

Laura Rendón Gaviria

**INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO URBANA NA GERAÇÃO
ENERGÉTICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
INTEGRADOS ÀS FACHADAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Fernando Oscar Ruttkey Pereira, PhD.

Co-orientador: Martin Ordenes Mizgier, Dr.

Florianópolis
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Rendón Gaviria, Laura
INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO URBANA NA GERAÇÃO ENERGÉTICA
DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS ÀS FACHADAS / Laura
Rendón Gaviria ; orientador, Fernando Oscar Ruttkay
Pereira ; co-orientador, Martin Ordenes Mizguier. -
Florianópolis, SC, 2013.
102 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo.

Inclui referências

1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Irradiação solar. 3.
Eficiência energética. 4. Potencial fotovoltaico. 5.
Contexto urbano. I. Ruttkay Pereira, Fernando Oscar . II.
Ordenes Mizguier, Martin. III. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e
Urbanismo. IV. Título.

Laura Rendón Gaviria

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Arquitetura e Urbanismo”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.

Florianópolis, 27 de Junho de 2013.

Prof. Ayrton Portilho Bueno, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, Dr.
Orientador - UFSC

Prof.^a Denise Helena Silva Duarte, Dr.^a
FAUUSP

Prof.^a Ana Ligia Papst de Abreu, Dr.^a
IFSC

Prof. Renato Tibiriçá de Saboya, Dr.
UFSC

Gracias Papá por ser mi constante motor!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os que de uma forma ou outra contribuíram para fazer possível este logro!

Obrigada família pelo apoio e motivação, especialmente obrigada mãe por sempre estar comigo.

Obrigada Jorge por me impulsionar e ensinar sempre!

Agradeço aos meus colegas pelas ideias, sorrisos, palpites, confusões, confraternizações e festinhas! Cada um de vocês contribuiu à finalização adequada deste lindo processo.

Obrigada Lê pelas inúmeras correções ao português, você fez a 'diferencia'! Obrigada Cata pelos conselhos e pensamentos conjuntos. Obrigada Caro pelas assessorias gráficas! Obrigada Carlos pelo grande apoio nos momentos difíceis, te amo! Obrigada Andrea e Olavo pela ajuda infinita e o carinho! Obrigada Marcelo pela sinceridade! Obrigada Vivi por me escutar e me apoiar! Obrigada Adri pela parceria! Obrigada Alejo pelo alento! Obrigada Lu pela confiança e o grande sorriso! Obrigada Andrea Invidiata pela força e o ânimo! Obrigada Nathy pelos momentos especiais! E obrigada Cíntia por ser referência de felicidade!

Obrigada Feco pela grande paciência e mais grande confiança!

Obrigada Martín por me acompanhar e guiar!

Obrigada Ana Maria e Mariany pela ajuda inmesurable!

Obrigada aos membros da banca pelas orientações e ideias!

Obrigada à CAPES pelo apoio financeiro.

Muito muito obrigada a toooooodos!

“No se hace arquitectura respondiendo a uno solo de estos factores por que el alma de nuestra labor está en balancear todos los elementos que participan en las fases de proyectación y construcción para lograr el equilibrio entre ciencia, arte y técnica que permite que la edificación sea útil a sus destinatarios y acorde al medio que le rodea.”

(SALAZAR, 1996)

RESUMO

O adensamento e o aumento no consumo de energia fazem dos centros urbanos um dos setores de maior impacto no balanço energético mundial, sendo responsáveis por 70% do consumo total de energia. Por outro lado, as fontes renováveis de energia estão se posicionando com força no mercado. A geração de energia fotovoltaica (FV) apresenta uma grande vantagem visto que geração e consumo podem ter coincidência espacial e temporal. Levando em consideração o formato principalmente vertical que possuem as edificações urbanas e a escassez de áreas horizontais disponíveis para a instalação de painéis fotovoltaicos, surge o objetivo principal do presente trabalho: avaliar o potencial de aplicação de painéis fotovoltaicos em fachadas de edificações em diferentes configurações urbanas, considerando o impacto do entorno construído. Foram analisados diferentes modelos variando parâmetros arquitetônicos e urbanos, por meio de simulações dinâmicas no plug-in DIVA dentro do programa Rhinoceros. Estabeleceu-se para cada configuração urbana o potencial de geração fotovoltaica das superfícies verticais opacas e finalmente foram identificados os modelos do cenário Miolo de Quadra como aqueles que apresentam a melhor relação entre geração e consumo. Contudo, os cenários com menor potencial de atendimento da demanda, foram os cenários Crescentes orientados para o Norte. Identificou-se que a determinação da eficiência dos modelos depende em grande medida da disponibilidade de superfícies para a geração FV (fachadas ou cobertura). Comprovou-se que conforme a Taxa de Ocupação aumenta, a razão entre geração e consumo possui uma tendência de aumento quando a conversão é realizada em fachadas e cobertura, gerando até 34% do consumo. No entanto, quando a integração FV se realiza apenas nas fachadas essa tendência se inverte, apresentando uma relação geração/consumo máxima de 9,3%. Observou-se que com a mudança da Taxa de Ocupação a influência dos parâmetros de construção no potencial de geração é variável. Finalmente a metodologia apresenta uma ferramenta bastante útil para o planejamento de centros urbanos eficientes e com potencial para geração de energia FV.

Palavras-chave: Irradiação solar, Potencial fotovoltaico, Sistemas integrados, Contexto urbano, Eficiência energética.

ABSTRACT

Cities densification process, added to growing energy consumption, make urban environments one of the greatest impact sector in energy balance, being responsible for 70% of the total energy consumption. On the other hand, renewable energy sources have been making great advances on the market, due to environmental concerns and the increase of fossil energy costs. Regarding PV energy conversion, the great advantage is the spatial and temporal coincidence of generation and consumption. Considering the mainly vertical format of urban buildings and the fact that there are not enough horizontal areas available for PV installation, is determinate the main objective of this survey: to assess the PV application potential in building facades within different urban contexts, considering the surroundings impact on the solar radiation availability. Different occupation models were analyzed by simulation on the Plug-in DIVA ran on Rhinoceros software, varying architectural and urban parameters. Was established for each urban model, the potential of PV generation of vertical opaque surfaces and finally the Cloisters' Models were identified for having the best generating/consumption ratio. Models with less potential for attending the energy demand were the Increasing North orientated. It was identified that the determination of the model's efficiency depends greatly on the kind of surfaces available for photovoltaic conversion (facades or roofs). Was proof as well, that with the increasing of occupation rate, the potential for energy generation have a growing tendency when the conversion occur on the facades and on the roof, generating until 34% of the consumption. However, when the conversion occurs just on facades, the tendency inverts, presenting a maximum generation/ consumption ratio of 9,3%. It was observed that when the occupation rate is modified, the influence of construction parameters on the energy generation potential is variable. Finally, the methodology presents a very useful tool for urban planning and for development of efficient urban context whit PV generation potential.

Keywords: Solar radiation, Photovoltaic generation, Building Integrated Photovoltaic, Urban environment, Energy Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comparação do crescimento da população mundial rural e urbana, desde 1950, com previsão até 2050. (ONU, 2011).....	1
Figura 2. Processo de crescimento e urbanização da população no Brasil, desde 1960 até 2010. (IBGE, 2010).....	2
Figura 3. Consumo final mundial desde 1971 até 2009, por fonte de geração. (IEA, 2011).	4
Figura 4. Geração de energia elétrica no Brasil em 2010. (MME, 2011).....	5
Figura 5. Capacidade instalada total mundial de energia solar fotovoltaica, de 1995 até 2011. (REN21, 2011).....	13
Figura 6. Relação das variáveis que influenciam o desenvolvimento dos sistemas fotovoltaicos. Produzido pelo autor.....	14
Figura 7. Tecnologias FV existentes e suas principais características. Produzido pelo autor.....	15
Figura 8. Evolução das diferentes tecnologias fotovoltaicas desde 1975 até 2012. (NREL, 2012)	17
Figura 9. Projetos BAPV e BIPV.	18
Figura 10. Mapa solarimétrico da média anual do total diário de irradiação solar global incidente no território brasileiro. (PEREIRA, E. B. <i>et al.</i> , 2006)	21
Figura 11. Plantas urbanas com as diferentes taxas de ocupação.	35
Figura 12: Cenários urbanos selecionadas para a criação dos modelos.	36
Figura 13. Exemplo dos modelos de simulação com o contexto urbano.....	37
Figura 14. Dimensões e especificações dos modelos.....	38
Figura 15. Resumo dos modelos, combinação das variáveis e codificação. Os modelos Uniforme, Pirâmide, Misto e Miolo de quadra foram avaliados para uma orientação só devido a sua simetria	38
Figura 16. Disposição dos pontos de análise nas superfícies a serem avaliadas.	39
Figura 17. Resultado gráfico gerado pela simulação no Plug-in DIVA, interface do Rhinoceros.....	41
Figura 18. Resultados numéricos em formato *.dat, gerado pela simulação no Plug-in DIVA.....	41

Figura 19. Perfil de consumo da tipologia de edificação predominante para Florianópolis. (SANTANA, 2006).....	46
Figura 20. Divisão das áreas dos modelos nas diferentes faixas DRS.	49
Figura 21. Níveis de radiação solar disponível nas superfícies externas. Modelos Uniformes.	52
Figura 22. Níveis de radiação solar disponível nas superfícies externas. Modelos Pirâmide.....	53
Figura 23. Níveis de radiação solar disponível nas superfícies externas. Modelos Mistos.	53
Figura 24. Níveis de radiação solar disponível nas superfícies externas. Modelos Miolo de Quadra.	54
Figura 25. Níveis de radiação solar disponível nas superfícies externas. Modelos Crescentes, orientados para o Norte.	55
Figura 26. Níveis de radiação solar disponível nas superfícies externas. Modelos Crescentes, orientados para o Leste.	56
Figura 27. Níveis de radiação solar disponível nas superfícies externas. Modelos Crescentes, orientados para o Sul.....	56
Figura 28. Níveis de radiação solar disponível nas superfícies externas. Modelos Crescentes, orientados para o Oeste.	57
Figura 29. Comparação da geração de energia fotovoltaica dos modelos quando levadas em consideração Fachadas e Fachadas + Cobertura.	61
Figura 30. Relação entre geração e consumo. Percentagem do consumo de cada cenário que é gerado pela produção FV.....	63
Figura 31. Fichas resumo do desempenho particular das edificações e da relação Geração/Consumo dos modelos Uniformes. Avaliação com e sem cobertura.	65
Figura 32. Fichas resumo do desempenho particular das edificações e da relação Geração/Consumo dos modelos Pirâmide. Avaliação com e sem cobertura.	66
Figura 33. Fichas resumo do desempenho particular das edificações e da relação Geração/Consumo dos modelos Mistos. Avaliação com e sem cobertura.....	68
Figura 34. Fichas resumo do desempenho particular das edificações e da relação Geração/Consumo dos modelos Miolo de Quadra. Avaliação com e sem cobertura.	69
Figura 35. Fichas resumo do desempenho particular das edificações e da relação Geração/Consumo dos modelos Crescentes, orientados para o Norte. Avaliação com e sem cobertura.	70

Figura 36. Fichas resumo do desempenho particular das edificações e da relação Geração/Consumo dos modelos Crescentes, orientados para o Leste. Avaliação com e sem cobertura.	71
Figura 37. Fichas resumo do desempenho particular das edificações e da relação Geração/Consumo dos modelos Crescentes, orientados para o Sul. Avaliação com e sem cobertura.	72
Figura 38. Fichas resumo do desempenho particular das edificações e da relação Geração/Consumo dos modelos Crescentes, orientados para o Oeste. Avaliação com e sem cobertura.	73
Figura 39. Influência da mudança de Taxa de Ocupação na eficiência dos modelos.	74
Figura 40 (a) (b) (c). Influência da alteração dos gabaritos na relação geração/consumo dos modelos Pirâmide.	76
Figura 41 (a) (b) (c). Influência da alteração dos gabaritos na relação geração/consumo dos modelos Mistos.	78
Figura 42. Influência da alteração dos gabaritos na relação geração/consumo dos modelos Crescentes, nas orientações Norte, Leste, Sul e Oeste.	80
Figura 43. Esquema explicativo do comportamento solar dos cenários Crescentes.	81
Figura 44. Médias da relação entre geração e consumo dos prédios da mesma altura em cada modelo. Comparação do aumento de dois em dois andares.	82
Figura 45. Sistema de numeração dos cenários Miolo de Quadra e do restante dos modelos.	85
Figura 46. Número de andares (contabilizados de cima para baixo) onde se recomenda integração FV para a geração de energia. Dados especificados por fachada nos modelos Uniformes.	85
Figura 47. Número de andares (contabilizados de cima para baixo) onde se recomenda integração FV para a geração de energia. Dados especificados por fachada nos modelos Pirâmide.	86
Figura 48. Número de andares (contabilizados de cima para baixo) onde se recomenda integração FV para a geração de energia. Dados especificados por fachada nos modelos Mistos.	86

Figura 49. Número de andares (contabilizados de cima para baixo) onde se recomenda integração FV para a geração de energia. Dados especificados por fachada nos modelos Miolo de Quadra.....	86
Figura 50. Número de andares (contabilizados de cima para baixo) onde se recomenda integração FV para a geração de energia. Dados especificados por fachada nos modelos Crescente, orientados para o Norte.....	87
Figura 51. Número de andares (contabilizados de cima para baixo) onde se recomenda integração FV para a geração de energia. Dados especificados por fachada nos modelos Crescente, orientados para o Leste.....	87
Figura 52. Número de andares (contabilizados de cima para baixo) onde se recomenda integração FV para a geração de energia. Dados especificados por fachada nos modelos Crescente, orientados para o Sul.	87
Figura 53. Número de andares (contabilizados de cima para baixo) onde se recomenda integração FV para a geração de energia. Dados especificados por fachada nos modelos Crescente, orientados para o Oeste.	88
Figura 54. Diretrizes gerais de projeto para a construção de centros urbanos que integrem sistemas FV.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Parâmetros de simulação adotados no Plug-in DIVA.....	66
Tabela 1.2. Parâmetros de simulação definidos como DEFAULT no Plug-in DIVA.....	66
Tabela 2. Cálculo do limite mínimo de disponibilidade de radiação para aproveitamento FV em superfícies verticais dentro de ambientes urbanos em Florianópolis. Para definição das faixas DRS.....	69
Tabela 3. Definição das faixas DRS segundo a contribuição das superfícies na disponibilidade de radiação solar.....	69
Tabela 4. Atribuição dos níveis de PAF às faixas DRS.....	70
Tabela 5. Características do módulo solar fotovoltaico adotado.....	71
Tabela 6. Divisão das áreas dos modelos nas diferentes faixas DRS.....	76
Tabela 7. Área efetiva para instalação FV, subtraindo as áreas das aberturas segundo a Faixa DRS (m ²).....	84
Tabela 8. Geração de energia FV de cada modelo para um ano completo (kWh/ano).....	86
Tabela 9. Andares recomendados para integração fotovoltaica nas fachadas das edificações. O número máximo de andares é contabilizado de acima para abaixo.....	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D – Duas dimensões

3D – Três dimensões

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

a-Si – Silício Amorfo

BAPV - Building Applied Photovoltaics

BBEZ – Bairro Balaço de Energia Zero

BIPV - Building Integrated Photovoltaics

CdTe – Telureto de Cádmiio

CIGS – Disseleneto de Cobre, Gálio e Índio

CIS - Disseleneto de Cobre e Índio

Cob - Cobertura

Cre – Crescente

c-Si – Silício Cristalino

DRS – Disponibilidade de Radiação Solar

E - Este

EBEZ - Edificações de Balanço de Energia Zero

Fac - Fachada

FCP - Fator de Céu Preferível

FCV - Fator de Céu Visível

FV – Fotovoltaico

GW – Giga Watts

IBGE - Instituto Brasileiro de Estatística e Geografia

IEA - International Energy Agency

Mio – Miolo de Quadra

Mis - Misto

MME – Ministério de Minas e Energia

m-Si – Silício Multicristalino

MW – Mega Watts

N - Norte

NREL - National Renewable Energy Laboratory

NURBS - Non-Uniform Rational B-splines

O - Oeste

ONU – Organização das Nações Unidas

PAF - Porcentagem de Aberturas de Fachada

PBT - *Pay-back-time*

Pir – Pirâmide

p-Si – Silício Policristalino

REN21 – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century

RSC - Royal Society of Chemistry

S - Sul

STC – Standard Test Conditions

SWERA - Solar and Wind Energy Resource Assessment

T – Todas as orientações

T.O. – Taxa de Ocupação

TRY – Test Reference Year

TW – Tera Watts

Uni – Uniforme

VDF - Fator de Luz Diurna Vertical

ZEB - Zero Energy Buildings

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. PROBLEMÁTICA	1
1.2. JUSTIFICATIVA	6
1.3. OBJETIVOS	10
1.3.1. Objetivo geral.....	10
1.3.2. Objetivos específicos.....	10
1.4. ESTRUTURA GERAL DO TEXTO.....	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1. SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO	12
2.1.1. Módulos solares fotovoltaicos	14
2.1.2. Integração dos sistemas FV nas edificações.....	17
2.2. RADIAÇÃO SOLAR	19
2.3. DETERMINAÇÃO DA DISPONIBILIDADE SOLAR NO MEIO URBANO.....	21
2.4. PARÂMETROS URBANOS E ACESSIBILIDADE SOLAR	26
2.5. INTEGRAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NAS EDIFICAÇÕES.....	29
2.6. FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO	32
2.6.1. Programa Rhinoceros 4.0.....	32
2.6.2. Plug-in DIVA 2.0	32
2.7. CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	33
3. METODOLOGIA	34
3.1. GERAÇÃO DOS MODELOS: PRIMEIRA ETAPA	34
3.1.1. Definição dos parâmetros.....	34
3.1.2. Síntese dos modelos base	37
3.2. FERRAMENTAS DE ANÁLISE	39
3.2.1. Construção dos modelos.....	39
3.2.2. Simulações de disponibilidade de radiação solar. Plug-in DIVA 2.0	39
3.3. PROCESSAMENTO DOS DADOS: SEGUNDA ETAPA.....	40
3.3.1. Simulações computacionais prévias	40
3.3.2. Criação das Faixas de Disponibilidade Solar.....	42
3.3.3. Definição do PAF para os cenários urbanos.....	43

3.3.4.	Escolha das características do sistema FV	44
3.4.	PROCESSAMENTO DOS DADOS: TERCEIRA ETAPA	45
3.4.1.	Cálculo da geração de energia	45
3.4.2.	Cálculo da demanda de energia	46
3.4.3.	Classificação das tipologias	47
3.4.4.	Relação entre os parâmetros de ocupação urbana e o potencial de geração de energia PV	47
4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	48
4.1.	DIVISÃO DAS FAIXAS DE DISPONIBILIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR	48
4.2.	CÁLCULO DA ÁREA OPACA DISPONÍVEL PARA INSTALAÇÃO DOS PAINÉIS	57
4.3.	CÁLCULO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA....	59
4.4.	COMPARAÇÃO ENTRE GERAÇÃO E CONSUMO.....	62
4.5.	FICHAS RESUMO DA EFICIÊNCIA GERAL DOS MODELOS	63
4.6.	RELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS DE CONSTRUÇÃO E A RAZÃO ENTRE GERAÇÃO E CONSUMO.....	74
4.6.1.	Variação da capacidade de atendimento da demanda com as diferentes Taxas de Ocupação.....	74
4.6.2.	Relação entre gabarito e potencial de atendimento da demanda.....	75
4.6.3.	Número de andares onde é recomendada a instalação FV.....	83
4.7.	CONSIDERAÇÕES DOS RESULTADOS	88
4.7.1.	Considerações sobre a influência dos parâmetros de construção	89
5.	CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES FINAIS	90
5.1.	CONCLUSÕES.....	90
5.1.1.	Diretrizes de projeto urbano para aumentar a eficiência energética dos centros urbanos.....	92
5.2.	LIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	93
5.3.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	94
	REFERÊNCIAS.....	96

1. INTRODUÇÃO

1.1. PROBLEMÁTICA

Historicamente, as cidades têm sido locais com maior densidade populacional quando comparadas com o restante do território, simplesmente porque no campo, as atividades agrícolas e pecuárias necessitam de grandes quantidades do solo para se realizar, limitando assim o aumento da população por metro quadrado de terra. Segundo Davis (1982), depois da Primeira Guerra Mundial, as populações urbanas começaram a aumentar além dos limites políticos das cidades, processo que já vinha ocorrendo após a revolução industrial (século XVIII), quando o desenvolvimento da urbanização acelerou-se significativamente. Na Figura 1 observa-se o ritmo acelerado que a urbanização da população mundial experimentou neste período.

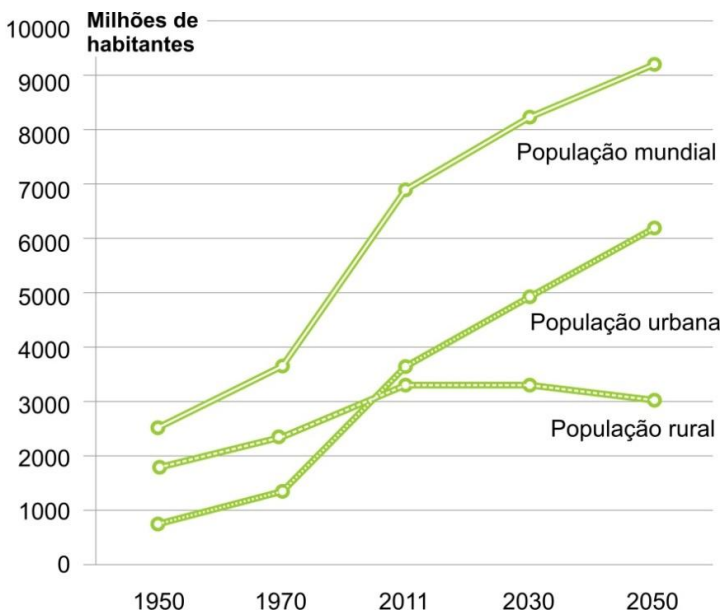


Figura 1. Comparação do crescimento da população mundial rural e urbana, desde 1950, com previsão até 2050. (ONU, 2011).

O surgimento de novas cidades e o crescimento das já existentes ocorreu principalmente a partir da metade do século

XIX, como consequência da união de vários fatores de ordem técnica, social e econômica, tais como: a criação de novos meios de produção em série, a descoberta de novas fontes de energia e o aprimoramento de materiais e técnicas de transporte e comunicações. Quanto à questão social, apresentaram-se importantes migrações campo – cidade, como decorrência da falta de investimento nas atividades agrárias e o auge do trabalho nas cidades, somado ao aumento demográfico da população já urbanizada. “[...] Uma porção substancial da população agrícola é, portanto, dispensável e inativa, e atraída pelos maiores salários das cidades” (DAVIS, 1982).

O ritmo de urbanização da população, ou seja, a mudança do local de moradia do campo para a cidade, tem então uma tendência de crescimento cada vez mais acelerada. Foi assim que, no ano de 2010, mais da metade da população mundial passou de população rural a urbana; e espera-se que essa porcentagem aumente para 75% no ano de 2025 (Figura 1). No cenário nacional, a urbanização também experimentou um crescimento bastante acelerado, ultrapassando, em 1963, a proporção de população urbana em relação à população rural (Figura 2). Como consequência do crescimento da população urbana, o tamanho e a densidade das cidades também aumentaram, colocando-as nos primeiros lugares das discussões meio ambientais (RUANO, 1999).

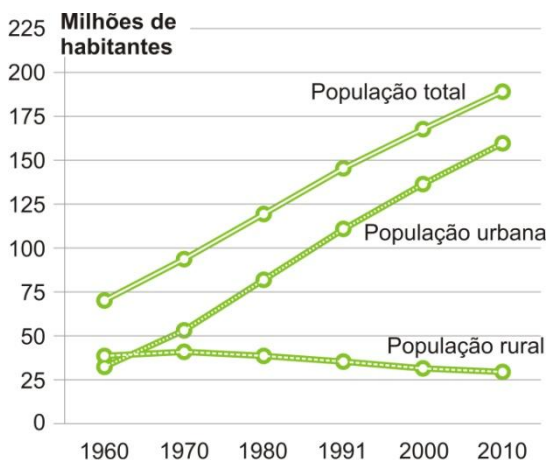


Figura 2. Processo de crescimento e urbanização da população no Brasil, desde 1960 até 2010. (IBGE, 2010).

Vale a pena destacar também que, com o processo de adensamento, somado ao desenvolvimento técnico na arquitetura, vem se adiantando paralelamente o processo de verticalização do parque urbano edificado. Com o avanço dos sistemas construtivos, a tendência das construções dentro dos centros urbanos é serem construídas cada vez mais altas, o que acarreta o aumento ainda mais acelerado do adensamento da população no território. Segundo dados do Ministério das Cidades (2010), a proporção da população que mora em centros urbanos brasileiros é de 82%, contrastando com o 10% do território que eles ocupam.

A urbanização do território traz como consequência o acréscimo na demanda de energia, simplesmente pelo aumento na quantidade de pessoas e equipamentos estabelecidos no mesmo território. Ainda, conforme Assis (2002), o adensamento dos núcleos urbanos ocasiona quedas importantes nos desempenhos dos edifícios e, portanto, aumentos sensíveis no consumo de energia referentes à iluminação auxiliar e condicionamento dos ambientes.

De acordo com Ruano (1999), os centros urbanos são responsáveis por 70% do total da energia consumida no mundo. Pela sua parte, as edificações comerciais e residenciais apresentam 52% do uso final da energia elétrica consumida na América Latina (IEA, 2011). Fica claro então, o impacto significativo que têm as cidades, como unidades e como sistemas, sobre o consumo final da energia e, conseqüentemente, o potencial que elas têm para diminuir de forma significativa os impactos negativos sobre o meio ambiente. Neste âmbito, é considerada a grande parcela de energia que é consumida pelas edificações residenciais e comerciais, o que possibilita que incluso pequenas reduções no consumo individual, representem grandes economias energéticas.

Complementarmente, os consumos finais energéticos a nível mundial tendem a um crescimento de aproximadamente 2% ao ano. Porém, a parcela dessa energia que é gerada por fontes renováveis só experimentou um crescimento de 1,7% desde 1973 até 2009 (Figura 3).

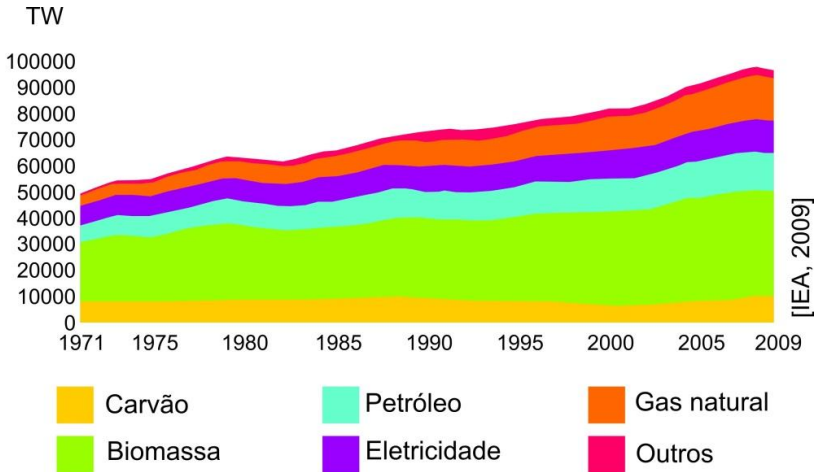


Figura 3. Consumo final mundial desde 1971 até 2009, por fonte de geração. (IEA, 2011).

No Brasil, a geração de energia elétrica apresentou, de 2009 para 2010, um aumento de 10%, mantendo como principal fonte a energia hidráulica, que apresentou uma elevação de 3,7% no mesmo período (MME, 2011). A Figura 4 mostra como no cenário nacional, 80% da energia elétrica é gerada por fontes renováveis, porém dentro dessa parcela, a contribuição de sistemas fotovoltaicos (FV) ainda é muito reduzida, não sendo ainda parte representativa da matriz energética nacional.

Embora a geração hidráulica seja considerada uma fonte renovável, ela tem impactos negativos sob o meio ambiente, por causa do alagamento de grandes áreas cultiváveis e dos gases efeito estufa que são expulsos na atmosfera como decorrência da degradação de matéria orgânica nos alagamentos (PEREIRA, E. B. *et al.*, 2006). Além disso, existem impactos sobre a fauna aquática por causa da construção e funcionamento das usinas. Similarmente, a energia eólica tem um grande potencial de geração energética no Brasil para as próximas décadas; porém, essa forma de geração também acarreta problemas ambientais como poluição sonora e visual, e pode interferir nas migrações de algumas espécies de pássaros, entre outros impactos ambientais significativos (MEIRELES, 2011).

