**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**

ARTHUR HENRIQUE CURSINO DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO TÉCNICA E FINANCEIRA DA GERAÇÃO
FOTOVOLTAICA INTEGRADA À FACHADA DE EDIFÍCIOS DE
ESCRITÓRIOS CORPORATIVOS NA CIDADE DE SÃO PAULO**

**SÃO PAULO
2015**

ARTHUR HENRIQUE CURSINO DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO TÉCNICA E FINANCEIRA DA GERAÇÃO
FOTOVOLTAICA INTEGRADA À FACHADA DE EDIFÍCIOS DE
ESCRITÓRIOS CORPORATIVOS NA CIDADE DE SÃO PAULO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. José Goldemberg

Versão corrigida

(versão original disponível na Biblioteca do Instituto de Energia e Ambiente e na Biblioteca de Teses e Dissertações da USP)

**SÃO PAULO
2015**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Santos, Arthur Henrique Cursino dos.

Avaliação técnica e financeira da geração fotovoltaica integrada à fachada de edifícios de escritórios corporativos na cidade de São Paulo. / Arthur Henrique Cursino dos Santos; orientador: José Goldemberg. – São Paulo, 2015.

186 f.: il.; 30 cm.

Tese (Doutorado em Ciência) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo

1. Geração fotovoltaica. 2. Edifícios comerciais. 3. Fontes alternativas de energia 4. Arquitetura sustentável. I. Título.

Dedicado a meus pais, Wanda e Waldemar,
pelo exemplo de luta.

“Vamos em frente!”

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Prof. Dr. José Goldemberg, ao Prof. Dr. Roberto Lamberts e ao Prof. Dr. Alessandro Barghini, sem os quais esse trabalho não seria possível.

Agradeço ao Prof. Dr. Murilo Fagá e ao Prof. Dr. Ildo Sauer, pelas incontáveis horas de conversas, discussões e risadas, que certamente me motivaram a continuar na área de energia.

Agradeço a todos os colegas que fiz durante esses anos de USP, por todas as conversas, embates e risadas: Larissa Rodrigues¹, Edgar Perlotti, Bruno Silva, Rafael Puglieri, José Rafael, Moana Simas, Viviane Romero, Milene Clifford, Aimé Pinto, Marcelo Almeida, e tantos outros que não seria possível incluir em apenas uma página.

Agradeço a todos os colegas da empresa Mitsidi, principalmente Edward Borgstein e André De Dominicis, por questionarem e duvidarem tão duramente dos resultados das simulações e também Bráullio Nunes, pelo suporte com os termos da arquitetura, não comuns a mim. Sem vocês certamente esse trabalho não seria o mesmo.

Agradeço a minha família, pais e amigos pelo suporte e apoio em todos os momentos de minha vida.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro para realização desse estudo.

¹ Você sabe

*Como se sabe, uma pequena porção de iogurte quando misturada ao leite,
pode fermentar este último e torná-lo também iogurte.*

*Acontece que em dada ocasião, Nasrudin estava à beira de um lago misturando
iogurte na água, quando um amigo que passava perguntou:*

- Nasrudin, o que está fazendo?

- Estou misturando iogurte na água, assim teremos um lago de iogurte.

- Mas isso não funciona, Nasrudin!

- Sei que não funciona, mas já pensou se dá certo?

RESUMO

SANTOS, Arthur Henrique Cursino dos. Avaliação técnica e financeira da geração fotovoltaica integrada à fachada de edifícios de escritórios corporativos na cidade de São Paulo. 2015. 186 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-graduação em Energia da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.

As edificações comerciais, públicas e residenciais foram responsáveis em 2014 por 50% do consumo de eletricidade no país. Considerando os últimos dez anos, enquanto o consumo médio dos diferentes setores da economia cresceu 3,5% ao ano, o consumo do setor comercial cresceu 5,4%. Os edifícios de escritórios corporativos representam grandes consumidores de energia, chegando a valores superiores aos 200 kWh/m².ano. A geração distribuída é uma solução que vem sendo estudada no país, primeiramente pela aprovação da Resolução Técnica 482:2012 da ANEEL, que regulamenta a geração de eletricidade na baixa tensão e depois pela aprovação da Portaria 381:2015 que dispõe sobre a geração de eletricidade na média tensão. Apesar do crescimento da geração por fontes fotovoltaicas no mundo, no Brasil essa geração ainda é mínima frente às fontes hídricas e térmicas. Nos edifícios de escritórios corporativos a instalação de painéis fotovoltaicos na cobertura é bastante limitada, devido à disputa de espaço com outros serviços, como as áreas técnicas e heliponto. Nesse contexto, as fachadas aparecem como oportunidade para geração de eletricidade, através da tecnologia fotovoltaica integrada na arquitetura (BIPV). Nesse estudo foi avaliada a viabilidade técnica e financeira da geração integrada à arquitetura dos edifícios de escritórios corporativos da cidade de São Paulo a partir do uso de vidros fotovoltaicos. Os resultados indicam que existe um potencial de redução de 15% no consumo de eletricidade anual, considerando tanto a geração de eletricidade, quanto a redução do consumo do sistema de ar condicionado, que tem sua carga térmica reduzida com o uso dos vidros fotovoltaicos. A tecnologia já é viável financeiramente no mercado brasileiro quando associada ao vidro refletivo, apresentando um tempo de retorno simples de 2,9 anos, uma TIR de 34,2% e um VPL de 1.779.257,53, para um edifício em torre com 28.010 m² de área condicionada e 21 andares.

Palavras-chave: Geração fotovoltaica; Edifícios comerciais; Fontes Alternativas de Energia; Arquitetura sustentável; Simulação energética; BIPV.

ABSTRACT

SANTOS, Arthur Henrique Cursino dos. Technical and financial evaluation of Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) in corporate buildings in the city of São Paulo. 2015. 186 p. Dissertation (Doctor of Science) – Graduate Program on Energy, University of Sao Paulo, São Paulo, 2015.

Commercial, public and residential buildings accounted in 2014 for 50% of electricity consumption in Brazil. Considering the last ten years, while the average consumption of the different sectors of the economy increased by 3.5% per year, the consumption of the commercial sector grew 5.4%. Corporate buildings are major energy consumers, reaching values in the range of 200 kWh/m².year. Distributed generation is a solution that has been studied in the country, primarily with the approval of the Technical Resolution 482:2012, which regulates the generation of electricity at low voltage and then with the approval of the General Ordinance 381:2015 which regulates the generation of electricity at medium voltage. Despite the growth in generation from photovoltaic sources in the world, in Brazil this generation is still minimal when compared to other sources, like hydro and thermal plants. In commercial buildings, the space to install photovoltaic panels on the roof is quite limited. In this context the facades appear as an opportunity to generate electricity through photovoltaic technology integrated in the architecture (BIPV). In this study we evaluated the technical and financial feasibility of the integrated generation to the architecture of corporate buildings in the city of Sao Paulo. The results indicate a 15% reduction potential in annual electricity consumption, considering both the electricity generation and the reduction of the consumption by the air conditioning system, which has a reduced thermal load when photovoltaic glass is used. The BIPV technology is already feasible in the Brazilian market when coupled with reflective glass, showing a simple payback of 2.9 years, an IRR of 34.2% and a NPV of 1,779,257.53, for a building with 28,010 m² and 21 floors.

Keywords: Photovoltaic power generation; Corporate buildings; Renewable Energy; Energy simulation; BIPV.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo setorial de eletricidade no Brasil em 2014.....	17
Figura 2 – Evolução do consumo de eletricidade pelos setores consumidores do país e pelo setor comercial entre os anos de 1970 e 2014	18
Figura 3 – Recordes de geração de eletricidade no Sistema Interligado Nacional nos meses quentes de janeiro de 2013 e janeiro de 2014.....	18
Figura 4 – Média anual do fator de emissões de CO ₂ pela geração de eletricidade no Brasil entre os anos 2006 e 2014 e previsão da EPE para 2030	19
Figura 5 – Valor médio da tarifa comercial de eletricidade na área de concessão da AES Eletropaulo entre janeiro de 2011 e julho de 2015.....	20
Figura 6 – Divisão do pavimento tipo em zonas térmicas.....	26
Figura 7 – Diagrama básico do sistema de ar condicionado simulado.....	30
Figura 8 – Perfil de ocupação do edifício.....	31
Figura 9 – Perfil de operação dos equipamentos elétricos	32
Figura 10 – Perfil de operação da iluminação interna	33
Figura 11 – Perfil de operação da iluminação externa	33
Figura 12 – Perfil de disponibilidade do sistema de ar condicionado	34
Figura 13 – Perfil de operação da central de processamento de dados	35
Figura 14 – Modelos das tipologias simuladas.....	38
Figura 15 - Esquema ilustrativo do modelo adotado com os vidros fotovoltaicos na parte superior e inferior da janela	40
Figura 16 – Tipologia contemporânea com vidros fotovoltaicos em entorno sem sombreamento (cobertura removida para facilitar a visualização).....	41
Figura 17 – Tipologia contemporânea com vidros fotovoltaicos em entorno com sombreamento.....	41
Figura 18 – Distâncias entre os principais elementos considerados no sombreamento do entorno.....	42
Figura 19 – Orientação de cada eixo de ocupação simulado na cidade de São Paulo.....	43
Figura 20 – Indicadores de viabilidade financeira adotados por diretores executivos de diversas companhias internacionais.....	46
Figura 21 – Estudo de geração elétrica por vidros fotovoltaicos realizado em edifício teste ..	52
Figura 22 – Vista da fachada principal do Edifício Guinle	56
Figura 23 – Vista da fachada principal do Edifício Sampaio Moreira	56
Figura 24– Vista da fachada principal do Edifício Martinelli	57
Figura 25 - Vista da fachada principal do Edifício Altino Arantes	58
Figura 26 – Vista da fachada do Edifício Itália	59

Figura 27 – Vista da fachada principal do Edifício Mirante do Vale.....	60
Figura 28 – Vista da fachada do Edifício Conde Prates	61
Figura 29 – Vista da fachada do Edifício Dacon.....	62
Figura 30 – Vista da fachada principal do Edifício Centro Empresarial do Aço	63
Figura 31 – Vista da fachada do Edifício Tomie Ohtake	64
Figura 32 – Vista da fachada principal do Edifício Sede do BankBoston	65
Figura 33 – Vista da fachada do Edifício E-Tower	65
Figura 34 – Vista das fachadas do Edifício Torre São Paulo JK.....	66
Figura 35 – Processo por trás da evolução arquitetônica dos edifícios de escritórios corporativos em SP	68
Figura 36 – Consumo de energia mensal por m ² em função da área das edificações	76
Figura 37 – Consumo de energia mensal por funcionário fixo em função da área das edificações	77
Figura 38 – Densidade de ocupação das edificações.....	78
Figura 39 – Consumo de energia mensal por m ² de área útil para os diferentes grupos estudados	79
Figura 40 – Consumo de energia mensal por m ² função da área das edificações sem CPD....	80
Figura 41 – Consumo de energia mensal por m ² função da área das edificações com CPD ...	81
Figura 42 – Fator de Carga e existência de CPD na amostra estudada	82
Figura 43 – Carta bioclimática para a cidade de São Paulo	90
Figura 44 – Carta bioclimática para a cidade de São Paulo em horário comercial	91
Figura 45 – Variáveis consideradas para análise do impacto da tecnologia BIPV na edificação	93
Figura 46 - Consumo por uso final da tipologia tradicional.....	94
Figura 47 - Consumo por uso final da tipologia de transição.....	95
Figura 48 - Consumo por uso final da tipologia contemporânea	96
Figura 49 – Curva de carga simulada da tipologia contemporânea na cidade de São Paulo....	98
Figura 50 – Curva de carga real de um edifício comercial corporativo na cidade de São Paulo	98
Figura 51 - Consumo por uso final da tipologia contemporânea com vidro insulado	99
Figura 52 - Consumo por uso final da tipologia contemporânea com vidro refletivo.....	100
Figura 53 - Consumo por uso final da tipologia BIPV	101
Figura 54 – Principais resultados da simulação do edifício contemporâneo com vidro verde e ventilação natural (dia quente)	102
Figura 55 – Principais resultados da simulação do edifício BIPV com ventilação natural (dia quente)	103

Figura 56 – Consumo anual de eletricidade pela área condicionado para as diferentes tipologias estudadas.....	104
Figura 57 – Mesa de um funcionário do departamento de vendas de uma empresa do setor da construção no início da década de 80	106
Figura 58 – Estações de trabalho em um edifício comercial de escritórios tirada no ano de 2014	106
Figura 59 – Potência do ar condicionado dimensionada para as diferentes tipologias estudadas	110
Figura 60 - Perdas consideradas pelo PVsyst na simulação da geração fotovoltaica.....	115
Figura 61 – Geração fotovoltaica na cobertura em um dia de céu limpo.....	116
Figura 62 – Média de geração mensal dos painéis instalados na cobertura	117
Figura 63 – Geração anual por kWp instalado entre as diferentes fachadas e a cobertura	118
Figura 64 – Geração anual por m ² de painéis instalados entre as diferentes fachadas e a cobertura	119
Figura 65 – Geração fotovoltaica nas fachadas pelas horas do dia em um dia de céu limpo.	119
Figura 66 - Curva de carga e geração fotovoltaica para um dia comercial típico no verão ...	120
Figura 67 - Curva de carga e geração fotovoltaica para um dia comercial típico no inverno	121
Figura 68 - Curva de carga e geração fotovoltaica para um dia de baixa ocupação no verão	122
Figura 69 - Curva de carga e geração fotovoltaica para um dia de baixa ocupação no inverno	123
Figura 70 – Resultados do modelo de daylighting para o pavimento tipo da tipologia contemporânea.....	124
Figura 71 – Resultados do modelo de daylighting para o pavimento tipo da tipologia BIPV	125
Figura 72 - Participação percentual de cada componente da tecnologia BIPV na redução dos custos operacionais anuais.....	142
Figura 73 – Locação versus taxa de vacância na cidade de São Paulo (esquerda) e Brasil (direita) para edifícios comerciais	143
Figura 74 – Variáveis consideradas para análise do impacto da tecnologia BIPV na edificação	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características construtivas básicas do modelo simulado da edificação	25
Tabela 2 – Características básicas dos sistemas e equipamentos do edifício simulado	27
Tabela 3 – Características do sistema de ar condicionado	28
Tabela 4 - Características construtivas das diferentes tipologias estudadas.....	36
Tabela 5– Especificações dos painéis fotovoltaicos.....	39
Tabela 6 – Indicadores de consumo da tipologia contemporânea comparados com dados reais de cinco edifícios de escritórios corporativos da cidade de São Paulo	97
Tabela 7 – Consumo anual de eletricidade e água pelo ar condicionado para as diferentes tipologias	107
Tabela 8 - Consumo anual de eletricidade e água pelo ar condicionado para a tipologia contemporânea a partir de diferentes temperaturas de conforto.....	109
Tabela 9 – Resultados das simulações da tipologia contemporânea com quatro arquivos climáticos disponíveis para a cidade de São Paulo.....	111
Tabela 10 – Valores de radiação solar global média por ano nos diferentes arquivos climáticos	112
Tabela 11 – Resultados das simulações do sombreamento do entorno nos três principais eixos de ocupação de edifícios de escritórios corporativos da cidade de São Paulo	127
Tabela 12 - Resultados das simulações do sombreamento do entorno para diferentes orientações.....	128
Tabela 13 – Tarifas da AES Eletropaulo adotadas na análise financeira com impostos.....	133
Tabela 14 – Tarifas da SABESP adotadas na análise financeira com impostos	133
Tabela 15 – Custos dos vidros e componentes do sistema FV e ar condicionado	135
Tabela 16 – Investimento inicial para as diferentes tipologias analisadas	136
Tabela 17 – Redução dos custos anuais para as diferentes tipologias.....	137
Tabela 18 – Fluxo de caixa para a tipologia BIPV	138
Tabela 19 – Resumo dos resultados obtidos para os indicadores financeiros	141

LISTA DE ABREVIACÕES

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

ABRAVIDRO - Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos

BIPV – Building-Integrated Photovoltaics

BAC - Bombas de Água de Condensação

BAGP - Bombas de Água Gelada Primárias

BAGS - Bombas de Água Gelada Secundárias

BREEAM - Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology

CAG - Central de Água Gelada

CPD - Central de Processamento de Dados

CIBSE - Chartered Institution of Building Services Engineers

COP - Coeficiente de Performance

CIE - Comissão Internacional em Iluminação

CBCS - Conselho Brasileiro de Construção Sustentável

DPI - Densidade de Potência de Iluminação

DEO - Desempenho Operacional em Edificações

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

FC - Fator de Carga

FS - Fator Solar

GEE - Gases de Efeito Estuda

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET - Instituto Nacional de Metrologia

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Especiais

IEA - International Energy Agency

IWEC - International Weather for Energy Calculations

LEED - Leadership in Energy and Environmental Design

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NCDC - National Climatic Data Center

NREL - National Renewable Energy Laboratory

PNE - Plano Nacional de Energia

PIB - Produto Interno Bruto

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

RJP - Razão Janela Parede

SIN - Sistema Interligado Nacional

SWERA - Solar and Wind Energy Resource Assessment

TIR - Taxa Interna de Retorno

TMA - Taxa Mínima de Atratividade

TRY - Test Reference Year

DOE - U.S Department of Energy

VPL - Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Questão central e hipótese	22
1.2	Objetivos	22
1.2.1	Objetivo geral	22
1.2.2	Objetivos específicos	23
1.3	Estrutura capitular	23
2	METODOLOGIA	24
2.1	Modelo das edificações	24
2.2	Cargas internas	27
2.3	Perfis de uso e operação	31
2.4	Materiais construtivos	35
2.5	Características dos módulos fotovoltaicos	38
2.6	Sombreamento do entorno	40
2.7	Localização geográfica e arquivos climáticos	44
2.8	Iluminação natural	44
2.9	Análise financeira	45
2.9.1	Tempo de retorno simples	46
2.9.2	Taxa Interna de Retorno - TIR	47
2.9.3	Valor Presente Líquido - VPL	48
3	CONCEITOS E FUNDAMENTOS	49
3.1	Efeito fotovoltaico e sistemas de geração	49
3.1.1	Tecnologia fotovoltaica de silício amorfo (a-Si)	49
3.1.2	Tecnologia de silício amorfo (a-Si) integrada em vidro	50
3.1.3	Estudos sobre BIPV	51
3.2	Arquitetura de edifícios	53
3.2.1	Tipologias arquitetônicas de edifícios comerciais	55
3.2.2	Evolução da arquitetura do edifício comercial de escritórios em São Paulo	67
3.3	Consumo de energia em edificações comerciais de escritório	69
3.3.1	Pesquisa sobre Consumo de Energia nos Setores de Comércio e Serviços na Cidade de São Paulo (1986)	70
3.3.2	Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso (2008)	72
3.3.3	Benchmarking de uma Empresa Imobiliária (2012)	74
3.4	Eficiência energética em edificações	83
3.4.1	Eficiência energética em edificações comerciais de escritório	84
3.4.2	Características arquitetônicas	85

3.4.3	Cargas internas	87
3.4.4	Arquitetura bioclimática	89
4	ANÁLISE TÉCNICA	93
4.1	Consumo de eletricidade	94
4.1.1	Consumo de eletricidade pelas diferentes tipologias de edifícios	94
4.1.2	Consumo de eletricidade e água pelo ar condicionado.....	107
4.1.3	Capacidade do sistema de climatização.....	109
4.1.4	Consumo de eletricidade com uso de diferentes arquivos climáticos	111
4.2	Geração fotovoltaica	114
4.2.1	Geração de eletricidade pela cobertura.....	116
4.2.2	Geração de eletricidade pelas fachadas	117
4.2.3	Geração frente ao consumo de eletricidade	120
4.3	Análise do impacto na iluminação natural.....	123
4.4	Análise do sombreamento do entorno na geração	126
4.6	Discussão sobre os resultados	129
5	ANÁLISE FINANCEIRA	132
5.1	Tarifas de eletricidade e água	132
5.2	Custos dos vidros e componentes do sistema FV e ar condicionado.....	134
5.3	Investimento inicial para as diferentes tipologias	135
5.4	Redução dos custos operacionais anuais para as diferentes tipologias.....	136
5.5	Fluxo de caixa para a tipologia BIPV	137
5.6	Resultados para os indicadores financeiros adotados	139
5.6.1	Tempo de retorno simples	139
5.6.2	Valor Presente Líquido (VPL).....	140
5.6.3	Taxa Interna de Retorno (TIR)	140
5.6.4	Resumo dos resultados para os indicadores financeiros.....	140
5.7	Discussão sobre os resultados	141
6	CONCLUSÕES	145
	REFERÊNCIAS	151
	APÊNDICES	158
	APÊNDICE A - Resultados das simulações emitidos pelo EnergyPlus.....	159
	APÊNDICE B - Relatórios das simulações emitidos pelo PVsyst	165
	ANEXOS	180
	ANEXO A - Croquis das diferentes tipologias arquitetônicas	181
	ANEXO B - Especificações do vidro fotovoltaico	187

1 INTRODUÇÃO

As edificações comerciais, residenciais e públicas representam um terço do consumo total de energia final na maioria dos países estudados pela International Energy Agency (IEA, 2014). No Brasil esses edifícios foram responsáveis por metade do consumo total de eletricidade no país em 2014 (Figura 1), sendo os edifícios comerciais responsáveis por 17% (EPE, 2015).

Figura 1 – Consumo setorial de eletricidade no Brasil em 2014

Fonte: elaboração própria a partir de EPE, 2015

Esse fato, associado à taxa de crescimento do consumo de eletricidade que nos últimos dez anos para todos os setores da economia foi de 3,5% ao ano, enquanto para o setor comercial foi de 5,4%, revela a importância de se pensar em soluções de eficiência energética para o setor.

A Figura 2 apresenta a série histórica de consumo de eletricidade para o Brasil e para o setor comercial, entre os anos de 1970 e 2014. É possível observar que a tendência de crescimento se modificou nos últimos vinte anos, uma vez que até então o crescimento do setor comercial acompanhava o crescimento do consumo do país.

Figura 2 – Evolução do consumo de eletricidade pelos setores consumidores do país e pelo setor comercial entre os anos de 1970 e 2014

Fonte: elaboração própria a partir de EPE, 2015

A maior participação dos edifícios comerciais no consumo do país não impacta apenas o consumo total, como também altera as curvas de carga do uso da eletricidade ao longo do dia, deslocando o pico de consumo nos meses quentes para o meio da tarde, devido principalmente a uma maior penetração dos equipamentos de ar condicionado (Vettorazzo, 2014). A Figura 3 apresenta os registros de geração de eletricidade no Sistema Interligado Nacional (SIN) nos meses de janeiro de 2013 e janeiro de 2014, ilustrando o deslocamento do pico de consumo.

Figura 3 – Registros de geração de eletricidade no Sistema Interligado Nacional nos meses quentes de janeiro de 2013 e janeiro de 2014

Fonte: Vettorazzo, 2014

O aumento no consumo de eletricidade, associado a uma menor participação da hidroeletricidade na matriz de geração brasileira, se reflete em uma maior emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), devido a um maior acionamento das termoelétricas a gás natural e óleo combustível, que desde 2014 tem operado praticamente na base. O aumento das emissões pode ser verificado na série histórica do fator de emissões de CO₂ do SIN, na Figura 4.

Figura 4 – Média anual do fator de emissões de CO₂ pela geração de eletricidade no Brasil entre os anos 2006 e 2014 e previsão da EPE para 2030

Fonte: elaboração própria a partir de EPE, 2007 & MCT, 2015

Nota-se que o crescimento do fator de emissão de CO₂ foi acentuado nos últimos quatro anos, aproximando-se da média estimada para 2030, calculada a partir da matriz de geração prevista no Plano Nacional de Energia (PNE) 2030 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

O acionamento das termoelétricas não ocasiona apenas o aumento das emissões de GEE do país, mas também encarece a geração, refletindo-se nas tarifas aplicadas pelas concessionárias elétricas. A Figura 5 mostra a evolução das tarifas da AES Eletropaulo – concessionária que atende grande parte do Estado de São Paulo – para o setor comercial em R\$/kWh entre janeiro de 2011 e julho de 2015.

Figura 5 – Valor médio da tarifa comercial de eletricidade na área de concessão da AES Eletropaulo entre janeiro de 2011 e julho de 2015

Fonte: elaboração própria a partir de ANEEL, 2015

No gráfico é possível observar a redução no valor da tarifa aplicado em fevereiro de 2013 através da Medida Provisória 579. Esse valor manteve-se ao redor dos 0,30 R\$/kWh durante o ano de 2013 e grande parte do ano de 2014, sendo então reajustado constantemente a partir de setembro de 2014 e chegando a quase dobrar em julho de 2015.

A utilização de fontes renováveis para reduzir a demanda por combustíveis fósseis, bem como reduzir o impacto do aquecimento global não é algo novo. Goldemberg et al. já discutia em 1987 como o uso da energia renovável, ao lado do aumento da eficiência energética, poderia oferecer um caminho auxiliar para o crescimento econômico dos países em desenvolvimento.

Na última década a geração de eletricidade por painéis fotovoltaicos tem ganhado espaço na agenda de diversos países, devido ao avanço da eficiência da tecnologia, bem como à redução dos custos produtivos. Nessa linha, os painéis fotovoltaicos integrados às estruturas dos edifícios (BIPV, do inglês *Building-Integrated Photovoltaics*) vêm sendo estudados como alternativa aos materiais tradicionais, substituindo janelas, brise-soleil, pisos e telhados (Miyazaki et al., 2005; Chow et al., 2007; Fung & Yang, 2008; Didoné & Wagner, 2013; Ng et al., 2013; Oliviera et al., 2014).

Estudos realizados em edifícios comerciais de pequeno porte obtiveram reduções significativas no consumo de eletricidade com o uso de BIPV. Miyazaki et al (2005) estimou

uma economia na ordem dos 54% em edifícios com BIPV projetados em Tóquio, Japão; Didoné & Wagner (2013) obtiveram uma redução de 43% no consumo simulado de um edifício em Fortaleza, com uso de uma janela fotovoltaica e Nga et al. (2013) obteve uma redução de 41,3% em um edifício simulado em Singapura.

Apesar de outros estudos sobre janelas com vidros fotovoltaicos terem sido realizados para edificações comerciais, inclusive nas cidades brasileiras de Florianópolis e Fortaleza, ainda não foi estudado o impacto da tecnologia BIPV quando aplicada em edifícios comerciais de grande porte, como os escritórios corporativos. Além disso, os estudos avaliam apenas a geração de eletricidade e a redução do consumo de eletricidade pela menor demanda do ar condicionado, não foram realizados trabalhos que analisam os impactos no edifício de forma ampla, considerando também o consumo de água, a redução na potência instalada dos equipamentos do sistema de ar condicionado, bem como o impacto no aproveitamento da luz natural.

Esse estudo faz uma análise técnico-financeira da contribuição do BIPV em um edifício de escritórios corporativos na cidade de São Paulo, comparando os resultados da tecnologia com diferentes tipologias arquitetônicas, que foram sendo desenvolvidas ao longo da história.

Os edifícios de escritórios corporativos foram escolhidos devido a três fatores: (1) grande disponibilidade de área nas fachadas para geração; (2) consumo elevado de energia por metro quadrado e (3) maior disponibilidade de capital para investimento em geração fotovoltaica, quando comparado com o setor residencial.

Já a cidade de São Paulo, por sua vez, foi escolhida devido a sua importância econômica para o país (em 2012 a cidade sozinha representou 11% do Produto Interno Bruto (PIB) de acordo com IBGE, 2013), bem como pelo desenvolvimento histórico da arquitetura em torre, que teve na cidade o primeiro edifício de escritórios de grande porte construído no país, o Edifício Sampaio Moreira, em 1924.

De forma a avaliar a representatividade da cidade de São Paulo e do consumo de eletricidade dos edifícios corporativos, é possível fazer uma estimativa grosseira do consumo de eletricidade da Avenida Paulista, um dos principais eixos de ocupação comercial da América Latina. Considerando que: (1) cada quarteirão da Avenida Paulista – entre as ruas Consolação e Rafael Barros – possui cerca de 24.000 m²; (2) cada quarteirão abriga seis edifícios corporativos com área condicionada média de 20.000 m² e (3) existem 19

quarteirões ocupados no perímetro analisado (descontando o quarteirão do Parque Trianon), encontra-se uma área de 2.280.000 m² de espaço condicionado. Considerando um consumo médio de 200 kWh/m² para esse tipo de edifício comercial, estima-se que a Avenida Paulista consuma cerca de 456 GWh/ano. Esse consumo equivale ao consumo residencial de eletricidade em 2014 de Estados brasileiros inteiros, como Acre, Amapá e Roraima (EPE. 2015).

1.1 Questão central e hipótese

A questão central que norteia o desenvolvimento do trabalho é: a tecnologia de geração fotovoltaica integrada à fachada dos edifícios de escritórios corporativos é viável técnica e financeiramente na cidade de São Paulo?

Como hipótese assume-se que a tecnologia de geração fotovoltaica integrada à fachada dos edifícios de escritórios corporativos apresenta uma contribuição significativa para a redução do consumo de eletricidade, apresentando viabilidade técnica e financeira, para a realidade climática e mercadológica da cidade de São Paulo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse estudo é avaliar a geração fotovoltaica integrada à fachada dos edifícios de escritórios corporativos do ponto de vista técnico e financeiro, comparando os resultados com diferentes tipologias que representam o desenvolvimento histórico da arquitetura em torre na cidade de São Paulo.

1.2.2 Objetivos específicos

Foram estabelecidos cinco objetivos específicos para desenvolvimento do estudo:

1. Identificar as principais tipologias de edifícios de escritórios corporativos existentes na cidade de São Paulo e descrever suas características arquitetônicas, bem como seu desenvolvimento histórico;
2. Identificar os principais usos finais da eletricidade e levantar os indicadores de consumo por área e funcionários para os edifícios de escritórios corporativos;
3. Desenvolver um modelo de geração fotovoltaica integrada à fachada do edifício, de acordo com as tipologias identificadas;
4. Simular o consumo de energia anual nas tipologias identificadas, com objetivo de fazer uma análise técnica sobre o consumo de eletricidade, a demanda térmica e a geração de eletricidade pelos painéis fotovoltaicos instalados, tanto nas fachadas, quanto na cobertura;
5. Avaliar a viabilidade financeira da geração fotovoltaica nas fachadas, através de três indicadores: tempo de retorno simples, Taxa Interna de Retorno (TIR) e Valor Presente Líquido (VPL).

1.3 Estrutura capitular

Essa tese é dividida em seis capítulos, sendo este primeiro a introdução com a justificativa, hipóteses e objetivos do estudo, o segundo a descrição da metodologia adotada para as simulações e análises, o terceiro uma revisão bibliográfica dos principais conceitos e fundamentos que envolvem a geração fotovoltaica e o consumo de energia pelas edificações, o quarto os resultados da análise técnica, o quinto os resultados da análise financeira e, finalmente, o sexto com as conclusões. São ainda disponibilizados apêndices e anexos ao fim do trabalho, apresentando detalhes dos resultados das simulações, bem como dos modelos desenvolvidos.

2 METODOLOGIA

Para realização dos objetivos previstos nesse trabalho foram realizadas simulações energéticas desenvolvidas no *software* EnergyPlus (versão 8.1). Paralelamente, para desenvolvimento dos modelos 3D dos edifícios, foi utilizado o *software* DesignBuilder (versão 4.2).

De forma complementar as simulações foram utilizados os *softwares* PVsyst (versões 6.35 e 6.38) e Climate Consultant (versão 5.5), com objetivo de calibrar os modelos de geração fotovoltaicos, bem como avaliar as condições climáticas típicas da cidade de São Paulo.

O detalhamento dos modelos desenvolvidos, bem como as análises utilizadas para avaliação dos resultados energéticos e financeiros, são descritas nos itens a seguir.

2.1 Modelo das edificações

Para as simulações energéticas foi elaborado um modelo padrão de um edifício de escritórios corporativos em torre, posteriormente complementado com características utilizadas para a construção de modelos adicionais.

O modelo padrão foi baseado no projeto de Desempenho Operacional em Edificações (DEO) do Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS). O projeto, que busca avaliar o desempenho das edificações na fase de uso, começou a ser desenvolvido em 2013 com a elaboração de um *benchmarking* de agências bancárias. Após a primeira etapa, o projeto entrou em uma segunda fase para desenvolvimento do *benchmarking* de escritórios corporativos.

