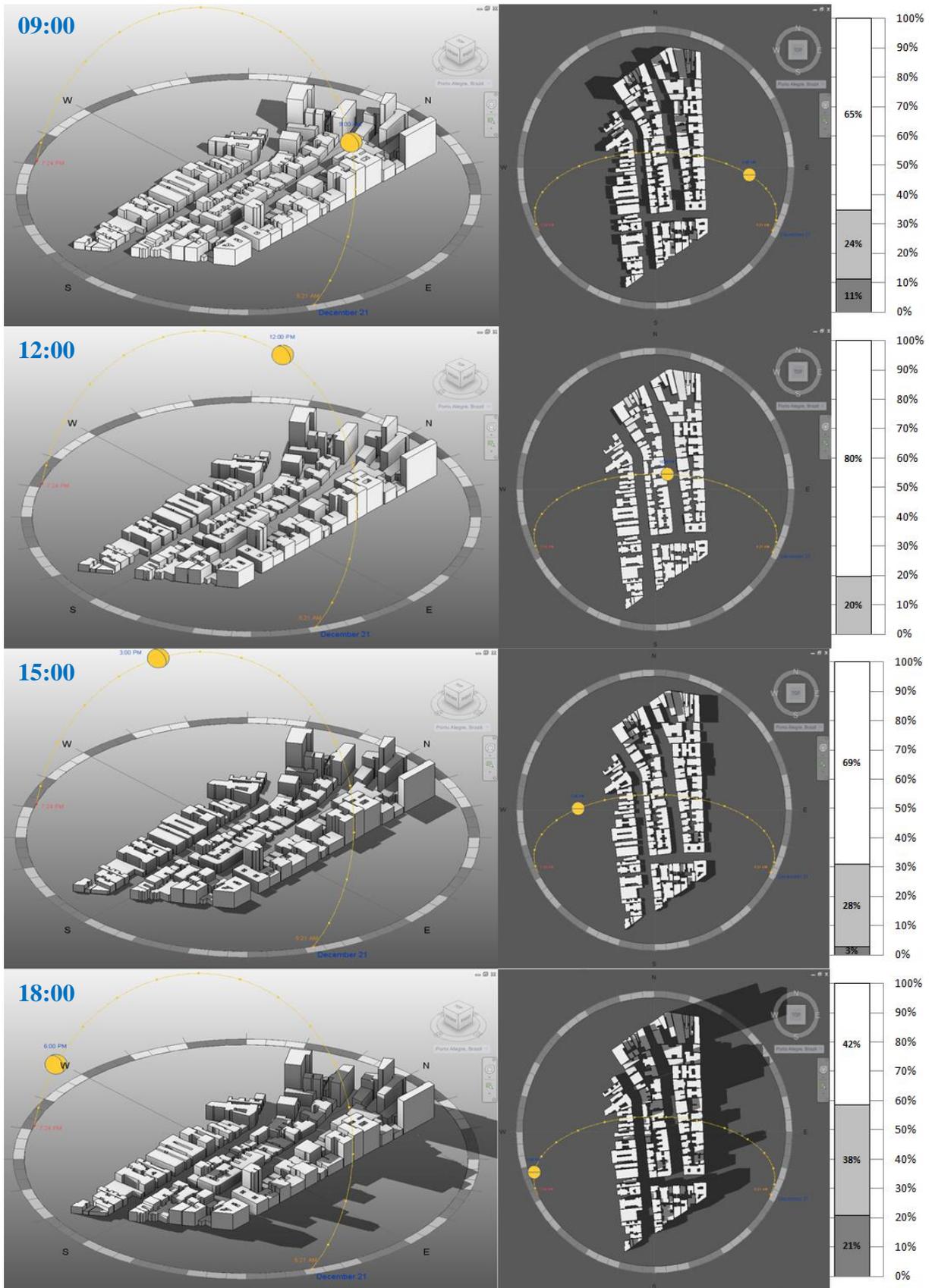


Figura 6.2 - Análise de sombras e percentual de telhados sombreados em 4 momentos do dia de solstício de verão para região do São Geraldo.



□ Sem Sombreamentos □ Alguns Sombreamentos ■ Tudo Sombreado

Figura 6.3 - Análise de sombras e percentual de telhados sombreados em 4 momentos do dia de solstício de verão para região do São Sebastião.



□ Sem Sombreamento □ Alguns Sombreamento ■ Tudo Sombreado

Figura 6.4 - Análise de sombras e percentual de telhados sombreados em 4 momentos do dia de solstício de verão para região do Santana.

Constata-se, para cada tipologia, um comportamento diferente dos sombreamentos. Na tipologia de prédios comerciais de escritórios do Centro Histórico o percentual de coberturas sombreadas é maior ao longo do dia, ou seja, é necessária uma preocupação maior com uma futura instalação fotovoltaica nos telhados. Isto ocorre por causa da maior altura média das edificações e maior densidade de ocupação da área do bairro. Esta mesma relação pode ser comprovada no bairro Santana, entretanto com menor impacto dos sombreamentos, onde também existe a maior densidade de ocupação das edificações, muitas delas juntas uma das outras e com alturas diferentes, ocorrendo efeitos de sombreamento. O bairro São Geraldo possui uma tipologia bem diferente das demais regiões, apresentando uma morfologia mais horizontal e com um perfil de alturas mais homogêneo. Desta forma uma edificação acaba não sendo afetada pela próxima, mesmo sendo de maior altura. A região do bairro São Sebastião apresenta, na média, um perfil homogêneo de edificações. É um bairro com o propósito residencial de baixa altura e planejado urbanisticamente. Desta forma, com espaços e terrenos bem determinados, as edificações acabam não realizando sombreamentos nas outras; entretanto, o posicionamento de duas grandes edificações, a oeste da região de análise e fora do padrão de alturas encontrado nesta região, ocasiona a projeção de grande sombreamento conforme aproxima-se do pôr do Sol. O gráfico da Figura 6.5 ilustra o aproveitamento de superfícies sem sombreamentos para o dia de solstício de cada região.

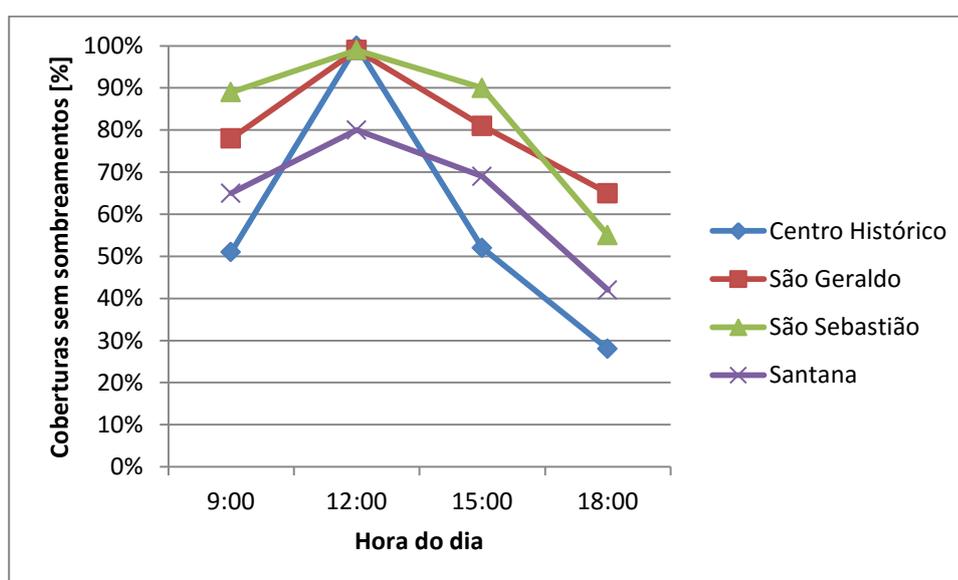


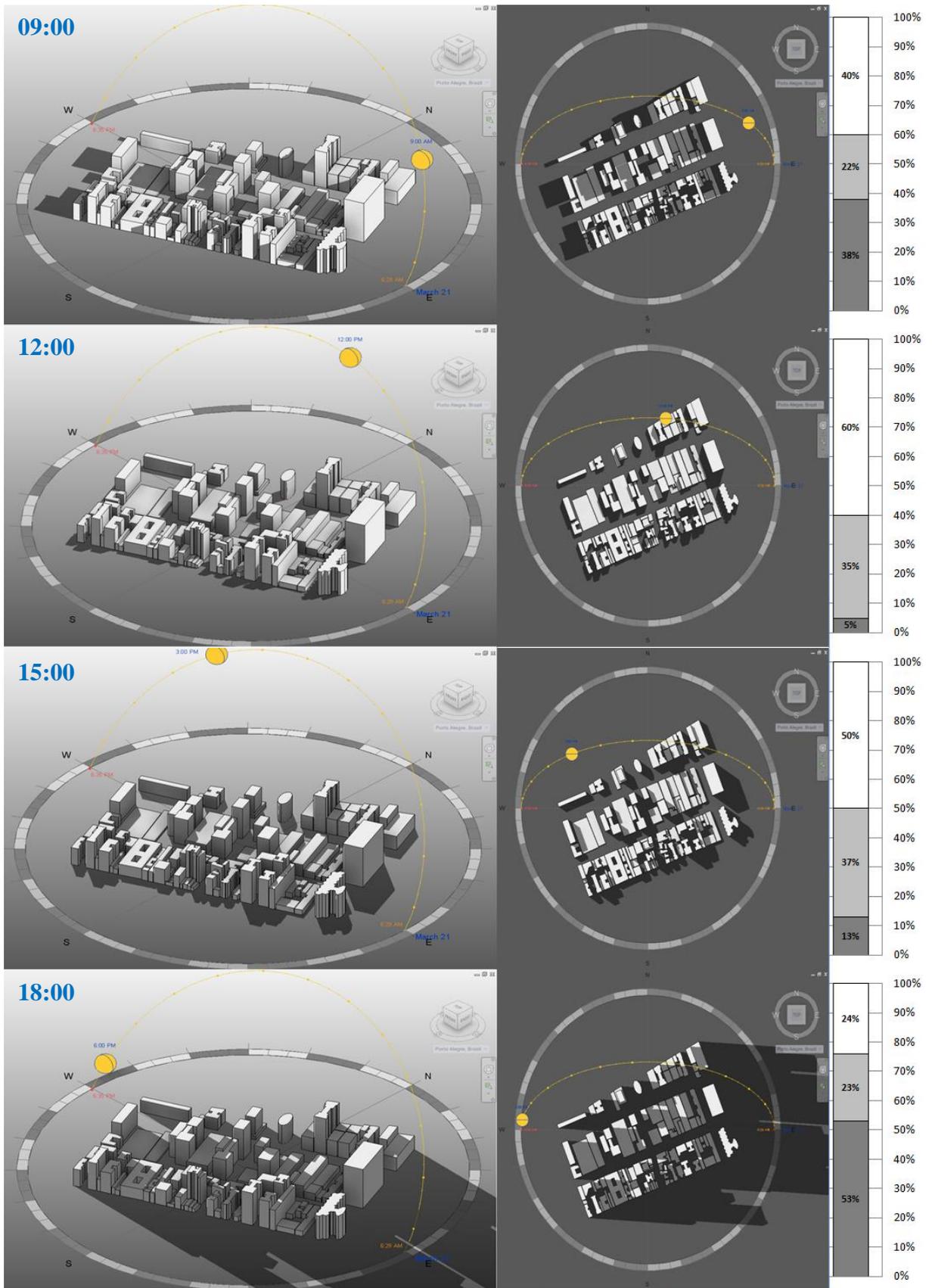
Figura 6.5 - Comparativo de superfícies sem sombreamentos para solstício de verão

6.1.2 Equinócio

As análises para o dia de equinócio de outono (21 de Março), para cada uma das tipologias, estão ilustradas pelas Figuras 6.6, 6.7, 6.8 e 6.9, representando as regiões do Centro Histórico, São Geraldo, São Sebastião e Santana, respectivamente. A análise de sombreamentos causada pelo movimento aparente do Sol para o dia de equinócio é importante por este dia representar, em média, seis meses do ano entre equinócio de outono e primavera: março, abril e maio (outono); setembro, outubro e novembro (primavera). Estima-se que este perfil de sombras e radiação solar é, aproximadamente, o mesmo para estes meses do ano, por isto a sua representatividade.

Verifica-se, para todas as regiões de estudo, a mesma variação de comportamento do percentual das superfícies sem sombreamentos. Pode-se dizer que, ao longo de grande parte do ano (períodos perto dos equinócios), sempre ocorrerá algum tipo de sombreamento nas coberturas, não importando a tipologia de bairro e forma como estão dispostas as construções. A maior variação diária ocorreu no bairro São Sebastião. Apesar de que na maior parte do dia (das 9h até as 15h) aproximadamente 80% das edificações estavam sem sombreamentos, devido ao loteamento e separação das edificações, o posicionamento das duas edificações a oeste do bairro acaba prejudicando e realizando grande sombreamento sobre a região. Em termos gerais, a região do São Geraldo, manteve uma média de 70% das superfícies sem sombreamento, mantendo o perfil já verificado para o dia de solstício de verão. As duas regiões com edificações de maior altura e mais densamente ocupadas, Centro e Santana, mantêm o mesmo comportamento diário para as condições de coberturas sem sombreamento, apesar da diferença entre as tipologias de edificações.

Esta verificação pode ser extrapolada para prever o comportamento ao longo de seis meses, por exemplo, e serve para ter conhecimento daquelas regiões que não terão sombreamentos na maior parte do ano, independentemente da região. A variação diária é ilustrada pelo gráfico da Figura 6.10.



□ Sem Sombreamentos □ Alguns Sombreamentos ■ Tudo Sombreado

Figura 6.6 - Análise de sombras e percentual de telhados sombreados em 4 momentos do dia de equinócio para região do Centro Histórico.

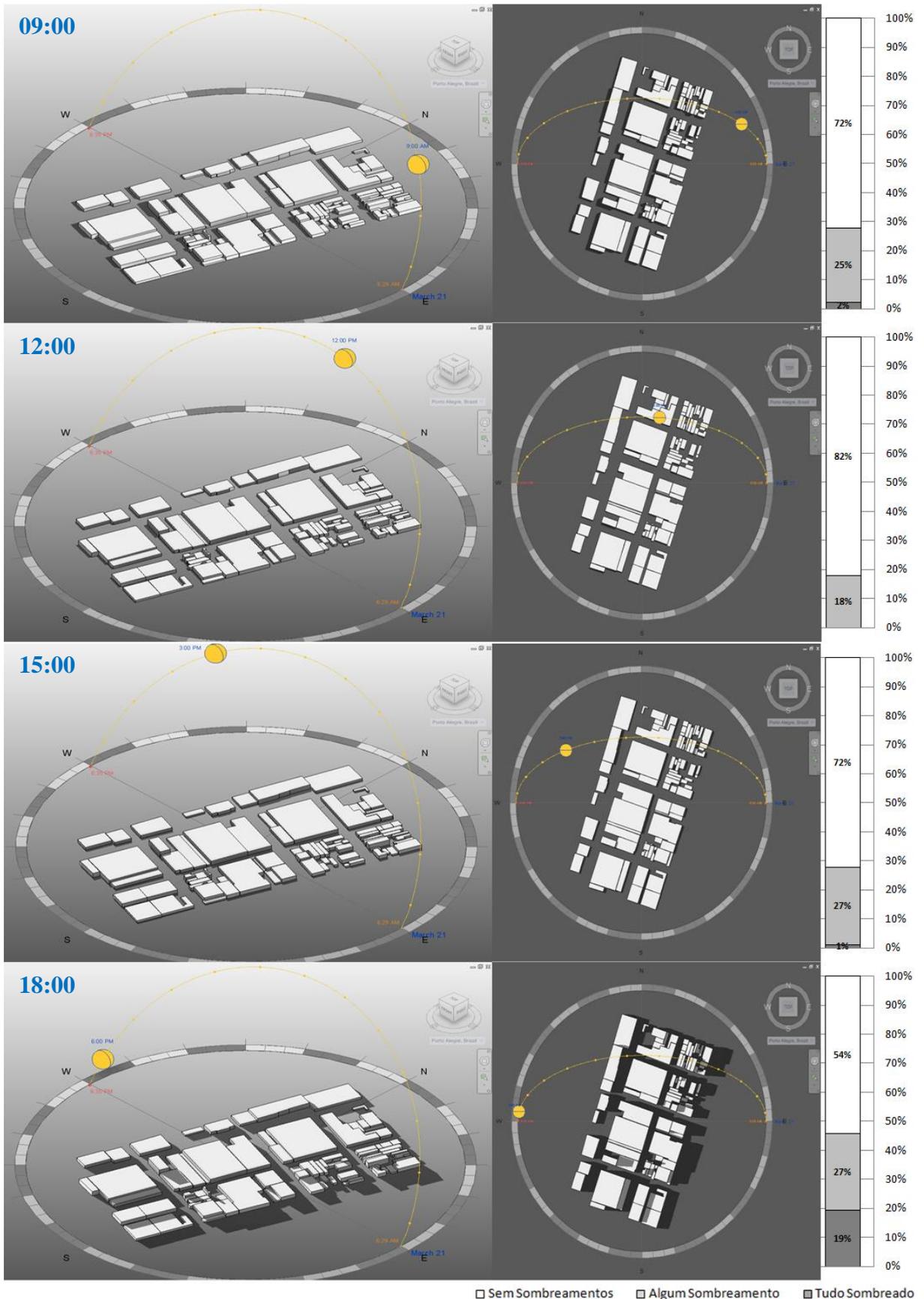


Figura 6.7 - Análise de sombras e percentual de telhados sombreados em 4 momentos do dia de equinócio para região do São Geraldo.

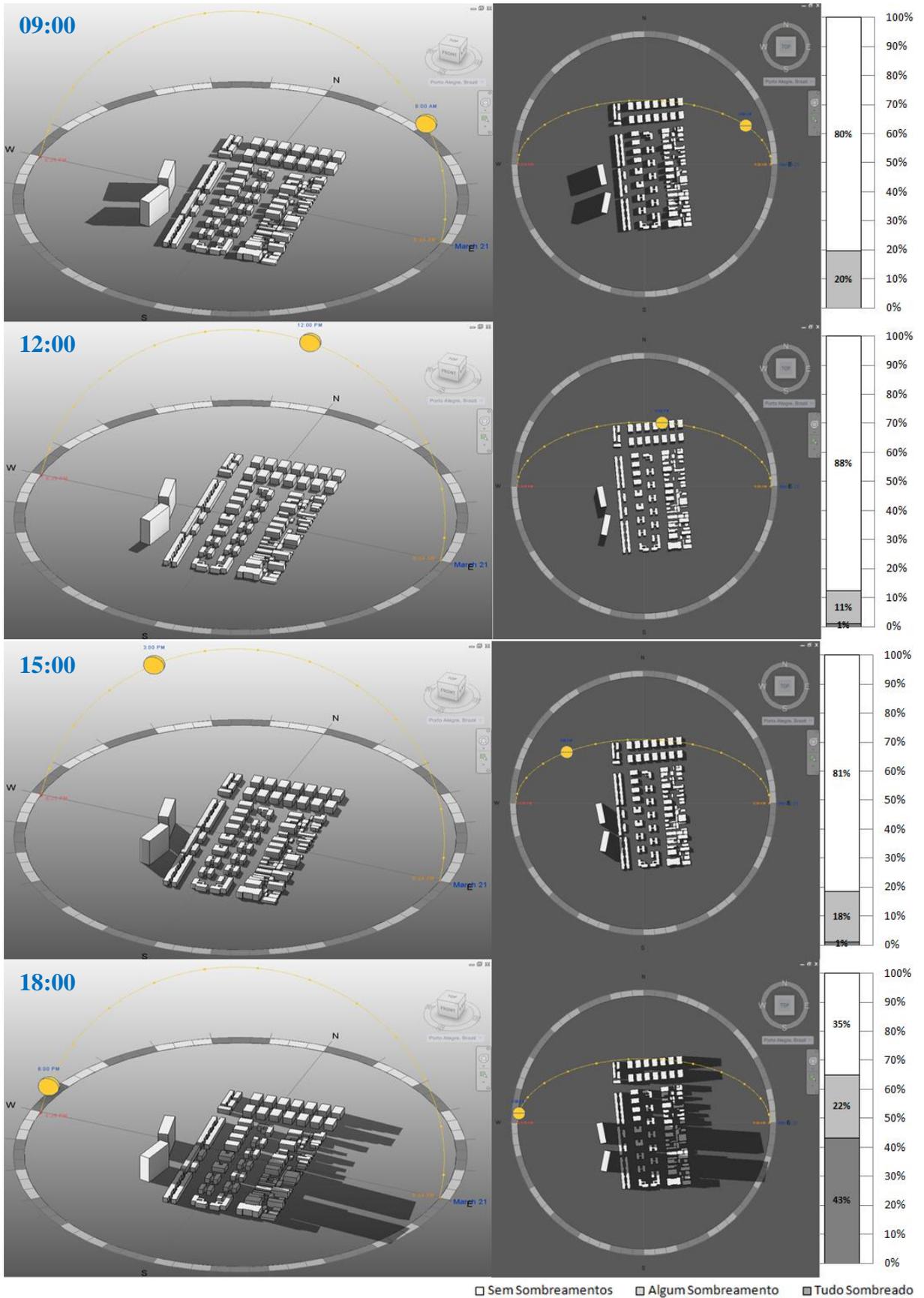


Figura 6.8 - Análise de sombras e percentual de telhados sombreados em 4 momentos do dia de equinócio para região do São Sebastião.

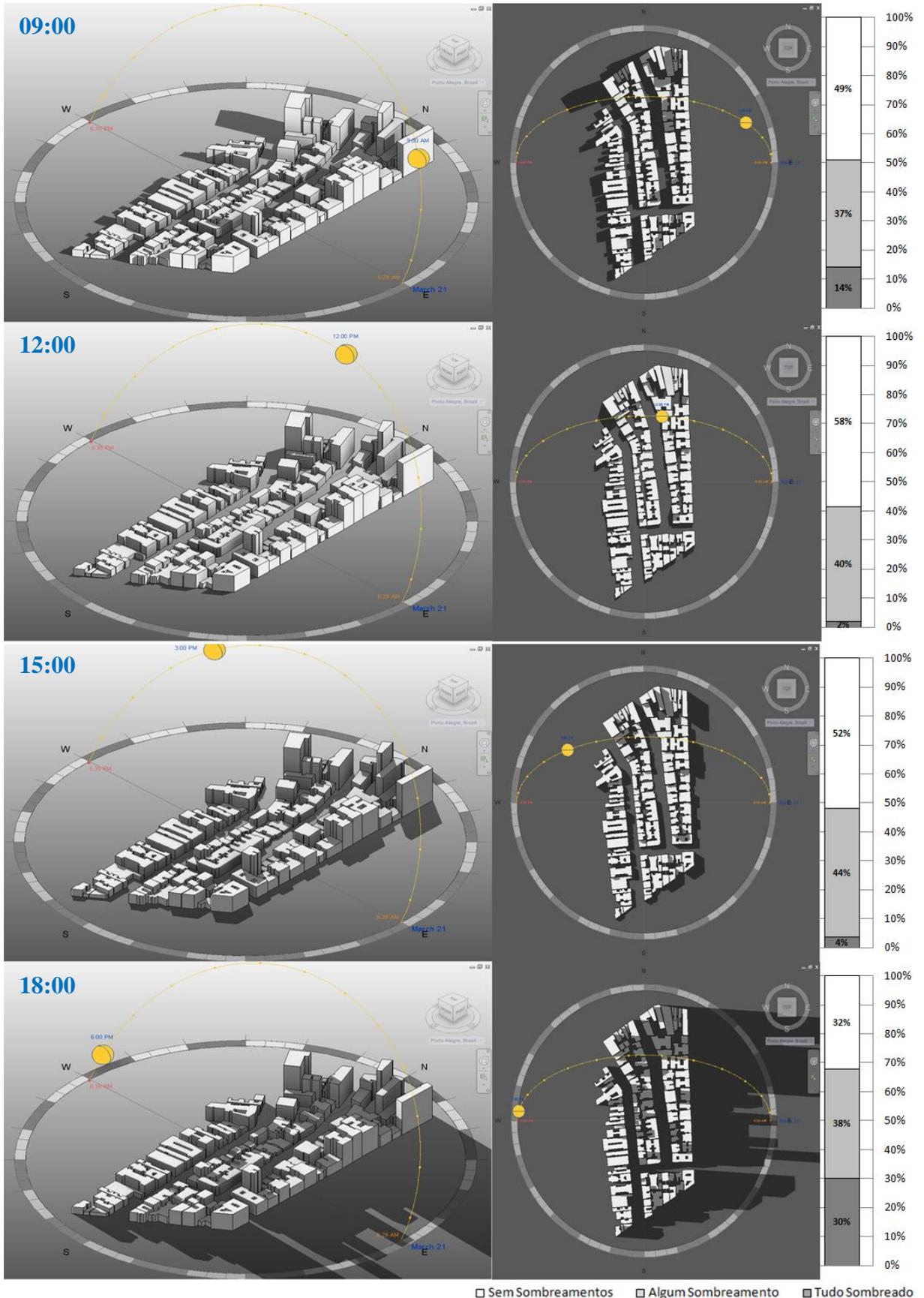


Figura 6.9 - Análise de sombras e percentual de telhados sombreados em 4 momentos do dia de equinócio para região do Santana.

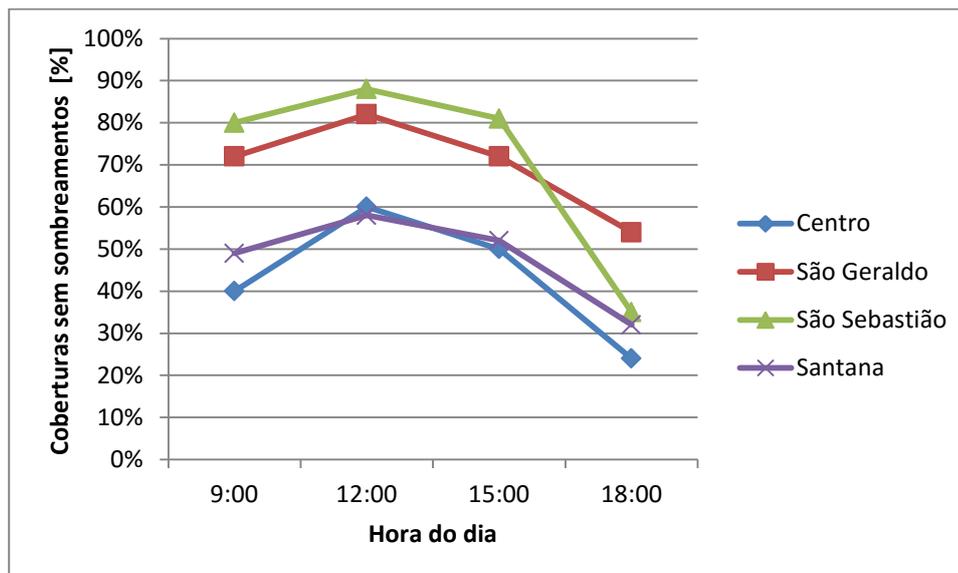
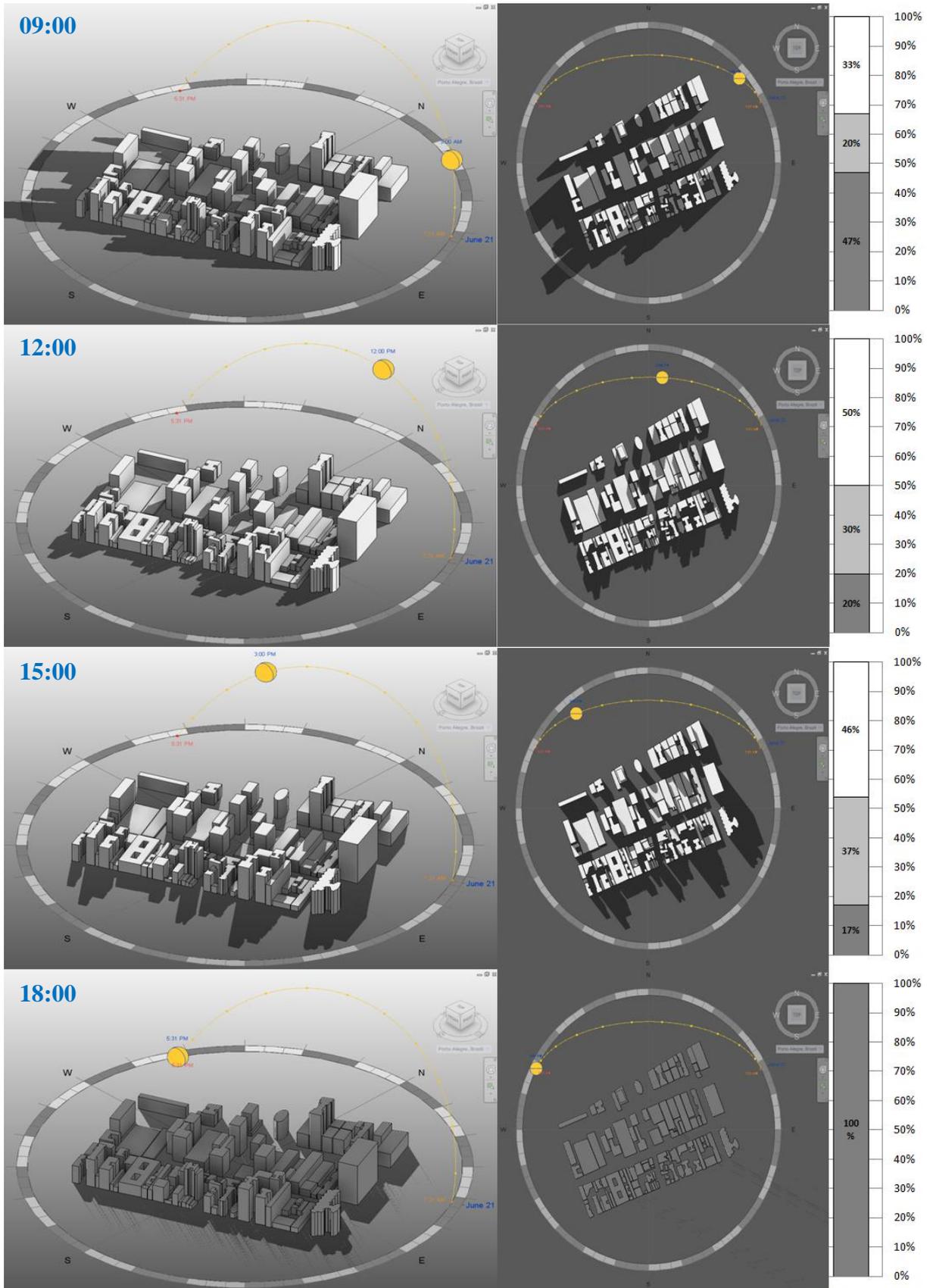


Figura 6.10 - Comparativo de superfícies sem sombreamentos para o equinócio (outono).