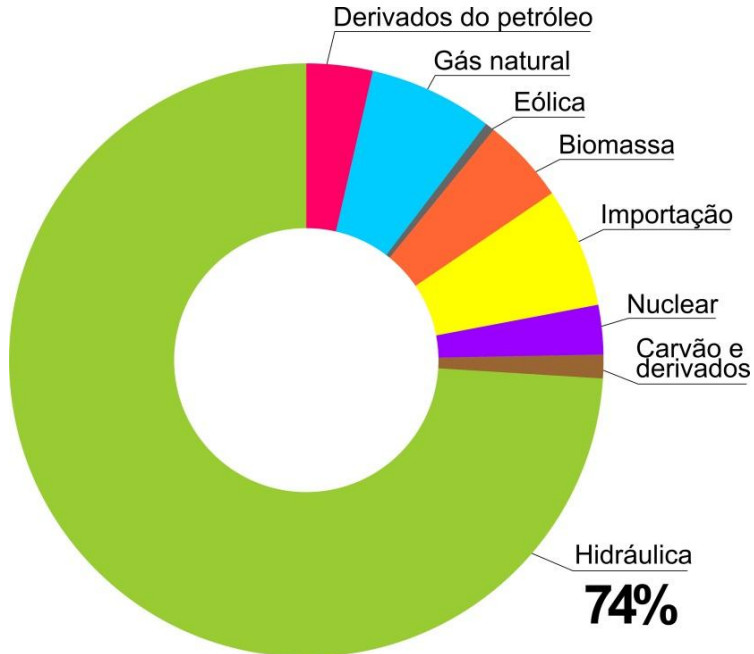


Figura 4. Geração de energia elétrica no Brasil em 2010. (MME, 2011).

A geração de energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico tem um grande potencial no Brasil, por se tratar de um país localizado na região tropical e com alta disponibilidade de radiação solar durante o ano inteiro. Além de ser uma fonte renovável e inesgotável, ela é não poluente, é silenciosa e não causa efeitos negativos sobre o meio ambiente (PEREIRA, E. B. *et al.*, 2006). Contudo, a participação da energia FV no consumo energético brasileiro em 2010 foi inferior a 2%.

A utilização de energias renováveis torna-se fundamental na implantação de Edificações de Energia Zero, ZEB (Zero Energy Buildings). Conforme, Carlisle, Geet, e Pless (2009), essas edificações atendem a totalidade (ou uma parcela importante) da sua demanda de energia por meio da geração energética por fontes renováveis. Além disso, a ZEB pode ser classificada segundo vários fatores como as fontes utilizadas para a geração da energia, decorrentes impactos sobre o meio ambiente, custos econômicos, entre outros. Assim, para uma edificação ser classificada como ZEB, devem ser calculados os

custos e benefícios energéticos, ambientais e econômicos de forma que o resultado seja sempre mais vantajoso nesses parâmetros. Contudo, uma edificação ZEB deve primeiramente, diminuir de forma significativa os consumos energéticos por meio de estratégias de uso eficiente dos recursos, para finalmente atender essa demanda por meio da geração de energia renovável.

Por fim, a combinação do crescimento da população urbana com a tendência de aumento do consumo de energia nos últimos anos, aponta à necessidade de estabelecer estratégias que aumentem a eficiência energética dos centros urbanos, por meio de fontes renováveis que não gerem efeitos negativos sobre o meio ambiente.

1.2. JUSTIFICATIVA

Em retrospectiva, a humanidade tem tido três grandes ondas de consciência energética. Em meados do século XX, após a Segunda Guerra Mundial, estimulados pela inovação na utilização de energia nuclear para usos não militares, começaram as primeiras preocupações por encontrar fontes alternativas aos combustíveis fósseis para a geração de energia (RUANO, 1999). Porém, a preocupação não era uma reflexão sobre a conservação do meio ambiente, mas sim uma questão econômica e de inovação tecnológica. Mais tarde, nas décadas de 1960 e 1970, depois da crise do petróleo, a visão da natureza como tela de fundo da vida humana começa a dar lugar a um pensamento com maior consciência social e ambiental. É nesse contexto que é introduzido, na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, o termo Sustentabilidade, e pela primeira vez são discutidas as implicações das atividades humanas no meio ambiente (ONU, 1972).

A terceira onda ocorreu em 1992, com a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro, na qual se apontou o termo desenvolvimento sustentável e foram proclamados vários princípios fundamentais que colocam o homem como centro das discussões sobre sustentabilidade:

O direito ao desenvolvimento deve ser exercido de modo a permitir que sejam atendidas equitativamente as necessidades

de desenvolvimento e de meio ambiente das gerações presentes e futuras.

Para alcançar o desenvolvimento sustentável, a proteção ambiental constituirá parte integrante do processo de desenvolvimento e não pode ser considerada isoladamente deste. (ONU, 1992, p.1)

O ritmo de crescimento do consumo energético, embora tenha experimentado algumas reduções (1,2% de 2008 para 2009) como consequência dessas três ondas de preocupação ambiental, ainda continua numa tendência ascendente. Torna-se fundamental então, o planejamento da construção de edificações e cidades mais sustentáveis, onde não só os consumos de energia sejam reduzidos, mas também que as fontes geradoras dessa energia não tenham efeitos negativos sob o meio ambiente. Além disso, é de extrema importância a escolha do tipo de geração energética para cada necessidade específica, pois perdas relacionadas com o transporte e distribuição dessa energia podem tornar inviável a implementação de algumas fontes, devido aos altos custos do transporte desde a fonte até o ponto de demanda, embora trate-se de uma fonte de energia limpa.

É nas cidades onde se encontram as maiores concentrações de edificações de formatos predominantemente verticais com usos comerciais e residenciais, representando 11% e 23% do total da energia elétrica consumida no Brasil, respectivamente (LAMBERTS; PEREIRA & DUTRA, 1997). Considerando-se esta informação, pode-se concluir que é nesses locais onde existem maiores demandas de energia. Segundo o Ministério de Minas e Energia (2011), o consumo energético do setor residencial, comercial e público experimentaram aumentos de 6,6% e 4,2% respectivamente de 2009 para 2010, o que confirma uma tendência crescente no gasto de energia elétrica a nível urbano.

Existem, como já mencionado, várias fontes de energia renovável com alto potencial de geração no Brasil. Porém, o presente trabalho foca-se nos sistemas solares fotovoltaicos, por se tratar de um tema ainda não o suficientemente explorado no meio urbano. No caso dos painéis fotovoltaicos (FV), são

necessárias grandes superfícies que recebam radiação solar. Porém, devido à alta densidade nas cidades, não há disponibilidade de tais espaços no plano base; e pela tipologia vertical da maioria das suas edificações, a reduzida área das coberturas não é suficiente para a aplicação de painéis que atendam a grande demanda ocasionada sobre tudo pelos usos residencial e comercial. No entanto, segundo Rüter (2004), os painéis fotovoltaicos podem ser usados nas fachadas das edificações como revestimento ou como elementos de sombreamento, com custos de instalação equivalentes aos custos de montagem de uma fachada envidraçada.

Assim, é interessante explorar a aplicação de painéis FV nas fachadas das edificações. Embora, pelas razões já explicadas, a área de superfícies verticais seja predominante, deve-se considerar que estas apresentam grandes desvantagens, pois a sua inclinação e o impacto da vizinhança restringem bastante a incidência da radiação solar. Faz-se necessário então, quantificar a radiação solar que recebem as fachadas para identificar o potencial de instalação de painéis FV, dependendo da altura do prédio, edificações vizinhas e orientação. Finalmente, deve ser salientada a grande vantagem da geração de energia por meio de sistemas fotovoltaicos dentro dos contextos urbanos:

Do ponto de vista da eficiência energética, estes sistemas podem ser considerados bastante ideais, visto que geração e consumo de energia têm coincidência espacial [...] (RÜTHER, 2004, p.12).

Estratégias como essa podem contribuir tanto ambientalmente como economicamente, pois o consumo de energia produzida por fontes não renováveis diminuiria substancialmente, reduzindo tanto o impacto ecológico quanto o custo neto da energia. Além disso, o aproveitamento da energia solar se apresenta como uma estratégia de dupla eficiência: por si só, ela é uma fonte de iluminação que pode, quando bem utilizada, reduzir substancialmente os gastos energéticos provenientes do uso da iluminação artificial e ao mesmo tempo, essa energia proveniente do sol pode gerar energia elétrica para ser utilizada na iluminação artificial nos períodos que não tem

penetração solar, ou para o funcionamento de aparelhos e eletrodomésticos. Embora a iluminação não seja o foco principal do presente trabalho, é um fato de grande importância, oferecendo mais uma vantagem à utilização de sistemas de conversão FV.

Entretanto, a integração de painéis fotovoltaicos às edificações (Building Integrated Photovoltaics, BIPV) para a geração de energia limpa, ainda não é uma prática muito utilizada nos países em desenvolvimento. Isso é consequência, em parte, da falta de informação sobre o funcionamento do sistema, os altos custos de instalação e a falta de informação sobre o potencial de aplicação do sistema nos meios urbanos (BAHAJ, 2005).

Grande parte dos potenciais investidores e produtores do setor energético não dispõem de informações nem de conhecimento, com o embasamento científico necessário, sobre as opções em fontes renováveis de energia e, por conta disso, tendem a evitar os riscos econômicos e financeiros associados ao desenvolvimento de projetos nessa área. (PEREIRA, E. B. et al., 2006, p. 11).

Diante deste ponto de vista e apontando mais uma vantagem da geração fotovoltaica, conforme Gadsden et al. (2003), a integração de sistemas solares nos centros urbanos é um passo importante na independência de fontes fósseis de energia e no combate das mudanças climáticas.

No Brasil recentemente foi lançada a Resolução Normativa N° 482, que apresenta as condições gerais para a instalação e operação de usinas de geração distribuída, que são aquelas instaladas próximas ao local de consumo e ligadas à rede elétrica pública. A norma expõe os critérios necessários para o funcionamento de usinas de até 1 MW de potência instalada, e estabelece as condições de compensação de energia, isto é, a possibilidade de injetar energia na rede pública quando a geração supere o consumo, e utilizar energia da rede quando o consumo seja maior (ANEEL, 2012). Além disso, é definido um prazo de 36 meses nos quais o consumidor pode acumular créditos pela energia que foi devolvida à rede. Isto possibilita um

aproveitamento maior da conversão fotovoltaica, mesmo se os picos de consumo e geração (diário e anual) não são coincidentes. Esse tipo de incentivos abrem o caminho para o aproveitamento do grande potencial de conversão fotovoltaica no país e permitem o conhecimento das vantagens ambientais e econômicas da utilização do sistema.

Levando-se em consideração todas as informações já mencionadas, surge a motivação principal do presente trabalho: verificar a influência de diferentes configurações urbanas sobre potencial de aplicação de painéis fotovoltaicos nas fachadas para a geração de energia elétrica.

Considerando-se que Florianópolis é uma capital com um dos menores níveis de disponibilidade de radiação solar do país, por causa da grande quantidade de horas que apresentam níveis altos de nebulosidade, as avaliações serão realizadas para o seu contexto climático, visando gerar conclusões que estejam baseadas nos parâmetros mais restritivos e garantindo assim a possibilidade de obter melhores resultados em outros casos de estudo.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo geral

Quantificar o potencial de geração de energia elétrica através da aplicação de painéis fotovoltaicos em fachadas de edificações em diferentes configurações urbanas.

1.3.2. Objetivos específicos

- Desenvolver e categorizar diferentes configurações urbanas a partir dos principais parâmetros de ocupação urbana.
- Analisar, mediante simulações computacionais, as condições de disponibilidade de radiação solar incidente nos planos verticais das edificações, nas diferentes orientações, em cada um das configurações urbanas.
- Classificar os diferentes cenários urbanos segundo o seu potencial anual de geração de energia elétrica nas diferentes orientações, através do recobrimento das fachadas com painéis fotovoltaicos.
- Avaliar o atendimento da demanda de energia elétrica nos diferentes cenários através da geração fotovoltaica.

1.4. ESTRUTURA GERAL DO TEXTO

O presente trabalho está dividido em cinco partes.

A primeira parte corresponde à introdução, onde são apresentados a problemática, justificativa e relevância do estudo e os objetivos geral e específicos.

Na segunda parte é apresentada a fundamentação teórica necessária para embasar a pesquisa e o cenário atual das investigações referentes à integração de sistemas fotovoltaicos em fachadas dentro de cenários urbanos, que permitiram compreender o desenvolvimento do assunto até o momento.

Na terceira parte é detalhado o processo metodológico que foi adotado para avaliar o potencial de geração FV de cada modelo urbano.

A quarta parte corresponde à exposição dos resultados produzidos com o desenvolvimento da metodologia proposta.

Na quinta parte são apresentadas as conclusões obtidas na pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

Finalmente, a sexta parte corresponde às referências bibliográficas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

A energia solar está disponível diariamente sem custo nenhum para ser aproveitada, entre muitas outras coisas, na geração de energia. Cada dia incide sobre a superfície da terra mais energia proveniente do sol do que a demanda energética mundial durante um ano (RÜTHER, 2004). Dessa forma, a conversão fotovoltaica (FV) é uma ótima oportunidade de geração de energia. Porém, em países como o Brasil, o uso desta tecnologia se limita ainda a poucos projetos, e a utilização em ambientes urbanos é pouco comum, refletindo no fato de que apenas 0,001% da potência instalada no país corresponde a fontes de geração FV (MME, 2011).

Segundo o Laboratório Nacional de Energia Renovável, NREL (2012), o efeito fotovoltaico (geração de carga elétrica quando um material condutor é exposto à luz solar) foi descoberto em 1954 e foi inicialmente usado na geração de energia em satélites e artefatos espaciais graças à durabilidade dos painéis e a pouca manutenção que eles requerem para funcionar adequadamente. Logo em seguida, os módulos fotovoltaicos começaram a ser utilizados para proporcionar pequenas quantidades de energia em aparelhos como calculadoras e relógios. Posteriormente, já nos anos 1980, surgiram as primeiras aplicações comerciais de sistemas fotovoltaicos que geravam energia elétrica para telecomunicações, bombeamento de água, aparelhos de navegação, entre outros (ZAHEDI, 2006). A partir desse ponto, a tecnologia fotovoltaica vem crescendo no mercado e seu uso está se expandindo pelo mundo de forma acelerada. Só no ano 2011, o mercado mundial de sistemas FV, aumentou 74% a sua capacidade instalada com respeito ao ano anterior. Pode-se observar uma tendência de crescimento bastante representativa desde 1995 até 2011, conforme apresentado na Figura 5 (REN21, 2011), o que leva a acreditar que o prognóstico para as próximas décadas seja o da expansão da utilização de sistemas fotovoltaicos a nível mundial.

Esse grande aumento da capacidade instalada a nível mundial surge como consequência principalmente de processos econômicos como a redução dos custos de produção dos módulos fotovoltaicos, que pela sua vez aparece como

decorrência do aperfeiçoamento técnico e do aumento da eficiência dos materiais de fabricação que a indústria fotovoltaica tem experimentado nos últimos anos. Além disso, a introdução de normativas, políticas de mercado e programas de incentivos tem estimulado apreciavelmente o uso de sistemas FV para a geração de energia elétrica (ZAHEDI, 2006; COLLE, ABREU, RUTHER, 2001). Do mesmo modo, a popularização do sistema de conversão fotovoltaica impulsiona cada vez mais o investimento do setor privado e público e da academia para a realização de pesquisas que melhorem a eficiência e/ou contribuam à redução dos custos de produção. A Figura 6 ajuda a esclarecer de forma esquemática a informação anterior.

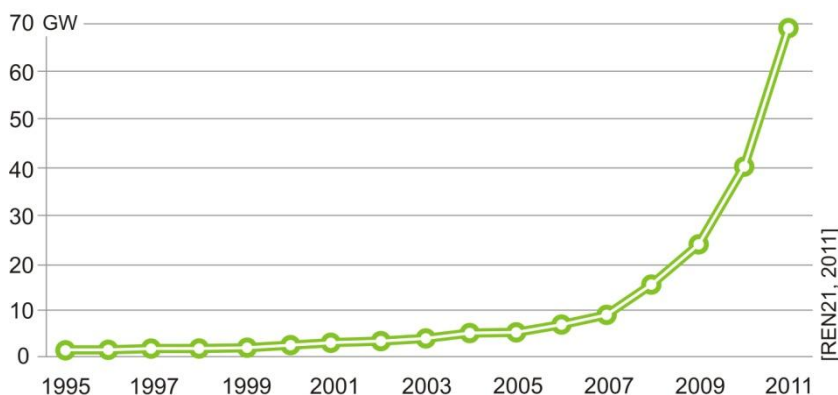


Figura 5. Capacidade instalada total mundial de energia solar fotovoltaica, de 1995 até 2011. (REN21, 2011).

No contexto brasileiro, como já foi mencionado, a participação da energia solar na matriz energética ainda é bastante reduzida, embora seja um país com um alto potencial de conversão fotovoltaica. Porém, pesquisas importantes tem sido desenvolvidas com o intuito de divulgar o potencial dos sistemas FV e disponibilizar informações que facilitem sua utilização no país (PEREIRA, et al., 2006; SANTOS, RÜTHER, 2012; CRONEMBERGER, CAAMAÑO-MARTÍN, SÁNCHEZ, 2012).



Figura 6. Relação das variáveis que influenciam o desenvolvimento dos sistemas fotovoltaicos. Produzido pelo autor.

2.1.1. Módulos solares fotovoltaicos

A geração de energia elétrica por meio de sistemas fotovoltaicos foi aproveitada inicialmente a bordo de aeronaves espaciais a meados do século XX. A partir dessa época, começaram-se a desenvolver usos terrestres para o fornecimento de energia de pequenos sistemas de comunicação e similares. Finalmente, após a crise de energia dos anos 1970, a utilização e investigação sobre os sistemas FV tem permitido o seu aperfeiçoamento e popularização.

O efeito fotovoltaico consiste na transformação da radiação solar em energia elétrica, e ocorre quando o raio solar atinge a superfície da célula solar, e é produzida então uma corrente elétrica devido ao movimento dos elétrons. Estas células são compostas por uma camada de um material semicondutor que permite a absorção de uma boa parcela do espectro solar. Na Figura 7 são apresentados os principais materiais semicondutores utilizados na fabricação de células FV e suas principais características (GOETZBERGER E HOFFMANN, 2005).



Figura 7. Tecnologias FV existentes e suas principais características. Produzido pelo autor.

Os módulos solares fotovoltaicos são formados por várias células dispostas em série uma do lado da outra. Dessa forma, a corrente elétrica gerada em cada uma é coletada por uma fina grade metálica que as cobre e depois é conduzida por meio de fios até o ponto de consumo. (GOETZBERGER & HOFFMANN, 2005).

Atualmente no mercado, existem quatro famílias principais de painéis fotovoltaicos, divididas segundo o material semicondutor usado para sua fabricação. A primeira, e ainda a mais comum no mercado, é a tecnologia de painéis a base de silício cristalino (c-Si). O silício é o segundo material mais comum no nosso planeta (RSC - ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY, 2013), porém devido às dimensões das lâminas usadas para a fabricação dos módulos, e ao alto nível de pureza que deve apresentar o material, a tecnologia apresenta custos bastante elevados. Contudo, as células de silício cristalino têm apresentado ótimos níveis de eficiência, perto de 27% (testes em laboratório), resultando em sua ampla difusão (RÜTHER, 2004).

A segunda família é composta pelos filmes finos. Essa família pode se dividir em dois grupos: filmes finos fabricados com silício amorfo hidrogenado (a-Si) e filmes finos não baseados em silício. A principal característica dessa família é a flexibilidade e versatilidade formal que vem da reduzida espessura da película, o que lhe dá a possibilidade de se integrar

de inúmeras formas nas coberturas e fachadas das edificações. Cabe salientar que os custos de fabricação e o pay-back-time¹ desse sistema são sensivelmente inferiores quando comparados com os sistemas c-Si, e a eficiência varia de 13% a 20% (JELLE; BREIVIK; RØKENES, 2012).

A terceira família são os sistemas fotovoltaicos multijunções, que se caracterizam por ter as eficiências mais elevadas: entre 30% e 40%. O sistema é baseado na superposição de duas ou três camadas de diferentes materiais semicondutores (diferentes ao silício), o que permite a absorção de uma maior quantidade de comprimentos de onda dos raios solares, (AMONIX, 2012).

A quarta família é composta pelas tecnologias fotovoltaicas que se encontram atualmente em desenvolvimento. Entre elas estão as células fotovoltaicas orgânicas, óxidos transparentes condutores, células solares sensibilizadas por corantes, entre outros. A característica principal dessas tecnologias é o seu custo reduzido de fabricação, porém elas apresentam as menores eficiências do mercado: de 7% até 12%. (NREL, 2012).

Na Figura 8 pode-se observar o processo de desenvolvimento das diferentes tecnologias ao longo das últimas duas décadas, e os níveis de eficiência que têm sido alcançados com cada uma delas. O gráfico é uma compilação de resultados de laboratório outorgados pelos principais produtores de células solares, como consequência os dados de eficiência são superiores às eficiências efetivas encontradas nos módulos comerciais. Percebe-se a tendência crescente que apresentam os sistemas FV emergentes que, segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos (2011), podem se converter em fortes competidores dos sistemas fotovoltaicos tradicionais, por meio da redução substancial dos custos de fabricação ou alcançando níveis de eficiência atraentes. De igual forma, os sistemas multijunções (ex. Disseleneto de cobre, gálio e índio) apresentaram uma forte melhora nos níveis de eficiência, colocando-os no primeiro lugar dentre os sistemas de conversão fotovoltaica. Já os sistemas baseados em silício e os filmes finos,

¹ *Pay-back-time*: É o tempo que demora um sistema solar FV em pagar o seu próprio custo. Ou seja, gerar economias equivalentes aos custos de materiais, fabricação e instalação do sistema.

que são os mais usados na atualidade, tem apresentado, nos últimos anos, aumentos desconsideráveis em suas eficiências. Pode-se concluir então que, embora as tecnologias mais comuns no mercado tenham quase esgotado as possibilidades de melhorar sua eficiência, o mercado solar fotovoltaico tem um grande potencial de desenvolver células comerciais com altas eficiências, e na mesma medida, aprimorar os processos de fabricação de modo a diminuir os custos totais do sistema. Isto pode ser verificado no fato de que o mercado atual está direcionando os esforços na redução dos custos de fabricação das células, ao invés de continuar aumentando as eficiências dos sistemas. Tudo isso, junto com a implementação de incentivos por meio dos governos, poderá provocar a popularização das tecnologias fotovoltaicas e então a projeção de cidades mais eficientes.

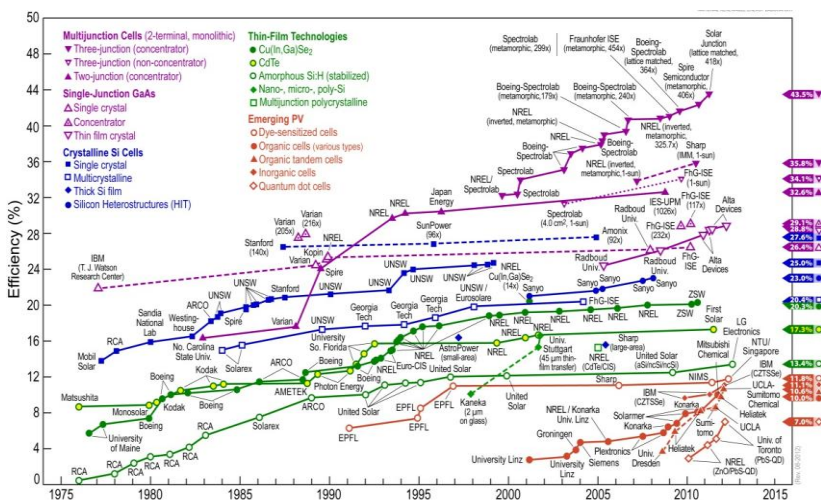


Figura 8. Evolução das diferentes tecnologias fotovoltaicas desde 1975 até 2012. (NREL, 2012)

2.1.2. Integração dos sistemas FV nas edificações.

Os painéis fotovoltaicos podem ser agrupados também segundo sua relação com a arquitetura. Os módulos fotovoltaicos aplicados às edificações, ou BAPV (Building Applied Photovoltaic), são aqueles painéis fixados ao envelope da edificação, mas que não fazem parte funcional dele. É comum o

uso de BAPV em residências ou edificações já construídas que instalam sistemas de conversão fotovoltaica sem fazer modificações arquitetônicas ou estruturais na edificação. Normalmente, tratam-se de módulos solares adicionados sobre alguma superfície da edificação, geralmente ocasionando uma perda na identidade estética do prédio.



Figura 9. Acima: projetos BAPV. (1) Imagem ilustrativa. Fonte: http://trinityerd.com/newsletter/_old_2009_06.html. (2) Energy Efficient House – Florianópolis. Fonte: (SANTOS; RÜTHER, 2012). (3) Imagem ilustrativa. Fonte: http://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/pv_tracking.php. Embaixo: projetos BIPV. (4) Imagem ilustrativa. Fonte: http://www.design-buildsolar.com/news/insight_management_acquires_rights_to_new_bipv_technology/. (5) The Visionaire - New York. Fonte: <http://www.greentechmedia.com/greentechlight/post/altpower-real-bipv>. Embaixo: projetos BIPV. (6) Imagem ilustrativa. Fonte: <http://lumensolar.wordpress.com/2010/03/25/bipv-crash-course-courtesy-of-solarity-lumen-solar/>.

Os sistemas BIPV (Building Integrated Photovoltaic), são constituídos por módulos fotovoltaicos integrados às edificações. A diferença fundamental com os BAPV é que eles fazem parte da estrutura ou envelope da edificação, e estão integrados não só estruturalmente com ela, mas também esteticamente (JELLE; BREIVIK; RØKENES, 2012). Segundo Cronemberger, Caamaño-Martínn e Sánchez (2012), existe tal integração quando os painéis cumprem uma dupla funcionalidade: arquitetônica e energética, substituindo algum elemento construtivo da edificação. Esses módulos tem uma série de vantagens, dentre

as quais cabe salientar a economia de material que representa a instalação dos módulos como parte do envelope da edificação, visto que eles irão substituir essa parte da fachada ou cobertura.

É importante apontar também que, graças à ampla variedade de elementos FV existentes no mercado, é possível ter grande liberdade estética e arquitetônica no desenvolvimento de um projeto BIPV. A Figura 9 exemplifica a comparação entre projetos BAPV e BIPV, respectivamente.

2.2. RADIAÇÃO SOLAR

A irradiação solar extraterrestre pode ser expressa como um fluxo constante incidindo perpendicularmente numa unidade de área determinada. Esse valor é chamado de Constante Solar e é equivalente a 1367 W/m^2 . Devido à composição da atmosfera terrestre e à quantidade de partículas suspensas nela e com o ângulo de incidência variável, a radiação que chega até a superfície da terra é menor do que a Constante Solar. Essa diminuição é calculada individualmente para cada local, conforme as condições ambientais como umidade, quantidade de nuvens, poluição do ar, entre outros. Contudo, a irradiação que influencia o sistema solar FV é constituída pela radiação solar que atravessou a atmosfera e as parcelas de radiação refletidas pelos elementos circundantes e pela abóbada celeste.

Calcular a radiação solar global é fundamental para avaliar o potencial de geração de energia e realizar o pré-dimensionamento do sistema solar fotovoltaico (FV). É importante considerar que a disponibilidade de radiação solar apresenta variações importantes dependendo da latitude do local, em função da geometria solar própria do local, horas de sol diárias, inclinação solar, etc. Adicionalmente, condições climáticas como a nebulosidade e mudanças sazonais devem ser levadas em consideração para a realização do cálculo de disponibilidade de radiação solar. A grande quantidade de fenômenos que influem e a própria natureza dinâmica deles, dificultam a determinação precisa da quantidade de radiação solar que atinge um determinado ponto (BAHAJ, 2005). Além disso, em contextos densamente edificadas, deve ser considerado cuidadosamente o sombreamento ocasionado pelas

edificações vizinhas, visto que é um das causas principais de quedas na eficiência dos sistemas FV (ZOMER, 2010).

Segundo o estudo de Cronemberger, Caamaño-Martín e Sánchez (2012), o ângulo de inclinação ótimo para sistemas FV é igual à latitude do local apenas para 11% das 78 cidades brasileiras estudadas. O restante apresenta os melhores rendimentos do sistemas com inclinações até 10° superiores ou inferiores à latitude local. Todavia, a orientação ótima é a orientação contrária ao hemisfério do local, porém, para localizações muito perto ao Equador, a diferença entre a disponibilidade solar entre Norte e Sul pode ser menor do que 5%. Resulta então, pouco significativo orientar o sistema para o Equador, visto que a insolação proveniente de Leste e Oeste pode ser maior do que a recebida nas superfícies orientadas para essa orientação. É importante considerar que, na maioria dos projetos BIPV, os painéis não responderão necessariamente à orientação e inclinação recomendados como ótimos, devido à sua integração na edificação, que responderá a parâmetros arquitetônicos, técnicos, estruturais e estéticos, e não só aos relacionados com a eficiência do sistema (VAN DER BORG; WIGGELINKHUIZEN, 2001). Devido a este fato, deve-se calcular cuidadosamente a disponibilidade de radiação solar nos diferentes planos da edificação com o objetivo de determinar as superfícies que possuam bom potencial de geração fotovoltaica.