O *benchmarking* de escritórios corporativos contou com uma etapa inicial de levantamento de dados de mais de trezentos edifícios, seguida de auditoria energética presencial em oito edifícios de escritórios, seis em São Paulo e dois no Rio de Janeiro. Os

dados dessas auditorias² foram utilizados como base para elaboração do modelo simulado nesse trabalho.

As características construtivas básicas apresentadas na Tabela 1 foram baseadas nas condições mais comuns encontradas na amostra do CBCS para edifícios de escritórios corporativos.

Tabela 1 – Características construtivas básicas do modelo simulado da edificação

Características construtivas	Valores	Mais informações
Número de andares	21	Térreo, mais 20 pavimentos tipo
Área total construída	32.680 m ²	-
Área condicionada	28.010 m ²	Exclui as áreas técnicas e <i>hall</i> dos elevadores
Área de laje útil por pavimento tipo	1.600 m ²	40 x 40 m
Área privativa por pavimento tipo	1.375 m ²	4 áreas privativas distribuídas igualmente
Área comum por pavimento tipo	225 m ²	<i>Hall</i> dos elevadores e áreas técnicas

Fonte: elaboração própria

Apesar dos edifícios analisados possuírem um ou mais subsolos de estacionamento, no modelo proposto esses pavimentos não foram inseridos, uma vez que não influenciam diretamente no consumo do sistema de ar condicionado e na geração fotovoltaica pelas fachadas, principais variáveis estudadas.

² O relatório com os resultados do projeto DEO para edifícios corporativos está disponível na página do CBCS, através do link: <http://www.cbcs.org.br/doe>

Cada pavimento tipo foi dividido em cinco zonas térmicas, sendo quatro para as áreas privativas e uma para o *hall* dos elevadores, como mostra a Figura 6.

Figura 6 – Divisão do pavimento tipo em zonas térmicas

Fonte: elaboração própria

A divisão adotada para as zonas térmicas é igual à proposta por Ng et al. (2013), em sua análise sobre o uso de BIPV na realidade climática de Singapura.

A divisão buscou separar o núcleo do edifício, onde está o *hall* dos elevadores, os elevadores, as escadas de incêndio e as áreas técnicas, que são ambientes das áreas comuns sem condicionamento ambiental, das zonas privativas condicionadas. Para as zonas privativas foram adotadas divisões entre as fachadas, de forma a permitir uma melhor análise da influência da radiação solar no modelo. As divisões internas, normalmente compostas por *drywall* ou divisórias plásticas, foram ignoradas, uma vez que sua influência nos resultados é mínima.

2.2 Cargas internas

Além das características construtivas básicas as potências e perfis de uso (*schedules*) dos diferentes sistemas e equipamentos também foram mantidos em todos os modelos simulados. A

Tabela 2 apresenta as principais características dos sistemas baseados nas visitas do projeto do CBCS.

Tabela 2 – Características básicas dos sistemas e equipamentos do edifício simulado

Características	Valores
Densidade de ocupação	10 m ² /pessoa
Densidade de Potência Elétrica	18 W/m ²
Densidade de Potência de Iluminação (DPI)	12 W/m ²
Potência de Iluminação Externa	1 kW
Elevadores	12,35 kW
Central de Processamento de Dados (CPD)	55 W/m ²

Fonte: elaboração própria

A DPI estimada para o sistema de iluminação foi levantada nas visitas técnicas do projeto do CBCS e se referem à iluminação fluorescente tubular com lâmpadas do tipo T5. A substituição por lâmpadas tubulares LED não foi considerada, mas estima-se que irá começar a ocorrer em maior escala, uma vez que os preços da tecnologia estão cada vez mais competitivos.

Em relação ao CPD, foi considerada uma central com 75,63 kW de potência que ocupa um pavimento tipo inteiro. Essa área funciona por 24 horas e é atendida por um sistema de ar condicionado exclusivo. A iluminação do pavimento permanece apagada na maior parte do tempo, uma vez que só é acionada para manutenção dos equipamentos.

Em relação ao sistema de ar condicionado central, foi adotado o modelo mais comum observado nas auditorias energéticas: expansão indireta com chiller centrífugo e resfriamento

a água. As potências do sistema foram calculadas pelo EnergyPlus a partir da metodologia autosize, enquanto as informações sobre taxa de renovação de ar e eficiência dos equipamentos foram obtidas no Anexo G da norma americana ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2010). As informações desse sistema são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características do sistema de ar condicionado

Características	Valores
Sistema	Expansão indireta (Central de Água Gelada - CAG)
Taxa de infiltração	0,7 trocas de ar por hora (ac/h)
Taxa de renovação de ar por pessoa	0,009440 m ³ /pessoa
Modelo do <i>chiller</i>	Centrífugo
Coefficiente de Performance (COP) do <i>chiller</i>	5,50 W/W
Curvas de carga do <i>chiller</i>	Banco de dados do EnergyPlus: DOE-2 Centrifugal/5.50 COP
Temperatura da água fria	6,67 °C
Temperatura do fluido de condensação	29,4 °C
Temperatura de resfriamento nas áreas privativas	24 °C
Bombas de Água Gelada Primárias (BAGP)	Vazão fixa
Bombas de Água Gelada Secundárias (BAGS)	Vazão variável (variador de frequência)
Bombas de Água de Condensação (BAC)	Vazão fixa
Torres de resfriamento	Velocidade fixa
<i>Fan Coils</i>	Pressão de operação: 350 Pa Um por zona térmica
Distribuição do ar resfriado	<i>Variable Air Volume</i> (VAV)
Horários de operação	Resfriamento: <i>schedule</i> próprio apresentado no Item 2.3 Aquecimento: desligado

Fonte: elaboração própria

Além do sistema central de ar condicionado, também foram inseridos outros dois sistemas complementares para atendimento isolado do CPD (como dito anteriormente) e da casa de máquina dos elevadores. Esses sistemas complementares são do tipo *self-contained*, mas utilizam o sistema de condensação da CAG. Esses sistemas permitem atender a uma demanda térmica maior, devido a grande potência por metro quadrado de equipamentos instalados.

As características do ar condicionado *self-contained* são iguais à CAG, com exceção do COP do equipamento que é de 3,0 W/W.

A Figura 7 apresenta o diagrama básico do sistema de ar condicionado adotado para todo o edifício.

Figura 7 – Diagrama básico do sistema de ar condicionado simulado

Fonte: elaboração própria a partir de DesignBuilder

2.3 Perfis de uso e operação

Para operação do edifício foram adotados diferentes perfis de uso e operação de acordo com o observado nas visitas do projeto do CBCS. Esses valores foram estimados com base na realidade observada de diferentes escritórios corporativos. O perfil de ocupação é apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Perfil de ocupação do edifício

Fonte: elaboração própria

Para um dia comercial comum, o perfil leva em conta a entrada dos funcionários da manutenção e limpeza do edifício, que começa a ocorrer a partir das 07h00 da manhã, seguido da chegada dos funcionários das empresas, a partir das 08h00. O edifício tem ocupação total das 09h00 às 12h00 e das 14h00 às 17h00, sendo que entre às 12h00 e às 14h00 ocorre o período de almoço, quando a ocupação cai pela metade. Entre às 18h00 às 19h00 ocorre a saída progressiva dos funcionários.

No sábado o edifício é ocupado apenas no período da manhã, tendo ocupação plena apenas das 09h00 às 11h00. Nos domingos e feriados o edifício não tem ocupação (foram considerados apenas os feriados nacionais).

O perfil de operação dos equipamentos elétricos segue o perfil de ocupação do edifício, porém com uma carga fixa permanente de 2,5% para todos os dias do ano, que representa o *stand by* dos equipamentos, como mostra a Figura 9.

Figura 9 – Perfil de operação dos equipamentos elétricos

Fonte: elaboração própria

O perfil de uso da iluminação também se concentra no período comercial, porém com uma diferença de acionamento. Nota-se que nos edifícios visitados o sistema de automação é programado para ligar e desligar a iluminação em horários programados, independente da ocupação. Nesses edifícios de escritórios não é comum o uso de sensores de presença, apenas em áreas técnicas e banheiros, que por serem muito específicas e apresentarem um consumo pequeno, não foram consideradas. Na Figura 10 é possível observar o sistema sendo ligado às 7h00 da manhã nos dias comuns e sábados e desligado às 20h00 da noite em dias comuns e 14h00 da tarde aos sábados. No restante dos dias uma carga de 1% fica ligada, correspondente à iluminação decorativa e de segurança de alguns ambientes.

Figura 10 – Perfil de operação da iluminação interna

Fonte: elaboração própria

Além da iluminação interna também foi considerada uma carga de iluminação externa decorativa e de segurança. O perfil de operação desse sistema é fixo para todos os dias do ano e permanece ligado no período noturno entre às 20h00 e às 6h00 (Figura 11).

Figura 11 – Perfil de operação da iluminação externa

Fonte: elaboração própria

Em relação ao sistema de ar condicionado, o perfil de uso é substituído pelo perfil de disponibilidade. Esse perfil não define a carga do ar condicionado, que é estimada pela simulação, mas sim se o ar condicionado pode ser ligado em determinado horário. Foi identificado que nos edifícios de escritórios corporativos de São Paulo o equipamento de ar condicionado é ligado apenas nos horários comerciais; nos demais horários o atendimento das cargas internas só é possível se os ocupantes fizerem uma solicitação especial aos administradores. Essas solicitações especiais foram desconsideradas no modelo.

Dessa forma, o perfil de disponibilidade do sistema de ar condicionado, que contempla refrigeração, ventilação e exaustão, começa nos dias comerciais e sábados às 7h00 da manhã e vai até às 19h00 da noite durante a semana e até às 14h00 no sábado. Nos demais horários o ar condicionado permanece desligado (Figura 12).

Figura 12 – Perfil de disponibilidade do sistema de ar condicionado

Fonte: elaboração própria

Além das cargas internas da ocupação, equipamentos elétricos e iluminação, foram ainda consideradas mais duas cargas representativas: uma CPD que ocupa o sétimo andar e a sala de máquinas dos elevadores, localizada no barrilete na cobertura.

O perfil de uso da central de processamento de dados é o mesmo para todos os dias do ano, uma vez que centrais do porte considerado são utilizadas para o processamento de dados de chamadas muitas vezes originadas fora da área do edifício em si, o que significa que seu

uso não está associado diretamente à ocupação. Foi considerada uma carga de 90% ao longo do horário diurno e uma carga de 45% no horário noturno, como mostra a Figura 13.

Figura 13 – Perfil de operação da central de processamento de dados

Fonte: elaboração própria

Para o perfil de operação dos elevadores foi adotada uma carga constante, calibrada pelo consumo estimado de energia para deslocamento, de acordo com a metodologia do Memorando Técnico 54 da Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE) (2013) que considera a potência do motor, o número de acionamentos por ano (valor tabelado para edifícios comerciais) e o tempo médio de subida³.

2.4 Materiais construtivos

A partir das características comuns adotadas em todos os modelos simulados, descritas nos Itens 2.1 a 2.3, foram então identificadas características particulares a diferentes tipologias arquitetônicas de edifícios de escritórios corporativos, incorporadas em diferentes

³ O tempo médio de subida calculado nos edifícios visitados pelo projeto do CBCS fica em torno de 30 segundos a cada 10 andares.

versões do modelo para estudar como o consumo de energia variou ao longo do desenvolvimento histórico dos edifícios desse tipo na cidade de São Paulo.

Para tanto foram considerados diferentes tipos de materiais, vedações, características arquitetônicas e tipos de vidro, como mostra a Tabela 4. As diferentes tipologias serão apresentadas com maiores detalhes posteriormente no Capítulo 3.

Por tipologia arquitetônica entende-se o estudo comparativo das características físicas do ambiente construído, que nesse estudo foi considerado como o edifício em si, posteriormente agrupado em categorias definidas por similaridades (Günei, 2007).

Tabela 4 - Características construtivas das diferentes tipologias estudadas

Tipologia	Período histórico	Principais características	Materiais	Materiais construtivos
Tradicional (Guerreiro, 2010) (Santos, 2012)	1910 - 1940	Estrutura de concreto armado Pé direito de 4,5 m RJP de 30%	Pisos e lajes de concreto, vedação e paredes internas em tijolo de barro maciço Vidro comum (4 mm)	Paredes externas: transmitância térmica (U): 1,863 / absorvância solar (α): 0,50 Cobertura: U: 0,895 / α : 0,70 Vidro: U: 5,855 – Transparência (T): 0,898 – Fator Solar (FS): 0,862
Transição (Guerreiro, 2010) (Santos, 2012)	1940 - 1980	Estrutura de concreto armado Pé direito de 3,2 m RJP de 50%	Pisos e lajes de concreto, vedação em bloco de concreto, paredes internas de gesso (<i>drywall</i>) Vidro comum (6 mm)	Paredes externas: U: 2,374 – α : 0,50 Cobertura: U: 1,298 – α : 0,70 Vidro: U: 5,778 – T: 0,881 – FS: 0,819
Contemporânea (Guerreiro, 2010) (Santos, 2012)	1980 – até hoje	Estrutura de concreto armado Pé direito de 3,5 m (com piso elevado e forro) RJP de 80%	Pisos e lajes de concreto, vedação em bloco de concreto, paredes internas de gesso (<i>drywall</i>) Vidro laminado verde (8 mm)	Paredes externas: U: 2,374 – α : 0,50 Cobertura: U: 1,298 – α : 0,70 Vidro: U: 5,703 – T: 0,749 – FS: 0,624
Contemporânea com vidro refletivo	2000 – até hoje	Estrutura de concreto armado Pé direito de 3,5 m (com piso elevado e forro) RJP de 80%	Pisos e lajes de concreto, vedação em bloco de concreto, paredes internas de gesso (<i>drywall</i>) Vidro refletivo (8 mm)	Paredes externas: U: 2,374 – α : 0,50 Cobertura: U: 1,298 – α : 0,70 Vidro: U: 5,733 – T: 0,130 – FS: 0,308

Contemporânea com vidro insulado	2000 – até hoje	Estrutura de concreto armado Pé direito de 3,5 m (com piso elevado e forro) RJP de 80%	Pisos e lajes de concreto, vedação em bloco de concreto, paredes internas de gesso (<i>drywall</i>) Vidro insulado duplo (8 mm + 8 mm de ar + 6 mm)	Paredes externas: U: 2,374 – α : 0,50 Cobertura: U: 1,298 – α : 0,70 Vidro: U: 2,635 – T: 0,20 – FS: 0,304
Contemporânea com painéis solares integrados na fachada (BIPV)	-	Estrutura de concreto armado Pé direito de 3,5 m (com piso elevado e forro) RJP de 80%	Pisos e lajes de concreto, vedação em bloco de concreto, paredes internas de gesso (<i>drywall</i>) Vidro refletivo (8 mm) Vidro fotovoltaico com 10% de visibilidade (8 mm)	Paredes externas: U: 2,374 – α : 0,50 Cobertura: U: 1,298 – α : 0,70 Vidro: U: 5,733 – T: 0,130 – FS: 0,308 Vidro fotovoltaico: U: 5,733 – T: 0,108 – FS: 0,332

Fonte: elaboração própria

Algumas características são comuns a todas as tipologias, como a estrutura de concreto armado e o uso de lajes e pisos de concreto. As mudanças mais marcantes são o pé direito, a Razão Janela Parede (RJP)⁴ e, nas tipologias contemporâneas, o tipo de vidro utilizado nas vedações.

A Figura 14 apresenta a imagem dos modelos 3D termo-energéticos desenvolvidos no DesignBuilder para as diferentes tipologias. É possível notar como o pé direito influencia na volumetria da edificação, apesar dos três modelos possuírem exatamente a mesma área construída. Também é possível observar a alteração nas vedações externas, evoluindo da alvenaria para o pano de vidro.

⁴ A RJP é resultado da divisão das áreas de abertura das fachadas pelo total de área das paredes das fachadas, indicando assim qual o percentual coberto por janelas.

Figura 14 – Modelos das tipologias simuladas

Fonte: elaboração própria a partir de DesignBuilder

Nos modelos desenvolvidos o consumo de eletricidade foi simulado para cada andar dos edifícios, a função *multiplier* do EnergyPlus, que simula apenas alguns andares e multiplica pelo número total de pavimentos, não foi utilizada.

2.5 Características dos módulos fotovoltaicos

Além da tipologia com painéis fotovoltaicos integrados nas fachadas da edificação foi também avaliada a geração de eletricidade por painéis fotovoltaicos instalados na cobertura, de forma a estudar a geração entre ambos.

Para os painéis fotovoltaicos integrados ao vidro foram utilizadas as características disponibilizadas pela principal empresa fornecedora brasileira, Soliker. A empresa possui uma linha de vidros fotovoltaicos com diferentes transparências, variando de 10% a 40%. No entanto, em 2015 a empresa comercializava apenas os vidros com transparências de 10% e 20%.

As características do vidro foram inseridas no EnergyPlus, de forma a simular o impacto de seu uso na demanda térmica do edifício e, conseqüentemente, no consumo de eletricidade e água pelo sistema central de condicionamento de ar.

A versão 8.1 do EnergyPlus⁵ ainda não permite simular vidros fotovoltaicos, dessa forma as características do vidro foram testadas no *software* e, posteriormente, a geração de eletricidade foi estimada no PVsyst, que possui em seu banco de dados o vidro fotovoltaico integrado a fachada. Para a simulação no PVsyst foi utilizada a opção “Project Design” que é a mais completa e permite avaliar as características específicas do modelo estudado.

A geração na cobertura por módulos fotovoltaicos policristalinos também foi simulada no PVsyst, apesar do EnergyPlus ser capaz de realizar simulação semelhante. O uso do PVsyst foi adotado para permitir avaliar a geração com base em um mesmo arquivo climático e, assim, permitir comparações entre ambas as tecnologias de forma mais fidedigna.

As especificações de todos os painéis fotovoltaicos adotados são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5– Especificações dos painéis fotovoltaicos

Vidro (Soliker, s.d.)	Modelo: vidro laminado com camada fina de silício amorfo (a-Si) e 10% de transparência U: 5,733 W/m ² -K FS: 0,332 T: 0,108 Potência: 43 Wp/painel Tamanho: 1.245 x 635 mm
Cobertura (ISE, 2015)	Modelo: Módulo de silício policristalino (p-Si) Potência: 220 Wp/painel Tamanho: 1.482 x 990 mm
Inversores (ISE, 2015)	Modelo: 60 Hz (frequência), 120-335 V (voltagem) Potência: 1,5 kW/inversor Eficiência: 94,8%

Fonte: elaboração própria

⁵ Versão mais recente disponível no momento de realização das simulações.

Em relação à disposição dos painéis fotovoltaicos nas fachadas, foram criadas duas fileiras, uma na parte inferior e uma na parte superior das janelas, de forma que no meio foi mantido um intervalo de 1,5m de vidro refletivo com melhor transparência. Esse intervalo tem por objetivo garantir a visibilidade do ambiente externo pelos usuários da edificação, bem como permitir uma maior entrada de luz natural. Um esquema do modelo adotado é apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Esquema ilustrativo do modelo adotado com os vidros fotovoltaicos na parte superior e inferior da janela

Fonte: elaboração própria

Com o uso do PVsyst foi possível avaliar as perdas na geração pela degradação natural dos painéis ao longo do tempo, pelo aumento da temperatura das células, por efeito ôhmico, pelas eficiências dos inversores e transformadores, entre outras. Um detalhamento completo das perdas consideradas está disponível no Apêndice B.

2.6 Sombreamento do entorno

Para avaliar o impacto do sombreamento do entorno na geração de eletricidade pelas fachadas na tipologia contemporânea com vidros fotovoltaicos (BIPV), foi utilizado o EnergyPlus. Como o *software* ainda não é capaz de simular vidros fotovoltaicos, painéis

policristalinos foram inseridos como elemento de sombreamento externo encostado no vidro das fachadas.

O uso do EnergyPlus para esse fim é mais limitado e não permite avaliar o impacto no condicionamento de ar, nem as perdas na geração pelo aumento da temperatura dos painéis. Dessa forma, o resultado final não pôde ser comparado à geração estimada pelo PVsyst, sendo os resultados utilizados apenas para avaliar o impacto do sombreamento na geração de eletricidade de forma comparativa entre a mesma tipologia em um ambiente sem sombreamento e em um ambiente com sombreamento. A Figura 16 e a Figura 17 apresentam essa diferença.

Figura 16 – Tipologia contemporânea com vidros fotovoltaicos em entorno sem sombreamento (cobertura removida para facilitar a visualização)

Fonte: elaboração própria a partir de DesignBuilder

Figura 17 – Tipologia contemporânea com vidros fotovoltaicos em entorno com sombreamento

Fonte: elaboração própria a partir de DesignBuilder

Na Figura 16 é possível observar a disposição dos painéis fotovoltaicos, destacados na imagem em cor azul clara. Já na segunda imagem (Figura 17), é possível observar o edifício com a cobertura cinza e os painéis fotovoltaicos rodeado por diversos outros edifícios representados no modelo como estruturas de sombreamento (cor rosa).

Para o espaçamento do entorno foram consultadas as principais distâncias dos quarteirões da Avenida Paulista e da Avenida Faria Lima em São Paulo, dois dos principais eixos de ocupação desse tipo de edifício de escritórios no país. As medidas são de 50 metros de distância entre os quarteirões principais em cada lado da avenida, 20 metros entre as ruas transversais e 10 metros entre os edifícios do mesmo quarteirão (Figura 18).

Figura 18 – Distâncias entre os principais elementos considerados no sombreamento do entorno

Fonte: elaboração própria a partir de DesignBuilder

Em relação à orientação do edifício, que possui um impacto relevante quando o sombreamento do entorno é considerado, foram simuladas três localidades: (1) Eixo da Av. Paulista; (2) Eixo da Av. Faria Lima e (3) Eixo da Marginal Pinheiros. Foi utilizado o mesmo arquivo climático disponível para a cidade de São Paulo. A Figura 19 apresenta as orientações de cada eixo.

Figura 19 – Orientação de cada eixo de ocupação simulado na cidade de São Paulo

Fonte: elaboração própria a partir de DesignBuilder

Para a medição das distâncias entre os elementos de sombreamento e para obter a orientação de cada eixo de ocupação, foi utilizado o *software* Google Earth Pro (versão 7.1.5).

2.7 Localização geográfica e arquivos climáticos

As simulações foram realizadas para a cidade de São Paulo, que possui clima subtropical úmido. Os arquivos climáticos utilizados para a simulação foram obtidos na página do U.S Department of Energy, da base de dados SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*) (DOE, 2014).

De forma a avaliar também as diferenças no consumo de energia por conta da utilização de diferentes arquivos climáticos, foram ainda realizadas simulações com quatro arquivos diferentes disponíveis para a cidade de São Paulo: (1) SWERA (DOE, 2014); (2) IWECC (DOE, 2014); (3) TRY (LabEEE, 2005) e (4) INMET (Roriz, 2012).

2.8 Iluminação natural

Além das simulações de consumo de energia e geração de eletricidade foi ainda avaliado o impacto do uso do vidro fotovoltaico na iluminação natural dos ambientes internos. Para a avaliação foi utilizado o módulo *daylighting* do *software* DesignBuilder, que permite obter um mapa de entrada de luz pelas aberturas dos ambientes.

A comparação foi realizada com o objetivo de estudar de maneira pontual o impacto da tecnologia no potencial de aproveitamento da iluminação natural.

No módulo utilizado o *software* avalia a incidência da luz natural nos ambientes a partir da norma CIE *overcast Day*, publicada pela Comissão Internacional em Iluminação (CIE, 2013), que define o céu como uma fonte uniforme de luz com iluminância constante de 10.000 lux. Durante a execução do teste a iluminação artificial é desligada, sendo mantidas as características arquitetônicas e dos materiais.

A partir do uso do módulo foi possível avaliar a iluminação natural em um pavimento tipo com uso de vidro comum (tipologia contemporânea) e com uso do vidro fotovoltaico (tipologia BIPV) para comparar os resultados.

2.9 Análise financeira

Para avaliação financeira dos modelos propostos foram realizadas cotações de mercado com as principais empresas brasileiras fornecedoras de vidro⁶, fornecedoras de painéis fotovoltaicos para fachadas⁷, instaladores e projetistas de ar condicionado⁸.

Os orçamentos foram solicitados com base no modelo definido no Item 2.1, de forma que as cotações foram realizadas sobre o mesmo projeto arquitetônico.

Para avaliação financeira foram utilizados três indicadores: (1) tempo de retorno simples do investimento inicial (*payback*); (2) Taxa Interna de Retorno – TIR e (3) Valor Presente Líquido - VPL. Como variáveis principais dos cenários financeiros foram adotadas uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) equivalente a Selic em setembro de 2015, 14,25% a.a. e um período de retorno de investimento de 25 anos, equivalente ao período ao qual o fabricante oferece garantia aos vidros fotovoltaicos.

Os três indicadores foram escolhidos, pois representam, juntamente com a TMA, as principais formas de avaliação de investimentos adotadas internacionalmente pelos diretores executivos de grandes companhias, de acordo com pesquisa de Graham & Harvey (2001), como mostra a Figura 20.

⁶ PKO do Brasil, contato realizado por e-mail e telefone com Rebeca Andrade, <http://www.pkodobrasil.com.br>.

⁷ Soliker Brasil, contato realizado por e-mail e telefone com Thiago Moraes, <http://www.soliker.com.br/>.

⁸ MHA Engenharia, contato presencial com Sérgio Marchioli, <http://www.mha.com.br>

Figura 20 – Indicadores de viabilidade financeira adotados por diretores executivos de diversas companhias internacionais

Fonte: Graham & Harvey (2001)

2.9.1 Tempo de retorno simples

O tempo de retorno (*payback*) simples é o período de tempo transcorrido entre um investimento inicial realizado no momento zero e o momento futuro onde os lucros líquidos acumulados igualam o investimento inicial.

O tempo de retorno simples é cálculo através da equação 1. Geralmente, quanto menor o resultado obtido para o tempo de retorno, mais indicado o investimento. É comum que as empresas possuam um valor mínimo para o tempo de retorno, que utilizam como referência para determinar se um investimento deve ou não ser analisado com maior detalhamento.

$$Payback \text{ simples} = \frac{(p-n)}{p} + n_y \quad (1)$$

Sendo,

p = investimento inicial (R\$);

n = o valor do retorno do último fluxo de caixa negativo;

n_y = o número de anos transcorridos até que o último retorno negativo ocorre.

Apesar de demasiado simples, o método de tempo de retorno simples é amplamente utilizado pelo mercado, de forma que os resultados obtidos no trabalho podem ser comparados com as expectativas dos empresários brasileiros⁹.

2.9.2 Taxa Interna de Retorno - TIR

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é uma taxa de desconto indicativa de quando os fluxos de caixa de um projeto, trazidos ao valor presente, igualam os retornos dos investimentos, também trazidos a valor presente.

A TIR é calculada através da equação 2, sendo seu valor (r) aquele que iguala o VPL a zero. Geralmente, quanto maior o valor da TIR, mais indicado o investimento. É comum que cada empresa tenha uma TIR interna de referência, pela qual estabelece se um investimento é ou não considerado interessante.

$$VPL = \sum_{n=0}^N \frac{C_n}{(1+r)^n} = 0 \quad (2)$$

Sendo,

VPL = Valor Presente Líquido;

N = número total de períodos;

n = integral positivo;

r = Taxa Interna de Retorno.

A TIR também possui limitações, especialmente quando se compararam projetos com tempos de investimento diferentes. Como os períodos de retorno das simulações realizadas são iguais, essa limitação não impacta o resultado. Além disso, mesmo em projetos com tempo de investimento iguais, comparar as taxas de retorno obtidas não é um indicativo

⁹ De acordo com Procel (2008), no mercado brasileiro o tempo de retorno simples considerado aceitável para os projetos de eficiência energética é de 6 meses para 27,8% dos empresários entrevistados, 1 ano para 24,6%, 2 anos para 16,6% e 3 anos para 7,6%. Nota-se ainda que 21,0% não sabia estimar o que seria um tempo de retorno aceitável.

confiável de que um projeto é melhor financeiramente que o outro. Para superar essas limitações e complementar a análise financeira, foi feito o uso do VPL.

2.9.3 Valor Presente Líquido - VPL

O Valor Presente Líquido (VPL) é o indicador financeiro que indica o valor presente de pagamentos a serem realizados no futuro, quando esses são descontados a uma taxa de juros pré-estabelecida, menos o investimento inicial.

O VPL é calculado através da equação 3. Quanto maior o valor obtido para o VPL, mais viável é considerado o investimento. O VPL pode também ser utilizado para comparar diferentes investimentos, sendo o mais indicado aquele que apresenta o maior valor (considerando que ambos investimentos possuam o mesmo risco).

$$VPL(i, N) = \sum_{t=0}^N \frac{R_t}{(1+i)^t} \quad (3)$$

Sendo,

VPL = Valor Presente Líquido;

N = número total de períodos;

i = taxa de desconto;

R_t = fluxo de caixa líquido no momento t.

3 CONCEITOS E FUNDAMENTOS

3.1 Efeito fotovoltaico e sistemas de geração

Descoberto em 1839, o efeito fotovoltaico passou a ser utilizado de forma prática na metade do século passado, quando pequenos painéis passaram a se tornar cada vez mais comuns nos satélites enviados ao espaço. No entanto, apenas com a primeira crise do petróleo de 1973, a tecnologia passou a ser estudada como alternativa de geração de eletricidade para uso no próprio planeta (Lorenzo, 1994, p. 46-49).

O efeito fotovoltaico recebe esse nome por descrever o processo no qual a luz pode ser convertida em eletricidade, através da criação de uma diferença de potencial em uma placa semicondutora (Lorenzo, 1994, p. 46-49).

A célula fotovoltaica, responsável pela conversão da luz em eletricidade, atualmente tem sua versão comercial amparada no silício, através de três formas: (i) monocristalina (mono-Si); (ii) policristalina (poly-Si) e amorfo (a-Si). Porém, muito mais que um desafio tecnológico, a geração fotovoltaica encontra sua maior barreira nos custos comparativos em relação à geração por outras fontes, sejam tradicionais, sejam renováveis (CRECESB, 2004, p. 18 e 19), apesar de que nos últimos anos os custos tem se tornado cada vez mais atrativos.

Em relação à tecnologia, basicamente cinco fatores controlam o comportamento de uma célula fotovoltaica, fatores esses divididos em duas categorias: (1) fatores internos – resistência em série; resistência de derivação e corrente de saturação e (2) fatores externos – irradiação solar e temperatura (Lasner & Ang, 1990, p. 76-82). No presente estudo, tanto os fatores internos, quanto os externos, foram considerados no modelo através das equações do próprio PVsyst.

3.1.1 Tecnologia fotovoltaica de silício amorfo (a-Si)

As células de silício amorfo (a-Si ou a-Si:H) recebem esse nome porque o silício utilizado não está organizado ou cristalizado em um nível molecular como nas outras tecnologias de policristalino e monocristalino. O processo de fabricação da célula solar de

silício amorfo consiste no depósito de uma ou mais camadas de material de silício sobre um substrato, processo que distribui a cadeia de moléculas de Silício de forma desordenada, o que provoca um comportamento anômalo na rede de distribuição dos elétrons (Schropp, 2014).

Entre as vantagens comparativas do silício amorfo em relação aos outros tipos de células é sua versatilidade de uso, permitindo a criação de módulos mais leves, flexíveis e com formatos não tradicionais. Além disso, a eficiência dos módulos apresenta um melhor desempenho em condições de baixa iluminação, reduzindo o impacto negativo do sombreamento (Schropp, 2014).

Em relação à produção de eletricidade em si, a tecnologia de silício amorfo ainda apresenta índices de eficiência menores que as outras tecnologias. Os chamados módulos de primeira geração apresentam eficiências entre 6% e 7% (Zeman, 2009), menos da metade da eficiência de módulos de silício mono e policristalino. Apesar dos módulos de primeira geração serem os únicos disponíveis atualmente no mercado, em laboratório eficiências entre 10% e 11% foram alcançadas nos módulos de segunda geração (Zeman, 2009).