6.1.3 Solstício de Inverno

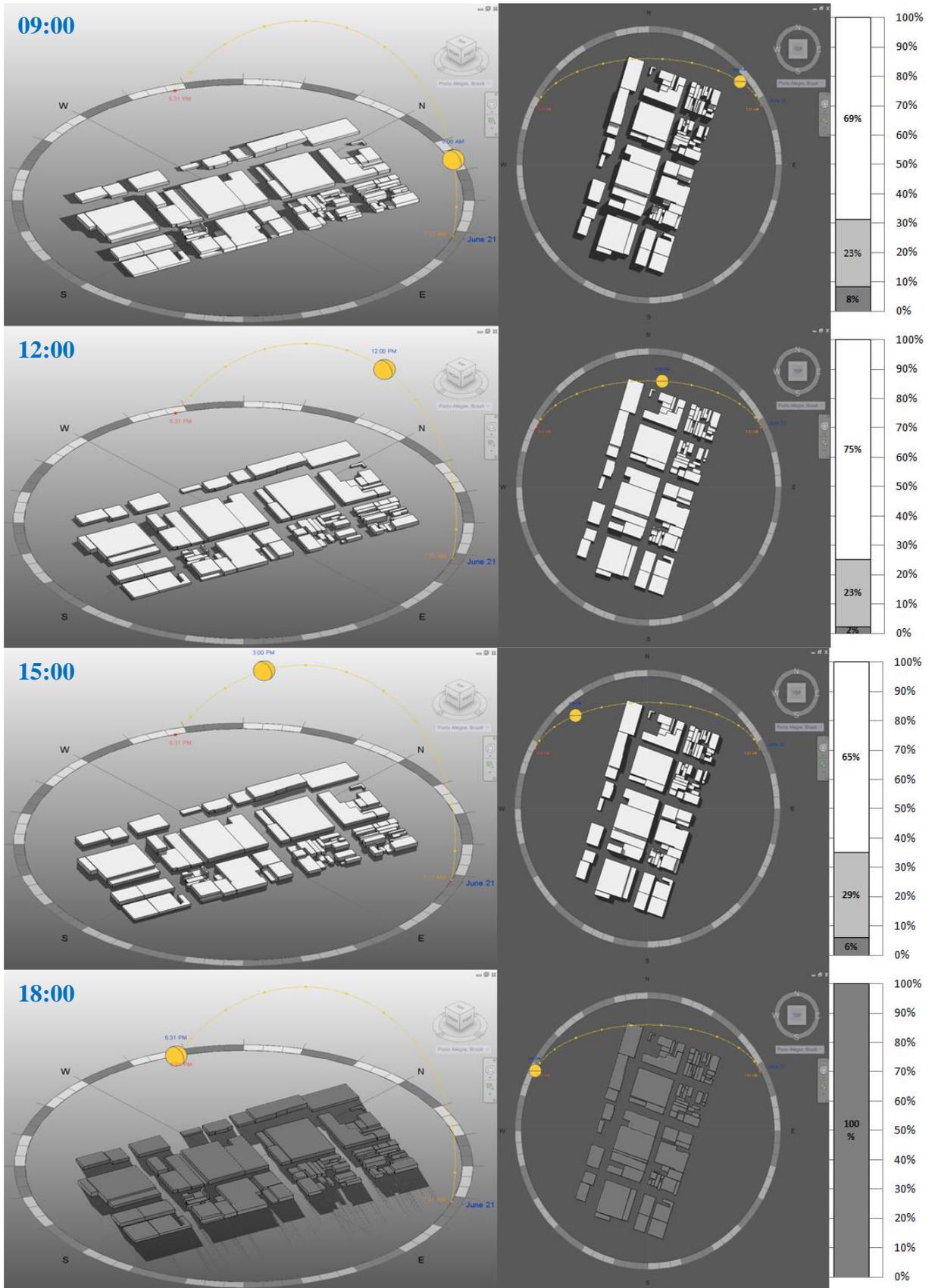
As análises para o dia de solstício de inverno (21 de Junho), para cada uma das tipologias, são ilustradas pelas Figuras 6.11, 6.12, 6.13 e 6.14, representando as regiões do Centro Histórico, São Geraldo, São Sebastião e Santana, respectivamente. Este é o dia crítico para o aproveitamento da radiação solar e produção de energia por sistemas fotovoltaicos. Os efeitos de sombreamentos são muito mais significativos e ocorrem com maior projeção, de uma edificação sobre as próximas, por causa da menor elevação do Sol em sua trajetória. Mesmo um sombreamento parcial sobre um módulo fotovoltaico pode ser responsável pela redução de produção de energia, dependendo da configuração dos circuitos das células fotovoltaicas. Em um projeto de sistemas fotovoltaicos este dia deve ser considerado por causa dos possíveis sombreamentos, além do fato de ser, teoricamente, o dia com menor quantidade de radiação solar disponível.

Neste dia as projeções dos sombreamentos serão as maiores possíveis, prejudicando a operação de possíveis sistemas fotovoltaicos; além disto, o menor número de horas de sol e os baixos níveis de radiação solar desta época não favorecem em nada a geração de energia através do sol. Ao contrário dos outros dias analisados, neste caso, o horário de pôr do sol ocorre antes das 18h. A partir das 17h e 31 minutos, neste dia, todas as superfícies já estarão totalmente sombreadas. Para ter um melhor entendimento da maior projeção de sombras é necessário verificar esta variação entre as 15h e 17h (não visualizado nas figuras anteriores).



□ Sem Sombreamentos □ Alguns Sombreamentos ■ Tudo Sombreado

Figura 6.11 - Análise de sombras e percentual de telhados sombreados em 4 momentos do dia de solstício de inverno para região do Centro Histórico.



□ Sem Sombreamentos □ Alguns Sombreamentos ■ Tudo Sombreado

Figura 6.12 - Análise de sombras e percentual de telhados sombreados em 4 momentos do dia de solstício de inverno para região do São Geraldo.

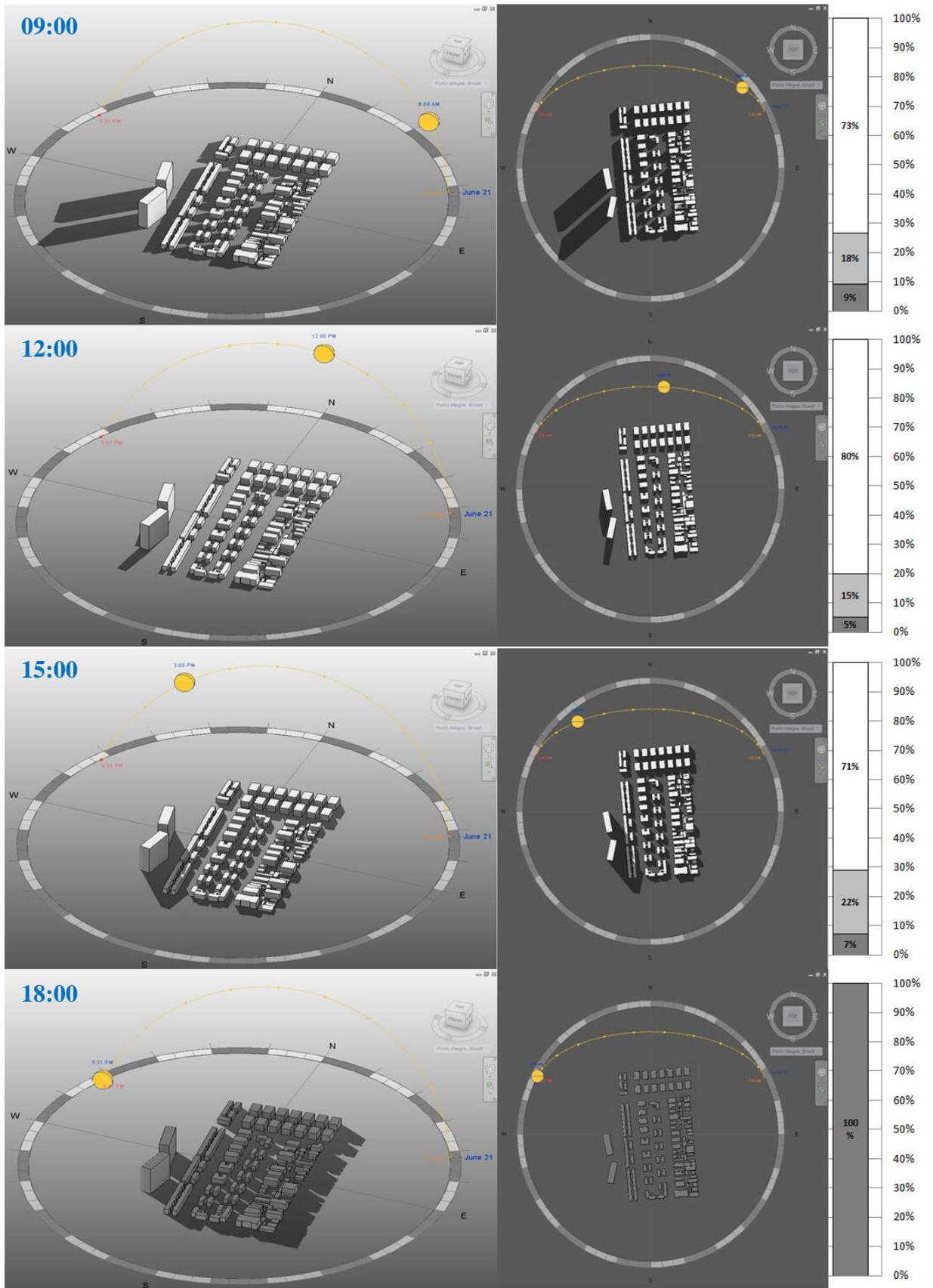


Figura 6.13 - Análise de sombras e percentual de telhados sombreados em 4 momentos do dia de solstício de inverno para região do São Sebastião.

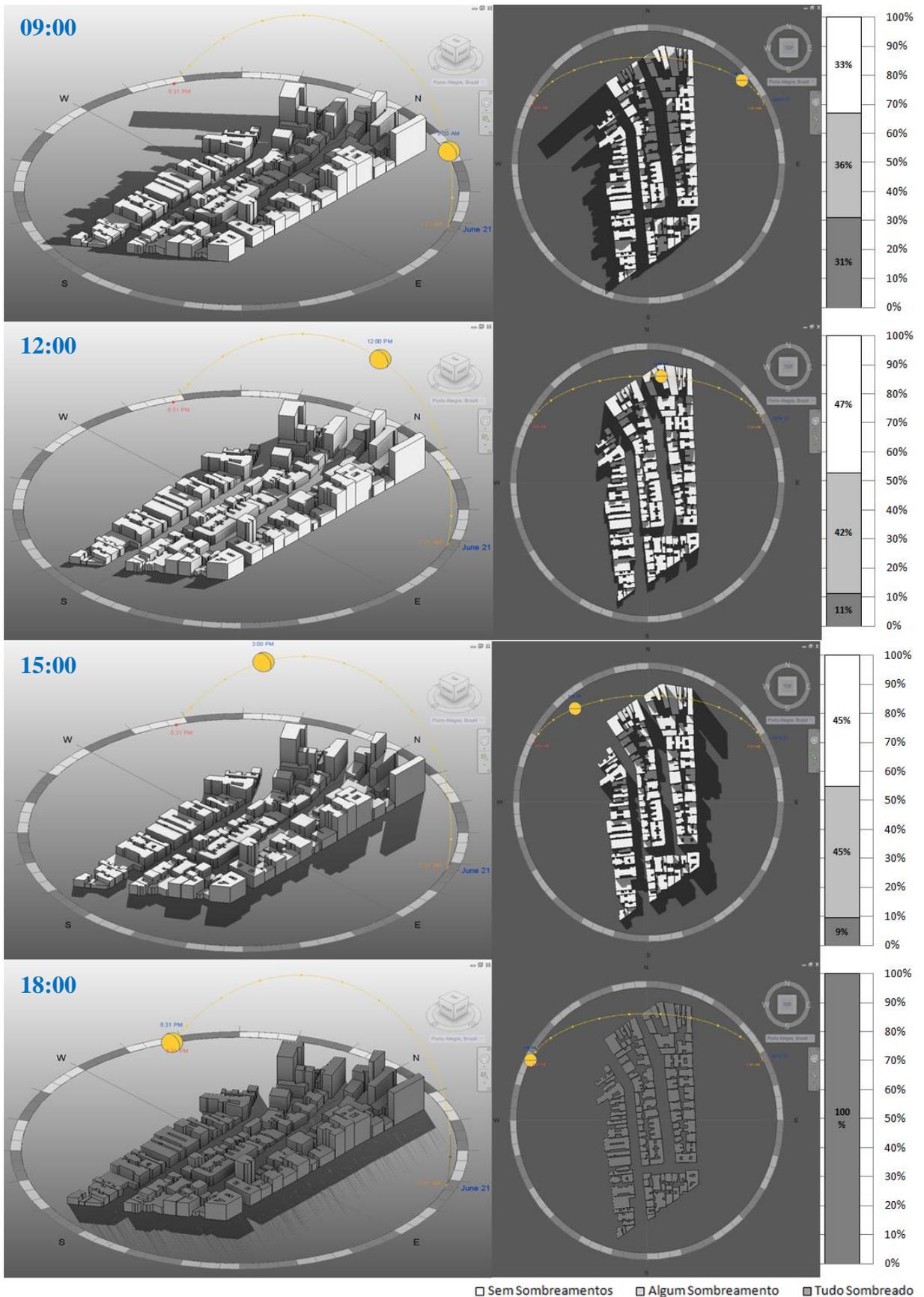


Figura 6.14 - Análise de sombras e percentual de telhados sombreados em 4 momentos do dia de solstício de inverno para região do Santana.

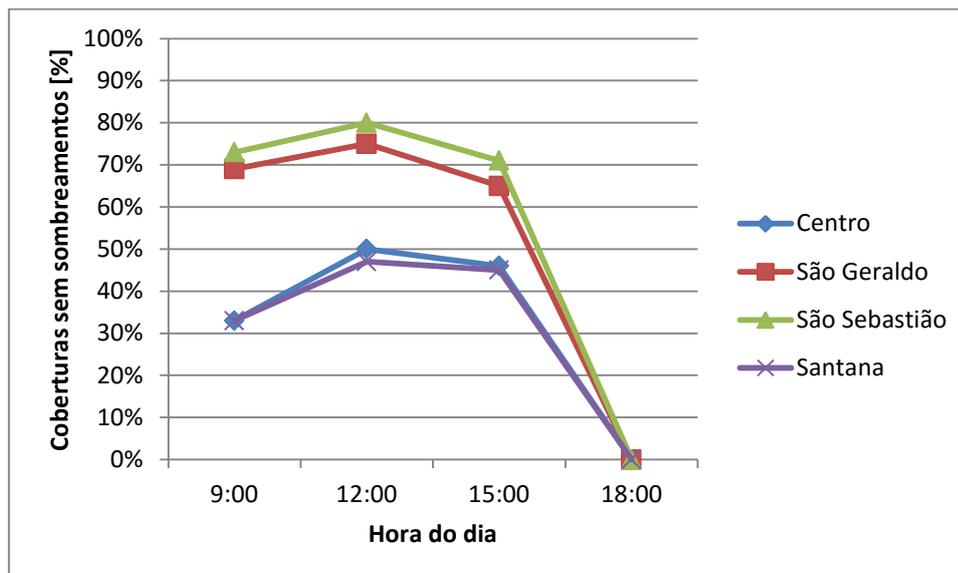


Figura 6.15 - Comparativo de superfícies sem sombreamentos para o solstício de inverno.

6.2 Verificação da Radiação Solar Incidente

A análise das projeções de sombreamentos acaba informando, também, as áreas de coberturas disponíveis e que não estarão no caminho das sombras. Desta forma, garantem-se as possíveis melhores áreas para as instalações de sistemas fotovoltaicos integrados às coberturas e telhados das edificações.

A partir do modelamento tridimensional realizado, a incidência de radiação solar possível de aproveitamento em cada uma das coberturas foi verificada, e por consequência, a validação das melhores áreas para a instalação de sistemas fotovoltaicos. A Figura 6.16 mostra a variação da disponibilidade de energia solar para as semanas que contêm os dias de solstício de inverno, verão e o equinócio de outono. Como os dados utilizados fazem parte de um arquivo climático genérico, considerou-se o dia "crítico" no meio de uma semana de análise, para evitar analisar um dia com valores discrepantes de nebulosidade ou um dia de céu claro e com alto índice de irradiação solar. Desta forma, ameniza-se a importância deste dia significativo e verifica-se melhor o comportamento nestes períodos. O gráfico da Figura 6.16 compara os dados climáticos de radiação global horizontal do arquivo climático com o valor da irradiação solar acumulada por dia em uma superfície sem sombreamentos, para cada semana de estudo. Ao longo de cada semana, os valores acabam tendendo ao comportamento climático da estação. A Tabela 6.2 resume os dados da Figura 6.16.

Avaliar as diferenças sazonais de potencial de radiação solar é importante quando avalia-se um empreendimento fotovoltaico ou uma instalação particular. A RN 482 da

ANEEL bonifica os proprietários de sistemas com créditos no sistema de compensação de energia. Assim, a avaliação de um dia com irradiação solar acumulada de 0,64 kW.h/m² (período de inverno), ou até mesmo a semana de menor irradiação solar acumulada, é importante para uma análise anual, que, em comparação com o potencial teórico para um período de verão, é possível estimar quantos créditos poderão ser adquiridos para compensar o período de menor irradiância.

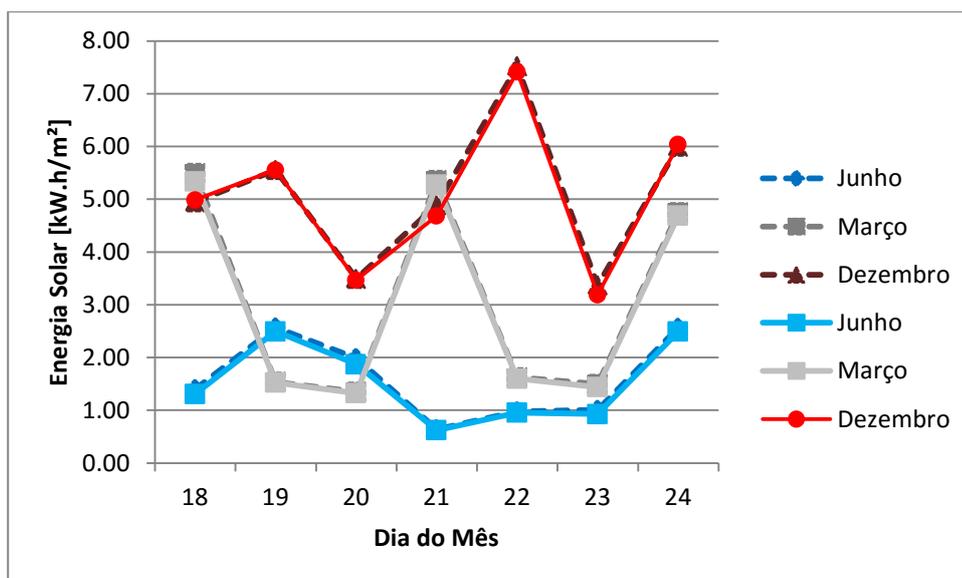


Figura 6.16 - Variação entre dados de irradiação diária do arquivo climático (linha tracejada) com o incidente em um telhado plano horizontal (linha contínua).

Tabela 6.2 - Distribuição de irradiação diária e acumulada em cada semana.

| Semana de Análise | Solstício de Inverno | Equinócio de Outono | Solstício de Verão |
|----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Irradiação Mínima | 0,64 kW.h/m ² | 1,35 kW.h/m ² | 3,37 kW.h/m ² |
| Irradiação Máxima | 2,57 kW.h/m ² | 5,49 kW.h/m ² | 7,52 kW.h/m ² |
| Irradiação Média | 1,59 kW.h/m ² | 3,09 kW.h/m ² | 5,11 kW.h/m ² |
| Irradiação Acumulada | 11,20 kW.h/m ² | 21,60 kW.h/m ² | 35,80 kW.h/m ² |

6.2.1 Região do bairro Centro Histórico

A Figura 6.17 mostra o analema solar, a região de trajetória do movimento aparente do Sol ao longo de 1 ano, para a região do Centro Histórico, composta por edificações de diversas alturas e próximas umas das outras.

A Figura 6.18 mostra a comparação entre os resultados para as semanas do solstício de inverno, equinócio de outono e solstício de verão, com o objetivo de comparar as variações e o potencial estimado de irradiação solar acumulada em diferentes períodos do ano. A comparação entre estas três semanas de análise demonstra a grande diferença de potencial de aproveitamento de energia solar nas coberturas das edificações. A variação da altitude solar ao longo do ano, aliada a um bairro com construções não homogêneas em alturas, proporciona em algumas coberturas uma mistura de excelente aproveitamento de irradiação com razoável ou péssimo aproveitamento de irradiação solar, esta análise vista com mais discrepância para a semana de verão.

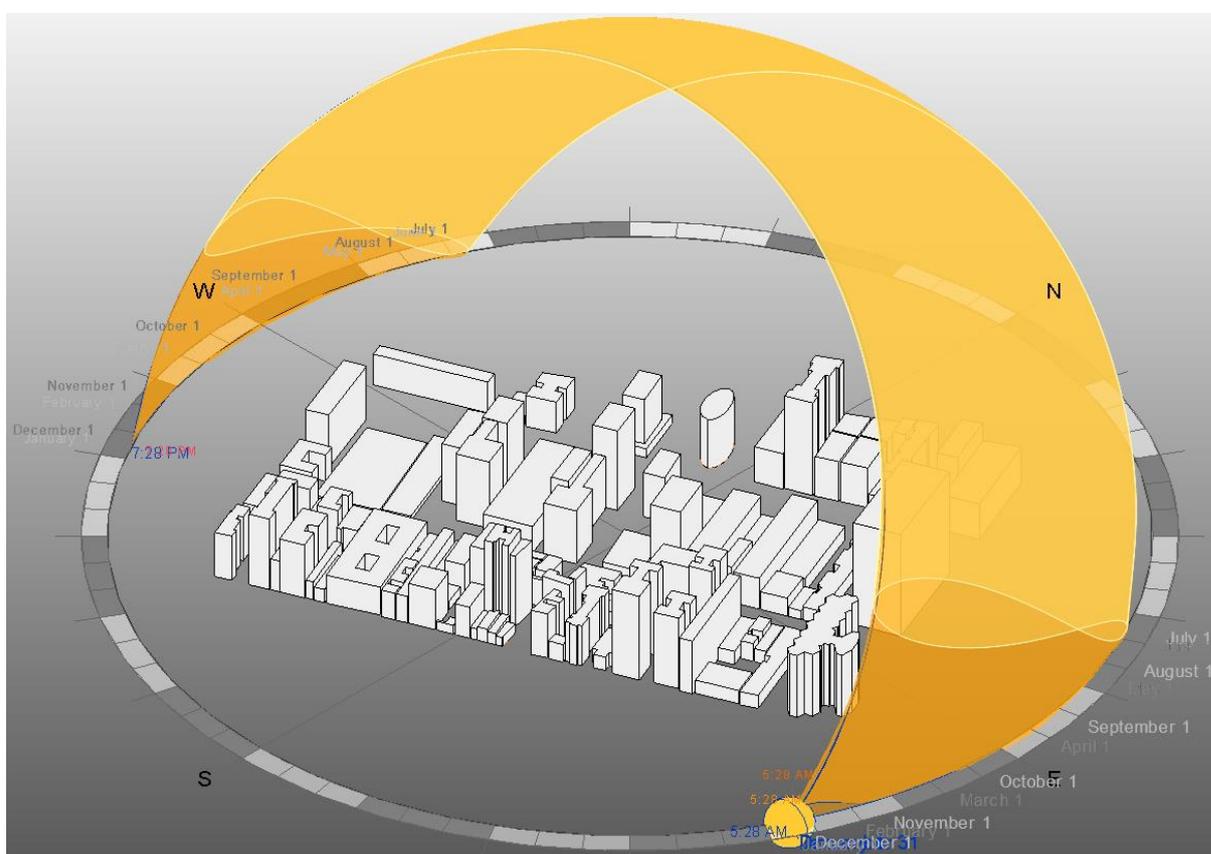


Figura 6.17 - Análise anual de radiação solar incidente para região do Centro Histórico.

Nesta tipologia de bairro torna-se fundamental a análise de sombreamentos e radiação solar incidente nas coberturas devido às diversas superfícies que podem interferir em uma futura instalação. As Figuras 7.19 e 7.20 concluem a verificação de irradiação solar anual nas superfícies de cobertura para uma região, de tipologia comercial de escritórios, do Centro Histórico.

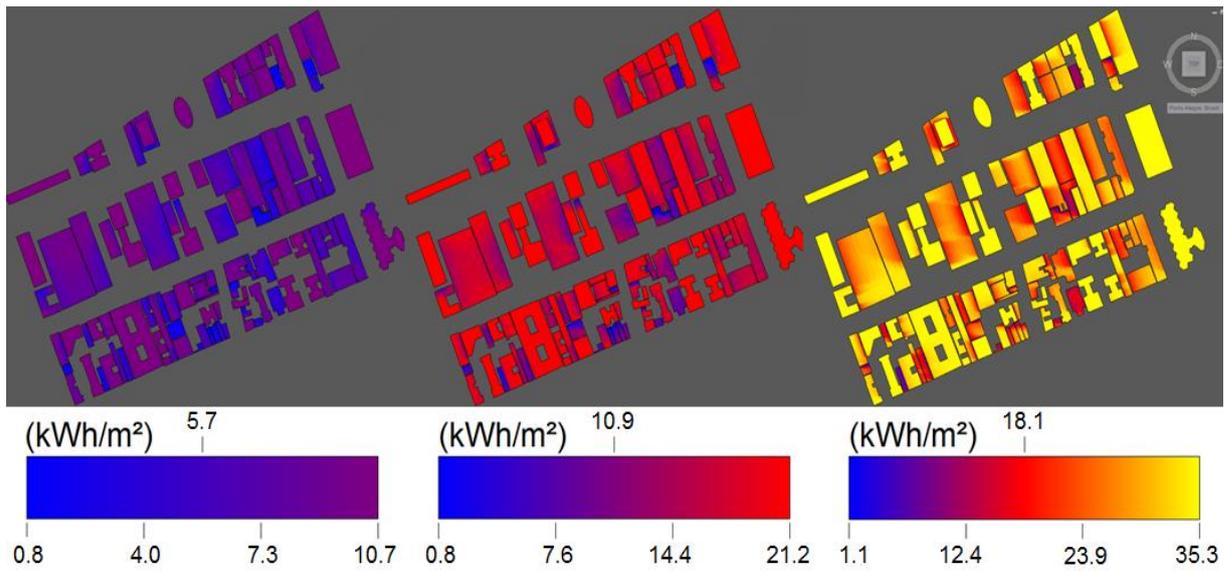


Figura 6.18 - Irradiação solar sobre as coberturas de uma região do Centro Histórico durante as semanas de: (a) solstício de inverno; (b) equinócio de outono; (c) solstício de verão.

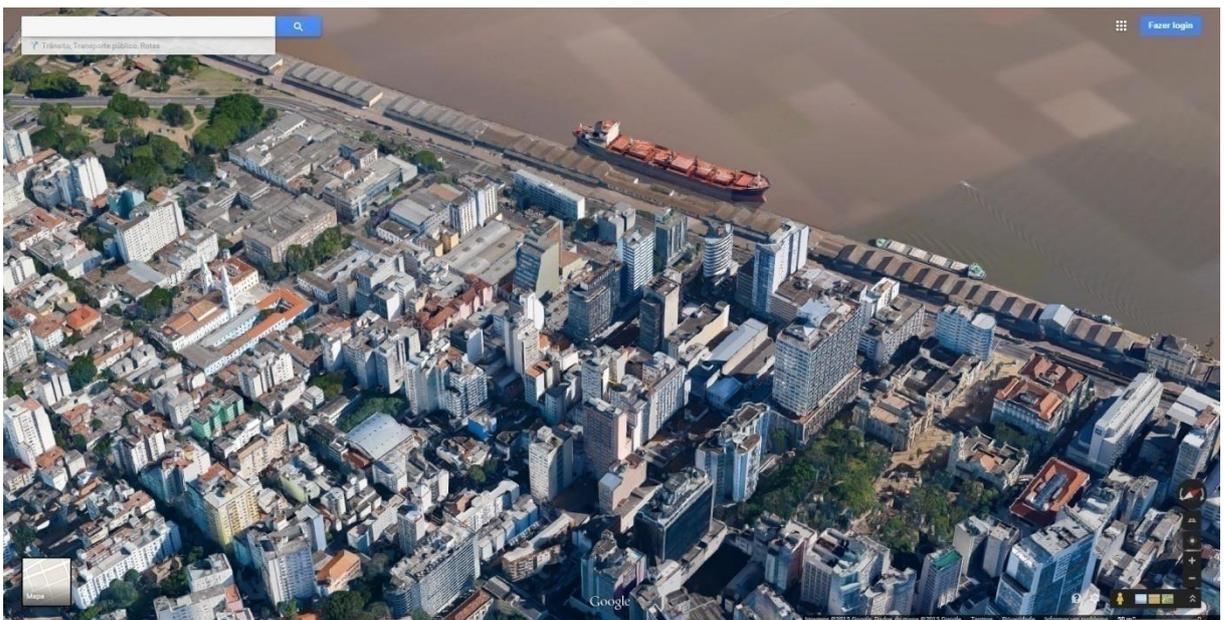


Figura 6.19 - Região do bairro Centro Histórico.

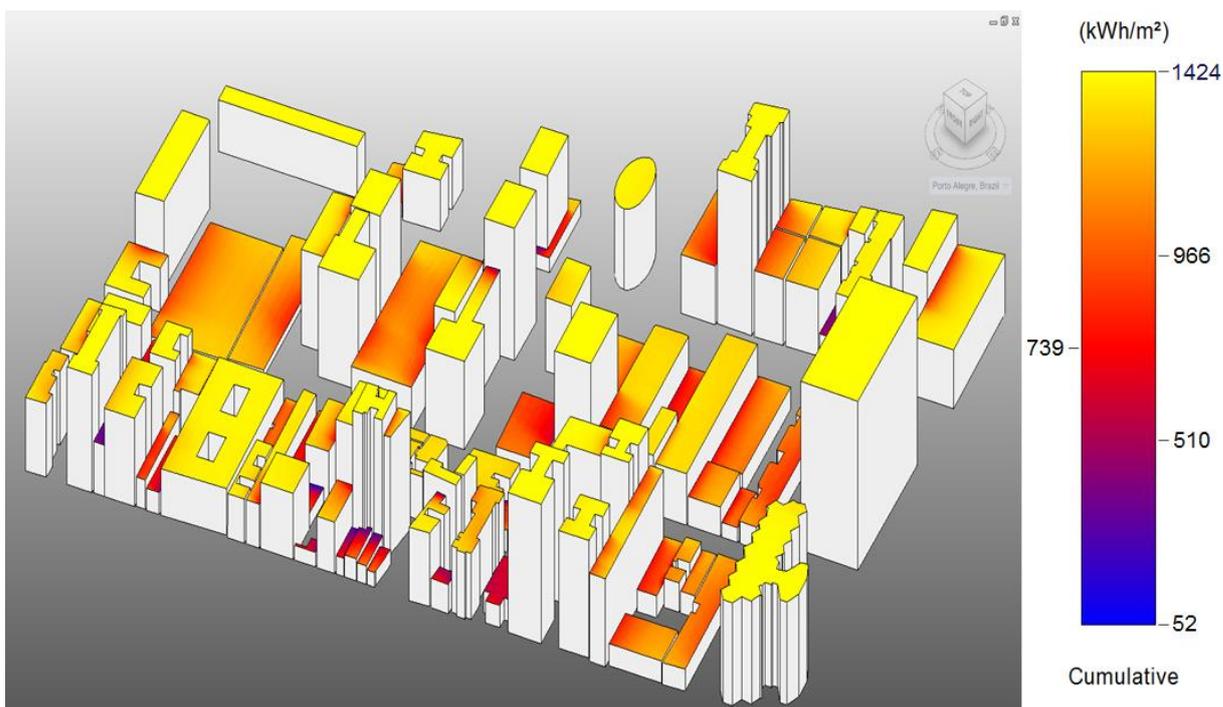


Figura 6.20 - Irradiação solar acumulada durante 1 ano sobre as coberturas/telhados de uma região do bairro Centro Histórico.