No Brasil foi criado, dentro do marco do projeto SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment), o Atlas Brasileiro de Radiação Solar, visando incentivar e estruturar o desenvolvimento de projetos de energia solar e eólica no país. Conforme Pereira et al. (2006), o Brasil apresenta uma irradiação solar global anual entre 4200 kWh/m² e 6700 kWh/m² (Figura 10) e embora Florianópolis tenha um dos níveis mais baixos do país, é ainda superior aos da maioria dos países europeus como Alemanha (900 – 1250 kWh/m²), Espanha (1200 - 1850 kWh/m²) e França (900 – 1650 kWh/m²). É evidente então, o grande potencial que existe no país para o desenvolvimento de projetos de geração energética por conversão fotovoltaica.

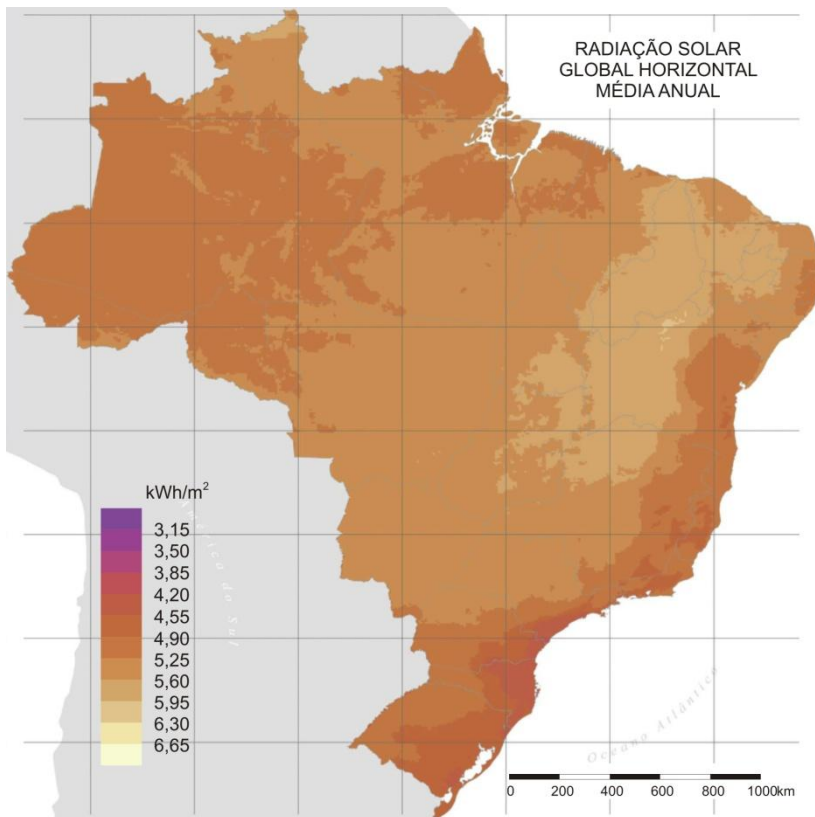


Figura 10. Mapa solarimétrico da média anual do total diário de irradiação solar global incidente no território brasileiro. (PEREIRA, E. B. *et al.*, 2006)

2.3. DETERMINAÇÃO DA DISPONIBILIDADE SOLAR NO MEIO URBANO

Dentre os estudos já realizados sobre a instalação de sistemas de geração fotovoltaica em cenários urbanos, existem análises baseadas tanto em estudos de caso e avaliações de cidades reais, quanto pesquisas que extraem os dados a partir de simulações computacionais. Porém, a grande maioria dos estudos realizados até o momento só consideram as coberturas das edificações como superfícies passíveis de receber painéis fotovoltaicos para gerar energia.

O objetivo principal dos estudos mais relevantes dentro da bibliografia consultada é encontrar o nível de sombreamento que as coberturas das edificações recebem, para assim calcular a área, ângulo de inclinação e tipo de painel ótimo que garanta a máxima eficiência do sistema de conversão. Isso é explicado pelo fato do sombreamento ser um fenômeno dinâmico, o que acaba dificultando bastante uma previsão acurada da geração energética de sistemas fotovoltaicos. Como decorrência, é necessário o desenvolvimento de metodologias que assistam engenheiros e arquitetos na projeção de sistemas fotovoltaicos eficientes integrados às edificações (ZOMER, 2010).

A grande maioria dos estudos realizados sobre acesso solar nos ambientes urbanos avaliam as edificações dentro do contexto edificado. Entretanto, é realizada a análise do comportamento de uma única edificação e não do desempenho de um grupo de edificações. Isto representa uma limitação, visto que fazer a avaliação isolada de uma edificação, levando em consideração a influência do contexto, vai refletir na recomendação de parâmetros arquitetônicos e urbanos para as edificações vizinhas sem analisar o desempenho delas. Contudo, há um conflito de interesses entre os diferentes blocos que conformam um determinado ambiente urbano na medida em que cada um deles ira bloquear uma parte da luz natural para os demais prédios e vice-versa (LITTLEFAIR, 1998).

Tregenza (1998) e Ng (2001) desenvolveram várias metodologias para estimar o ingresso solar em ambientes urbanos altamente adensados, demonstrando, ao contrário do pensamento de outros autores, o grande peso que tem as alturas das edificações na admissão de luz natural nos espaços urbanos. Nas metodologias desenvolvidas foram levados em consideração tanto os ângulos de obstrução solar verticais quanto horizontais. Contudo, na pesquisa de Littlefair (2001), o autor concluiu que para avaliações dentro de cenários urbanos, as técnicas baseadas nos ângulos de obstrução não resultam adequadas, devido à grande quantidade de variáveis arquitetônicas e urbanas (da edificação e das vizinhanças) que interferem no projeto. Para identificar o potencial de realização de projetos solares passivos, o autor recomendou uma série de metodologias desenvolvidas por ele anteriormente. Porém, é observado que as técnicas mencionadas estão desenhadas para orientações e latitudes específicas. Além disso, propôs uma

metodologia baseada na quantificação da porcentagem de perdas nos níveis de iluminação causadas pelas ações arquitetônicas. Finalmente, Littlefair (2001) indicou como estratégia no planejamento urbano, o cálculo de uma área de céu que deve ficar descoberta de qualquer obstáculo, visando garantir determinados níveis de iluminação. Pela sua vez, Sánchez, et al. (2005), desenvolveram uma metodologia para a avaliação da disponibilidade de radiação solar nas superfícies externas de edificações. Seu estudo estimou separadamente a parcela da radiação direta e refletida e utilizou um processo de retro-projeção dos raios para identificar a existência ou não de obstáculos (projeção desde o ponto até a fonte). Visto que só pode ser feita a avaliação de um ponto de cada vez, é uma metodologia estática que apresenta limitações na representatividade espacial dos resultados.

Existem, dentro da bibliografia analisada, vários estudos focados no comportamento da iluminação natural dentro de cenários urbanos. Embora este não seja o foco específico do presente trabalho, são estudos que permitiram embasá-lo de forma sólida visto que muitos dos conceitos, metodologias e ferramentas utilizadas são também válidos para a análise da insolação. Ng (2005), focou no cálculo do Fator de Luz Diurna Vertical (VDF) nas fachadas, concluindo que diferenças maiores entre as alturas das edificações resultam em vantagens nos níveis de iluminação, quando comparado com edificações de alturas mais uniformes. Nesse contexto, cabe salientar o trabalho de Ng (2005), que estudou a relação entre o comportamento da luz natural e a diferença de altura de prédios inseridos em configurações urbanas de alta densidade. Nesse estudo foram avaliados vários conjuntos de edificações como um sistema e não só o desempenho de uma edificação isolada. Similarmente, Pereira et al. (2001), determinaram um volume hipotético dentro do qual dever-se-ia inserir cada edificação de forma a garantir que todos os elementos do contexto urbano tivessem boas condições de iluminação e insolação. Nesse estudo, é interessante destacar que parte-se de uma configuração urbana estabelecida (em planta) e condições de iluminação alvo, e a partir disso são criados os limites tridimensionais para a construção das edificações. Leder e Pereira (2009), também realizaram comparações de diferentes tipologias de ocupação urbana em função da disponibilidade de luz natural. Nesse caso,

foi utilizado o parâmetro de Janela de Céu Preferível, que corresponde à porção de céu responsável pela maior disponibilidade de iluminação natural num ponto interno da edificação. Este parâmetro é definido pelos ângulos de azimute e altura (LEDER, PEREIRA, 2009; PEREIRA, 2008). Concluiu-se que cenários com gabaritos e afastamentos uniformes resultam bastante desfavoráveis para a disponibilidade de iluminação natural e pelo contrário, os cenários com miolo de quadra apresentam consideráveis melhorias no desempenho. Além disso, foi identificado que o parâmetro de maior influência nas tipologias mais uniformes é o afastamento entre as edificações e para tipologias de miolo de quadra tem maior impacto as variações de altura (LEDER, PEREIRA, 2009).

Loulas et al.,(2012) avaliaram, por meio da simulação de uma porção de cidade real, o lucro econômico de um sistema de conversão FV instalado nas coberturas, levando em conta os cálculos de sombreamento das superfícies. Similarmente, Hofierka e Kaňuk (2009) estudaram o potencial de aplicação de módulos solares fotovoltaicos nas coberturas de prédios numa cidade existente, por meio de simulação computacional. Embora o autor reconheça o potencial que tem as fachadas para receber também painéis, os modelos 2D usados nas simulações não permitiram a avaliação das superfícies verticais. Esse estudo concluiu que, graças à tipologia predominantemente horizontal dos prédios, 2/3 da energia consumida na cidade escopo poderia ser gerada pelo sistema FV aplicado nas coberturas. Cabe ressaltar que nesse caso, o alto potencial de geração energética das coberturas é contrastado com a reduzida quantidade de energia que se poderia gerar com módulos FV instalados nas fachadas. Similarmente, Gadsden et al. (2003), desenvolveram um método baseado em várias etapas, com o objetivo de avaliar edificações (ou conjuntos de edificações) reais para identificar aquelas que possuem o maior potencial para instalação de sistemas fotovoltaicos. Estas etapas baseiam-se na avaliação das condições físicas e socioeconômicas do prédio, e finalmente no cálculo do potencial de geração energética. Dessa metodologia, vale a pena salientar que condições socioeconômicas como: tipo de morador (locatário ou proprietário), renda dos ocupantes, uso da edificação e valor da edificação, têm bastante influência no potencial de instalação FV, porém não são levadas em consideração na maioria dos

estudos. Já Mardaljevic e Rylatt (2003), desenvolveram uma ferramenta bastante acurada para a previsão da radiação solar incidente nas superfícies de contextos urbanos, baseada em mapas de cor falsa. A principal contribuição do estudo é a possibilidade de gerar resultados dinâmicos tanto no tempo, quanto no espaço (utilizando arquivos climáticos TRY), como também a simulação separada do componente solar e celeste, que decorre na alta precisão dos dados. Além disso, é uma ferramenta aplicável a diferentes escalas de avaliação: desde uma única edificação até porções completas de cidades. No entanto, segundo os autores, o tempo de simulação e os requerimentos de potência computacional são bastante elevados.

Cronemberger, Caamaño-Martín e Sánchez (2012), estudaram a disponibilidade de radiação solar em 70 cidades do Brasil com o intuito de determinar as condições ótimas para a instalação de sistemas de conversão fotovoltaica nesses locais. Concluíram que painéis FV aplicados nas fachadas das edificações podem receber até 60% da radiação solar incidente num sistema colocado na inclinação ideal, e esse valor é ainda 14% maior do que a disponibilidade numa fachada sul em Munich.

Conforme Di Vincenzo, Kesten e Infield (2010), em ambientes urbanos é importante calcular a inclinação ótima para os módulos fotovoltaicos, de forma a garantir o melhor desempenho possível. Os autores demonstram que, em alguns casos, o ângulo ideal de inclinação pode não ser a latitude do local, como é comumente recomendado na literatura. Isso deve-se aos altos níveis de sombreamento presentes nos centros urbanos e ao possível auto sombreamento do próprio sistema.

O estudo de Michael, Bougiatioti e Oikonomou (2010) traz como inovação o cálculo da radiação global no plano horizontal, para cada mês, em várias cidades mediterrâneas, ao longo do ano inteiro. Porém, a avaliação dos diferentes modelos de contextos urbanos em função da relação entre afastamento e altura dos prédios só é realizada para a época do verão. Isto limita novamente os resultados, devido à impossibilidade de generalizar e aplicar o cálculo em outras épocas ou climas diferentes.

Okeil (2010) apontou na sua pesquisa, para a necessidade de projetar edificações que não só atendam o conforto humano, mas também integrem bons níveis de acesso solar e ajudem a

controlar o clima urbano. O autor comprovou que é possível projetar edificações eficientes energeticamente tanto para o inverno quanto o verão, mantendo bons níveis de conforto no espaço urbano e conservando um bom aproveitamento do solo. O estudo conclui que ainda é necessária a determinação de indicadores solares que assistam os projetistas a tomar decisões dirigidas ao aproveitamento solar. Nessa linha, é interessante a contribuição do trabalho de Cherqui, et al.(2005), que sugere os indicadores solares mais importantes para projetar contextos urbanos eficientes. Porém, os autores salientam que ainda é necessária a determinação da influência que os parâmetros têm em cada projeto específico, para fixar os limites dentro dos quais devem-se inserir.

2.4. PARÂMETROS URBANOS E ACESSIBILIDADE SOLAR

Conforme Ng (2005b), devido à grande dificuldade de avaliar as condições de acesso solar nos cenários urbanos, é necessário identificar quais parâmetros urbanos afetam em maior ou menor medida o fenômeno. Contudo, não é suficiente a identificação, mas sim a caracterização precisa da influência que cada um dos parâmetros tem sob a acessibilidade da luz solar, de forma a possibilitar a definição dos seus limites em função do desempenho solar esperado. O autor destaca também a importância de gerar uma base científica sólida, baseada na avaliação exaustiva do fenômeno, que permita a correta inclusão de diretrizes nos documentos normativos. Nesse sentido, conforme Gadsden et al. (2003), o desenvolvimento de metodologias que avaliem o potencial econômico e energético da geração de energia fotovoltaica, influencia de forma positiva a popularização dos sistemas na medida em que é possível prever os benefícios da sua aplicação e gerar dados concretos e segurança para os possíveis investidores. Isto, conseqüentemente decorre no interesse da população por utilizar sistemas eficientes que reduzam os impactos ao meio ambiente. Já Li et al. (2006) identificaram os principais parâmetros que comprometem os níveis de iluminação natural dentro do ambiente urbano, destacando a orientação e a altura da janela dentre os mais significativos. Adicionalmente, determinaram que para ângulos de obstrução verticais de até 30°, são observadas as maiores reduções nos níveis de fator de luz diurna, enquanto

que obstruções superiores não geram reduções adicionais significativas. Cabe destacar que os níveis mínimos de disponibilidade de radiação solar devem ser assegurados para os andares inferiores das edificações, de forma a garantir um desempenho acima desses limites no total da edificação. Contudo, é possível ainda gerar níveis excessivos nos andares superiores, fazendo-se necessária uma revisão criteriosa do projeto, para assim prever o excesso de acessibilidade solar. Leder e Pereira (2009), analisaram o impacto dos limites máximos de construção permitidos pelos documentos normativos da cidade de Florianópolis, no desempenho da luz natural. Foram implementados nas avaliações, os parâmetros Fator de Céu Visível (FCV) e Fator de Céu Preferível (FCP), identificando uma estreita relação com os níveis de Fator de Luz Diurna e níveis de iluminação no interior dos espaços. Baseados nisso, foi validada a aplicabilidade do parâmetro FCP no planejamento urbano. Da mesma forma, esses parâmetros são aplicáveis para as avaliações de disponibilidade de irradiação solar nos envelopes de edificações dentro dos contextos urbanos.

Ng e Wong (2004) estudaram por meio de modelos paramétricos, a influência da densidade, afastamento entre edificações e gabarito, nos níveis de iluminação disponíveis num contexto urbano. Encontraram aumentos de 20% a 30% nos níveis de luz natural nos contextos com alturas variáveis, concluindo que é possível garantir a mesma disponibilidade de iluminação natural num cenário 13% mais denso e apresentando alturas variáveis, quando comparado com um que apresenta alturas constantes. Os autores apontaram então, para a possibilidade de planejar cidades eficientes e com bons desempenhos ambientais sem sacrificar o aproveitamento do solo. Similarmente, as conclusões de estudos como este, podem ser aplicadas para identificar a influência desses parâmetros na disponibilidade de radiação solar nas superfícies de edificações inseridas em contextos urbanos. Embora a quantidade de iluminação natural não é sempre proporcional à quantidade de radiação solar, as ferramentas utilizadas para quantificar ambas podem ser similares. Visto que a radiação solar é um dos parâmetros que influenciam iluminação natural, é possível utilizar os mecanismos de avaliação dela, levando em consideração só a porção solar, para a avaliação do desempenho da disponibilidade de radiação solar.

Igualmente, Di Vincenzo, Kesten e Infield (2010), avaliaram o desempenho de elementos de sombreamento com sistemas FV integrados na conversão de energia. Identificou-se a relação entre gabarito e afastamento dos prédios como o fator de maior influência na produção energética, devido ao sombreamento. Os autores recomendam, especialmente no inverno, uma análise criteriosa do comportamento do sistema solar fotovoltaico, pois a reduzida altura solar somada à alta densidade edificada podem acarretar em reduções significativas na eficiência. Por fim, os autores concluíram que é possível obter economias de até 35% no consumo de energia por meio da inclusão adequada da iluminação no projeto urbano.

Assis (2002), visando a inclusão normativa de parâmetros que garantam a disponibilidade de iluminação natural dentro dos núcleos urbanos, estabeleceu três modelos urbanos de conversão: o primeiro só considera as coberturas como superfícies conversoras, resultando num potencial de geração reduzido, em contraste com um alto potencial de ocupação do solo. O segundo modelo analisa a totalidade do envelope como superfície conversora, e embora traga um maior potencial de conversão, surgem limites nos afastamentos e gabaritos que diminuem o aproveitamento do solo. O último modelo tem o maior potencial de geração, e adicionalmente apresenta bons níveis de insolação no espaço urbano, por considerar não só a edificação como área de conversão, mas também o solo urbano. No entanto, conta com o potencial de construção mais baixo. É interessante destacar que a categorização de diferentes zonas dentro das cidades pode ajudar na aplicação de normativas urbanas visando obter o máximo do potencial de cada tipologia urbana, tanto em termos de conversão quanto ao aproveitamento do solo. Nesse contexto, cabe salientar o estudo de Okeil (2010), que destaca a determinação normativa de limites de construção específicos para zonas muito extensas das cidades, uma das principais causas da projeção de grandes áreas urbanas com edificações com alturas similares. É importante então, refletir sobre o adequado zoneamento das cidades, de forma a garantir heterogeneidade nas alturas e afastamentos das edificações.

De acordo com o trabalho de Van Esch, Looman e De Bruin-Hordijk (2012), os afastamentos entre edificações e as características formais deles afetam a incidência de radiação solar nos seus envelopes. Todavia, obstruções e elementos de

sombreamento diminuem a quantidade de radiação recebida pelas superfícies externas da edificação, da mesma forma que a própria edificação bloqueia os raios solares em direção de outras edificações ou dos arredores. Nesta pesquisa, os autores procuraram encontrar uma disposição urbana adequada para duas edificações de forma a garantir os maiores níveis de ganho solar, tanto nos envelopes das edificações quanto no próprio espaço urbano. Concluíram que o parâmetro mais influente na quantidade de radiação solar recebida nas superfícies é o afastamento entre os blocos. No entanto, a orientação e a forma do telhado não resultaram em muitas diferenças nesse aspecto.

2.5. INTEGRAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NAS EDIFICAÇÕES

Vartiainen (2001) estudou varias tipologias de fachada com painéis fotovoltaicos e aberturas de vidro claro, visando encontrar uma configuração de fachada que otimizasse a relação entre ingresso solar e potencial de geração fotovoltaica. O estudo demonstrou que fachadas cobertas com painéis fotovoltaicos e com uma Porcentagem da área de Aberturas pela área da Fachada (PAF) de 24% apresentam o melhor desempenho em função da relação entre geração FV e iluminação natural ao interior dos espaços. É importante levar em consideração a proporção entre aberturas e painéis opacos, para evitar a cobertura excessiva com painéis FV, em detrimento do PAF, e conseqüentemente dos níveis de iluminância e conforto ao interior dos espaços. Uma grande área de fachada disponível para a conversão de energia solar refletirá num importante potencial de energia gerada, porém poderá reduzir de forma significativa a admissão de luz no espaço interno, decorrendo em níveis de iluminação inadequados para a realização das tarefas, falta de conforto e também um aumento sensível no gasto de energia diante da maior necessidade de iluminação artificial. Contudo, segundo Vartiainen (2001), essa relação não é proporcional, visto que uma fachada com 24% de PAF apresenta maiores benefícios energéticos (levando em consideração a geração FV da porção opaca da fachada e a acessibilidade da luz natural) quando comparada com uma fachada de 60% de PAF e outra de 14%. Percebe-se então, que deve ser realizada uma análise precisa da relação adequada entre a instalação de

sistemas fotovoltaicos e as áreas de aberturas, baseado nos parâmetros arquitetônicos e ambientais de cada caso, de forma a garantir o melhor desempenho energético e luminoso.

Cabe salientar que, conforme a eficiência dos sistemas de iluminação artificial aumenta, uma determinada quantidade de luz admitida num espaço, através de uma abertura, representa um investimento econômico cada vez menor em luz artificial. Isto decorre na necessidade de recalcular constantemente a relação entre PAF e área para conversão fotovoltaica nas fachadas, que garanta os melhores benefícios energéticos. Nessa mesma linha, Salazar et al., (2009) apontaram que metodologias que integrem variáveis de sombra e luz, apresentam melhores resultados na eficiência energética, do que estudos que avaliam os parâmetros separadamente.

É identificado também, no estudo de Vartiainen (2001), como a escolha das diversas tecnologias fotovoltaicas influencia de forma significativa os cálculos de previsão de geração energética, em função da variabilidade nos níveis de eficiência de um sistema para outro. Contudo, Michael, Bougiatioti e Oikonomou (2010) apontaram que em localidades com razoáveis quantidades de horas de sol e boa radiação incidente, a produção de energia pode ser considerada eficiente economicamente, ainda no caso de sistemas com baixas eficiências.

Vartiainen (2001) ainda faz reflexões interessantes sobre a adequada proporção entre área de abertura e área de módulos FV nas fachadas, sendo uma das únicas que considera a opção de instalação de painéis FV nas superfícies verticais. Dentro do estudo não são considerados os sombreamentos devido ao entorno, o que diminui a aplicabilidade dos resultados em contextos urbanos onde a possibilidade de se ter superfícies externas que não sejam sombreadas, é quase nula.

Similarmente, Ordenes et al. (2007) estudaram o resultado da aplicação de painéis FV numa edificação em diferentes contextos climáticos. Verificaram que para o caso de estudo (uma edificação com 16m x 9m de planta, quatro andares de 2,8m cada e PAF de 18%), a soma do potencial de geração de energia por conversão fotovoltaica das quatro fachadas é equivalente à geração da cobertura. Vale a pena ressaltar que é interessante então avaliar o potencial conjunto resultante da aplicação de módulos solares nas fachadas e na cobertura,

sendo que dependendo do formato da edificação, terá mais vantagens uma ou outra situação. Contudo, o cálculo cuidadoso do potencial global da edificação irá decorrer na obtenção da máxima eficiência possível do sistema.

Hwangm, Kang e Kim (2012) mostraram as possibilidades de integração de painéis fotovoltaicos em elementos de sombreamento nas fachadas de edificações de formatos predominantemente verticais. Calcularam a disponibilidade de radiação solar sobre cada sistema, para finalmente encontrar que porcentagem da demanda energética da edificação foi atendida pela geração FV. No estudo, encontraram os sistemas de BIPV mais eficientes dependendo da orientação, tamanho e inclinação dos módulos.

A geração distribuída, ou seja, a geração de energia elétrica realizada próxima do ponto de consumo, traz como vantagem a possibilidade de criar mini-usinas geradoras com potências que se acoplem às demandas próprias de cada projeto. Além disso, apresentam uma grande redução nos custos, devido ao fato de não precisarem de investimentos para ampliação da rede elétrica e as perdas energéticas por transmissão e distribuição são quase eliminadas (ZOMER, 2010). O foco desta pesquisa é o estudo da geração distribuída em diferentes cenários urbanos, sem a utilização de baterias para o armazenamento da energia gerada e não consumida. É importante levar em consideração que nesse caso, o potencial de geração de energia anual pode não ser equivalente à quantidade de energia FV consumida (HOFIERKA E KAŇUK, 2009). Ou seja, não é possível avaliar corretamente a eficiência do sistema, estabelecendo que 100% da energia gerada será consumida pela edificação, visto que pela inexistência de sistemas de acumulação, a geração e a demanda devem ter coincidência temporal. Porém, existe a possibilidade de interligar o sistema fotovoltaico à rede elétrica pública, de forma a não desperdiçar a energia gerada que não seja consumida. Comumente, quando a geração é maior do que o consumo, a energia remanescente é injetada na rede elétrica e são acumulados créditos energéticos a favor da edificação geradora. Similarmente, quando a instalação consumidora não consegue suprir a demanda, é consumida energia proveniente da rede elétrica (RÜTHER, 2004).

Os consumos energéticos mudam conforme muda o clima (ORDENES et al., 2007), comprometendo assim o cálculo da

relação entre consumo e geração. Além disso, a eficiência de algumas tipologias de módulos solares pode ser comprometida devido a altas temperaturas (comuns no verão), afetando também a taxa de geração energética.

Finalmente, vários autores citaram como vantagens da utilização de sistemas BIPV a economia decorrente da supressão da totalidade ou de uma parte dos materiais do envelope; o valor arquitetônico que o sistema pode dar às edificações (ORDENES *et al.*, 2007) e a sensibilização dos usuários quanto ao uso eficiente da energia e às fontes renováveis de energia (MICHAEL; BOUGIATIOTI; OIKONOMOU, 2010). Além da principal vantagem, que é a capacidade da edificação de gerar a própria energia que vai consumir, sem acarretar poluição ou nenhum outro efeito negativo sob o meio ambiente.

2.6. FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO

Nessa seção são apresentadas as ferramentas de análise utilizadas no desenvolvimento do presente trabalho.

2.6.1. Programa Rhinoceros 4.0

Rhinoceros é uma ferramenta de modelagem 3D desenvolvida por Robert McNeel & Associates, que permite a representação de uma grande quantidade de elementos em diversas escalas. Trata-se principalmente de um modelador de superfícies tipo NURBS, (non-uniform rational B-splines) que são representações matemáticas de geometrias 3D que descrevem de maneira precisa elementos de qualquer formato. Adicionalmente é possível editar a geometria, orientação, tipologia e materiais dos elementos para exporta-los a outros programas ou para inclui-los em simulações dentro de algum dos diversos Plug-ins compatíveis com o programa (ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES, 2008).

2.6.2. Plug-in DIVA 2.0

O plug-in foi desenvolvido por Jakubiec e Reinhard, baseado em algoritmos de programas de simulação como Radiance, Daysim e EnergyPlus. O programa trabalha sob a interface do programa Rhinoceros, possibilitando a manipulação gráfica dos modelos e a conferência dos inputs diretamente na tela. É utilizado um arquivo climático de base horária,

possibilitando a realização de simulações dinâmicas. O Plug-in realiza a avaliação sobre uma série de nós localizados nas superfícies a serem analisadas. A densidade dos nós em cada superfície determina então, o nível de detalhe dos resultados. (JAKUBIEC; REINHART, 2011; SOLEMMMA - ENVIRONMENTAL TOOLS TO EMPOWER DESIGN, 2013)

2.7. CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Até o momento, não tem sido amplamente explorado o desenvolvimento de métodos para avaliar o potencial dos sistemas FV para integração às edificações dentro dos centros urbanos. Contudo, uma limitação importante da maioria dos estudos desenvolvidos é a utilização de cálculos estáticos para a avaliação do acesso solar nos ambientes urbanos. Tanto assistidos por simulação computacional quanto por meio da delimitação dos ângulos de obstrução, a análise é comumente realizada para uma data específica do ano. Geralmente, é escolhido o solstício de inverno por ser o dia mais curto do ano e, portanto, com menor disponibilidade de radiação solar. Porém, para avaliações que incluam o cálculo da eficiência de sistemas fotovoltaicos, devem ser levadas em consideração as grandes divergências no comportamento do sistema, que trazem as mudanças sazonais.