3.1.2 Tecnologia de silício amorfo (a-Si) integrada em vidro

A produção de um módulo solar integrado em vidro consiste no processo de depósito do Silício amorfo em um vidro, utilizado como substrato. O módulo solar integrado pode então ser composto em diferentes tipos de vidros especiais, como vidros duplos ou triplos.

O processo mais comum de depósito utilizado é através do uso de vapor químico, processo chamado de *Chemical Vapor Deposition* (CVD) (Gordon, 1997). Esse processo é o mesmo utilizado para fabricação de vidros de baixa emissividade (*low-e*), refletivos e oleofóbicos (que repele substâncias oleosas; muito utilizado em telas de celulares) (Gordon, 1997). O interessante desse processo é que os custos de produção entre os chamados vidros refletivos e os vidros fotovoltaicos estão, assim, mais relacionados ao custo da matéria prima e a escala de produção do que à tecnologia em si.

Para a produção do vidro fotovoltaico é utilizado o gás silano (SiH_4), depositado na superfície do vidro ainda quente a uma temperatura de 650 °C (Gordon, 1997).

3.1.3 Estudos sobre BIPV

Dinodé & Wagner (2013) estudaram a instalação de janelas fotovoltaicas semitransparentes na realidade climática de duas cidades brasileiras: Fortaleza e Florianópolis. Para tanto foi desenvolvido um modelo 3D termo-energético simulado no EnergyPlus, composto basicamente por uma zona térmica com 88 m^2 e pé direito de 2,70 m. O modelo proposto tem apenas uma janela em uma fachada, uma ocupação de $14,7 \text{ m}^2/\text{pessoa}$, ganhos internos de 8 W/m^2 para a iluminação e $9,7 \text{ W/m}^2$ para equipamentos elétricos e um ar condicionado do tipo *Split* para climatização. Foram avaliados os consumos do ar condicionado com uso de diferentes vidros: (i) vidro simples com 6 mm de espessura; (ii) vidro duplo; (iii) vidro insulado; (iv) vidro insulado fotovoltaico com película orgânica e (v) vidro insulado fotovoltaico de silício amorfo.

Os resultados indicam uma redução total do consumo de energia (que considera a redução do consumo do ar condicionado, da iluminação artificial e da geração de eletricidade pelas células fotovoltaicas) de 39% em Fortaleza e 43% em Florianópolis. Apesar dos resultados expressivos, o estudo adotou apenas vidros fotovoltaicos insulados, onde as células fotovoltaicas são inseridas no interior da camada de ar entre duas camadas de vidro de baixa emissividade (chamado comercialmente de *low-e*). Na prática a escolha realizada para o vidro dificulta avaliar a verdadeira contribuição do vidro fotovoltaico, uma vez que o vidro insulado com baixa emissividade já retém grande parte da radiação solar incidente.

Miyazaki et al. (2005) realizou estudo semelhante utilizando o EnergyPlus para simular o consumo de um edifício comercial de um andar com 5 zonas térmicas em Tóquio, Japão. O edifício tem área de 792 m^2 , pé direito de 3,6 m, densidade de ocupação de $6,5 \text{ m}^2/\text{pessoa}$, carga de iluminação de 25 W/m^2 , carga de equipamentos elétricos de 20 W/m^2 e modelo de ar condicionado simples (significa que o EnergyPlus estima apenas o consumo de energia útil para condicionamento, desconsiderando a eficiência do equipamento). Para o vidro fotovoltaico foi utilizado o tipo de silício amorfo instalado em um vidro duplo com duas placas de vidro entremeadas por uma camada de ar de 6 mm.

Foi testada ainda a relação entre RJP e transparência do vidro fotovoltaico, obtendo como resultado no melhor cenário (RJP de 50% com vidro fotovoltaico com 40% de transparência) uma redução de 54% no consumo total de eletricidade quando comparado com o modelo de linha de base com vidro duplo comum.

Outra simulação sobre o potencial da tecnologia BIPV foi realizada por Ng et al. (2013) para um edifício comercial de um andar com cinco zonas térmicas, área de 800 m², pé direito de 3,0 m, densidade de ocupação de 5 m²/pessoa, carga de iluminação de 10 W/m², carga de equipamentos elétricos de 8W/m² e sistema de ar condicionado central com COP de 3,37. Foi considerada a realidade climática de Singapura para avaliar seis tipos de vidros fotovoltaicos, com diferentes eficiências e fatores solares.

De acordo com o tipo de vidro fotovoltaico foram obtidas reduções no consumo total na faixa de 16,7% a 41,3%. Os resultados demonstram que mesmo os vidros fotovoltaicos com menor eficiência e fator solar apresentam potencial maior para redução do consumo que o uso de vidros comuns, duplos ou insulados.

Apesar dos resultados expressivos na redução do consumo de energia obtido nos três estudos, todos adotam a simulação como metodologia de análise. Song et al. (2008) realizou um estudo prático comparando a geração dos vidros fotovoltaicos instalados em um edifício teste (Figura 21) com a geração simulada no *software* TRNSYS da Universidade de Wisconsin, EUA. Os resultados indicam uma margem de erro de 8,5% entre o modelo real e o modelo simulado, margem essa considerada pelo autor como adequada e confiável.

Figura 21 – Estudo de geração elétrica por vidros fotovoltaicos realizado em edifício teste

Fonte: Song et al. (2008)

Olivieri et al. (2014) estudou também os vidros fotovoltaicos em instalações reais, testando principalmente a diferença entre a transparência dos vidros na eficiência de geração de eletricidade e concluiu que a transparência não é em si um fator determinante para a geração de eletricidade, uma vez que os vidros com transparências de 10%, 20% e 30%

apresentaram eficiências semelhantes. O estudo, no entanto, testou apenas uma placa de cada vidro, o que não é suficiente para garantir uma amostra com relevância estatística.

3.2 Arquitetura de edifícios

As construções em altura, nas quais se enquadram os edifícios de escritórios corporativos para escritórios, fazem parte do ambiente das cidades, de forma que é difícil separar o processo de urbanização do processo de verticalização (Santos, 2012). Nesse contexto, os edifícios corporativos podem ser considerados como os principais agentes de transformação da paisagem, incentivados fortemente pelo mercado imobiliário e pelo poder público (Guerreiro, 2010).

Apesar disso, observando a evolução das construções ao longo do próprio desenvolvimento da humanidade, nota-se que desde a antiguidade o ser humano apresenta um ímpeto pelo desenvolvimento das estruturas altas. Os primeiros edifícios de porte grande dos quais se tem registro remontam do início da Idade do Bronze, sendo os dois exemplos mais famosos, o Ziggurat de Ur, no Iraque e o Chogha Zanbil, no Irã, que evidenciam o desejo de construir estruturas maiores que o próprio homem para de alguma forma cultuar ou mostrar respeito aos Deuses (Addis, 2007).

Marcus Vitruvius Pollio, provavelmente o primeiro arquiteto da história, adotava como princípio que uma edificação deveria ser sólida, útil e bela. Um dos pontos notáveis de seu trabalho foi garantir um maior conforto aos habitantes das edificações, ao mesmo tempo usando técnicas para reduzir o consumo de lenha para aquecimento (Cruickshank, 1996).

A primeira evolução tecnológica que permitiu às estruturas crescer em tamanho e complexidade foi o desenvolvimento do adobe, uma mistura de areia, argila, água e alguma substância fibrosa, como palha, ou esterco seco. Com grande resistência e capacidade de ser modelado em peças de diferentes tamanhos, o adobe foi fundamental para garantir um salto evolutivo para além das simples cabanas e abrigos (Addis, 2007).

Foi com o desenvolvimento da argamassa de cal, no Império Romano, que as construções cresceram não apenas em tamanho, mas também em quantidade.

Além do desenvolvimento dos materiais, nota-se uma evolução das ferramentas utilizadas, como polias e guindastes de madeira. Ferramentas, essas desenvolvidas tanto em

Roma, quanto na Grécia, e importantes para aumentar a complexidade das edificações e ao mesmo tempo reduzir o tempo médio de construção (Giedion, 1949).

Apesar de imponentes igrejas e catedrais terem sido construídas na Idade Medieval, não se registram avanços tecnológicos marcantes durante o período. As habitações populares eram feitas basicamente de madeira, sendo as edificações mais importantes e caras, como castelos e igrejas, feitas de pedra (Giedion, 1949).

Apesar dos avanços realizados, a grande revolução na área das construções teve início no século dezessete, com o nascimento e desenvolvimento da ciência moderna, que permitiu aos engenheiros e arquitetos calcularem as forças em atuação dentro de uma estrutura, superando a técnica anterior baseada principalmente na tentativa e erro.

As ideias e conceitos desenvolvidos no século dezessete foram utilizados em larga escala no século dezoito, com o consequente aumento das cidades, devido à revolução industrial. Um dos maiores avanços desse século foi à utilização maciça do ferro, possível graças ao desenvolvimento industrial de sua produção. Primeiramente como ferro fundido, depois ferro batido e então o aço. A utilização do ferro nas construções também foi responsável pelo surgimento do concreto armado (Pevsner, 1980).

No século dezenove, a produção em massa de materiais como o aço, o concreto e os painéis de vidro, alterou o formato das edificações. Finalmente, no século 20, o desenvolvimento dos elevadores e dos guindastes permitiu o surgimento do modelo do edifício em torre, em análise nesse trabalho (Giedion, 1949).

O conceito do edifício de escritórios surgiu primeiramente de forma marcante em Chicago, nos Estados Unidos. Após um incêndio de grandes proporções ocorrido em 1871, a cidade foi repensada de forma que apenas os quarteirões centrais abrigassem os edifícios comerciais. Isso levou a uma necessidade de verticalização, para compensar o capital dos investidores (Santos, 2012).

De forma resumida, quatro tecnologias são consideradas fundamentais para o desenvolvimento da estrutura em torre: (1) a estrutura de concreto e a armadura de aço; (2) o vidro translúcido; (3) o elevador elétrico e (4) os sistemas de abastecimento e comunicação. Também se destaca a criação do conceito de “pavimento tipo”, que proporcionava uma maior rapidez às obras, bem como um barateamento dos custos de construção (Banham, 1969; Pevsner, 1980).

As primeiras torres construídas incorporavam em si os conceitos do chamado Estilo Internacional, cujo arquiteto Le Corbusier é a principal referência. Esse estilo reforçava as proporções entre o homem e o espaço projetado como principal característica arquitetônica, porém, como será mostrado nos próximos itens, a maioria desses conceitos se perdeu na evolução das tipologias, limitando a arquitetura a, como diz Lamberts (1997), “*um mero jogo de motivos em fachadas ou uma luta pela conquista de vãos cada vez maiores em concreto armado.*” (Lamberts et al., 1997, p. 17).

3.2.1 Tipologias arquitetônicas de edifícios comerciais

Na arquitetura uma tipologia representa uma classificação taxonômica de características elementares encontradas em diferentes edificações e classificadas em categorias comuns (Gunei, 2007). O presente trabalho analisa três tipologias de tipos de edificações: (1) tradicional; (2) transição e (3) contemporânea, de acordo com os trabalhos de Barghini et al. (1989) e Barghini et al. (2014). Cada tipologia é apresentada nos itens a seguir, tanto em termos de suas principais características, quanto sobre qual período histórico sua utilização foi mais frequente.

3.2.1.1 Tipologia tradicional

A tipologia tradicional representa as primeiras torres construídas na cidade de São Paulo nas décadas de 1910 a meados de 1940. Dessas destacam-se o Edifício Guinle, o Edifício Sampaio Moreira e o Edifício Martinelli.

Construído em concreto armado com 36 metros de altura divididos em 8 pavimentos, o Edifício Guinle, terminado em 1913, foi o primeiro da cidade a romper os limites de altura da época, que se limitavam aos 4 pavimentos. Na Figura 22 pode se observar os detalhes de sua fachada.

Figura 22 – Vista da fachada principal do Edifício Guinle

Fonte: Google Images, 2015

O Edifício Sampaio Moreira, considerado como o primeiro arranha céu da cidade, construído também em concreto armado e terminado em 1924, possui 50 metros de altura divididos em 12 pavimentos. Na Figura 23 nota-se sua semelhança com o Edifício Guinle.

Figura 23 – Vista da fachada principal do Edifício Sampaio Moreira

Fonte: Google Images, 2015

Outro edifício do período, o Edifício Martinelli, que concluído em 1929, foi o primeiro da cidade a apresentar um uso misto, uma vez que abrigava tanto lojas comerciais, quanto apartamentos residenciais. Com 110 metros de altura, divididos em 25 andares, o edifício possui uma estrutura de concreto armado com alvenaria de tijolos. Na Figura 24, detalhes de sua fachada são apresentados.

Figura 24– Vista da fachada principal do Edifício Martinelli

Fonte: Google Images, 2015

Por fim, o Edifício Altino Arantes, também chamado de Edifício Banespa, foi um dos mais proeminentes edifícios que representam a tipologia tradicional, sendo que na época de sua construção chegou a ser considerado a maior estrutura em concreto armado do mundo. Inaugurado em 1947, o edifício com 161 metros e 35 andares, foi o mais alto da capital entre o ano de sua inauguração e 1960. Abaixo pode se observar detalhes da sua fachada (Figura 25).

Figura 25 - Vista da fachada principal do Edifício Altino Arantes

Fonte: Google Images, 2015

As principais características dos edifícios da tipologia tradicional, de acordo com os levantamentos das edificações e Barghini et al. (2014) são: (i) estrutura de concreto armado; (2) vedação externa em alvenaria de tijolos de barro; (ii) pé-direito de 4 metros sem piso elevado e forro; (iii) janelões de vidro com possibilidade de abertura; (iv) RJP em torno de 30%; (v) vigas e pilares aparentes; e (vi) laje com espessura de 15 cm.

Apesar da metodologia adotada para a simulação considerar apenas as características arquitetônicas, é interessante notar que nos edifícios dessa época a menor quantidade de equipamentos elétricos, associada a estratégias de ventilação cruzada, permitiam manter níveis de conforto adequados para os ocupantes sem a necessidade de ar condicionado artificial (Santos, 2012, p. 286).

No Anexo A são apresentados croquis das vedações externas e cobertura da tipologia tradicional, de acordo com Barghini et al. (2014).

3.2.1.2 Tipologia de transição

A aqui chamada tipologia de transição equivale historicamente às novas técnicas construtivas e experiências arquitetônicas trazidas ao Brasil pelos arquitetos europeus

refugiados no país no período da Segunda Guerra Mundial, que compreende, dessa forma, edifícios construídos entre 1950 e 1980.

Essa tipologia é chamada de transição, pois marca a linha de sucessão entre os edifícios tradicionais e os edifícios contemporâneos da fase seguinte. Nessa tipologia dois elementos principais conectam o estilo antigo, ao estilo futuro: a grelha estrutural (antigo) e o uso do vidro nas fachadas (futuro) (Guerreiro, 2010).

O edifício mais proeminente desta tipologia em São Paulo é o Edifício Itália. Inaugurado em 1965 o edifício possui 46 andares e 165 metros de altura. A estrutura em concreto armado possui vedações em alvenaria e janelas envidraçadas. Uma característica interessante é a utilização de brise móvel metálico, para diminuir a incidência da radiação solar no interior dos ambientes. A Figura 26 apresenta a fachada do edifício com vista para a torre de base elíptica.

Figura 26 – Vista da fachada do Edifício Itália

Fonte: Google Images, 2015

Outro edifício conhecido desta tipologia é até hoje o mais alto da cidade de São Paulo e do país, o Edifício Mirante do Vale. Concluído em 1966, a torre em formato retangular possui 51 andares e 170 metros de altura. A estrutura de concreto armado tem vedações em alvenaria e janelas envidraçadas, como nota-se na Figura 27.

Figura 27 – Vista da fachada principal do Edifício Mirante do Vale

Fonte: Google Images, 2015

Por fim, outro edifício representante dessa tipologia teve sua construção concluída em 1955, quando na época representava o segundo maior arranha-céu do Vale do Anhangabaú. O Edifício Conde Prates é dividido em dois blocos, um embasamento que abriga os centros comerciais e a torre vertical onde ficam os escritórios. O edifício possui 112 metros de altura, divididos em 33 andares e vedações em alvenaria e janelas envidraçadas. A vista de suas fachadas pode ser observada na Figura 28.

Figura 28 – Vista da fachada do Edifício Conde Prates

Fonte: Google Images, 2015

As principais características dos edifícios da tipologia de transição, de acordo com os levantamentos das edificações e Barghini et al. (2014) são: (i) estrutura de concreto armado; (ii) vedação externa em alvenaria de bloco de concreto; (iii) pé-direito montado de acordo com a estrutura, com cerca de 3 metros, sem piso elevado e forro; (iv) maior ocorrência de aberturas envidraçadas, com RJP em torno de 60%; (v) vigas recuadas; (vi) pilares recuados ou internos e (vii) laje com 20 cm de espessura.

Nos edifícios de transição, a ventilação natural utilizada nos edifícios tradicionais para manutenção do conforto interno deu lugar aos equipamentos de ar condicionado do tipo janela, que se tornaram comuns nas fachadas, chegando inclusive a alterar a estética do edifício como um todo (Santos, 2012, p. 273).

No Anexo A são apresentados croquis das vedações externas e cobertura da tipologia de transição, de acordo com Barghini et al. (2014).

3.2.1.3 Tipologia contemporânea

A tipologia contemporânea passou a se tornar comum na cidade de São Paulo a partir do fim da década de 80, com a expansão da construção civil para novos eixos além do centro

e da Avenida Paulista. O eixo da Marginal Pinheiros (Santos, 2012), como é chamado, foi criado principalmente pela atuação do mercado imobiliário, que na década de 1980 recebeu muitos investimentos por representar uma alternativa mais segura frente à instabilidade econômica da época.

Nessa fase surgiram os edifícios corporativos, que requerem o emprego de novas tecnologias construtivas para atender aos requisitos dos clientes, como andares maiores, piso elevado e vidros especiais. Nesse novo tipo de construção o ar condicionado central passa a ser requisito obrigatório de conforto (Guerreiro, 2010).

O primeiro edifício que marca a tipologia contemporânea abordada nesse trabalho é o Edifício Dacon, inaugurado em 1981 na esquina das avenidas Faria Lima e Cidade Jardim. O edifício, de 96 metros de altura e 23 pavimentos tipo, foi o primeiro de São Paulo a possuir cobertura total de painéis de vidro em sua fachada, como mostra a Figura 29.

Figura 29 – Vista da fachada do Edifício Dacon

Fonte: Google Images, 2015

A partir de meados da década de 90, a arquitetura do Edifício Dacon passa a definir o viés de muitos novos projetos, marcados pela adoção dos panos de vidro totais. Sobre essa tendência, Santos (2012) comenta:

“...a produção arquitetônica caminha para um viés de adoção dos panos de vidro totais, talvez numa adaptação empobrecida do modelo do arranha-céu de vidro tão bem desenvolvido por Mies van der Rohe.” (Santos, 2012, p. 186)

Outro exemplo de projeto com pano de vidro total é o Edifício do Centro Empresarial do Aço, localizado no bairro do Jabaquara. Inaugurado em 1995, o edifício possui a maior estrutura metálica da América Latina e possui 9 andares com 2,60 metros de pé-direito cada. Com sua fachada em azul metálico, a edificação se destaca na paisagem, como mostra a Figura 30.

Figura 30 – Vista da fachada principal do Edifício Centro Empresarial do Aço

Fonte: Google Images, 2015

Inaugurado em 2001, o Edifício Tomie Ohtake, conhecido edifício da região de Pinheiros devido às cores de sua fachada, possui duas torres de escritórios com 22 andares tipo cada. A fachada é composta por painéis de vidro e painéis metálicos em três tonalidades, que variam do roxo para o vinho e a estrutura em forma retangular com laje de 620 m² é levemente arredondada nas bordas. Nos primeiros andares da edificação estão instalados um teatro e um espaço cultural, diversificando os usos. A fachada do edifício é apresentada na Figura 31.

Figura 31 – Vista da fachada do Edifício Tomie Ohtake

Fonte: Google Images, 2015

Por fim, nota-se que o conceito de pano de vidro total está associado à imagem de modernidade e inovação. Na página da *wikipedia* na internet¹⁰ é possível consultar uma lista dos principais arranha-céus da cidade de São Paulo. Nessa página dois edifícios recebem destaque pela legenda de suas fotos: o Edifício Sede do BankBoston (Figura 32) e o Edifício E-Tower (Figura 33). O primeiro é chamado de “um dos edifícios mais inovadores da cidade” e o segundo “um dos edifícios mais modernos da cidade”. Apesar dessa referência não se basear em uma análise arquitetônica e tecnológica dos edifícios, ela revela como a imagem da torre de vidro mescla-se com a visão popular de modernidade.

¹⁰ Wikipedia, Arranha-Céu. Disponível em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Arranha-c%C3%A9u>

Figura 32 – Vista da fachada principal do Edifício Sede do BankBoston

Fonte: Google Images, 2015

Figura 33 – Vista da fachada do Edifício E-Tower

Fonte: Google Images, 2015

O Edifício Sede do BankBoston foi concluído em 2002, possui 145 metros de altura, divididos em 35 andares e apresenta estrutura metálica com fechamento em vidro e granito. O Edifício E-Tower, concluído em 2005, apresenta 148 metros de altura e estrutura de concreto armado com fechamento em vidro e granito. Ambos estão localizados na região da Vila Olímpia, zona sul de São Paulo.

Por fim, destaca-se o Edifício Torre São Paulo JK, devido à história envolta em sua construção. A estrutura de concreto armado que sustenta o edifício foi terminada em 1989 e por 18 anos permaneceu apenas um esqueleto na paisagem da Marginal Pinheiros. A estrutura seria a sede da AES Eletropaulo (na época ainda estatal), porém foi abandonada. Terminado em 2009, o edifício possui 136 metros e vedações em vidro, a vista das fachadas construídas sobre a velha estrutura pode ser observada na Figura 34.

Figura 34 – Vista das fachadas do Edifício Torre São Paulo JK

Fonte: Google Images, 2015

As principais características dos edifícios da tipologia contemporânea, de acordo com os levantamentos das edificações e Barghini et al. (2014) são: (i) estrutura de concreto armado; (ii) vedação externa em vidro laminado; (iii) pé-direito maior para comportar o piso elevado e o forro; (iv) pano de vidro total em pelo menos em 2 fachadas; (v) RJP de 80% ou mais; (vi) vigas recuadas, mais estreitas e prolongadas e (vii) laje com 20 cm de espessura.

Nos edifícios da tipologia contemporânea o uso do ar condicionado passou a ser fundamental, devido principalmente as maiores densidades de ocupação e cargas de equipamentos elétricos. No entanto, o ar condicionado de janela deu espaço ao ar condicionado central, o que transferiu as centenas de pequenos compressores pendurados nas fachadas para um espaço único - normalmente na cobertura ou no subsolo – onde um compressor de grande porte supre toda a demanda interna dos ambientes (Santos, 2012, p. 273). Apesar de propiciar uma “limpeza” na fachada, o uso do ar condicionado central requer a passagem de dutos para circulação de água fria e ar refrigerado, o que forçou o aumento do pé direito e a instalação de forro.

No Anexo A são apresentados croquis das vedações externas e cobertura da tipologia de transição, de acordo com Barghini et al. (2014).

3.2.2 Evolução da arquitetura do edifício comercial de escritórios em São Paulo

A partir da revisão bibliográfica sobre as principais tipologias arquitetônicas de edifícios de escritórios corporativos na cidade de São Paulo é possível observar um processo por trás da evolução histórica no período observado (Figura 35), basicamente às escolhas arquitetônicas levaram a uma maior exposição dos edifícios ao ambiente externo.

Figura 35 – Processo por trás da evolução arquitetônica dos edifícios de escritórios corporativos em SP

Fonte: elaboração própria

Nota-se um aumento da RJP, passando de 30% na tipologia tradicional para 80% na tipologia contemporânea. Já a transmitância térmica média das vedações também aumentou, passando de 1,863 W/m².K na tipologia tradicional para 5,733 W/m².K na contemporânea. Esses dois processos juntos levaram a uma maior influência das condições climáticas do ambiente externo nos ambientes internos do edifício. Essa influência materializa-se em dois fatores: (1) aumento da entrada da radiação solar e (2) aumento da troca de calor entre os ambientes interno e externo. Esses dois fatores somados levaram ao aumento do consumo de energia pelo ar condicionado – passando de 71,2 kWh/m².ano na tipologia tradicional para 110,1 kWh/m².ano na contemporânea – que se tornou o único responsável por equilibrar as condições ambientais de conforto dos ocupantes.

A partir do processo exposto na Figura 35 e pela inflexibilidade de alteração da RJP, devido ao estabelecimento do padrão de fechamento em vidro para os edifícios de escritórios corporativos, o mercado identificou a oportunidade de desenvolver soluções tecnológicas para reduzir o Fator Solar (FS) e a transmitância térmica dos vidros a partir de alterações nas características dos materiais, sem a necessidade de reverter às decisões arquitetônicas tomadas.

O resultado desse processo foi o surgimento de linhas especiais de vidros refletivos ou de baixa emissividade, cuja principal função é justamente combater os dois fatores que levam ao aumento do consumo de ar condicionado citados acima: radiação solar e troca de calor.

Esses vidros possuem custos mais elevados em relação aos vidros laminados comuns, o que exige um maior investimento inicial por parte da construtora com a justificativa de uma economia de energia operacional ao futuro proprietário. O problema é que em muitos projetos os objetivos das construtoras entram em conflito com os objetivos dos proprietários e a redução de custos almejada na etapa de construção acaba por perpetuar o uso do vidro comum.

As certificações de sustentabilidade e eficiência energética, como LEED¹¹ e BREEAM¹², possuem requisitos que atuam para romper essa dinâmica, ao exigir o uso de vidros refletivos ou determinar consumos mínimos que não podem ser obtidos com o uso do vidro comum.

O desenvolvimento do vidro fotovoltaico segue o desenvolvimento dos vidros refletivos, mas vai um passo além, ao buscar uma solução que atua tanto na redução quanto na geração de eletricidade.

3.3 Consumo de energia em edificações comerciais de escritório

O consumo de energia pelas edificações comerciais de escritório foi avaliado com base nas pesquisas existentes para o país. Nota-se que o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) possui atualmente apenas uma pesquisa mensal para os edifícios de comércio e serviços, porém focada em avaliar os resultados financeiros do setor, sem considerar as variáveis relacionadas ao consumo de energia.

O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) possui apenas um relatório para o setor de comércio em relação ao consumo de energia, porém, o mesmo data de 2005 e o relatório para edifícios de escritórios não foi publicado. Para esse tipo de

¹¹ LEED é a sigla de Leadership in Energy and Environmental Design, programa de certificação para “edifícios verdes” do U.S. Green Building Council (USGBC).

¹² BREEAM é a sigla de Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology, programa de certificação que avalia princípios de sustentabilidade em edifícios do Building Research Establishment (BRE).

edificação só é possível visualizar algumas informações divulgadas no relatório do setor comercial como um todo.

A avaliação do consumo setorial foi utilizada para calibrar os modelos das simulações e comparar os resultados obtidos com os resultados de outras pesquisas realizadas com metodologias diferentes.

3.3.1 Pesquisa sobre Consumo de Energia nos Setores de Comércio e Serviços na Cidade de São Paulo (1986)

A primeira pesquisa realizada no país com o objetivo de determinar os perfis de consumo das edificações comerciais e de serviços foi realizada por Barghini de 1986 a 1988 (Barghini et al., 1988). Os valores paramétricos encontrados foram comparados posteriormente com os resultados das simulações, de forma a se avaliar a evolução histórica do consumo de eletricidade por edificações de escritórios na cidade de São Paulo.

Nota-se que Geller (1997) possui um livro que apresenta uma estimativa do consumo por uso final das edificações comerciais brasileiras, porém, apesar dessa ser uma referência com muitas citações, não é apresentada a metodologia que permitiu a obtenção dos valores encontrados, nem uma referência da onde teriam sido retirados esses valores. Por conta disso, foi feita a opção de focar a análise apenas na pesquisa de Barghini (1988).

A pesquisa partiu dos dados do Censo de Comércio e Serviços de 1980, na época ainda realizado pelo IBGE. O consumo das edificações do grupo Escritório e Serviços Pessoais apresentou uma variação no consumo de eletricidade de 41 a 140 kWh/mês.funcionário.

A partir desse valor genérico foram realizadas auditorias energéticas em algumas edificações sorteadas, de acordo com o cadastro elétrico do município de São Paulo. No fim, removendo-se os vieses, recusas e mudanças, o consumo de 34 edifícios foi mapeado.

A pesquisa classifica os escritórios em dois tipos (1) tradicionais e (2) modernos. Os escritórios tradicionais são aqueles que apresentam tamanho reduzido, por se tratarem de setores administrativos de empresas pequenas, onde a utilização do espaço só se dá quando existem pessoas trabalhando. Já os escritórios modernos são aqueles de grande porte, com área superior a 500 m² e mais de 50 funcionários.

Considerando apenas os escritórios modernos do estrato superior a 5.000 kWh/mês – uma vez que as demais categorias apresentadas na pesquisa não se aplicam ao escopo dessa tese – a pesquisa demonstrou que na época os estabelecimentos apresentavam uma área média de 2.370 m², 144 funcionários e um consumo mensal de 20.120 kWh. Isso representa um consumo de 8,5 kWh/m².mês e 140 kWh/funcionário.mês ou 102 kWh/m².ano e 1.680 kWh/funcionário.ano.

Nesse tipo de escritório os principais sistemas consumidores de energia correspondem à iluminação e ao ar condicionado. A iluminação representa em média 36,5% do consumo total, o ar condicionado 51% e as outras cargas 12,5%.

Um aspecto interessante dos sistemas de iluminação entre os escritórios tradicionais e modernos é que nos escritórios tradicionais o fluxo luminoso era mais concentrado sobre o local de trabalho, enquanto nos escritórios modernos o sistema era pensado de forma a garantir um fluxo luminoso mínimo de 500 lux em todo o ambiente. Essa diferença é significativa na potência total necessária, sendo que para os escritórios tradicionais a potência encontrada por m² ficou em 11,8W e para os escritórios modernos, 13,0W. Em relação ao tipo de iluminação, notou-se o uso comum de lâmpadas fluorescentes expostas.

Em relação o ar condicionado, na época apenas 18% dos escritórios tradicionais possuíam esse tipo de equipamento, enquanto 100% dos escritórios modernos tinham algum tipo de condicionamento artificial. Nos modernos a potência por m² representava em média 41,2W.

Sobre as demais cargas elétricas, nos escritórios modernos a maioria dos estabelecimentos visitados possuíam equipamentos de informática e fotocopiadoras e esses representavam uma potência instalada de 10,8 W/funcionário. Também se identificou uma carga referente a equipamentos de conforto para os funcionários, como geladeiras, bebedouros, máquinas de café, entre outros. Em relação a esses equipamentos foram observados dois casos: o primeiro onde existia uma estrutura maior, com copa, ou mesmo refeitório, onde o consumo de energia chegava a representar até 10% do consumo total e um segundo caso, onde existia apenas bebedouro e máquina de café, onde o consumo representava apenas 2-3%.

Em suas conclusões a pesquisa aponta um salto de consumo entre os edifícios tradicionais e modernos e entre os diferentes estratos de consumo avaliados. Em alguns casos os valores encontrados entre as classificações chegaram a dobrar. Segundo Barghini (1988), o

motivo dessa variação reside em dois pontos: (1) concepção do projeto da edificação¹³ e (2) entropia gerada nas grandes organizações, ocasionando uma maior falta de controle individual.

3.3.2 Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso – Classe Comercial (2008)

A pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso da Classe Comercial em Alta Tensão, de autoria do PROCEL, apresenta o consumo nacional de energia elétrica para alguns setores de atividade comercial, entre os anos de 2005 e 2006 (PROCEL, 2008).

A pesquisa é dividida em 11 tipos de consumidores: (1) hotel/motel; (2) hospital/clínica; (3) shopping center; (4) supermercado/hipermercado; (5) edifício de escritórios; (6) instituições de ensino; (7) loja de varejo; (8) loja atacadista; (9) entretenimento; (10) restaurante e (11) banco. A grande maioria dos entrevistados (94,1%) pertencem ao subgrupo A4 de tensão¹⁴, sendo que 86,7 possuem demanda máxima de até 500 kW.