6.2.2 Região do bairro São Geraldo

A Figura 6.21 mostra o analema solar, a região de trajetória do movimento aparente do Sol ao longo de 1 ano, para a região do São Geraldo, composta por edificações de baixa altura e grande área. Além disto, a homogeneidade de edificações e telhados se mantém para grande parte desta região.

A Figura 6.22 mostra a comparação entre as semanas do solstício de inverno, equinócio de outono e solstício de verão, comparando as variações e potencial de irradiação ao longo de diferentes período num ano.

A comparação entre estas três semanas de análise ilustra quase nenhuma diferença de potencial de aproveitamento de energia solar nas coberturas das edificações. A variação da altitude solar ao longo do ano, aliada ao perfil uniforme deste bairro, não ocasiona variações nos sombreamentos e proporciona excelente aproveitamento da radiação solar nas coberturas e telhados ao longo do ano. Nesta tipologia de bairro não torna-se fundamental uma análise mais aprofundada sobre a projeção de sombreamentos, porque verifica-se que a radiação solar incidente, para a maioria absoluta de áreas de cobertura, estará sempre nos índices máximos de irradiação solar local.

As Figuras 6.23 e 6.24 concluem a verificação de irradiação solar anual nas superfícies de cobertura para a tipologia de galpões comerciais.

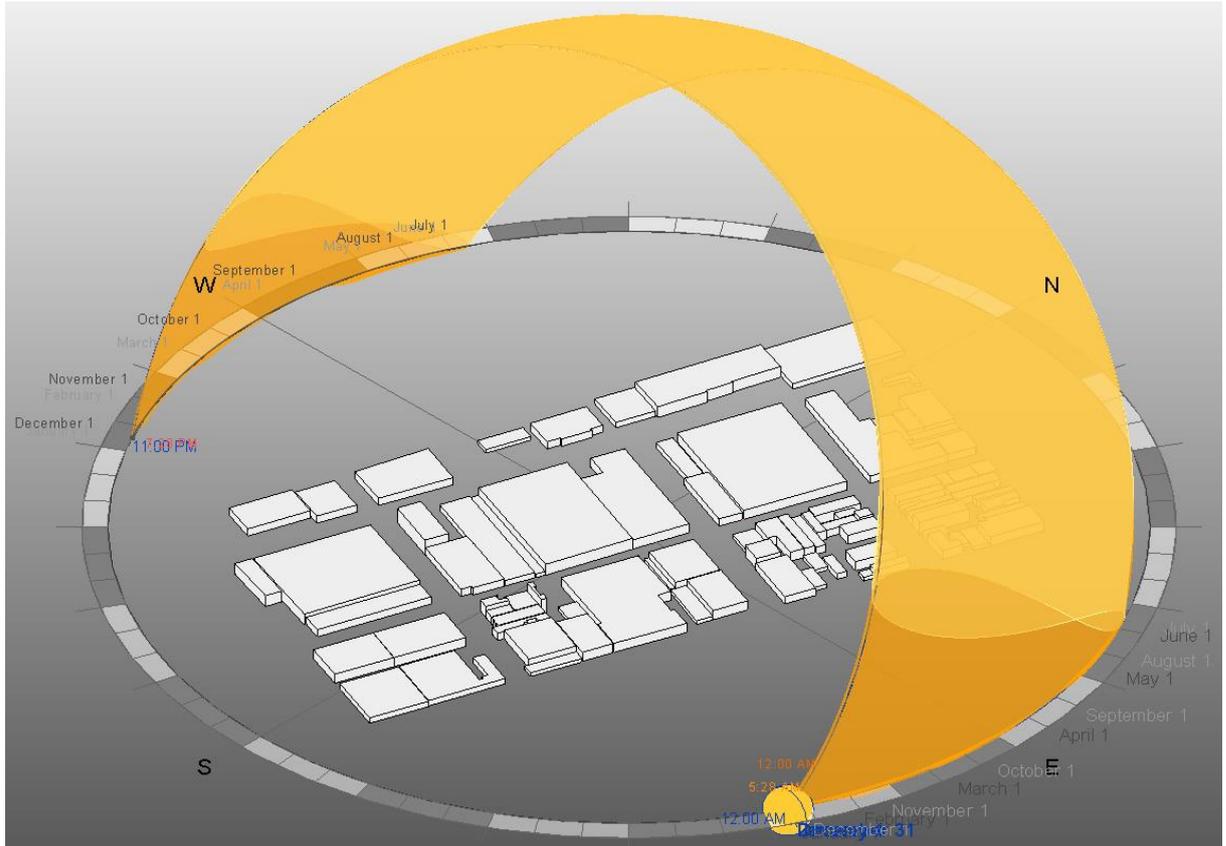


Figura 6.21 - Análise anual de radiação solar incidente para região do São Geraldo.

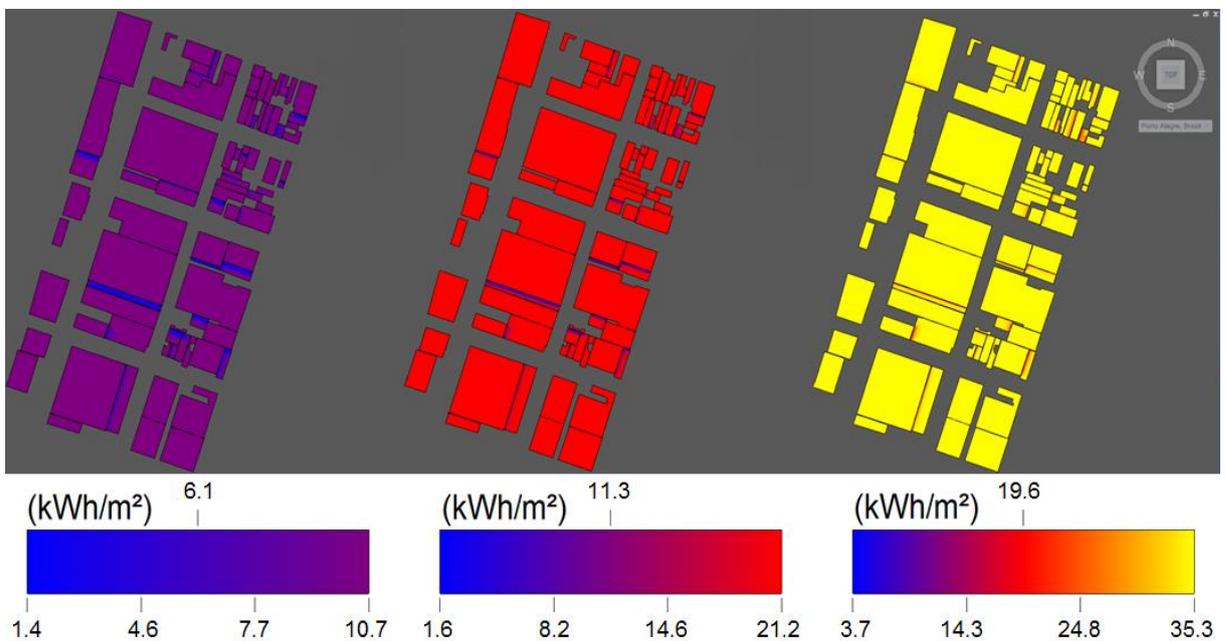


Figura 6.22 - Irradiação solar sobre as coberturas de uma região do São Geraldo durante as semanas de: (a) solstício de inverno; (b) equinócio de outono; (c) solstício de verão.

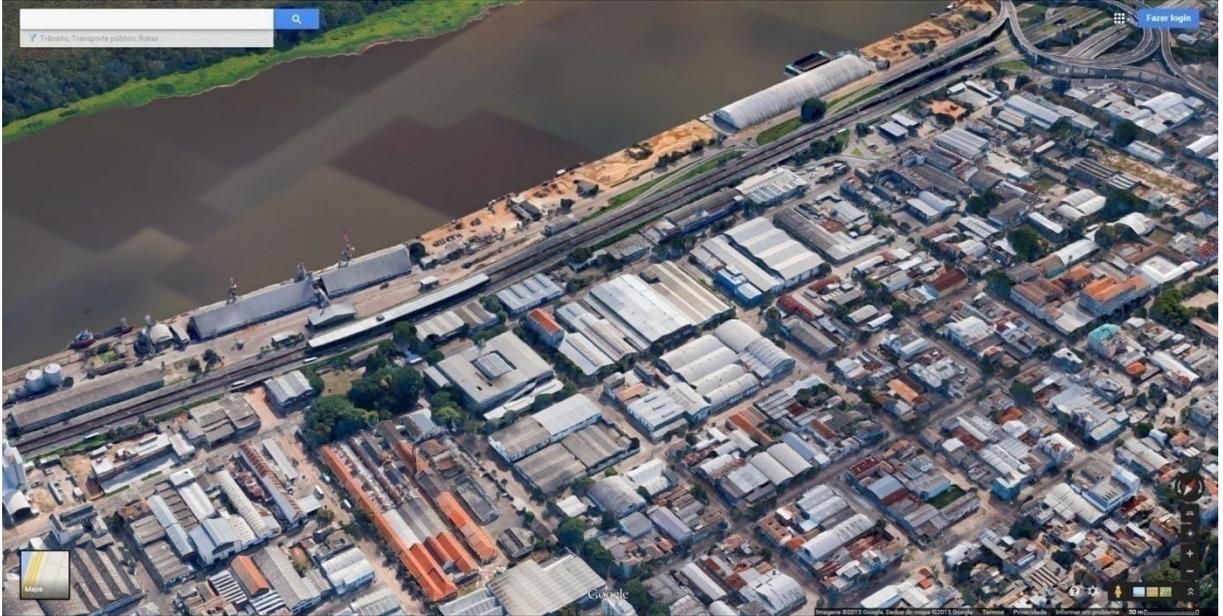


Figura 6.23 - Região do bairro São Geraldo

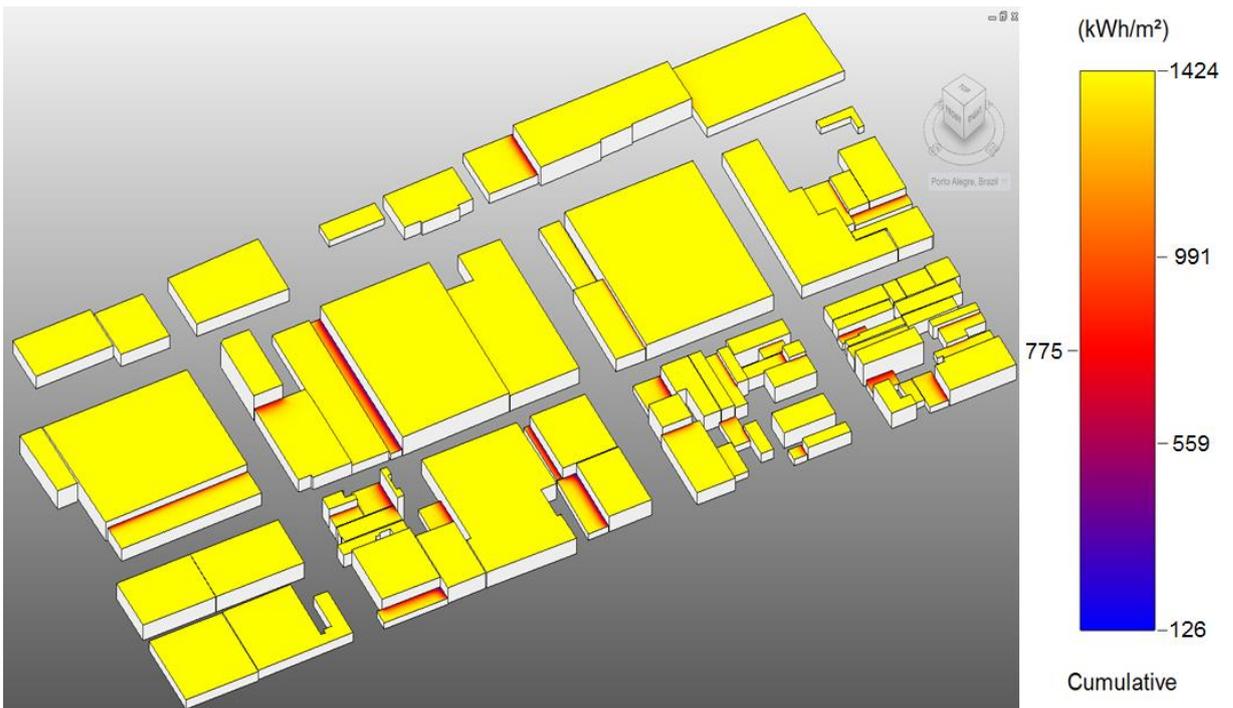


Figura 6.24 - Irradiação solar acumulada durante 1 ano sobre as coberturas/telhados de uma região do bairro São Geraldo.

6.2.3 Região do bairro São Sebastião

A Figura 6.25 mostra o analema solar, a região de trajetória do movimento aparente do Sol ao longo de 1 ano, para a região do São Sebastião, composta por edificações de baixa altura, área e tipologia de residências. Além disto, a homogeneidade de diversas edificações

juntamente com um planejamento urbanístico nos loteamentos, favorecem poucas projeções de sombreamento de uma edificação para outra. Entretanto, a construção de duas novas construções de grande altura e fora do perfil de construções da localidade, ocasiona grande projeção de sombreamentos ao longo deste bairro, conforme verificado anteriormente.

A Figura 6.26 compara os resultados para as semanas do solstício de inverno, equinócio de outono e solstício de verão, comparando o potencial de irradiação ao longo de diferentes períodos. Os resultados identificam um bom aproveitamento de energia solar nas coberturas das edificações para cada época do ano, indicando quase todas as edificações, com o máximo possível de irradiação acumulada. A mudança da altitude solar ao longo do ano não ocasiona variações de sombreamentos e quase não prejudica o aproveitamento de radiação solar nas coberturas/telhados. Esta tipologia de bairro planejado, com edificações espaçadas, uniformes e homogêneas em alturas, proporciona excelente aproveitamento de irradiação ao longo do ano.

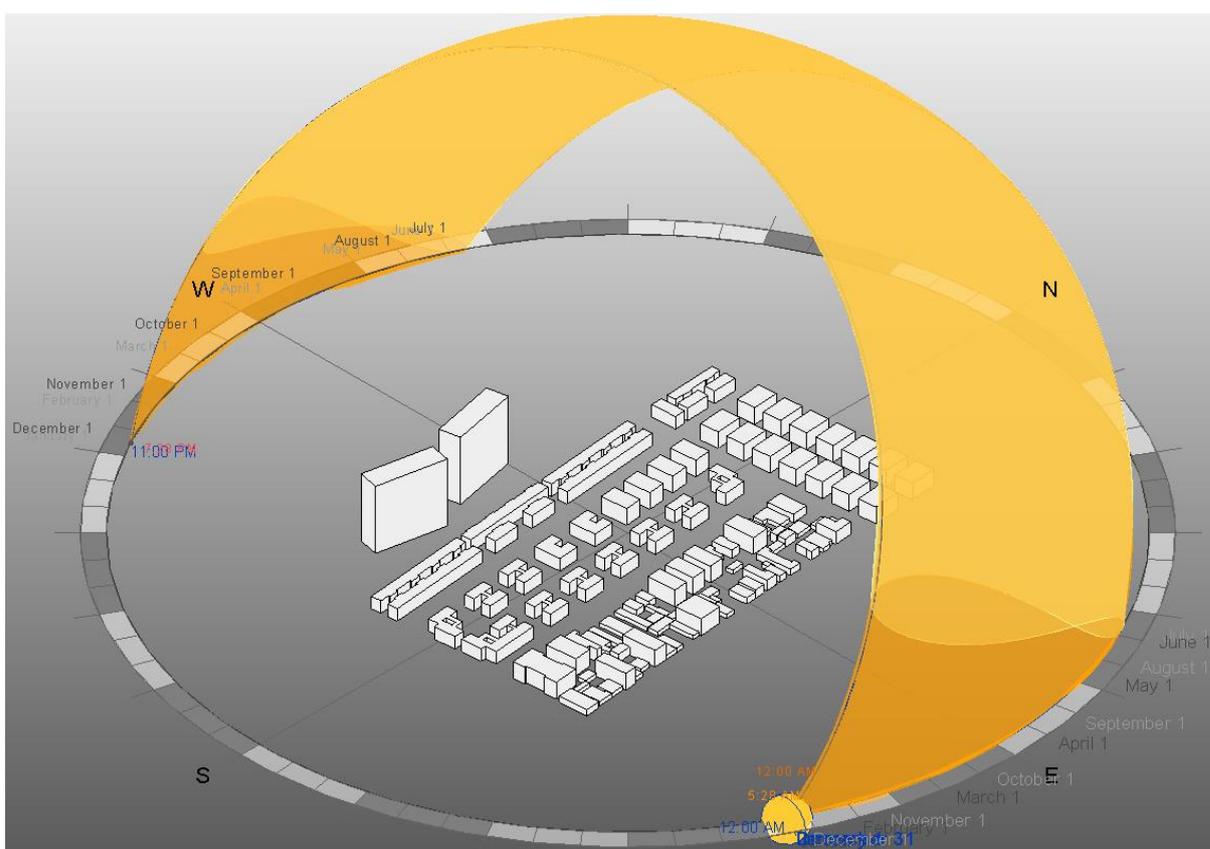


Figura 6.25 - Análise anual de radiação solar incidente para região do São Sebastião.

Não são necessárias análises mais aprofundadas sobre a projeção de sombreamentos, mesmo com duas possíveis grandes obstruções, porque verifica-se índices máximos de

irradiação solar nos diferentes períodos de estudo. As Figuras 6.27 e 6.28 concluem a verificação de irradiação solar anual para a tipologia residencial de baixa altura.

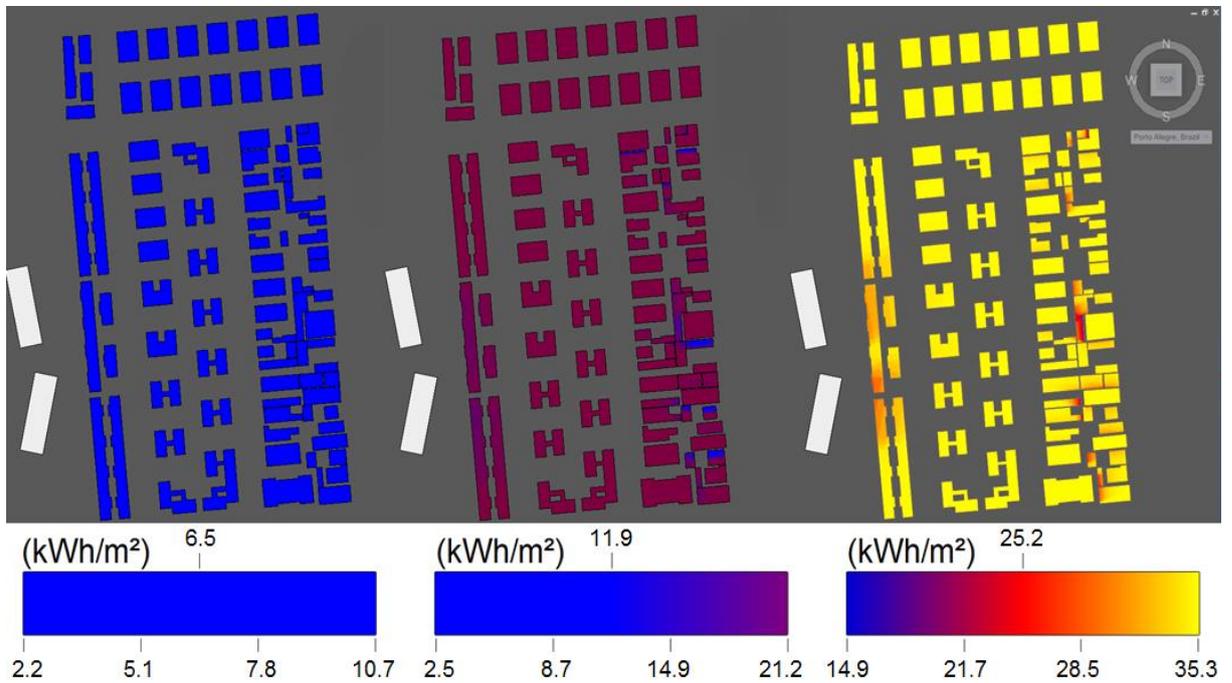


Figura 6.26 - Irradiação solar sobre as coberturas de uma região do São Sebastião durante as semanas de: (a) solstício de inverno; (b) equinócio de outono; (c) solstício de verão.

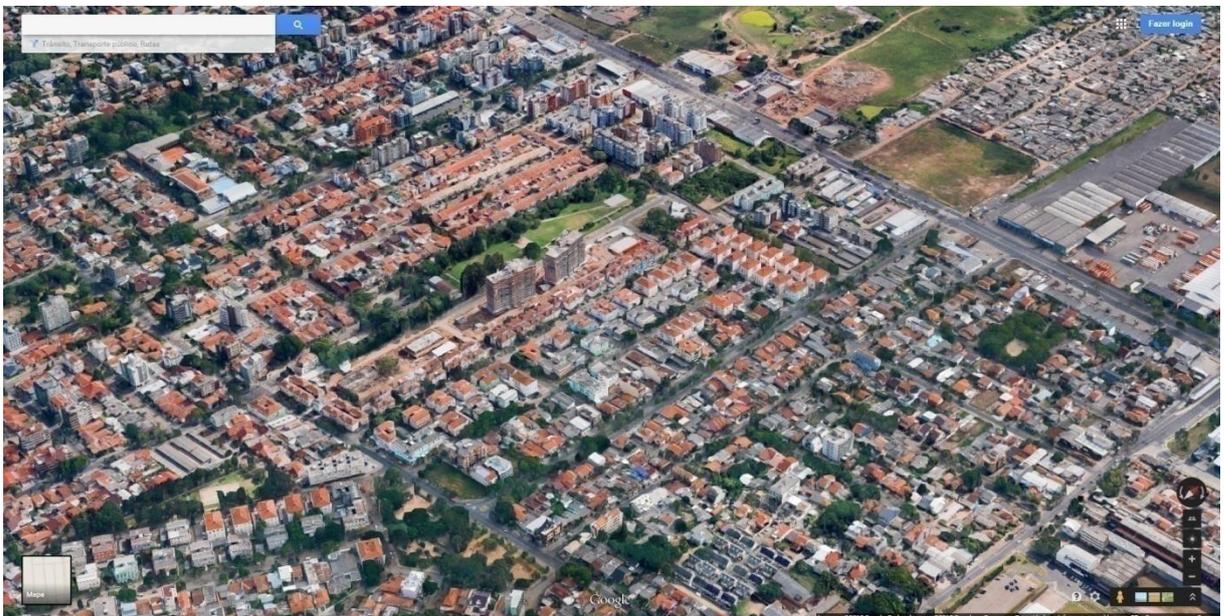


Figura 6.27 - Região do bairro São Sebastião.

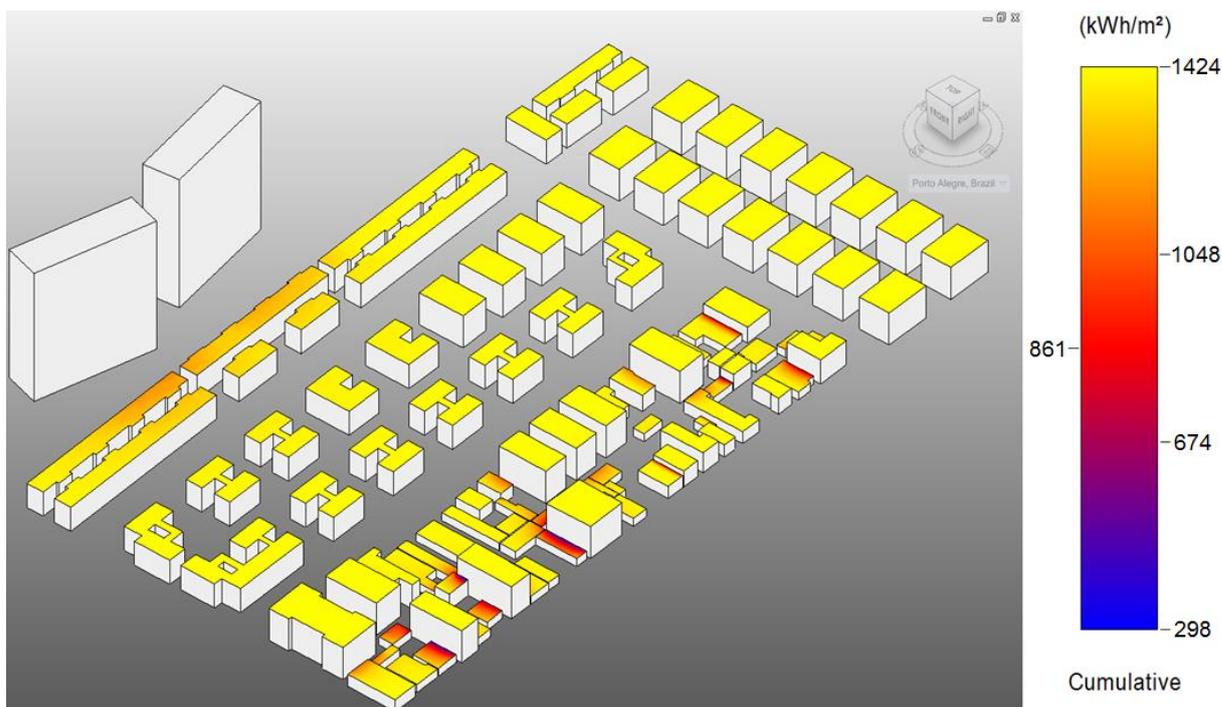


Figura 6.28 - Irradiação solar acumulada durante 1 ano sobre as coberturas/telhados de uma região do bairro São Sebastião.

6.2.4 Região do bairro Santana

Pode-se realizar uma comparação entre a região do Centro Histórico com a região do Santana por serem bairros mais antigos na cidade, possuírem uma mistura de edificações antigas e novas, pela densidade mais elevada de ocupação e a variação de altura entre as edificações. Entretanto, todas estas semelhanças não continuam na forma como as edificações são utilizadas e ocupadas. A Figura 6.29 mostra o analema solar, a região de trajetória do movimento aparente do Sol ao longo de 1 ano, para a região do Santana, área e tipologia residencial. As diferenças de áreas e alturas entre muitas edificações favorecem as projeções de sombreamento de uma edificação para outra.

A Figura 6.30 compara os resultados para as semanas do solstício de inverno, equinócio de outono e solstício de verão, a fim de estimar a variação e o potencial de irradiação ao longo de diferentes períodos do ano. Apesar de grande parte das edificações apresentarem baixos índices de sombreamento e consequentemente elevada irradiação solar acumulada nas coberturas/telhados, ainda é necessária uma melhor verificação das projeções de sombreamento para futuras instalações fotovoltaicas.



Figura 6.29 - Análise anual de radiação solar incidente para região do Santana.

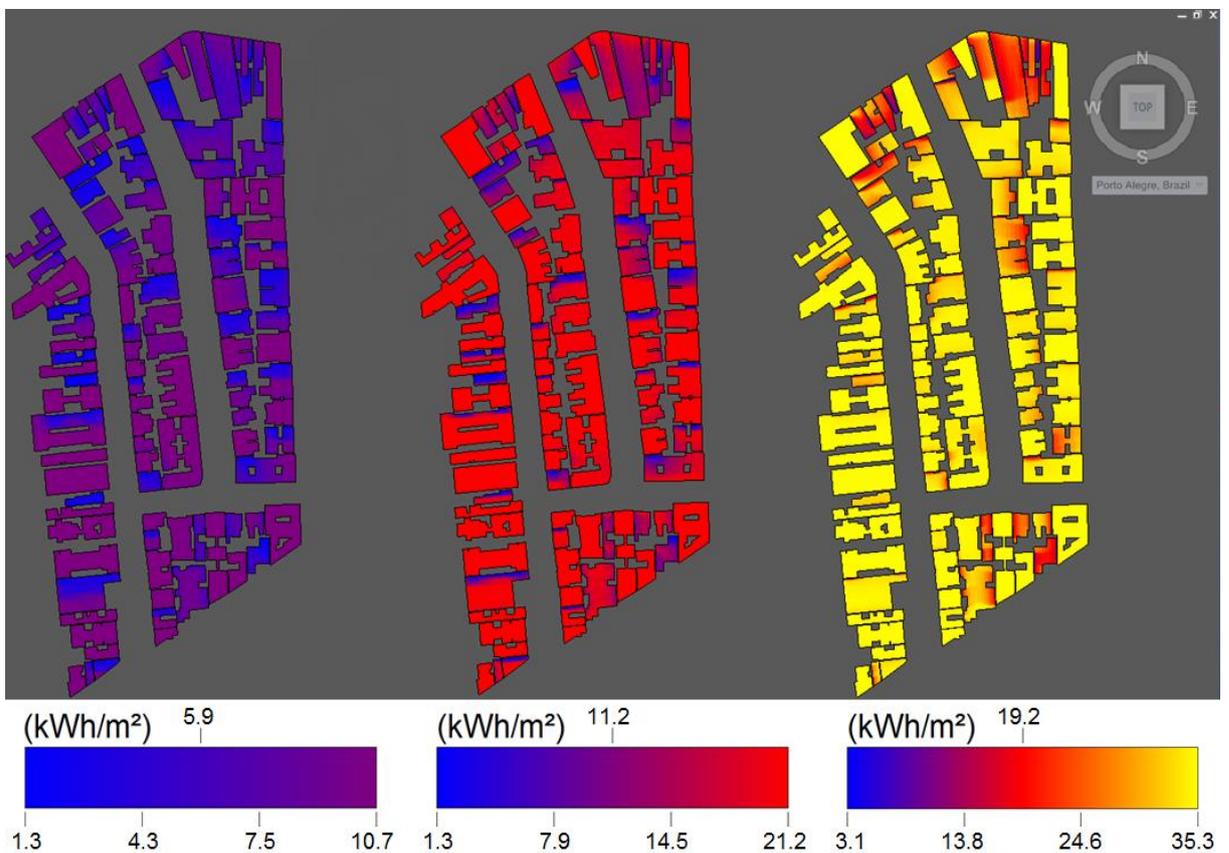


Figura 6.30 - Irradiação solar sobre as coberturas de uma região do Santana durante as semanas de: (a) solstício de inverno; (b) equinócio de outono; (c) solstício de verão.