É essencial lembrar que existe uma diferença fundamental entre o estudo da iluminação natural, que tem a ver com a visualização da abóbada celeste, e o estudo da insolação, que analisa a visualização, orientação e inclinação do sol (bloqueio de elementos opacos, sombreamento, nebulosidade, etc.) (PEREIRA, 1994). Este último caso é o foco do presente trabalho, visto que a disponibilidade de radiação solar direta é o fator determinante na análise do potencial de conversão fotovoltaica de uma superfície, embora não seja o único.

3. METODOLOGIA

A pesquisa é um estudo exploratório que visa avaliar potencial de geração de energia elétrica por conversão fotovoltaica das fachadas de diferentes conformações urbanas.

O processo metodológico está dividido em quatro etapas; a seguir são descritos os procedimentos realizados para se atingir cada um dos objetivos específicos.

Como primeira etapa, foram definidos os parâmetros usados na construção dos cenários urbanos e, com o auxílio do programa Rhinoceros 4.0, foram produzidos os modelos computacionais.

A segunda etapa consiste na obtenção, a partir da simulação computacional, dos 24 modelos por meio do plug-in Diva, dos dados de disponibilidade de radiação solar que possuem as superfícies das edificações. Foram atribuídos diferentes níveis de PAF para cada cenário urbano, e assim foram realizados novamente os cálculos das áreas disponíveis para instalação FV e de radiação solar nas superfícies dos 24 cenários.

Na terceira etapa foi calculada a contribuição na geração de energia de cada unidade e do contexto urbano completo, após a designação do sistema de conversão fotovoltaica.

Finalmente, na etapa quatro, foram realizadas comparações entre a demanda de energia de cada modelo urbano e através dessa comparação, classificadas segundo a porcentagem da demanda de energia atendida pela geração FV em cada um deles.

3.1. GERAÇÃO DOS MODELOS: PRIMEIRA ETAPA

3.1.1. Definição dos parâmetros

O foco das análises contidas nesse trabalho foi o desempenho da acessibilidade solar de diferentes cenários urbanos, compostos por várias edificações. Foram escolhidos os parâmetros que, segundo a revisão bibliográfica, apresentam uma maior influência na acessibilidade solar nas edificações dentro do contexto urbano.

Os modelos foram construídos visando representar de forma generalizada diferentes configurações urbanas. O objetivo das diferentes tipologias é conformar uma amostra que represente diversas formas de agrupamento urbano, sem que

isso reproduza de maneira literal a configuração de uma cidade real. Sendo assim, é possível avaliar o desempenho de um cenário completo ou a influência dos diferentes parâmetros no comportamento de um edifício em particular.

Área de análise. É um dos parâmetros mantidos constantes entre os cenários, de forma a permitir uma comparação equilibrada entre os mesmos. Estabeleceu-se uma área base quadrada de 100 m x 100 m, representando uma porção de cidade onde se situaram 25 edificações uniformemente espaçadas entre si.

Taxa de ocupação (T.O). Este parâmetro indica a porção do terreno que será ocupada com edificações. É definida como o quociente entre a projeção horizontal da área construída e a área total do terreno, e expressa percentualmente. Foram definidas três porcentagens diferentes, que apresentaram variações na área construída em contato com o solo. O nível máximo adotado foi 40% da área do lote, conforme os limites presentes no Plano Diretor de Florianópolis, e adicionalmente foram utilizadas taxas de ocupação de 35% e 20%. Cabe ressaltar que, mantendo a área do lote constante, a variação na taxa de ocupação decorre na variação dos afastamentos entre edificações: uma das variáveis com maior peso na disponibilidade de radiação solar nos contextos urbanos, segundo Pereira et al., (2008), Ng (2004), Di Vincenzo, Kesten e Infield (2010). Estabeleceu-se então, três modelos de planta urbana com afastamentos entre edificações e gabaritos diferentes entre si, conforme os três valores da taxa de ocupação, como se observa na Figura 11.

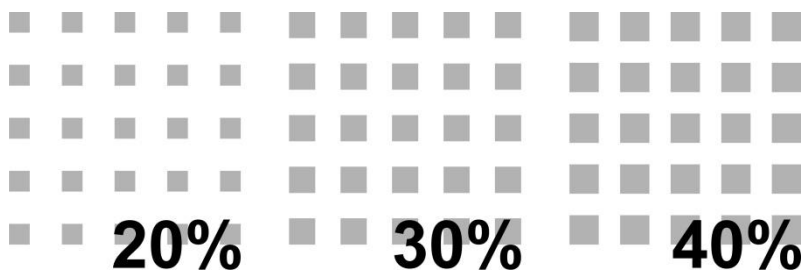


Figura 11. Plantas urbanas com as diferentes taxas de ocupação.

Volume construído. A soma dos volumes das 25 edificações de cada modelo também foi mantida constante, possibilitando a comparação entre os consumos e gerações energéticas das diferentes tipologias.

Gabarito. Como apontam vários autores, (NG & WONG, 2004; LEDER, PEREIRA, 2009; NG, 2005b; LITTLEFAIR, 2001), a altura dos edifícios é um dos parâmetros mais influentes no comportamento da luz natural e no bloqueio dos raios solares dentro dos contextos urbanos. Por consequência, foi um dos parâmetros escolhidos como variável no presente estudo. As alturas foram definidas, como resultado da combinação entre a Taxa de Ocupação e a Área Construída de cada cenário. Foi considerado um pé-direito de 2,85 metros.

Cenário urbano. Foram definidos cinco tipos de cenários urbanos a serem aplicados nas três plantas urbanas base geradas: uniforme, crescente, pirâmide, mista e Miolo de Quadra. No caso do modelo Miolo de Quadra, foram respeitados os afastamentos dados pelas Taxas de Ocupação, porém foram dispostas unicamente as edificações do perímetro, deixando vazio o lugar dos prédios interiores do cenário (Figura 12). A combinação das variáveis resultou em 15 modelos urbanos. As tipologias foram definidas de forma que respondessem a um amplo leque de formas urbanas e sky-lines², sobre os quais fosse possível gerar resultados e conclusões aplicáveis a agrupamentos urbanos reais com melhores relações de desempenho entre acessibilidade solar e geração fotovoltaica.

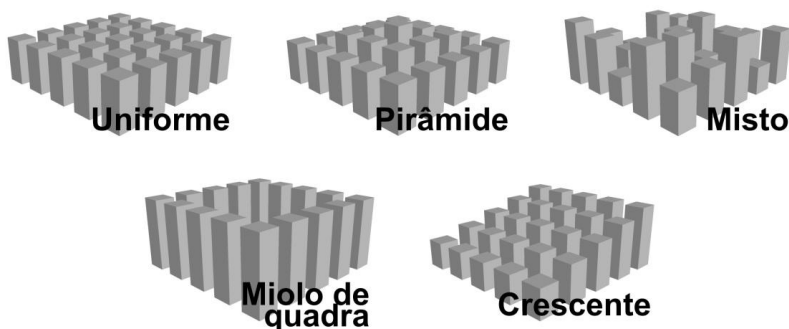


Figura 12: Cenários urbanos selecionadas para a criação dos modelos.

²*Sky-line:* Perfil ou linha de horizonte artificial criada pelo contorno do conjunto de elementos dentro de uma cidade.

Largura das ruas. Visto que cada agrupação de 25 edificações representa uma quadra dentro de uma cidade, os modelos foram construídos replicando-se a quadra base nove vezes e avaliando apenas a quadra central, garantindo assim uma certa continuidade do tecido urbano. As separações entre as quadras, que representam as ruas, foram definidas em 16 metros. (Figura 13).

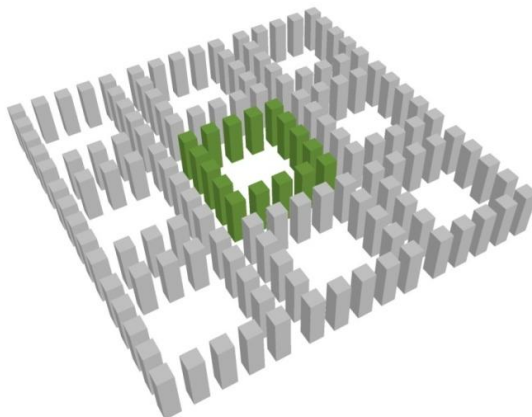


Figura 13. Exemplo dos modelos de simulação com o contexto urbano.

Orientação. Os modelos podem ser divididos em simétricos e assimétricos. Os quatro modelos simétricos (uniforme, pirâmide, misto e miolo de quadra) serão simulados unicamente com uma orientação. O modelo restante (crescente) será avaliado para as quatro orientações principais: Norte, Sul, Leste e Oeste.

3.1.2. Síntese dos modelos base

Finalmente, a partir da combinação das variáveis descritas anteriormente, foram modelados 24 cenários urbanos. As figuras 14 e 15 apresentam graficamente a codificação dos modelos e as suas características principais.

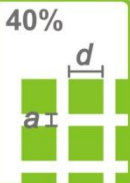
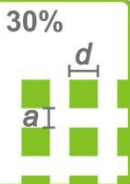
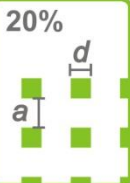
Taxa de ocupação	Modelo	Dimensões da Edificação [d]	Número de andares	Afastamento entre edificações [a]	Largura das ruas
40% 	uniforme	12,64m x 12,64m	9	9,20m	16m
	pirâmide		8 - 10 - 12		
	misto		5 - 7 - 9 - 11 - 13		
	miolo de quadra		0 - 14		
	crescente		5 - 7 - 9 - 11 - 13		
30% 	uniforme	10,95m x 10,95m	9	11,31m	16m
	pirâmide		8 - 10 - 12		
	misto		5 - 7 - 9 - 11 - 13		
	miolo de quadra		0 - 14		
	crescente		5 - 7 - 9 - 11 - 13		
20% 	uniforme	8,94m x 8,94m	9	13,83m	16m
	pirâmide		8 - 10 - 12		
	misto		5 - 7 - 9 - 11 - 13		
	miolo de quadra		0 - 14		
	crescente		5 - 7 - 9 - 11 - 13		

Figura 14. Dimensões e especificações dos modelos.

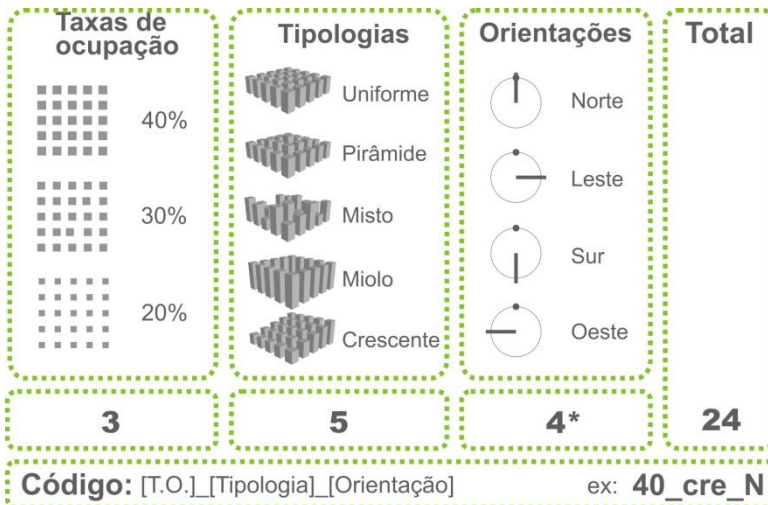


Figura 15. Resumo dos modelos, combinação das variáveis e codificação. Os modelos Uniforme, Pirâmide, Misto e Miolo de quadra foram avaliados para uma orientação só devido a sua simetria

3.2. FERRAMENTAS DE ANÁLISE

3.2.1. Construção dos modelos

Os modelos tridimensionais foram confeccionados por meio de superfícies planas que representam a volumetria das edificações dentro dos cenários urbanos. É importante garantir que as superfícies estejam direcionadas para o exterior dos prédios (para a fonte de luz, neste caso o sol e o céu), garantindo que a simulação posterior será feita corretamente. O programa permite a entrada das medidas exatas manualmente, garantindo um alto nível de precisão. Contudo, não foi aplicado nenhum material às superfícies, visto que esse é um dos parâmetros de entrada no processo da simulação.

3.2.2. Simulações de disponibilidade de radiação solar. Plug-in DIVA 2.0

As simulações foram realizadas a partir do arquivo climático Test Reference Year da cidade de Florianópolis (Tomado de: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>). O arquivo TRY é uma compilação dos dados climáticos das 8760 horas do ano, onde são eliminados os valores de temperaturas extremas, de forma a obter uma situação de referencia média do clima do local.

A malha de pontos foi disposta uniformemente sobre todas as superfícies (verticais e horizontais) que compõem as edificações, com uma separação entre pontos de aproximadamente 0,50 metros, conforme a Figura 16.

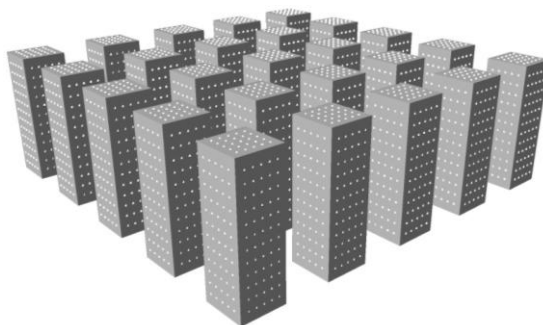


Figura 16. Disposição dos pontos de análise nas superfícies a serem avaliadas.

Os parâmetros de simulação foram determinados segundo as tabelas 1.1 e 1.2, a seguir.

Tabela 1.1. Parâmetros de simulação adotados no Plug-in DIVA.

Refletâncias dos materiais			Tipo de simulação	Dados de saída
Edificações	Contexto edificado	Base		
35%	35%	10%	Daylight Grid-Based	Radiation Map

Tabela 1.2. Parâmetros de simulação definidos como DEFAULT no Plug-in DIVA.

Start time	End time	Hour range	Radiance parameters	Hide dynamics shading	Geometric density
Data de início (mês/dia)	Data final (mês/dia)	Intervalo de horas (hr/hr)	Parâmetros do Radiance	Ocultar sombreamento dinâmico	Densidade da geometria
01 01	12 31	00 24	-ab2 -ad 1000 -as 20 -ar 300 -aa 0.1	Sim	100

3.3. PROCESSAMENTO DOS DADOS: SEGUNDA ETAPA

3.3.1. Simulações computacionais prévias

A partir da construção dos 24 modelos urbanos base no programa Rhinoceros, foram feitas simulações de disponibilidade de radiação solar nas superfícies das edificações da quadra central por meio do Plug-in DIVA. Os resultados das simulações, expressados em kWh/m²/ano, foram armazenados em tabelas eletrônicas, possibilitando o cálculo da quantidade de radiação disponível no total de cada cenário urbano, como também a contribuição de cada edificação dentro do seu contexto. A seguir, são apresentados os arquivos de resultados gerados por uma simulação. Na Figura 17 mostra-se o resultado gráfico obtido diretamente na interface do programa Rhinoceros, e na Figura 18 se observa o arquivo de dados no formato *.dat. Neste arquivo,

as três primeiras colunas correspondem às coordenadas X, Y, Z de cada ponto, respectivamente. As colunas D, E e F indicam a orientação de cada ponto nos eixos X, Y e Z, sendo que o valor de 1 significa que o ponto está virado para o lado positivo do eixo correspondente, e o valor de -1 significa que o nodo está virado para a porção negativa do eixo. Já os valores apresentados nas colunas G, H e I (que neste tipo de arquivo são iguais), representam a quantidade de radiação solar disponível nesse nodo durante o ano inteiro, expressa em kWh/m²/ano.

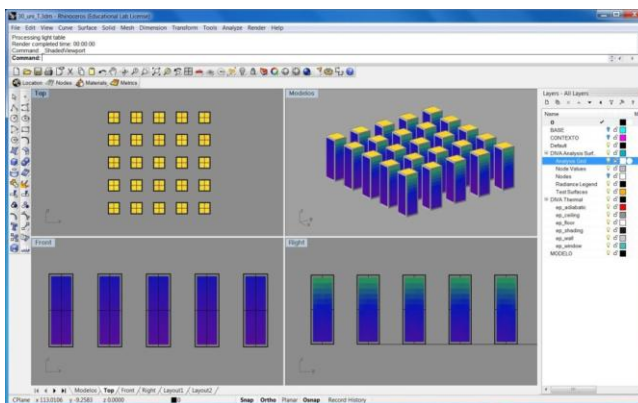


Figura 17. Resultado gráfico gerado pela simulação no Plug-in DIVA, interface do Rhinoceros.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	125.125	205.04	2.586154	0	-1	0	119.44	119.44	119.44											
2	125.125	205.04	5.112308	0	-1	0	133.79	133.79	133.79											
3	125.125	205.04	7.648462	0	-1	0	148.29	148.29	148.29											
4	125.125	205.04	10.204616	0	-1	0	158.96	158.96	158.96											
5	125.125	205.04	12.81077	0	-1	0	173.34	173.34	173.34											
6	125.125	205.04	15.39692	0	-1	0	183.54	183.54	183.54											
7	125.125	205.04	17.96308	0	-1	0	213.96	213.96	213.96											
8	125.125	205.04	20.53923	0	-1	0	235.57	235.57	235.57											
9	125.125	205.04	23.09538	0	-1	0	259.90	259.90	259.90											
10	125.125	205.04	25.66154	0	-1	0	294.91	294.91	294.91											
11	125.125	205.04	28.22769	0	-1	0	324.44	324.44	324.44											
12	125.125	205.04	30.79385	0	-1	0	352.48	352.48	352.48											
13	123.3	205.04	2.586154	0	-1	0	118.60	118.60	118.60											
14	123.3	205.04	5.112308	0	-1	0	132.29	132.29	132.29											
15	123.3	205.04	7.648462	0	-1	0	142.11	142.11	142.11											
16	123.3	205.04	10.204616	0	-1	0	156.85	156.85	156.85											
17	123.3	205.04	12.81077	0	-1	0	170.31	170.31	170.31											
18	123.3	205.04	15.39692	0	-1	0	189.69	189.69	189.69											
19	123.3	205.04	17.96308	0	-1	0	212.70	212.70	212.70											
20	123.3	205.04	20.53923	0	-1	0	238.79	238.79	238.79											
21	123.3	205.04	23.09538	0	-1	0	263.44	263.44	263.44											
22	123.3	205.04	25.66154	0	-1	0	295.75	295.75	295.75											
23	123.3	205.04	28.22769	0	-1	0	323.37	323.37	323.37											
24	123.3	205.04	30.79385	0	-1	0	354.63	354.63	354.63											
25	121.475	205.04	2.586154	0	-1	0	119.79	119.79	119.79											
26	121.475	205.04	5.112308	0	-1	0	133.92	133.92	133.92											
27	121.475	205.04	7.648462	0	-1	0	146.17	146.17	146.17											
28	121.475	205.04	10.204616	0	-1	0	157.87	157.87	157.87											
29	121.475	205.04	12.81077	0	-1	0	173.22	173.22	173.22											
30	121.475	205.04	15.39692	0	-1	0	189.26	189.26	189.26											
31	121.475	205.04	17.96308	0	-1	0	219.51	219.51	219.51											

Figura 18. Resultados numéricos em formato *.dat, gerado pela simulação no Plug-in DIVA.

3.3.2. Criação das Faixas de Disponibilidade Solar

Cada ponto das malhas definidas nas superfícies da edificação conta com uma disponibilidade de radiação solar diferente, dependendo da sua localização dentro do contexto urbano e sua orientação. Levando isso em consideração, as superfícies de cada edificação foram divididas em três Faixas de Disponibilidade de Radiação Solar (DRS). As faixas foram estabelecidas baseadas nos níveis mínimos de radiação para aproveitamento FV recomendados na Europa. Contudo, conforme Cronemberger, et al. (2012), o limite mínimo europeu de 60% deve ser reconsiderado para o caso de Florianópolis.

Foi estabelecido o limite mínimo de radiação solar disponível aproveitável para conversão FV nas superfícies de edificações inseridas em contextos urbanos. Visando gerar uma comparação equilibrada, levou-se em consideração que trata-se de uma situação restrita, devido à grande quantidade de obstruções que apresentam as superfícies. Foi tomada como base a recomendação europeia de 60% do total disponível (CRONEMBERGER; CAAMAÑO-MARTÍN e SÁNCHEZ, 2012), porém, pelas razões explicadas acima, e levando-se em consideração que o nível máximo de radiação disponível nos modelos estudados foi 1376 kWh/m^2 , foi adotada uma redução à recomendação. Adotou-se então 40% como limite mínimo de radiação solar disponível para aproveitamento fotovoltaico do presente trabalho.

Vale a pena apontar que, segundo Cronemberger, et al. (2012), a disponibilidade solar nas fachadas é aproximadamente 60% da disponibilidade em uma superfície com orientação e inclinação ótimas, o que no caso de Florianópolis ainda representa níveis bastante elevados, demonstrando que as superfícies verticais têm potencial para integração FV e devem ser levadas em consideração nos cálculos de geração de energia.

Tabela 2. Cálculo do limite mínimo de disponibilidade de radiação para aproveitamento FV em superfícies verticais dentro de ambientes urbanos em Florianópolis. Para definição das faixas DRS.

	Europa			Florianópolis		
	Alemanha	Espanha	França			
Níveis máximos [kWh/m ² /ano]	1250	1850	1650	1376,85*		
Nível mínimo recomendado (Europa) [kWh/m ² /ano]	60%					
	750	1110	990			
Nível mínimo calculado (Fplis) [kWh/m ² /ano]				40%	50%	60%
				550	688	826

*Radiação máxima disponível nos modelos urbanos do presente estudo.

Com a recomendação mínima estabelecida em 550 kWh/m²/ano (40% da radiação máxima disponível), foi definido o limite para a faixa média em 800 kWh/m²/ano, que é mais do que 50% da radiação máxima disponível. Na Tabela 3 são apresentadas as Faixas DRS com seus valores.

Tabela 3. Definição das faixas DRS segundo a contribuição das superfícies na disponibilidade de radiação solar.

Faixa DRS	Disponibilidade de radiação solar
Baixa	0 – 550kWh/m ² /ano
Média	551 – 800kWh/m ² /ano
Alta	>800kWh/m ² /ano

3.3.3. Definição do PAF para os cenários urbanos

Para avaliar o real potencial que uma determinada fachada possui para receber módulos fotovoltaicos opacos integrados à fachada, é necessário confrontar os resultados do potencial de geração de energia da fachada completa, com a quantidade de energia que pode ser gerada quando são introduzidos diferentes níveis de porcentagem de abertura na fachada (PAF).

No cálculo inicial do potencial de geração fotovoltaica de uma fachada completa (DRS), não será levada em consideração a existência de janelas nas edificações. Sendo assim, o potencial

encontrado para um determinado modelo pode ser reduzido de forma importante quando são inseridas janelas nas suas fachadas, devido à redução da área de aplicação dos painéis.

Diante disto e baseando-se em estudos de Melo (2012), Didoné (2009), Ghisi e Tinker (2005) e Díaz (2011), são propostos diferentes níveis de PAF para as três Faixas de Disponibilidade Solar, inversamente proporcionais ao potencial de geração. As áreas das edificações que pertencem à Faixa de Disponibilidade de Radiação Alta são áreas que, por terem um maior potencial de geração, devem aproveitar o máximo possível de área conversora, limitando-se então a área envidraçada (PAF = 25%). Inclusive, no caso de edificações com condições de insolação bastante significativas, é uma boa estratégia restringir o tamanho das aberturas, de forma a evitar desconforto visual e ganhos térmicos que poderiam resultar exagerados para o contexto climático de Florianópolis. Para as edificações da Faixa de Disponibilidade de Radiação Média será atribuído 50% de PAF, enquanto que as edificações pertencentes à Faixa de DRS Baixa contarão com o PAF de 75%, levando-se em consideração que, acompanhando o baixo potencial de geração, esse grupo de edifícios contará provavelmente com baixos níveis de iluminação natural, o que pode ser parcialmente resolvido com aberturas maiores. Na Tabela 4 pode-se observar a distribuição dos PAF para as Faixas Alta, Média e Baixa.

Tabela 4. Atribuição dos níveis de PAF às faixas DRS.

Faixa DRS	PAF
Baixa	75%
Média	50%
Alta	25%

3.3.4. Escolha das características do sistema FV

Como já foi observado na revisão bibliográfica, existem no mercado diferentes sistemas fotovoltaicos que variam em custo, eficiência, aparência e materiais de fabricação. Com o objetivo de escolher um sistema FV para realizar os cálculos de geração de energia, foi realizada uma revisão das ofertas atuais dos principais produtores de sistemas de conversão solar fotovoltaica do mercado internacional. Finalmente, foi escolhido um painel de

Silício Multicristalino do fabricante Yingli Solar, que conta com características físicas e de eficiência conforme a Tabela 5. A escolha visou adotar características médias dentre os diferentes sistemas presentes no mercado, que não fosse o sistema mais eficiente nem um com a eficiência mais baixa.

Tabela 5. Características do módulo solar fotovoltaico adotado.

Fabricante	Modelo	Tecnologia	Eficiência	Potência nominal	Dimensões [mm]
Yingli Solar	YL 180P-23b	Silício multicristalino	13,9%	180 W	1310*990

É importante levar em consideração que o rendimento do sistema referenciado anteriormente (igual que os rendimentos da totalidade dos sistemas oferecidos no mercado), é resultado de experimentos de laboratório realizados sob condições ótimas (Standard Test Conditions, STC), que decorrem da suposição de níveis de eficiência superiores aos que seriam alcançados no funcionamento real do sistema.

3.4. PROCESSAMENTO DOS DADOS: TERCEIRA ETAPA

3.4.1. Cálculo da geração de energia

A área de superfície disponível para a instalação dos painéis foi calculada para cada um dos 24 cenários urbanos, já com o nível de PAF correspondente, dependendo na Faixa de Disponibilidade Solar na qual foi classificada.

A partir dos dados de disponibilidade de radiação solar e levando-se em consideração o sistema FV adotado, foi calculada a quantidade de energia produzida por cada prédio no período de um ano completo. Por fim, as gerações energéticas das 25 edificações de cada contexto são somadas, resultando na quantidade total de energia gerada por cada modelo urbano. O cálculo da geração de energia anual será realizado através da seguinte equação:

$$E = G \times r \times Pcc$$

Eq. 1

Onde:

E é a energia gerada, em kWh/ano,

G é a irradiação anual recebida no plano do painel fotovoltaico (kWh/m²), dividida pela irradiância de referência (STC) de 1 kW/m², expressa em número de horas (h)

r é o rendimento ou coeficiente de desempenho do sistema fotovoltaico como um todo. Foi adotado 0,80 por ser um valor comumente recomendado na literatura (ZOMER, 2010),

Pcc é a potência do sistema em corrente contínua (kW).

3.4.2. Cálculo da demanda de energia

Para cada tipologia urbana foi simulado o consumo energético global, supondo o uso comercial para a totalidade das edificações. Para efeito de simplificação, foi adotada uma constante de consumo baseada na pesquisa de Santana (2006). Assim, conforme a Figura 19, onde é apresentado o perfil de consumo simulado para a tipologia predominante de edificações em Florianópolis durante o ano completo, estabeleceu-se um consumo de 89 kWh/m²/ano.

Finalmente, foram comparados os dados de consumo e geração total, visando avaliar a eficiência de cada modelo em função da porcentagem da demanda energética total que a própria geração fotovoltaica consegue atender.

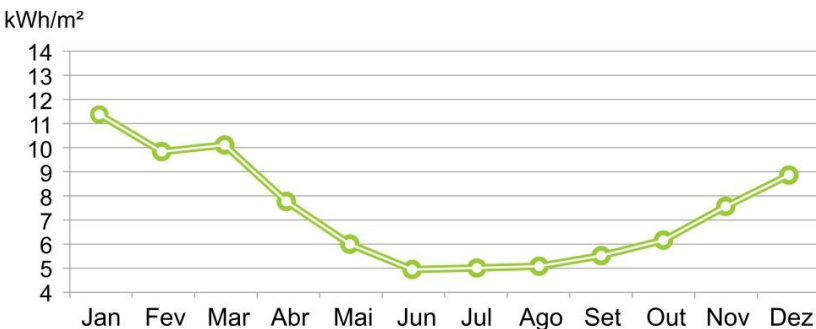


Figura 19. Perfil de consumo da tipologia de edificação predominante para Florianópolis. (SANTANA, 2006).

3.4.3. Classificação das tipologias

Partindo do conceito EBEZ, Edificações de Balanço de Energia Zero, foi definido o BBEZ, Bairro Balanço Energia Zero. A definição é um bairro ou cenário urbano que gera toda a energia que ele consome. Sem dúvidas, é uma perspectiva bastante positivista, porém a ideia de um cenário urbano que gera energia limpa de maneira eficiente para atender a sua própria demanda, é o intuito do presente trabalho. Dessa forma, a classificação geral das tipologias urbanas baseou-se no nível de autoatendimento da demanda energética, ou seja, em quão perto estão de serem cenários BBEZ.