A pesquisa é apresentada em um relatório síntese com uma série de informações para cada setor, além de relatórios independentes para cada setor de atividade, no entanto, o setor de edifícios de escritórios não tem um relatório exclusivo publicado na página do PROCEL. O relatório foi requerido à Eletrobras, que informou que o relatório para edifícios de escritórios não foi elaborado. Por conta disso, essa revisão ficou restrita aos dados gerais disponíveis.

O relatório síntese, com informações agrupadas de todos os setores, apresenta, em seu Capítulo 3 - “Sistema elétrico e fornecimento de energia”, que os edifícios de escritórios pesquisados possuem fator de carga geral médio de 0,36. Isso significa que nesses empreendimentos a demanda máxima é muito superior à demanda média.

Em relação aos energéticos consumidos pelas edificações de escritórios (Capítulo 4), 100% dos estabelecimentos entrevistados consomem eletricidade, 18,3% consomem também óleo diesel, 8,5% consomem gás natural, 6,1% gás LP e 1,2% óleo combustível.

¹³ Aqui o autor cita particularmente dois problemas: o uso de janelas fixas que não podem ser abertas e cortinas utilizadas para barrar a radiação solar direta, forçando assim a utilização constante da iluminação e do condicionamento de ar artificiais.

¹⁴ O subgrupo de tensão A4 representa os consumidores com potências demandadas entre 2,3 e 25 kV.

Sobre os sistemas de iluminação, a grande maioria dos escritórios pesquisados apresentam potências entre 5.000 e 100.000 Watts¹⁵. Não existem dados específicos sobre os tipos de lâmpadas para escritórios, porém, para a amostra total, 72,5% utilizam lâmpadas fluorescentes tubulares e 15,8% lâmpadas fluorescentes compactas para iluminação dos ambientes internos.

Por fim, o relatório apresenta dados sobre as ações realizadas pelos escritórios pesquisados para racionalizar o consumo de energia. Apenas 7,7% dos entrevistados afirmaram ter realizado alguma ação, sendo que 35,6% não admite ter realizado qualquer medida para redução de consumo.

O relatório trata ainda sobre diversas outras variáveis, como tipo de arquitetura, equipamentos de escritório, transporte vertical, eletrotermia, sistemas de ar condicionado, entre outros, porém sempre com dados para a amostra total, o que traz pouca relevância para o tema desta tese, e de certa forma, pouca relevância para entendimento do consumo de energia no setor em geral.

Uma análise dos anexos do relatório completo permitiu a extração de mais algumas variáveis, apresentadas a seguir.

Os edifícios de escritórios entrevistados estão localizados nos subgrupos de tensão A4 (84,1%) e AS¹⁶ (15,9%), sendo que a grande maioria (70,1%) possui demanda máxima inferior a 500 kW. Isso revela que os empreendimentos visitados são pequenos em relação aos empreendimentos estudados nesse trabalho e podem ser classificados como tradicionais, pela metodologia proposta por Barghini (1988). O número de funcionários de cada escritório confirma essa hipótese, sendo que 30,1% dos entrevistados possuem menos de 30 funcionários, seguido de 36,9% com 30 a 100 funcionários.

Sobre a geração de emergência, apenas 52,4% dos escritórios responderam ter gerador, desses 11,6% admitiram acionar os equipamentos no horário de ponta para reduzir a tarifa elétrica. Em relação aos elevadores, 83,3% dos entrevistados possuem equipamentos com até 100 kW de potência, sendo que apenas 43,9% possuem elevador na edificação.

Nos anexos ainda existem informações sobre a potência dos equipamentos de escritório, porém não se define o que seriam esses equipamentos, nem sobre o que o valor total representa. Consta no anexo que a maioria dos entrevistados (49,1%) apresenta uma

¹⁵ 20,3% entre 5.001 e 10.000W; 38,0% entre 10.001 e 50.000W e 15,2% entre 50.001 e 100.000W.

¹⁶ AS representa o subgrupo com distribuição subterrânea e potência abaixo de 2,3kV.

potência de operação superior a 10.000 W, seguido de 10,5% com potências entre 5.001 e 10.000 W e 28,1% entre 1.001 e 5.000 W.

O documento também apresenta os dados sobre sistemas de aquecimento de água com eletricidade, sendo que apenas 7,3% dos escritórios entrevistados apresentam demanda para esse uso final.

Para finalizar, outro dado interessante é sobre o tempo de retorno considerado razoável para os projetos de eficiência energética, de acordo com os entrevistados. Nota-se que 25% consideram seis meses o limite razoável, 25% de seis meses a um ano e 18,8% de um a dois anos. Do total, 18,8% disseram não saber qual seria um tempo de retorno favorável. De forma prática, essa expectativa inviabiliza grande parte das opções de *retrofit*, uma vez que alterações na envoltória e nos sistemas de grande porte (como ar condicionado central) requerem investimentos maiores, com tempos de retorno maiores.

É preciso ressaltar que apesar do grande potencial, a quantidade de informações disponibilizada pelo Procel é pequena e faltam estimativas dos principais indicadores de consumo. Foi realizado um contato com o Procel para requerimento da base de dados colhida na pesquisa para cálculo dos indicadores, porém, o pedido foi negado.

3.3.3 Benchmarking de uma Empresa Imobiliária (2012)

O *benchmarking* utilizado para as análises desse item foram fornecidos por uma importante empresa internacional que atua no ramo de gestão de empreendimentos imobiliários. Por uma questão de sigilo comercial, o nome da empresa e dos empreendimentos analisados não pôde ser divulgado.

O benchmark consiste de uma planilha que a empresa utiliza para avaliar os custos de seus clientes. A planilha apresenta o consumo de energia e uma série de outras variáveis sobre edificações comerciais de escritórios. A versão disponibilizada para o estudo teve o endereço e o nome dos edifícios removidos, de forma que é impossível associar as informações disponíveis a edifícios em particular.

A planilha contém informações sobre o consumo de energia anual de 70 edificações construídas no Brasil, sendo uma no Espírito Santo, uma em Minas Gerais, uma no Paraná, três no Distrito Federal, três no Rio Grande do Sul, dezessete no Rio de Janeiro e 44 em São

Paulo. Nota-se que apenas Rio de Janeiro e São Paulo apresentam relevância estatística dentro da amostra, representando 24,3% e 62,8%, respectivamente.

Para a amostra total, o consumo de energia médio por funcionário/mês é de 199,44 kWh e o consumo de energia médio por m²/mês é de 17,58 kWh. A metragem quadrada média por funcionário é de 13,53 m², a área total média é de 25.581 m², a área útil média é de 18.198 m², o número médio de pavimentos é de 12 andares e a população média é de 1.535 pessoas fixas e 902 pessoas variáveis.

Dos setenta edifícios, 51,4% são monousuários (ocupados por apenas uma firma) e 48,6% de multiusuários. Desses, 97,1% possuem geração de emergência, 47,1% possuem ar condicionado central, 47,1% possuem central de processamento de dados (*datacenter*) e 0,03% possuem central de cogeração.

Em relação à estrutura, 35,7% possuem vedações em vidro ou pele de vidro, 40,0% vedações em alvenaria revestida de pastilhas, pedra, cerâmica ou apenas pintura, 24,3% vedações em painéis metálicos ou de concreto e apenas um edifício possui vedação em tijolo aparente.

A tabela ainda informa o tipo de vidro utilizado nas edificações: 48,6% possuem vidro reflexivo, 24,3% vidro fumê, 13,5% vidro com película, 8,1% vidro insulado e apenas 5,4% possuem beiral ou brise solar.

Apesar das médias gerais servirem para referenciar alguns valores utilizados nos modelos da simulação, a dispersão encontrada para os dados é significativa, como mostra a Figura 36. Para a construção da figura foi utilizado um gráfico de dispersão, apresentando o consumo de energia em relação à área útil dos edifícios em kWh/m². Metodologia semelhante foi proposta por Chung (2012) para *benchmarking* do consumo de energia de edificações comerciais.

Figura 36 – Consumo de energia mensal por m² em função da área das edificações

Fonte: elaboração própria a partir dos dados da Empresa Imobiliária (2012)

Nota-se que a maioria dos edifícios possui áreas entre 3.000 e 25.000 m². A reta de regressão apresenta um comportamento de crescimento progressivo leve, porém o último ponto da direita (edifício com 130.000 m²) destoa completamente dos demais. A maioria dos pontos localiza-se na faixa de consumo entre 5 e 40 kWh/m².mês, com exceção de alguns extremos, o que representa 60 a 480 kWh.m².ano. O gráfico revela que existe uma concentração de pontos para determinadas áreas, mas a variabilidade do consumo é alta, sendo difícil fazer previsões com base apenas nesses valores.

O gráfico para o consumo de energia por funcionário fixo apresentou uma dispersão ainda maior, como mostra a Figura 37.

Figura 37 – Consumo de energia mensal por funcionário fixo em função da área das edificações

Fonte: elaboração própria a partir dos dados da Empresa Imobiliária (2012)

A dispersão varia em faixas entre 50 e 1000 kWh/funcionário.mês, o que representa 600 a 12.000 kWh/funcionário.ano. A princípio três hipóteses podem ser levantadas para explicar tal dispersão: (1) muitas edificações possuem CPDs, que representam sistemas com grande consumo e baixa densidade de pessoas; (2) as edificações são usadas por atividades comerciais diferentes ou (3) o critério para definir funcionário fixo pode ter sido reportado de forma diferente por cada entrevistado, considerando que na dinâmica de uma edificação existem funcionários fixos, comuns, terceirizados, população flutuante etc.

Outro fator que pode influenciar significativamente a dispersão do consumo observada são as características climáticas das diferentes cidades onde as edificações estão instaladas. Para minimizar essa ocorrência foram analisados apenas os dados de consumo das edificações da cidade de São Paulo. Essas edificações, além de representarem a amostra maior, também foram relacionadas com as edificações simuladas na tese.

Para a cidade de São Paulo são apresentados dados de 41 edificações que atuam dentro de 10 atividades comerciais diferentes. As atividades podem ser relacionadas por semelhança, de forma que surgem cinco grupos distintos: (1) Alimentação; (2) Serviços de informação; (3) Serviços financeiros; (4) Serviços de escritório, jurídicos e de publicidade e (5) Atividades artísticas e cinematográficas.

Para as análises foram excluídos os edifícios dos grupos (1) e (5), que executam serviços diferenciados em relação aos demais, e dois edifícios que não possuem dados sobre o consumo de energia para o ano de 2012. A amostra final ficou com 34 edificações, que representam 48,6% da amostra original, sendo nove do grupo de serviços de informação, quatorze do grupo de serviços financeiros e onze do grupo de escritórios e demais atividades relacionadas.

Antes de avaliar as variáveis energéticas, foi determinada a densidade das edificações, que corresponde à divisão da área útil pela população fixa dos edifícios, a Figura 38 apresenta os valores obtidos para a amostra estudada, com a densidade de ocupação no eixo y e os edifícios no eixo x.

Figura 38 – Densidade de ocupação das edificações

Fonte: elaboração própria a partir dos dados da Empresa Imobiliária (2012)

Nota-se alguns extremos em ambos os lados do gráfico. Esses extremos representam dois tipos de edificações: *call centers* e *data centers*. O primeiro possui um período estendido de funcionamento, que vai além do período comercial típico, dessa forma, exigindo diferentes turnos de funcionários. Esses turnos não são definidos na planilha, de forma que o total de funcionários não representa o total de pessoas presentes na edificação no mesmo período. No outro oposto, os *data centers* possuem grandes áreas ocupadas por computadores e servidores, sem ocupação fixa de funcionários.

Para calcular a densidade média foi utilizada a mediana da amostra, de forma a diluir o impacto dos extremos. O resultado encontrado foi de 12 m²/funcionário.

Em relação ao consumo energético, foi primeiramente calculado o consumo de energia por m² quadrado de área útil para os diferentes grupos de atividades comerciais presentes na amostra. Os valores obtidos são apresentados no gráfico de dispersão da Figura 39.

Figura 39 – Consumo de energia mensal por m² de área útil para os diferentes grupos estudados

Fonte: elaboração própria a partir dos dados da Empresa Imobiliária (2012)

Além de uma dispersão, nota-se que os edifícios que realizam serviços financeiros possuem um consumo superior aos demais, isso ocorre devido à existência de CPDs dentro das edificações. Enquanto no grupo de serviços de informação apenas três edifícios possuem central de processamento e no grupo de serviços de escritório apenas dois possuem, no grupo de serviços financeiros onze dos quatorze edifícios possuem esse tipo de estrutura.

Considerando a amostra selecionada, 47% dos edifícios possuem CPDs com potências instaladas que variam entre 100 e mais de 500 kW. Esse é um ponto fundamental identificado na planilha de dados, que não havia aparecido nas demais pesquisas avaliadas.

O impacto das CPDs é tão representativo que inviabiliza a análise conjunta das edificações. Para avaliar apenas os edifícios com fins próprios de escritório, a amostra foi novamente dividida, porém agora em edificações com ou sem CPD. A Figura 40 e a Figura 41

apresentam a dispersão de consumo para a amostra sem CPD (19 pontos) e com CPD (15 pontos).

Figura 40 – Consumo de energia mensal por m² função da área das edificações sem CPD

Fonte: elaboração própria a partir dos dados da Empresa Imobiliária (2012)

Nota-se que o consumo de energia varia na faixa dos 3 aos 20 kWh/m².mês, o consumo médio é de 13,39 kWh/m².mês e o desvio padrão de 11,8, o que evidencia a dispersão observada. Existe um ponto extremo com consumo de 55 kWh/m².mês, que na verdade representa um medidor único de um condomínio de nove edifícios. Dividindo o consumo por nove, obtêm-se o valor de 6,11 kWh/m².mês, situado dentro da faixa observada.

Multiplicando o consumo médio mensal de 13,39 kWh/m².mês por doze meses, encontra-se um consumo médio anual de 160,68 kWh/m².ano.

Figura 41 – Consumo de energia mensal por m² função da área das edificações com CPD

Fonte: elaboração própria a partir dos dados da Empresa Imobiliária (2012)

A figura apresenta dispersão semelhante à obtida anteriormente, porém os consumos são maiores, variando em uma faixa de 5 a 60 kWh/m².mês. O consumo médio é de 31,8 kWh/m².mês com desvio padrão de 22. Novamente, observa-se um ponto extremo com mais de 85 kWh/m².mês. Um estudo particular revelou que essa edificação possui um consumo total de energia pequeno frente às demais, porém conta com uma área reduzida, apenas um ar condicionado central de 60 TR e um CPD com cargas entre 100 e 500 kW. Pelas informações é possível supor que trata-se de um edifício utilizado basicamente como central de processamento de dados, o que o enquadra fora do grupo analisado.

Multiplicando o consumo médio mensal de 31,8 kWh/m² por doze meses, encontra-se um consumo médio anual de 381,6 kWh/m².ano.

Além do impacto do CPD no consumo foi ainda estimado o impacto no consumo por m² em relação às edificações com e sem ar condicionado central. Foi obtida uma média de 39,4 kWh/m².mês para edificações com ar condicionado central e CPD, contra uma média de 20,4 kWh/m².mês para edificações sem ar condicionado central e com CPD. Para as edificações sem CPD foi obtida uma média de 17 kWh/m².mês para edifícios com ar condicionado central e uma média de 7,21 kWh/m².mês para edifícios sem ar condicionado central. Nota-se, uma média de consumo maior para os edifícios com ar condicionado central

e, mais uma vez, que a presença do CPD contribui significativamente para o aumento do consumo de energia por m^2 .

Ainda com base na planilha foi realizada uma tentativa de relacionar o consumo de energia por m^2 com o material predominante da fachada externa (alvenaria, painel de concreto ou metálico e vidro), porém, o pequeno número de edificações por tipo de material não permitiu a obtenção de valores confiáveis.

Por fim, foi calculado o Fator de Carga (FC) para a amostra, sendo o valor mínimo encontrado de 0,22 e o valor máximo de 0,82. A média para a cidade de São Paulo foi de 0,43. A Figura 42 apresenta os FC calculados, bem como a existência ou não de CPD. Nota-se que com exceção de dois pontos no lado esquerdo do gráfico, a presença das centrais de processamento tende a aumentar o FC.

Figura 42 – Fator de Carga e existência de CPD na amostra estudada

Fonte: elaboração própria a partir dos dados da Empresa Imobiliária (2012)

Apesar da grande quantidade de informação disponível, a taxa de vacância dos imóveis não consta da planilha, o que dificulta uma análise mais detalhada do consumo a partir da real ocupação dos edifícios.

3.4 Eficiência energética em edificações

Para a Organização das Nações Unidas (ONU) a eficiência energética é considerada ação prioritária para assegurar o suprimento de energia nos países em desenvolvimento e reduzir os efeitos do aquecimento global (ONU, 2007).

No Brasil o primeiro programa de eficiência energética foi iniciado em 1984, com a criação do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). Iniciado na área automotiva, o programa cresceu rapidamente para se tornar o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) existente até hoje (Inmetro, 2011). São figuras importantes no PBE o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), através da parceria Inmetro – Eletrobras, e o Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET), através da parceria Inmetro – Petrobras. O Procel trabalha para racionalizar o uso da eletricidade, enquanto o Conpet busca racionalizar o uso de derivados do petróleo e do gás natural.

O conceito de eficiência energética nasceu no ambiente industrial, onde sua utilização tinha como principal objetivo reduzir os custos de produção. Nesse ambiente, Patterson (1996, p.377) define eficiência energética como:

$$\text{Eficiência Energética} = \frac{\text{Quantidade de trabalho gerada}}{\text{Energia consumida pelo processo}}$$

Nota-se que o foco principal da equação é encontrar uma medida que relacione a quantidade gerada de trabalho pela energia consumida pelo processo. Como as unidades de ambas as variáveis são iguais, a eficiência energética é demonstrada como um índice percentual, que representa a qualidade do processo em transformar a energia.

No entanto, quando o conceito é aplicado para as edificações, algumas modificações devem ser realizadas, de forma a adaptar os termos para um ambiente onde a redução de custos não necessariamente representa o fator mais determinante. Considerando que as edificações são construções desenvolvidas pelos seres humanos para atender suas necessidades (Sturgis, 1901), é possível representar o conceito de eficiência energética como:

$$\text{Eficiência Energética} = \frac{\text{Conforto promovido pela edificação}}{\text{Energia consumida pela edificação}}$$

Na equação apresentada, o trabalho realizado por um processo não é mais o foco principal, mas sim o nível de conforto entregue aos ocupantes de uma edificação. Considerando as edificações comerciais, esse conforto é obtido, basicamente, através de 4 variáveis: (1) quantidade adequada de luz para realização das atividades profissionais; (2) temperatura ambiente dentro de uma faixa de conforto; (3) ventilação e exaustão para manutenção da qualidade interna do ar e (4) distribuição de água e remoção de efluentes.

O escopo do conceito de eficiência energética aplicado às edificações é mais complexo e subjetivo que o conceito aplicado ao ambiente industrial, uma vez que existem mais processos consumidores de energia e nem sempre as unidades utilizadas para medição se refletem realmente em um aumento da percepção de conforto, como será visto a seguir.

3.4.1 Eficiência energética em edificações comerciais de escritório

O primeiro ponto a ser considerado para a construção de um edifício mais eficiente é a elaboração de um projeto através de uma equipe multidisciplinar. O que ocorre normalmente no mercado é que a arquitetura da edificação é definida junto ao cliente e apenas depois os demais profissionais irão trabalhar sobre o projeto. Nesse modelo a discussão sobre o consumo de energia ocorre em uma fase posterior (ou nem mesmo ocorre), limitando as ações de eficiência energética a escolha de lâmpadas mais eficientes, ou equipamentos de ar condicionado com melhor classificação no PBE.

É preciso notar que uma série de fatores influencia o consumo de energia em uma edificação: (1) características climáticas da região onde a edificação será construída; (2) projeto arquitetônico em relação às condições naturais de iluminação e ventilação; (3) dispositivos de sombreamento e melhor localização das aberturas; (4) escolha dos materiais construtivos; (5) definição correta do projeto elétrico e das cargas térmicas; (6) escolha de equipamentos e sistemas de controle mais eficientes, entre outros (Lamberts, 1997, p. 24).

Dentre os fatores citados, entender a variável climática é fundamental para a elaboração de um projeto de edifício com menor consumo de energia. Muitos edifícios modernos possuem um alto grau de isolamento em relação ao ambiente externo, exigindo que

a climatização e a iluminação interiores sejam realizadas por sistemas artificiais. Essa característica aumenta o consumo de energia.

Quando utilizadas de forma correta, as variáveis climáticas podem contribuir para o nível de conforto da edificação, sem requerer o acionamento de sistemas artificiais. A radiação solar, os ventos, a temperatura e a umidade são variáveis que, quando conhecidas e utilizadas de forma correta, permitem uma redução do consumo de energia (Lamberts, 1997).

De forma resumida, o consumo de energia de uma edificação varia de acordo com suas características arquitetônicas em relação aos fatores climáticos da região onde ela está inserida e das cargas internas existentes. Nota-se ainda que o ambiente urbano também impacta o consumo de energia das edificações, uma vez que alterações do micro clima influenciam as cidades no fenômeno conhecido como “ilha de calor”. Uma série de fatores influencia para a geração desse fenômeno, entre eles um maior nível de impermeabilização do solo, um maior adensamento, uma maior absorção de calor e reflexão difusa da radiação solar, entre outros (Lengen, 1983).

3.4.2 Características arquitetônicas

A forma da edificação é o primeiro ponto a ser observado na tentativa de conciliar o conforto interno com as características macro, meso e microclimáticas¹⁷ do entorno. Esse aspecto é importante, pois de acordo com as superfícies e a orientação da construção em relação ao norte, obtêm-se diferentes comportamentos térmicos e visuais (Lamberts, 1997, p. 52).

O segundo ponto fundamental em um projeto arquitetônico deve ser a função para a qual se planeja o edifício. Um edifício de escritórios, geralmente, terá um perfil de uso e uma carga interna superior a um edifício residencial, por exemplo (Romero & Reis, 2012).

Uma vez que função e forma estejam caracterizadas a principal relação do edifício com o meio ocorre através de sua envoltória, ou seja, o fechamento que separa o ambiente externo do interno. Os fechamentos podem ser classificados em duas categorias, fechamentos

¹⁷ As características climáticas podem ser classificadas de acordo com sua amplitude. As macroclimáticas aplicam-se a regiões maiores e são mais genéricas, incidindo sobre uma área geográfica mais extensa. As características meso e microclimáticas impactam mais diretamente a edificação. O relevo, o tipo de solo e a presença de barreiras naturais ou artificiais, por exemplo, são variáveis que influenciam as condições do local de forma mais pontual.

opacos e fechamentos transparentes. Em cada tipo de fechamento, a transmissão de calor ocorre de forma diferente.

Nos fechamentos opacos a superfície externa recebe calor através dos fenômenos de radiação e convecção. A quantidade de calor absorvida e refletida varia de acordo com a cor e o tipo do material. A absorvidade avalia o quanto determinado fechamento absorverá de calor a partir da cor de sua superfície. Cores claras, por exemplo, podem absorver de 20 a 50% do calor irradiado, enquanto cores escuras podem absorver quantidades maiores, na ordem dos 70 a 90% (Lamberts, 1997, p. 57).

Além da absorvidade, a condutividade térmica dos materiais também é importante para definir o comportamento térmico de uma edificação. A condutividade térmica é definida como a capacidade de determinado material conduzir uma determinada quantidade de calor por unidade de tempo. Quanto maior a condutividade, maior será a quantidade de calor transferida pelo material. Para exemplificar essa variável, o isopor (considerado um bom isolante térmico) possui condutividade de 0,03 W/mK, enquanto o concreto possui uma condutividade de 1,50 W/mK (Lamberts, 1997, p. 58).

Os materiais também emitem calor por radiação, de acordo com a sua emissividade. Os materiais podem ser classificados de duas formas através do valor de sua emissividade: metálicos e não metálicos.

Por fim, a característica mais importante dos materiais utilizados nos fechamentos opacos é a transmitância térmica, que representa o inverso da resistência térmica total dos materiais utilizados ou, em outras palavras, a facilidade que o fechamento terá em transmitir calor. Essa característica é importante para que o arquiteto possa escolher materiais que evitem perdas excessivas de calor no inverno e evitem ganhos térmicos exagerados no verão (Lamberts, 1997, p. 62).

Em relação aos fechamentos transparentes, as transmissões por condução e convecção são semelhantes aos fechamentos opacos, já a radiação é mais intensa, uma vez que uma parcela é diretamente transmitida para o interior, de acordo com a transmissividade, a absorvidade e a refletividade do vidro. Existem uma série de tipos de vidros desenvolvidos para atender a diferentes objetivos, como por exemplo, admitir ou bloquear o calor solar, ou permitir ou bloquear o contato visual entre exterior e interior (Lamberts, 1997, p.66).

Uma das formas mais eficientes de se reduzir os ganhos térmicos pelos fechamentos transparentes é a utilização de proteções solares. As proteções internas, como cortinas e

venezianas, protegem o ambiente da radiação visível que, em excesso, pode causar ofuscamento e prejudicar a percepção de contraste, porém, não impedem a entrada do calor, favorecendo o efeito estufa interno ao ambiente. Koenigsberger et al. (1977, p. 119) calcula que a instalação de uma persiana pode reduzir o fator solar em 17%, o que representa um ganho interessante.

As proteções externas, ou dispositivos de sombreamento, representam elementos arquitetônicos construídos na envoltória, que permitem reduzir a radiação direta sem prejudicar a iluminação natural. Existem diferentes tipos de proteções, como os brises solares (verticais e horizontais), prateleiras de luz e grelhas (Koenigsberger et al., 1977, p. 127-131). Um dos aspectos que reduz a utilização dessas estruturas é a intervenção na fachada do edifício, que altera a linguagem arquitetônica muitas vezes pretendida pelo cliente ou arquiteto. Também podem ser utilizadas outras soluções arquitetônicas para aumentar a iluminação natural, como aberturas zenitais e indiretas (Lamberts, 1997, p. 71).

A principal variável para a avaliação do potencial de transmissão de calor pelos vidros é o fator solar, calculado por dois componentes: (1) a transmissividade média do vidro, que determina o quanto de calor é transferido por radiação e (2) a transmitividade térmica do vidro, que determina o quanto de calor é transferido por convecção. O primeiro componente representa a maior parte do fator solar, sendo que vidros simples transparentes podem chegar a um fator solar de 0,87¹⁸, enquanto vidros reflexivos apresentam fatores solares entre 0,26 e 0,37 (Dutra, 1994).

3.4.3 Cargas internas

As cargas internas de uma edificação variam de acordo com a função do edifício, das características arquitetônicas de sua construção, dos perfis de uso dos seus habitantes e das características das atividades executadas, dos equipamentos existentes e dos sistemas em uso (Romero & Reis, 2012).

Os perfis de uso variam de acordo com a função da edificação - que determina seus horários de uso - com o período do dia - que determina quais sistemas terão um uso maior - e a estação do ano - que determina as necessidades térmicas. Os perfis de uso podem ser

¹⁸ O valor do fator solar informa o quanto é transmitido pelo vidro em percentual do calor total disponível no ambiente externo.

obtidos em normas que definem padrões de simulação, ou através de pesquisas estatísticas do uso de cada tipo de edifício.

As atividades executadas determinam qual a emissão de calor de cada habitante da edificação em função de sua atividade física. Quanto maior a atividade física, maior a quantidade de calor emitida pelo metabolismo. O corpo de um ser humano em repouso, por exemplo, emite cerca de 60 W (desses, 75% são calor sensível e 25% calor latente), durante a prática de atividades físicas esse valor pode aumentar consideravelmente, chegando a até 500W. (Callaghan, 1978, p. 46).

Já os equipamentos e sistemas em uso terão suas emissões de calor determinadas por uma série de fatores, como tipo do equipamento, eficiência, potência instalada, entre outros.

Os sistemas de iluminação artificial permitem a ocupação e uso das edificações em perfis diferentes daqueles possíveis antes da invenção da eletricidade. A eficiência das lâmpadas é determinada através da emissão luminosa (em lúmens) pelo consumo de energia elétrica (em Watts); de forma geral, quanto menor a emissão luminosa por unidade de energia, maior a emissão de calor. Existem diversos tipos de lâmpadas, como incandescentes, de descarga gasosa e de diodos emissores de luz (LED). Um ponto importante é que não apenas o tipo de lâmpada definirá a eficiência do sistema de iluminação, uma vez que o tipo de luminária e os mecanismos de controle e automação também são componentes importantes para determinar o consumo de energia.

Os sistemas de climatização artificial permitem a manutenção do nível de conforto da edificação independente das condições climáticas do ambiente externo. Basicamente, os sistemas são divididos em ventilação mecânica, resfriamento e aquecimento. A ventilação mecânica pode ser utilizada em exaustores¹⁹ e ventiladores²⁰, de acordo com as necessidades de projeto. Apesar de apresentar um custo menor, nem sempre a ventilação mecânica é suficiente para garantir os níveis de conforto de uma edificação.

Os sistemas de resfriamento artificiais estão disponíveis em diferentes tecnologias: ar condicionado de janela, *split*, *self contained* e *chillers* centrais elétricos ou de absorção. Basicamente podem-se dividir os tipos de equipamentos de acordo com o local onde ocorre a condensação do fluido refrigerante. Em equipamentos menores a condensação ocorre no próprio ambiente, ou nas proximidades do ambiente em que se deseja refrigerar. Já em

¹⁹ Para remover o ar quente ou poluído do interior do ambiente.

²⁰ Para circular o ar aumentando a sensação de conforto dos ocupantes durante estações ou dias quentes.

sistemas maiores, a condensação ocorre em uma central de condicionamento e a água gelada, fluido refrigerado ou ar resfriado é posteriormente distribuído para os diferentes ambientes por dutos ou encanamentos.

Por fim, as cargas térmicas internas podem ainda ser geradas por outros equipamentos elétricos e transformadores de voltagem, que geram calor, seja por ineficiência, seja por suas características tecnológicas próprias. Esses equipamentos variam de acordo com a função do edifício e as necessidades de seus habitantes, sendo necessário um levantamento particular para determinar suas potências e perfis de uso. Para a simulação energética utilizam-se valores médios que consideram uma carga elétrica por pessoa ou por metragem quadrada.

Destacam-se ainda outros sistemas como aquecimento de água, geração de vapor, motores elétricos (bombas, elevadores, máquinas, etc.), congelamento e resfriamento, equipamentos médicos e demais sistemas particulares a cada tipo de edificação com uso específico, como hospitais, hotéis, lavanderias, centros comerciais e assim por diante.

3.4.4 Arquitetura bioclimática

A arquitetura bioclimática busca incorporar estratégias de iluminação e condicionamento naturais à realidade das edificações, de forma a equilibrar a necessidade e o uso de sistemas naturais e artificiais, dentro de uma lógica que compreenda os aspectos climáticos, construtivos, humanos e financeiros das alternativas existentes (Lamberts, 1997 & Romero, 1988). Goldemberg em 1983 já ressaltava o potencial da arquitetura bioclimática para economia do consumo de energia para climatização, de forma a aliviar o sistema de geração e distribuição de eletricidade do país (Goldemberg, 1983).

Entre o ser humano e o ambiente ocorrem trocas térmicas constantes, sendo que diversos modelos foram desenvolvidos para estabelecer escalas de conforto que incorporem a flexibilidade humana em relação às características do meio físico (Romero, 1988). Lamberts (1997) realizou testes com os modelos existentes para averiguar quais mais se aproximam da realidade climática brasileira e identificou o uso das cartas bioclimáticas de Givoni (1992) como o mais adequado.

Através do estudo da carta bioclimática, aplicado a uma determinada região, é possível avaliar qual ou quais estratégias de climatização são mais indicadas. A carta apresenta

diversas estratégias que relacionam conforto com a temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido e umidade do ar. Existem *softwares* que geram as cartas bioclimáticas com base nos arquivos climáticos. Utilizando o *software* Climate Consultant, versão 5.5 (University of California, 2014), foi obtida a carta bioclimática para a cidade de São Paulo, apresentada na Figura 43.