Uma vez que existe uma não uniformidade nas edificações e, principalmente, nas alturas das mesmas, resulta que muitas áreas possuem algum sombreamento e portanto não atingem o potencial máximo estimado para aproveitamento da energia solar. Ao longo do período de inverno, com a trajetória do movimento aparente do Sol mais baixa, é notado o maior número de áreas com possíveis sombreamentos. Mesmo com grande parte de edificações com os índices mais elevados de irradiação solar, é recomendada melhor verificação porque, para este caso, os limites estabelecidos para análise eram favoráveis ao não aparecimento de sombreamentos. Em outra região residencial de mesma tipologia densa e média altura, por exemplo, pode ser mais complicado encontrar limites que não interfiram na região de análise.

As Figuras 6.31 e 6.32 concluem a verificação de irradiação solar anual para a tipologia residencial densa e de média altura do bairro Santana.

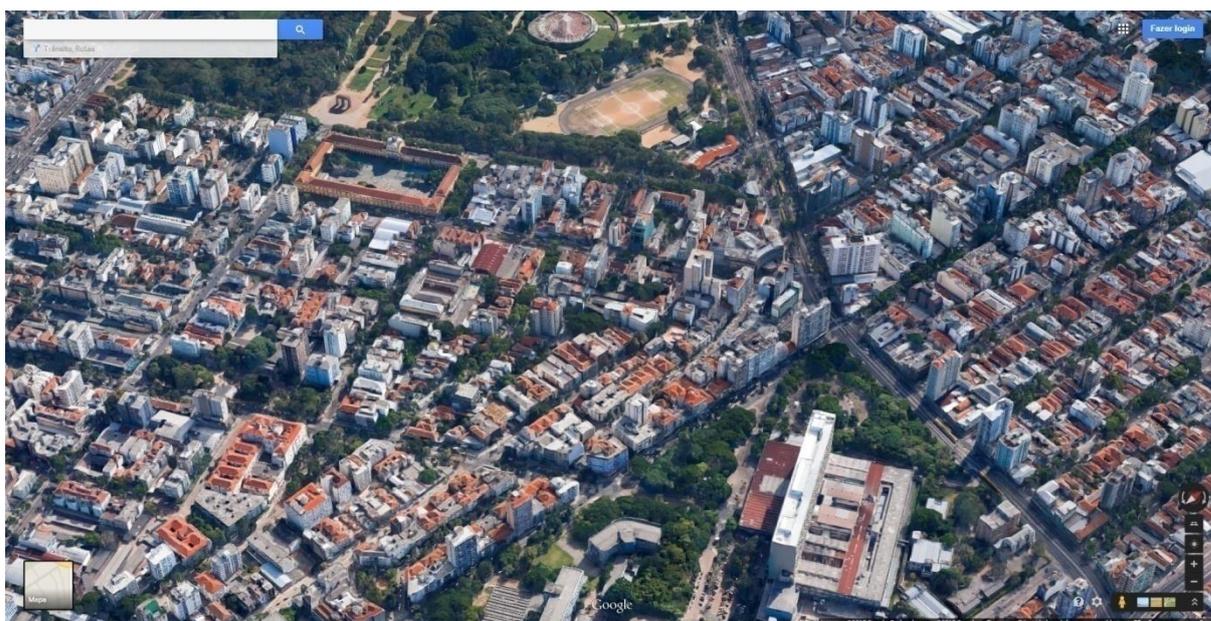


Figura 6.31 - Região do bairro Santana.
Fonte: Google Maps, 2015.

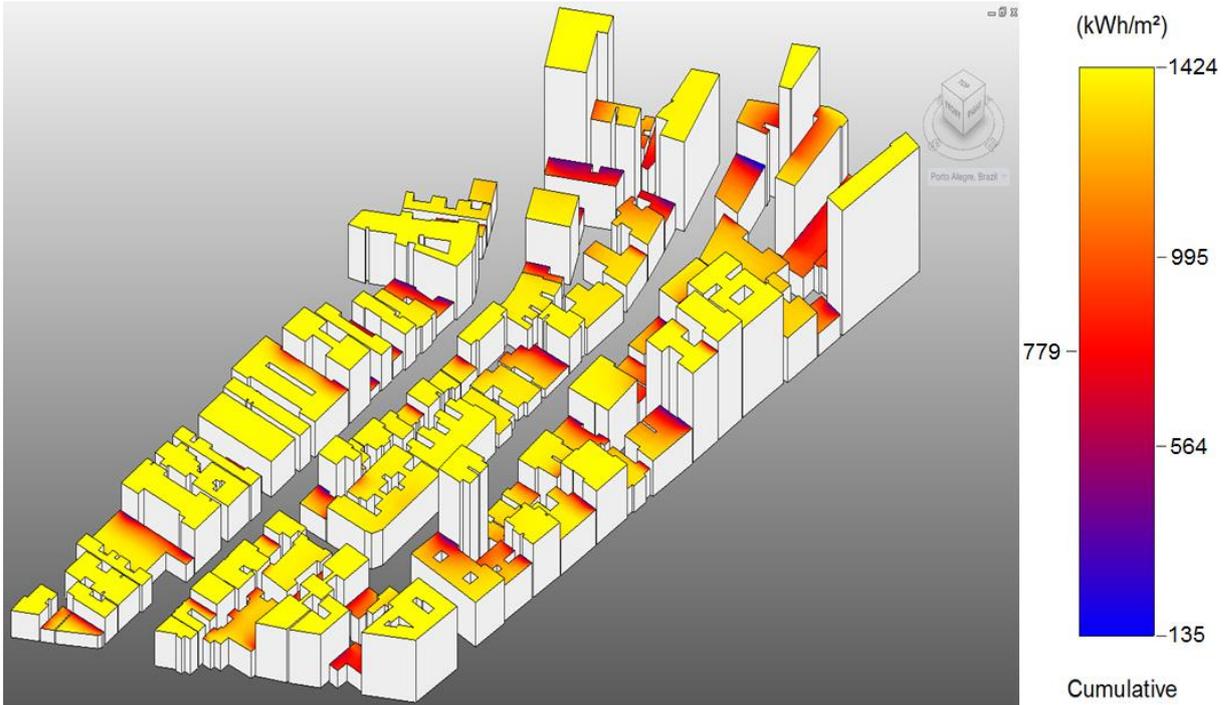


Figura 6.32 - Irradiação solar acumulada durante 1 ano sobre as coberturas/telhados de uma região do bairro Santana.

6.2.5 Montagem de Mapas Solares em Meio Urbano

As Figuras 6.33, 6.34, 6.35, 6.36 ilustram os gráficos de irradiação nos telhados das edificações nas regiões analisadas, mantendo a escala de cores para aproveitamento solar:

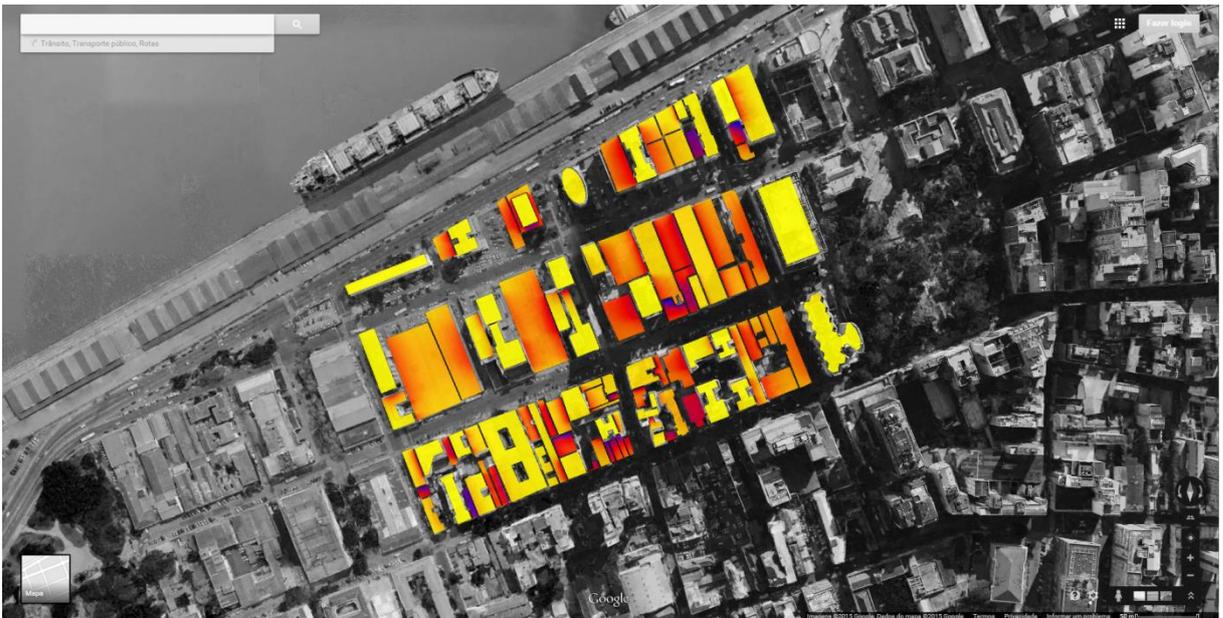


Figura 6.33 - Mapa solar em meio urbano para região do Centro Histórico.



Figura 6.34 - Mapa solar em meio urbano para região do São Geraldo.



Figura 6.35 - Mapa solar em meio urbano para região do São Sebastião.



Figura 6.36 - Mapa solar em meio urbano para região do Santana.

6.3 Capacidade de Instalação Fotovoltaica e Estimativa de Produção de Energia

Para cada região foi elaborada uma estimativa de potencial de instalação fotovoltaica. Aliada ao estudo de sombreamentos e de irradiação solar anual nas coberturas, a estimativa de instalação prevê o quanto é possível produzir de energia elétrica a partir de futuros sistemas fotovoltaicos conectados à rede, a fim de diminuir a demanda das edificações por energia da rede/concessionária local. No Apêndice A encontram-se as plantas e as tabelas contendo as áreas de projeção, estimativas de instalação e produção de energia de todas as edificações verificadas. Os resultados não contabilizam possíveis sombreamentos, pois estimam o potencial teórico baseado nas premissas de cálculo, e estão separados em dois cenários da seguinte forma:

1. 40% de cada área de cobertura/telhado: cenário adequado de instalação e que possibilita algum retorno de investimento;
2. 70% de cada área de cobertura/telhado: cenário otimista (comentado no texto).

6.3.1 Cenário para região do Centro Histórico

As Tabelas 6.3 e 6.4 mostram o cenário 1 de potencial de instalação de sistemas fotovoltaicos para região do bairro em estudo.

Tabela 6.3 - Cenário 1 para o Centro Histórico.

| CENTRO HISTÓRICO | 40% Área de Projeção [m²] | Nº Módulos | Potência Instalada [kW_p] | Energia Gerada em 1 Ano [MW.h] |
|-------------------------------|---|-------------------|--|---------------------------------------|
| Menor Edificação | 16 | 10 | 2,3 | 3,2 |
| Maior Edificação | 1076 | 672 | 159,2 | 219,7 |
| Média das Edificações | 178 | 111 | 26,4 | 36,4 |
| Total: 100 Edificações | 17814 | 11134 | 2636,4 | 3638,2 |

Tabela 6.4 - Cenário 1 de potencial de instalação para as 10 maiores áreas de cobertura/telhados da região do Centro Histórico.

| Nº Edificação | Área [m²] | Área de Instalação [m²] | Nº Módulos | Potência Instalada [kW_p] | Energia Gerada em 1 Ano [MW.h] |
|----------------------|-----------------------------|---|-------------------|--|---------------------------------------|
| 16 | 2689 | 1076 | 672 | 159,2 | 219,7 |
| 21 | 2465 | 986 | 616 | 145,9 | 201,4 |
| 45 | 1898 | 759 | 475 | 112,4 | 155,1 |
| 39 | 1839 | 736 | 460 | 108,9 | 150,2 |
| 17 | 1404 | 562 | 351 | 83,1 | 114,7 |
| 97 | 1283 | 513 | 321 | 76,0 | 104,8 |
| 29 | 1261 | 504 | 315 | 74,7 | 103,0 |
| 94 | 1206 | 482 | 302 | 71,4 | 98,5 |
| 27 | 1106 | 442 | 277 | 65,5 | 90,4 |
| 30 | 893 | 357 | 223 | 52,9 | 73,0 |

Analisando o cenário proposto, pode-se constatar a possibilidade de instalar uma pequena usina fotovoltaica com, aproximadamente, 2,6 MW_p, e aproximadamente 11 mil módulos. Na média, equivale a instalar a 111 módulos por cobertura/telhado. Entretanto, muitas dificuldades de instalação podem ser encontradas. A análise de potencial de instalação mostra que apenas nas 10 maiores áreas de cobertura é possível instalar, aproximadamente, 1,0 MW_p, produzindo aproximadamente 1310 MW.h ao longo de 1 ano. Isto equivale a aproximadamente 36% do potencial total de instalação e produção de energia para esta região. Comparativamente, um cenário otimista para 70% de área de instalação para as 10 maiores áreas de cobertura equivale a 1,7 MW_p e 2294 MW.h de energia produzida em 1 ano.

6.3.2 Cenário para região do São Geraldo

Região de baixa altura, sem grandes projeções de sombreamento e grandes áreas de cobertura, esta região possui um apelo maior para futuras instalações fotovoltaicas. A Tabela 6.5 descreve o cenário 1 de potencial e a Tabela 6.6 a estimativa para as 10 maiores áreas de cobertura.

Tabela 6.5 - Cenário 1 para o São Geraldo.

| SÃO GERALDO | 40% Área de Projeção [m²] | Nº Módulos | Potência Instalada [kW_p] | Energia Gerada em 1 Ano [MW.h] |
|------------------------------|---|-------------------|--|---------------------------------------|
| Menor Edificação | 24 | 15 | 3,6 | 4,9 |
| Maior Edificação | 3148 | 1968 | 466,0 | 643,0 |
| Média das Edificações | 394 | 246 | 58,3 | 80,5 |
| Total: 83 Edificações | 32708 | 20442 | 4840,8 | 6680,3 |

Tabela 6.6 - Cenário 1 de potencial de instalação para as 10 maiores áreas de cobertura/telhados da região do São Geraldo.

| Nº Edificação | Área [m²] | Área de Instalação [m²] | Nº Módulos | Potência Instalada [kW_p] | Energia Gerada em 1 Ano [MW.h] |
|----------------------|-----------------------------|---|-------------------|--|---------------------------------------|
| 20 | 7871 | 3148 | 1968 | 466,0 | 643,0 |
| 16 | 6569 | 2628 | 1642 | 388,9 | 536,7 |
| 10 | 6048 | 2419 | 1512 | 358,1 | 494,1 |
| 42 | 4698 | 1879 | 1174 | 278,1 | 383,8 |
| 17 | 3821 | 1529 | 955 | 226,2 | 312,2 |
| 8 | 3801 | 1520 | 950 | 225,0 | 310,5 |
| 21 | 3339 | 1336 | 835 | 197,7 | 272,8 |
| 7 | 2891 | 1156 | 723 | 171,1 | 236,2 |
| 14 | 2228 | 891 | 557 | 131,9 | 182,0 |
| 31 | 2181 | 872 | 545 | 129,1 | 178,2 |

O cenário proposto para a região do bairro São Geraldo mostra que é possível instalar, aproximadamente, 4,8 MW_p. Dentro de um ambiente urbano e de forma descentralizada, mas com dimensões de uma grande usina fotovoltaica. Na média, equivale a instalar a 246 módulos por cobertura/telhado. A análise de potencial de instalação mostra que nas 10 maiores áreas de cobertura é possível instalar um total de 2,6 MW_p, produzindo aproximadamente 3550 MW.h ao longo de 1 ano. Isto equivale a aproximadamente 53% do potencial total de instalação e produção de energia para esta região. O cenário otimista para 70% de área de instalação, para as 10 maiores áreas de cobertura, equivale a 4,5 MW_p e 6212 MW.h de energia produzida em 1 ano.

6.3.3 Cenário para região do São Sebastião

Região basicamente residencial, a escolha por sistemas fotovoltaicos pode ser vista, atualmente, como um investimento elevado. Entretanto, o setor residencial possui as tarifas de energia mais elevadas e por isto justifica a redução destes custos com a produção in loco. As Tabelas 6.7 e 6.8 estabelecem o potencial de instalação e produção de energia por sistemas fotovoltaicos nas coberturas das edificações desta região.

Tabela 6.7 - Cenário 1 para o São Sebastião.

| SÃO SEBASTIÃO | 40% Área de Projeção [m²] | Nº Módulos | Potência Instalada [kW_p] | Energia Gerada em 1 Ano [MW.h] |
|-------------------------------|---|-------------------|--|---------------------------------------|
| Menor Edificação | 9 | 5 | 1.3 | 1,8 |
| Maior Edificação | 231 | 145 | 34 | 47,2 |
| Média das Edificações | 79 | 49 | 12 | 16,0 |
| Total: 100 Edificações | 7622 | 4764 | 1128 | 1556,7 |

Tabela 6.8 - Cenário 1 de potencial de instalação para as 10 maiores áreas de cobertura/telhados da região do São Sebastião.

| Nº Edificação | Área [m²] | Área de Instalação [m²] | Nº Módulos | Potência Instalada [kW_p] | Energia Gerada em 1 Ano [MW.h] |
|----------------------|-----------------------------|---|-------------------|--|---------------------------------------|
| 19 | 578 | 231 | 145 | 34,2 | 47,2 |
| 20 | 578 | 231 | 145 | 34,2 | 47,2 |
| 24 | 578 | 231 | 145 | 34,2 | 47,2 |
| 25 | 578 | 231 | 145 | 34,2 | 47,2 |
| 21 | 548 | 219 | 137 | 32,4 | 44,8 |
| 27 | 532 | 213 | 133 | 31,5 | 43,5 |
| 42 | 531 | 212 | 133 | 31,4 | 43,4 |
| 68 | 322 | 129 | 80 | 19,0 | 26,3 |
| 26 | 290 | 116 | 73 | 17,2 | 23,7 |
| 48 | 286 | 114 | 72 | 16,9 | 23,4 |

O cenário proposto para a região do bairro São Sebastião indica a possibilidade de instalar até 1,1 MW_p em módulos fotovoltaicos. Neste bairro, organizado urbanisticamente e com edificações bem espaçadas, pode-se considerar a instalação destes sistemas, até como forma de incentivo aos novos bairros de mesma tipologia. Na média, o potencial total de instalação equivale a 49 módulos por cobertura/telhado. A análise de potencial de instalação mostra que para as 10 maiores áreas de cobertura é possível instalar um total de 0,3 MW_p, produzindo, aproximadamente, 394 MW.h ao longo de 1 ano. Isto equivale a aproximadamente 25% do potencial total de instalação e produção de energia para esta região. Para 70% de área de instalação nas coberturas, para as 10 maiores áreas, equivale a 0,5 MW_p e 690 MW.h de energia produzida em 1 ano.

6.3.4 Cenário para região do Santana

As Tabelas 6.9 e 6.10 ilustram os cenários de instalação para região do bairro Santana.

Tabela 6.9 - Cenário 1 para o Santana.

| SANTANA | 40% Área de Projeção [m ²] | Nº Módulos | Potência Instalada [kW _p] | Energia Gerada em 1 Ano [MW.h] |
|-------------------------------|--|------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| Menor Edificação | 22 | 14 | 3,3 | 4,5 |
| Maior Edificação | 291 | 182 | 43,1 | 59,5 |
| Média das Edificações | 94 | 59 | 13,9 | 19,2 |
| Total: 100 Edificações | 9979 | 6237 | 1476,9 | 2038,2 |

Tabela 6.10 - Cenário 1 de potencial de instalação para as 10 maiores áreas de cobertura/telhados da região do Santana.

| Nº Edificação | Área [m ²] | Área de Instalação [m ²] | Nº Módulos | Potência Instalada [kW _p] | Energia Gerada em 1 Ano [MW.h] |
|---------------|------------------------|--------------------------------------|------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| 73 | 729 | 291 | 182 | 43,1 | 59,5 |
| 14 | 688 | 275 | 172 | 40,7 | 56,2 |
| 102 | 666 | 266 | 166 | 39,4 | 54,4 |
| 22 | 594 | 238 | 149 | 35,2 | 48,5 |
| 96 | 565 | 226 | 141 | 33,4 | 46,1 |
| 7 | 550 | 220 | 137 | 32,5 | 44,9 |
| 93 | 538 | 215 | 135 | 31,8 | 44,0 |
| 72 | 517 | 207 | 129 | 30,6 | 42,3 |
| 12 | 502 | 201 | 126 | 29,7 | 41,0 |
| 41 | 475 | 190 | 119 | 28,1 | 38,8 |

Mesmo sendo uma região tipicamente residencial, em área densamente povoada e ocupada na parte central da cidade, a região de estudo para o bairro Santana possui um considerável número de telhados sem nenhum efeito de sombreamento de outras edificações além de espaços para futuras instalações, como visualizado nas análises de sombreamentos e radiação solar incidente.

O cenário proposto para a região do bairro Santana contabiliza, no total, até 1,4 MW_p de instalação em módulos fotovoltaicos. Apesar da composição adensada de edificações nesta região, muitas coberturas possuem um bom espaço e nenhum sombreamento, crítico, ao longo do ano. Na média, o potencial de instalação equivale a 58 módulos por cobertura/telhado. Analisando somente as 10 maiores áreas de cobertura, referente ao potencial de instalação, é possível instalar um total de 0,3 MW_p, produzindo aproximadamente 475 MW.h ao longo de 1 ano. Isto equivale a aproximadamente 23% do potencial total de instalação e produção de energia para esta região. Para 70% de área de instalação nas coberturas, para as 10 maiores áreas, equivalem a 0,6 MW_p e 832 MW.h de energia produzida em 1 ano.

6.3.5 Resumo Comparativo entre as Regiões de Estudo

A Tabela 6.11 resume os cenários de estudo e compara o potencial para cada região, ainda classificando conforme a altura das edificações e homogeneidade entre elas:

Tabela 6.11 - Resumo comparativo entre as regiões para o cenário de 40% de área de aproveitamento.

| Região de Estudo | Tipologia | Capacidade de Instalação | Capacidade de Produção | Representatividade das 10 Maiores Áreas de Cobertura |
|------------------|--------------------|--------------------------|------------------------|--|
| Centro Histórico | Alta e Heterogênea | 2636,4 kWp | 3638,2 MW.h | 36 % |
| São Geraldo | Baixa e Homogênea | 4840,8 kWp | 6680,3 MW.h | 53 % |
| São Sebastião | Baixa e Homogênea | 1128,1 kWp | 1556,7 MW.h | 25 % |
| Santana | Alta e Heterogênea | 1476,9 kWp | 2038,2 MW.h | 23 % |

Conforme verificado pelas análises anteriores e visto na Tabela 6.11, mesmo sendo poucas áreas em um rol tão grande, a representatividade com relação ao total de coberturas pode ser considerável. Nas regiões residenciais verificadas, normalmente não ocorre uma variação muito grande entre as áreas de projeção das edificações, ocorrendo um comportamento perto da média da região. Entretanto, regiões comerciais como a do Centro e do São Geraldo, podem possuir diferentes tipos e áreas de ocupação das edificações e, nesta questão, pode ocorrer de algumas edificações estarem bem acima da média global. Num total de 83 áreas de cobertura na região do bairro São Geraldo, metade da produção de energia elétrica (53%) é representada por 10 edificações.

6.4 Simulação Termoenergética para Edificações Típicas e Balanço de Energia.

Para considerar o investimento em um sistema fotovoltaico conectado à rede, primeiramente deverá ser conhecida a área disponível de instalação, possíveis obstáculos, sombreamentos e dificuldades técnicas. Depois destas etapas, estimar a demanda energética para basear a capacidade de instalação e produção de energia através do sol. Para isto, foram desenvolvidos modelos termoenergéticos de edificações médias típicas para cada região. Os resultados indicarão o consumo energético anual, a análise para cada tipologia de edificação,

além das estratégias para definir a instalação dos sistemas fotovoltaicos a partir dos indicadores de consumo energético. A simulação termoenergética foi realizada através do software *EnergyPlus*.

6.4.1 Simulação de uma Edificação Típica Comercial.

A Figura 6.37 mostra o modelo geométrico tridimensional desenvolvido para uma edificação típica de uso comercial de escritórios, referente ao bairro Centro Histórico.

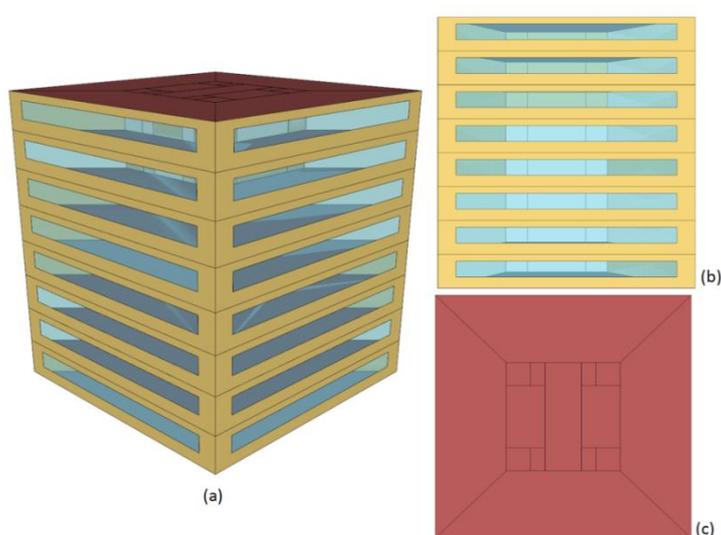


Figura 6.37 - Modelo de simulação para uma edificação típica comercial. (a) vista isométrica; (b) vista frontal; (c) vista de topo.

Esta edificação tem como propósito estabelecer uma referência para o consumo energético de uma edificação típica comercial, como as encontradas na região do bairro Centro Histórico. Demais informações referentes aos dados de entrada para a simulação, tais como, cargas internas, elementos construtivos, perfis horários de uso e ocupação, sistemas de climatização e ventilação encontram-se no Apêndice D.

O gráfico da Figura 6.38 mostra o consumo energético para cada uso final presente neste tipo de edificação. Os resultados são apresentados em escala anual a fim de contabilizar as variações sazonais que interferem no desempenho do sistema de climatização, e também, para estabelecer um valor de desempenho energético comparável e utilizável para uma análise financeira.

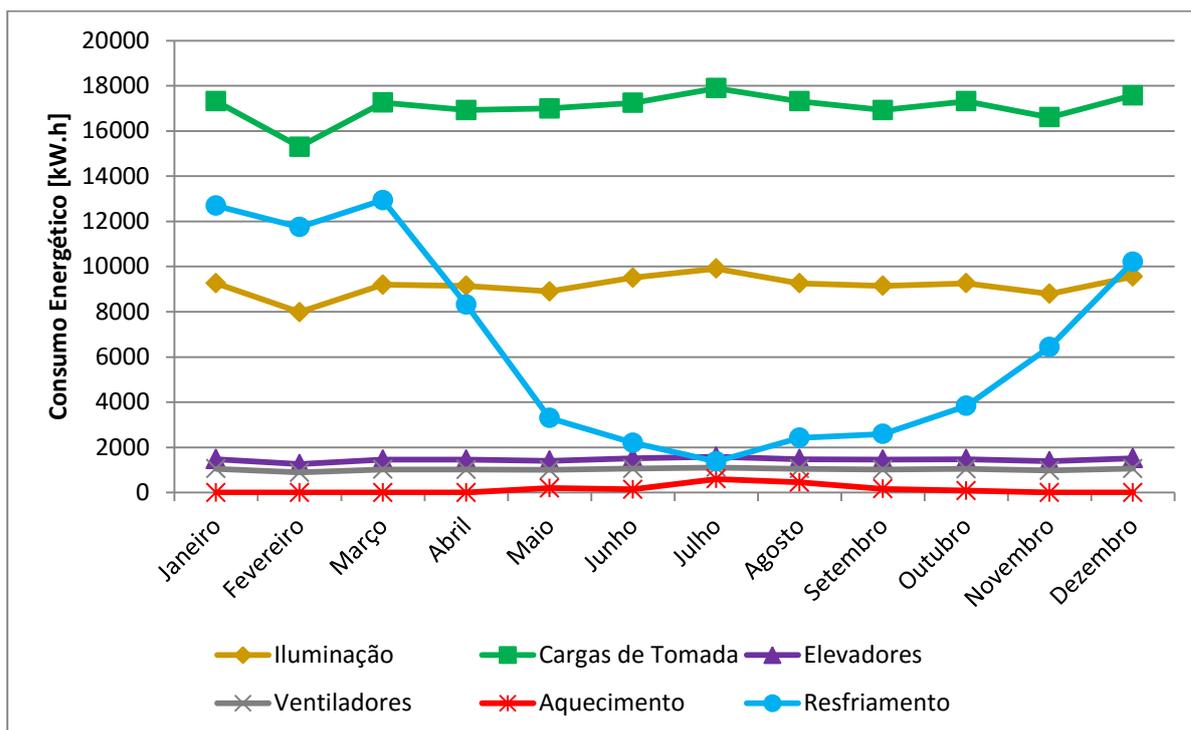


Figura 6.38 - Consumo energético anual para uma edificação típica comercial.

Analisando o gráfico da Figura 6.38, destacam-se os consumos finais referentes às cargas de tomada (equipamentos em geral), iluminação e resfriamento. Notadamente é possível projetar sistemas de iluminação mais eficientes, podendo reduzir este uso final. O sistema de climatização, além de bem dimensionado e especificado, depende, também, do desempenho térmico da envoltória (fechamentos externos e superfícies envidraçadas). Já as cargas de tomada são mais improváveis de estabelecer medidas de eficiência energética.

O gráfico da Figura 6.39 mostra o balanço de energia para o consumo total predial ao longo de 1 ano e o consumo associado às áreas comuns, condominiais, da edificação: circulações, escadas e elevadores. Constata-se que "zerar" o consumo energético de toda edificação, ao longo de 1 ano de operação, é muito difícil. Entretanto, é possível reduzir os custos energéticos associados aos consumos demandados pelas áreas comuns e elevadores. Desta forma, os custos condominiais serão mínimos em alguns meses do ano e zero na maioria dos meses, como mostra o gráfico anterior. Isto quer dizer que ao longo de um ano, o balanço de energia para esta edificação, com relação ao consumo energético das áreas comuns é zero, tanto para uma instalação fotovoltaica que ocupe 40% da área de cobertura, como para uma que ocupe 70%. A Tabela 6.12 detalha os valores para o balanço de energia.

