

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUIS FELIPE BENEDITO

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA SINALIZAÇÃO SEMAFÓRICA DE
PATO BRANCO UTILIZANDO SISTEMAS LED E GERAÇÃO FOTOVOLTAICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2016

LUIS FELIPE BENEDITO

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA SINALIZAÇÃO
SEMAFÓRICA DE PATO BRANCO UTILIZANDO SISTEMAS LED E
GERAÇÃO FOTOVOLTAICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Elétrica – DAELE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Géremi Gilson Dranka

PATO BRANCO

2016

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado “**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA SINALIZAÇÃO SEMAFÓRICA DE PATO BRANCO UTILIZANDO SISTEMAS LED E GERAÇÃO FOTOVOLTAICA**”, do acadêmico **LUIS FELIPE BENEDITO** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora **Nº 126** de 2016.

Fizeram parte da banca os professores:

Géremi Gilson Dranka

Alexandre Batista de Jesus Soares

César Augusto Portolann

A Ata de Defesa assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

Aos meus pais, Luiz Claudio e Rosa Maria, pelos esforços, incentivo, suporte e motivação que conduziram para minha educação formal.

Ao meu irmão e amigos pelas experiências compartilhadas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, especialmente aos meus pais e irmão, pelos ensinamentos, pela confiança e pelo apoio incondicional para realização dos meus objetivos.

Ao meu orientador Prof. Géremi Gilson Dranka, pela disponibilidade, apoio, dedicação, sugestões e opiniões na orientação desse trabalho.

Ao Prof. Alexandre Batista de Jesus Soares e Prof. César Augusto Portolann que, através de sugestões e opiniões, contribuíram para o desenvolvimento do estudo.

Aos amigos e colegas pelo conhecimento compartilhado e pelas experiências vividas.

A persistência é o menor caminho do êxito. (Charles Chaplin)

RESUMO

BENEDITO, Luis Felipe. Análise da eficiência energética na sinalização semafórica de Pato Branco utilizando sistemas LED e geração fotovoltaica. 2016. 121 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

Este trabalho apresenta o dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição para fornecimento de energia elétrica para o sistema semafórico da cidade de Pato Branco utilizando tecnologia LED e analisa a viabilidade econômica da sua implementação considerando o tempo de retorno do investimento (*Payback*) e valor presente líquido (VPL). Para tanto, o estudo aborda algumas características básicas dos componentes utilizados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Além disso, a partir do ambiente de desenvolvimento GUIDE do *software* Matlab®, iniciou-se o desenvolvimento de uma interface gráfica para auxílio na análise da viabilidade econômica de projetos de sistemas semafóricos com tecnologia LED alimentados com energia fotovoltaica.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica, Geração distribuída, Sistema semafórico, Eficiência energética, LED.

ABSTRACT

BENEDITO, Luis Felipe. Analysis of energy efficiency in traffic signs of the Pato Branco using LED systems and photovoltaic generation. 2016. 121 p. Completion of course work – Electrical Engineering course, Federal Technology University of Paraná. Pato Branco, 2016.

This paper presents the design of a photovoltaic system connected to the grid to supply electricity to the traffic signal system of the city of Pato Branco and analyzes the economic feasibility of its implementation considering the time of return on investment (Payback) and net present value (VPL). For achieve this purpose, the study addresses some basic characteristics of the components used in photovoltaic systems connected to the grid. In addition, from the GUIDE development environment of Matlab® software, a graphic interface was developed to aid in the economic feasibility analysis of photovoltaic LED based light signaling systems.

Keywords: Photovoltaic solar energy, Distributed generation, Traffic signal system, Energy efficiency, LED.