Figura 43 – Carta bioclimática para a cidade de São Paulo

Fonte: University of California (2014)

Os pontos verdes indicam cada hora do ano e apresentam um maior volume nas zonas 1, 2, 4, 8 e 9. Isso significa que ao longo do ano 32,3% das horas são consideradas confortáveis (zona 1), enquanto 67,7% requerem alguma ação de condicionamento. Das horas que requerem condicionamento, 50,7% podem ser alcançadas apenas com a geração de calor pelas cargas internas da edificação (zona 9); 15,2% podem ser alcançadas com sombreamento das janelas (zona 2); 11,4% podem ser alcançadas com ventilação mecânica (zona 8) e 8,9% podem ser alcançadas com acumulo de massa térmica no interior da edificação (zona 4). Destaca-se ainda que apenas 0,2% das horas requerem resfriamento artificial (zona 15).

Lamberts et al. (1997) comenta que os resultados obtidos podem apresentar distorções por conta das estações meteorológicas estarem localizadas em aeroportos, onde o efeito “ilha

de calor” é reduzido em relação ao ambiente urbano. Segundo o autor, no ambiente urbano a necessidade por aquecimento seria menor e a necessidade por ventilação maior.

Nota-se também que a carta bioclimática aplica-se a todas as horas do ano. Para edifícios comerciais, a carta precisa ser adaptada, devido aos horários de uso das edificações. Por serem utilizados basicamente durante o dia os escritórios apresentam uma necessidade por resfriamento maior, como mostra a Figura 44.

Figura 44 – Carta bioclimática para a cidade de São Paulo em horário comercial ²¹

Fonte: University of California (2014)

Na carta bioclimática adaptada para as edificações de escritórios, o aquecimento não é mais tão relevante quanto averiguado antes. Em 43,6% das horas é possível obter conforto sem nenhuma ação de condicionamento (zona 1). Nas demais horas, em 34,0% pode ser obtido conforto com os ganhos internos (zona 9); em 30,3% evitado um ganho solar desnecessário com sombreamento das janelas (zona 2); em 17,4% a temperatura pode ser balanceada com um acúmulo de massa térmica no interior do edifício (zona 4) e em 16,8% o uso da ventilação mecânica seria suficiente (zona 8).

²¹ Considerou-se como horário comercial o período das 8h00 às 19h00, de forma a contemplar um período estendido maior para os escritórios em relação a outras edificações comerciais de varejo, por exemplo.

Como dito anteriormente, o ar condicionado artificial não aparece como opção relevante dentro da realidade climática da cidade (sendo necessário em apenas 0,4% das horas comerciais ao longo do ano). Seu uso se torna intenso na medida em que as edificações passam a gerar e armazenar uma grande quantidade de calor em seus interiores, seja por conta de escolhas arquitetônicas não adaptadas ao clima, seja pela carga interna gerada pela crescente quantidade de equipamentos necessários a realização das funções comerciais.

Para aumentar a eficiência nessas edificações existe uma série de opções, que não devem considerar apenas um aumento de eficiência dos equipamentos em si. Para a iluminação devem ser pensados o tipo de lâmpada e o tipo de luminária, as possíveis contribuições da luz natural e dos sistemas de controle e automação, bem como a escolha do próprio sistema, que pode ser direcionado para o trabalho, como o sistema de iluminação por tarefa (Lengen, 1983).

Em relação ao ar condicionado, devem ser reduzidas as transmitâncias térmicas das paredes e da cobertura, utilizadas proteções solares nas aberturas, usadas cores claras nas fachadas, bem como o emprego da ventilação cruzada e/ou vertical sempre que possível. Além disso, a eficiência do sistema e do(s) *chiller(s)* é importante, bem como o correto isolamento dos dutos, a manutenção preventiva e o ajuste da temperatura do termostato dentro de um limite razoável (Lamberts et al., 1997).

4 ANÁLISE TÉCNICA

Com base na metodologia adotada foram simuladas as diferentes tipologias construtivas, o que resultou em uma série de dados e planilhas de consumo. A apresentação dos resultados é dividida em quatro itens: (1) consumo de eletricidade; (2) geração fotovoltaica; (3) análise do impacto na iluminação natural e (4) análise do sombreamento do entorno. Ao fim do capítulo são feitas discussões sobre os resultados.

Basicamente a alteração do vidro da fachada gera uma reação em cadeia que se reflete em uma série de variáveis que influenciam o consumo de energia e água da edificação. A Figura 45 apresenta todas as variáveis consideradas no estudo e seus respectivos impactos, tanto para a análise técnica, quanto para a análise financeira.

Figura 45 – Variáveis consideradas para análise do impacto da tecnologia BIPV na edificação

Fonte: elaboração própria

4.1 Consumo de eletricidade

O consumo total para as edificações simuladas considera o consumo anual de eletricidade do edifício dividido por seus diferentes usos finais, bem como dividido pela metragem quadrada de área condicionada e população fixa²² que ocupa as áreas internas.

Os resultados das simulações gerados pelo EnergyPlus estão disponíveis para consulta no Apêndice A.

4.1.1 Consumo de eletricidade pelas diferentes tipologias de edifícios

4.1.1.1 Tipologia tradicional

O consumo total de eletricidade do modelo simulado foi de 5.022.905,9 kWh/ano, enquanto o consumo total de água pelo ar condicionado foi de 8.350,9 m³/ano. O consumo por m² de área condicionada ficou em 179,3 kWh/m².ano e pela população fixa ficou em 1.537,0 kWh/funcionário.ano.

O gráfico do consumo por usos finais para os sistemas de iluminação, ar condicionado, ventilação e consumo por equipamentos elétricos é apresentado na Figura 46.

Figura 46 - Consumo por uso final da tipologia tradicional

Fonte: elaboração própria

²² Por população fixa entendem-se os funcionários que trabalham na edificação, desconsiderando a população variável que pode visitar o edifício durante o horário comercial.

O consumo do ar condicionado é o que possui a maior representatividade com 33%, seguido dos equipamentos elétricos com 32%, da iluminação com 28% e da ventilação com 7%.

4.1.1.2 Tipologia de transição

O consumo total de eletricidade do modelo simulado foi de 5.397.399,7 kWh/ano, enquanto o consumo total de água pelo ar condicionado foi de 9.982,5 m³/ano. O consumo por m² de área condicionada ficou em 192,7 kWh/m².ano e pela população fixa ficou em 1651,6 kWh/funcionário.ano.

O gráfico do consumo por usos finais para os sistemas de iluminação, ar condicionado, ventilação e consumo por equipamentos elétricos é apresentado na Figura 47.

Figura 47 - Consumo por uso final da tipologia de transição

Fonte: elaboração própria

O consumo do ar condicionado é o que possui a maior representatividade com 36%, seguido dos equipamentos elétricos com 30%, da iluminação com 26% e da ventilação com 8%. Nota-se um aumento do percentual de participação do ar condicionado e ventilação em relação à tipologia tradicional.

4.1.1.3 Tipologia contemporânea

O consumo total de eletricidade do modelo simulado foi de 6.113.277,7 kWh/ano, enquanto o consumo total de água pelo ar condicionado foi de 12,822,0 m³/ano. O consumo por m² de área condicionada ficou em 218,2 kWh/m².ano e pela população fixa ficou em 1.870,6 kWh/m².ano.

O gráfico do consumo por usos finais para os sistemas de iluminação, ar condicionado, ventilação e consumo por equipamentos elétricos é apresentado na Figura 48.

Figura 48 - Consumo por uso final da tipologia contemporânea

Fonte: elaboração própria

O consumo do ar condicionado é o que possui a maior representatividade com 42%, seguido dos equipamentos elétricos com 27%, da iluminação com 23% e da ventilação com 8%. Nota-se que nessa tipologia o consumo do ar condicionado e da ventilação passa a representar 50% do consumo total de eletricidade, diferentemente das tipologias tradicional e de transição onde esse consumo foi de 40% e 44%, respectivamente.

Como essa tipologia é a que mais se aproxima dos edifícios estudados pelo CBCS na cidade de São Paulo, os indicadores de consumo por m² foram comparados com dados medidos para validar o modelo. Na Tabela 6 apresenta-se o consumo simulado para a tipologia contemporânea juntamente a dados reais de consumo de cinco edifícios de escritórios corporativos.

Tabela 6 – Indicadores de consumo da tipologia contemporânea comparados com dados reais de cinco edifícios de escritórios corporativos da cidade de São Paulo

Edifício	Indicador de consumo (kWh/m ² .ano)
Tipologia contemporânea (simulação)	218,2
Edifício 01 (valores medidos)	221,9
Edifício 02 (valores medidos)	244,5
Edifício 03 (valores medidos)	246,1
Edifício 04 (valores medidos)	232,6
Edifício 05 (valores medidos)*	151,8

*O edifício 05 foi entregue em 2013 e ainda possui taxa de vacância superior aos demais edifícios da tabela.

Fonte: elaboração própria a partir de CBCS (2015)

Nota-se que o valor simulado para o indicador da tipologia contemporânea está bem próximo da média dos cinco edifícios (219,4 kWh/m².ano), porém um pouco abaixo da mediana (232,6 kWh/m².ano), que reduz o impacto do consumo inferior do edifício 05, devido a sua menor ocupação. Dessa forma, a margem de erro em relação à mediana é de 6,2%.

Em relação à curva de carga da tipologia contemporânea, foi comparada a curva simulada com a curva medida de um dos edifícios da Tabela 6, de forma a validar os perfis de uso da edificação. Os resultados para as duas curvas são apresentados na Figura 49 e na Figura 50.

Figura 49 – Curva de carga simulada da tipologia contemporânea na cidade de São Paulo

Fonte: elaboração própria

Figura 50 – Curva de carga real de um edifício comercial corporativo na cidade de São Paulo

Fonte: CBCS, 2015

A curva de carga real foi medida através de um medidor central instalado no transformador de entrada do edifício e monitorado pelo *software* WebEnergy. Nota-se que o consumo noturno do edifício é elevado, representando mais de 30% da carga total, o que não é considerado comum para edificações desse tipo.

Independente da carga noturna expressiva, é possível observar na comparação das duas imagens que o perfil de uso da tipologia simulada aproxima-se de um edifício real, com consumo elevando-se abruptamente às 7h00, atingindo o pico matinal às 10h00, sofrendo uma pequena queda no horário de almoço, subindo novamente no período da tarde e caindo no final do dia entre às 17h00 e 19h00. No período noturno as cargas se reduzem e mantêm-se constantes entre às 21h00 e 05h00.

4.1.1.4 Tipologia contemporânea: vidro insulado

O consumo total de eletricidade do modelo simulado foi de 5.344.567,1 kWh/ano, enquanto o consumo total de água pelo ar condicionado foi de 9.543,4 m³/ano. O consumo por m² de área condicionada ficou em 190,8 kWh/m².ano e pela população fixa ficou em 1.635,4 kWh/funcionário.ano.

O gráfico do consumo por usos finais para os sistemas de iluminação, ar condicionado, ventilação e consumo por equipamentos elétricos é apresentado na Figura 51.

Figura 51 - Consumo por uso final da tipologia contemporânea com vidro insulado

Fonte: elaboração própria

O consumo do ar condicionado é o que possui a maior representatividade com 36%, seguido dos equipamentos elétricos com 31%, da iluminação com 26% e da ventilação com 7%. Nota-se uma redução do percentual do ar condicionado e da ventilação para 43%, valor mais próximo à tipologia de transição.

4.1.1.5 Tipologia contemporânea: vidro refletivo

O consumo total de eletricidade do modelo simulado foi de 5.347.045,4 kWh/ano, enquanto o consumo total de água pelo ar condicionado foi de 9.189,6 m³/ano. O consumo por m² de área condicionada ficou em 190,9 kWh/m².ano e pela população fixa ficou em 1.636,2 kWh/funcionário.ano.

O gráfico do consumo por usos finais para os sistemas de iluminação, ar condicionado, ventilação e consumo por equipamentos elétricos é apresentado na Figura 52.

Figura 52 - Consumo por uso final da tipologia contemporânea com vidro refletivo

Fonte: elaboração própria

O consumo do ar condicionado é o que possui a maior representatividade com 35%, seguido dos equipamentos elétricos com 31%, da iluminação com 26% e da ventilação com 8%. Nota-se uma que o percentual do ar condicionado e da ventilação manteve-se em 43%, valor igual ao percentual da tipologia contemporânea com vidro insulado, demonstrando que o resultado dos dois tipos de tecnologias é semelhante para o clima da cidade de São Paulo.

4.1.1.6 Tipologia BIPV

De forma a permitir uma comparação com as demais tipologias, os resultados aqui apresentados para a tipologia BIPV desconsideram a geração fotovoltaica pelas fachadas e pela cobertura, a geração será discutida no Item 4.2.

O consumo total de eletricidade do modelo simulado foi de 5.390.763,1 kWh/ano, enquanto o consumo total de água pelo ar condicionado foi de 9.329,5 m³/ano. O consumo por m² de área condicionada ficou em 192,5 kWh/m².ano e pela população fixa ficou em 1.649,6 kWh/funcionário.ano.

O gráfico do consumo por usos finais para os sistemas de iluminação, ar condicionado, ventilação e consumo por equipamentos elétricos é apresentado na Figura 53.

Figura 53 - Consumo por uso final da tipologia BIPV

Fonte: elaboração própria

O consumo do ar condicionado é o que possui a maior representatividade com 36%, seguido dos equipamentos elétricos com 30%, da iluminação com 26% e da ventilação com 8%. O percentual de consumo do ar condicionado e da ventilação somados ficou em 44%, mesmo valor da tipologia de transição.

4.1.1.7 Tipologia contemporânea: vidro verde com ventilação natural

De forma a avaliar se a ventilação natural poderia ser uma alternativa viável para reduzir o consumo de energia da edificação contemporânea na cidade de São Paulo, foi simulada a mesma tipologia contemporânea com vidro verde, porém sem sistema de ar condicionado e com abertura de 20% da área envidraçada total das janelas sempre que a temperatura interna é superior a 21 °C.

Para a análise foram avaliadas às 24 horas de um dia quente de verão com incidência de vento (no arquivo climático representado pelo dia 15 de janeiro de 2002, uma terça-feira comum). Os principais resultados para a simulação são apresentados na Figura 54.

Figura 54 – Principais resultados da simulação do edifício contemporâneo com vidro verde e ventilação natural (dia quente)

Fonte: elaboração própria

O primeiro gráfico da Figura 54 revela que as temperaturas de conforto internas (linha verde) estão sempre acima das temperaturas do ar externa (linha azul escura) e que esse comportamento se mantém ao longo de todas as horas do dia. Isso indica que as cargas de calor internas não estão sendo dissipadas de forma efetiva, o que pode contribuir para uma sensação de desconforto dos ocupantes.

O segundo gráfico indica que a radiação solar (linha amarela) é a maior fonte de calor interno dos ambientes, muito acima das demais cargas (iluminação, equipamentos e ocupação), que mal podem ser diferenciadas na figura. O gráfico ainda revela que existe uma retirada de calor do ambiente promovida pelo ar externo (linha verde clara), porém em quantidade inferior aos ganhos.

Por fim, o último gráfico mostra a quantidade de trocas de ar interno ocorrendo por hora (linha roxa), devido à ventilação natural e a infiltração de ar por frestas e aberturas.

Nota-se que a linha está sempre acima da média de quatro trocas de ar por hora e em alguns momentos atinge picos de mais de 10 trocas. Essa informação revela que a ventilação natural está ocorrendo de forma constante e em uma faixa de valor significativa.

De forma a realizar mais uma análise sobre o potencial da ventilação natural foi realizada uma simulação com as mesmas premissas, porém para o edifício BIPV. O objetivo foi avaliar como se comportam as temperaturas internas em um ambiente com uma menor influência da radiação solar, os resultados são apresentados na Figura 55.

Figura 55 – Principais resultados da simulação do edifício BIPV com ventilação natural (dia quente)

Fonte: elaboração própria

Os resultados obtidos para o edifício BIPV são semelhantes aos obtidos para o edifício contemporâneo com vidro verde. Apesar da radiação solar (linha amarela no segundo gráfico) no ambiente interno ter se reduzido em quase 75% e as trocas de ar por hora (linha roxa no terceiro gráfico) terem se mantido constantes, a temperatura interna (linha verde do primeiro gráfico) ainda se manteve acima da temperatura do ar externo (linha azul escura do primeiro gráfico) ao longo do dia, mesmo que com um delta menor quando comparada com o edifício contemporâneo com vidro verde.

A análise das simulações dos dois edifícios revela, portanto, que a ventilação natural não é uma alternativa para garantir o conforto interno da edificação sem o uso do ar

condicionado no edifício contemporâneo com vidro verde e BIPV. Apesar disso, os valores de trocas de ar observados sugerem um potencial que poderia ser aproveitado por sistemas mistos de condicionamento (que utilizam tanto a ventilação natural, quanto sistemas de ar condicionado), bem como por sistemas de condicionamento noturno, que aproveitam o ar mais frio da madrugada para retirar parte da carga térmica acumulada nos materiais.

4.1.1.8 Comparativo geral das tipologias construtivas

A partir das simulações e dos resultados anteriores foi elaborada a Figura 56 com o consumo de eletricidade pela área condicionada de todas as tipologias construtivas estudadas.

Figura 56 – Consumo anual de eletricidade pela área condicionado para as diferentes tipologias estudadas

Fonte: elaboração própria

A edificação com tipologia tradicional é que apresenta o menor consumo por área condicionada (179,3 kWh/m²), enquanto a edificação contemporânea apresenta o maior (218,2 kWh/m²). Nota-se que o consumo das tipologias com vidro insulado, vidro refletivo e BIPV ficou abaixo da tipologia de transição, apesar da maior RJP.

É importante ressaltar que a geração de eletricidade pelos módulos fotovoltaicos nas fachadas ainda não foi considerada nesse resultado, o que reduzirá o consumo da tipologia BIPV em relação às demais tipologias estudadas. Apenas de forma demonstrativa, a geração

de eletricidade por fonte fotovoltaica – descrita no Item 4.2.2 – foi inserida como uma coluna verde na Figura 56, contribuindo para uma redução de 7,0 kWh/m².ano. Essa geração faria com que a tipologia BIPV apresentasse o segundo menor consumo entre todas as tipologias, com 185,5 kWh/m².ano.

Como descrito na metodologia, foram adotados os mesmos valores de potência e uso para os equipamentos elétricos e sistema de iluminação, de forma a avaliar apenas o impacto da arquitetura na evolução do consumo de eletricidade. É possível observar pelos resultados das tipologias tradicional, de transição e contemporânea, que as decisões arquitetônicas influenciaram diretamente o consumo de eletricidade dos edifícios, que com o passar dos anos tornaram-se mais dependentes do sistema de ar condicionado.

Comparando os resultados de Barghini (1988) com os resultados das simulações, nota-se que o consumo por m² registrado nos edifícios comerciais de escritórios na década de 1980 - de 102 kWh/m².ano - cresceu 214% até atingir 218,2 kWh/m².ano na tipologia contemporânea simulada.

Quando a tipologia de transição é comparada, uma vez que essa tipologia é mais representativa à realidade da época estudada por Barghini (1988), ainda assim é possível notar um aumento no consumo de 189%, passando de 102 kWh/m².ano para 192,7 kWh/m².ano.

No entanto, quando o indicador de consumo pela população fixa é comparado, os resultados encontrados são bem diferentes. Enquanto o consumo identificado por Barghini (1988) para os edifícios comerciais de escritórios foi de 1.680 kWh/funcionário.ano, para a tipologia de transição simulada esse valor caiu para 1.651,6 kWh/funcionário.ano e para a tipologia contemporânea subiu para 1.870,6 kWh/funcionário.ano.

Dois fatores explicam o fenômeno observado: (1) a carga de equipamentos elétricos cresceu exponencialmente, passando de 10,8 W/funcionário (Barghini, 1988) para 180 W/funcionário e (2) a população fixa aumentou, o que explica o indicador de consumo por funcionário se manter praticamente constante, apesar do expressivo aumento do indicador de consumo por m².

A Figura 57 apresenta uma foto do departamento de vendas de um escritório comercial de um grande grupo do setor da construção, tirada no início da década de 80. Nota-se a quase ausência de equipamentos elétricos, reduzidos a uma calculadora elétrica, e o espaçamento entre as mesas de trabalho dos funcionários.

Figura 57 – Mesa de um funcionário do departamento de vendas de uma empresa do setor da construção no início da década de 80

Fonte: acervo do autor

Já na Figura 58 é apresentado um escritório comercial de escritórios em foto tirada em 2014, onde é possível observar a maior densidade ocupacional devido à proximidade das estações de trabalho, bem como a maior quantidade de equipamentos elétricos disponíveis para cada funcionário.

Figura 58 – Estações de trabalho em um edifício comercial de escritórios tirada no ano de 2014

Fonte: acervo do autor

Por fim, quando os valores de consumo da tipologia contemporânea são comparados com o Benchmarking de uma empresa imobiliária realizado em 2012 (Item 4.3.3), os resultados encontrados são semelhantes aos valores da simulação da tipologia contemporânea, com um consumo de 210,9 kWh/m².ano e 2393,3 kWh/funcionário.ano, para a amostra total de 70 edifícios.

4.1.2 Consumo de eletricidade e água pelo ar condicionado

O consumo específico de eletricidade e água pelo sistema de ar condicionado e ventilação é apresentado na Tabela 7 para as diferentes tipologias estudadas.

Tabela 7 – Consumo anual de eletricidade e água pelo ar condicionado para as diferentes tipologias

Tipologia	Consumo para resfriamento e ventilação* (kWh/m².ano)	Aumento no consumo de eletricidade (%)	Consumo de água** (m³/ano)	Aumento no consumo de água (%)
Tradicional	71,2	(referência)	8.350,9	(referência)
Transição	84,5	+18,8%	9.982,5	+19,5%
Contemporânea	110,1	+54,7%	12.822,0	+53,5%
Contemporânea: vidro insulado	82,7	+16,1%	9.543,4	+14,3%
Contemporânea: vidro refletivo	82,7	+16,3%	9.189,6	+10,0%
BIPV	84,3	+18,5%	9.329,5	+11,7%

*Considera o consumo dos *chillers*, bombas, torres de resfriamento, *fan coils* e VAVs

**Considera apenas o consumo de água pelas torres de resfriamento do sistema de ar condicionado

Fonte: elaboração própria

O consumo do edifício tradicional é o menor entre todas as tipologias analisadas, o que demonstra que a RJP e a transmitância térmica das vedações são variáveis determinantes no consumo de energia do ar condicionado. Por representar o menor consumo esse edifício foi adotado como referência.

O segundo menor consumo estimado é do edifício contemporâneo com vidro insulado, seguido do vidro refletivo e do BIPV. Os resultados indicam que as tecnologias de vidro insulado e de vidro refletivo apresentam resultados semelhantes para o consumo de energia e água, apesar dos fabricantes indicarem que o vidro insulado tem um desempenho superior. Caso o aquecimento artificial dos ambientes interiores fosse necessário, o vidro insulado seria mais indicado, porém a necessidade por aquecimento não foi identificada na cidade de São Paulo para esse tipo de edifício comercial de escritórios.

Tanto o aumento no consumo de eletricidade, como o aumento no consumo de água pela tipologia BIPV estão próximos às tipologias de vidro insulado e vidro refletivo (18,5%; 16,1% e 15,3%, respectivamente para o consumo de eletricidade e 11,7%; 14,3% e 10% para o consumo de água), mostrando que a tecnologia fotovoltaica se equipara aos vidros especiais.

Já o consumo de eletricidade e água da tipologia contemporânea se mostrou muito superior às demais tipologias (54,7% superior à referência para o consumo de eletricidade e 53,5% para o consumo de água), mostrando que o vidro verde (representante da tecnologia de vidro colorido sem tratamento solar, que possui variâncias nas cores azul e cinza) não é adequado para vedação total de fachadas em climas e edificações que necessitam do uso do ar condicionado para climatização interior.

Apesar de não ter relação direta com os resultados comparativos entre as diferentes tipologias, o consumo de eletricidade e água foi simulado com diferentes faixas de temperatura de conforto interno para a tipologia contemporânea, de forma a avaliar como as decisões internas dos ocupantes, além das características arquitetônicas, também podem impactar o consumo anual.

A Tabela 8 apresenta o consumo anual de eletricidade e água quando quatro diferentes temperaturas de conforto são utilizadas na tipologia contemporânea para configuração (*set point*) do ar condicionado: 24 °C, 23 °C, 22 °C e 21 °C.

Tabela 8 - Consumo anual de eletricidade e água pelo ar condicionado para a tipologia contemporânea a partir de diferentes temperaturas de conforto

Temperatura interna de conforto	Consumo do ar condicionado e ventilação* (kWh/m².ano)	Aumento no consumo de eletricidade (%)	Consumo de água** (m³/ano)	Aumento no consumo de água (%)
24 °C	110,1	(referência)	12.822,0	(referência)
23 °C	118,6	+7,7%	13.872,8	+8,2%
22 °C	127,7	+16,0%	14.970,8	+16,8%
21 °C	137,8	+25,2%	16.116,0	+25,7%

*Considera o consumo dos *chillers*, bombas, torres de resfriamento, *fan coils* e VAVs

**Considera apenas o consumo de água pelas torres de resfriamento do sistema de ar condicionado

Fonte: elaboração própria

Nota-se que para cada grau de resfriamento reduzido na temperatura de conforto interna o consumo de eletricidade e água aumenta. Entre a temperatura de 24 °C, considerada como referência, e a temperatura de 21 °C, foi registrado um aumento de 25,2% no consumo de eletricidade e 25,7% no consumo de água.

O aumento registrado demonstra que as decisões dos usuários podem influenciar diretamente o consumo de energia e água do edifício.

4.1.3 Capacidade do sistema de climatização

A arquitetura e os sistemas adotados em um edifício não influenciam apenas no consumo de eletricidade e água, mas também na potência do sistema de ar condicionado. A potência dos equipamentos deve levar em conta uma série de variáveis, como orientação, zona bioclimática, humidade, temperatura ambiente, radiação solar, propriedades térmicas dos materiais construtivos, cargas internas, entre outras (ABNT, 2008).

O dimensionamento da potência deve levar em conta a carga máxima do edifício em um dia típico de verão – para o sistema de resfriamento – e um dia típico de inverno – para o sistema de aquecimento (ABNT, 2008).

Existem diferentes metodologias e programas computacionais de simulação para determinar a potência necessária do ar condicionado. Para os resultados apresentados a seguir foi utilizado o módulo *cooling design* do DesignBuilder (versão 4), que utiliza o EnergyPlus (versão 8.1) para dimensionar a potência a partir de uma semana típica de verão e inverno.

As potências estimadas para resfriamento das diferentes tipologias estudadas é apresentada na Figura 59, considerando o *setpoint* de 24 °C adotado na metodologia. Não foi identificada a necessidade por aquecimento nesses edifícios na cidade de São Paulo.

Figura 59 – Potência do ar condicionado dimensionada para as diferentes tipologias estudadas

Fonte: elaboração própria

A potência estimada na Figura 59 considera tanto a potência dos equipamentos de resfriamento (*chillers*), quanto a potência do sistema de ventilação (*fan coils*).

Nota-se que a tipologia tradicional requer a menor potência instalada (3010,7 kW ou 856,1 TR), seguida da tipologia contemporânea com vidro insulado (3231,3 kW ou 918,8 TR), da tipologia contemporânea com vidro refletivo (3404,3 kW ou 968 TR), da tipologia BIPV (3465,81 ou 985,5 TR), da tipologia de transição (3530,2 ou 1003,8) e, finalmente, da tipologia contemporânea (4223,5 ou 1200,9).

A diferença entre a tipologia com menor necessidade de potência para resfriamento (tradicional) para a tipologia com maior necessidade (contemporânea) é de 40,3%, enquanto para as demais tipologias essa relação variou entre 7,3% (contemporânea com vidro insulado) e 17,3% (de transição).

Uma menor necessidade de potência do ar condicionado significa equipamentos, dutos e tubulações menores, reduzindo tanto o custo de instalação e manutenção, quanto o investimento inicial necessário para aquisição do sistema.

4.1.4 Consumo de eletricidade com uso de diferentes arquivos climáticos

Em relação ao consumo de eletricidade e água das diferentes tipologias, ainda foi realizada uma última comparação dos valores a partir da utilização de diferentes arquivos climáticos disponíveis para a cidade de São Paulo. O objetivo dessa análise foi entender o impacto que a escolha dos arquivos climáticos pode ter nos resultados finais da simulação.

Para a comparação foi simulada apenas a tipologia contemporânea com quatro arquivos climáticos: (1) SWERA (DOE, 2014); (2) IWEC (DOE, 2014); (3) TRY (LabEEE, 2005) e (4) INMET (Roriz, 2012).

Os resultados da simulação, levando em conta apenas o consumo de eletricidade e água (sem geração fotovoltaica) são apresentados na Tabela 9. Como referência para comparação foi utilizado o arquivo SWERA, utilizado nas demais simulações desse capítulo.

Tabela 9 – Resultados das simulações da tipologia contemporânea com quatro arquivos climáticos disponíveis para a cidade de São Paulo

Arquivo climático	Consumo do ar condicionado e ventilação* (kWh/m ² .ano)	Variação no consumo de eletricidade (%)	Consumo de água** (m ³ /ano)	Variação no consumo de água (%)
SWERA	110,1	(referência)	12.822,0	(referência)
IWEC	103,6	-5,9%	11.607,0	-9,5%
TRY	101,8	-7,5%	10.423,2	-18,7%
INMET	96,6	-12,2%	10.755,9	-16,1%

*Considera o consumo dos *chillers*, bombas, torres de resfriamento, *fan coils* e VAVs

**Considera apenas o consumo de água pelas torres de resfriamento do sistema de ar condicionado

Fonte: elaboração própria

Nota-se uma variação significativa nos resultados dos diferentes arquivos climáticos, tanto no consumo de eletricidade, quanto no consumo de água pelo ar condicionado. Tanto para o consumo de eletricidade, quanto para o consumo de água, a variação observada entre a referência (ASHRAE) e o arquivo com base nos dados do INMET (menos 12,2% e 16,1%, respectivamente) podem definir a viabilidade ou não de um projeto.

As diferenças ocorrem devido principalmente aos valores de radiação solar. Os dados do arquivo do INMET, por exemplo, são derivados de estações automáticas instaladas em diferentes cidades do país e monitoradas pelo Instituto Nacional de Metrologia (INMET). Nesse arquivo, os níveis de irradiâncias e iluminâncias foram corrigidos, uma vez que originalmente a radiação foi publicada apenas como média mensal em kJ/m^2 (Roriz, 2012).

A Tabela 10 apresenta a média anual da radiação solar global, de forma a ilustrar o observado, comparando também a média do potencial solar divulgado pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito – CRECESB (2015).

Tabela 10 – Valores de radiação solar global média por ano nos diferentes arquivos climáticos

Arquivo climático	Radiação solar global média por ano ($\text{Wh/m}^2\text{.ano}$)	Variação (%)
SWERA	4.603,2	(referência)
IWEC	4.199,3	-8,8%
TRY	5.126,9	+11,4%
INMET	4.027,0	-12,5%
CRECESB	3.960,0	-14,0%

Fonte: elaboração própria

Nota-se que o arquivo INMET apresenta um valor 12,5% menor para a radiação solar global quando comparado com o arquivo SWERA. Já o arquivo TRY apresenta valor 11,4% maior, apesar de seu consumo ter sido menor que a referência (Tabela 10).

Outro fator que explica as diferenças entre os valores simulados para cada arquivo climático é a quantidade de anos disponíveis na amostragem. Enquanto os arquivos SWERA e IWECC possuem 12 anos de amostragem, os arquivos TRY e INMET possuem apenas 1.

A discussão sobre qual arquivo climático deve ser utilizado para simulação não é recente, porém ganhou novo ânimo com o crescimento de programas de certificações como o LEED, onde um edifício pode ou não receber o selo a partir do nível de consumo apresentado em uma simulação.

Crawley (1998) apresenta a origem histórica das principais metodologias utilizadas para desenvolvimento de arquivos climáticos, como a WYEC2 da ASHRAE, TMY do NREL, CWEC da WATSUN e CTZ da CEC e explica como diferentes formas de cálculo evoluíram, principalmente para tornar a estimativa da radiação solar mais fidedigna.