3.4.4. Relação entre os parâmetros de ocupação urbana e o potencial de geração de energia PV

Foram analisados os impactos na relação geração/consumo das variações dos parâmetros construtivos gabarito e afastamento entre edificações. Dessa forma foi possível encontrar os parâmetros mais influentes dependendo da tipologia urbana.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados os principais resultados encontrados. Inicialmente é apresentada a distribuição das áreas nas diferentes Faixas de Disponibilidade de Radiação Solar, DRS, uma classificação das superfícies segundo a quantidade de radiação solar que recebem. Em seguida foram calculadas as áreas das fachadas disponíveis para conversão FV, após diminuir a área das aberturas (PAF). Finalmente, a partir dos dados de consumo energético de cada cenário, foram classificadas as tipologias urbanas segundo o potencial para atender a sua própria demanda, por meio da geração fotovoltaica. Com base nestas informações foram desenvolvidas as comparações entre os cenários.

Cada cenário urbano foi considerado como uma mini-usina de geração FV, que pode exportar para a rede pública a energia que não é consumida no momento da geração. Isso possibilita grande flexibilidade ao sistema, visto que não é preciso nem viável o uso de instalações acumuladoras e, além disso, o custo total do sistema é reduzido aproximadamente 30% quando comparado com sistemas de acumulação (RÜTHER, 2004). A energia injetada na rede elétrica produzirá créditos para o local gerador que podem ser aproveitados nos momentos em que a demanda supere a geração. Finalmente, supõe-se que a totalidade do cenário irá usufruir da energia por ele gerada, independente de qual edificação gera mais ou menos energia de forma individual.

Adicionalmente, foram analisados os impactos na relação geração/consumo das variações dos parâmetros construtivos gabarito e afastamento entre edificações. Dessa forma foi possível encontrar os parâmetros mais influentes em cada tipologia urbana.

4.1. DIVISÃO DAS FAIXAS DE DISPONIBILIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR

Foram calculadas as áreas de cada modelo pertencentes a cada faixa DRS. A Figura 20 apresenta a comparação das áreas dos modelos e a subdivisão nas diferentes faixas.

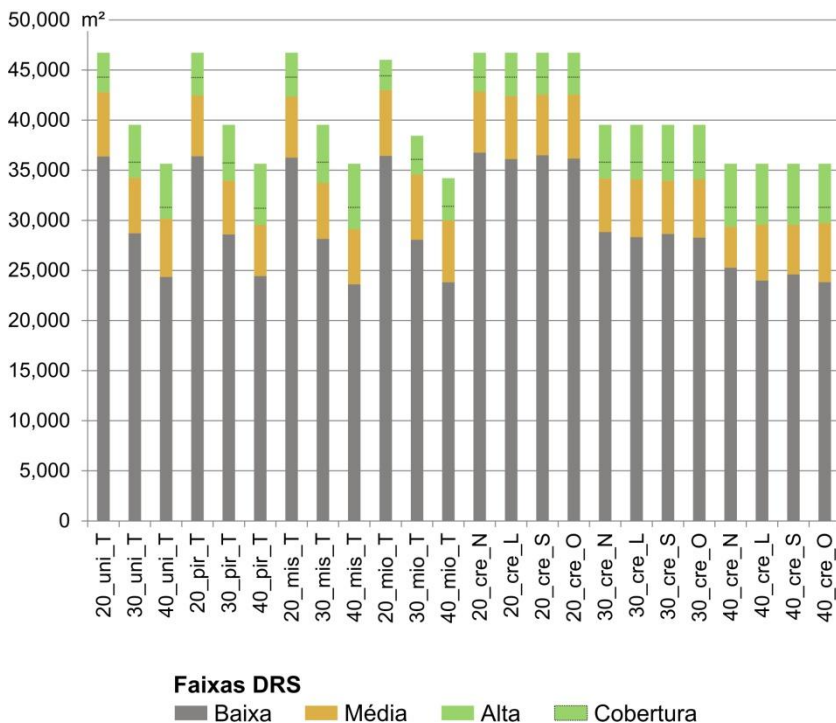


Figura 20. Divisão das áreas dos modelos nas diferentes faixas DRS.

Conforme a Tabela 6, nos modelos com T.O. de 20%, em torno de 78% da área total das superfícies foi classificada na faixa DRS Baixa; nos modelos de T.O. de 30% esta porcentagem caiu para 72% e finalmente nos modelos com T.O. de 40%, a faixa Baixa representou entre 66 e 70% da área total. É verificado na Figura 20, que conforme o nível de T.O. aumenta, as áreas classificadas na Faixa Baixa variam em maior grau. O elevado nível de obstrução apresentado pelas fachadas nos cenários com menores afastamentos entre os prédios e a redução na área de cobertura são provavelmente os aspectos responsáveis por este efeito.

Tabela 6. Divisão das áreas dos modelos nas diferentes faixas DRS.

	BAIXA		MÉDIA		ALTA			
					Fac		Cob	
	m ²	%	m ²	%	m ²	%	m ²	%
20_uni_T	36.372	77,8%	6.427	13,8%	1,482	3,2%	2.460	5,3%
30_uni_T	28.704	72,6%	5.531	14,0%	1,563	4,0%	3.729	9,4%
40_uni_T	24.346	68,3%	5.793	16,3%	1,154	3,2%	4.346	12,2%
20_pir_T	36.392	77,9%	6.073	13,0%	1,790	3,8%	2.486	5,3%
30_pir_T	28.587	72,3%	5.385	13,6%	1,769	4,5%	3.786	9,6%
40_pir_T	24.441	68,6%	5.114	14,3%	1,653	4,6%	4.433	12,4%
20_mis_T	36.261	77,6%	6.107	13,1%	1,913	4,1%	2.460	5,3%
30_mis_T	28.155	71,2%	5.590	14,1%	2,052	5,2%	3.729	9,4%
40_mis_T	23.602	66,2%	5.515	15,5%	2,177	6,1%	4.346	12,2%
20_mio_T	36.432	79,2%	6.565	14,3%	1,438	3,1%	1.587	3,4%
30_mio_T	28.059	73,0%	6.539	17,0%	1,477	3,8%	2.373	6,2%
40_mio_T	23.808	69,6%	6.182	18,1%	1,409	4,1%	2.803	8,2%
20_cre_N	36.753	78,6%	6.095	13,0%	1,433	3,1%	2.460	5,3%
20_cre_L	36.120	77,3%	6.279	13,4%	1,882	4,0%	2,460	5,3%
20_cre_S	36.501	78,1%	6.052	12,9%	1,728	3,7%	2.460	5,3%
20_cre_O	36.163	77,4%	6.396	13,7%	1,722	3,7%	2.460	5,3%
30_cre_N	28.824	72,9%	5.346	13,5%	1,629	4,1%	3.729	9,4%
30_cre_L	28.322	71,7%	5.758	14,6%	1,718	4,3%	3.729	9,4%
30_cre_S	28.639	72,5%	5.322	13,5%	1,838	4,6%	3.729	9,4%
30_cre_O	28.275	71,5%	5.811	14,7%	1,712	4,3%	3.729	9,4%
40_cre_N	25.271	70,9%	4.103	11,5%	1,919	5,4%	4.346	12,2%
40_cre_L	23.992	67,3%	5.577	15,6%	1,725	4,8%	4.346	12,2%
40_cre_S	24.590	69,0%	4.965	13,9%	1,739	4,9%	4.346	12,2%
40_cre_O	23.825	66,8%	5.904	16,6%	1,565	4,4%	4.346	12,2%

Na Faixa Alta, as áreas das fachadas não apresentam uma distribuição tão equilibrada. A porcentagem da área nos modelos

com T.O 20% varia desde 3,1% (20_cre_N e 20_mio_T) até 4,1% (20_mis_T), nos modelos de 30% de T.O, o valor se amplia para 3,8% no modelo 30_mio_T, até 5,2% no modelo 30_mis_T. Finalmente, entre os cenários com 40% de T.O, a diferença aumenta ainda mais indo desde 3,2% (40_uni_T) até 6,1% (40_mis_T). As maiores percentagens de área classificadas na Faixa DRS Alta, ocorrem nos modelos Mistos, para todos os níveis de T.O. Os modelos com menor T.O possuem um comportamento mais previsível, porém, conforme a taxa aumenta, o comportamento dos cenários apresenta maiores variações. Isto indica que a influência da tipologia urbana utilizada, aumenta conforme o nível de T.O vai crescendo.

Os modelos que possuem as maiores diferenças entre as áreas correspondentes a cada Faixa DRS são os cenários Miolo de Quadra, visto que a menor quantidade de edificações reduz significativamente a área disponível de cobertura. Contudo, nos modelos de T.O 20%, a faixa Alta apresenta áreas similares nas fachadas e nas coberturas, visto que é um modelo com uma área de cobertura bastante reduzida. Embora a cobertura seja usualmente a superfície com maior irradiação solar, nesses casos, considerando a divisão das faixas, as fachadas dos últimos andares apresentam uma disponibilidade de área com um potencial de conversão próximo ao da cobertura.

Cabe salientar que, embora os modelos com taxas de ocupação mais baixas apresentam maiores áreas de fachada disponíveis para a instalação de painéis FV e maiores afastamentos entre edificações, a relação entre a área total externa dos modelos uniformes e a área pertencente à faixa Média (entre 551 e 800 kWh/m²/ano) não é diretamente proporcional. Dentre os cenários dessa tipologia, é no modelo 20_uni_T onde se encontra a maior área na faixa Média; já na faixa Alta, é o modelo 30_uni_T que apresenta maior área, quando levadas em consideração as superfícies das fachadas e cobertura.

Contudo, na somatória das áreas de fachadas e cobertura, o modelo com maior área na faixa Alta é o 40_mis_T, o que pode ser explicado pelo maior tamanho das coberturas e as grandes áreas verticais que não apresentam bloqueios por causa da variação dos gabaritos (Figura 20).

Nos modelos Crescentes com T.O de 20% e 30% as áreas na faixa DRS média apresentam valores similares nas

orientações Norte e Sul, e Leste e Oeste respectivamente. Contudo, essa relação não é mantida na divisão das áreas de fachada que correspondem à faixa Alta. Nos modelos 20_cre, 30_cre e 40_cre, as maiores áreas ocorrem nas orientações Leste, Sul e Norte, respectivamente.

No caso do modelo 40_mio_T, embora tenha a mesma área de cobertura em cada edificação, o número reduzido de edificações traz como decorrência um decréscimo significativo na disponibilidade de radiação solar.

Conforme a Figura 21, nos cenários Uniformes, é evidente que com o aumento da T.O, a área classificada na Faixa Alta se reduz drasticamente, nas edificações ao interior do modelo. Porém, as edificações do perímetro, mantêm as condições de radiação praticamente inalteradas, visto que a separação entre o modelo e o contexto permanece constante.

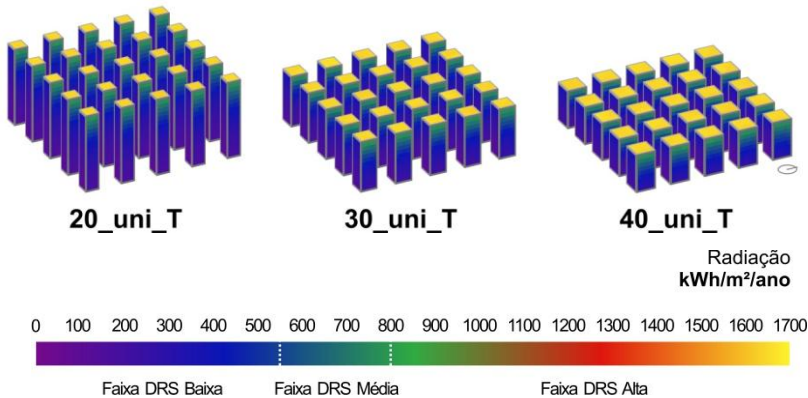


Figura 21. Níveis de radiação solar disponível nas superfícies externas. Modelos Uniformes.

Nos cenários tipo Pirâmide, mostrados na Figura 22, é evidente o benefício que apresenta o aumento gradativo das alturas, sobretudo nas áreas correspondentes à Faixa DRS Alta, que apresentam aumentos de 0,6%, 0,5% e 1,4% (para os T.O de 20, 30 e 40%, respectivamente), quando comparados com os modelos Uniformes. A diferença se faz maior conforme a T.O aumenta, por causa da redução ao acesso solar nas fachadas o que aumenta a influência da diferença nos gabaritos.

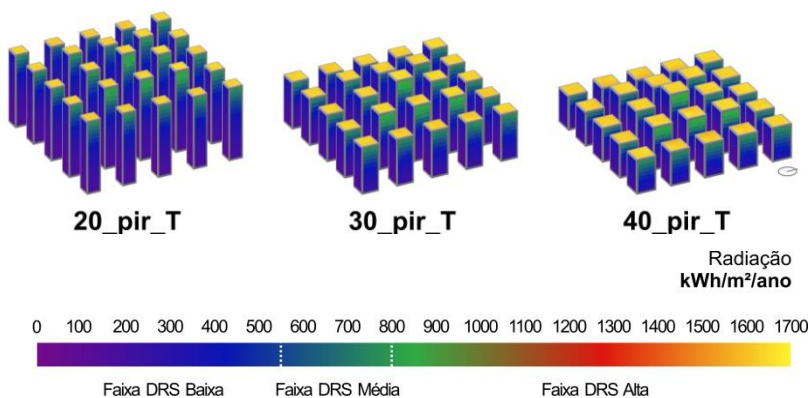


Figura 22. Níveis de radiação solar disponível nas superfícies externas. Modelos Pirâmide.

No caso dos modelos Mistos, pela aleatoriedade nas alturas das edificações observam-se amplas áreas de fachada expostas e outros prédios com níveis de radiação bastante restritos pelo sombreamento (Figura 23). Infere-se que a disponibilidade de radiação solar nas superfícies externas teria um comportamento menos previsível, porém, é conferido um efeito de compensação entre os níveis máximos e mínimos de radiação solar. Este fenômeno traz como consequência que a quantidade total de irradiação solar é similar à recebida nos cenários Uniformes.

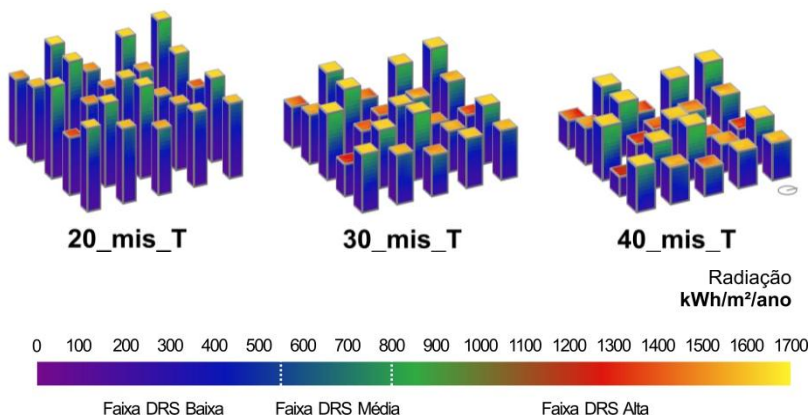


Figura 23. Níveis de radiação solar disponível nas superfícies externas. Modelos Mistos.

Contudo, é evidente que nos cenários Mistos, diferente do que acontece nos cenários Uniformes, os comportamentos dos edifícios quando avaliados isoladamente, são bastante heterogêneos decorrente da variação aleatória entre as alturas das edificações adjacentes.

Vale a pena salientar que embora as condições de acessibilidade solar sejam bastante superiores nas fachadas dos modelos Miolo de Quadra, a diminuição no número de blocos, e conseqüentemente, na área de superfícies externas disponíveis para integração FV é um fator de peso na disponibilidade de radiação solar. Nesses cenários é observado também que as edificações que apresentam melhores desempenhos não pertencem ao lado Norte da quadra. Isto pode ser explicado pelo fato de que a maior quantidade de radiação vinda do Norte tem mais fácil acesso aos blocos do lado Sul por meio do vazio da quadra. Similarmente as edificações no Leste e Oeste recebem apreciáveis quantidades de radiação através do vazio (Figura 24). Pode-se conferir então, que as fachadas voltadas para o interior do cenário são as que contam com os melhores desempenhos.

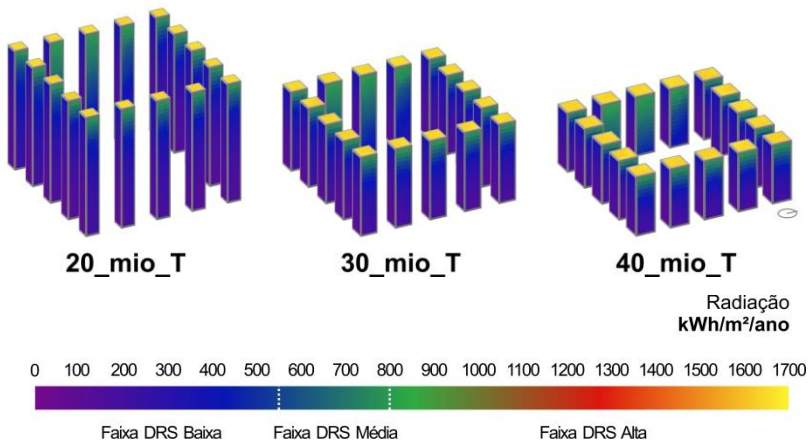


Figura 24. Níveis de radiação solar disponível nas superfícies externas. Modelos Miolo de Quadra.

Nos cenários Crescentes, poderia se inferir que o melhor desempenho se apresentaria nos casos voltados para o Norte, visto que as maiores edificações estariam voltadas para esta

orientação. Porém, é interessante constatar que a situação se inverte, ou seja, é a orientação Sul que conta com os melhores desempenhos. Isso está explicado pelo fato de que as áreas superiores das fachadas de cada edificação não apresentam bloqueio algum por causa da redução da altura das edificações contíguas. Assim, a soma dessas pequenas áreas sem restrições na insolação é maior do que a área de fachada, desprovida de bloqueios, das edificações mais altas (ver Figura 25).

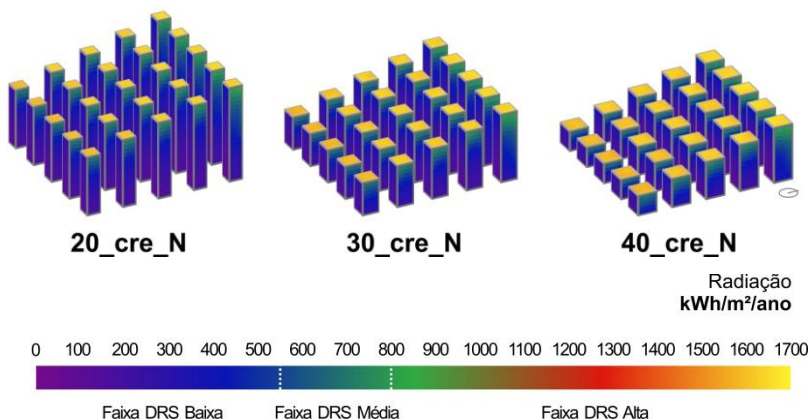


Figura 25. Níveis de radiação solar disponível nas superfícies externas. Modelos Crescentes, orientados para o Norte.

É interessante ressaltar que são nos cenários orientados para o Norte, que as coberturas das edificações mais baixas apresentam melhores desempenhos. Novamente, poderia parecer contraditório, visto que nestes casos estas edificações estão viradas para o Sul. Contudo, é a influência do entorno o que acarreta o fenômeno.

Comparando os cenários Crescentes orientados para Leste e Oeste, para os três níveis de T.O, são os edifícios voltados para o Leste os que apresentam maiores áreas verticais na Faixa DRS Alta (ver Figura 26 e 28). Contudo, a diferença entre as áreas dos modelos 30_cre_O e 30_cre_L é bastante reduzida, enquanto que a diferença entre as áreas dos modelos voltados para Leste e Oeste com os outros níveis de TO (20% e 40%) é apreciavelmente maior.

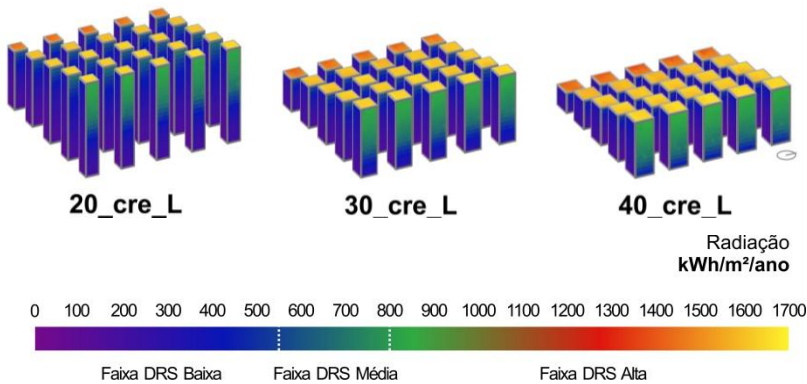


Figura 26. Níveis de radiação solar disponível nas superfícies externas. Modelos Crescentes, orientados para o Leste.

Nos modelos orientados para o Sul (modelo crescendo para o Sul), como se observa na Figura 27, a disponibilidade de radiação solar nas edificações mais baixas fica praticamente restrita pelo sombreamento das edificações do entorno (que nesse caso são as edificações mais altas do modelo).

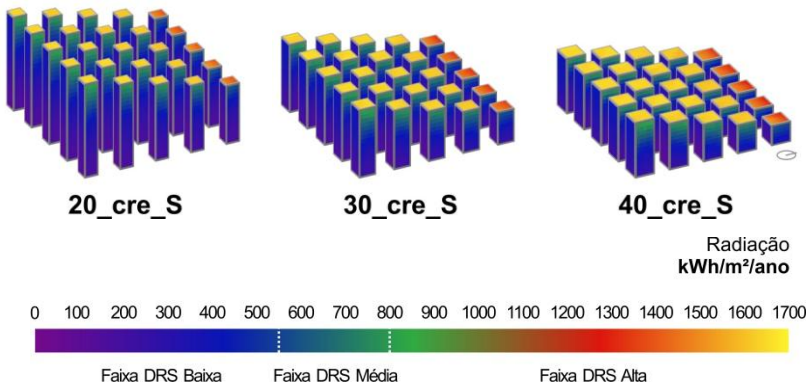


Figura 27. Níveis de radiação solar disponível nas superfícies externas. Modelos Crescentes, orientados para o Sul.

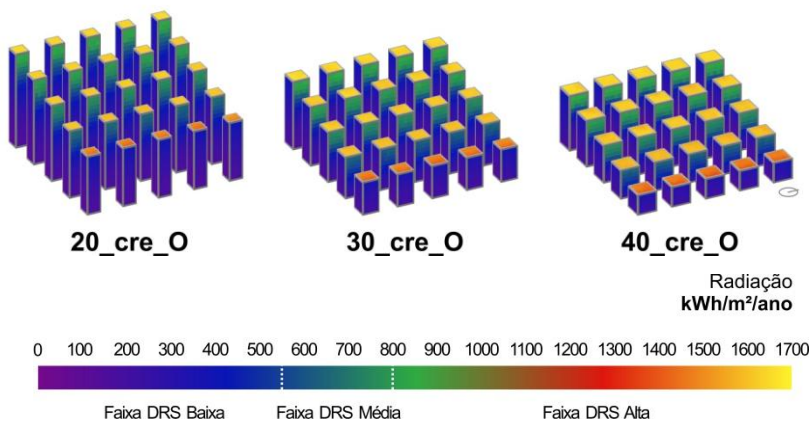


Figura 28. Níveis de radiação solar disponível nas superfícies externas. Modelos Crescentes, orientados para o Oeste.

4.2. CÁLCULO DA ÁREA OPACA DISPONÍVEL PARA INSTALAÇÃO DOS PAINÉIS

Como já colocado anteriormente, para o cálculo da geração fotovoltaica é importante levar em consideração a presença aberturas, onde não é possível a instalação de painéis FV opacos.

Na Tabela 7 são apresentadas as áreas resultantes da redução da área disponível para cada valor de PAF em cada faixa DRS.

Depois do recálculo das áreas já sem o PAF correspondente a cada faixa, são os modelos Mistos os que apresentam maior área de superfícies verticais na Faixa Alta, com valores diretamente proporcionais ao aumento na T.O. Já no caso dos cenários Miolo de Quadra e Uniforme, os cenários com T.O de 30% são os que apresentam a maior área correspondente à Faixa Alta.

Tabela 7. Área efetiva para instalação FV, subtraindo as áreas das aberturas segundo a Faixa DRS (m²).

	BAIXA	MÉDIA	ALTA	
			Fac	Cob
PAF	75%	50%	25%	-
20_uni_T	27.279	3.213	371	1.998
30_uni_T	21.528	2.765	391	3.120
40_uni_T	18.260	2.896	289	3.994
20_pir_T	27.294	3.036	448	1.998
30_pir_T	21.440	2.693	442	2.998
40_pir_T	18.331	2.557	413	3.994
20_mis_T	27.196	3.054	478	1.998
30_mis_T	21.116	2.795	513	2.998
40_mis_T	17.702	2.757	544	3.994
20_mio_T	27.324	3.282	360	1.279
30_mio_T	21.044	3.269	369	1.918
40_mio_T	17.856	3.091	352	2.556
20_cre_N	27.565	3.047	358	1.998
20_cre_L	27.090	3.140	470	1.998
20_cre_S	27.376	3.026	432	1.998
20_cre_O	27.122	3.198	431	1.998
30_cre_N	21.618	2.673	407	2.998
30_cre_L	21.242	2.879	430	2.998
30_cre_S	21.479	2.661	459	2.998
30_cre_O	21.206	2.906	428	2.998
40_cre_N	18.953	2.051	480	3.994
40_cre_L	17.994	2.789	431	3.994
40_cre_S	18.442	2.483	435	3.994
40_cre_O	17.869	2.952	391	3.994

Na comparação entre as áreas totais de cada modelo e as áreas resultantes da redução do PAF, são os cenários 40_uni_T, 40_pir_T, 40_cre_N e 40_cre_L os que apresentaram as maiores percentagens das áreas totais, como área efetivas para instalação FV, ficando acima de 71%. Já os modelos 30_mis_T, 30_mio_T, 30_cre_L e 30_cre_O apresentaram as menores percentagem de área resultante, com respeito à área total das superfícies de cada modelo, com valores abaixo de 69,7% (Ver Tabela 7). Já no caso dos modelos Crescentes, em cada orientação, os que apresentam maiores áreas na faixa DRS Alta são os de T.O 20% para Leste e Oeste, os de T.O 30% para a orientação Sul e para os modelos virados para o norte, os de T.O 40%.

4.3. CÁLCULO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Na Tabela 8 são apresentadas as quantidades de energia, expressas em kWh/ano, que os modelos produzem anualmente em cada uma das faixas DRS.

Conforme Figura 29, em todos os modelos, à medida que a Taxa de Ocupação aumenta, a quantidade de energia gerada (fachadas + cobertura) também aumenta, em especial devido às coberturas. Porém, o aumento na geração de energia não registra uma tendência linear como apresenta o aumento dos níveis de T.O. Também é percebido que o aumento da Taxa de Ocupação não representa aumentos diretamente proporcionais na geração energética, mostrando uma curva de crescimento não linear e com tendência à estabilização. Esta condição deve acontecer em torno da condição de edificações térreas com T.O teórica de 100%, quando a geração seria máxima através das coberturas. Entretanto, quando é verificada a geração de energia só das fachadas, o aumento do T.O provoca uma leve tendência de diminuição na produção de energia.

Tabela 8. Geração de energia FV de cada modelo para um ano completo (kWh/ano).

	BAIXA	MÉDIA	ALTA		TOTAL Fac	TOTAL Fac + Cob
			Fac	Cob		
20_uni_T	-	250.774	37.707	468.022	288.482	756.503
30_uni_T	-	216.133	39.200	709.985	255.333	965.319
40_uni_T	-	224.675	29.171	827.616	253.846	1.081.462
20_pir_T	-	235.438	45.104	470.298	280.541	750.840
30_pir_T	-	209.701	44.634	715.875	254.335	970.210
40_pir_T	-	198.668	41.776	837.000	240.444	1.077.444
20_mis_T	-	237.408	48.587	450.073	285.995	736.069
30_mis_T	-	219.025	52.447	671.062	271.473	942.534
40_mis_T	-	216.710	56.030	769.937	272.739	1.042.677
20_mio_T	-	254.990	36.572	302.252	291.562	593.814
30_mio_T	-	253.291	37.553	452.174	290.844	743.018
40_mio_T	-	241.541	35.779	533.057	277.320	810.377
20_cre_N	-	234.596	37.893	462.624	272.489	735.113
20_cre_L	-	243.432	46.489	453.827	289.920	743.747
20_cre_S	-	233.508	44.674	454.497	278.182	732.679
20_cre_O	-	249.210	42.417	454.290	291.627	745.917
30_cre_N	-	202.882	43.501	698.857	246.383	945.240
30_cre_L	-	227.013	42.341	685.741	269.355	955.096
30_cre_S	-	205.403	47.582	686.723	252.986	939.709
30_cre_O	-	228.866	41.884	686.033	270.751	956.784
40_cre_N	-	154.228	51.504	814.257	205.732	1.019.989
40_cre_L	-	221.236	42.173	796.132	263.410	1.059.542
40_cre_S	-	192.863	45.467	799.039	238.330	1.037.368
40_cre_O	-	233.979	38.039	795.361	272.018	1.067.379

É interessante apontar que dependendo do tipo de integração FV, unicamente nas fachadas ou tanto em fachadas quanto em coberturas, resultará conveniente ou não o aumento

da Taxa de Ocupação. No caso dos modelos urbanos que possam integrar os sistemas fotovoltaicos em fachadas e coberturas, resulta mais vantajoso uma tipologia com taxa de ocupação maior. Contudo, se a integração FV for realizada unicamente nas fachadas, são recomendados modelos com níveis de T.O menores para alcançar maior geração. Isto pode ser conferido na Figura 29, onde é evidente a tendência da geração de energia dos modelos quando consideradas as coberturas como superfícies conversoras e quando são consideradas só as fachadas.