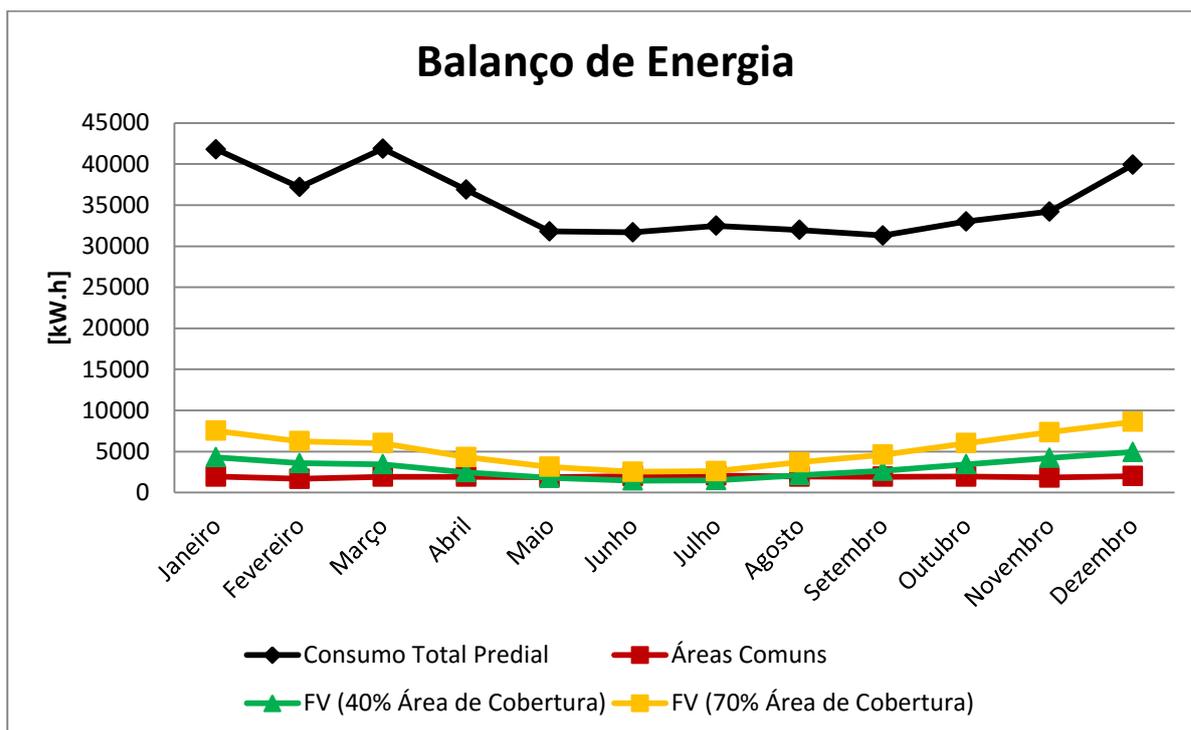


Figura 6.39 - Balanço de energia para edificação típica comercial de uso de escritórios.

Tabela 6.12 - Detalhamento do balanço de energia para a edificação típica comercial de escritórios

| | Consumo Total Predial | Consumo Áreas Condominiais | Produção de Energia (FV-40% Área) | Produção de Energia (FV-70% Área) |
|----------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Energia [kW.h] | 424084,90 | 23045,87 | 35863,62 | 62645,49 |
| % do Total | 100,0% | 5,4% | 8,5% | 14,8% |

6.4.2 Simulação de uma Edificação Típica de Galpão Comercial.

A Figura 6.40 mostra o modelo geométrico tridimensional desenvolvido para uma edificação típica de galpões comerciais e oficinas, referente ao bairro São Geraldo.

Estabelece-se, com este modelo, uma referência para o perfil de uso e consumo energético. Demais informações encontram-se no Apêndice D. O gráfico da Figura 6.41, mostra o consumo energético para cada uso final presente neste tipo de edificação. Os resultados são apresentados em escala anual a fim de contabilizar as variações sazonais que interferem no desempenho do sistema de climatização e também para estabelecer um valor de desempenho energético comparável e utilizável para uma análise financeira. Analisando o gráfico da Figura 6.41, destacam-se, para esta tipologia de edificação, os consumos finais referentes à

iluminação e cargas de tomadas (equipamentos em geral). Diferentemente da tipologia de escritórios, neste caso, o sistema de iluminação é o maior consumidor de energia.

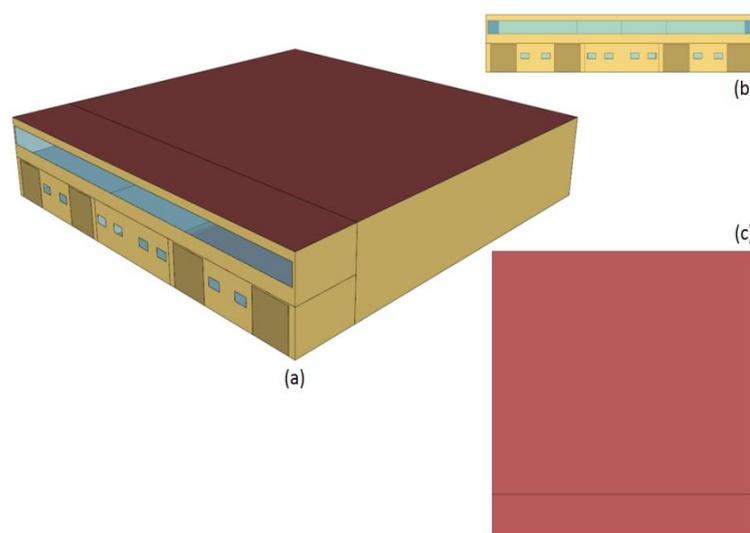


Figura 6.40 - Modelo de simulação para uma edificação típica de galpão comercial. (a) vista isométrica; (b) vista frontal; (c) vista de topo.

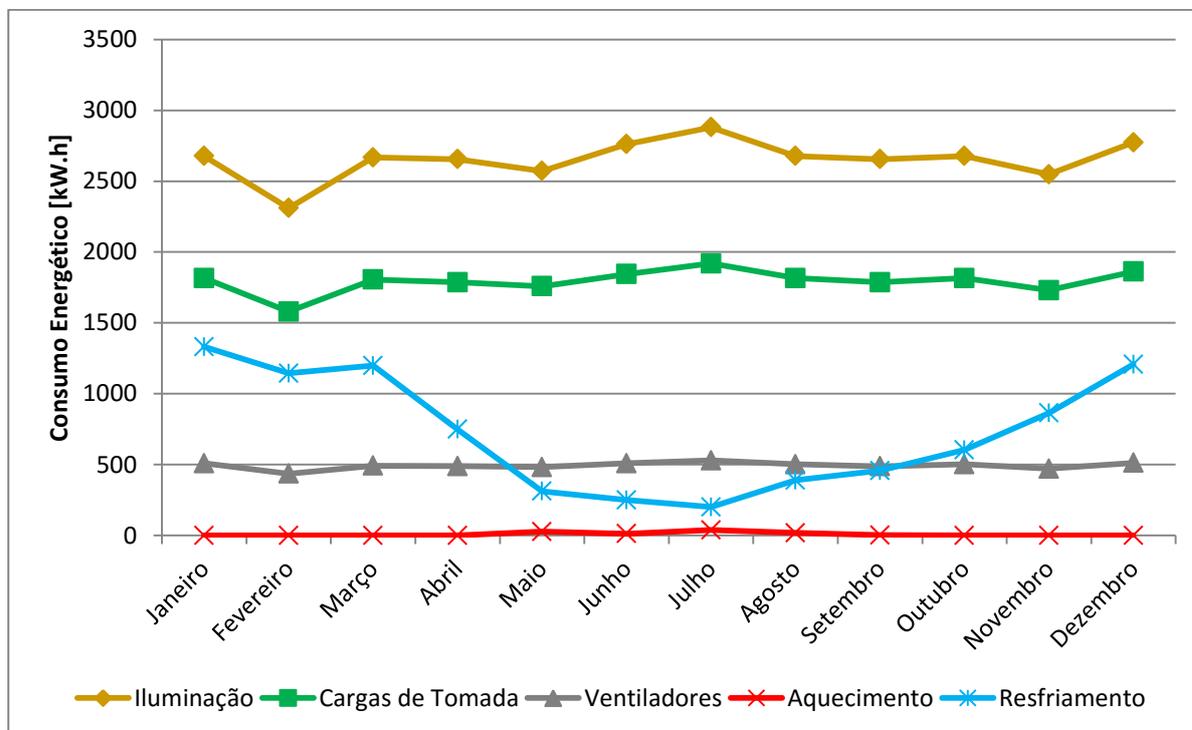


Figura 6.41 - Consumo energético anual para uma edificação típica de galpões comerciais.

O gráfico da Figura 6.42 mostra o balanço de energia para o consumo total predial ao longo de 1 ano, considerando que este tipo de edificação é utilizada por um único ocupante

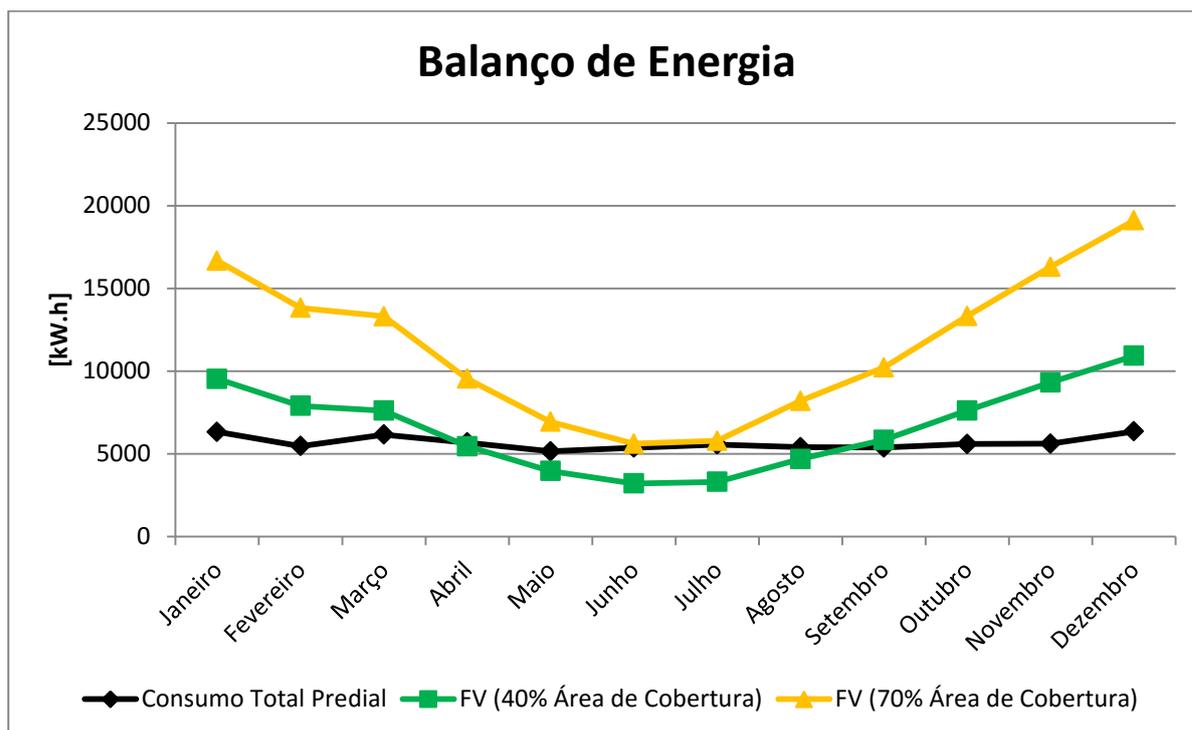


Figura 6.42 - Balanço de energia para edificação típica de galpões comerciais.

. Constata-se que uma instalação fotovoltaica que ocupe 40% da área de cobertura consegue tornar o balanço de energia ao longo de um ano positivo, ou seja, a energia produzida in loco é maior do que o consumo energético, num período de 1 ano. A Tabela 6.13 detalha os valores para o balanço de energia.

Tabela 6.13 - Detalhamento do balanço de energia para a edificação típica de galpões.

| | Consumo Total Predial | Produção de Energia (FV-40% Área) | Produção de Energia (FV-70% Área) |
|----------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Energia [kW.h] | 68113,27 | 79430,06 | 138906,5 |
| % do Total | 100,0% | 116,6% | 203,9% |

Verifica-se o potencial, devido às grandes áreas de telhados e coberturas nesta região, de instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Para esta tipologia o potencial de instalação é elevado, os sombreamentos são irrelevantes, a radiação solar é bem aproveitada nas coberturas e, em termos de consumo energético, verifica-se até a possibilidade de balanço positivo de energia. Para estes casos é importante ressaltar que o excedente, dentro do prazo de validade dos créditos de energia proposto pela ANEEL, não será contabilizado para a unidade consumidora.

6.4.3 Simulação de uma Edificação Típica Residencial de Baixa Altura.

A Figura 6.43 mostra o modelo geométrico tridimensional desenvolvido para uma edificação típica residencial de uma região de baixa altura, referente ao bairro São Sebastião. Estabelece-se, com este modelo, uma referência para o perfil de uso e consumo energético deste tipo de edificação da região do São Sebastião. Demais informações encontram-se no Apêndice D. O gráfico da Figura 6.44, demonstra o perfil de consumo energético para cada uso final presente neste tipo de edificação. Os resultados estão apresentados em escala anual a fim de contabilizar as variações sazonais que interferem no desempenho do sistema de climatização e consolidar um perfil mais realístico sobre o desempenho energético.

O gráfico da Figura 6.44 informa que os maiores consumos finais referentes são cargas de tomada e chuveiros (aquecimento de água). Logo após, a iluminação e o sistema de resfriamento do ar condicionado.

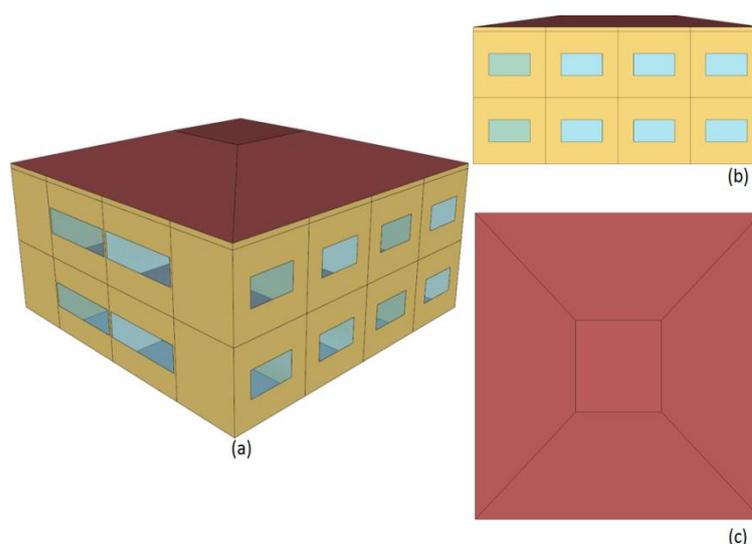


Figura 6.43 - Modelo de simulação para uma edificação típica residencial de baixa altura. (a) vista isométrica; (b) vista frontal; (c) vista de topo.

Este tipo de edificação possui um perfil de uso bem diferente das edificações anteriores, com os sistemas e a ocupação ocorrendo nos turnos opostos ao perfil comercial das análises anteriores. Como medidas de eficiência energética, para uma edificação do tipo residencial, destaca-se o aquecimento de água por meio de coletores solares, reduzindo demanda de energia para vencer um determinado diferencial de temperatura além da termoacumulação em reservatórios, e sistemas de climatização com maior eficiência possível.

Atuar sobre cargas de tomadas e iluminação, dentro dos requisitos funcionais, de aparência e principalmente conforto de cada pessoa, torna-se inviável.

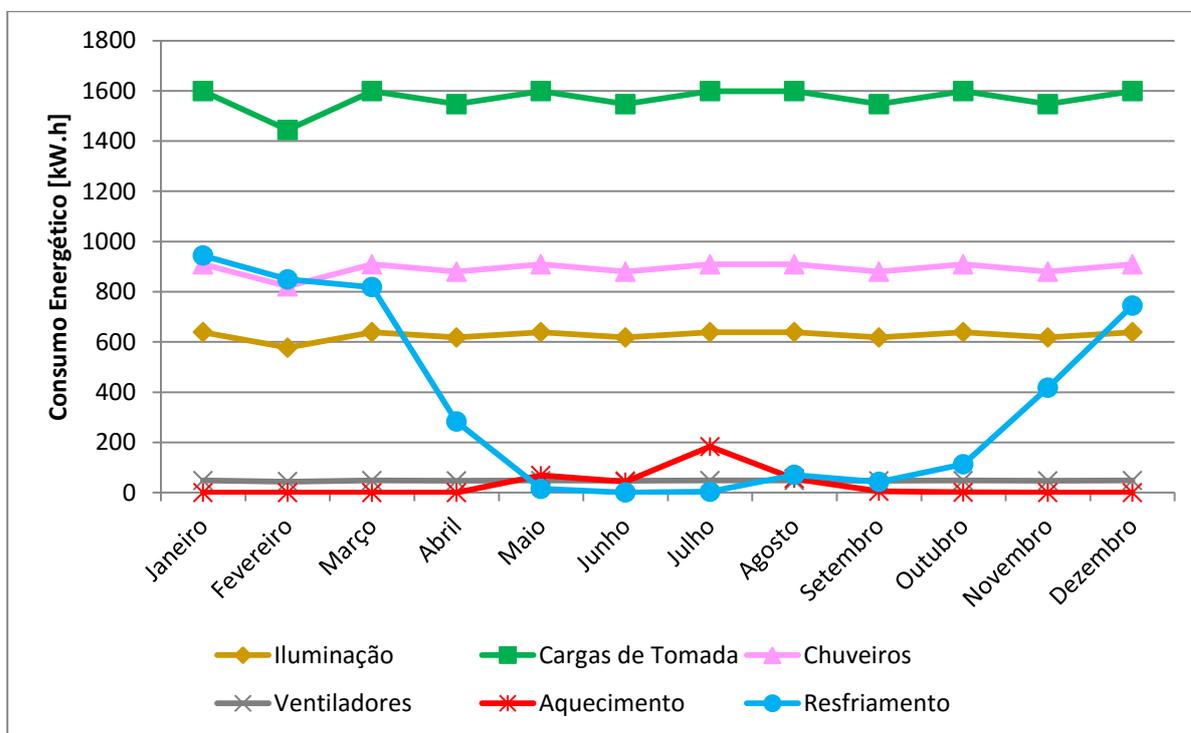


Figura 6.44 - Consumo energético anual para uma edificação típica residencial de baixa altura.

O gráfico da Figura 6.45 mostra o balanço de energia para o consumo total predial ao longo de 1 ano. Mostra, também, a baixa representatividade do consumo energético referente as áreas condominiais, neste caso, somente a iluminação dos corredores internos de uso comum. Verifica-se que uma instalação fotovoltaica que ocupe 40% da área de cobertura consegue representar, aproximadamente, 37% do consumo energético anual. Já uma instalação que ocupe 70% da área de cobertura consegue representar aproximadamente 65% do consumo energético anual. Visto que a produção de energia é bem superior ao que representam os custos condominiais, pode-se pensar em uma instalação menor que atenda somente a demanda de energia das áreas comuns.

Com os indicadores de sombreamento, irradiação solar e balanço de energia, é importante ressaltar o potencial de aproveitamento e produção de energia para as edificações de baixo porte com perfil de uso residencial. Comenta-se, ainda que, o planejamento urbano para este bairro contribuiu para a menor projeção de sombreamentos de uma edificação para a outra, o que minimiza futuras perdas de geração e beneficia o retorno de investimento.

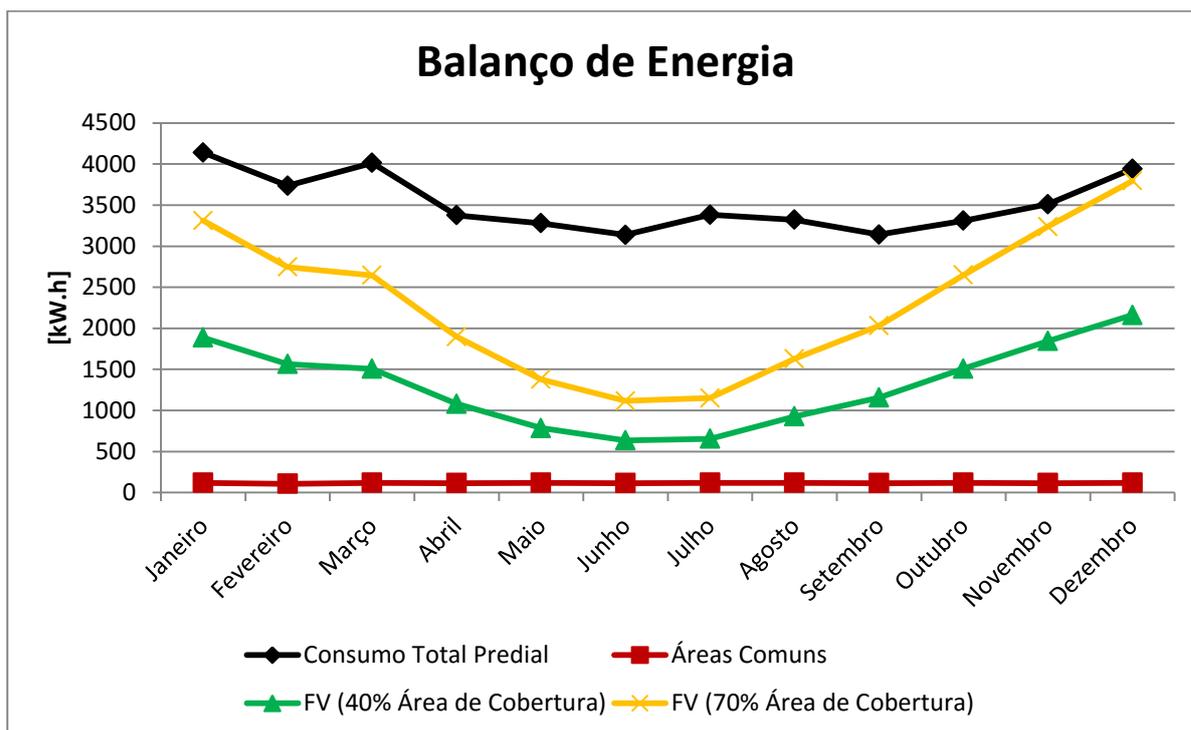


Figura 6.45 - Balanço de energia para edificação típica residencial de baixa altura.

Tabela 6.14 - Detalhamento do balanço de energia para a edificação típica residencial de baixa altura.

| | Consumo Total Predial | Consumo Áreas Condominiais | Produção de Energia (FV-40% Área) | Produção de Energia (FV-70% Área) |
|----------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Energia [kW.h] | 42288,85 | 1401,6 | 15714,36 | 27589,71 |
| % do Total | 100,0% | 3,3% | 37,2% | 65,2% |

6.4.4 Simulação de uma Edificação Típica Residencial.

A Figura 6.46 ilustra o modelo geométrico tridimensional desenvolvido para uma edificação típica residencial, referente a região do bairro Santana.

Comparativamente, este modelo possui as mesmas características do residencial de baixa altura, somente um fator de escala, na área de projeção de acordo com a média para esta tipologia. Além disto, o número de ambientes climatizados também é maior que na edificação de baixa altura. Demais informações e diferenças entre os modelos de simulação são possíveis encontrar no Apêndice D. As Figuras 6.47 e 6.48 demonstram o consumo energético em escala anual e o balanço de energia proposto para uma instalação fotovoltaica nesta edificação. O maior consumo ocorre através das cargas de tomada. Após, verifica-se o

consumo dos chuveiros (aquecimento de água), iluminação dos espaços internos e o elevador, como mostra a Figura 6.47.

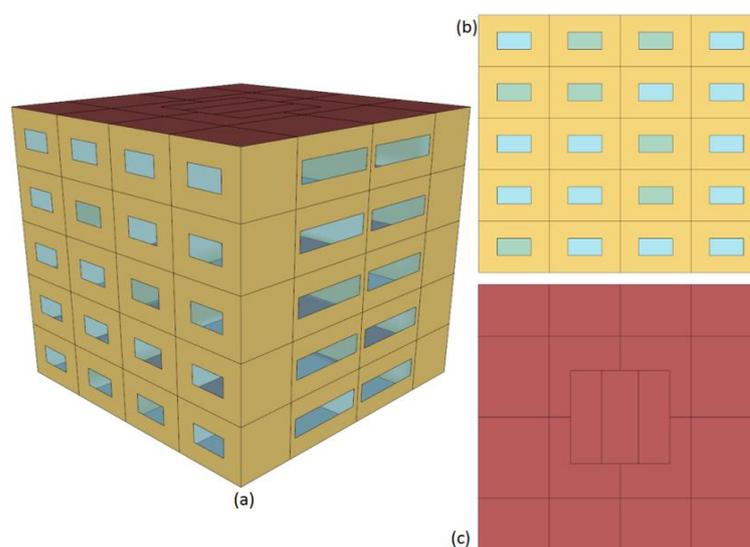


Figura 6.46 - Modelo de simulação para uma edificação típica residencial. (a) vista isométrica; (b) vista frontal; (c) vista de topo.

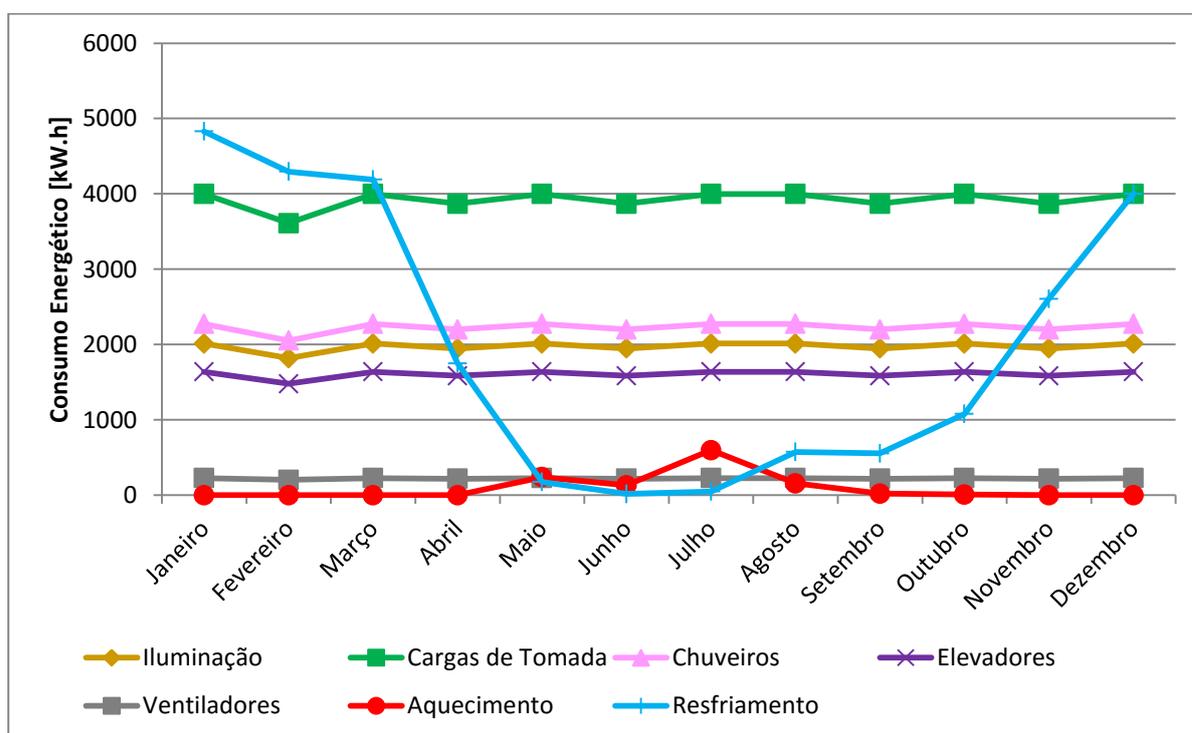


Figura 6.47 - Consumo energético anual para uma edificação típica residencial

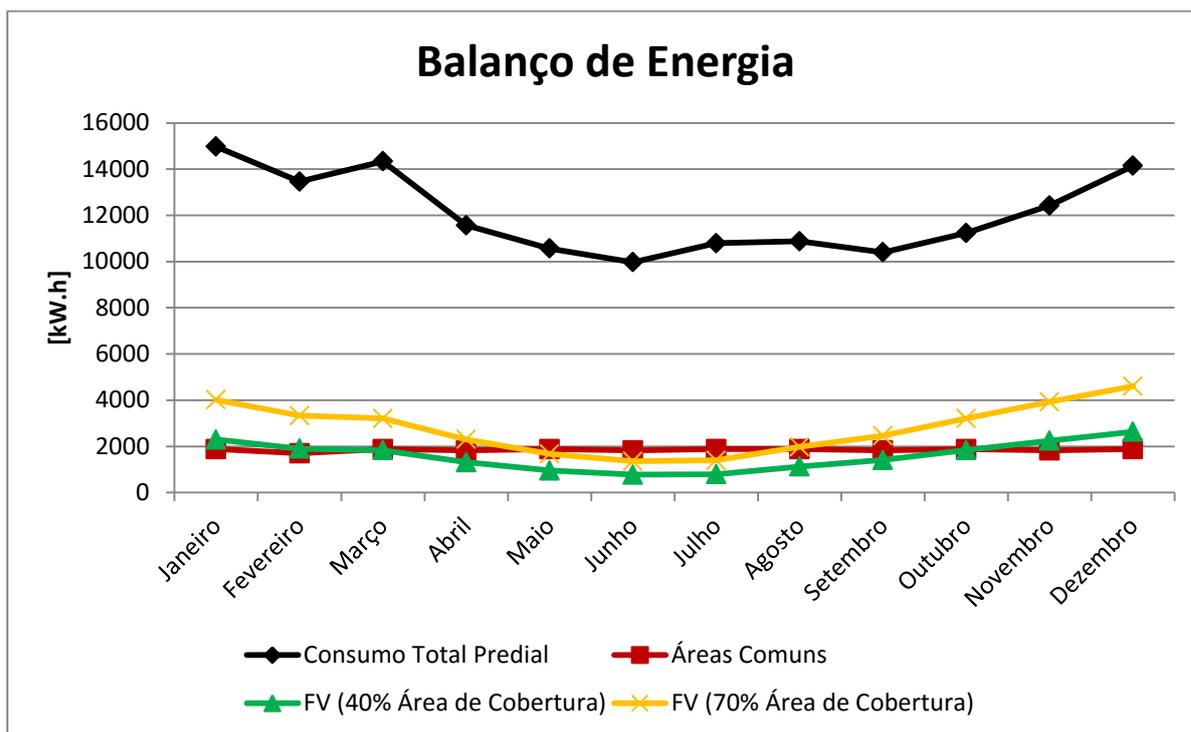


Figura 6.48 - Balanço de energia para edificação típica residencial.

As medidas de eficiência energética para este perfil de edificação e uso podem ser as mesmas da tipologia residencial de baixa altura, entretanto, agora a relação de unidades consumidoras aumentou com relação a área de projeção da edificação, aumentando a necessidade por coletores solares para aquecimento de água.

O gráfico da Figura 6.48 indica que o consumo de áreas condominiais desta edificação (iluminação e elevadores) poderá ser totalmente suprido por um sistema fotovoltaico que ocupe entre 40-70% da área de cobertura desta edificação típica. A representatividade de um sistema fotovoltaico, para o quanto é consumido de energia, não é tão favorável por causa da maior relação de consumo de energia devido ao maior número de pavimentos da edificação.