De acordo com o autor o arquivo TRY (Test Reference Year) foi um dos primeiros a ser desenvolvidos e continha informações sobre temperaturas de bulbo seco e úmido, ponto de orvalho, velocidade e direção dos ventos, pressão barométrica, umidade relativa e tipo de cobertura por nuvens. A partir da cobertura por nuvens o valor da radiação solar era estimado, gerando uma série de distorções nos valores finais. Crawley (1998) ainda comenta que arquivos desse tipo, com apenas um ano em sua amostra, devem ser evitados nas simulações, devido à falta de confiabilidade nos resultados finais. Outro tipo de arquivo climático com apenas um ano é apresentado no formato TMY (Typical Meteorological Year), onde as condições climáticas de diferentes anos são compiladas em valores médios para apenas um, caracterizado assim de ano típico.

Apesar do desenvolvimento dos arquivos climáticos datar do início da década de 1980, uma grande limitação histórica foi a falta de dados para países além dos EUA, Canadá e Europa. Apenas em 2001, com a publicação dos arquivos SWERA e IWECC, a quantidade de informação disponível para outros países começou a aumentar (DOE, 2015).

O arquivo IWECC (International Weather for Energy Calculations) é derivado da base de dados DATSAV3 do National Climatic Data Center (NCDC), localizado nos EUA. A base de dados DATSAV3 foi criada a partir do processamento de observações da superfície terrestre realizadas por satélite. No entanto, as informações de radiação solar também derivam

de estimativas adicionais realizadas a partir da cobertura de nuvens. O desenvolvimento do arquivo IWECC é de responsabilidade da ASHRAE (DOE, 2015).

Por fim, o arquivo SWERA é de responsabilidade do programa de mesmo nome, chamado de Solar and Wind Resource Assessment. Iniciado em 2001 o programa tem como objetivo prover uma base de dados confiável para a análise de viabilidade de projetos de geração renovável, tanto solares, quanto eólicos. Para a radiação solar no Brasil, dado crítico nos arquivos climáticos; existem três bases de dados com diferentes resoluções: Alta resolução - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE); Resolução moderada - NREL e baixa resolução - National Aeronautics and Space Administration (NASA). Atualmente o projeto é coordenado pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL), também localizado nos EUA (SWERA, 2015).

É importante ressaltar que ainda não existe no mundo um consenso sobre a utilização e a qualidade dos arquivos climáticos disponíveis para simulação. Como identificado nos resultados obtidos para a tipologia contemporânea, alterações significativas podem ocorrer entre os diferentes arquivos, o que sugere a importância da normatização dessas informações, seja para padronizar os dados, seja para classificar os arquivos por um índice de qualidade.

Para o presente trabalho, a utilização do arquivo SWERA foi preferida, uma vez que apresenta uma amostragem de doze anos em sua base de dados e possui dados de radiação solar mais adequados para estudos de geração renovável.

4.2 Geração fotovoltaica

Como descrito na metodologia, a geração de eletricidade pelo vidro fotovoltaico instalado nas fachadas foi simulada no PVsyst (versão 6.3.8). De forma a calcular os principais indicadores de geração e comparar os resultados, foi simulada também a geração por painéis instalados na cobertura.

De acordo com os dados do projeto de benchmarking de edifícios de escritórios corporativos do CBCS, nos edifícios em torre modernos, o espaço para instalação de painéis na cobertura é limitado, uma vez que a área para a geração solar compete com outros usos considerados de maior prioridade, como heliponto, antenas de transmissão/celular e casas de máquinas. Dessa forma, a geração da cobertura é estimada apenas como referência

comparativa e não como solução prática para reduzir o consumo das edificações desse tipo e porte.

Para a simulação foi utilizada a opção *Project Design* no PVsyst, que permite estimar todas as perdas existentes no sistema, tais como perdas por temperatura da placa, desgaste do material ao longo dos anos, efeito ôhmico, eficiência dos inversores, entre outras. Todas as perdas consideradas são apresentadas na Figura 60, gerada pelo PVsyst.

Figura 60 - Perdas consideradas pelo PVsyst na simulação da geração fotovoltaica

Fonte: PVSyst, 2015

Todos os relatórios emitidos pelo PVsyst podem ser consultados na íntegra no Apêndice B.

4.2.1 Geração de eletricidade pela cobertura

Para a cidade de São Paulo a simulação da geração de eletricidade a partir de painéis policristalinos instalados na cobertura, com potência total de 238,0 kWp (equivale a 1.080 painéis), gerou 298.178,0 kWh/ano. Considerando a área total de painéis de 1.600,0 m², a geração por m² é de 186,4 kWh/m².ano, enquanto a geração média por kWp instalado é de 1.252,8 kWh/kWp.ano.

Para a simulação foi considerada uma ligação em paralelo entre fileiras de 15 painéis em série com inclinação de 20 graus e orientação para o Norte. Foram utilizados dois inversores com 100 kW de potência cada, com eficiência de 96%.

A Figura 61 apresenta a curva de geração para um dia de céu limpo.

Figura 61 – Geração fotovoltaica na cobertura em um dia de céu limpo

Fonte: PVsyst, 2015

Nota-se que, como esperado, em um dia sem nuvens a geração fotovoltaica atinge pouco mais de 200 kWp entre às 10h e 14h, iniciando às 6h00 da manhã e finalizando aproximadamente às 18h30 da tarde.

Em relação à média mensal de geração, nota-se uma uniformidade entre os diferentes meses do ano, porém, com os meses de janeiro, fevereiro, agosto, novembro e dezembro apresentando médias superiores aos demais, como mostra a Figura 62.

Figura 62 – Média de geração mensal dos painéis instalados na cobertura

Fonte: PVsyst, 2015

4.2.2 Geração de eletricidade pelas fachadas

Para a cidade de São Paulo a simulação de vidros fotovoltaicos instalados nas fachadas, com potência total instalada de 355,6 kWp gerou 194.876,0 kWh/ano. Considerando a área total de vidro fotovoltaico de 6.688,4 m², a geração por m² é de 29,1 kWh/m².ano, enquanto a geração média por kWp instalado é de 548,0 kWh/kWp.ano.

Nota-se que esses resultados não consideram a diferença de geração a partir da orientação de cada fachada. Quando essa variável é considerada os resultados por fachada são diferentes, como mostra a Figura 63 com os valores de kWh/kWp para as quatro fachadas e a cobertura.

Figura 63 – Geração anual por kWp instalado entre as diferentes fachadas e a cobertura

Fonte: elaboração própria

Todas as fachadas apresentaram uma geração inferior à cobertura, o que já era esperado, em função do ângulo dos vidros fotovoltaicos em relação ao ângulo dos painéis instalados na cobertura e em função das eficiências do módulo do vidro de silício amorfo e o módulo da cobertura de silício policristalino.

Apesar disso, é possível observar que a fachada sul apresenta uma geração duas vezes inferior à fachada norte, enquanto as fachadas leste e oeste, apesar de apresentarem média inferior à fachada norte, estão acima da média geral de 548,0 kWh/kWp que considera todas as fachadas.

Em relação à geração por m^2 de painéis instalados, os resultados entre as fachadas são semelhantes, porém a diferença entre a geração pelas fachadas e pela cobertura é ainda mais significativa, como apresenta a Figura 64.

Figura 64 – Geração anual por m² de painéis instalados entre as diferentes fachadas e a cobertura

Fonte: elaboração própria

Apesar da diferença significativa entre a geração pela cobertura e as fachadas, esse valor na prática tem pouca representatividade, uma vez que a área disponível nas fachadas é muito superior à área disponível na cobertura, bem como a geração pelas fachadas não compete com outros usos do espaço.

Em relação à geração nas fachadas em função das horas do dia, a Figura 65 apresenta os resultados em kWh/m².h para um dia de céu limpo.

Figura 65 – Geração fotovoltaica nas fachadas pelas horas do dia em um dia de céu limpo

Fonte: elaboração própria

A geração na fachada norte segue a mesma dinâmica da geração na cobertura, atingindo o pico de geração entre às 10h e 14h. Já os picos de geração das fachadas leste e oeste se alteram em função do caminho do sol no céu, enquanto o pico na fachada leste ocorre entre às 9h e 10h da manhã, na fachada oeste o pico ocorre entre às 16h e 17h.

O pico de geração da fachada sul é semelhante ao da fachada norte, porém em valores muito mais reduzidos.

Essa informação revela que a fachada oeste tem um potencial extra de reduzir a demanda do edifício nos horários da tarde, quando os picos de demanda da rede têm ocorrido no verão com cada vez mais frequência, devido ao aumento da quantidade de equipamentos de ar condicionado instalados no país (Vettorazzo, 2014).

4.2.3 Geração frente ao consumo de eletricidade

De forma a entender como se comporta a geração fotovoltaica pelas fachadas frente ao consumo de eletricidade da edificação como um todo, foi considerado o consumo da tipologia BIPV. A Figura 66 apresenta a curva de carga e a geração fotovoltaica para um dia comercial típico em um dia quente do verão, quando o edifício apresenta seu maior pico de consumo (1,88 kW).

Figura 66 - Curva de carga e geração fotovoltaica para um dia comercial típico no verão

Fonte: elaboração própria

Nota-se que a eletricidade gerada é consumida pela edificação e representa uma fração do consumo do edifício. Isso significa que toda a eletricidade gerada será consumida pelos próprios sistemas prediais, sem injetar eletricidade na rede de distribuição. A princípio, isso poderia evitar perdas nos transformadores, uma vez que a saída em baixa tensão não requer a transformação para média tensão, tipo de conexão dos edifícios desse porte, atendidos pelos contratos do Grupo A²³. No entanto, é necessário avaliar também a geração frente ao consumo em dias comerciais de inverno, bem como em dias sem ocupação.

A Figura 67 apresenta a geração fotovoltaica frente ao consumo em um dia comercial típico de inverno.

Figura 67 - Curva de carga e geração fotovoltaica para um dia comercial típico no inverno

Fonte: elaboração própria

Comparando o consumo do dia típico de verão e inverno é possível notar que tanto o pico de consumo, quanto o perfil da curva de carga sofreram alterações. Enquanto no verão a curva de carga apresenta um consumo crescente pela manhã que se equipara ao consumo da tarde, no inverno o crescimento do consumo ocorre ao longo do dia, atingindo seu pico por volta das 15h. Em relação ao pico de consumo, nota-se uma redução de 22,3%, entre 1,88 kW no verão para 1,46 kW no inverno.

²³ Os edifícios de escritórios corporativos do tipo estudado possuem contrato no Grupo A nas modalidades A3a e A4. A modalidade A3a é aplicada para potências entre 30 kV e 44 kV, já a modalidade A4 atende as potências entre 2,3 e 25 kW (AES Eletropaulo, 2015b).

Independente das mudanças observadas, a geração fotovoltaica permanece como uma fração do consumo, não ocorrendo injeção na rede de distribuição em nenhum momento do dia.

Para analisar a possibilidade de injeção na rede foram analisados ainda a curva de carga e a geração em um dia de baixa ocupação (domingo), tanto no verão, quanto no inverno. A Figura 68 apresenta os resultados para o verão.

Figura 68 - Curva de carga e geração fotovoltaica para um dia de baixa ocupação no verão

Fonte: elaboração própria

Mesmo em um dia de baixa ocupação, as cargas em *stand by* dos equipamentos, bem como as cargas dos equipamentos e ar condicionado da central de processamento de dados, apresentam um consumo superior à geração fotovoltaica. Enquanto a geração atingiu um pico de 121,2 kW, o consumo nunca esteve abaixo de 147,1 kW.

No inverno o mesmo fenômeno foi observado, apesar das cargas internas serem menores, como mostra a Figura 69.

Figura 69 - Curva de carga e geração fotovoltaica para um dia de baixa ocupação no inverno

Fonte: elaboração própria

Apesar da menor potência consumida, 131,7 kW no inverno, contra 147,1 kW no verão, em nenhum momento ocorre injeção de eletricidade na rede pelo sistema de geração fotovoltaica, o que demonstra que as perdas de eletricidade pela eficiência dos transformadores podem ser desconsideradas.

Em termos contratuais, a partir dos requisitos da Regulamentação Normativa 482 da ANEEL (ANEEL, 2012), que regulamenta a microgeração no país, os resultados indicam que não haverá creditação na conta de eletricidade do edifício, o que significa que não serão descontados os impostos como ICMS, PIS e COFINS. Apesar de alguns estados, como São Paulo, terem abolido a cobrança do ICMS para microgeração fotovoltaica, a cobrança de PIS e COFINS ainda ocorre.

4.3 Análise do impacto na iluminação natural

Além do impacto da tecnologia BIPV no consumo do ar condicionado e na geração de eletricidade, foi ainda estimado o impacto na iluminação natural dos ambientes. Para tanto, como descrito na metodologia, foi utilizado o módulo de *Daylighting* do software DesignBuilder.

Foram comparadas apenas duas tipologias, a contemporânea (adotada como referência) e a BIPV. A Figura 70 apresenta o potencial de iluminação natural de um pavimento tipo da tipologia contemporânea, expresso em uma escala de lux que varia entre 0 lux (mínimo) até 3374 lux (máximo).

É importante ressaltar que os valores da escala de lux não representam números observados em um edifício construído, sendo utilizados apenas para comparar diferentes soluções de fachadas e aberturas.

Figura 70 – Resultados do modelo de daylighting para o pavimento tipo da tipologia contemporânea

Fonte: DesignBuilder, 2015

Os resultados obtidos variam entre 111,7 lux (mínimo) até 3.373,6 lux (máximo). Sendo que a maior concentração de luz ocorre nos arredores das fachadas, reduzindo-se gradualmente até o núcleo do pavimento tipo, onde estão localizados os elevadores e as salas técnicas. Os ambientes do núcleo aparecem com cor branca, uma vez que não foram desenhadas aberturas para esses ambientes, atendidos totalmente por fontes artificiais de iluminação.

Nos resultados também é possível observar picos elevados de luz natural nos cantos das fachadas, representados pela coloração vermelha. Esses picos causam ofuscamento aos ocupantes do edifício, sendo normalmente reduzidos pela instalação de persianas internas.

Os resultados obtidos para o modelo *daylighting* da tipologia BIPV são apresentados na Figura 71.

Figura 71 – Resultados do modelo de daylighting para o pavimento tipo da tipologia BIPV

Fonte: DesignBuilder, 2015

Os resultados demonstram uma redução no potencial de iluminação natural, em relação à tipologia contemporânea, variando entre 64,7 lux (mínimo) até 2.423,2 lux (máximo). É possível observar que próximo ao núcleo do pavimento tipo existem manchas de coloração escura, que não foram observadas na tipologia contemporânea. Essas manchas indicam uma menor penetração da luz, uma vez que parte da radiação solar está sendo absorvida no processo fotovoltaico.

Nos arredores das fachadas, no entanto, os resultados indicam que ainda existe uma faixa de iluminação natural com potencial de aproveitamento. Esse aproveitamento pode ocorrer tanto pela instalação de interruptores separados, quanto pela instalação de sensores de dimerização nas luminárias das fileiras próximas às janelas. Diferentemente do modelo da tipologia contemporânea, não foram observados pontos de ofuscamento no pavimento tipo da tipologia BIPV.

Considerando os resultados dos dois modelos, nota-se uma redução de 28,2% no potencial de iluminação natural entre as tipologias contemporânea e BIPV. Essa redução, no

entanto, é mais notável nas regiões próximas ao núcleo do pavimento tipo, onde normalmente ficam os corredores de circulação atendidos por iluminação artificial.

4.4 Análise do sombreamento do entorno na geração

Com objetivo de entender como o sombreamento do entorno pode impactar a geração fotovoltaica nas fachadas, foram elaborados diferentes modelos a partir da orientação dos três principais eixos de ocupação comercial em São Paulo: (1) eixo da Av. Paulista; (2) eixo da Marginal Pinheiros e (3) eixo da Av. Faria Lima. Como apresentado na metodologia, foi considerado espaçamento de 50 metros entre os edifícios localizados de cada lado das avenidas, 20 metros entre os quarteirões demarcados pelas ruas transversais e 10 metros entre edifícios no mesmo quarteirão.

A altura adotada para os edifícios do entorno foi à mesma, de forma a permitir uma base de comparação comum às quatro fachadas. Os edifícios do entorno foram desenhados no *software* DesignBuilder como estruturas de sombreamento com propriedades reflexivas do concreto, o que reduz a radiação solar difusa, quando comparado com outros materiais, como o vidro.

Os resultados obtidos para a geração com uso do *software* EnergyPlus diferem dos resultados obtidos pelo PVsyst, considerados mais fidedignos. A versão utilizada do EnergyPlus (versão 8.1) ainda não é capaz de simular vidros fotovoltaicos; dessa forma o modelo desenvolvido considera a geração nas fachadas como painéis fotovoltaicos comuns, porém com as variáveis de eficiência alteradas manualmente para os valores dos vidros. Essa adaptação permite comparar a variação percentual de geração entre os modelos, assim demonstrando o impacto do sombreamento, porém, não é considerada suficiente para avaliar a tecnologia em si.

Os resultados para as simulações dos três eixos de ocupação são apresentados na Tabela 11. Para cada eixo foi simulado o posicionamento do edifício em um lado da avenida, de acordo com a orientação. Um edifício posicionado no lado sul terá sua fachada norte com maior exposição ao sol, já um edifício posicionado no lado leste, terá sua fachada oeste com maior exposição.

Tabela 11 – Resultados das simulações do sombreamento do entorno nos três principais eixos de ocupação de edifícios de escritórios corporativos da cidade de São Paulo

Eixo de ocupação	Orientação (ângulo em relação ao Norte)	Geração fotovoltaica (kWh/ano)		Variação percentual
		Sem sombreamento	Com sombreamento	
Av. Paulista - lado sul	45°	234.150,0	161.160,0	-31,2%
Av. Paulista - lado norte			115.801,8	-50,5%
Av. Faria Lima - lado sul	70°	231.813,8	159.545,5	-31,2%
Av. Faria Lima - lado norte			120.437,2	-48,0%
Marginal Pinheiros - lado leste	125°	190.827,6	139.685,1	-26,8%
Marginal Pinheiros - lado oeste			141.281,0	-26,0%

Fonte: elaboração própria

Pela análise dos resultados é possível observar que o impacto do sombreamento é considerável na geração fotovoltaica, variando entre uma redução de 26% (melhor caso) a 50,5% (pior caso). Também é possível notar que a orientação da fachada voltada para a avenida (que possui maior exposição ao sol) é determinante para a redução da geração de eletricidade. Enquanto nas Av. Paulista e Av. Faria Lima o impacto entre os lados das avenidas é mais significativo entre os modelos, uma vez que a geração na fachada sul é menor, na orientação Leste – Oeste (Marginal Pinheiros), a posição do edifício em relação ao lado da avenida pode ser desconsiderada.

Pela tabela também é possível comparar como a geração varia a partir da orientação, sem levar em conta o sombreamento do entorno. Enquanto o ângulo de 45 graus da Av. Paulista proporcionou a maior geração (234.150,0 kWh/ano), o ângulo de 125 graus da Marginal Pinheiros gerou apenas 190.827,6, uma redução de 18,5%.

Esses resultados sugerem que o sombreamento é um fator importante a ser considerado, porém não limita completamente a adoção da tecnologia BIPV em ambientes urbanos de densa ocupação, demonstrando que existem oportunidades de aproveitamento da

tecnologia nas fachadas norte dos eixos de ocupação da Av. Paulista e Av. Faria Lima, bem como nas fachadas leste e oeste do eixo de ocupação da Marginal Pinheiros.

De forma a complementar os resultados foram ainda simulados mais quatro modelos, considerando ângulos de orientação em relação ao Norte padronizados (sem considerar a orientação de eixos de ocupação particulares). Os resultados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados das simulações do sombreamento do entorno para diferentes orientações

Fachada com maior exposição ao sol	Orientação (ângulo em relação ao Norte)	Geração fotovoltaica (kWh/ano)		Variação percentual
		Sem sombreamento	Com sombreamento	
Norte	0°	202.725,4	155.851,9	-23,1%
Leste	90°		153.449,0	-24,3%
Sul	180°		117.338,4	-42,1%
Oeste	270°		125.000,2	-38,2%

Fonte: elaboração própria

Novamente é possível observar que o sombreamento do entorno tem impacto significativo na geração fotovoltaica, reduzindo em 23,1% a geração no modelo com maior exposição ao sol na fachada norte (melhor caso) e em 42,1% no modelo com maior exposição ao sol na fachada sul (pior caso).

Em relação às diferenças de geração entre as fachadas com maior exposição, nota-se que as fachadas norte e leste sofrem menor impacto (23,1% e 24,3%, respectivamente), quando comparadas com as fachadas oeste e sul (38,2% e 42,1%). Esses resultados reforçam a importância de se considerar a orientação da fachada com maior exposição ao sol no momento de analisar a viabilidade da adoção do vidro fotovoltaico.

4.6 Discussão sobre os resultados

A comparação do consumo de eletricidade a partir do desenvolvimento histórico da arquitetura das edificações comerciais corporativas revelou que uma maior RJP, associada a uma redução da transmitância térmica das vedações, levou a uma maior exposição dos ambientes internos dos edifícios às condições climáticas exteriores.

De forma a manter o conforto interno dos ocupantes, ao menos em relação à temperatura do ar, essa maior exposição foi compensada com um aumento no consumo de eletricidade pelo ar condicionado, como é possível notar no consumo por metro quadrado entre a tipologia tradicional (71,2 kWh/m².ano) e a tipologia contemporânea (110,1 kWh/m².ano).

Esse aumento de consumo vem representando uma oportunidade para o desenvolvimento de novos materiais, o que para os vidros em específico levou ao desenvolvimento comercial do chamado vidro de baixa emissividade, do vidro refletivo e do próprio vidro fotovoltaico. Ainda que, essas tecnologias aumentem o custo de produção, ao possuir um valor agregado maior por m². Esse valor é compensando com a economia de eletricidade que o emprego da tecnologia proporciona ao longo da vida útil do edifício.

Seguindo a mesma lógica de reprodução do capital observada no mundo, no Brasil o mercado de construção de edifícios de escritórios corporativos passou a se profissionalizar no início da década de 1990, com aumento de intensidade a partir de 2005, quando diversas construtoras de grande porte, tradicionalmente familiares, iniciaram um movimento de abertura de capital. Nesse movimento os edifícios de escritórios corporativos passaram a assumir cada vez mais uma função de produto, com desenvolvimento de projeto guiado pela lógica do retorno sobre o investimento, do que pela lógica da construção eficiente ou sustentável (Guerreiro, 2012).

Na prática, o que ocorreu no país foi à adoção em massa dos vidros tingidos, dos quais o vidro verde adotado na tipologia contemporânea faz parte. Esse tipo de vidro apresenta um menor custo, sendo, portanto, preferido pelas construtoras, orientadas pelo objetivo de manter sua lucratividade em um ambiente financeiro aberto e de alta volatilidade. Nessa dinâmica os custos com o condicionamento interno do edifício acabam em segundo plano, uma vez que serão assumidos apenas pelos locatários futuros.

Por conta das particularidades climáticas do Brasil, que na maior parte de sua extensão territorial requer apenas resfriamento, ao contrário de países onde o frio é uma questão central (o que força a utilização de soluções de fechamento mais complexas, como as janelas com vidros duplos ou triplos), a cultura do mercado construtivo em relação ao tipo de vidro limitou-se às características de resistência do material. A norma da ABNT que trata sobre as especificações mínimas dos vidros a serem utilizados em edifícios altos (NBR 7199) data do ano de 1989 e não foi revisada desde então. A norma define apenas a espessura que o vidro deve possuir, de forma a suportar determinadas pressões dinâmicas dos ventos, a partir de coeficientes de segurança. A norma não faz menção alguma às propriedades térmicas ou acústicas dos vidros (ABNT, 1989).

Diante dessa realidade o uso do vidro fotovoltaico, ou mesmo do vidro refletivo, fica limitada aos empreendimentos submetidos a normas internacionais, como aqueles certificados pelo selo LEED, que de alguma forma apresentam uma restrição maior aos tipos de materiais passíveis de serem instalados.

Em relação à utilização do vidro fotovoltaico na dinâmica do consumo de eletricidade pelo edifício, foi demonstrado nos resultados que a redução da carga térmica interna é significativa, reduzindo o consumo do sistema de ar condicionado como um todo, considerando não apenas o equipamento resfriador em si (*chiller*), como também os equipamentos de ventilação e rejeição de calor.

Diferentemente de outros estudos que trataram do impacto da geração fotovoltaica nas fachadas de edifícios (Miyazaki et al., 2005; Chow et al., 2007; Fung & Yang, 2008; Didoné & Wagner, 2013; Ng et al., 2013; Oliviera et al., 2014), a metodologia empregada permitiu realizar uma análise mais ampla, considerando também o consumo de água pelo equipamento de ar condicionado, bem como o dimensionamento da potência dos equipamentos em si, demonstrando que tanto o vidro refletivo, quanto o vidro fotovoltaico, permitem obter ganhos adicionais, além da redução do custo operacional com energia. A tipologia BIPV apresenta uma economia com água de 27,2% ao ano, bem como atende ao nível de conforto interno dos ocupantes com equipamentos de ar condicionado 17,9% menores, quando comparada com a tipologia contemporânea.

Ao analisar a redução no consumo ocasionada pelo vidro fotovoltaico (tipologia BIPV) em relação ao vidro verde (tipologia contemporânea), é possível observar que a maior parte é ocasionada pela redução do consumo de eletricidade pelo ar condicionado (25,8 kWh/m².ano ou 11,8% do consumo total da tipologia contemporânea), seguido pela geração

fotovoltaica ($7 \text{ kWh/m}^2\text{.ano}$ ou 3,2%). Independente de sua origem, a redução no consumo total gerado pela tipologia BIPV é de 15% em relação à tipologia contemporânea, o que representa um potencial interessante para a tecnologia como medida de eficiência energética.

Apenas de forma comparativa, um estudo de eficiência energética desenvolvido pelo autor para um edifício corporativo no Rio de Janeiro (cujo nome não pode ser citado por razões contratuais), apresentou uma redução de 1,9% no consumo total simulado com instalação de película térmica nos vidros das fachadas; 2% com instalação de janela dupla com vidro refletivo, 4,5% com *retrofit* dos equipamentos de ar condicionado e 16,7% com troca de todas as lâmpadas internas por lâmpadas LED.

Em razão do caráter mais geral do estudo, no entanto, não foram simuladas alterações na forma do edifício, com outras relações entre fator de forma e fator de altura, bem como entre área de laje e altura do pé direito, que podem alterar os resultados obtidos. Essas questões, relacionadas com os resultados para o estudo de sombreamento, demonstram que o uso da geração fotovoltaica é sensível a diversas variáveis, como desenho, orientação e características do entorno, o que indica que o emprego da tecnologia está condicionado à simulação e análise de cada projeto específico, inviabilizando sua adoção em massa para toda e qualquer edificação.

5 ANÁLISE FINANCEIRA

Primeiramente foi analisada a vedação externa proposta na metodologia para a tipologia BIPV: duas faixas de vidro fotovoltaico nas áreas inferiores e superiores das janelas, com uma faixa de 1,5 m de altura de vidro refletivo no meio.

Para análise da solução foram considerados os valores de mercado levantados com os principais fornecedores brasileiros, bem como as tarifas vigentes em setembro de 2015. Todos os custos, retornos e variáveis consideradas são apresentados abaixo.

5.1 Tarifas de eletricidade e água

Para a cidade de São Paulo foram consideradas as tarifas de eletricidade da AES Eletropaulo reajustadas em 30 de junho de 2015 pela Resolução n.º 1.920 da ANEEL. Foi considerado o subgrupo A4 com tarifa horária verde, que corresponde a potências instaladas de 2,3 a 25 kV.

Sobre os valores das tarifas foram aplicados os percentuais de três impostos, com as seguintes incidências: (1) PIS/PASEP: 1,04%; COFINS: 4,81% e ICMS: 18%. Os impostos foram calculados “por dentro”, ou seja, fazem parte da sua própria base de cálculo, incidindo assim sobre o total faturado. A metodologia de cálculo e os valores dos impostos foram obtidos a partir de AES Eletropaulo (2015a).

Como a partir de 2015 ocorre à cobrança adicional da bandeira tarifária – dividida em verde, amarela e vermelha, de acordo com os custos de geração – foi considerada a cobrança da bandeira vermelha para todo o período analisado de 25 anos, correspondente ao período que o fornecedor dos módulos fotovoltaicos oferece como garantia. Os reajustes anuais da eletricidade com base na inflação para os anos futuros foram ignorados, sendo a tarifa mantida constante para todo o período. De forma comparativa para as discussões finais sobre os resultados, foi também estimado o retorno de investimento com adoção da bandeira verde.

Os valores com impostos das tarifas de consumo de eletricidade e demanda contratada são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Tarifas da AES Eletropaulo adotadas na análise financeira com impostos

Tarifa	Valor
Energia fora de ponta com bandeira verde	0,3929 R\$/kWh
Energia fora de ponta com bandeira vermelha	0,4641 R\$/kWh
Demanda contratada (ponta e fora de ponta)	10,0168 R\$/kW contratado

Fonte: AES Eletropaulo, 2015a & 2015b

Apesar das curvas de geração fotovoltaicas apresentadas no Item 4.2.3 demonstrarem que em alguns períodos do ano o sistema fotovoltaico produzirá também eletricidade no horário de ponta da concessionária elétrica (quando a tarifa cobrada por kWh é maior), essa contribuição foi desprezada, uma vez que representa um valor mínimo ao ano, sendo assim aplicada a tarifa do horário fora de ponta para todo o período analisado.

Além da tarifa de eletricidade foi também considerada a redução de custos a partir do consumo de água pelo sistema de rejeição de calor do ar condicionado. Foi adotada a tarifa da SABESP para uso comercial com cobrança de PIS/COFINS “por dentro”, com incidência de 7,3%. Foi considerada a última revisão da concessionária divulgada em junho de 2014 (SABESP, 2014). As cobranças de multas vigentes no ano de 2015 foram ignoradas, uma vez que correspondem a um período de crise hídrica que pode não se repetir no futuro. Os valores são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Tarifas da SABESP adotadas na análise financeira com impostos

Tarifa	Valor
Água	14,99 R\$/m ³
Esgoto	14,99 R\$/m ³

Fonte: SABESP, 2014

Os valores adotados para as tarifas de eletricidade e água são os oficiais divulgados pelas concessionárias; possíveis descontos concedidos a diferentes clientes através de contratos particulares não foram considerados.

Como visto no Item 4.2.3, em nenhum momento do ano o sistema fotovoltaico instalado nas fachadas injeta eletricidade na rede; dessa forma, foi considerado o valor integral da tarifa de consumo de eletricidade para cálculo do retorno financeiro da geração, sem desconto de eventuais taxas e impostos adicionais.

5.2 Custos dos vidros e componentes do sistema FV e ar condicionado

Os custos dos vidros e componentes do sistema fotovoltaico e ar condicionado foram levantados com os principais fornecedores brasileiros, através de solicitação de orçamento ao departamento comercial. Foram considerados os valores com impostos no Brasil, o que considera as taxas de importação incidentes sobre os componentes do sistema FV.

Os custos de instalação e entrega dos vidros, seja dos vidros comuns e refletivo, seja do vidro fotovoltaico, foram assumidos como constantes para todas as tecnologias e dessa forma ignorados, uma vez que dependem diretamente de especificidades de projeto, que não puderam ser orçadas.

Os custos foram orçados por unidade de área ou de potência instalada. Para os vidros foram obtidos valores em R\$/m², para o sistema fotovoltaico em R\$/kWp instalado e para o ar condicionado em R\$/TR instalada.

Os custos foram levantados entre o período de fevereiro e setembro de 2015 e são apresentados na Tabela 16.