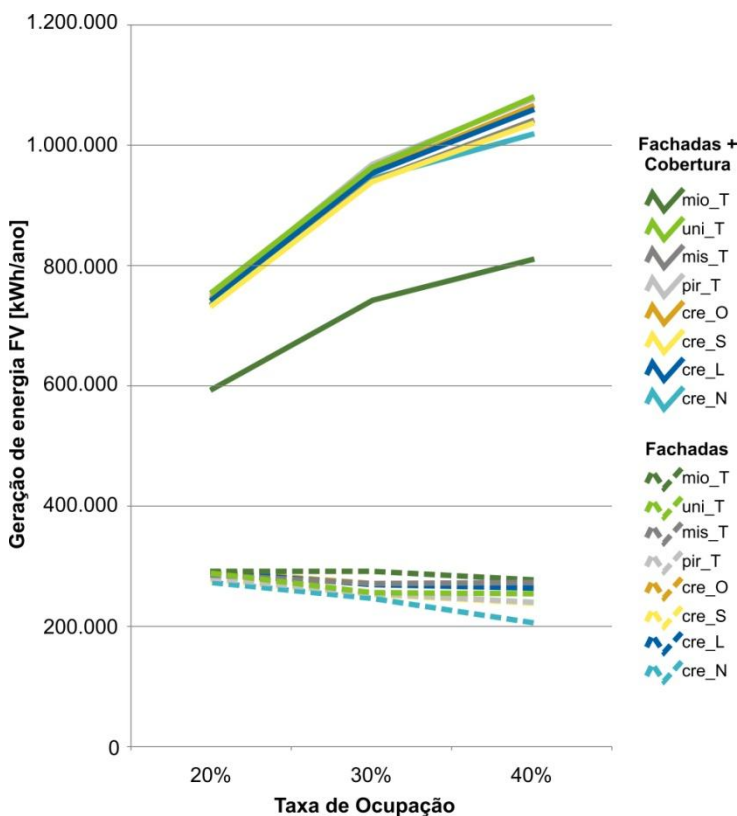


Figura 29. Comparação da geração de energia fotovoltaica dos modelos quando levadas em consideração Fachadas e Fachadas + Cobertura.

4.4. COMPARAÇÃO ENTRE GERAÇÃO E CONSUMO

A Figura 30 apresenta a razão entre geração/consumo de energia para os diferentes cenários; na qual quanto maior o valor, uma maior porção do consumo estará sendo atendida pela geração local. Os modelos do cenário Pirâmide apresentam razões levemente superiores que as dos outros cenários, seguidos pelos modelos Crescentes. Já os modelos dos cenários Uniformes e Mistos possuem comportamentos similares e levemente inferiores do que observados nos Crescentes. Finalmente, e com uma relação geração/consumo apreciavelmente inferior, estão os modelos Miolo de Quadra. Um aspecto relevante é que a razão aumenta com a T.O quando se considera a energia gerada nas fachadas e nas coberturas, mas a tendência se inverte quando se computa apenas a energia gerada nas fachadas, como já foi observado na Figura 29, com as fachadas apresentando uma participação na geração total de energia de aproximadamente 10%.

No caso dos modelos do cenário Crescente, é evidente que conforme a T.O aumenta, as diferenças entre os desempenhos dos modelos nas quatro orientações também aumenta. Porém, o comportamento é o mesmo: os modelos orientados para Leste e Oeste possuem os melhores desempenhos, os que estão virados para o Sul aparecem em seguida e os piores desempenhos são os dos modelos virados para o Norte.

O modelo 40_pir_T obteve a maior razão entre geração e consumo entre todos os modelos, quando levadas em consideração fachadas e coberturas como superfícies conversoras, chegando perto de suprir 35% da demanda energética anual. Com 34,12% segue o modelo 40_cre_O e com 33,79% o modelo 40_uni_T (Figura 30). Já no caso da integração fotovoltaica unicamente nas superfícies verticais, os modelos com melhores desempenhos foram os cenários 20_cre_O e 20_mio_T atendendo 9,32% da demanda energética, seguidos pelo cenário 20_mis_T com 9,14% da demanda.

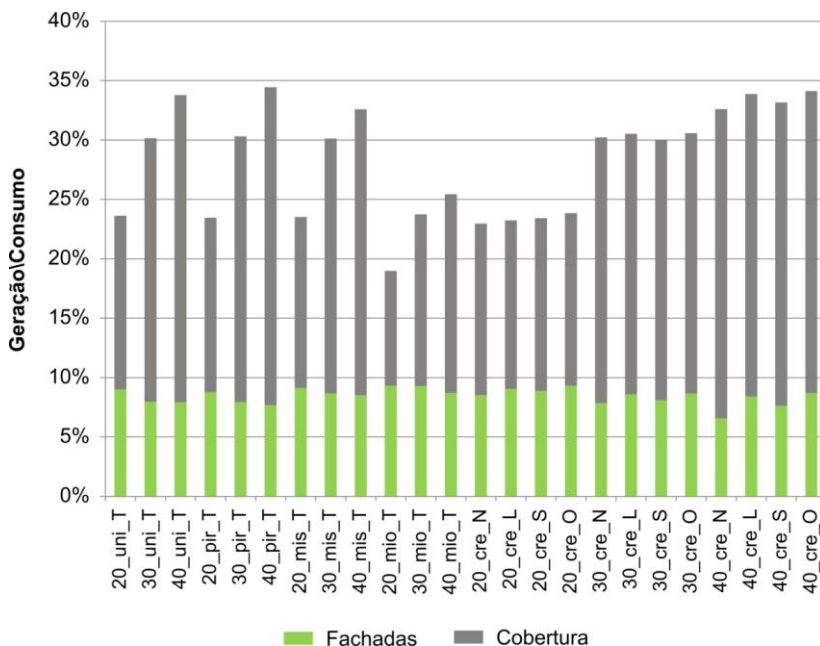


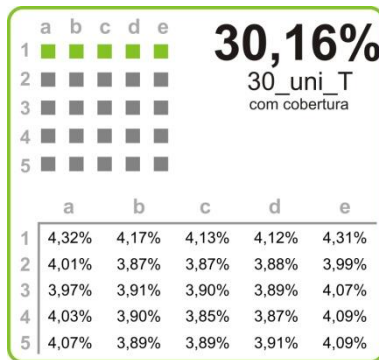
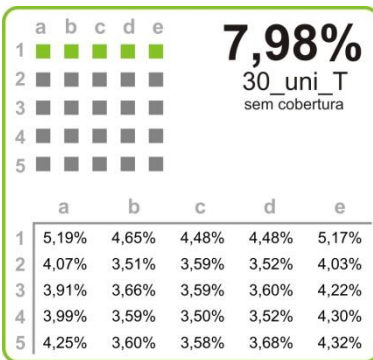
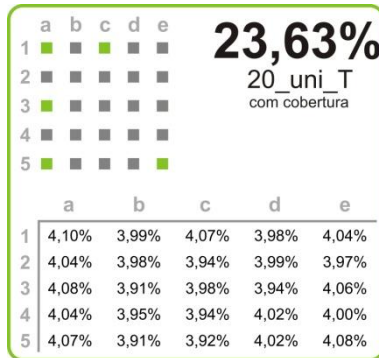
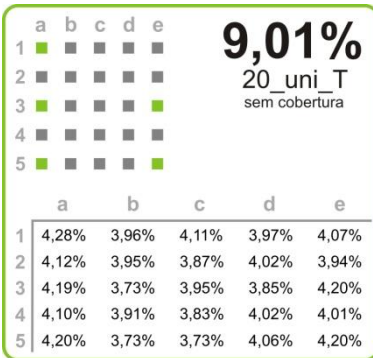
Figura 30. Relação entre geração e consumo. Percentagem do consumo de cada cenário que é gerado pela produção FV.

4.5. FICHAS RESUMO DA EFICIÊNCIA GERAL DOS MODELOS

Nesta seção são apresentadas as fichas resumo da eficiência na geração FV de cada cenário. Na parte esquerda da ficha apresenta-se a planta do modelo ressaltando os cinco prédios que possuem as maiores contribuições na geração energética. No lado direito são apresentados os aportes de cada edificação na produção de energia total, possibilitando a comparação entre eles. Finalmente, na parte superior, encontram-se a identificação do modelo e a porcentagem do consumo total anual atendida pela geração FV.

Pela Figura 31 pode-se perceber que no caso dos cenários Uniformes com T.O de 20%, as edificações que contribuem em maior medida à geração de energia, são edificações perimetrais, na sua maioria nas esquinas do modelo, porém só uma delas está orientada para o Norte. Levando em consideração que o

afastamento entre edificações, nesse caso é similar ao afastamento entre o modelo de quadra e o contexto edificado, é conferida uma influência importante da orientação e da localização dos prédios dentro do próprio cenário. Já nos modelos 30_uni_T e 40_uni_T o desempenho das edificações se vê influenciado pela redução do afastamento entre blocos, incorrendo em uma tendência clara dos prédios perimetrais orientados ao Norte apresentarem melhores desempenhos.



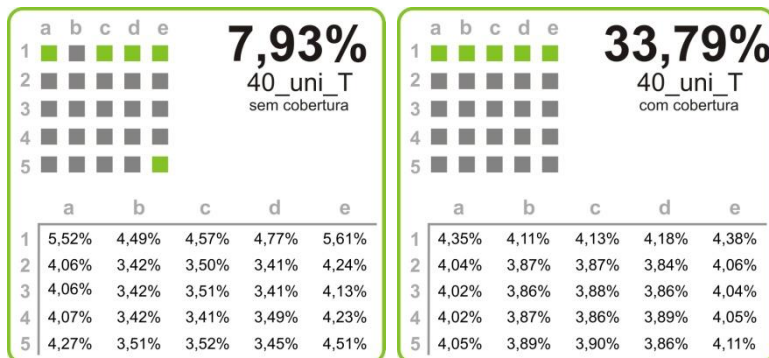


Figura 31. Fichas resumo do desempenho particular das edificações e da relação Geração/Consumo dos modelos Uniformes. Avaliação com e sem cobertura.

Nos cenários Pirâmide, é clara a variação da influência dos parâmetros segundo o valor da T.O. Conforme a Figura 32, nos modelos com taxa de ocupação 20% é evidente a influência do gabarito, visto que as edificações com melhores desempenhos são os prédios de altura maior e média, nenhum deles é um dos prédios mais baixos. No caso dos cenários com 30% de taxa de ocupação, o comportamento individual de cada bloco é similar ao registrado nos modelos com T.O de 20%, porém aparece um dos prédios de menor altura entre os prédios com melhores desempenhos. Essa tendência é acentuada nos resultados do modelo com T.O de 40%, no qual dois dos prédios mais baixos fazem parte dos blocos que mais contribuem na geração do cenário. Isto é explicado pelo fato de que, conforme o nível de T.O aumenta, o afastamento dos prédios vai diminuindo e então a acessibilidade solar nas fachadas não é tão influenciada pela altura do prédio, mais sim pela orientação. Assim, conforme a taxa de ocupação vai aumentando, a influência da orientação vai aumentando também.

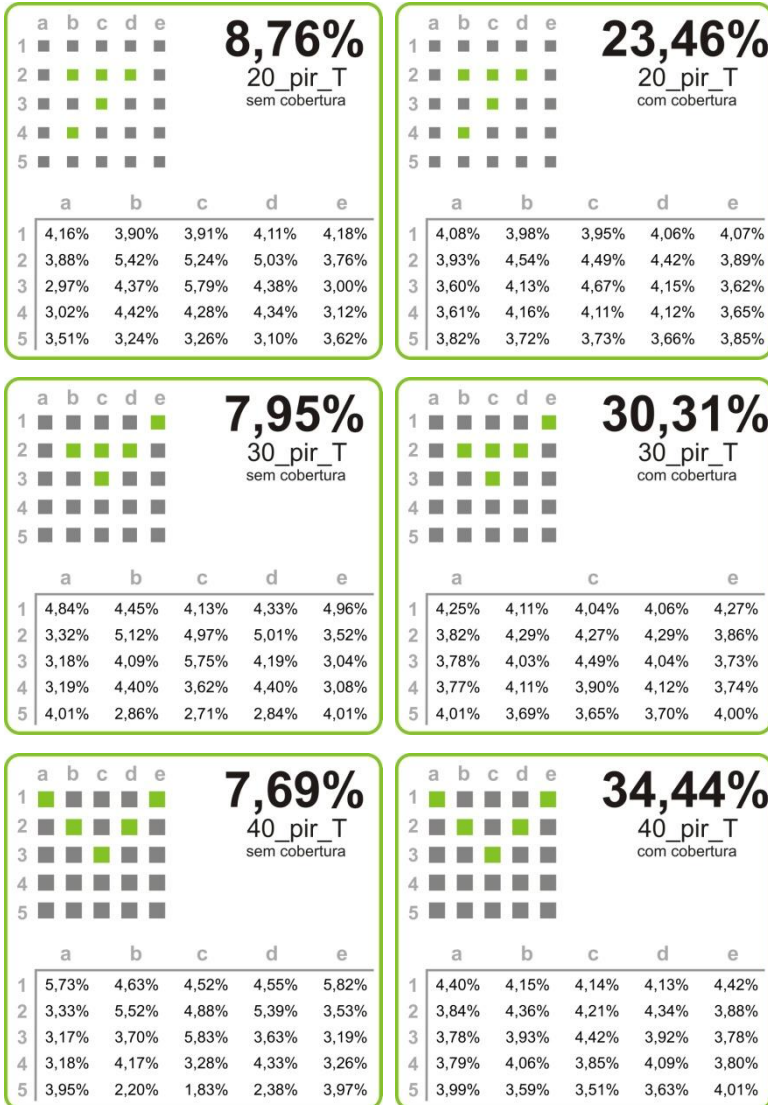
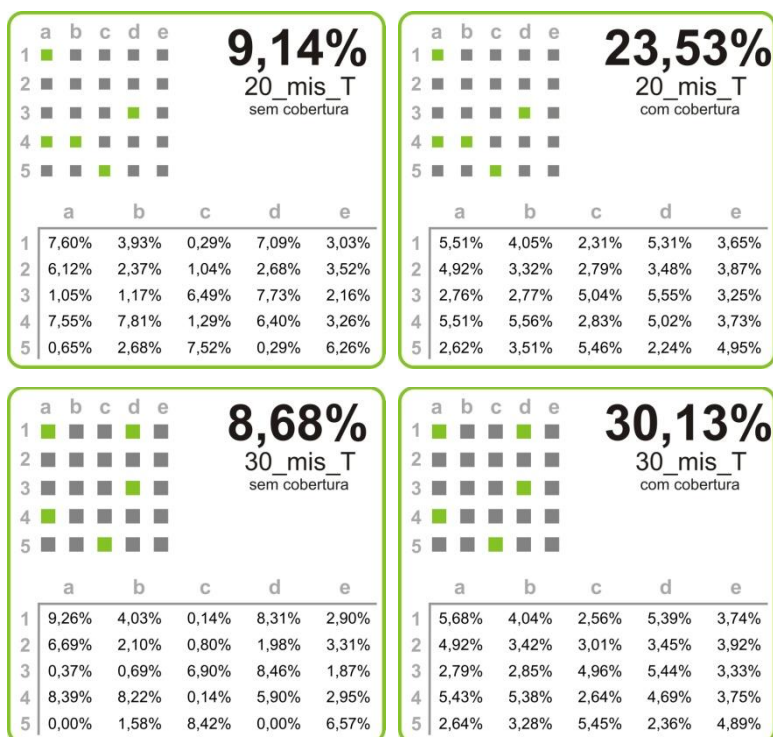


Figura 32. Fichas resumo do desempenho particular das edificações e da relação Geração/Consumo dos modelos Pirâmide. Avaliação com e sem cobertura.

As edificações que expõem os melhores desempenhos nos Modelos Mistos são na maioria aquelas que contam com

gabaritos mais altos e por tanto possuem maior exposição solar. Como pode ser observado na Figura 33, só uma das edificações que apresenta um desempenho superior trata-se de um bloco mais baixo (modelo 30_mis_T e 40_mis_T). Isto é explicado pela proximidade existente entre dois dos prédios mais altos do cenário, o que cria altos níveis de obstrução solar (Figura 23, página 52). Contudo, é interessante constatar que conforme o nível de T.O aumenta, o desempenho dos prédios é mais influenciado pela localização da edificação na quadra do que pela própria altura.



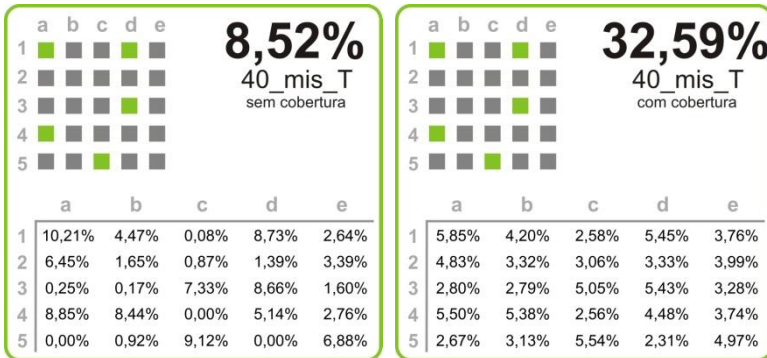
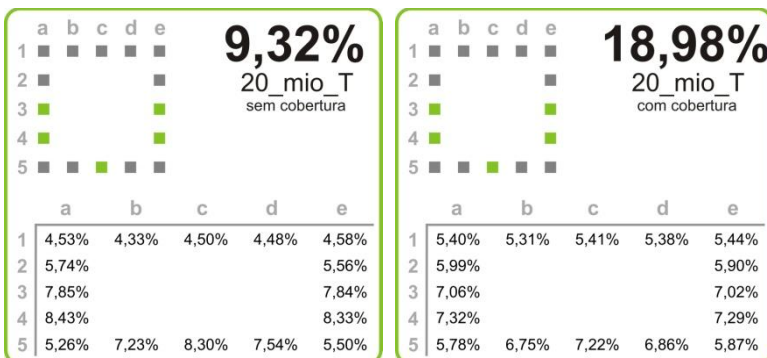


Figura 33. Fichas resumo do desempenho particular das edificações e da relação Geração/Consumo dos modelos Mistos. Avaliação com e sem cobertura.

O grupo dos modelos Miolo de Quadra possui os melhores desempenhos quando consideradas unicamente as superfícies verticais como superfícies de conversão (ver Figura 34). É importante salientar que dependendo das condições de obstrução do entorno, torna-se fundamental levar em consideração a radiação solar vinda de Leste e Oeste, visto que é uma parcela importante da radiação total. Isto se torna evidente na Figura 34, onde se observa que os prédios que mais contribuem na geração de energia fotovoltaica estão voltados para Leste e Oeste. Este fenômeno acontece pelos raios solares que atingem as superfícies pelo quadrante Nordeste nas horas da manhã e pelo quadrante Noroeste nas horas da tarde.



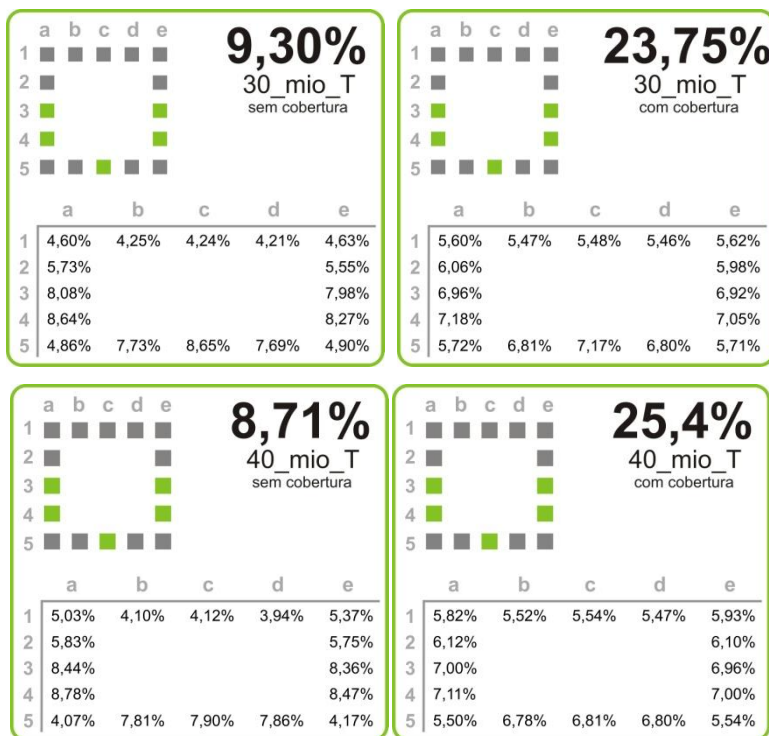


Figura 34. Fichas resumo do desempenho particular das edificações e da relação Geração/Consumo dos modelos Miolo de Quadra. Avaliação com e sem cobertura.

No caso dos cenários Crescentes, são os orientados para o Oeste, os que apresentam os melhores desempenhos, com as três taxas de ocupação. Na totalidade dos modelos orientados para o Norte, o Leste e o Oeste, os prédios mais altos (virados para a orientação indicada em cada caso), são os que apresentam os melhores desempenhos de cada cenário. Porém, nos modelos 30_cre_S e 40_cre_S, por se tratar de uma orientação pouco vantajosa para os prédios maiores, a influência da insolação proveniente de Leste e Oeste supera a contribuição dos blocos mais altos. Isto traz como decorrência que alguns dos prédios com os melhores desempenhos estejam orientados para Leste e Oeste (Figura 35, 36, 37 e 38).

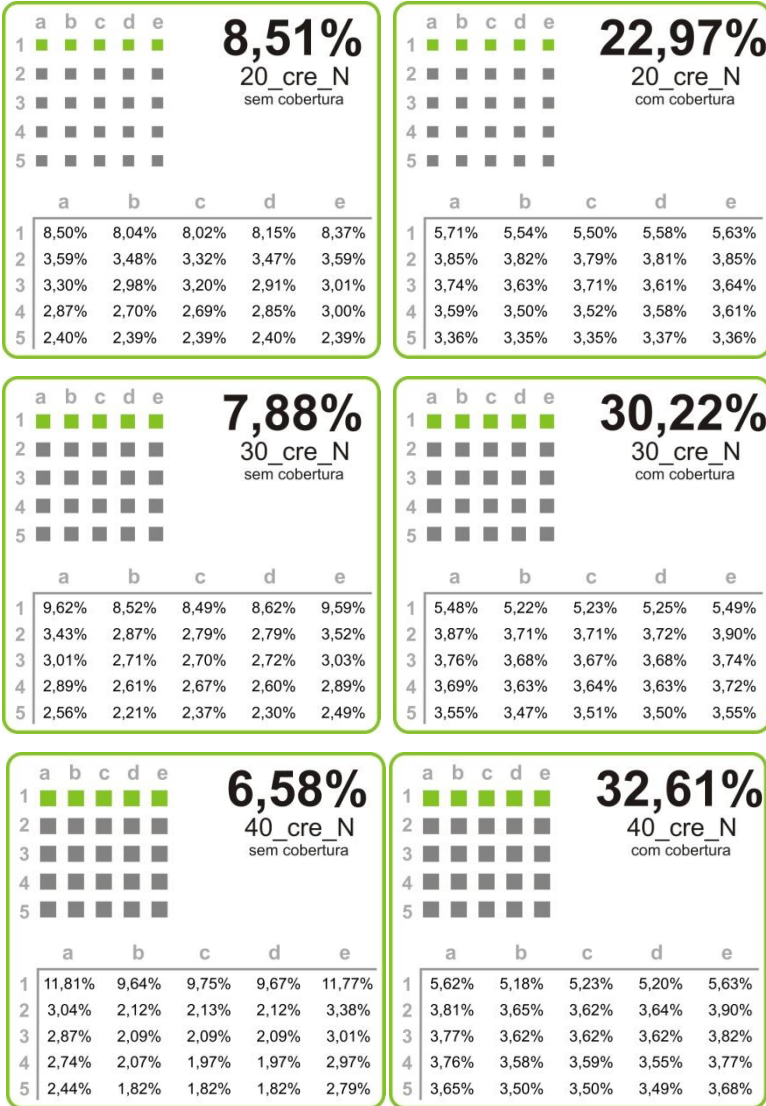


Figura 35. Fichas resumo do desempenho particular das edificações e da relação Geração/Consumo dos modelos Crescentes, orientados para o Norte. Avaliação com e sem cobertura.

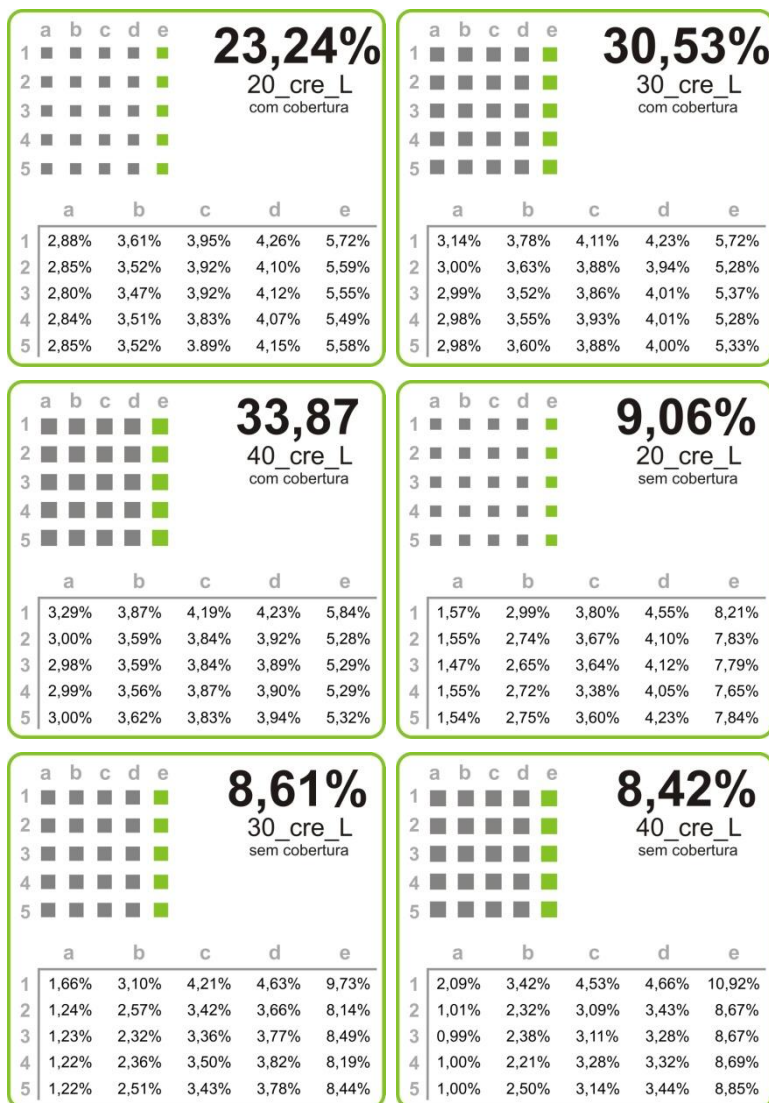


Figura 36. Fichas resumo do desempenho particular das edificações e da relação Geração/Consumo dos modelos Crescentes, orientados para o Leste. Avaliação com e sem cobertura.