Algumas edificações possuem grandes áreas de cobertura/telhado e quase nenhuma projeção significativa de sombreamento. Isto favorece o investimento para uma instalação fotovoltaica que reduza os custos condominiais do rateio entre os ocupantes, uma vez que, atender todo o consumo da edificação torna-se um investimento de maior porte e sem sentido se antes, não houvessem medidas de eficiência energética para reduzir a demanda de energia elétrica da rede e que favoreça o balanço de energia. A Tabela 6.15 resume o balanço de energia entre o consumo e a produção através de sistemas fotovoltaicos.

Apesar do crescimento desordenado dos bairros mais antigos da cidade, a região do bairro Santana apresenta um bom potencial de instalação e produção de energia e, para uma

edificação média típica, a relação de balanço de energia pode ser de até 24% do total e 100% de atendimento com relação às áreas condominiais. Esta pode ser uma estratégia para os condomínios reduzirem seus custos energéticos, incentivar a conceitos de eficiência energética para os ocupantes e reduzir a demanda da rede elétrica.

Tabela 6.15 - Detalhamento dos valores do balanço de energia para a edificação típica residencial.

| | Consumo Total Predial | Consumo Áreas Condominiais | Produção de Energia (FV-40% Área) | Produção de Energia (FV-70% Área) |
|----------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Energia [kW.h] | 144765,87 | 22160,52 | 19117,09 | 33435,45 |
| % do Total | 100,0% | 15,3% | 13,2% | 23,1% |

6.5 Fluxo de Caixa para Sistemas Fotovoltaicos das Edificações Típicas

Atualmente, os custos de instalação podem variar dependendo da capacidade de instalação (potência nominal) e do tipo de instalação, ou seja, será atendido um consumo residencial, industrial ou comercial. Assim sendo, cada edificação típica terá um retorno de investimento, sobre uma instalação fotovoltaica, em um determinado período. Considerando somente o investimento inicial e os custos energéticos evitados com a utilização de sistemas fotovoltaicos, o gráfico da Figura 6.49 ilustra os fluxos de caixa em cada edificação típica simulada.

Verifica-se para a região do bairro São Geraldo, tipicamente de galpões, retorno sobre o investimento em 8,6 anos, valor de mercado para esta aplicação. Isto ocorre devido aos menores valores praticados, no mercado, para instalações nestas tipologias de edificação e consumo energético. Além da maior disponibilidade de áreas de cobertura e poucas projeções de sombreamentos, verifica-se o maior potencial de instalação nestas regiões. Na sequência, edificações comerciais em 10,6 anos. Neste caso, comenta-se também a relação entre a área de projeção da edificação, com relação ao volume total (diversos pavimentos), o que dificulta e muito um balanço de energia positivo. Após, as tipologias residenciais, com aproximadamente 11,7 anos. Tendo em vista a forte variação tanto dos valores do equipamentos fotovoltaicos (para menos) quanto das tarifas de distribuição de energia elétrica (para mais), os resultados das análises de investimento podem ser considerados conservadores.

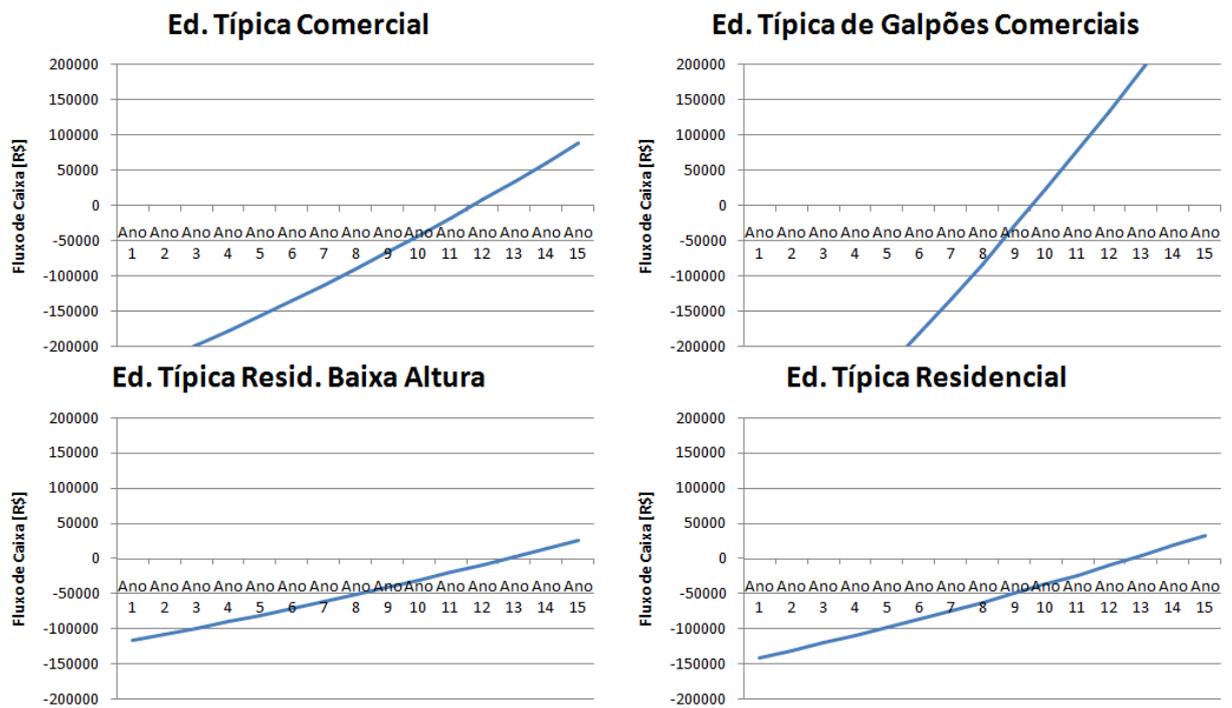


Figura 6.49 - Fluxo de caixa ao longo de um período de 15 anos.

7 CONCLUSÕES

A cidade de Porto Alegre possui grandes edificações, regiões de grande densidade de ocupação e trânsito de pessoas, regiões comerciais, industriais, regiões com centros logísticos para escoamento de produtos e mercadorias, grandes conjuntos e bairros residenciais e, para tudo isto funcionar, é necessária energia elétrica. São necessárias linhas de transmissão, uma subestação para a região e ligação com a concessionária local. Desde a produção, em grandes hidrelétricas, termelétricas ou demais usinas de geração de energia elétrica até o consumidor final, também ocorrem muitas perdas de transmissão e conseqüentemente recursos desperdiçados. Todas as análises apresentadas e a discussão dos resultados apontam para o caminho da descentralização da geração de energia elétrica. Verifica-se potencial viabilidade da instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede nas coberturas das edificações, fazendo parte do sistema de compensação de energia proposto pela ANEEL. Estimando a vida útil dos equipamentos em 30 anos, foram estimados retorno sobre investimento na faixa de 9 e 12 anos, no meio urbano e para diferentes tipologias. Este resultado é animador perante as constantes elevações nos preços das tarifas energéticas e, atualmente, mudança de cultura e mentalidade das pessoas, visando a eficiência e energética e dos recursos naturais. Ainda, verifica-se que a geração de mapas solares, trazendo diversas informações sobre estimativa de irradiação solar, efeitos de sombreamentos, capacidade de instalação e produção de energia pode ser, no futuro, uma excelente alternativa para as cidades e seus cidadãos terem conhecimento do seu potencial de acesso a energia solar e prever um futuro investimento nesta tecnologia, assim como já está disponível em diversas cidades ao redor do mundo e que também já faz parte das políticas de eficiência energética, meio ambiente, desenvolvimento tecnológico e de mercado em muitos países.

Ao longo desta pesquisa, foram estudadas quatro tipologias de edificações e bairros que, na grande maioria, representam as construções e o perfil urbanístico mais comum da cidade de Porto Alegre. Ainda, a criação de mapas solares em ambiente urbano comprova, mesmo que através de uma metodologia adaptada dos demais, ser de grande valor para avaliar a irradiação solar incidentes nos telhados e coberturas, os efeitos de sombreamento em uma escala de múltiplas superfícies e obstáculos. A abordagem visual de interpretação dos resultados, juntamente com diversas informações técnicas e de fácil acesso, é uma forma inclusiva de atingir a todos os públicos e uma das grandes vantagens e premissa dos sistemas de informação geográfica (GIS). O modelamento geométrico 3D de cidades pode servir de

metodologia para diversas áreas de estudos sobre os fenômenos que ocorrem em um meio urbano, provando ser uma excelente ferramenta.

Verifica-se que o levantamento topográfico de superfícies por escaneamento a laser aerotransportado (LiDAR) pode facilitar e tornar muito mais confiável o modelamento tridimensional das edificações, árvores e superfícies do entorno, entretanto, a criação de modelos geométricos através dos mapas das cidades já concebidos e elencando todas as hipóteses e premissas de estudo, também pode ser uma maneira eficaz e academicamente viável de realizar estes estudos, sem o dispêndio financeiro em equipamentos e infraestrutura de medição em escala urbana.

O software Vasari, pelo menos em sua aplicação para Porto Alegre, subestima a irradiação solar disponível, levando a erros da ordem de 23% para valores anuais e da ordem de 37% para um período de inverno. Constatou-se que o índice de cobertura de nuvens, modelos de nebulosidade, utilizado no mecanismo de cálculo do software deve estar influenciando de forma equivocada na estimativa de irradiação. Esta constatação levou a uma falta de confiabilidade nos resultados do mesmo, fazendo com que sua aplicação nesta dissertação ficasse restrita a apresentações infográficas depois de uma correção de proporcionalidade.

O software Vasari, pelo envolvimento com dados construtivos em 3D e pela consideração de efeitos de sombreamento, constitui uma ferramenta adequada para individualizar os resultados por edificação, não fossem os erros comentados anteriormente. Uma solução mais efetiva para viabilizar sua utilização deverá ser implementada no futuro para aperfeiçoar os resultados aqui apresentados. Dada esta limitação, os valores referentes a produção de energia em cada edificação são indicativos para uma condição de não-sombreamento, ou seja, o máximo possível sem perdas.

A simulação termoenergética de edificações vem ganhando muito espaço atualmente, principalmente nas fases iniciais do desenvolvimento dos projetos de edificações. Aliado aos programas internacionais de certificação ambiental e de sustentabilidade, torna-se uma excelente ferramenta para previsão de consumo e custos energéticos. Para o presente trabalho, auxiliou no entendimento e previsão de consumos energéticos e os custos associados para as quatro tipologias, simulou ao longo de um ano a operação de um sistema fotovoltaico e ainda realizou o balanço de energia e investimento em módulos fotovoltaicos, podendo estabelecer cenários de investimento para toda a edificação ou somente para áreas condominiais, por exemplo.

O balanço de energia que se propôs pode ser de grande valia para os moradores, ocupantes ou operadores das edificações no que diz respeito à análise de investimento em sistemas fotovoltaicos. Com isto procura-se reduzir os custos energéticos associados a algum tipo de uso final ou sobre o consumo total predial. Ainda, serve como parâmetro também para investimentos em infraestrutura da concessionária local de energia elétrica (CEEE), racionalizando o investimento e/ou aplicando programas de incentivo a microgeração em determinadas localidades onde a geração de energia fotovoltaica pode suprir grande parte da demanda de energia elétrica, por exemplo. Dependendo da edificação cada tipo de consumo energético poderá ter maior ou menor representatividade e, desta forma, pode-se avaliar se um sistema fotovoltaico, mesmo que não seja capaz de suprir todo o consumo energético, pelo menos possa ser capaz de "zerar" algum tipo de uso final, como estratégia de eficiência energética para as edificações e criação de políticas locais de consumo inteligente.

Da análise realizada, considerando a hipótese de 40% de área disponível para instalações fotovoltaicas e as premissas de cálculo elencadas, conclui-se que para edificações típicas nos Bairros analisados, Centro Histórico, São Geraldo, São Sebastião e Santana, o potencial de produção de eletricidade fotovoltaica permite suprir proporções de 8%, 116%, 37% e 13% respectivamente. Na consideração de 70% de área de instalação, estas proporções sobem para 15%, 200%, 65% e 23% respectivamente.

Ressalta-se ainda que as cidades e seus Planos Diretores devem prever, para os próximos anos, a possibilidade de geração distribuída. Uma vez que o retrato dos bairros e suas construções podem mudar ao longo do tempo, a garantia de uniformidade de altura das edificações é uma variável de peso quando se trata de um investimento para sistemas fotovoltaicos e a possibilidade de sombreamentos do entorno.

Apesar de ainda reduzida, a utilização desta tecnologia aplicada ou integrada às edificações poderá ter um crescimento mais acentuado nos próximos anos. Os cenários de escassez de recursos naturais, crise econômica e aumento de tarifas de energia atuais, favorecem a diversificação das fontes energéticas, busca por novas e mais eficientes tecnologias e que não possuam características de agressão ao meio ambiente. Os sistemas fotovoltaicos juntam todas estas características e a sua popularização, em meios urbanos, depende de trabalhos que possuam fácil acesso e interpretação. A confecção de mapas solares mostrou resultados em algumas cidades e faz parte das políticas energéticas em outras. No Brasil, muitas tecnologias ainda estão em desenvolvimento e o poder público já está em sintonia com a atualização de seus mapas urbanos, até mesmo por medições a laser. Através

destes novos mapas, muitas novas ferramentas poderão ser desenvolvidas, principalmente, a criação e disponibilização de mapas solares em escala urbana.

7.1 Limitações do Trabalho

Através das pesquisas realizadas e desenvolvimento deste trabalho, algumas dificuldades foram encontradas, principalmente sobre um levantamento atualizado dos mapas (planialtimétrico) da cidade de Porto Alegre. A criação dos mapas das regiões foi baseada em levantamentos urbanos da década de 80, compatibilizados com os mapas atuais disponíveis online. Ainda, algumas premissas de cálculo e hipóteses de simplificação de geometrias foram utilizadas para vencer as barreiras de modelamento geométrico tridimensional de edificações. Não contabilizar possíveis peitoris, casas de máquinas de elevadores, reservatórios, caixas de água e chaminés, por exemplo, tem como consequência superestimar o possível potencial e acesso a irradiação solar, além de não contabilizar possíveis projeções de sombreamentos indesejados. A escolha por simular todos os telhados planos foi uma das hipóteses utilizadas e que já foi vista em outros modelos de mapas solares urbanos.

A utilização de arquivos climáticos virtuais, disponíveis pelo software da Autodesk, ocasionou uma pesquisa paralela sobre os arquivos climáticos atualmente disponíveis para a cidade de Porto Alegre. Ainda, seria necessária uma melhor verificação das simulações em meio urbano com arquivos climáticos já estabelecidos e aceitos atualmente, conforme considerações sobre as limitações do software.

Atualmente, os estudos sobre integração ou aplicação fotovoltaica em edificações dentro do contexto urbano, utilizam como cenário uma escala menor e, normalmente, estudos de caso. Não foi encontrado um mapa solar urbano, para Porto Alegre, com premissas e metodologia de cálculo descrita, assim como foi encontrado e descrito na revisão bibliográfica do presente trabalho para outras localidades. Não existem modelos geométricos para estimativas do acesso solar de telhados urbanos em Porto Alegre. Os modelos termoenergéticos das edificações procuraram estabelecer uma referência para o consumo energético de uma determinada edificação. No Brasil não existe uma referência ou um estudo consolidado sobre o consumo médio de cada tipo de edificação e quais seus usos finais mais representativos. A quantidade de variáveis envolvidas e a sensibilidade de alguns parâmetros faz com que este tipo de análise deva sempre estar alinhado com algumas referências. Para isto, a grande maioria dos dados de entrada dos modelos de simulação foi baseado em

normas, códigos e padrões internacionais de cálculo e de eficiência energética em edificações, tudo para estimar o comportamento médio energético para uma edificação referência.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

A iniciativa de documentar uma metodologia alternativa à criação dos mapas solares em meio urbano, atualmente desenvolvidos, contribui e incentiva novos estudos sobre o caso. A continuidade de criação de modelos geométricos tridimensionais para mais regiões da cidade e/ou somente para certas edificações de grande área de cobertura pode ser uma nova alternativa e verificação de estimativa de potencial de instalação e produção de energia através de sistemas fotovoltaicos.

No aspecto arquitetônico e de planejamento as cidades, sugere-se uma revisão bibliográfica dos modelos da forma urbana e como as cidades estão sendo planejadas para o futuro. Como planejar futuras instalações fotovoltaicas se a cidade, bairros e edificações podem mudar, crescer, e afetar o desempenho de instalações fotovoltaicas previamente instaladas e em operação? Discussões sobre o Plano Diretor das cidades deverão levar em consideração a micro e mini geração distribuída também. Ainda, estudos comparando áreas homogêneas e heterogêneas na cidade, em função da forma das edificações ou dos bairros, para a instalação de usinas fotovoltaicas urbanas e como isto poderá guiar o crescimento das cidades, tanto para habitação e serviços como para o crescimento e desenvolvimento da matriz energética.

A disponibilização futura de dados consolidados, nuvem de pontos escaneados por laser (LiDAR), pode ser um novo incentivo à criação de mapas solares para a cidade de Porto Alegre. Sugere-se, para o futuro, a utilização dos dados do mapeamento digital de Porto Alegre, e o modelamento tridimensional da cidade, para a criação destes mapas solares. Ainda, o desenvolvimento de capacitação em softwares de modelamento geométrico de edificações, seja para simulações termoenergéticas ou para *Building Information Modeling*, além do crescimento de *Geographic Information Systems*, são tendências nos mercados de arquitetura, engenharia, geografia e até mesmo política e, portanto, são ferramentas que auxiliam no aperfeiçoamento das informações e capacidades dos mapas solares atualmente disponíveis, podendo apresentar novos cenários e metodologias de investimento para a integração de sistemas fotovoltaicos nas edificações.

Sugere-se, também, que a metodologia descrita neste trabalho possa ser aplicada a alguma outra cidade ou até mesmo a uma cidade de menor porte, a fim de avaliar o potencial

para estimativa do mapa solar completo em um meio urbano, verificando novas dificuldades e possíveis limitações que até o momento não foram enfrentadas ou relegadas por premissas e/ou hipóteses da metodologia.

Comenta-se também que o desenvolvimento dessas ferramentas para a análise solar em meios urbanos vem crescendo e ganhando espaço no meio acadêmico. O SimmLab (Laboratório para Simulação e Modelagem em Arquitetura e Urbanismo) da UFRGS vem desenvolvendo softwares para aplicação GIS, potenciais construtivos de lotes urbanos, efeitos espaciais e de processamento de imagens para o espaço urbano. Dessa forma, pode-se juntar as análises de potencial solar com as análises e regras do Plano Diretor da cidade de Porto Alegre para uma melhor análise de instalação de usinas fotovoltaicas urbanas.

Sugere-se, ainda, que sejam melhor avaliados os dados climáticos disponibilizados pelo arquivo climático do software. Neste trabalho fez-se uso de uma correção, entretanto, é necessária uma melhor avaliação destes dados climáticos e utilização sem correções.

Também é possível repetir as simulações propostas, considerando todos ângulos de inclinação e de azimute dos telhados das edificações, a fim de simular as superfícies e suas áreas reais, não somente de projeção, e também não foram avaliadas a disponibilidade de radiação solar das fachadas das edificações. Ainda, não foram contabilizados os volumes técnicos nas coberturas das edificações (como casas de máquinas, reservatórios e chaminés). São estruturas que ocupam parte das áreas de telhados e coberturas realizando possíveis sombreamentos e, desta forma, diminuindo o potencial de acesso à radiação solar.

Modelos para a previsão de consumo energético e custos associados, através de simulações termoenergéticas, podem ser revisados para uma melhor avaliação do percentual de instalações fotovoltaicas que representem algum uso final de energia relacionado, por exemplo: uma instalação fotovoltaica produz energia que representa todo o consumo energético das áreas condominiais de uma edificação, ou, todo o consumo e custo associado ao sistema de iluminação de um galpão comercial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ABNT NBR 5460. **Sistemas Elétricos de Potência**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1992.

ALMEIDA, M. P. **Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. Dissertação de Mestrado. USP. 2012

ASHRAE. **Standard 140-2001 - Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 2001.

ASHRAE. **Standard 90.1-2007 - Energy Standard for Buildings except Low-Rise Residential Buildings**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 2007.

ASTM. **ASTM E490 Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables**. American Society for Testing and Materials. 2014.

ASTM. **ASTM G-173-03 Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface**. American Society for Testing and Materials. 2014.

BARBOSA, E. M. S., CANDEIAS, A. L., TIBA, C., VILELA, O. C. **Metodologia de Avaliação do Potencial de Sistemas Fotovoltaicos Conectado à Rede em Centros Urbanos**. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 14. 2010.

BEN 2014. **Balanco Energético Nacional 2014 - Ano Base 2013**. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. 2014.

BERS - **Balanco Energético do Estado do Rio Grande do Sul. Ano Base 2013**. 2014.

BIM. **National Building Information Modeling Standard**. Disponível em: <http://www.nationalbimstandard.org/committees.php>. Acesso em Novembro de 2014.

BPA. **Autodesk Building Performance Analysis** (GreenBuildingStudio). <https://gbs.autodesk.com/GBS/>. Acesso em Novembro de 2014.

BRAUN-GRABOLLE, P. A **Integração de Sistemas Solares Fotovoltaicos em Larga Escala no Sistema Elétrico de Distribuição Urbana**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. 2010.

BRITO, M. C., GOMES, N., SANTOS, T., TENEDÓRIO, J.A. **Photovoltaic Potential in a Lisbon Suburb using LiDAR Data**. Solar Energy 86 (1), 283–288. 2012.

C40 CITIES. **City Climate Leadership Awards**. Disponível em: www.cityclimateleadershipawards.com. Acesso em Maio 2014.

CAMERON, C. P., BOYSON, W. E., RILEY, D. M. **Comparison of PV System Performance-Model Predictions with Measured PV System Performance**. Photovoltaic Specialists Conference, San Diego. 2008.

CEEE. **Tabela de Tarifas e Custos de Serviços (Vigente a partir de 08/12/2014)**. Companhia Estadual de Energia Elétrica. 2015.

CEPEL-CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. 2014.

CHOI, Y., RAYL, J., TAMMINEEDI, C., BROWNSON, J.R.S. **PV Analyst: Coupling ArcGIS with TRNSYS to Assess Distributed Photovoltaic Potential in Urban Areas**. Solar Energy 85 (11), 2924–2939. 2011.

DGS. **Planning and Installing Photovoltaic Systems: a Guide for Installers, Architects and Engineers**. 2ª Ed. Berlim Earthscan. 2008.

DOE. **U.S. Department of Energy**. <http://energy.gov/eere/articles/energyplus-boosts-building-efficiency-help-autodesk>. Acesso em Novembro 2013.

ENERGYPLUS. **Engineering Reference: The Reference for EnergyPlus Calculations**. U.S. Department of Energy. 2014.

ENERGYPLUS. **Input Output Reference**. U.S. Department of Energy. 2014.

EPE. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. 2012.

EPIA. **Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018**. European Photovoltaic Industry Association. 2014.

ESRI Map Book. Disponível em: <http://media.esri.com/mapbook/volume24/index.html>. Acesso em Outubro 2014.

FREIRE, L. B. C. **Método Para Levantamento do Potencial Energético Solar em Campus Universitário**. Universidade Federal do Paraná - UFPR. 2013.

GBC Brasil. **Greenbuilding Council Brasil**. www.gbcbrasil.org.br. Acesso em Setembro de 2014.

GOOGLE. **Google Imagens**. Pesquisa por imagens na internet. Disponível em: <http://www.google.com.br>. Acesso em Janeiro 2015.

GOOGLE. **Google Sketchup**. Disponível em: <http://www.sketchup.com/pt-BR/products/sketchup-pro>.

IBGE. **Censo Demográfico 2010: Características da População e dos Domicílios - Resultados do Universo**. Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. Rio de Janeiro. 2010.

JAKUBIEC, J.A.; REINHART, C.F. **A Method for Predicting City-Wide Electricity Gains From Photovoltaic Panels Based on LiDAR and GIS Data Combined with Hourly Daysim Simulations**. Solar Energy 93, 127–143. 2013.

JARDIM, C. S.. **A Inserção da Geração Solar Fotovoltaica em Alimentadores Urbanos Enfocando a Redução do Pico de Demanda Diurno**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. 2007.

JOCHEM A., HOFLE B., RUTZINGER M. **Extraction of Vertical Wall from Mobile Laser Scanning Data for Solar Potential Assessment**. *Remote Sensing* (3), 650-667. 2011.
JOCHEM A., HOFLE B., RUTZINGER M., PFEIFER N. **Automatic Roof Plane Detection and Analysis in Airbone Lidar Point Clouds for Solar Potential Assessment**. *Sensors* 2009 (9), 5241-5262. 2009.

KUROKAWA, K. **PV Systems in Urban Environment**. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, nº 67, p.629-637. 2001.

LUQUE, A., HEGEDUS, S. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**. 2º Ed. 2011.

MAPDWELL. **Mapdwell® Solar System™**. Disponível em: <http://www.mapdwell.com/en>. Acesso em: Agosto 2014.

MARDALJEVIC, J. **The Simulation of Annual Daylighting Profiles for Internal Illuminance**. *Lighting Research and Technology* 32 (3), 111– 118. 2000.

MARION, B., ANDERBERG, M., GEORGE, R., GRAY-HANN, P., HEIMILLER, D. **PVWATTS Version 2 - Enhanced Spatial Resolution for Calculating Grid-Connected PV Performance**. NREL - National Renewable Energy Laboratory. 2001.

MARKVART, T., CATAÑER, L. **Practical Handbook of Photovoltaics Fundamentals and Applications**. Elsevier. 984 p. 2003.

MARTINS, T. A. L. **De Condicionantes Solares à Oportunidades de Desenho Urbano: Otimização de Tipo-Morfologias Urbanas em Contexto de Clima Tropical**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. 2014.

MCT. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. Ministério de Ciência e Tecnologia. 2006.

MIT. **Massachusetts Institute of Technology - Sustainable Design Lab**. disponível em: <http://web.mit.edu/sustainabledesignlab/>. Acesso em: Outubro 2014.

NASA. **Cosmicopia**. National Aeronautics and Space Administration.. Disponível em: http://helios.gsfc.nasa.gov/qa_sun.html. Acesso em Agosto 2014.

NASA. **Imagine the Universe!**. National Aeronautics and Space Administration. Disponível em: <http://imagine.gsfc.nasa.gov.html>. Acesso em: Agosto 2014.

NBIMS-US. **National Building Information Model Standard**. Disponível em: <http://www.nationalbimstandard.org/>. Acesso em Janeiro 2015.

NEW YORK CITY SOLAR MAP. Disponível em: <http://www.nycsolarmap.com/>. Acessado em: Agosto 2014.

NGUYEN, H. T., PEARCE, J. M. **Estimating Potential Photovoltaic Yield With R.Sun and the Open Source Geographical Resources Analysis Support System.** Solar Energy 84 (5), 831–843. 2010.

NGUYEN, H. T., PEARCE, J. M. **Incorporating Shading Losses in Solar Photovoltaic Potential Assessment at the Municipal Scale.** Solar Energy 86 (5), 1245–1260. 2012.

NORDPIL. **Nordpil World Database of Large Urban Areas, 1950-2050.** Disponível em: <http://nordpil.com/go/resources/world-database-of-large-cities/>. 2007. Acesso em: Setembro de 2014.

PEIXOTO, E.B.A.; TAVARES, M. **Relatório Final da Execução da Cobertura Laser. Curitiba: Consórcio Guaíba.** 114p. 2012.

PERAZA, D. G. **Estudo de Viabilidade da Instalação de Usinas Solares Fotovoltaicas no Estado do Rio Grande do Sul.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. 2013.

PEREZ, R., INEICHEN, P., SEALS, R., MICHALSKY, J., STEWART, R. **Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance.** Solar Energy, Vol. 44, N°. 5, p271-289. 1990.

PEREZ, R., SEALS, R., MICHALSKY, J. **All-Weather Model for Sky Luminance Distribution — Preliminary Configuration and Validation.** Solar Energy 50 (3), 235–245. 1993.

PEREZ, R.; INEICHEN, P.; SEALS, R.; MICHALSKY, J.; STEWART, R. **Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance.** Solar Energy, 44(5), pp. 271-289. 1990.

PORTAL SOLAR. www.portalsolar.com.br/quanto-custa-a-energia-solar-fotovoltaica.html. Acessado em: Março 2015.

PMPA. **Prefeitura de Porto Alegre.** disponível em: <http://www2.portoalegre.rs.gov.br>. Acesso em Outubro 2014.

PRODIST. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Módulo 1.** 2011.

REINHART, C. F., WALKENHORST, O. **Validation of Dynamic RADIANCE-based Daylight Simulations for a Test Office with External Blinds.** Energy and Buildings 33 (7), 683–697. 2001.

REVIT. **Autodesk Revit.** Disponível em: <http://www.autodesk.com.br/products/revit-family/overview>. Acesso em Abril de 2014.

RODRIGUES, C. **Mecanismos Regulatórios, Tarifários e Econômicos na Geração Distribuída: O Caso dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

SODA. **Solar Radiation Data**. Disponível em: http://www.soda-is.com/eng/map/maps_for_free.html. Acessado em: Agosto 2014.

SOLARATLAS BERLIN. Disponível em: <http://www.businesslocationcenter.de/wab/maps/solaratlas/>. Acesso em Julho 2014.

SRHE. **Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos de Pernambuco**. http://www.srhe.pe.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=501:pernambuco-tera-todo-seu-territorio-mapeado-a-laser&catid=40:newsflash&Itemid=72. Acessado em: Fevereiro 2015.

SÚRI, M., HOFIERKA, J. **A New GIS-Based Solar Radiation Model and its Application to Photovoltaic Assessments**. Transactions in GIS 8 (2), 175–190. 2004.

SÚRI, M., HULD, T.A., DUNLOP, E.D. **PV-GIS: A Web-Based Solar Radiation Database for the Calculation of PV Potential in Europe**. International Journal of Sustainable Energy 24 (2), 55–67. 2005.

TAKENAKA, F. O. **Avaliação do Potencial de Geração de Energia Solar Fotovoltaica na Cobertura das Edificações do Campus I - CEFET-MG, Interligado à Rede Elétrica**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. 2010.

TORRES, R. G. **Projeto de um Prédio de Energia Líquida Zero (PELZ) com Foco nos Sistemas**. Trabalho de Conclusão de Curso. DEMEC-UFRGS. 2011.

USGBC. **Leadership in Energy and Environmental Design**. United States GreenBuilding Council. www.usgbc.org. 2014.

VANNINI, V. C. **Otimização da Forma para Captação da Radiação Solar sobre Superfícies de Edifícios: Um Exercício de Integração entre os Programas Rhinoceros e Ecotect**. Dissertação de Mestrado. PROPAR-UFRGS. 2011.

VASARI. **Autodesk Vasari**. Disponível em: <http://autodeskvasari.com/>. Acesso em Abril 2014.

WWF. **World Wide Fund for Nature**. Disponível em: www.wwf.org.br. Acesso em: Novembro 2014.