Tabela 15 – Custos dos vidros e componentes do sistema FV e ar condicionado

Material / Componente	Custo
Vidro laminado verde com 8 mm de espessura	180,00 R\$/m ²
Vidro laminado refletivo com 8 mm de espessura	240,00 R\$/m ²
Vidro fotovoltaico com 10% de transparência e 8 mm de espessura	541,53 R\$/m ² (414,54 R\$/módulo) (9.640,47 R\$/kWp)
Inversores de frequência	2.100,00 R\$/kWp
Cabeamento de cobre para sistema FV	1.200,00 R\$/kWp
Sistema completo para geração fotovoltaica na cobertura com módulos policristalinos convencionais	R\$ 6.000,00 R\$/kWp
Sistema de ar condicionado – <i>chillers, fancoils</i> e dutos	8.000,00 R\$/TR

Fonte: PKO do Brasil, 2015; Soliker Brasil, 2015 & MHA Engenharia, 2015

5.3 Investimento inicial para as diferentes tipologias

Para estimar o investimento inicial foram orçadas as tipologias contemporânea (vidro laminado verde) e BIPV. Para os vidros – tanto convencionais, quanto fotovoltaicos – foram consideradas perdas de 3% na execução da obra, estimativa padrão adotada em projetos de engenharia. Também foram consideradas as economias no investimento inicial advindas da redução da carga térmica e, conseqüentemente, da potência instalada do sistema de ar condicionado.

Os valores calculados são apresentados na Tabela 16, juntamente com as variáveis consideradas para sua composição.

Tabela 16 – Investimento inicial para as diferentes tipologias analisadas

Tipologia	Detalhamento do cálculo	Investimento inicial
Contemporânea (vidro laminado verde)	Área envidraçada: 12.128,1 m ²	R\$ 2.183.052,96
BIPV	Área envidraçada com vidro refletivo: 5.439,7 m ²	R\$ 4.812.600,73 (vidros) R\$ 252.000,00 (inversores)
	Área envidraçada com vidro fotovoltaico: 6.688,4 m ²	R\$ 426.720,00 (cabeamento)
	Potência total dos inversores ²⁴ : 120 kW	R\$ -1.723.680,00 (economia ar condicionado)
	Redução na potência instalada do ar condicionado: 215,46 TR	R\$ 3.767.640,73 (total)

Fonte: elaboração própria

5.4 Redução dos custos operacionais anuais para as diferentes tipologias

A partir dos dados de redução do consumo de eletricidade, redução do consumo de água pelo sistema de ar condicionado e geração fotovoltaica – apresentados no Capítulo 4 – foram estimados as reduções de custos operacionais ao ano da Tabela 17 para as tipologias contemporânea e BIPV.

²⁴ Como os painéis das diferentes fachadas não geram ao mesmo tempo, a potência dos inversores foi estimada pela maior potência requerida no horário de maior geração em um dia sem nuvens no verão.

Tabela 17 – Redução dos custos anuais para as diferentes tipologias

Tipologia	Detalhamento do cálculo		Custos operacionais
Contemporânea (vidro laminado verde)	(referência)		
BIPV	Redução no consumo de eletricidade pelo ar condicionado	722.514,66 kWh/ano	R\$ -335.319,05 /ano
	Redução na demanda contratada do ar condicionado	137,77 kW/ano (215,46 TR/ano)	R\$ -16.560,17 /ano
	Redução no consumo de água pelo ar condicionado	3.492,49 m ³ /ano	R\$ -104.704,85 /ano
	Geração de eletricidade	194.876,00 kWh/ano	R\$ -90.441,95 /ano
	TOTAL		R\$ -547.026,02 /ano

Fonte: elaboração própria

5.5 Fluxo de caixa para a tipologia BIPV

Com base em todos os valores estimados foi possível construir o fluxo de caixa da tipologia BIPV, considerando o investimento inicial, a redução nos custos operacionais ao ano e a troca dos inversores de frequência realizada a cada 10 anos²⁵.

²⁵ Para a troca foi considerado o custo integral da tecnologia orçado para o ano de 2015, não foram considerados ganhos de escala para barateamento da tecnologia nos anos futuros, nem os custos de reajuste dos preços pela inflação.

Os custos com manutenção dos vidros foram ignorados, uma vez que a garantia do fornecedor cobre o período de 25 anos, utilizado para análise. Os custos com limpeza das fachadas também foi ignorado, uma vez que se aplicam também às demais tipologias.

Apesar de ao final dos 25 anos os vidros fotovoltaicos ainda possuírem um valor residual e apesar da geração de eletricidade ter se reduzido gradativamente por conta do desgaste, esse valor foi desprezado no fluxo de caixa, apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 – Fluxo de caixa para a tipologia BIPV

Ano	Valor	Valor acumulado
0*	-R\$ 1.584.587,77	-R\$ 1.584.587,77
1	R\$ 547.026,02	-R\$ 1.102.879,96
2	R\$ 547.026,02	-R\$ 621.172,14
3	R\$ 547.026,02	-R\$ 139.464,33
4	R\$ 547.026,02	R\$ 342.243,49
5	R\$ 547.026,02	R\$ 823.951,30
6	R\$ 547.026,02	R\$ 1.305.659,12
7	R\$ 547.026,02	R\$ 1.787.366,93
8	R\$ 547.026,02	R\$ 2.269.074,75
9	R\$ 547.026,02	R\$ 2.750.782,56
10**	R\$ 295.026,03	R\$ 3.232.490,38
11	R\$ 547.026,02	R\$ 3.714.198,19
12	R\$ 547.026,02	R\$ 4.195.906,01
13	R\$ 547.026,02	R\$ 4.677.613,82
14	R\$ 547.026,02	R\$ 5.159.321,64
15	R\$ 547.026,02	R\$ 5.641.029,45
16	R\$ 547.026,02	R\$ 6.122.737,27
17	R\$ 547.026,02	R\$ 6.604.445,08
18	R\$ 547.026,02	R\$ 7.086.152,90
19	R\$ 547.026,02	R\$ 7.567.860,71
20**	R\$ 295.026,03	R\$ 8.049.568,53
21	R\$ 547.026,02	R\$ 8.531.276,34
22	R\$ 547.026,02	R\$ 9.012.984,15
23	R\$ 547.026,02	R\$ 9.494.691,97
24	R\$ 547.026,02	R\$ 9.976.399,78
25	R\$ 547.026,02	R\$ 10.458.107,60

* Representa o investimento adicional calculado descontando-se o investimento total da tipologia contemporânea (vidro laminado verde) pelo investimento total da tipologia BIPV.

** Considera a troca de todos os inversores de frequência.

Fonte: elaboração própria

Cabe lembrar que o desgaste dos vidros fotovoltaicos, que reduz a geração de eletricidade gradativamente ao longo dos anos, já foi considerado pela simulação no *software* PVsyst. No entanto, a metodologia do próprio programa distribuiu essas perdas ao longo dos 25 anos. Para a análise financeira, esse fato pode distorcer o cálculo do fluxo de caixa, que, na prática, deveria ser maior nos primeiros anos e menor nos últimos. Como não foi possível obter a geração anual no PVsyst, foi adotado o fluxo de caixa da Tabela 18.

5.6 Resultados para os indicadores financeiros adotados

Como descrito na metodologia, foram adotados três indicadores para avaliação de retorno de investimento: (1) tempo de retorno simples sobre o investimento (*payback*); (2) VPL e (3) TIR.

5.6.1 Tempo de retorno simples

O resultado para o tempo de retorno simples foi de 2,9 anos para a tipologia BIPV, quando comparada com a tipologia contemporânea. Apenas de forma comparativa, foi estimado o tempo de retorno simples para um sistema fotovoltaico convencional instalado na cobertura. Considerando o custo de 6.000,00 R\$/kWp, uma geração²⁶ de 298.178,00 kWh/ano (estimada no PVsyst) e a troca dos inversores a cada 10 anos, o retorno seria de 11,5 anos.

Ambos os resultados consideram a tarifa de eletricidade com bandeira vermelha para todo o período; caso a bandeira verde fosse adotada, os resultados seriam de 3,3 anos e 13,6 anos, respectivamente.

Os resultados indicam que o sistema convencional instalado na cobertura tem uma sensibilidade maior à tarifa de eletricidade, uma vez que para o sistema FV instalado nas fachadas essa sensibilidade é diluída pela redução também do consumo de água, faturado sobre outras bases.

²⁶ Equivale a 1.252,85 kWh/kWp, considerando uma potência instalada de 238 kWp em painéis policristalinos.

5.6.2 Valor Presente Líquido (VPL)

Para cálculo do VPL foi adotado o fluxo de caixa apresentado no Item 5.5 e a taxa de desconto equivalente ao valor da taxa de juros do Sistema Especial de Liquidação e de Custódia (Selic) válida em setembro de 2015 de 14,25%.

O resultado para a tipologia BIPV foi de R\$ 1.779.257,53, valor positivo, que indica que o investimento realizado teria retorno para o período de 25 anos analisado. O valor do VPL para o sistema convencional instalado na cobertura foi negativo (R\$ -478.943,01).

Caso a bandeira tarifária verde fosse considerada, o resultado se manteria apenas com valores menores. O VPL para a tipologia BIPV seria de R\$ 1.392.408,91 e, para o sistema convencional instalado na cobertura, de R\$ -604.679,79.

5.6.3 Taxa Interna de Retorno (TIR)

Com base no fluxo de caixa a TIR para o investimento foi de 34,2%, valor acima da taxa de juros da Selic, de 14,25%. Para o sistema convencional instalado na cobertura o resultado foi de 7,5% para a TIR.

Caso a bandeira tarifária verde fosse usada no cálculo o resultado da TIR seria de 30,0% para a tipologia BIPV e 5,4% para o sistema convencional FV.

5.6.4 Resumo dos resultados para os indicadores financeiros

A Tabela 20 apresenta os resultados compilados para os três indicadores financeiros adotados para a tipologia BIPV e para o sistema convencional fotovoltaico instalado na cobertura, utilizado como referência. São apresentados os resultados para os cálculos utilizando a bandeira tarifária vermelha e a verde.

Tabela 19 – Resumo dos resultados obtidos para os indicadores financeiros

Modelo	Indicador financeiro					
	Payback (anos)		VPL (R\$)		TIR (%)	
	Tarifa elétrica vermelha	Tarifa elétrica verde	Tarifa elétrica vermelha	Tarifa elétrica verde	Tarifa elétrica vermelha	Tarifa elétrica verde
Tipologia BIPV	2,9	3,3	1.779.257,53	1.392.408,91	34,2	30,0
Sistema FV convencional instalado na cobertura	11,5	13,6	-478.943,01	-604.679,79	7,5	5,4

Fonte: elaboração própria

5.7 Discussão sobre os resultados

A partir dos resultados é possível observar que a viabilidade financeira da tipologia BIPV ocorre por dois fatores considerados principais: (1) as reduções nos custos operacionais e no investimento inicial, associados ao sistema de ar condicionado e (2) o custo-benefício do vidro refletivo utilizado paralelamente ao vidro fotovoltaico.

Em relação ao primeiro fator, a geração de eletricidade pela tecnologia BIPV representa apenas 14,6% da redução dos custos operacionais anuais, sendo a grande parte, 85,4%, relacionada à redução de custos com ar condicionado (Figura 72).

Figura 72 - Participação percentual de cada componente da tecnologia BIPV na redução dos custos operacionais anuais

Fonte: elaboração própria

Na prática isso indica que a tecnologia BIPV compete diretamente com outras soluções para vedações externas que reduzem a carga térmica do ar condicionado a partir da reflexão ou absorção da radiação solar, tais como o próprio vidro refletivo, ou mesmo as películas de poliéster com características térmicas, aplicadas diretamente sobre o vidro comum.

Como exercício comparativo, foi realizada uma nova simulação financeira para avaliar os indicadores financeiros adotados caso a tipologia BIPV utilizasse vidro laminado verde entre as faixas de vidro fotovoltaico, ao invés do vidro refletivo. Adotando a bandeira tarifária vermelha para o período de 25 anos, os resultados para os indicadores são de: (1) tempo de retorno: 7,7 anos; (2) VPL: -304.684,99 e (3) TIR: 11,6%.

Apesar de inviabilizar o investimento, os resultados para os indicadores são melhores que o sistema convencional instalado na cobertura e se encontram no limiar da viabilidade. Caso fosse adotado o valor do Euro²⁷ de julho de 2015²⁸, ao invés de setembro, por exemplo, o projeto teria tempo de retorno de 5,5 anos, VPL de 246.836,73 e TIR de 17,1%.

Ainda assim, a tecnologia BIPV não poderia competir contra o vidro refletivo, que representa uma melhor alternativa financeira. No entanto, o que os resultados da análise

²⁷ Os vidros fotovoltaicos são importados da Europa e orçados em Euro.

²⁸ Antes do rebaixamento da nota de crédito do Brasil pela agência Standard & Poor's em 8 de setembro de 2015, a cotação do Euro estava em R\$ 3,47.

técnica indicam, principalmente o estudo sobre o sombreamento do entorno, é que o vidro fotovoltaico não é uma solução única a ser aplicada em todo e qualquer edifício, uma vez que sua viabilidade técnica e financeira depende de uma série de fatores que devem ser avaliados para cada projeto, sendo sua utilização sinérgica ao vidro refletivo e não concorrencial.

O uso do vidro fotovoltaico pode auxiliar a expansão do uso do vidro refletivo, uma vez que a geração solar fotovoltaica pode ter um apelo maior de vendas que o vidro refletivo, que, apesar de mais tempo no mercado, até o momento não é usado em larga escala. De acordo com dados da Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos (ABRAVIDRO), a venda dos vidros com propriedades térmicas, agrupados na categoria ‘vidro insulado’, representaram apenas 0,9% das vendas do setor em 2014, 0,8% em 2013 e 0,5% em 2012, descontando os vidros automotivos (ABRAVIDRO, 2015).

Esse auxílio pode ocorrer devido à percepção de valor dos consumidores sobre a geração solar. Dos consumidores que instalaram painéis fotovoltaicos até abril de 2014, por exemplo, 45% disseram ter optado pelo sistema devido principalmente à preocupação ambiental (ANEEL, 2014). Isso mostra que outros valores podem ser levados em conta como atrativo de vendas em um mercado de alta concorrência, com taxas de vacância crescentes a cada ano, como mostra a Figura 74.

Figura 73 – Locação versus taxa de vacância na cidade de São Paulo (esquerda) e Brasil (direita) para edifícios comerciais

Fonte: Cushman & Wakefield (2013)

Como discutido anteriormente nas conclusões do capítulo de análise técnica, o mercado de construção de edifícios de escritórios corporativos no Brasil segue a lógica de

maximização dos lucros a partir da redução dos custos com investimentos iniciais, uma vez que os custos de operação serão assumidos pelos futuros locatários, não envolvidos no projeto do edifício.

O investimento inicial com vidro laminado verde, azul ou cinza (tipo de vidro com especificação mínima para atender aos requisitos da NBR 7199 de 1989) é de 66,80 R\$/m² de área útil construída. Para o vidro refletivo esse valor sobe para 89,07 R\$/m², um acréscimo de 33,3%. Já para a tipologia BIPV, com vidro fotovoltaico e vidro refletivo, o valor chega a 168,03 R\$/m² (acrécimo de 151%). No entanto, esses valores são pequenos frente ao valor de venda ou aluguel de um edifício comercial corporativo na cidade de São Paulo, que na Av. Paulista, por exemplo, pode custar 20.000,00 R\$/m² para compra ou 142,00 R\$/m²/mês para aluguel (Mamona, 2013 & Wieczorek, 2013).

No âmbito regulatório, a Resolução Normativa 482 da ANEEL tem pouco impacto sobre a tecnologia BIPV, uma vez que os resultados da simulação indicam que em momento algum do ano será injetada eletricidade na rede de distribuição em edifícios do porte das tipologias simuladas. Já a NBR 7199, que trata sobre as especificações mínimas de segurança para os vidros utilizados na construção civil, deveria ser atualizada para incluir também características mínimas de desempenho térmico dos vidros, visto o impacto que os mesmos podem promover no consumo de energia de um edifício.

Cabe a futuros estudos pesquisar se os consumidores de edifícios de escritórios corporativos nas principais capitais do país estão dispostos a pagar mais por edifícios com geração fotovoltaica em suas fachadas, informação fundamental para determinar a expansão do uso da tecnologia, uma vez que as viabilidades técnica e financeira de projetos desse tipo se mostraram viáveis, ao menos na realidade climática e construtiva da cidade de São Paulo.

6 CONCLUSÕES

A metodologia adotada, com base nos dados do projeto de Desempenho Operacional de Edificações (DEO) do Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS), permitiu o desenvolvimento de um modelo de linha de base com consumo de 218,2 kWh/m².ano e 1.870,6 kWh/funcionário.ano, valor considerado dentro da faixa de consumo de edificações comerciais corporativas, como mostrou o comparativo com dados reais dos edifícios estudados pelo CBCS na cidade de São Paulo. A comparação entre a curva de carga simulada e a curva de carga real medida de um edifício comercial corporativo também se mostrou adequada para representar o comportamento do consumo em edificações desse tipo.

O uso de diferentes *softwares* para simulação do consumo de energia, modelagem 3D e geração fotovoltaica – EnergyPlus; DesignBuilder e PVsyst – se mostrou suficiente para realização do estudo, permitindo superar limitações pontuais de um *software* em relação ao outro. O uso dessas ferramentas também permitiu realizar uma análise mais ampla da tecnologia BIPV, considerando não apenas o impacto no consumo de energia do ar condicionado e na geração de eletricidade, mas também no consumo de água e na redução da potência e, conseqüentemente, da demanda contratada do sistema de ar condicionado.

Em relação às avaliações técnica e financeira, foi desenvolvido um fluxograma para identificar todas as variáveis impactadas pela geração fotovoltaica nas fachadas, como mostra a Figura 74.

Figura 74 – Variáveis consideradas para análise do impacto da tecnologia BIPV na edificação

Fonte: elaboração própria

O impacto da tecnologia no consumo de eletricidade pela iluminação artificial foi desprezado, uma vez que no Brasil os sistemas de dimerização das luminárias, que permite um maior aproveitamento da luz natural, ainda não são utilizados em larga escala. Para avaliar o impacto da tecnologia BIPV na iluminação natural dos ambientes internos foi elaborado um mapa de iluminação a partir do módulo de *daylighting* do DesignBuilder.

De forma a entender não apenas os impactos pontuais da tecnologia BIPV nos consumos e custos de um edifício, mas também como a tecnologia se encaixa no contexto histórico do desenvolvimento arquitetônico dos edifícios de escritórios corporativos na cidade de São Paulo, foi realizado um estudo complementar sobre as principais tipologias existentes na cidade, bem como as diferenças entre os materiais e técnicas construtivas adotadas nessas edificações.

Foram identificadas três tipologias principais: (1) tipologia tradicional, caracterizada pelo pé direito alto, baixa RJP (30%) e paredes com baixa transmitância térmica / alta capacidade térmica; (2) tipologia de transição, caracterizada pelo pé direito mínimo de acordo com a composição de altura da estrutura, RJP intermediário (30-60%) e paredes com transmitância mais alta e capacidade mais baixa e (3) tipologia contemporânea, caracterizada pelo pé direito maior em relação à tipologia de transição, de forma a comportar o piso elevado e forro, alta RJP (80%) e vedações externas com transmitância alta e baixa capacidade térmica (vidro).

A análise da evolução das principais variáveis das tipologias revelou que com o passar das décadas os ambientes internos passaram a ter uma maior exposição às condições climáticas exteriores, o que gerou um aumento do consumo de energia para climatização. Enquanto a tipologia tradicional apresentou um consumo de 179,3 kWh/m².ano, a tipologia de transição apresentou um consumo de 192,7 kWh/m².ano e a tipologia contemporânea de 218,2 kWh/m².ano.

Dentro desse contexto, de maior exposição e aumento de consumo, foram desenvolvidos novos materiais para redução do consumo de energia, sem comprometimento da forma arquitetônica da tipologia contemporânea. O vidro refletivo e o vidro fotovoltaico são frutos desse desenvolvimento. A tipologia contemporânea com vidro refletivo apresentou um consumo de 190,9 kWh/m².ano, enquanto a tipologia contemporânea com vidro fotovoltaico, chamada de tipologia BIPV, apresentou um consumo de 185,5 kWh/m².ano, considerando tanto o consumo quanto a geração de eletricidade.

Em relação à geração fotovoltaica pelas fachadas, a análise técnica revelou que existe um potencial para uso da tecnologia na tipologia contemporânea, que pode gerar uma redução de 3,6% no consumo total de um edifício, mesmo considerando todas as perdas do sistema devido à inclinação dos módulos, menor eficiência dos materiais (silício amorfo) e orientação em relação ao Norte, quando comparado com um sistema fotovoltaico convencional (com painéis policristalinos) instalado na cobertura.

Quando a redução da carga térmica do sistema de ar condicionado é adicionada às estimativas de redução de consumo, aí sim a tecnologia mostra seu potencial verdadeiro, reduzindo em 15% o consumo total da tipologia BIPV, quando comparada com a tipologia contemporânea (que utilizada vidro laminado verde para as vedações externas).

Apesar da redução de consumo, a análise do potencial de aproveitamento da iluminação natural revelou que o uso dos vidros fotovoltaicos reduz em 28,2% a média de iluminância dos ambientes internos, quando comparado com o vidro laminado verde. Essa redução, no entanto, ocorre com mais intensidade nas regiões internas de passagem; nos arredores das fachadas a entrada de luz natural ainda permanece em níveis adequados, o que permitiria instalar sensores de dimerização ou interruptores individuais nas fileiras de lâmpadas mais próximas às janelas.

Por fim, na análise técnica, ainda foi estudado o impacto do sombreamento do entorno na geração de eletricidade pelas fachadas. Os resultados indicaram que mesmo em regiões urbanas com alta densidade de ocupação – Eixos da Avenida Paulista, Avenida Faria Lima e Marginal Pinheiros – a tecnologia pode ser empregada em fachadas voltadas para as avenidas²⁹, desde que orientadas predominantemente ao Norte ou Leste. Nessas orientações o impacto na geração é de 23,1% e 24,3%, respectivamente; já nas fachadas com orientação predominante ao Oeste e Sul, o impacto é de 38,2% e 42,1%, inviabilizando o uso da tecnologia BIPV. Nota-se que apesar do potencial de geração entre as fachadas Leste e Oeste, a princípio, ser o mesmo, na cidade de São Paulo a incidência de chuvas é maior à tarde, o que reduz a geração de eletricidade ao longo do ano na fachada Oeste.

Os resultados da análise técnica indicam que a tecnologia BIPV possui um potencial a ser explorado como alternativa de eficiência energética para edificações comerciais corporativas na cidade de São Paulo, porém seu uso deve ser avaliado em cada projeto particular, considerando as características das fachadas, áreas de abertura, orientação e sombreamento do entorno.

Além da análise técnica foi ainda realizada uma análise financeira da tecnologia, a partir da comparação das variáveis apresentadas na Figura 74, comparando os investimentos iniciais e custos de operação das tipologias contemporânea e BIPV. Os resultados indicam que quando associado ao vidro refletivo, o vidro fotovoltaico tem grande viabilidade financeira, considerando os três indicadores calculados: tempo de retorno simples, VPL e TIR.

Considerando a solução adotada na tipologia BIPV: faixas de vidro fotovoltaico entremeadas por uma faixa de vidro refletivo no meio da janela, o tempo de retorno simples seria de 2,9 anos, o VPL de R\$ 1.779.257,53 e a TIR de 34,2% (com bandeira tarifária

²⁹ Onde ocorre uma maior exposição ao Sol.

vermelha para a eletricidade). Esse resultado é favorecido pelo uso do vidro refletivo, que possui ótimo retorno financeiro.

Na teoria os indicadores financeiros demonstram que o vidro fotovoltaico concorre com o vidro refletivo, porém o que se observa no mercado construtivo do país é que o vidro refletivo possui uma penetração mínima, representando em 2014 apenas 0,9% das vendas de vidros planos usados no setor da construção civil³⁰ (ABRAVIDRO, 2015).

Na prática o vidro fotovoltaico pode auxiliar a expandir a adoção do vidro refletivo, uma vez que sua utilização é sinérgica nos edifícios de escritórios corporativos, inclusive com apelos comerciais que vão além da questão financeira de retorno de investimento. No caso dos edifícios comerciais, a tecnologia poderia ser inclusive um diferencial de vendas em um mercado de alta concorrência com taxas de vacância em ascensão.

Uma das dificuldades da expansão no uso do vidro refletivo e também do vidro fotovoltaico é a lógica que define as relações comerciais no mercado da construção civil de edifícios de escritórios corporativos. As construtoras, interessadas no retorno financeiro da venda dos espaços, buscam maximizar o lucro reduzindo os investimentos iniciais, enquanto os futuros ocupantes, que arcarão com os custos operacionais dos sistemas instalados, só tem acesso aos edifícios prontos, quando não existe mais espaço para alterar a concepção arquitetônica ou a escolha das tecnologias empregadas. Essa dinâmica prejudica a inserção de novas tecnologias mais caras, mas que permitem uma redução dos custos operacionais, como a BIPV, que apresenta custo inicial de 168,03 R\$/m², frente ao vidro laminado verde que apresenta custo de 66,80 R\$/m².

Essa lógica é semelhante ao conflito de interesses existente entre o proprietário e o locatário de um imóvel, que restringe a expansão de novas tecnologias para eficiência energética em edificações, mesmo aquelas que apresentam excelente retorno financeiro. O interesse em reduzir os custos operacionais do imóvel é do locatário, porém o investimento a ser realizado é sobre a infraestrutura de posse do proprietário. Essa questão vai além da viabilidade técnica ou financeira, esbarrando em aspectos jurídicos contratuais, que devem também ser considerados (RMI, 2012).

Outro aspecto jurídico que também impacta a adoção da tecnologia fotovoltaica em larga escala nas edificações é a obrigatoriedade da construtora em fornecer garantia de cinco anos a todos os sistemas que entrega instalados. Apesar dos vidros fotovoltaicos e inversores

³⁰ Esse percentual ainda agrupa outros tipos de vidros com controle térmico, como os vidros insulados.

terem garantia dos fabricantes para esse período de tempo, a obrigatoriedade da garantia pela construtora em si também é um fator que pode pesar na decisão de instalar o sistema, uma vez que gera um compromisso além do ambiente de negócios tradicional do segmento construtivo.

No âmbito regulatório, a Resolução Normativa 482 da ANEEL tem pouco impacto sobre a tecnologia analisada, uma vez que não haverá injeção de eletricidade na rede, já a NBR 7199 poderia passar por atualização para incluir características mínimas de desempenho térmico dos vidros, visto sua contribuição para o consumo de energia pelo ar condicionado.

Como estudos complementares para entender melhor o potencial da tecnologia BIPV, sugere-se a instalação dos vidros fotovoltaicos em um laboratório a céu aberto com acompanhamento horário da geração ao longo de pelo menos um ano, com objetivo de calibrar os dados da simulação realizada no PVsyst. Também é importante repetir o estudo para outras cidades brasileiras, onde a tecnologia pode inclusive apresentar melhor viabilidade técnica e financeira, devido às condições climáticas e tarifárias mais favoráveis.

Em relação aos aspectos financeiros, seria oportuno realizar uma análise de sensibilidade sobre as condições de mercado que impactam a tecnologia, de forma a permitir uma maior compreensão sobre os fatores que influenciam seus custos. Por fim, um estudo mercadológico para averiguar a percepção dos administradores e locatários dos edifícios de escritórios corporativos sobre a geração solar poderia avaliar quanto os consumidores estão dispostos a pagar mais por um edifício com tecnologia BIPV, a fim de motivar o emprego do vidro fotovoltaico em larga escala.

REFERÊNCIAS

ADDIS, BILL. **Building: 3000 years of Design Engineering and Construction**. Phaidon, 2007. 632 p.

AES ELETROPAULO. **PIS, PASEP E COFINS**. São Paulo, 2005a. Disponível em <https://www.aeseletpaulo.com.br>, acessado em 08 de setembro de 2015.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS – ASHRAE. **Standard 90.1-2010 - Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. Estados Unidos, 2010.

_____. **Sistema de tarifação de energia**. São Paulo, 2005b. Disponível em <https://www.aeseletpaulo.com.br>, acessado em 08 de setembro de 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Avaliação dos resultados da Resolução Normativa 482/2012 na visão do Regulador**. Superintendência de Regulação de Serviços de Distribuição. Brasília, 09 de abril de 2014.

_____. **Relatórios ANEEL**. Superintendência de Fiscalização dos Serviços de Eletricidade – SFE. Brasília, 2015. Disponível em <http://relatorios.aneel.gov.br/>, acessado em 10 de setembro de 2015.

_____. **Resolução Normativa 482**. Estabelece as condições gerais para acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Brasil, 17 de abril de 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7199 – Projeto, execução e aplicações de vidros na construção civil**. Comitê Brasileiro de Construção Civil (CB 02). Brasil, 30 de novembro de 1989.

_____. **NBR 16401 - Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários**. Comitê Brasileiro de Refrigeração, Ar-condicionado, Ventilação e Aquecimento (CB 055). Brasil, 04 de agosto de 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES E PROCESSADORES DE VIDROS PLANOS – ABRAVIDRO. **Panorama ABRAVIDRO 2015**. São Paulo, 2015. Disponível em http://www.abravidro.org.br/encarte_panorama2015.asp, acessado em 09 de setembro de 2015.

BANHAM, REYNER. **Teoria e projeto na primeira era da máquina**. Editora Perspectiva: São Paulo, 1975. 520 p.

_____. **The architecture of well-tempered environment**. Segunda edição. The University of Chicago Press: Chicago, 1969. 319 p.

BARGHINI, ALESSANDRO; SPINELLI, WALTER; GRIS, FLORA; MASCARÓ, JUAN LUIS; TORQUATO, VALDIR; FAVILLI, UBIRAJARA; PACHECO, WAGNER JOSE. **Consumo de energia nos setores de comércio e serviços na Cidade de São Paulo. II** Relatórios setoriais. Capítulo 8, Escritórios. São Paulo, 1988. 28 p.

BARGHINI, ALESSANDRO; SPINELLI, WALTER; GRIS, FLORA; SILVEIRA, WANDA DONIZETTI; ROMERO, MARCELO DE ANDRADE. **Pesquisa sobre utilização de energia no Setor de Serviços: consumo de energia nas edificações – estudo paramétrico.** Jorge Wilhelm Consultores Associados. Eletrobrás, Procel: São Paulo, Abril de 1989. 66 p.

BARGHINI, ALESSANDRO; BENAVIDES, JOSE RAFAEL; RIBEIRO, MARIA ALICE; CALDEIRA, RINALDO; SANTOS, ARTHUR. **Geração distribuída e cogeração com gás natural: barreiras tecnológicas e institucionais.** Instituto de Energia e Ambiente (IEE), Universidade de São Paulo. São Paulo, Julho de 2014. 74 p.

CALLAGHAN, P. W. O'. **Building for energy conservation.** Escola de Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia de Cranfield. Pergamon Press: Inglaterra, 1978. 232 p.

CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS – CIBSE. **Technical Memorandum 54: Evaluating operational energy performance of buildings at the design stage.** Reino Unido, 2013.

CHOW, TT; FONG, K.F.; HE, H.; LIN, Z.; CHAN, A.L.S. **Performance evaluation of a PV ventilated window applying to office building of Hong Kong.** Energy and Buildings, volume 39, 2007, 643–650 p.

CHUNG, William. **Using the fuzzy linear regression method to benchmark the energy efficiency of commercial buildings.** Applied Energy, volume 95, julho de 2012. p. 45-49.

CIE – INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION. **Spatial distribution of daylight.** CIE standard general sky, Austrália, 2003.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL – CBCS. **Desempenho Energético Operacional em Edificações.** Relatório Final. Benchmarking de escritórios corporativos e recomendações para certificação DEO no Brasil. São Paulo, setembro de 2015.

CRAWLEY, DRURY B. **Which weather data should you use for energy simulations of commercial buildings?** ASHRAE 1998 Transactions 104, parte 2. EUA, 1998.

CRECESB - CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES). Edição especial. Rio de Janeiro: agosto, 2004. 207 p.

CRUICKSHANK, DAN. **Sir Banister Fletcher's a History of Architecture.** Architectural Press, 20ª edição, 1996. ISBN 0-7506-2267-9.

CUSHMAN & WAKEFIELD. **Marketbeat Office Snapshot**. São Paulo, quarto semestre de 2013.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO – CRECESB. **Base de Dados de radiação solar incidente (irradiação solar)**. Disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>, acessado em dezembro de 2015.

DESIGNBUILDER SOFTWARE LTD. **DesignBuilder – Simulation Made Easy**. Disponível em <http://www.designbuilder.co.uk/>. Reino Unido, 2015.