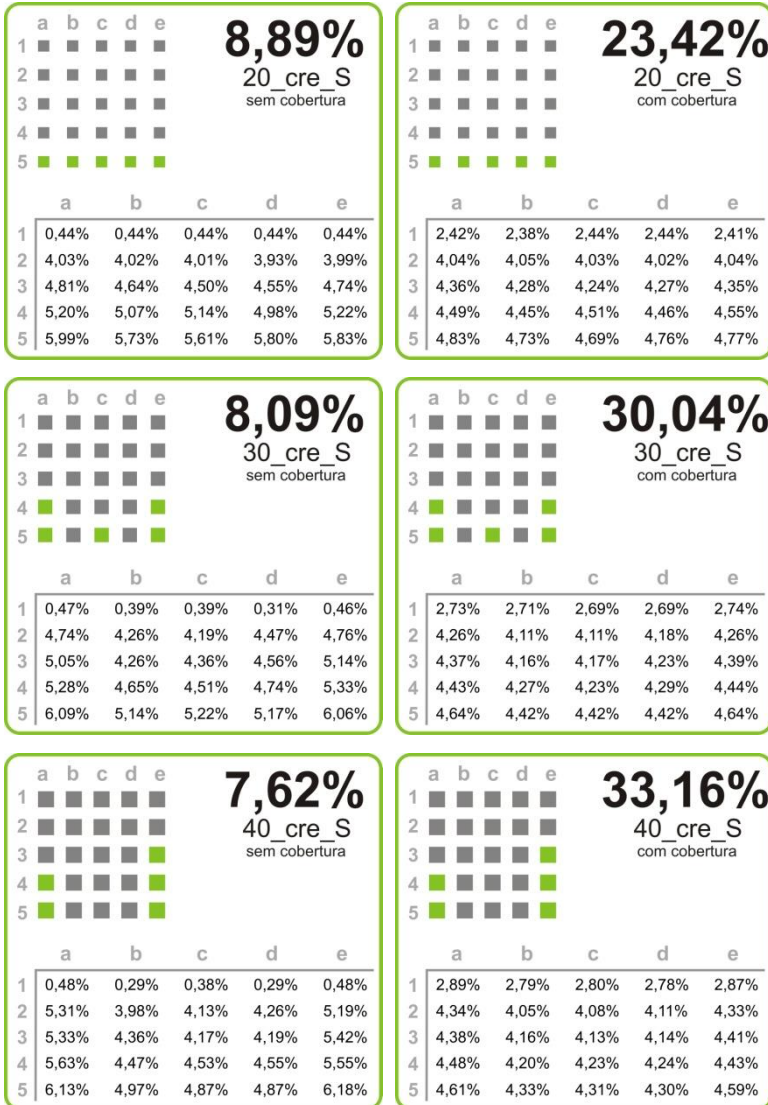


Figura 37. Fichas resumo do desempenho particular das edificações e da relação Geração/Consumo dos modelos Crescentes, orientados para o Sul. Avaliação com e sem cobertura.

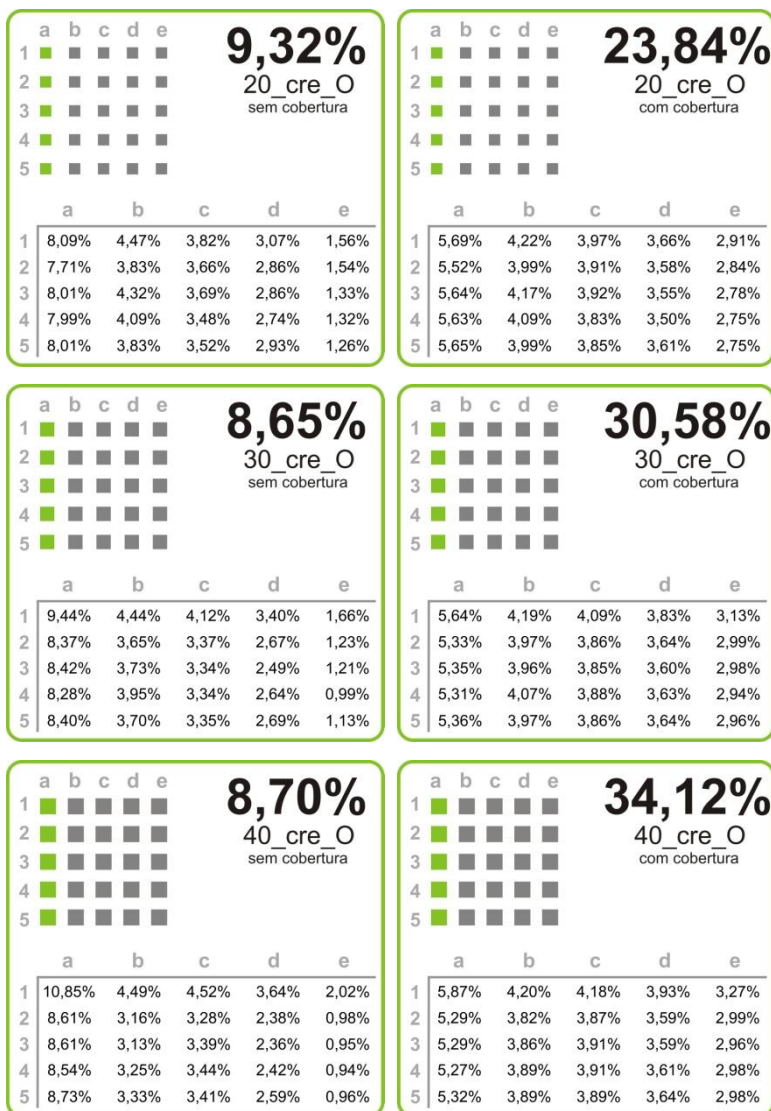


Figura 38. Fichas resumo do desempenho particular das edificações e da relação Geração/Consumo dos modelos Crescentes, orientados para o Oeste. Avaliação com e sem cobertura.

4.6. RELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS DE CONSTRUÇÃO E A RAZÃO ENTRE GERAÇÃO E CONSUMO

4.6.1. Variação da capacidade de atendimento da demanda com as diferentes Taxas de Ocupação

Na Figura 39 são comparadas as eficiências alcançadas pelos diferentes modelos com a mesma T.O, quando são levadas em consideração unicamente as fachadas como superfícies conversoras. Pode ser conferida uma relação não linear da redução da eficiência com o aumento da taxa de ocupação dentro de cada tipologia. Ou seja, embora todos os cenários (exceto o modelo cre_O) reduzam sua eficiência com o aumento do T.O, essa diminuição não segue a mesma tendência em todos os casos. É claro, no caso dos modelos Miolo de Quadra, quando a T.O aumenta de 20% para 30%, a relação entre consumo e geração diminui unicamente 0,02% (de 9,32% a 9,30%), enquanto que o aumento da taxa de ocupação de 30% para 40% decorre na redução de 0,59% da eficiência. Contudo, o modelo cre_N apresenta as reduções mais significativas na relação geração/consumo com o aumento da T.O.

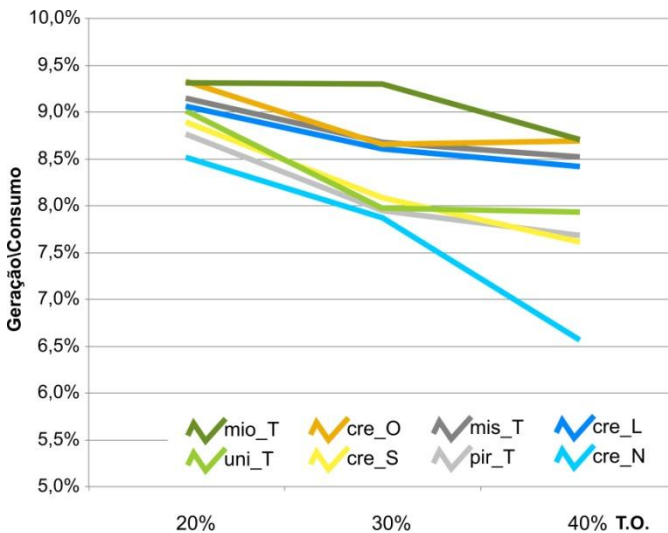


Figura 39. Influência da mudança de Taxa de Ocupação na eficiência dos modelos.

Cabe salientar que, segundo o cenário urbano analisado, o parâmetro Taxa de Ocupação tem uma influência diferente. Isto ocorre como consequência das mudanças entre afastamentos das edificações e a sua relação com a variação das áreas disponíveis para geração fotovoltaica. Nessa linha, os modelos Uniformes são mais influenciados pelo aumento de T.O de 20% a 30%, do que de 30% a 40%. Isto indica uma tendência à estabilização da geração energética, com a continuação do aumento da taxa de ocupação até o teórico de 100% que representaria uma única edificação com disponibilidade de conversão máxima nas coberturas. Os modelos cre_O apresentam um comportamento similar, reduzindo de forma mais significativa a razão entre geração e consumo quando a T.O aumenta de 20% para 30%.

Nos modelos mis_T, cre_L, pir_T e cre_S é observado um comportamento de redução no potencial de geração mais constante, quando aumenta a taxa de ocupação.

Já os cenários mio_T e cre_N apresentam uma tendência de diminuição mais leve quando a T.O aumenta de 20% para 30% e registram um decréscimo muito maior com o incremento da Taxa de Ocupação de 30% para 40%. Porém, no cenário cre_N, esse decréscimo é muito mais pronunciado, reduzindo seu desempenho de 7,88% para 6,58% com o aumento de T.O de 30% para 40%.

Uma vez que os comportamentos dos modelos apresentam tendências bastante variadas com o aumento da T.O, pode-se considerar que, embora seja uma constante a diminuição da relação geração/consumo, outros parâmetros como a configuração urbana, afastamentos entre prédios e o gabarito resultam bastante influentes na classificação dos cenários segundo seu potencial de geração de energia fotovoltaica.

4.6.2. Relação entre gabarito e potencial de atendimento da demanda

Nesta seção são avaliadas as variações na relação geração/consumo decorrentes das modificações nas alturas dos prédios dentro dos modelos de cada cenário urbano.

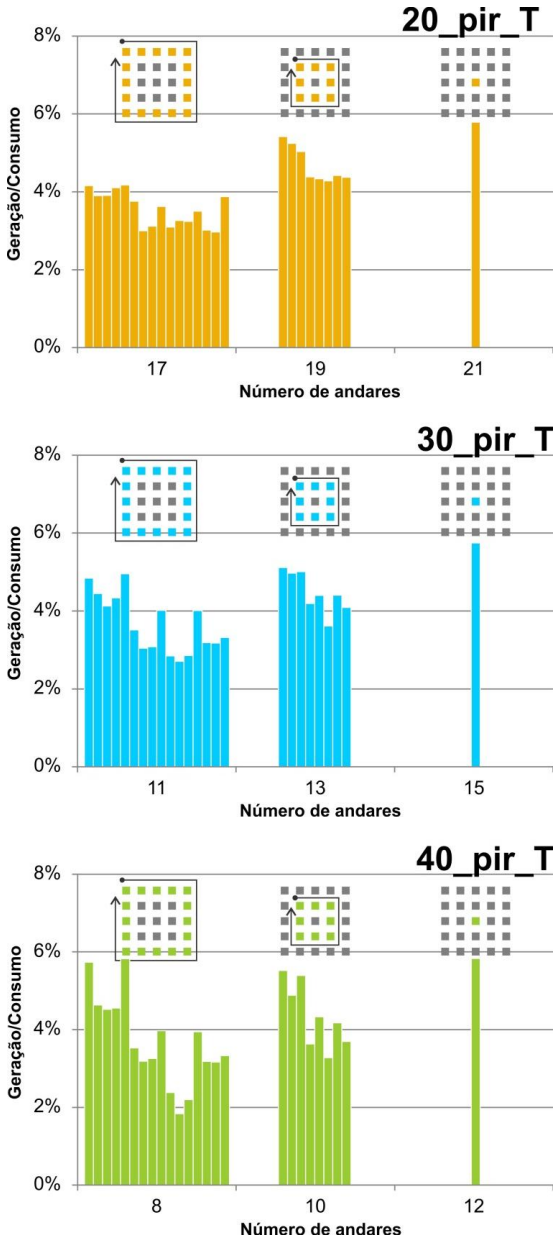


Figura 40 (a) (b) (c). Influência da alteração dos gabaritos na relação geração/consumo dos modelos Pirâmide.

Nos modelos do cenário Pirâmide, a altura das edificações é aumentada de dois em dois andares; as 16 edificações do perímetro do modelo são as mais baixas, a edificação central é a mais alta e as 9 edificações restantes têm uma altura média. Através da Figura 40 é possível observar que no modelo 20_pir_T, a participação no atendimento da demanda das edificações é diretamente proporcional ao aumento da altura, ou seja, enquanto a altura das edificações aumenta, a relação geração/consumo destas também cresce. Todavia, é observado que os desempenhos das 16 edificações menores são mais estáveis quando comparados com estas mesmas edificações no modelo 30_pir_T. Pela sua vez, o comportamento das 16 edificações perimetrais desse modelo é também mais estável do que no cenário 40_pir_T. Contudo, a tendência de comportamento dessas edificações é similar nos três modelos com diferentes T.O.

Conforme a Figura 40, é possível conferir que a influência da variação da altura das edificações dentro do modelo, para os resultados de desempenho, tem um peso muito maior quando o modelo conta com uma Taxa de Ocupação menor. Já quando a T.O aumenta, a influência da altura torna-se menor e a configuração urbana da tipologia e a orientação revelam-se como os parâmetro mais influentes. É evidente, sobretudo nos modelos com maiores níveis de T.O, que as edificações das esquinas do modelo apresentam os melhores desempenhos dentre as edificações perimetrais, sendo que são influenciadas de maneira importante pela orientação. Contudo, no modelo 30_pir_T, e em maior proporção no modelo 40_pir_T, essas edificações nas esquinas (prédios de menor altura), possuem melhores eficiências do que a maioria dos nove prédios de altura média. Isto demonstra que a diferença de altura só resulta ser o parâmetro mais influente quando a Taxa de Ocupação é baixa. Explicitando de outra forma, existe uma relação entre diferença de altura e o afastamento dos prédios. Conforme a Taxa de Ocupação aumenta, os afastamentos entre as edificações diminuem, e este é o parâmetro que restringe a influência da variação da altura na eficiência, visto que restringe de forma significativa a acessibilidade solar nas fachadas.

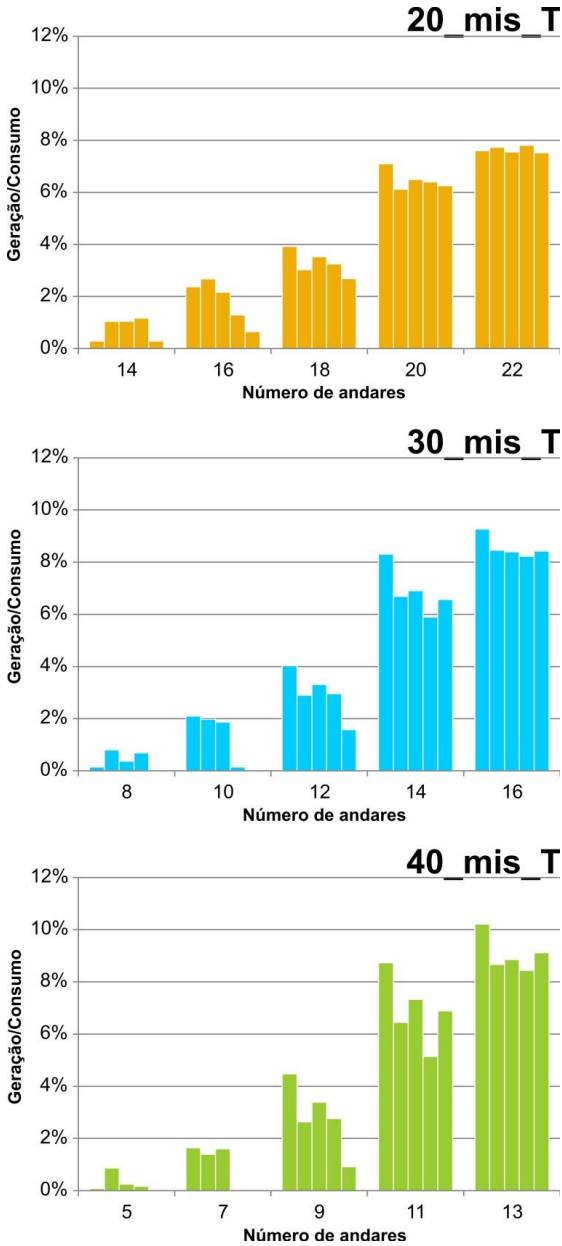


Figura 41 (a) (b) (c). Influência da alteração dos gabaritos na relação geração/consumo dos modelos Mistos.

Pela Figura 41 pode-se perceber que, similarmente ao comportamento nos cenários Pirâmide, conforme a T.O aumenta nos cenários Mistos, os desempenhos das edificações apresentam menor estabilidade. No modelo 20_mis_T, que possui edificações com cinco alturas diferentes, variando de 14 até 22 andares, é observado que os prédios aumentam sua eficiência de forma gradativa, conforme sua altura aumenta. Porém, nos modelos 30_mis_T e 40_mis_T, o incremento na eficiência não é diretamente proporcional ao aumento do gabarito. No caso dos modelos Mistos, pela aleatoriedade na localização das edificações, o comportamento de cada prédio se vê influenciado pela variação de alturas entre um e outro. Essa variação não é constante, visto que pode ocorrer que do lado do prédio mais alto exista um da mesma altura, ou um dos mais baixos, o que vai influenciar bastante a eficiência de cada edificação. Esta condição e a influência da orientação revelam-se como parâmetros com maior peso na eficiência dos modelos, conforme a T.O aumenta.

Na Figura 42 observa-se que nos modelos Crescentes, as edificações orientadas para Norte, Leste e Oeste apresentam um leve aumento na eficiência conforme a altura delas aumenta, porém os cinco prédios maiores apresentam um aumento muito mais evidente. Isto é explicado pelo fato de que a acessibilidade solar aumenta bastante não apenas pela diferença de dois andares com os prédios adjacentes, mas sim pela grande diferença com os prédios do contexto edificado, que neste caso trata-se das edificações mais baixas. Contudo, os cenários orientados para o Sul mostram um comportamento contrário: O aumento mais significativo da eficiência ocorre quando são comparados os prédios mais baixos e os localizados na seguinte fileira. Isto é consequência dos bloqueios dos raios solares causados pela própria tipologia do cenário.

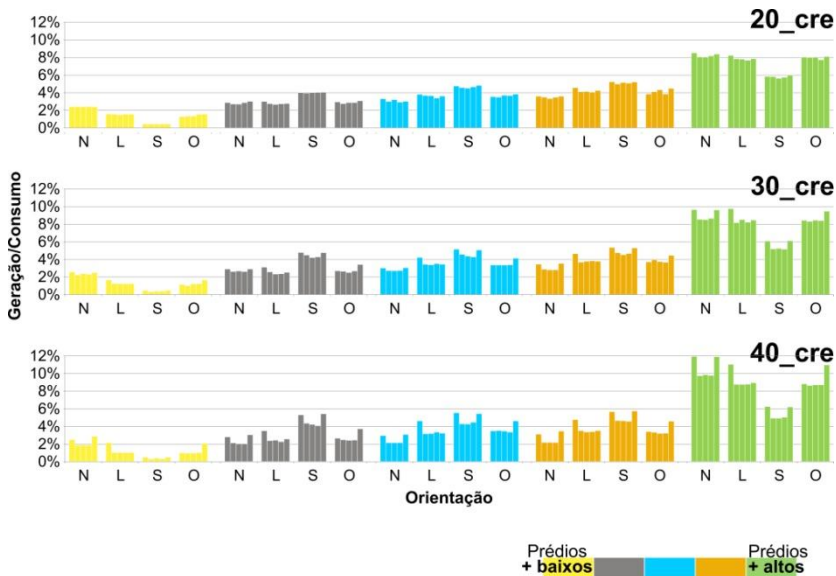


Figura 42. Influência da alteração dos gabaritos na relação geração/consumo dos modelos Crescentes, nas orientações Norte, Leste, Sul e Oeste.

Como nos casos anteriormente analisados, a geração de energia fotovoltaica é mais uniforme quando a Taxa de Ocupação é menor. Porém, é interessante observar que nos modelos com os três níveis de T.O, o desempenho das edificações localizadas nos extremos dos modelos, ou seja, as mais baixas e as mais altas, apresenta um comportamento bastante estável para as orientações Norte, Leste e Oeste e uma diminuição importante no desempenho nos modelos orientados para o Sul. Entretanto, para as edificações restantes, é a orientação Sul a que apresenta um pico na eficiência das edificações, enquanto que as outras orientações ficam, em todos os casos, abaixo desse nível. Este fenômeno pode ser explicado, novamente, pelas restrições na acessibilidade solar causadas pela gradação nas alturas dos blocos (Figura 43).

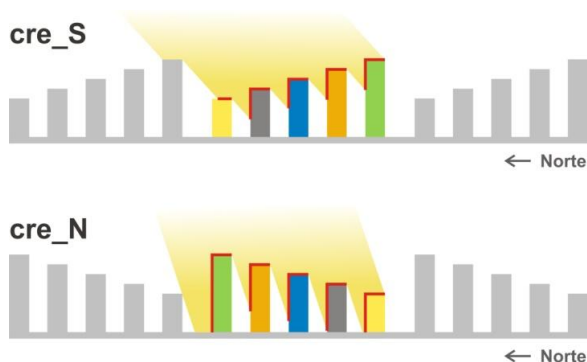


Figura 43. Esquema explicativo do comportamento solar dos cenários Crescentes.

Além do anterior, é percebida também uma influência maior da localização das edificações conforme a T.O aumenta. Nos modelos 40_cre é claramente observado que as edificações externas de cada fileira têm uma eficiência apreciavelmente maior do que as localizadas no interior desta. Isto é explicado, mais uma vez, pelo fato da acessibilidade solar nas fachadas ser bastante reduzido nos modelos de T.O de 40%, fazendo com que a separação do modelo com o contexto (que é maior do que o afastamento entre as edificações), permita menores bloqueios ao ingresso solar nas fachadas.

Na figura 44, pode-se identificar a influência da diferença entre os gabaritos, nos casos nos quais aumenta gradativamente de dois em dois andares (Pir_T, Cre_N, Cre_L, Cre_S e Cre_O). Observa-se que no caso dos modelos Crescente, o aumento nas alturas das edificações apresenta influências diversas no desempenho dos prédios. Os modelos orientados para Leste e Oeste possuem aumentos constantes, da ordem de 0.05%, no potencial de geração das edificações, conforme aumentam sua altura. Porém, o comportamento das edificações maiores, quando comparadas com aquelas da fileira adjacente, apresenta um aumento bastante representativo. No caso dos modelos Cre_N, conforme aumentam as alturas das primeiras quatro fileiras de edificações, o comportamento permanece quase constante, entretanto, as edificações maiores apresentam um pico pronunciado, similarmente aos orientados para Leste e Oeste. Já a mudança de altura nas edificações dos modelos

Cre_S, mostra um comportamento inverso: o aumento de altura entre as edificações menores e as adjacentes representa o maior aumento na razão geração/consumo com valores entre 1,3% e 1,6%, no potencial de geração. Contudo, a diferença entre a segunda fileira e as edificações maiores (quinta fileira) alcança apenas aumentos de 0,2% e 0,7% respectivamente. Cabe salientar que no caso da construção de modelos com aumentos gradativos nas alturas das edificações, estes apresentarão melhores desempenhos quando orientados para L e O, sendo representativamente maiores os desempenhos nas edificações mais altas.

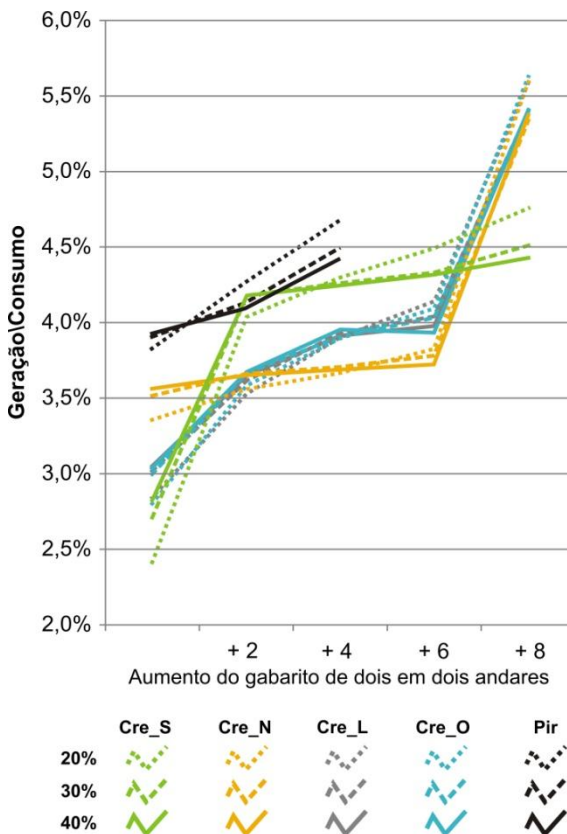


Figura 44. Médias da relação entre geração e consumo dos prédios da mesma altura em cada modelo. Comparação do aumento de dois em dois andares.

No caso dos modelos Pirâmide, por serem modelos simétricos, é observado um aumento similar e constante da relação geração/consumo, quando a altura das edificações vai aumentando. Isto faz também com que o desempenho desses cenários seja mais previsível. Contudo, o aumento no potencial de geração alcança apenas valores de 0,5%, 0,6% e 0,9%.

Torna-se evidente que a influência do aumento da altura das edificações está estreitamente ligada à orientação, sendo que os modelos onde o aumento dos gabaritos aponta para Leste e Oeste apresentam melhores desempenhos, inclusive, quando comparados com modelos onde o aumento acontece em todas as direções (cenários Pirâmide).

4.6.3. Número de andares onde é recomendada a instalação FV

Nesta seção é apresentado o número de andares nos quais é recomendada a instalação de painéis fotovoltaicos, conforme a divisão das faixas DRS, em cada um dos modelos. Na Tabela 9 é indicado o número máximo de andares que, em cada modelo, resulta recomendável para integração FV. É indicado também, em qual edificação se apresenta a quantidade máxima de andares e a orientação da fachada na que ocorre.

Tabela 9. Andares recomendados para integração fotovoltaica nas fachadas das edificações. O número máximo de andares é contabilizado de cima para abaixo.

	Número máximo de andares	Edificação número	Orientação			
			N	L	S	O
20_uni_T	6	1, 5	x			
30_uni_T	5	1, 2, 3, 4, 5	x			
40_uni_T	5	1, 2, 3, 4, 5	x			
20_pir_T	5	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 25	x			
30_pir_T	5	1, 2, 4, 5	x			
40_pir_T	5	1, 2, 3, 5	x			

Tabela 9 (Continuação). Andares recomendados para integração fotovoltaica nas fachadas das edificações. O número máximo de andares é contabilizado de acima para abaixo.

	Número máximo de andares	Edificação número	Orientação			
			N	L	S	O
20_mis_T	12	4, 8, 13, 16, 17	x			
30_mis_T	12	13	x			
40_mis_T	11	13	x			
20_mio_T	19	14	x			
30_mio_T	16	14	x			
40_mio_T	13	13, 14, 15	x			
20_cre_N	13	1, 2, 3, 4, 5	x			
20_cre_L	12	1, 2, 6, 11, 16, 21	x			
20_cre_S	13	8, 10	x			
20_cre_O	12	4, 5, 10, 15, 20, 25	x			
30_cre_N	13	1, 2, 3, 4, 5	x			
30_cre_L	12	1	x			
30_cre_S	12	6, 7, 8, 9, 10	x			
30_cre_O	12	4, 5	x			
40_cre_N	12	2, 4, 6, 8, 9, 10	x			
40_cre_L	12	1	x			
40_cre_S	11	3, 4, 5, 6	x			
40_cre_O	12	15	x			

A Figura 45 exibe a numeração dos prédios ao interior do modelo, para a tipologia Miolo de Quadra e para as tipologias restantes.

Na Tabela 9, pode-se observar que os modelos que alcançam um maior número de andares com instalação FV são os modelos Miolo de Quadra. Como estes cenários possuem

prédios muito mais altos e são beneficiados pelo vazio interior, a acessibilidade solar pode ser aproveitada em um número maior de andares.

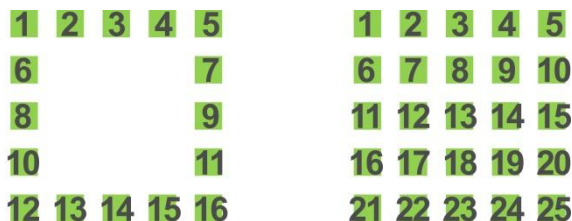


Figura 45. Sistema de numeração dos cenários Miolo de Quadra e do restante dos modelos.

Nas figuras 46 até 53, é possível observar detalhadamente o número de andares que cada fachada de cada prédio dispõe para integração fotovoltaica. É possível então, baseado nisso, tomar decisões de projeto, arquitetônicas e estéticas, que permitam um aproveitamento máximo do potencial de conversão fotovoltaica. Da mesma forma, é possível calcular de maneira aproximada a economia de materiais construtivos, decorrentes da substituição dos materiais convencionais pelos painéis FV nos andares superiores recomendados.