ZANARDI, R.P., SCHNEIDER, A. H., SALOMONI, T. R., SALOMONI, C. S., REISS, M. L. L. **Validação da Qualidade do Perfilamento a LASER Aerotransportado da Cidade de Porto Alegre**. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR INPE. p.6178-6184. 2013.

ZANDONÁ, D. F.; LINGNAU, C.; MULLER, M.; MARTINS, M. A. R. **Avaliação da Precisão Altimétrica do Mapeamento Digital a Laser em Áreas de Cobertura Vegetal Densa**. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. INPE. 2005.

APÊNDICE A – Mapas Urbanos das Regiões Seleccionadas

O desenvolvimento dos modelos geométricos tridimensionais foram possíveis, primeiramente, através da criação de mapas urbanos das regiões seleccionadas. Através do software Autodesk Autocad 2014 e da compatibilização de áreas e imagens do Google Earth e Google Maps, foram criados os seguintes mapas, ilustrados nas Figuras A.1, A.2, A.3 e A.4, representando: Centro Histórico, São Geraldo, São Sebastião e Santana, respectivamente (os mapas serão apresentados fora de escala).

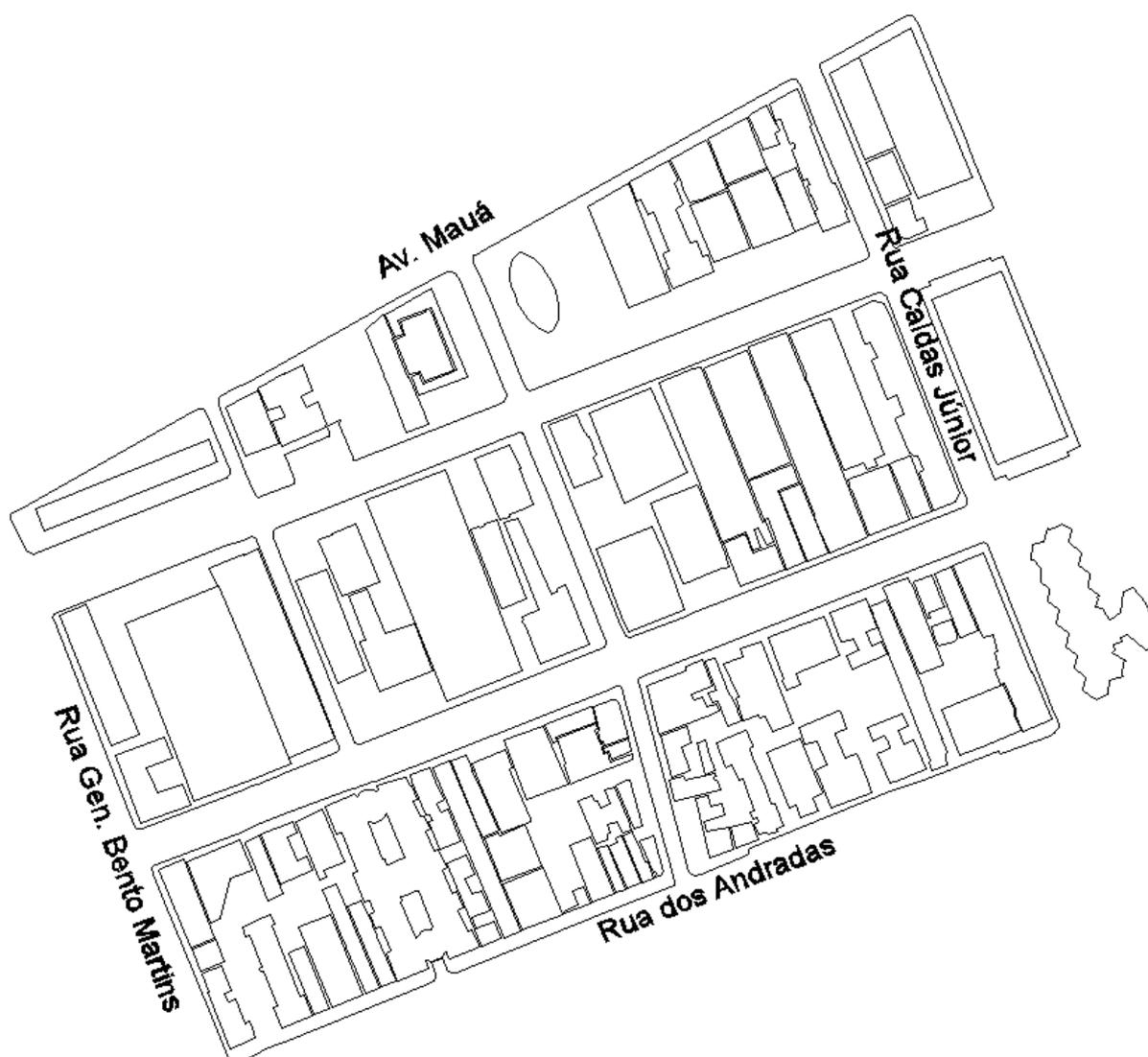


Figura A1 - Mapa desenvolvido para a região do Centro Histórico.

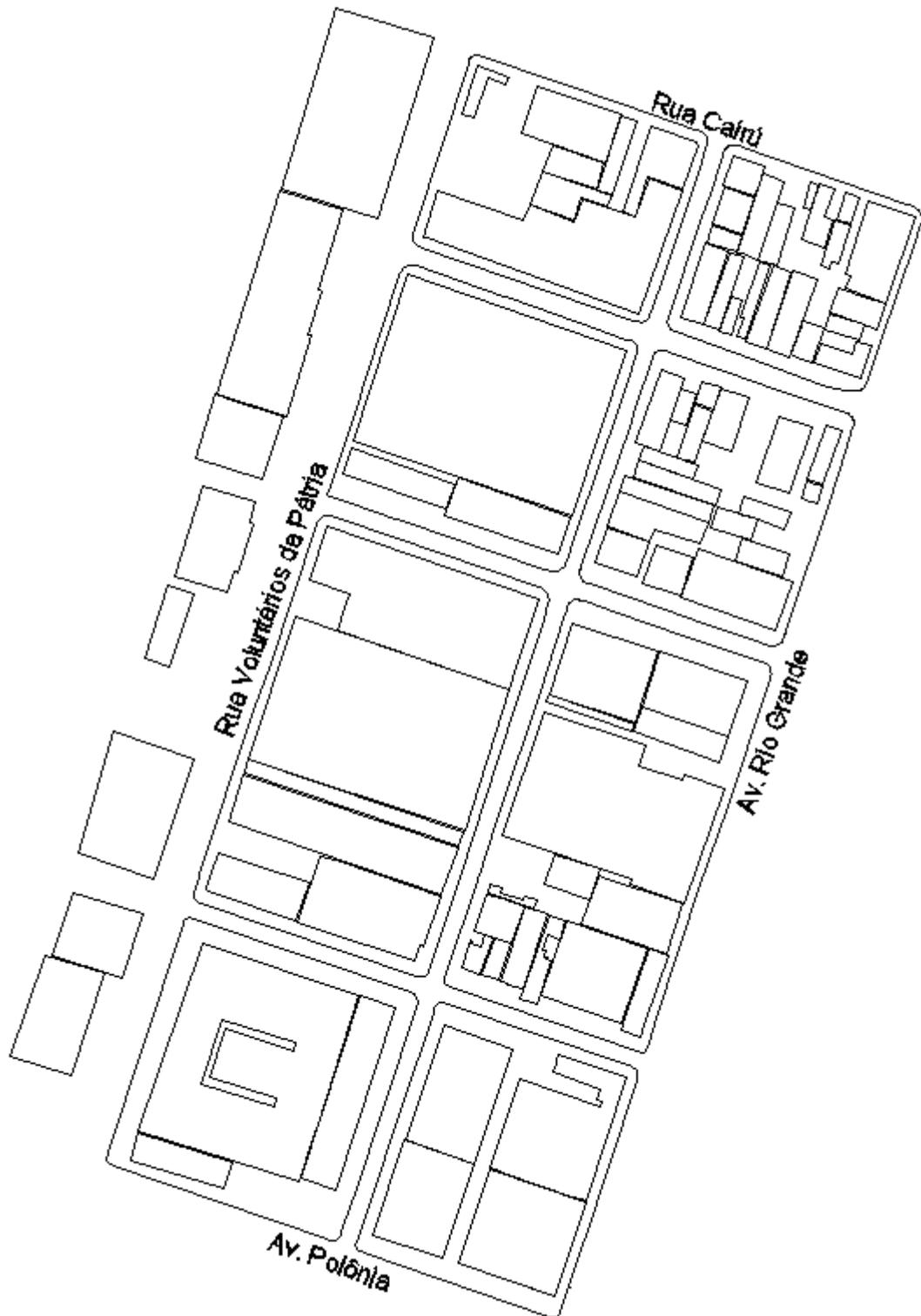


Figura A2 - Mapa desenvolvido para a região do São Geraldo.



Figura A3 - Mapa desenvolvido para a região do São Sebastião.

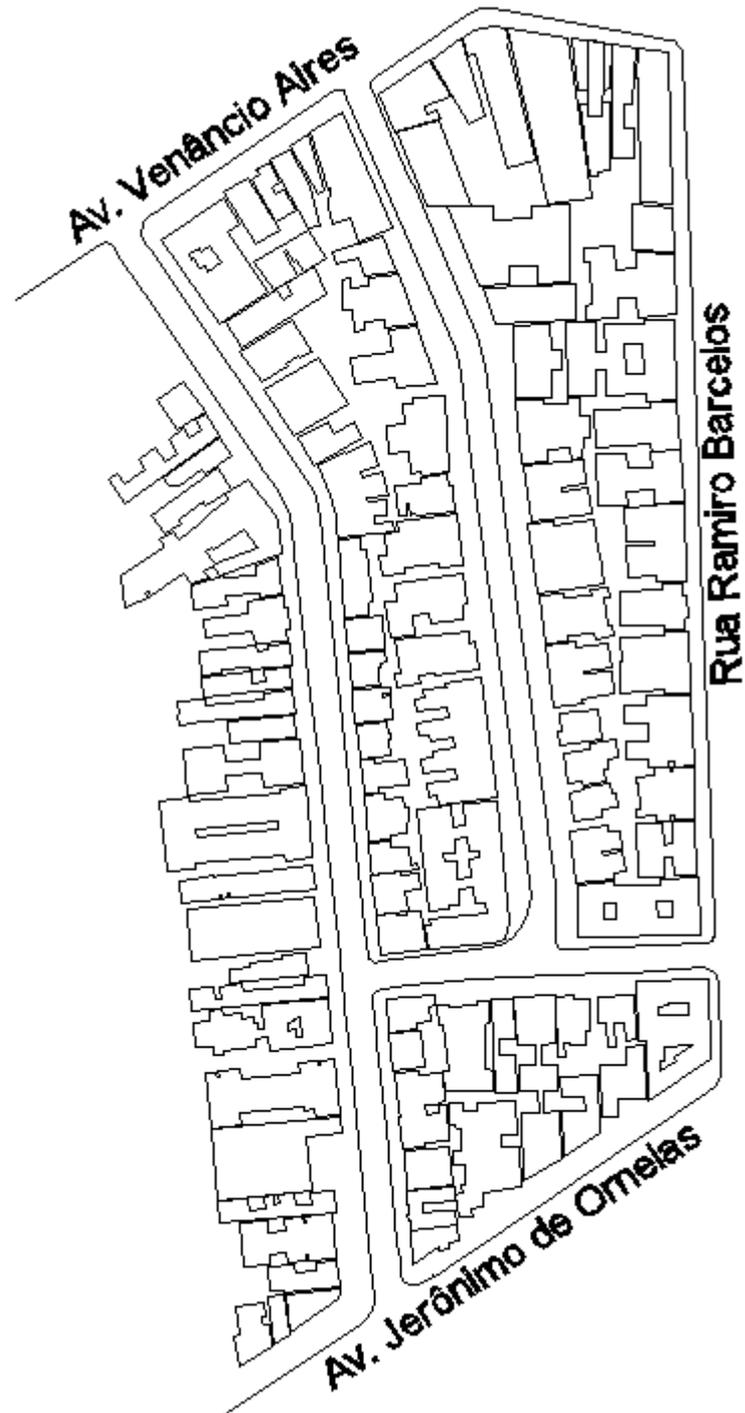


Figura A4 - Mapa desenvolvido para região do Santana.

APÊNDICE B – Amostragem Utilizada como Premissa de Cálculo.

A Tabela B1 mostra os dados coletados junto ao PBE INMETRO Edição 01/2013 para módulos fotovoltaicos. A partir destas informações, algumas premissas de cálculo foram utilizadas, como Potência por metro quadrado e área média dos módulos.

Tabela B1 - Informações da amostragem de módulos utilizada

| PBE INMETRO - Edição 01/2013 | | | | | | | |
|------------------------------|----------------------|------------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------|--------------------------------|---------------------------|
| Marca | Modelo/Código | Material | Área [m ²] | Potência [W] | Selo Procel | Relação [W/m ²] | Media [W/m ²] |
| ALPER | ALP230P-60 | poly-Si | 1.637 | 230 | A | 140.5 | 145.0 |
| ALPER | ALP235P-60 | poly-Si | 1.637 | 235 | A | 143.6 | |
| ALPER | ALP280P-72 | poly-Si | 1.940 | 280 | A | 144.3 | |
| ALPER | ALP285P-72 | poly-Si | 1.940 | 285 | A | 146.9 | |
| ALPER | ALP290P-72 | poly-Si | 1.940 | 290 | A | 149.5 | |
| AVPROJECT | AVP-140P | poly-Si | 1.034 | 144 | A | 139.3 | 144.6 |
| AVPROJECT | AVP48M-190wP | poly-Si | 1.325 | 190 | A | 143.4 | |
| AVPROJECT | AVP60M-240wP | poly-Si | 1.631 | 240 | A | 147.1 | |
| AVPROJECT | AVP72M-285wP | poly-Si | 1.960 | 285 | A | 145.4 | |
| AVPROJECT | AVP72M-290wP | poly-Si | 1.960 | 290 | A | 148.0 | |
| RENESOLA | JC200S-24-Db | mono-Si | 1.277 | 201 | A | 157.4 | 150.4 |
| RENESOLA | JC140M-12-Gb | poly-Si | 1.000 | 140 | A | 140.0 | |
| RENESOLA | JC240M-24-Bb p | poly-Si | 1.627 | 240 | A | 147.5 | |
| RENESOLA | JC290M-24-Abv | poly-Si | 1.940 | 291 | A | 150.0 | |
| RENESOLA | JC305M-24-Abv | poly-Si | 1.940 | 305 | A | 157.2 | |
| CANADIAN | CS6P 235P | poly-Si | 1.609 | 235 | A | 146.1 | 151.0 |
| CANADIAN | CS6P 245P | poly-Si | 1.609 | 245 | A | 152.3 | |
| CANADIAN | CS6P-240M | mono-Si | 1.609 | 240 | A | 149.2 | |
| CANADIAN | CS6P-245M | mono-Si | 1.609 | 245 | A | 152.3 | |
| CANADIAN | CS6P-250M | mono-Si | 1.609 | 250 | A | 155.4 | |
| KYOCERA | KD140SX-UFBS | poly-Si | 1.002 | 140 | A | 139.7 | 145.3 |
| KYOCERA | KD240GH-2PB p | poly-Si | 1.649 | 240 | A | 145.5 | |
| KYOCERA | KD245GH-4FB | poly-Si | 1.645 | 245 | A | 148.9 | |
| KYOCERA | KD245GX-LPB | poly-Si | 1.645 | 245 | A | 148.9 | |
| KYOCERA | KD315GH-4FB | poly-Si | 2.194 | 315 | A | 143.6 | |
| SOLAR WORLD | SW 140 R6A POLY | poly-Si | 1.025 | 141 | A | 137.6 | 143.8 |
| SOLAR WORLD | SW230 POLY | poly-Si | 1.677 | 230 | A | 137.1 | |
| SOLAR WORLD | SW240 POLY | poly-Si | 1.677 | 240 | A | 143.1 | |
| SOLAR WORLD | SW245 POLY | poly-Si | 1.677 | 245 | A | 146.1 | |
| SOLAR WORLD | SW260 MONO | mono-Si | 1.677 | 260 | A | 155.0 | |
| SOLARIA | S5M170 | mono-Si | 1.251 | 171 | A | 136.7 | 144.6 |
| SOLARIA | S6P230 | poly-Si | 1.609 | 230 | A | 142.9 | |
| SOLARIA | S6M2G245 | mono-Si | 1.631 | 245 | A | 150.2 | |
| SOLARIA | S6M2G240 | mono-Si | 1.631 | 240 | A | 147.1 | |
| SOLARIA | S6P235 | poly-Si | 1.609 | 235 | A | 146.1 | |
| SOLARTERRA | HD210 | poly-Si | 1.465 | 210 | A | 143.3 | 141.5 |
| SOLARTERRA | HG135 | poly-Si | 0.964 | 135 | A | 140.0 | |
| SOLARTERRA | HG190 | mono-Si | 1.277 | 190 | A | 148.8 | |
| SOLARTERRA | HG50 | mono-Si | 0.357 | 50 | A | 140.1 | |
| SOLARTERRA | HG90 | mono-Si | 0.666 | 90 | A | 135.1 | |
| YINGLI SOLAR | YL140P-17B | poly-Si | 1.000 | 140 | A | 140.0 | 152.6 |
| YINGLI SOLAR | YL270C-30B | mono-Si | 1.634 | 270 | A | 165.2 | |
| YINGLI SOLAR | YL270P-30B m | mono-Si | 1.634 | 270 | A | 165.2 | |
| YINGLI SOLAR | YL280P-35B | poly-Si | 1.950 | 280 | A | 143.6 | |
| YINGLI SOLAR | YL290P-35B | poly-Si | 1.950 | 290 | A | 148.7 | |
| CSUN | CSUN310-72M | mono-Si | 1.936 | 310 | A | 160.1 | 153.1 |
| BYD | BYD140P6-18 | poly-Si | 1.002 | 140 | A | 139.7 | |
| Q-CELLS | QBASE G2 240 | poly-Si | 1.670 | 239 | A | 143.1 | |
| YINXING | YXGF-240P60 | poly-Si | 1.634 | 241 | A | 147.5 | |
| PANASONIC | VBHN220AA01 | mono-Si | 1.261 | 221 | A | 175.3 | |
| Nº Marcas | Nº de Modelos | Material | Área Média [m²] | Potência Média [W] | PROCEL | Média [W/m²] | |
| 14 | 50 | mono/poly | 1.537 | 227.18 | A | 148 | |

APÊNDICE C – Cenários de Instalação e Produção de Energia.

As Tabelas C1, C2, C3 e C4 apresentam os resultados para a estimativa de instalação e produção de energia em cada cobertura de edificação nas regiões selecionadas.

Tabela C1 - Estimativa de capacidade e produção de energia para as coberturas da região do Centro Histórico.

| CENTRO HISTÓRICO | | (40% Área) | (A = 1.6 m ²) | (148 W _p /m ²) | (Y _f = 1380 kW.h/kW _p) |
|------------------|------------------------|--------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---|
| Nº Edificação | Área [m ²] | Área de Instalação [m ²] | Nº Módulos | Potência Instalada [W _p] | Energia Produzida em 1 ano [kW.h] |
| 1 | 265 | 106 | 66 | 15688 | 21649 |
| 2 | 398 | 159 | 100 | 23562 | 32515 |
| 3 | 355 | 142 | 89 | 21016 | 29002 |
| 4 | 623 | 249 | 156 | 36882 | 50897 |
| 5 | 353 | 141 | 88 | 20898 | 28839 |
| 6 | 708 | 283 | 177 | 41914 | 57841 |
| 7 | 552 | 221 | 138 | 32678 | 45096 |
| 8 | 276 | 110 | 69 | 16339 | 22548 |
| 9 | 315 | 126 | 79 | 18648 | 25734 |
| 10 | 110 | 44 | 28 | 6512 | 8987 |
| 11 | 528 | 211 | 132 | 31258 | 43135 |
| 12 | 342 | 137 | 86 | 20246 | 27940 |
| 13 | 411 | 164 | 103 | 24331 | 33577 |
| 14 | 562 | 225 | 141 | 33270 | 45913 |
| 15 | 421 | 168 | 105 | 24923 | 34394 |
| 16 | 2689 | 1076 | 672 | 159189 | 219681 |
| 17 | 1404 | 562 | 351 | 83117 | 114701 |
| 18 | 485 | 194 | 121 | 28712 | 39623 |
| 19 | 345 | 138 | 86 | 20424 | 28185 |
| 20 | 543 | 217 | 136 | 32146 | 44361 |
| 21 | 2465 | 986 | 616 | 145928 | 201381 |
| 22 | 314 | 126 | 79 | 18589 | 25653 |
| 23 | 340 | 136 | 85 | 20128 | 27777 |
| 24 | 608 | 243 | 152 | 35994 | 49671 |
| 25 | 289 | 116 | 72 | 17109 | 23610 |
| 26 | 885 | 354 | 221 | 52392 | 72301 |
| 27 | 1106 | 442 | 277 | 65475 | 90356 |
| 28 | 763 | 305 | 191 | 45170 | 62334 |
| 29 | 1261 | 504 | 315 | 74651 | 103019 |
| 30 | 893 | 357 | 223 | 52866 | 72955 |
| 31 | 888 | 355 | 222 | 52570 | 72546 |
| 32 | 753 | 301 | 188 | 44578 | 61517 |

| | | | | | |
|----|------|-----|-----|--------|--------|
| 33 | 602 | 241 | 151 | 35638 | 49181 |
| 34 | 240 | 96 | 60 | 14208 | 19607 |
| 35 | 341 | 136 | 85 | 20187 | 27858 |
| 36 | 227 | 91 | 57 | 13438 | 18545 |
| 37 | 357 | 143 | 89 | 21134 | 29165 |
| 38 | 117 | 47 | 29 | 6926 | 9558 |
| 39 | 1839 | 736 | 460 | 108869 | 150239 |
| 40 | 305 | 122 | 76 | 18056 | 24917 |
| 41 | 356 | 142 | 89 | 21075 | 29084 |
| 42 | 135 | 54 | 34 | 7992 | 11029 |
| 43 | 215 | 86 | 54 | 12728 | 17565 |
| 44 | 234 | 94 | 59 | 13853 | 19117 |
| 45 | 1898 | 759 | 475 | 112362 | 155059 |
| 46 | 224 | 90 | 56 | 13261 | 18300 |
| 47 | 465 | 186 | 116 | 27528 | 37989 |
| 48 | 183 | 73 | 46 | 10834 | 14950 |
| 49 | 347 | 139 | 87 | 20542 | 28349 |
| 50 | 373 | 149 | 93 | 22082 | 30473 |
| 51 | 105 | 42 | 26 | 6216 | 8578 |
| 52 | 144 | 58 | 36 | 8525 | 11764 |
| 53 | 291 | 116 | 73 | 17227 | 23774 |
| 54 | 41 | 16 | 10 | 2427 | 3350 |
| 55 | 80 | 32 | 20 | 4736 | 6536 |
| 56 | 250 | 100 | 63 | 14800 | 20424 |
| 57 | 402 | 161 | 101 | 23798 | 32842 |
| 58 | 151 | 60 | 38 | 8939 | 12336 |
| 59 | 405 | 162 | 101 | 23976 | 33087 |
| 60 | 226 | 90 | 57 | 13379 | 18463 |
| 61 | 198 | 79 | 50 | 11722 | 16176 |
| 62 | 215 | 86 | 54 | 12728 | 17565 |
| 63 | 267 | 107 | 67 | 15806 | 21813 |
| 64 | 305 | 122 | 76 | 18056 | 24917 |
| 65 | 39 | 16 | 10 | 2309 | 3186 |
| 66 | 199 | 80 | 50 | 11781 | 16258 |
| 67 | 200 | 80 | 50 | 11840 | 16339 |
| 68 | 73 | 29 | 18 | 4322 | 5964 |
| 69 | 63 | 25 | 16 | 3730 | 5147 |
| 70 | 101 | 40 | 25 | 5979 | 8251 |
| 71 | 77 | 31 | 19 | 4558 | 6291 |
| 72 | 61 | 24 | 15 | 3611 | 4983 |
| 73 | 409 | 164 | 102 | 24213 | 33414 |
| 74 | 127 | 51 | 32 | 7518 | 10375 |
| 75 | 454 | 182 | 114 | 26877 | 37090 |
| 76 | 379 | 152 | 95 | 22437 | 30963 |
| 77 | 267 | 107 | 67 | 15806 | 21813 |

| | | | | | |
|-------------------------------|------|---|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 78 | 445 | 178 | 111 | 26344 | 36355 |
| 79 | 351 | 140 | 88 | 20779 | 28675 |
| 80 | 99 | 40 | 25 | 5861 | 8088 |
| 81 | 178 | 71 | 45 | 10538 | 14542 |
| 82 | 762 | 305 | 191 | 45110 | 62252 |
| 83 | 60 | 24 | 15 | 3552 | 4902 |
| 84 | 137 | 55 | 34 | 8110 | 11192 |
| 85 | 121 | 48 | 30 | 7163 | 9885 |
| 86 | 157 | 63 | 39 | 9294 | 12826 |
| 87 | 41 | 16 | 10 | 2427 | 3350 |
| 88 | 61 | 24 | 15 | 3611 | 4983 |
| 89 | 343 | 137 | 86 | 20306 | 28022 |
| 90 | 337 | 135 | 84 | 19950 | 27532 |
| 91 | 437 | 175 | 109 | 25870 | 35701 |
| 92 | 267 | 107 | 67 | 15806 | 21813 |
| 93 | 454 | 182 | 114 | 26877 | 37090 |
| 94 | 1206 | 482 | 302 | 71395 | 98525 |
| 95 | 612 | 245 | 153 | 36230 | 49998 |
| 96 | 423 | 169 | 106 | 25042 | 34557 |
| 97 | 1283 | 513 | 321 | 75954 | 104816 |
| 98 | 189 | 76 | 47 | 11189 | 15441 |
| 99 | 134 | 54 | 34 | 7933 | 10947 |
| 100 | 200 | 80 | 50 | 11840 | 16339 |
| CENTRO HISTÓRICO | | (40%) Área de Projeção [m²] | Nº Módulos | Potência Instalada [kWp] | Energia Produzida [MW.h] |
| Menor Edificação | | 16 | 10 | 2.3 | 3.2 |
| Maior Edificação | | 1076 | 672 | 159.2 | 219.7 |
| Média das Edificações | | 178 | 111 | 26.4 | 36.4 |
| Total: 100 Edificações | | 17814 | 11134 | 2636.4 | 3638.2 |

Tabela C2 - Estimativa de capacidade e produção de energia para as coberturas da região do São Geraldo.

| SÃO GERALDO | | (40% Área) | (A = 1.6 m²) | (148 Wp/m²) | (Yf = 1380 kW.h/kWp) |
|----------------------|-----------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|--|
| Nº Edificação | Área [m²] | Área de Instalação [m²] | Nº Módulos | Potência Instalada [Wp] | Energia Produzida em 1 Ano [kW.h] |
| 1 | 1307 | 523 | 327 | 77345 | 106736 |
| 2 | 947 | 379 | 237 | 56086 | 77399 |
| 3 | 2032 | 813 | 508 | 120306 | 166023 |
| 4 | 404 | 162 | 101 | 23940 | 33038 |
| 5 | 1070 | 428 | 268 | 63356 | 87431 |
| 6 | 923 | 369 | 231 | 54659 | 75430 |

| | | | | | |
|----|------|------|------|--------|--------|
| 7 | 2891 | 1156 | 723 | 171135 | 236167 |
| 8 | 3801 | 1520 | 950 | 225007 | 310510 |
| 9 | 544 | 218 | 136 | 32199 | 44434 |
| 10 | 6048 | 2419 | 1512 | 358053 | 494114 |
| 11 | 1404 | 562 | 351 | 83129 | 114718 |
| 12 | 748 | 299 | 187 | 44293 | 61125 |
| 13 | 1749 | 700 | 437 | 103529 | 142870 |
| 14 | 2228 | 891 | 557 | 131915 | 182043 |
| 15 | 670 | 268 | 167 | 39652 | 54720 |
| 16 | 6569 | 2628 | 1642 | 388908 | 536694 |
| 17 | 3821 | 1529 | 955 | 226227 | 312193 |
| 18 | 555 | 222 | 139 | 32826 | 45300 |
| 19 | 934 | 374 | 234 | 55299 | 76312 |
| 20 | 7871 | 3148 | 1968 | 465963 | 643029 |
| 21 | 3339 | 1336 | 835 | 197657 | 272767 |
| 22 | 385 | 154 | 96 | 22804 | 31469 |
| 23 | 302 | 121 | 75 | 17861 | 24648 |
| 24 | 863 | 345 | 216 | 51078 | 70487 |
| 25 | 157 | 63 | 39 | 9306 | 12843 |
| 26 | 250 | 100 | 63 | 14800 | 20424 |
| 27 | 581 | 232 | 145 | 34407 | 47482 |
| 28 | 1424 | 570 | 356 | 84289 | 116319 |
| 29 | 1970 | 788 | 492 | 116612 | 160925 |
| 30 | 1727 | 691 | 432 | 102232 | 141081 |
| 31 | 2181 | 872 | 545 | 129115 | 178179 |
| 32 | 341 | 136 | 85 | 20169 | 27834 |
| 33 | 1320 | 528 | 330 | 78132 | 107822 |
| 34 | 255 | 102 | 64 | 15072 | 20800 |
| 35 | 368 | 147 | 92 | 21797 | 30080 |
| 36 | 137 | 55 | 34 | 8099 | 11176 |
| 37 | 121 | 49 | 30 | 7187 | 9918 |
| 38 | 295 | 118 | 74 | 17446 | 24076 |
| 39 | 64 | 25 | 16 | 3771 | 5204 |
| 40 | 294 | 117 | 73 | 17381 | 23986 |
| 41 | 910 | 364 | 227 | 53848 | 74311 |
| 42 | 4698 | 1879 | 1174 | 278110 | 383791 |
| 43 | 130 | 52 | 33 | 7696 | 10620 |
| 44 | 488 | 195 | 122 | 28872 | 39843 |
| 45 | 1330 | 532 | 332 | 78718 | 108631 |
| 46 | 1043 | 417 | 261 | 61728 | 85184 |
| 47 | 1019 | 408 | 255 | 60337 | 83265 |
| 48 | 312 | 125 | 78 | 18441 | 25448 |
| 49 | 316 | 126 | 79 | 18695 | 25800 |
| 50 | 550 | 220 | 138 | 32572 | 44949 |
| 51 | 226 | 90 | 56 | 13356 | 18431 |

| | | | | | |
|------------------------------|---|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------|
| 52 | 182 | 73 | 45 | 10745 | 14828 |
| 53 | 165 | 66 | 41 | 9768 | 13480 |
| 54 | 314 | 126 | 79 | 18601 | 25669 |
| 55 | 280 | 112 | 70 | 16600 | 22908 |
| 56 | 163 | 65 | 41 | 9644 | 13308 |
| 57 | 359 | 144 | 90 | 21276 | 29362 |
| 58 | 107 | 43 | 27 | 6305 | 8701 |
| 59 | 88 | 35 | 22 | 5198 | 7173 |
| 60 | 207 | 83 | 52 | 12237 | 16887 |
| 61 | 329 | 132 | 82 | 19483 | 26886 |
| 62 | 470 | 188 | 118 | 27830 | 38405 |
| 63 | 60 | 24 | 15 | 3552 | 4902 |
| 64 | 187 | 75 | 47 | 11047 | 15244 |
| 65 | 241 | 96 | 60 | 14249 | 19664 |
| 66 | 159 | 64 | 40 | 9401 | 12973 |
| 67 | 119 | 48 | 30 | 7045 | 9722 |
| 68 | 258 | 103 | 64 | 15256 | 21053 |
| 69 | 395 | 158 | 99 | 23384 | 32270 |
| 70 | 319 | 127 | 80 | 18861 | 26028 |
| 71 | 172 | 69 | 43 | 10171 | 14035 |
| 72 | 90 | 36 | 23 | 5352 | 7385 |
| 73 | 234 | 94 | 59 | 13859 | 19125 |
| 74 | 355 | 142 | 89 | 21028 | 29018 |
| 75 | 108 | 43 | 27 | 6411 | 8848 |
| 76 | 237 | 95 | 59 | 14007 | 19329 |
| 77 | 207 | 83 | 52 | 12254 | 16911 |
| 78 | 351 | 140 | 88 | 20761 | 28651 |
| 79 | 245 | 98 | 61 | 14504 | 20016 |
| 80 | 230 | 92 | 57 | 13586 | 18749 |
| 81 | 238 | 95 | 60 | 14090 | 19444 |
| 82 | 845 | 338 | 211 | 50024 | 69033 |
| 83 | 149 | 60 | 37 | 8821 | 12173 |
| Resumo São Geraldo | (40%) Área de Projeção [m²] | Nº Módulos | Potência Instalada [kWp] | Energia Produzida [MW.h] | |
| Menor Edificação | 24 | 15 | 3.6 | 4.9 | |
| Maior Edificação | 3148 | 1968 | 466.0 | 643.0 | |
| Média das Edificações | 394 | 246 | 58.3 | 80.5 | |
| Total: 83 Edificações | 32708 | 20442 | 4840.8 | 6680.3 | |