DIDONÉ, E. L.; WAGNER, A. **Semi-transparent PV windows: A study for office buildings in Brazil**. Energy and Buildings, volume 67, 2013, 136-142 p.

DEPARTMENT OF ENERGY (DOE) U.S. **Energy Efficiency & Renewable Energy**. Weather Data, All Regions: South America WMO Region 3, 2014, disponível em <http://apps1.eere.energy.gov>, acessado em maio de 2014.

_____. **EnergyPlus Energy Simulation Software**. Versão 8.1. Disponível em <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>. Estados Unidos, 2015.

_____. **Weather Data Resources**. Disponível em: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_sources.cfm#IWEC, acessado em 21 de agosto de 2015.

DUTRA, LUCIANO. **Uma metodologia para a determinação do fator solar desejável em aberturas**. Dissertação de mestrado apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 1994. 104 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanco Energético Nacional (BEN)**. Séries históricas completas, 1970-2014. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/BENSeriesCompletas.aspx>, acessado em 10 de setembro de 2015.

_____. **Plano Nacional de Energia (PNE) 2030**. Rio de Janeiro, 2007.

FUNG, T.Y.Y.; YANG, H. **Study on thermal performance of semi-transparent building-integrated photovoltaic glazings**. Energy and Buildings, volume 40 (3), 2008, 341–350 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produto Interno Bruto dos Municípios 2012**. Brasil, 2013.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Buildings and Communities**. França, 2014. Disponível em <http://www.iea.org>, acessado em 18 de maio de 2014.

INSTITUTE OF THE SCIENCES OF THE ENVIRONMENT – ISE. **Software PVsyst**. Versão 6.35. Universidade de Genebra, março de 2015.

GELLER, HOWARD; JANNUZI, GILBERTO DE MARTINO; SCHAEFFER, ROBERTO; TOLMASQUIM, MAURÍCIO TIOMMO. **The efficient use of electricity in Brazil: progress and opportunities**. American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE): Washington, Estados Unidos, Maio de 1997. 27 p.

GIEDION, SIGFREUD. **Space, Time and Architecture: the growth of a new tradition**. Geoffrey Cumberlege Oxford University Press: Londres, 1949. 665 p.

GIVONI, B. **Comfort Climate Analysis and Building Design Guidelines**. Energy and Buildings, volume 18, 1992, p. 11-23.

GOLDEMBERG, JOSÉ. **Seminário de arquitetura bioclimática**. Companhia Energética de São Paulo – CESP. Rio de Janeiro, 1983. 87 p.

GOLDEMBERG, JOSÉ; JOHANSSON, THOMAS B.; REDDY, AMULYA K. N.; WILLIAMS, ROBERT H. **Energy for a Sustainable World**. World Resources Institute, setembro de 1987. 120 p.

GORDON, ROY. **Chemical vapor deposition of coatings on glass**. Section 3: Glass coating at atmospheric pressure. Departamento of Chemistry, Harvard University. Estados Unidos, 1997. Páginas 81-91.

GUERREIRO, ISADORA DE ANDRADE. **Arquitetura-capital: a funcionalidade dos edifícios corporativos paulistas**. Dissertação de mestrado apresentada para obtenção do título de Mestre em Arquitetura. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010. 256 p.

GRAHAN, JOHN R., HARVEY, R. CAMPBELL. **The theory and practice of corporate finance: evidence from the field**. Journal of Financial Economics, volume 60. Estados Unidos, 2001. 187-243 p.

GÜNEI, YASEMIN I. **Type and typology in architectural discourse**. FBI BAU Magazine, volume 9, issue 1, Turkey, Balıkesir University Faculty of Architecture and Engineering, July 2007. 3-18 p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Buildings and Communities**. França, 2014. <http://www.iea.org>, acessado em maio de 2014.

KOENIGSBERGER, O. H.; INGERSOLL, T. G.; MAYHEW, A.; SZOKOLAY, S. V. **Manual of tropical housing and building**. Longman Group Limited. Tradução para espanhol por Emilio Romero Rios. Paraninfo: Espanha, 1977. 328 p.

LABORATORIO DE EFICIENCIA ENERGETICA EM EDIFICACOES – LABEEE. **Arquivos climáticos em formato TRY, SWERA, CSV e BIN**. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2005. Disponível em <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>, acessado em maio de 2014.

LAMBERTS, ROBERTO; DUTRA, LUCIANO; PEREIRA, FERNANDO O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. PW Editores: São Paulo, 1997. 192 p.

LASNER, F. & ANG, T.G. **Photovoltaic Engineering Handbook**. França, 1990. 568 p.

LENGEN, JOHAN VAN. **Manual del arquitecto descalzo: como construir casas y otros edificios**. Primeira reimpressão. Ed. Pax-Mexico: México, maio de 1983. 538 p.

LORENZO, E. et al. **Solar Electricity. Engineering of Photovoltaic Systems**. Primeira edição, Espanha: Universidad Politecnica de Madrid, novembro de 1994. 310 p.

MAMONA, KARLA SANTANA. **Preço médio de locação de imóveis comerciais aumentou 2% no trimestre**. Publicado em InfoMoney, em 18 de dezembro de 2013. Disponível em <http://www.infomoney.com.br/imoveis/noticia/3109113/preco-medio-locacao-dos-imoveis-comerciais-aumentou-trimestre>, acessado em 09 de setembro de 2015.

MHA ENGENHARIA. **Estimativa de custos de sistema de ar condicionado**. Contato com Eng. Sérgio Marchioli em 09 de fevereiro de 2015. São Paulo, 2015.

MICHELATO, RUBIA. **Avaliação do desempenho térmico de vidros refletivos: estudo de caso em células-teste**. Dissertação de mestrado apresentada para obtenção do título de Mestre em Arquitetura. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007, 225 p.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO – MCT. **Fatores de emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil**. Arquivos dos Fatores de Emissão. Brasília, 2015.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. **Balanço Energético Nacional – BEN 2013**. Brasília, 2014. Disponível em <http://ben.epe.gov.br>, acessado em maio de 2014.

MIYAZAKI, T.; AKISAWA, A.; KASHIWAGI, T. **Energy savings of office buildings by the use of semi-transparent solar cells for Windows**. Renewable Energy, volume 30, 2005, 281–304 p.

NG, P. K.; MITHRARATNEA, N.; KUA, H. W. **Energy analysis of semi-transparent BIPV in Singapore buildings**. Energy and Buildings, volume 66, 2013, 274-281 p.

OLIVIERIA, L.; CAAMA NO-MARTIN, E.; OLIVIERI, F.; NEILA, J. **Integral energy performance characterization of semi-transparent photovoltaic elements for building integration under real operation conditions**. Energy and Buildings, volume 68, 2014, 280-290 p.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Realizing the Potential of Energy Efficiency Energy**. Washington, DC, 2007. 72 p.

PATTERSON, M. **What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues.** Energy Policy, v. 24, n. 5, p. 377-390. doi: 10.1016/0301-4215(96)00017-1, 1996.

PEVSNER, NIKOLAUS. **Os pioneiros do desenho moderno: de William Morris a Walter Gropius.** 1ª Edição. Tradução: João Paulo Monteiro. Ed. Martins Fontes: São Paulo, fevereiro de 1980. 268 p.

PKO DO BRASIL. **Preços estimativos de vidros.** Contato com Rebeca Andrade em 28 de agosto de 2015. São Paulo, 2015.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – PROCEL. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso.** Classe Comercial – Alta tensão, ano base 2005. Brasília, agosto de 2008.

PVSYST SA. **PVsyst Photovoltaic Software.** Versões 6.35 e 6.38. Disponível em <http://www.pvsyst.com/en/>. Suíça, 2015.

ROCKY MOUNTAIN INSTITUTE – RMI. **Working together for sustainability: the RMI-BOMA guide for landlords and tenants.** Estados Unidos, junho de 2012.

ROMERO, MARCELO DE ANDRADE & REIS, LINEU BELICO DOS. **Eficiência energética em edifícios.** Ed. Manole: São Paulo, 2012.

ROMERO, MARTA ADRIANA BUSTOS. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano.** Projeto Editores Associados Ltda: São Paulo, 1988. 128 p.

RORIZ, MAURÍCIO. **Correções nas irradiâncias e iluminâncias dos arquivos epw da base ANTAC.** Grupo de trabalho sobre conforto e eficiência energética de edificações. São Carlos, SP: novembro de 2012. Disponível em <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-epw>, acessado em junho de 2015.

SABESP – COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Comunidade 07/14.** Tarifas vigentes a partir de dezembro de 2014. São Paulo, 2014. Disponível em <http://site.sabesp.com.br>, acessado em 08 de setembro de 2015.

SANTOS, MAYRA SIMONE. **Arquitetura pela torre: Avenida Paulista 1960-80 e Marginal do Rio Pinheiros 1980-90.** Dissertação de mestrado apresentada para obtenção do título de Mestre em Arquitetura. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012. 289 p.

SCHROPP, R.E.I. **Amorphous and Microcrystalline Silicon Solar Cells, in Solar Cell Materials: Developing Technologies.** John Wiley & Sons, Ltd, Chichester. Reino Unido, 2014.

SOLAR AND WIND ENERGY RESOURCE ASSESSMENT (SWERA). **About SWERA.** Disponível em: <http://en.openei.org/wiki/SWERA/About>, acessado em 21 de agosto de 2015.

SOLIKER BRASIL. **Catálogo técnico Solglass e (3+3)**. Soliker Brasil, s.d. Disponível em <http://www.solikerbrasil.com.br>, acessado em maio de 2015.

_____. **Preços estimativos do vidro e sistema fotovoltaico**. Contato com Thiago Moraes em 15 de maio de 2015. São Paulo, 2015.

SONG, JONG-HAW; AN YOUNG-SUB; KIM, SOEK-GE; LEE, SUNG-JIN; YOON, JONG-HO; CHOUNG, YOUN-KYOO. **Power output analysis of transparent thin-film module in building integrated photovoltaic system (BIPV)**. Energy and Buildings, volume 40, 2008. 2067-2075 p.

STURGIS, RUSSELL. **A dictionary of architecture and building: biographical, historical, and descriptive**. Volume 1. The Macmillan Co.: Nova Iorque, 1901. 2236 p.

UNIVERSITY OF CALIFORNIA. **Climate Consultant software**. Versão 5.5 beta. Departamento de Arquitetura e Desenho Urbano, Universidade da Califórnia, Estados Unidos. Disponível em: <http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/>. Visitado em 01 de março de 2014.

VETTORAZZO, LUCAS. **Alta dos serviços e calor mudam o pico de energia para meio da tarde**. Em Folha de São Paulo, caderno Mercado. Rio de Janeiro: 28 de janeiro de 2014.

WIECZOREK, GUILHERME. **Oportunidades para trabalho e novos negócios**. Revista Infra Outsourcing & Workplace, publicado em 01 de março de 2013. Disponível em <http://www.revistainfra.com.br/portal/imprime.asp?secao=3&codigo=13595&edicao=Edi%C3%A7%C3%A3o>, acessado em 09 de setembro de 2015.

ZEMAN, MIRO. **Advanced Thin-Film Silicon Solar Cells**. Apresentação apresentada na Delft University of Technology. Holanda, 2009.

APÊNDICES

APÊNDICE A Resultados das simulações emitidos pelo EnergyPlus

APÊNDICE B Relatórios das simulações emitidos pelo PVsyst

APÊNDICE A - Resultados das simulações emitidos pelo EnergyPlus

A1. TIPOLOGIA TRADICIONAL

Building Area

	Area [m2]
Total Building Area	32679.94
Net Conditioned Building Area	28010.73
Unconditioned Building Area	4669.22

End Uses

	Electricity [kWh]	Natural Gas [kWh]	Additional Fuel [kWh]	District Cooling [kWh]	District Heating [kWh]	Water [m3]
Heating	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cooling	899973.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Lighting	1391339.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	4076.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	1633959.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Equipment	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fans	350263.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumps	629216.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	114077.63	0.00	0.00	0.00	0.00	8350.93
Humidification	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water Systems	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Refrigeration	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generators	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total End Uses	5022905.86	0.00	0.00	0.00	0.00	8350.93

A2. TIPOLOGIA DE TRANSIÇÃO

Building Area

	Area [m2]
Total Building Area	32679.94
Net Conditioned Building Area	28010.73
Unconditioned Building Area	4669.22

End Uses

	Electricity [kWh]	Natural Gas [kWh]	Additional Fuel [kWh]	District Cooling [kWh]	District Heating [kWh]	Water [m3]
Heating	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cooling	1076728.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Lighting	1391339.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	4076.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	1633959.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Equipment	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fans	419716.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumps	734426.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	137154.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9982.52
Humidification	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water Systems	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Refrigeration	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generators	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total End Uses	5397399.68	0.00	0.00	0.00	0.00	9982.52

A3. TIPOLOGIA CONTEMPORÂNEA

Building Area

	Area [m2]
Total Building Area	32679.94
Net Conditioned Building Area	28010.73
Unconditioned Building Area	4669.22

End Uses

	Electricity [kWh]	Natural Gas [kWh]	Additional Fuel [kWh]	District Cooling [kWh]	District Heating [kWh]	Water [m3]
Heating	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cooling	1365058.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Lighting	1391339.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	4076.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	1633959.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Equipment	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fans	522563.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumps	1006356.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	189924.48	0.00	0.00	0.00	0.00	12821.98
Humidification	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water Systems	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Refrigeration	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generators	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total End Uses	6113277.74	0.00	0.00	0.00	0.00	12821.98

A4. TIPOLOGIA CONTEMPORÂNEA COM VIDRO INSULADO

Building Area

	Area [m2]
Total Building Area	32679.94
Net Conditioned Building Area	28010.73
Unconditioned Building Area	4669.22

End Uses

	Electricity [kWh]	Natural Gas [kWh]	Additional Fuel [kWh]	District Cooling [kWh]	District Heating [kWh]	Water [m3]
Heating	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cooling	1016210.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Lighting	1391339.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	4076.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	1633959.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Equipment	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fans	384431.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumps	770793.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	143757.25	0.00	0.00	0.00	0.00	9543.42
Humidification	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water Systems	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Refrigeration	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generators	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total End Uses	5344567.09	0.00	0.00	0.00	0.00	9543.42

A5. TIPOLOGIA CONTEMPORÂNEA COM VIDRO REFLETIVO

Building Area

	Area [m2]
Total Building Area	32679.94
Net Conditioned Building Area	28010.73
Unconditioned Building Area	4669.22

End Uses

	Electricity [kWh]	Natural Gas [kWh]	Additional Fuel [kWh]	District Cooling [kWh]	District Heating [kWh]	Water [m3]
Heating	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cooling	949350.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Lighting	1391339.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	4076.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	1633959.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Equipment	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fans	416921.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumps	810473.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	140926.21	0.00	0.00	0.00	0.00	9189.59
Humidification	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water Systems	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Refrigeration	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generators	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total End Uses	5347045.42	0.00	0.00	0.00	0.00	9189.59

A6. TIPOLOGIA BIPV (SEM GERAÇÃO FOTOVOLTAICA)

Building Area

	Area [m2]
Total Building Area	32679.94
Net Conditioned Building Area	28010.73
Unconditioned Building Area	4669.22

End Uses

	Electricity [kWh]	Natural Gas [kWh]	Additional Fuel [kWh]	District Cooling [kWh]	District Heating [kWh]	Water [m3]
Heating	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cooling	962638.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Lighting	1391339.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	4076.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	1633959.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Equipment	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fans	427482.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumps	827469.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	143798.29	0.00	0.00	0.00	0.00	9329.49
Humidification	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water Systems	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Refrigeration	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generators	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total End Uses	5390763.08	0.00	0.00	0.00	0.00	9329.49

APÊNDICE B - Relatórios das simulações emitidos pelo PVsyst

PVSYST V6.38		15/05/15		Page 1/3	
Grid-Connected System: Simulation parameters					
Project :		SP_Cobertura			
Geographical Site		São Paulo		Country	Brazil
Situation		Latitude	23.6°S	Longitude	46.6°W
Time defined as		Legal Time	Time zone UT-3	Altitude	760 m
		Albedo	0.20		
Meteo data:		São Paulo Synthetic - Meteonorm 7.1			
Simulation variant : 1					
		Simulation date	15/05/15 17h13		
Simulation parameters					
Collector Plane Orientation		Tilt	24°	Azimuth	0°
Models used		Transposition	Perez	Diffuse	Erbs, Meteonorm
Horizon		Free Horizon			
Near Shadings		No Shadings			
PV Array Characteristics					
PV module		Si-poly	Model	GPM220P-B-54	
		Manufacturer	GPPV		
Number of PV modules		In series	15 modules	In parallel	72 strings
Total number of PV modules		Nb. modules	1080	Unit Nom. Power	220 Wp
Array global power		Nominal (STC)	238 kWp	At operating cond.	216 kWp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)		U mpp	375 V	I mpp	576 A
Total area		Module area	1585 m²	Cell area	1419 m²
Inverter					
		Model	PVP 100KW-480		
		Manufacturer	PV Powered		
Characteristics		Operating Voltage	295-500 V	Unit Nom. Power	100 kWac
Inverter pack		Nb. of inverters	2 units	Total Power	200 kWac
PV Array loss factors					
Thermal Loss factor		Uc (const)	20.0 W/m²K	Uv (wind)	0.0 W/m²K / m/s
Wiring Ohmic Loss		Global array res.	11 mOhm	Loss Fraction	1.5 % at STC
Module Quality Loss				Loss Fraction	1.5 %
Module Mismatch Losses				Loss Fraction	1.0 % at MPP
Incidence effect, ASHRAE parametrization		IAM =	1 - bo (1/cos i - 1)	bo Param.	0.05
User's needs :		Unlimited load (grid)			

PVsyst Evaluation mode

Figura B1 – Relatório PVsyst para geração fotovoltaica na cobertura (1/3)

Figura B2 – Relatório PVsyst para geração fotovoltaica na cobertura (2/3)

Figura B3 – Relatório PVSyst para geração fotovoltaica na cobertura (3/3)

PVSYST V6.35			10/04/15	Page 1/3
Grid-Connected System: Simulation parameters				
Project : SP_FachadaNorte				
Geographical Site		São Paulo	Country	Brazil
Situation		Latitude 23.6°S	Longitude 46.6°W	
Time defined as		Legal Time	Time zone UT-3	Altitude 760 m
		Albedo 0.20		
Meteo data:		São Paulo Synthetic - Meteonom 7.1		
Simulation variant : New simulation variant				
Simulation date 10/04/15 16h49				
Simulation parameters				
Collector Plane Orientation		Tilt 90°	Azimuth 0°	
Models used		Transposition Perez	Diffuse Erbs, Meteonom	
Horizon		Free Horizon		
Near Shadings		No Shadings		
PV Array Characteristics				
PV module	a-Si:H tandem	Model	ASI THRU-4-L 10%	
		Manufacturer	Schott Solar AG	
Number of PV modules	In series	3 modules	In parallel	190 strings
Total number of PV modules	Nb. modules	570	Unit Nom. Power	156 Wp
Array global power	Nominal (STC)	88.9 kWp		
Array operating characteristics (50°C)	U mpp	240 V	I mpp	352 A
Total area	Module area	1671 m²		
Inverter		Model	CL 44.4 Delta / 240	
		Manufacturer	Fronius USA	
Characteristics	Operating Voltage	230-500 V	Unit Nom. Power	44.4 kWac
Inverter pack	Nb. of inverters	2 units	Total Power	89 kWac
PV Array loss factors				
Thermal Loss factor	Uc (const)	20.0 W/m²K	Uv (wind)	0.0 W/m²K / m/s
Wiring Ohmic Loss	Global array res.	11 mOhm	Loss Fraction	1.5 % at STC
Module Quality Loss			Loss Fraction	5.0 %
Module Mismatch Losses			Loss Fraction	0.8 % at MPP
Incidence effect, ASHRAE parametrization	TM = 1 - bo (1/cos i - 1)	bo Param.	0.05	
User's needs :		Unlimited load (grid)		

PVsyst Evaluation mode

Figura B4 – Relatório PVsyst para geração fotovoltaica na fachada norte (1/3)

Figura B5 – Relatório PVsyst para geração fotovoltaica na fachada norte (2/3)

Figura B6 – Relatório PVsyst para geração fotovoltaica na fachada norte (3/3)

PVSYST V6.35			10/04/15	Page 1/3
Grid-Connected System: Simulation parameters				
Project : SP_FachadaLeste				
Geographical Site		São Paulo	Country	Brazil
Situation		Latitude 23.6°S	Longitude	46.6°W
Time defined as		Legal Time	Time zone UT-3	Altitude 760 m
		Albedo	0.20	
Meteo data:		São Paulo	Synthetic - Meteonorm 7.1	
Simulation variant : New simulation variant				
Simulation date 10/04/15 17h00				
Simulation parameters				
Collector Plane Orientation		Tilt 90°	Azimuth -90°	
Models used		Transposition Perez	Diffuse Erbs, Meteonorm	
Horizon		Free Horizon		
Near Shadings		No Shadings		
PV Array Characteristics				
PV module		a-Si:H tandem	Model	ASI THRU-4-L 10%
		Manufacturer	Schott Solar AG	
Number of PV modules		In series 3 modules	In parallel	190 strings
Total number of PV modules		Nb. modules 570	Unit Nom. Power	156 Wp
Array global power		Nominal (STC) 88.9 kWp	At operating cond.	84.2 kWp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)		U mpp 240 V	I mpp	352 A
Total area		Module area	1671 m²	
Inverter		Model	CL 44.4 Delta / 240	
		Manufacturer	Fronius USA	
Characteristics		Operating Voltage 230-500 V	Unit Nom. Power	44.4 kWac
Inverter pack		Nb. of inverters 2 units	Total Power	89 kWac
PV Array loss factors				
Thermal Loss factor		Uc (const) 20.0 W/m²K	Uv (wind)	0.0 W/m²K / m/s
Wiring Ohmic Loss		Global array res. 11 mOhm	Loss Fraction	1.5 % at STC
Module Quality Loss			Loss Fraction	5.0 %
Module Mismatch Losses			Loss Fraction	0.8 % at MPP
Incidence effect, ASHRAE parametrization		TM = 1 - bo (1/cos i - 1)	bo Param.	0.05
User's needs :		Unlimited load (grid)		

PVsyst Evaluation mode

Figura B7 – Relatório PVsyst para geração fotovoltaica na fachada leste (1/3)

Figura B8 – Relatório PVSyst para geração fotovoltaica na fachada leste (2/3)

Figura B9 – Relatório PVSyst para geração fotovoltaica na fachada leste (3/3)

PVSYST V6.35			10/04/15	Page 1/3
Grid-Connected System: Simulation parameters				
Project : SP_FachadaOeste				
Geographical Site		São Paulo	Country Brazil	
Situation		Latitude 23.6°S	Longitude 46.6°W	
Time defined as		Legal Time	Time zone UT-3	Altitude 760 m
		Albedo 0.20		
Meteo data:		São Paulo Synthetic - Meteonorm 7.1		
Simulation variant : New simulation variant				
Simulation date 10/04/15 17h05				
Simulation parameters				
Collector Plane Orientation		Tilt 90°	Azimuth 90°	
Models used		Transposition Perez	Diffuse Erbs, Meteonorm	
Horizon		Free Horizon		
Near Shadings		No Shadings		
PV Array Characteristics				
PV module	a-Si:H tandem	Model	ASI THRU-4-L 10%	
		Manufacturer	Schott Solar AG	
Number of PV modules	In series	3 modules	In parallel	190 strings
Total number of PV modules	Nb. modules	570	Unit Nom. Power	156 Wp
Array global power	Nominal (STC)	88.9 kWp		
Array operating characteristics (50°C)	U mpp	240 V	I mpp	352 A
Total area	Module area	1671 m²		
Inverter		Model	CL 44.4 Delta / 240	
		Manufacturer	Fronius USA	
Characteristics	Operating Voltage	230-500 V	Unit Nom. Power	44.4 kWac
Inverter pack	Nb. of inverters	2 units	Total Power	89 kWac
PV Array loss factors				
Thermal Loss factor	Uc (const)	20.0 W/m²K	Uv (wind)	0.0 W/m²K / m/s
Wiring Ohmic Loss	Global array res.	11 mOhm	Loss Fraction	1.5 % at STC
Module Quality Loss			Loss Fraction	5.0 %
Module Mismatch Losses			Loss Fraction	0.8 % at MPP
Incidence effect, ASHRAE parametrization	AM = 1 - bo (1/cos i - 1)	bo Param.	0.05	
User's needs :		Unlimited load (grid)		

PVsyst Evaluation mode

Figura B10 – Relatório PVsyst para geração fotovoltaica na fachada oeste (1/3)

Figura B11 – Relatório PVsystr para geração fotovoltaica na fachada oeste (2/3)

Figura A12 – Relatório PVsyst para geração fotovoltaica na fachada oeste (3/3)

PVSYST V6.35			10/04/15	Page 1/3
Grid-Connected System: Simulation parameters				
Project : SP_FachadaSul				
Geographical Site		São Paulo	Country Brazil	
Situation		Latitude 23.6°S	Longitude 46.6°W	
Time defined as		Legal Time	Time zone UT-3	Altitude 760 m
		Albedo 0.20		
Meteo data:		São Paulo	Synthetic - Meteonom 7.1	
Simulation variant : New simulation variant				
Simulation date 10/04/15 16h54				
Simulation parameters				
Collector Plane Orientation		Tilt 90°	Azimuth 180°	
Models used		Transposition Perez	Diffuse Erbs, Meteonom	
Horizon		Free Horizon		
Near Shadings		No Shadings		
PV Array Characteristics				
PV module		a-Si:H tandem	Model	ASI THRU-4-L 10%
		Manufacturer	Schott Solar AG	
Number of PV modules		In series 3 modules	In parallel	190 strings
Total number of PV modules		Nb. modules 570	Unit Nom. Power	156 Wp
Array global power		Nominal (STC) 88.9 kWp	At operating cond.	84.2 kWp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)		U mpp 240 V	I mpp	352 A
Total area		Module area	1671 m²	
Inverter				
		Model	CL 44.4 Delta / 240	
		Manufacturer	Fronius USA	
Characteristics		Operating Voltage	230-500 V	Unit Nom. Power 44.4 kWac
Inverter pack		Nb. of inverters	1 units	Total Power 44 kWac
PV Array loss factors				
Thermal Loss factor		Uc (const) 20.0 W/m²K	Uv (wind)	0.0 W/m²K / m/s
Wiring Ohmic Loss		Global array res. 11 mOhm	Loss Fraction	1.5 % at STC
Module Quality Loss			Loss Fraction	5.0 %
Module Mismatch Losses			Loss Fraction	0.8 % at MPP
Incidence effect, ASHRAE parametrization		AM = 1 - bo (1/cos i - 1)	bo Param.	0.05
User's needs : Unlimited load (grid)				

PVsyst Evaluation mode

Figura A13 – Relatório PVsyst para geração fotovoltaica na fachada sul (1/3)

Figura A14 – Relatório PVsyst para geração fotovoltaica na fachada sul (2/3)

Figura A15 – Relatório PVsyst para geração fotovoltaica na fachada sul (3/3)

ANEXOS

- ANEXO A** Croquis das diferentes tipologias arquitetônicas
- ANEXO B** Especificações do vidro fotovoltaico

ANEXO A - Croquis das diferentes tipologias arquitetônicas

Figura 1 - Edificação tradicional, pavimento tipo. Escala 1:25, cotas em milímetros.

PISO TÉRREO COM SUBSOLO

PISO TÉRREO SEM SUBSOLO

COBERTURA ÚLTIMO PAVIMENTO

Figura 2 - Edificação tradicional, diferenças entre pisos. Escala 1:25, cotas em milímetros.

Figura 3 - Edificação de transição, pavimento tipo. Escala 1:25, cotas em milímetros.

PISO TÉRREO COM SUBSOLO

PISO TÉRREO SEM SUBSOLO

COBERTURA ÚLTIMO PAVIMENTO

Figura 4 - Edificação de transição, diferenças entre pisos. Escala 1:25, cotas em milímetros.

Figura 5 - Edificação contemporânea, pavimento tipo. Escala 1:25, cotas em milímetros.

Figura 6 - Edificação contemporânea, diferenças entre pisos. Escala 1:25, cotas em milímetros.

ANEXO B - Especificações do vidro fotovoltaico

SOLGLASS e (3+3)

PROPIEDADES DEL LAMINADO	GRADOS DE TRANSPARENCIA ESTÁNDAR DISPONIBLES				
	0%	10%	20%	30%	SOLGLASS e 40%
REACCIÓN AL FUEGO	B-s1,d0	B-s1,d0	B-s1,d0	B-s1,d0	B-s1,d0
RESISTENCIA AL IMPACTO DE CUERPO BLANDO	2(B)2	2(B)2	2(B)2	2(B)2	2(B)2
RESISTENCIA A LA EFRACCIÓN	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD
ATENUACIÓN ACÚSTICA (dB)	32(-1;-3)	32(-1;-3)	32(-1;-3)	32(-1;-3)	32(-1;-3)
TRANSMISIÓN LUMINOSA	0,2%	10,8%	17,3%	28,4%	36,6%
REFLEXIÓN LUMINOSA (CARA FOTOACTIVA)	7,6%	8,3%	7,6%	8,2%	8,3%
REFLEXIÓN LUMINOSA (CARA INTERNA)	61,0%	52,9%	47,8%	37,9%	32,1%
TRANSMISIÓN UV	0,0%	1,5%	1,5%	4,7%	5,1%
TRANSMISIÓN SOLAR	0,2%	9,4%	15,0%	24,3%	31,7%
REFLEXIÓN SOLAR (CARA FOTOACTIVA)	14,8%	13,9%	11,1%	12,4%	11,6%
REFLEXIÓN SOLAR (CARA INTERNA)	60,0%	52,2%	46,7%	37,9%	31,9%
FACTOR SOLAR (g)	22,0%	29,0%	34,0%	41,0%	46,0%
TRANSMITANCIA TÉRMICA (valor U) (W/m² K)	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
POTENCIA PICO (Wp/m²)	62,0	49,4	43,0	35,4	26,6
PESO ESPECÍFICO (Kg/m²)	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS (STC)* PARA 1.245x635 mm.	0%	10%	20%	30%	SOLGLASS e 40%
POTENCIA NOMINAL Inicial **	56 Wp - 60 Wp	39 Wp - 43 Wp	34 Wp - 37 Wp	28 Wp - 31 Wp	21 Wp - 24 Wp
POTENCIA MÁXIMA, P _{mp}	49 ± 5%	35 ± 5%	30 ± 5%	25 ± 5%	20 ± 5%
TENSIÓN MÁXIMA POTENCIA, V _{mp} (V)	51,70	45	45	45	45
INTENSIDAD MÁXIMA POTENCIA, I _{mp} (A)	0,95	0,77	0,68	0,56	0,44
TENSIÓN CIRCUITO ABIERTO, V _{oc} (V)	64,50	59,5	59,5	59,5	59,5
INTENSIDAD DE CORTOCIRCUITO, I _{sc} (A)	1,050	0,89	0,79	0,64	0,52
COEFICIENTE TEMPERATURA, P _{mp}	-0,19% / °C				
COEFICIENTE TEMPERATURA, V _{oc}	-0,28% / °C				
COEFICIENTE TEMPERATURA, I _{sc}	+0,09% / °C				
TENSIÓN MÁXIMA DEL SISTEMA, V _{sys}	1.000				
TEMPERATURA DE OPERACIÓN, T _c	-40 °C...+85°C				

CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS	
TIPO CÉLULA FOTOVOLTAICA	Células a-Si / a-Si en tándem
VIDRIO FRONTAL	N/A
ENCAPSULANTE FRONTAL	N/A
VIDRIO FOTOVOLTAICO	Float glass 3,2 mm
ENCAPSULANTE TRASERO	EVA 0,45 mm
VIDRIO TRASERO	Float glass 3,2 mm
DIMENSIÓN MÍNIMA	300 x 300 mm
DIMENSIÓN MÁXIMA	1.245 x 635 mm

CAJA DE CONEXIONES	
PROTECCIÓN	IP65
CONECTORES	MC4 o compatible
SECCIÓN CABLE	2,5 mm²
LONGITUD CABLE	(según proyecto)
GARANTÍAS	
GARANTÍA DE FABRICACIÓN	5 años
GARANTÍA DE POTENCIA	90% (10 años), 80% (25 años)