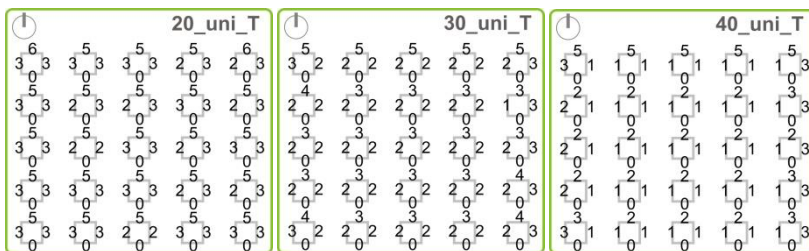


Figura 46. Número de andares (contabilizados de cima para baixo) onde se recomenda integração FV para a geração de energia. Dados especificados por fachada nos modelos Uniformes.

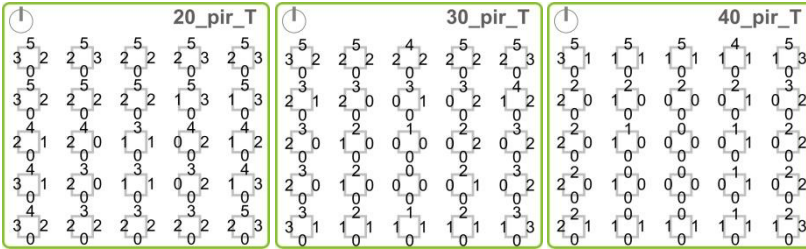


Figura 47. Número de andares (contabilizados de cima para baixo) onde se recomenda integração FV para a geração de energia. Dados especificados por fachada nos modelos Pirâmide.

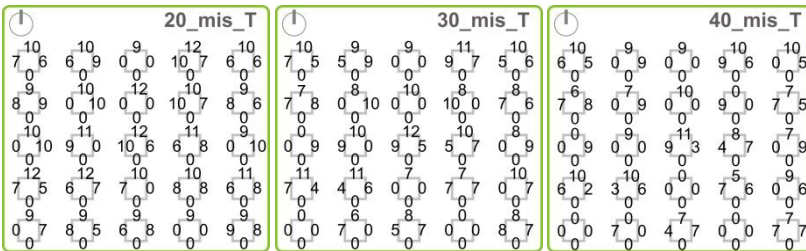


Figura 48. Número de andares (contabilizados de cima para baixo) onde se recomenda integração FV para a geração de energia. Dados especificados por fachada nos modelos Mistos.

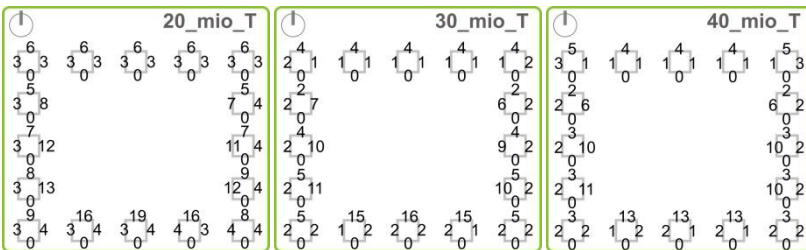


Figura 49. Número de andares (contabilizados de cima para baixo) onde se recomenda integração FV para a geração de energia. Dados especificados por fachada nos modelos Miolo de Quadra.

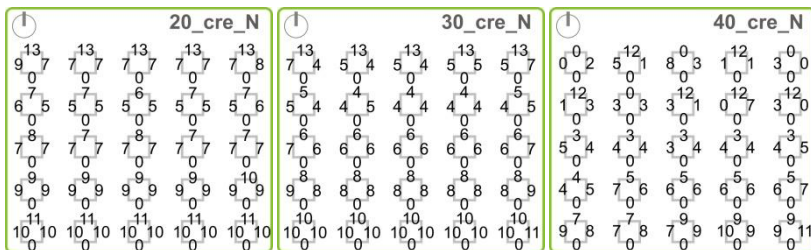


Figura 50. Número de andares (contabilizados de cima para baixo) onde se recomenda integração FV para a geração de energia. Dados especificados por fachada nos modelos Crescente, orientados para o Norte.

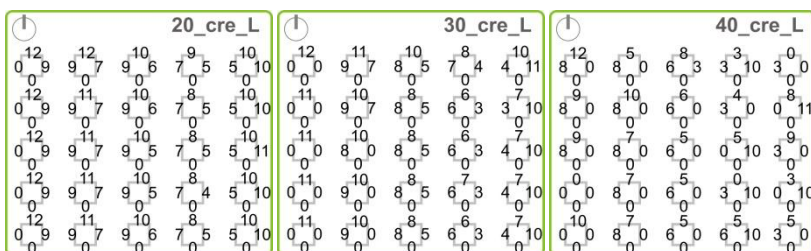


Figura 51. Número de andares (contabilizados de cima para baixo) onde se recomenda integração FV para a geração de energia. Dados especificados por fachada nos modelos Crescente, orientados para o Leste.

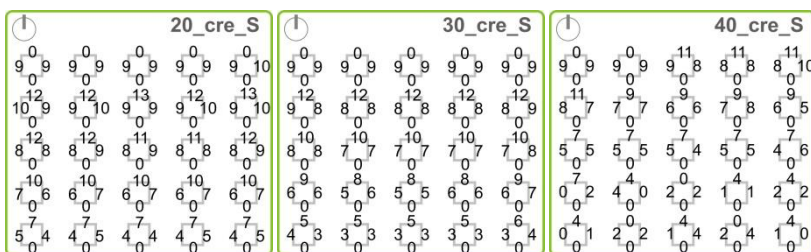


Figura 52. Número de andares (contabilizados de cima para baixo) onde se recomenda integração FV para a geração de energia. Dados especificados por fachada nos modelos Crescente, orientados para o Sul.

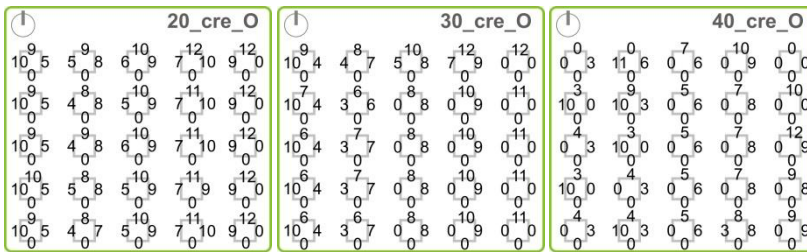


Figura 53. Número de andares (contabilizados de cima para baixo) onde se recomenda integração FV para a geração de energia. Dados especificados por fachada nos modelos Crescente, orientados para o Oeste.

4.7. CONSIDERAÇÕES DOS RESULTADOS

As maiores percentagens de área classificadas na Faixa DRS Alta, ocorrem nos modelos Mistos, para todos os níveis de T.O. Porém o cálculo da relação entre geração e consumo mostra que é o cenário 40_pir_T que apresenta o melhor desempenho. Cabe salientar que, não é possível garantir que o modelo que possui a maior área na faixa alta, seja o que vai ter o melhor potencial de geração de energia, visto que para o cálculo de geração FV tanto a área quanto a quantidade de radiação solar são fatores fundamentais.

Os modelos com menor T.O apresentam um comportamento mais previsível na disponibilidade de radiação solar, porém, conforme a T.O aumenta, o comportamento dos modelos é muito mais variável. Isto indica que a influência da tipologia urbana é mais acentuada conforme o nível de T.O vai aumentando. A redução da Taxa de Ocupação, que decorre no aumento do afastamento entre as edificações, acarreta que os desempenhos das edificações na disponibilidade de radiação solar, sejam mais estáveis. Sendo assim, pode-se concluir que quanto mais isoladas estejam as edificações menores serão as variações em seus desempenhos.

Os modelos Miolo de Quadra são os únicos que apresentam áreas similares na faixa DRS Alta em fachadas e coberturas. Isto é explicado pela grande quantidade de radiação solar admitida pelo vazio na quadra que atinge as fachadas das edificações. Já os modelos Mistos apresentam desempenhos bastante variáveis quando são avaliadas as edificações separadamente, visto que a aleatoriedade nas alturas decorre

em grandes áreas de fachada com altos níveis de disponibilidade solar, porém também acarreta prédios bastante restritos pelo sombreamento. Contudo, quando é avaliada a razão entre geração e consumo do cenário o desempenho é similar aos valores dos cenários Uniformes, demonstrando uma compensação, nos modelos Mistos, entre os prédios com os maiores desempenhos e aqueles que apresentam os mais restritos.

4.7.1. Considerações sobre a influência dos parâmetros de construção

Os potenciais de geração energética dos modelos, conforme aumentam os níveis de T.O, varia de forma diferente, dependendo das superfícies que sejam levadas em consideração para essa conversão. Quando a geração é realizada unicamente nas fachadas, o aumento da T.O gera uma diminuição nos desempenhos dos modelos. Inversamente, quando são as coberturas e fachadas as superfícies conversoras, a razão entre geração e consumo apresenta uma tendência crescente.

Percebe-se que, conforme a taxa de ocupação vai aumentando, a influência da orientação e da localização da edificação na quadra aumenta também. Visto que a tendência do comportamento dos modelos apresenta variações bastante representativas com o aumento da T.O, pode-se considerar que, embora seja uma constante a diminuição da relação geração/consumo, outros parâmetros como a configuração urbana, afastamentos entre prédios e o gabarito resultam bastante influentes na classificação dos cenários segundo seu potencial de geração de energia fotovoltaica. No caso dos modelos Pirâmide, por exemplo, quando a T.O é baixa, a diferença nas alturas das edificações se converte no parâmetro mais influente no potencial de atendimento da demanda. Já os modelos mistos são mais influenciados pela aleatoriedade nas alturas e a orientação, conforme a Taxa de Ocupação aumenta.

No caso dos modelos Crescentes, observa-se que o peso do aumento nas alturas, na relação geração/consumo, está estreitamente ligado à orientação do cenário.

5. CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões encontradas no desenvolvimento da pesquisa. Adicionalmente são mencionadas algumas considerações finais como as limitações que apresentou o trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

5.1. CONCLUSÕES

No contexto energético e ambiental atual, é de grande importância que desde o campo da arquitetura e a construção, sejam gerados projetos ambientalmente responsáveis. Para atender este objetivo, a eficiência energética é uma das ferramentas fundamentais nas ações a serem tomadas. O presente estudo apresenta uma metodologia que permite a determinação do potencial que tem as superfícies verticais para geração de energia FV dentro de centros urbanos. Com a validação da ferramenta, concluiu-se que esta pode ser utilizada em diferentes contextos climáticos, latitudes e para quaisquer modelo de cidade, dando a possibilidade de ser aplicada em uma grande quantidade de projetos de diversas magnitudes.

Os alcances da metodologia proposta não se limitam apenas ao cálculo do potencial de integração FV em projetos de cenários ou bairros a serem construídos. A ferramenta possibilita também a análise de conjuntos de edificações já construídas, para assistir processos de *retrofit* e integração de fontes renováveis de energia para elevar a eficiência energética de centros urbanos já existentes. Isto resulta numa importante contribuição para diminuir os impactos energéticos das cidades, que são responsáveis por uma grande parcela do consumo de energia no mundo.

A configuração ortogonal dos modelos analisados no presente estudo mostrou que, quando virados para a melhor orientação, a disponibilidade de radiação solar nas fachadas resulta bastante restrita pelo sombreamento das edificações adjacentes, visto que encontram-se perfeitamente alinhadas. Sobretudo nos modelos nos quais os melhores desempenhos se apresentam nas edificações voltadas para o Norte ou o Sul, evitar o alinhamento das edificações nessa direção resultaria em melhoras representativas na disponibilidade solar das fachadas,

visto que o prédio adjacente não estaria bloqueando os raios solares mais influentes.

É importante levar em consideração que, embora o trabalho apresente uma ferramenta bastante útil para tornar os centros urbanos em usinas geradoras da sua própria energia, sempre deve haver uma preocupação inicial em todos os projetos ao aplicar estratégias que diminuam o consumo energético das edificações. Assim, após garantir que os prédios estão projetados para manter consumos responsáveis, pode ser aplicada a metodologia proposta resultando em projetos com ótimos níveis de eficiência.

Concluiu-se ainda que o modelo que apresentou o menor desempenho possui um bom potencial de geração fotovoltaica para atender a sua própria demanda de energia, considerando que pode chegar até 6,6%, o que representa grandes economias energéticas por se tratar de um estudo a nível urbano. Além disso, cabe salientar que, as quantidades de energia geradas pelos cenários poderiam aumentar de forma significativa implementando tecnologias fotovoltaicas com maiores níveis de eficiência. Similarmente, se as superfícies envidraçadas pudessem ser levadas em consideração dentro das superfícies conversoras, com a integração de módulos fotovoltaicos translúcidos, o potencial de atendimento da demanda dos modelos aumentaria consideravelmente.

Mesmo em um local razoavelmente longe do Equador, como Florianópolis, sempre deve ser levada em consideração a radiação vinda desde Leste e Oeste. Foi comprovado que, em alguns casos, a configuração do modelo e do entorno, ocasionou que as edificações voltadas para essas orientações possuíam desempenhos superiores aos encontrados nas edificações orientadas para o Norte.

Concluiu-se que não é possível classificar os parâmetros de construção segundo sua influência no potencial de geração dos diferentes modelos urbanos, de forma separada, visto que, como foi observado no capítulo de resultados, a influência de cada parâmetro está determinada pela relação dele com vários outros parâmetros. Sendo assim, a influência de cada parâmetro muda conforme outros parâmetros variam.

5.1.1. Diretrizes de projeto urbano para aumentar a eficiência energética dos centros urbanos

A determinação dos parâmetros mais influentes na geração energética dos diferentes modelos urbanos depende, em grande medida, de dois aspectos fundamentais: Quais as superfícies disponíveis para a integração FV (Fachadas ou fachadas e coberturas) e a Taxa de Ocupação da zona que será analisada. Estes aspectos são, na maioria dos casos, fixados nas primeiras etapas do projeto, possibilitando a determinação da combinação mais vantajosa energeticamente entre os parâmetros, para cada projeto específico. Porém, também é possível escolher estes aspectos arquitetônicos e urbanos se baseando no potencial de integração fotovoltaica esperado.

A Figura 54 apresenta as diretrizes gerais para a construção de cenários urbanos que integrem painéis fotovoltaicos nas fachadas das edificações. Na coluna à esquerda estão os diferentes parâmetros de construção analisados. Em seguida as diferentes opções de cada parâmetro são apresentadas, conforme representem maior ou menor potencial de geração energética. Os parâmetros localizados no extremo direito da fileira são aqueles que apresentam maiores relações Geração/Consumo, e os localizados à esquerda apresentam os desempenhos menos vantajosos. Para os parâmetros Gabarito e Orientação, é indicado em quais casos possuem maior influência no potencial de atendimento da demanda dos diferentes modelos.

A figura 54 é uma ferramenta que pode assistir o processo projetual de arquitetos e urbanistas que busquem a construção (ou readaptação) de centros urbanos nos quais se integrem sistemas fotovoltaicos de forma eficiente para a geração de energia.

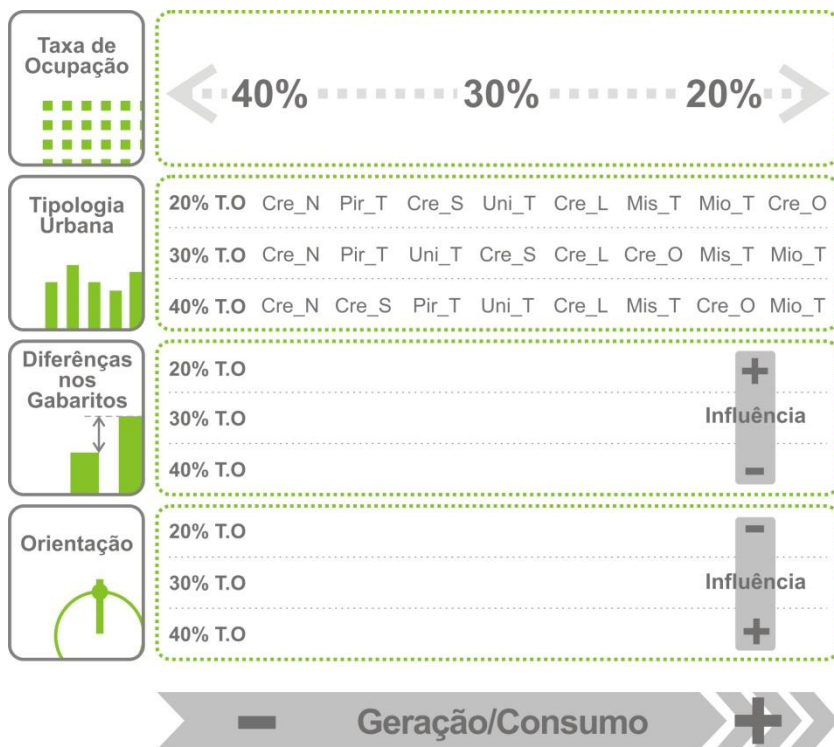


Figura 54. Diretrizes gerais de projeto para a construção de centros urbanos que integrem sistemas FV.

Para processos de *retrofit* ou em programas para implementar energia FV em contextos urbanos existentes, devem ser identificados os parâmetros que correspondam ao caso analisado, de forma a encontrar qual será o potencial aproximado de geração energética.

5.2. LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Durante o desenvolvimento da pesquisa foram encontradas algumas limitações referentes aos modelos computacionais e à adoção de certas variáveis para o cálculo do potencial de atendimento da demanda dos cenários. A seguir são explicadas estas limitações.

- Simplicidade dos modelos: Embora as cinco tipologias de cenários urbanos formem uma amostra representativa dos

modelos de cidades reais, foram adotadas simplificações no formato e disposição das edificações, visto que foram simuladas edificações com formato de prisma regular e utilizado só um arranjo. Além disso, não foram levadas em consideração possíveis inclinações do terreno e as simulações foram realizadas apenas para as quatro orientações principais.

- Faixas DRS: A reduzida quantidade de faixas de DRS resultou na determinação dos diferentes níveis de PAF para grandes quantidades de área, com disponibilidades de radiação solar bastante variáveis.

- Determinação do consumo de energia: Os valores de consumo, utilizados para o cálculo da relação entre geração e consumo, foram determinados adotando-se um valor de consumo constante por metro quadrado.

- Cálculos de geração de energia: Os cálculos da energia gerada pelos módulos FV, integrados às superfícies das edificações, foram realizados com um sistema FV comum disponível no mercado. Porém, não foram testados outros sistemas com eficiências diferentes de forma a comparar os desempenhos dos cenários quando utilizados diferentes tecnologias FV.

- Caracterização econômica das propostas: No presente estudo não foram levados em consideração os custos econômicos da instalação dos sistemas fotovoltaicos. Similarmente, não foram quantificadas as economias decorrentes da substituição dos materiais das fachadas e coberturas, por módulos FV; e principalmente, as economias decorrentes da geração de uma parcela importante da demanda energética dos modelos.

5.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nas limitações apresentadas acima e nos resultados e conclusões do trabalho, foram identificadas algumas orientações para trabalhos futuros.

- Aplicar a metodologia proposta em modelos urbanos mais complexos, que levem em consideração outros parâmetros de construção.

- Gerar uma maior quantidade de faixas DRS para a divisão das áreas, visando atribuir níveis de PAF mais adequados para cada uma.

- Incluir, nos cálculos do consumo energético, simulações da demanda de energia de cada edificação baseadas no arquivo climático, de forma a melhorar a precisão dos cálculos do potencial de atendimento da demanda.

- Calcular o benefício econômico da aplicação dos sistemas FV propostos, levando-se em consideração: Custos do sistema FV, custos de instalação, *Pay-Back-Time*, economia pela substituição dos materiais de construção nas áreas de integração e economia pela energia gerada pelo sistema.

REFERÊNCIAS

AMONIX - DESIGNER E FABRICANTE DE SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR. Acessado em: setembro 2012. Disponível em: <<http://amonix.com/pt-pt/node/858>>.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa N° 482**, de 17 de abril de 2012. p. 1-4, 2012.

ASSIS, E. S. D. Critérios de acessibilidade ao sol e à luz natural planejamento urbano. **IX Encontro Nacional de tecnologia do Ambiente Construído**, 2002.

BAHAJ, A. Solar photovoltaic energy: generation in the built environment. **Proceedings of ICE**, p. 45-51, 2005.

CARLISLE, N.; GEET, O.; PLESS, S. **Definition of a “Zero Net Energy” Community Definition of a “Zero Net Energy” Community**. *Technical Report NREL/TP-7A2-46065, 2009*. Acessado em: junho 2012. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/46065.pdf>>.

CHERQUI, F. *et al.* A step toward the global assessment of district projects: Solar indicators and way to quantify them. **Building Simulation**, p. 167-174, 2005.

COLLE, S.; ABREU, S. L. D. E.; RÜTHER, R. Uncertainty in economical analysis of solar water heating. **Solar Energy**, p. 131-142, 2001.

CRONEMBERGER, J.; CAAMAÑO-MARTÍN, E.; SÁNCHEZ, S. V. Assessing the solar irradiation potential for solar photovoltaic applications in buildings at low latitudes – Making the case for Brazil. **Energy and Buildings**, 2012.

DAVIS, K. *A urbanização da Humanidade*. In: **Cidades, a Urbanização da Humanidade**. Zahar Edit. Rio de Janeiro: 1982.

DI VINCENZO, M. C.; KESTEN, D.; INFELD, D. Assessment of performance of building shading device with integrated photovoltaics

in different urban scenarios. **2010 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET)**, p. 1-5, 2010.

DIDONÉ, E. L. **A influência da Luz Natural na avaliação da eficiência energética de edifícios contemporâneos de escritórios em Florianópolis/SC**. 2009. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo - Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo; Universidade Federal de Santa Catarina; Florianópolis, 2009.

DÍAZ, L. A. **Ensaio do método para análise integrada da iluminação natural e da conveniência solar**. 2011. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo - Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo; Universidade Federal de Santa Catarina; Florianópolis, 2011.

GADSDEN, S. *et al.* Predicting the urban solar fraction: a methodology for energy advisers and planners based on GIS. **Energy and Buildings**, p. 37-48, 2003.

GHISI, E.; TINKER, J. A. An Ideal Window Area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings. **Building and Environment**, p. 51-61, 2005.

GOETZBERGER, A.; HOFFMANN, V. U. **Photovoltaic Solar Energy Generation**. Springer ed. Heidelberg: 2005.

HOFIERKA, J.; KAŇUK, J. Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar radiation tools. **Renewable Energy**, p. 2206-2214, 2009.

HWANG, T.; KANG, S.; KIM, J. T. Optimization of the building integrated photovoltaic system in office buildings. Focus on the orientation, inclined angle and installed area. **Energy and Buildings**, p. 92-104, 2012.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE ESTATÍSTICA E GEOGRAFIA. **Sinopse do Censo Demográfico 2010**. Acessado em: outubro de 2012. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=8&uf=00>>.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key World Energy Statistics, 2011**. Acessado em: junho 2012. Disponível em: <<http://www.iea.org/stats/index.asp/>>.

JAKUBIEC, J. A.; REINHART, C. DIVA 2.0: Integrating daylight and thermal simulations using Rhinoceros 3D , Daysim and Energyplus. **Building Simulation**, p. 14-16, 2011.

JELLE, B. P.; BREIVIK, C.; RØKENES, H. D. Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, p. 69-96, 2012.

LAMBERTS, R.; PEREIRA, F. O. R.; DUTRA, L. **Eficiência energética na arquitetura**. PW ed. São Paulo: 1997.

LEDER, S. M.; PEREIRA, F. O. R. Padrões de Ocupação Urbana e disponibilidade da Luz Natural. **Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**, p. 7, 2009.

LI, D. H. W. *et al.* A study of the daylighting performance and energy use in heavily obstructed residential buildings via computer simulation techniques. **Energy and Buildings**, p. 1343-1348, 2006.

LITTLEFAIR, P. Daylight, sunlight and solar gain in the urban environment. **Solar Energy**, p. 177-185, 2001.

LITTLEFAIR, P. Passive solar urban design: ensuring the penetration of solar energy into the city. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, p. 303-326, 1998.

LOULAS, N. M. *et al.* Photovoltaics in urban environment: A case study for typical apartment buildings in Greece. **Renewable Energy**, p. 453-463, 2012.

MARDALJEVIC, J.; RYLATT, M. Irradiation mapping of complex urban environments: an image-based approach. **Energy and Buildings**, p. 27-35, 2003.

MEIRELES, A. J. DE A. Danos socioambientais originados pelas usinas eólicas nos campos de dunas do Nordeste brasileiro e critérios para definição de alternativas locais. **Confinos**, 2011.

MELO, A. P. **Desenvolvimento de um método para estimar o Consumo de Energia de edificações comerciais através da aplicação de Redes Neurais**. 2012. Tese de Doutorado em Engenharia Civil - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

MICHAEL, A.; BOUGIATIOTI, F.; OIKONOMOU, A. Less could be more: Architectural integration of active solar systems in existing urban centres. **7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion**, p. 1-7, 2010.

MINISTÉRIO DAS CIDADES - SECRETARIA NACIONAL DE TRANSPORTES E MOBILIDADE. Acessado em: abril 2012. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/>>.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional, 2011. Acessado em: abril 2012. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/default.aspx>>.

NG, E. A study of the relationship between Daylight performance and height difference of buildings in high density cities using computational simulation. **Building Simulation**, p. 847-852, 2005a.

NG, E. Towards better building and urban design in Hong Kong. **Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment**, p. 923-928, 2005b.

NG, E.; WONG, N. H. Better Daylight and Natural Ventilation by Design. **21th Conference on Passive and Low Energy Architecture**, p. 19-22, 2004.

NREL - NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. Acessado em: setembro 2012. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/pv/>>.

OKEIL, A. A holistic approach to energy efficient building forms. **Energy and Buildings**, p. 1437-1444, 2010.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment**, 1972. Disponível em: <<http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?documentid=97&articleid=1503>>.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento**, 1992. Acessado em: abril 2012. Disponível em: <<http://www.onu.org.br/rio20/img/2012/01/rio92.pdf>>.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **World Urbanization Prospects The 2011 Revision**. 2011.

ORDENES, M. *et al.* The impact of building-integrated photovoltaics on the energy demand of multi-family dwellings in Brazil. **Energy and Buildings**, p. 629-642, 2007.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. INPE ed. São José dos Campos: 2006.

PEREIRA, F. O. R. *et al.* Analysis of Urban Occupation X Daylighting Availability Using the Preferable Sky Window Parameter. **Conference on Passive and Low Energy Architecture**, 2008.

PEREIRA, F. O. R.; SILVA, C. A. N.; TURKIENIKZ, B. A methodology for sunlight urban planning: a computer-based solar and sky vault obstruction analysis. **Solar Energy**, p. 217-226, 2001.

REN21. Renewables Global Status Report. Acessado em: julho 2012. Disponível em: <http://www.map.ren21.net/GSR/GSR2012_low.pdf>.

ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES. **Rhinoceros 4.0 User's Guide**. 2008.

RSC - ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY. Acessado em: abril 2012. Disponível em: <<http://www.rsc.org/periodic-table/element/14/silicon>>.

RUANO, M. **Ecourbanismo. Sustainable human settlements: 60 cases studies.** Gustavo Gi ed. Barcelona: 1999.

RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil.** USFC/LABSO ed. Florianópolis: 2004.

SALAZAR, J. *et al.* Criterios para el diseño de fachadas utilizando elementos prefabricados en las torres de oficinas. Proyecto centro cívico de Antioquia, Plaza de la Libertad, Medellín, Colombia. **X Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**, 2009.

SANTANA, M. **Influência de parâmetros construtivos no consumo de energia de edifícios de escritório localizados em Florianópolis - SC.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento da Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SANTOS, Í. P. D.; RÜTHER, R. The potential of building-integrated (BIPV) and building-applied photovoltaics (BAPV) in single-family, urban residences at low latitudes in Brazil. **Energy and Buildings**, p. 290-297, 2012.

SOLEMMA - ENVIRONMENTAL TOOLS TO EMPOWER DESIGN.
Acessado em: Abril 2013. Disponível em:
<<http://www.solemma.net/>>.

SÁNCHEZ DE LA FLOR, F. J. *et al.* Solar radiation calculation methodology for building exterior surfaces. **Solar Energy**, p. 513-522, 2005.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. 2010 Solar Technologies Market Report. 2011.

VAN DER BORG, N. J. C. M.; WIGGELINKHUIZEN, E. J. Irradiation in the built environment. **Solar Energy**, 2001.

VAN ESCH, M. M. E.; LOOMAN, R. H. J.; DE BRUIN-HORDIJK, G. J. The effects of urban and building design parameters on solar

access to the urban canyon and the potential for direct passive solar heating strategies. **Energy and Buildings**, p. 189-200, 2012.

VARTIAINEN, E. Electricity benefits of daylighting and photovoltaics for various solar facade layouts in office buildings. **Energy and Buildings**, p. 113-120, 2001.

ZAHEDI, A. Solar photovoltaic (PV) energy; latest developments in the building integrated and hybrid PV systems. **Renewable Energy**, p. 711-718, 2006.

ZOMER, C. **Geração solar fotovoltaica integrada a uma edificação inserida em meio urbano e conectada à rede elétrica**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento da Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.