Tabela C3 - Estimativa de capacidade e produção de energia para as coberturas da região do São Sebastião.

| | | | | |
|----------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| SÃO SEBASTIÃO | (40% Área) | (A = 1.6 m²) | (148 Wp/m²) | (Yf = 1380 kW.h/kWp) |
|----------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|

| Nº Edificação | Área [m²] | Área de Instalação [m²] | Nº Módulos | Potência Instalada [Wp] | Energia Produzida em 1 Ano [kW.h] |
|----------------------|------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|--|
| 1 | 258 | 103 | 65 | 15274 | 21078 |
| 2 | 138 | 55 | 35 | 8170 | 11274 |
| 3 | 138 | 55 | 35 | 8170 | 11274 |
| 4 | 148 | 59 | 37 | 8762 | 12091 |
| 5 | 254 | 102 | 64 | 15037 | 20751 |
| 6 | 254 | 102 | 64 | 15037 | 20751 |
| 7 | 254 | 102 | 64 | 15037 | 20751 |
| 8 | 254 | 102 | 64 | 15037 | 20751 |
| 9 | 254 | 102 | 64 | 15037 | 20751 |
| 10 | 254 | 102 | 64 | 15037 | 20751 |
| 11 | 254 | 102 | 64 | 15037 | 20751 |
| 12 | 254 | 102 | 64 | 15037 | 20751 |
| 13 | 254 | 102 | 64 | 15037 | 20751 |
| 14 | 254 | 102 | 64 | 15037 | 20751 |
| 15 | 254 | 102 | 64 | 15037 | 20751 |
| 16 | 254 | 102 | 64 | 15037 | 20751 |
| 17 | 254 | 102 | 64 | 15037 | 20751 |
| 18 | 254 | 102 | 64 | 15037 | 20751 |
| 19 | 578 | 231 | 145 | 34218 | 47220 |
| 20 | 578 | 231 | 145 | 34218 | 47220 |
| 21 | 548 | 219 | 137 | 32442 | 44769 |
| 22 | 155 | 62 | 39 | 9176 | 12663 |
| 23 | 155 | 62 | 39 | 9176 | 12663 |
| 24 | 578 | 231 | 145 | 34218 | 47220 |
| 25 | 578 | 231 | 145 | 34218 | 47220 |
| 26 | 290 | 116 | 73 | 17168 | 23692 |
| 27 | 532 | 213 | 133 | 31494 | 43462 |
| 28 | 242 | 97 | 61 | 14326 | 19770 |
| 29 | 242 | 97 | 61 | 14326 | 19770 |
| 30 | 242 | 97 | 61 | 14326 | 19770 |
| 31 | 242 | 97 | 61 | 14326 | 19770 |
| 32 | 267 | 107 | 67 | 15806 | 21813 |
| 33 | 242 | 97 | 61 | 14326 | 19770 |
| 34 | 267 | 107 | 67 | 15806 | 21813 |
| 35 | 242 | 97 | 61 | 14326 | 19770 |
| 36 | 235 | 94 | 59 | 13912 | 19199 |
| 37 | 242 | 97 | 61 | 14326 | 19770 |
| 38 | 235 | 94 | 59 | 13912 | 19199 |
| 39 | 235 | 94 | 59 | 13912 | 19199 |
| 40 | 263 | 105 | 66 | 15570 | 21486 |
| 41 | 235 | 94 | 59 | 13912 | 19199 |
| 42 | 531 | 212 | 133 | 31435 | 43381 |

| | | | | | |
|----|-----|-----|----|-------|-------|
| 43 | 222 | 89 | 56 | 13142 | 18137 |
| 44 | 42 | 17 | 11 | 2510 | 3464 |
| 45 | 139 | 56 | 35 | 8229 | 11356 |
| 46 | 107 | 43 | 27 | 6346 | 8758 |
| 47 | 60 | 24 | 15 | 3528 | 4869 |
| 48 | 286 | 114 | 72 | 16931 | 23365 |
| 49 | 197 | 79 | 49 | 11686 | 16127 |
| 50 | 157 | 63 | 39 | 9294 | 12826 |
| 51 | 114 | 46 | 29 | 6767 | 9338 |
| 52 | 190 | 76 | 48 | 11248 | 15522 |
| 53 | 64 | 25 | 16 | 3771 | 5204 |
| 54 | 72 | 29 | 18 | 4280 | 5907 |
| 55 | 124 | 50 | 31 | 7341 | 10130 |
| 56 | 240 | 96 | 60 | 14220 | 19623 |
| 57 | 229 | 91 | 57 | 13533 | 18676 |
| 58 | 139 | 55 | 35 | 8211 | 11331 |
| 59 | 91 | 37 | 23 | 5411 | 7467 |
| 60 | 83 | 33 | 21 | 4914 | 6781 |
| 61 | 130 | 52 | 33 | 7696 | 10620 |
| 62 | 74 | 30 | 19 | 4381 | 6046 |
| 63 | 63 | 25 | 16 | 3747 | 5171 |
| 64 | 107 | 43 | 27 | 6334 | 8741 |
| 65 | 94 | 37 | 23 | 5547 | 7655 |
| 66 | 69 | 28 | 17 | 4085 | 5637 |
| 67 | 59 | 23 | 15 | 3463 | 4779 |
| 68 | 322 | 129 | 80 | 19033 | 26265 |
| 69 | 220 | 88 | 55 | 13006 | 17949 |
| 70 | 212 | 85 | 53 | 12550 | 17320 |
| 71 | 81 | 32 | 20 | 4766 | 6577 |
| 72 | 220 | 88 | 55 | 13006 | 17949 |
| 73 | 62 | 25 | 15 | 3659 | 5049 |
| 74 | 23 | 9 | 6 | 1379 | 1904 |
| 75 | 220 | 88 | 55 | 13006 | 17949 |
| 76 | 102 | 41 | 26 | 6062 | 8366 |
| 77 | 99 | 39 | 25 | 5831 | 8047 |
| 78 | 99 | 40 | 25 | 5867 | 8096 |
| 79 | 46 | 18 | 12 | 2723 | 3758 |
| 80 | 125 | 50 | 31 | 7412 | 10228 |
| 81 | 103 | 41 | 26 | 6092 | 8407 |
| 82 | 22 | 9 | 5 | 1291 | 1781 |
| 83 | 69 | 27 | 17 | 4055 | 5596 |
| 84 | 188 | 75 | 47 | 11100 | 15318 |
| 85 | 272 | 109 | 68 | 16102 | 22221 |
| 86 | 57 | 23 | 14 | 3345 | 4616 |
| 87 | 118 | 47 | 30 | 6997 | 9656 |

| | | | | | |
|------------------------------|-----|---|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 88 | 46 | 18 | 11 | 2700 | 3725 |
| 89 | 55 | 22 | 14 | 3226 | 4452 |
| 90 | 77 | 31 | 19 | 4564 | 6299 |
| 91 | 182 | 73 | 46 | 10798 | 14901 |
| 92 | 92 | 37 | 23 | 5446 | 7516 |
| 93 | 142 | 57 | 36 | 8406 | 11601 |
| 94 | 228 | 91 | 57 | 13498 | 18627 |
| 95 | 37 | 15 | 9 | 2190 | 3023 |
| 96 | 45 | 18 | 11 | 2652 | 3660 |
| 97 | 151 | 60 | 38 | 8921 | 12312 |
| Resumo São Sebastião | | (40%) Área de Projeção [m²] | Nº Módulos | Potência Instalada [kWp] | Energia Produzida [MW.h] |
| Menor Edificação | | 9 | 5 | 1.3 | 1.8 |
| Maior Edificação | | 231 | 145 | 34 | 47.2 |
| Média das Edificações | | 79 | 49 | 12 | 16.0 |
| Total: 97 Edificações | | 7622 | 4764 | 1128.1 | 1556.7 |

Tabela C4 - Estimativa de capacidade e produção de energia para as coberturas da região do Santana.

| SANTANA | | (40% Área) | (A = 1.6 m²) | (148 Wp/m²) | (Yf = 1380 kW.h/kWp) |
|----------------------|-----------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|--|
| Nº Edificação | Área [m²] | Área de Instalação [m²] | Nº Módulos | Potência Instalada [Wp] | Energia Produzida em 1 Ano [kW.h] |
| 1 | 125 | 50 | 31 | 7370 | 10171 |
| 2 | 55 | 22 | 14 | 3274 | 4518 |
| 3 | 97 | 39 | 24 | 5713 | 7884 |
| 4 | 124 | 50 | 31 | 7353 | 10147 |
| 5 | 290 | 116 | 73 | 17186 | 23716 |
| 6 | 163 | 65 | 41 | 9661 | 13333 |
| 7 | 550 | 220 | 137 | 32536 | 44900 |
| 8 | 442 | 177 | 110 | 26155 | 36093 |
| 9 | 375 | 150 | 94 | 22212 | 30652 |
| 10 | 184 | 74 | 46 | 10916 | 15065 |
| 11 | 111 | 44 | 28 | 6553 | 9044 |
| 12 | 502 | 201 | 126 | 29724 | 41020 |
| 13 | 231 | 92 | 58 | 13652 | 18839 |
| 14 | 688 | 275 | 172 | 40718 | 56191 |
| 15 | 320 | 128 | 80 | 18944 | 26143 |
| 16 | 110 | 44 | 28 | 6512 | 8987 |
| 17 | 173 | 69 | 43 | 10253 | 14150 |
| 18 | 130 | 52 | 33 | 7696 | 10620 |
| 19 | 150 | 60 | 38 | 8880 | 12254 |
| 20 | 189 | 75 | 47 | 11171 | 15416 |

| | | | | | |
|----|-----|-----|-----|-------|-------|
| 21 | 174 | 69 | 43 | 10277 | 14182 |
| 22 | 594 | 238 | 149 | 35165 | 48527 |
| 23 | 136 | 55 | 34 | 8069 | 11135 |
| 24 | 92 | 37 | 23 | 5452 | 7524 |
| 25 | 190 | 76 | 48 | 11266 | 15547 |
| 26 | 90 | 36 | 23 | 5340 | 7369 |
| 27 | 85 | 34 | 21 | 5002 | 6903 |
| 28 | 117 | 47 | 29 | 6944 | 9583 |
| 29 | 133 | 53 | 33 | 7862 | 10849 |
| 30 | 429 | 172 | 107 | 25385 | 35031 |
| 31 | 254 | 102 | 64 | 15049 | 20767 |
| 32 | 92 | 37 | 23 | 5423 | 7483 |
| 33 | 105 | 42 | 26 | 6222 | 8586 |
| 34 | 295 | 118 | 74 | 17464 | 24100 |
| 35 | 143 | 57 | 36 | 8448 | 11658 |
| 36 | 415 | 166 | 104 | 24556 | 33888 |
| 37 | 174 | 70 | 44 | 10319 | 14240 |
| 38 | 122 | 49 | 30 | 7205 | 9942 |
| 39 | 169 | 68 | 42 | 10017 | 13823 |
| 40 | 107 | 43 | 27 | 6311 | 8709 |
| 41 | 475 | 190 | 119 | 28144 | 38838 |
| 42 | 135 | 54 | 34 | 7992 | 11029 |
| 43 | 114 | 46 | 28 | 6743 | 9305 |
| 44 | 89 | 35 | 22 | 5245 | 7238 |
| 45 | 127 | 51 | 32 | 7518 | 10375 |
| 46 | 96 | 38 | 24 | 5683 | 7843 |
| 47 | 78 | 31 | 19 | 4600 | 6348 |
| 48 | 95 | 38 | 24 | 5636 | 7777 |
| 49 | 85 | 34 | 21 | 5008 | 6911 |
| 50 | 92 | 37 | 23 | 5435 | 7500 |
| 51 | 157 | 63 | 39 | 9265 | 12785 |
| 52 | 327 | 131 | 82 | 19376 | 26739 |
| 53 | 110 | 44 | 27 | 6500 | 8970 |
| 54 | 257 | 103 | 64 | 15238 | 21029 |
| 55 | 167 | 67 | 42 | 9857 | 13602 |
| 56 | 220 | 88 | 55 | 13042 | 17998 |
| 57 | 460 | 184 | 115 | 27250 | 37605 |
| 58 | 150 | 60 | 38 | 8880 | 12254 |
| 59 | 131 | 53 | 33 | 7773 | 10727 |
| 60 | 89 | 36 | 22 | 5287 | 7295 |
| 61 | 121 | 48 | 30 | 7163 | 9885 |
| 62 | 61 | 24 | 15 | 3599 | 4967 |
| 63 | 395 | 158 | 99 | 23396 | 32286 |
| 64 | 105 | 42 | 26 | 6234 | 8603 |
| 65 | 217 | 87 | 54 | 12817 | 17687 |

| | | | | | |
|-------------------------|-----|------------------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 66 | 238 | 95 | 60 | 14096 | 19452 |
| 67 | 271 | 108 | 68 | 16043 | 22140 |
| 68 | 144 | 58 | 36 | 8525 | 11764 |
| 69 | 277 | 111 | 69 | 16404 | 22638 |
| 70 | 260 | 104 | 65 | 15362 | 21200 |
| 71 | 253 | 101 | 63 | 14984 | 20677 |
| 72 | 517 | 207 | 129 | 30624 | 42261 |
| 73 | 729 | 291 | 182 | 43127 | 59516 |
| 74 | 459 | 184 | 115 | 27173 | 37498 |
| 75 | 184 | 73 | 46 | 10863 | 14991 |
| 76 | 207 | 83 | 52 | 12243 | 16895 |
| 77 | 99 | 39 | 25 | 5837 | 8055 |
| 78 | 207 | 83 | 52 | 12231 | 16878 |
| 79 | 124 | 49 | 31 | 7311 | 10089 |
| 80 | 306 | 122 | 77 | 18115 | 24999 |
| 81 | 92 | 37 | 23 | 5452 | 7524 |
| 82 | 261 | 104 | 65 | 15422 | 21282 |
| 83 | 302 | 121 | 75 | 17855 | 24640 |
| 84 | 223 | 89 | 56 | 13190 | 18202 |
| 85 | 195 | 78 | 49 | 11544 | 15931 |
| 86 | 344 | 137 | 86 | 20341 | 28071 |
| 87 | 327 | 131 | 82 | 19329 | 26674 |
| 88 | 252 | 101 | 63 | 14889 | 20547 |
| 89 | 276 | 110 | 69 | 16327 | 22532 |
| 90 | 284 | 114 | 71 | 16825 | 23218 |
| 91 | 259 | 104 | 65 | 15333 | 21159 |
| 92 | 223 | 89 | 56 | 13184 | 18194 |
| 93 | 538 | 215 | 135 | 31850 | 43952 |
| 94 | 238 | 95 | 59 | 14084 | 19435 |
| 95 | 389 | 155 | 97 | 23005 | 31747 |
| 96 | 565 | 226 | 141 | 33424 | 46126 |
| 97 | 146 | 58 | 36 | 8631 | 11911 |
| 98 | 275 | 110 | 69 | 16268 | 22450 |
| 99 | 213 | 85 | 53 | 12627 | 17426 |
| 100 | 163 | 65 | 41 | 9673 | 13349 |
| 101 | 360 | 144 | 90 | 21324 | 29427 |
| 102 | 666 | 266 | 166 | 39398 | 54369 |
| 103 | 85 | 34 | 21 | 5056 | 6977 |
| 104 | 208 | 83 | 52 | 12284 | 16952 |
| 105 | 161 | 64 | 40 | 9513 | 13129 |
| 106 | 359 | 143 | 90 | 21235 | 29304 |
| Resumo Santana | | (40%) Área de Projeção [m²] | Nº Módulos | Potência Instalada [kWp] | Energia Produzida [MW.h] |
| Menor Edificação | | 22 | 14 | 3.3 | 4.5 |

| | | | | |
|-------------------------------|-------------|-------------|---------------|---------------|
| Maior Edificação | 291 | 182 | 43.1 | 59.5 |
| Média das Edificações | 94 | 59 | 13.9 | 19.2 |
| Total: 106 Edificações | 9979 | 6237 | 1476.9 | 2038.2 |

APÊNDICE D – Dados de Entrada dos Modelos de Energéticos.

O software *EnergyPlus* é utilizado para a simulação termoenergética de edificações e seus sistemas. Atualmente está na versão 8.2. A geometria das edificações é produzida no software *Google Sketchup* que com a utilização do *plugin OpenStudio*, converte todas os dados de coordenadas de superfícies em dados de entrada (formato .idf: *input data file*) para o software. O ambiente de simulação utilizado pelo software é um arquivo climático, definido pelo usuário para a simulação em questão. O arquivo climático (formato .epw: *energyplus weather*) possui diversas variáveis, como temperaturas, radiações, velocidades dos ventos e umidade relativa para todas as horas do ano, ou seja, para 8760 horas. Os modelos foram criados a partir de pavimentos tipo, ou seja, a repetição de um mesmo perfil de espaços em diferentes pavimentos consecutivos.

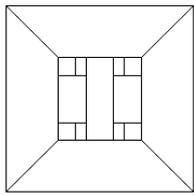
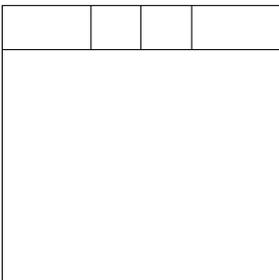
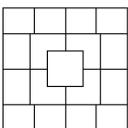
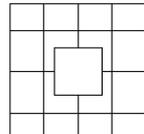
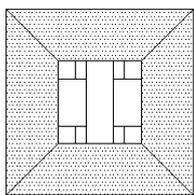
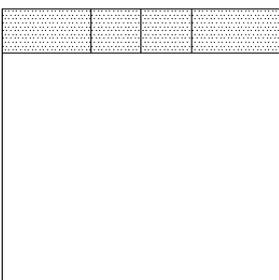
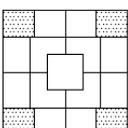
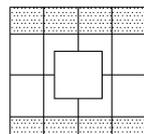
| Divisão das Zonas Térmicas | | | |
|---|---|--|---|
| Prédio Comercial/Escritórios | Prédio Galpões/Oficinas | Residencial de Baixa Altura | Residencial |
|  |  |  |  |
| Zonas Condicionadas | | | |
| Prédio Comercial/Escritórios | Prédio Galpões/Oficinas | Residencial de Baixa Altura | Residencial |
|  |  |  |  |

Figura D1 - Divisão de zonas térmicas e relação de áreas condicionadas (hachuradas) em cada modelo.

As Tabelas D1, D2, D3 e D4 resumem as zona térmicas em cada edificação. A Tabela D5 informa os materiais utilizados nos elementos construtivos.

Tabela D1 - Resumo das zonas térmicas para edificação comercial.

| Edificação Perfil Comercial - Escritórios | Nº | Zona | Área [m ²] | HVAC | Volume [m ³] | Janelas [m ²] | Ilum. [W/m ²] | Ocup. [m ² /p] | Cargas de Tomada [W/m ²] |
|---|----|--------------|------------------------|------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| | 1 | OFFICE-SUL | 89.21 | Sim | 267.64 | 25.34 | 12.00 | 7.00 | 16.20 |
| | 2 | OFFICE-NORTE | 89.21 | Sim | 267.64 | 25.34 | 12.00 | 7.00 | 16.20 |
| | 3 | OFFICE-LESTE | 89.21 | Sim | 267.64 | 25.34 | 12.00 | 7.00 | 16.20 |
| | 4 | OFFICE-OESTE | 89.21 | Sim | 267.64 | 25.34 | 12.00 | 7.00 | 16.20 |
| | 5 | CIRCULACAO | 28.20 | Não | 84.60 | 0.00 | 5.00 | 0.00 | 0.00 |
| | 6 | ESCADAS | 17.28 | Não | 51.84 | 0.00 | 6.00 | 0.00 | 0.00 |
| | 7 | SANITARIOS | 16.00 | Não | 48.00 | 0.00 | 10.00 | 0.00 | 0.00 |
| | 8 | COPAS | 9.60 | Não | 28.80 | 0.00 | 13.00 | 0.00 | 0.00 |
| | 9 | ELEVADORES | 17.28 | Não | 51.84 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

Tabela D2 - Resumo das zonas térmicas para edificação de galpões:

| Galpões Oficinas e Depósitos | Nº | Zona | Área [m ²] | HVAC | Volume [m ³] | Janelas [m ²] | Ilum. [W/m ²] | Ocup. [m ² /p] | Cargas de Tomada [W/m ²] |
|---------------------------------|----|------------|------------------------|------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| | 1 | GALPAO | 828.96 | Não | 4973.76 | 0.00 | 10.00 | 15.50 | 7.00 |
| | 2 | OFFICES | 157.00 | Sim | 471.00 | 43.40 | 12.00 | 7.00 | 16.20 |
| | 3 | VESTIARIOS | 43.00 | Não | 129.00 | 2.40 | 10.00 | 0.00 | 0.00 |
| | 4 | A_TECNICAS | 114.00 | Não | 342.00 | 2.40 | 20.00 | 0.00 | 0.00 |

Tabela D3 - Resumo das zonas térmicas para edificação residencial de baixa altura:

| Residencial de Baixa Altura | Nº | Zona | Área [m ²] | HVAC | Volume [m ³] | Janelas [m ²] | Ilum. [W/m ²] | Ocup. [m ² /p] | Cargas de Tomada [W/m ²] |
|-----------------------------|-------------|----------------|------------------------|-------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| | 1 | QUARTO1A | 10.50 | Sim | 31.50 | 2.00 | 12.00 | 5.25 | 21.90 |
| | 2 | QUARTO1B | 10.50 | Não | 31.50 | 2.00 | 12.00 | 5.25 | 21.90 |
| | 3 | SALA1 | 12.00 | Não | 36.00 | 3.80 | 23.00 | 3.00 | 38.33 |
| | 4 | AREASINTERNAS1 | 12.00 | Não | 36.00 | 0.00 | 10.00 | 0.00 | 141.08 |
| | 5 | QUARTO2A | 10.50 | Sim | 31.50 | 2.00 | 12.00 | 5.25 | 21.90 |
| | 6 | QUARTO2B | 10.50 | Não | 31.50 | 2.00 | 12.00 | 5.25 | 21.90 |
| | 7 | SALA2 | 12.00 | Não | 36.00 | 3.80 | 23.00 | 3.00 | 38.33 |
| | 8 | AREASINTERNAS2 | 12.00 | Não | 36.00 | 0.00 | 10.00 | 0.00 | 141.08 |
| | 9 | QUARTO3A | 10.50 | Sim | 31.50 | 2.00 | 12.00 | 5.25 | 21.90 |
| | 10 | QUARTO3B | 10.50 | Não | 31.50 | 2.00 | 12.00 | 5.25 | 21.90 |
| | 11 | SALA3 | 12.00 | Não | 36.00 | 3.80 | 23.00 | 3.00 | 38.33 |
| | 12 | AREASINTERNAS3 | 12.00 | Não | 36.00 | 0.00 | 10.00 | 0.00 | 141.08 |
| | 13 | QUARTO4A | 10.50 | Sim | 31.50 | 2.00 | 12.00 | 5.25 | 21.90 |
| | 14 | QUARTO4B | 10.50 | Não | 31.50 | 2.00 | 12.00 | 5.25 | 21.90 |
| | 15 | SALA4 | 12.00 | Não | 36.00 | 3.80 | 23.00 | 3.00 | 38.33 |
| | 16 | AREASINTERNAS4 | 12.00 | Não | 36.00 | 0.00 | 10.00 | 0.00 | 141.08 |
| 17 | AREASCOMUNS | 16.00 | Não | 48.00 | 0.00 | 5.00 | 0.00 | 0.00 | |

Tabela D4 - Resumo das zonas térmicas para edificação residencial.

| Residencial | Nº | Zona | Área [m ²] | HVAC | Volume [m ³] | Janelas [m ²] | Ilum. [W/m ²] | Ocup. [m ² /p] | Cargas de Tomada [W/m ²] |
|-------------|---------|--------------|------------------------|-------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| | 1 | QUARTO1A | 11.55 | Sim | 34.65 | 1.85 | 12.00 | 5.77 | 19.91 |
| | 2 | QUARTO1B | 11.55 | Sim | 34.65 | 1.85 | 12.00 | 5.77 | 19.91 |
| | 3 | QUARTO2A | 11.55 | Sim | 34.65 | 1.85 | 12.00 | 5.77 | 19.91 |
| | 4 | QUARTO2B | 11.55 | Sim | 34.65 | 1.85 | 12.00 | 5.77 | 19.91 |
| | 5 | QUARTO3A | 11.55 | Sim | 34.65 | 1.85 | 12.00 | 5.77 | 19.91 |
| | 6 | QUARTO3B | 11.55 | Sim | 34.65 | 1.85 | 12.00 | 5.77 | 19.91 |
| | 7 | QUARTO4A | 11.55 | Sim | 34.65 | 1.85 | 12.00 | 5.77 | 19.91 |
| | 8 | QUARTO4B | 11.55 | Sim | 34.65 | 1.85 | 12.00 | 5.77 | 19.91 |
| | 9 | SALA1 | 18.09 | Não | 54.28 | 4.10 | 23.00 | 4.52 | 25.42 |
| | 10 | SALA2 | 18.09 | Não | 54.28 | 4.10 | 23.00 | 4.52 | 25.42 |
| | 11 | SALA3 | 18.10 | Não | 54.29 | 4.10 | 23.00 | 4.52 | 25.42 |
| | 12 | SALA4 | 18.10 | Não | 54.29 | 4.10 | 23.00 | 4.52 | 25.42 |
| | 13 | AREAINTERNA1 | 10.80 | Não | 32.41 | 0.00 | 10.00 | 0.00 | 156.69 |
| | 14 | AREAINTERNA2 | 10.81 | Não | 32.42 | 0.00 | 10.00 | 0.00 | 156.69 |
| | 15 | AREAINTERNA3 | 10.81 | Não | 32.42 | 0.00 | 10.00 | 0.00 | 156.69 |
| | 16 | AREAINTERNA4 | 10.81 | Não | 32.42 | 0.00 | 10.00 | 0.00 | 156.69 |
| | 17 | CIRCULACAO | 10.80 | Não | 32.40 | 0.00 | 5.00 | 0.00 | 0.00 |
| | 18 | ELEVADORES | 9.18 | Não | 27.54 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 19 | ESCADAS | 9.18 | Não | 27.54 | 0.00 | 6.00 | 0.00 | 0.00 | |

Tabela D5 - Resumo das características construtivas.

| Construções dos Modelos | Layers | Material | L [m] | k [W/m.K] | ρ [kg/m ³] | C _p [J/kg.K] | R [m ² .K/W] |
|--------------------------------|--------|---|-------|-----------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Vidros Externos | 1 | Vidro Simples Clear U = 5.4 W/m ² .K SHGC = 0.85 | 0.003 | - | - | - | - |
| Paredes Externas | 1 | Reboco | 0.020 | 1.9 | 1856 | 840 | - |
| | 2 | Tijolo | 0.190 | 0.89 | 1920 | 790 | - |
| | 3 | Reboco | 0.020 | 1.9 | 1856 | 840 | - |
| Parades Internas | 1 | Reboco | 0.015 | 1.9 | 1856 | 840 | - |
| | 2 | Tijolo | 0.140 | 0.89 | 1920 | 790 | - |
| | 3 | Reboco | 0.015 | 1.9 | 1856 | 840 | - |
| Pisos Externos | 1 | Laje Concreto Pesado | 0.200 | 1.95 | 2240 | 900 | - |
| Forros e Pisos Internos | 1 | Laje Concreto | 0.200 | 0.53 | 1280 | 840 | - |
| | 2 | Espaço de Ar | - | - | - | - | 0.18 |
| | 3 | Forro Acústico | 0.020 | 0.06 | 368 | 590 | - |
| Telhados Externos (Escritório) | 1 | Acabamento Externo | 0.025 | 1.8 | 2560 | 790 | - |
| | 2 | Laje Concreto | 0.200 | 0.53 | 1280 | 840 | - |
| | 3 | Espaço de Ar | - | - | - | - | 0.18 |
| | 4 | Isolamento Térmico | 0.025 | 0.03 | 43 | 1210 | - |

| | | | | | | | |
|--|---|--------------------|-------|-------|------|------|------|
| | 5 | Forro Acústico | 0.020 | 0.06 | 368 | 590 | - |
| Telhados Externos (Galpão) | 1 | Telha Metálica | 0.001 | 45.38 | 7824 | 500 | - |
| | 3 | Espaço de Ar | - | - | - | - | 0.18 |
| | 4 | Isolamento Térmico | 0.025 | 0.03 | 43 | 1210 | - |
| | 5 | Forro Acústico | 0.020 | 0.06 | 368 | 590 | - |
| Telhados Externos (Residencial baixa altura) | 1 | Telha Metálica | 0.001 | 45.38 | 7824 | 500 | - |
| | 3 | Madeira | 0.025 | 0.15 | 608 | 1630 | 0.18 |
| Telhados Externos (Residencial) | 1 | Acabamento Externo | 0.025 | 1.8 | 2560 | 790 | - |
| | 2 | Reboco | 0.020 | 1.9 | 1856 | 840 | - |
| | 2 | Laje Concreto | 0.200 | 0.53 | 1280 | 840 | - |
| | 4 | Isolamento Térmico | 0.025 | 0.03 | 43 | 1210 | - |
| | 5 | Forro Acústico | 0.020 | 0.06 | 368 | 590 | - |