LISTA DE SIGLAS

ABESCO	Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia
AIS	Ativo Imobilizado dm Serviço
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEM	Balanço Energético Nacional
BIG	Banco de Informações de Geração
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito
CTB	Código Brasileiro de Trânsito
DETRAN	Departamento de Trânsito
EVA	<i>Ethylene Vinyl Acetate</i>
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FNP	Frente Nacional dos Prefeitos
GD	Geração Distribuída
GUIDE	<i>Graphical User Interface Development Environment</i>
HSP	Horas de Sol Pleno
IBC	Índice de Benefício/Custo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
ROIA	Retorno Adicional Sobre o Investimento
SAVEPI	Sistema de Análise de Viabilidade Econômica de Projetos de Investimentos

SELIC	Sistema Especial de Liquidação e de Custódia
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SFCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede
SFI	Sistemas Fotovoltaicos Isolados
SIN	Sistema Interligado Nacional
TEP	Toneladas Equivalentes de Petróleo
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
VPL	Valor Presente Líquido
VPLA	Valor Presente Líquido Anualizado

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução acumulada do PIB e do consumo de energia elétrica no Brasil.	10
Figura 2 - Consumo de eletricidade por setor no Brasil.	11
Figura 3 - Matriz de energia elétrica brasileira.	12
Figura 4 - Diagrama de bloco do sistema proposto.	16
Figura 5 - Principais configurações de sistemas semaforicos.....	23
Figura 6 - Participação de fontes renováveis na matriz energética mundial.	31
Figura 7 - Dez maiores incrementos na capacidade instalada de energia fotovoltaica em 2015.....	34
Figura 8 - Produção mundial de células fotovoltaicas.	35
Figura 9 - Projeção do crescimento da capacidade instalada e custos até 2050.	35
Figura 10 - Células fotovoltaicas de silício monocristalino, policristalino e amorfo. ..	37
Figura 11 - Resposta espectral para várias tecnologias fotovoltaicas.	38
Figura 12 - Associações de células e módulos fotovoltaicos.	39
Figura 13 - Componentes de um módulo fotovoltaico com células de silício cristalino.	40
Figura 14 - Elementos constituintes dos focos semaforicos com (a) LED e (b) lâmpada incandescente.	43
Figura 15 - Exemplos de anteparos com orla.	44
Figura 16 - Principais componentes da sinalização semaforica.	45
Figura 17 - Exemplo de diagrama de estágio.	46
Figura 18 - Exemplo de diagrama de intervalos luminosos.	46
Figura 19 - Radiação solar global diária, média mensal (MJ/m ² .dia)	53
Figura 20 - Perfis de radiação solar diária e equivalentes em HSP.	54
Figura 21 - Exemplo de curva de carga para uma comunidade da Amazônia.	56
Figura 22 - Exemplo de correção da declinação magnética.....	62
Figura 23 - Plano semaforico adotado para análise.	65
Figura 24 - Semáforo convencional instalado no cruzamento entre as ruas Itabira e Aimoré.....	66
Figura 25 - Semáforo de LED instalado no cruzamento entre as ruas Itabira e Tocantins.....	67
Figura 26 - Controlador semaforico instalado no cruzamento entre a Avenida Tupi e a rua Itabira.	68

Figura 27 - Estrutura da interface gráfica.	98
Figura 28 - Fluxograma dos processos realizados pela interface gráfica.	99
Figura 29 - Interface gráfica para auxílio nos projetos de análise da viabilidade econômica de sistemas semafóricos alimentados com energia fotovoltaica.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo de eletricidade por setor no Brasil (TWh).	12
Tabela 2 - Custo entre as tecnologias de energias renováveis.	29
Tabela 3 - Consumo mundial de energia elétrica e emissão de CO ₂	30
Tabela 4 - Comparação da eficiência energética das diversas tecnologias de células fotovoltaicas.	38
Tabela 5 - Irradiação Solar no Plano Horizontal para localidades próximas a Pato Branco (kWh/m ² .dia).	63
Tabela 6 - Irradiação Solar no Plano Inclinado para Xanxerê/SC (kWh/m ² .dia).	64
Tabela 7 - Irradiação Solar no Plano Inclinado para Chapecó/SC (kWh/m ² .dia).	64
Tabela 8 - Irradiação Solar no Plano Inclinado para Palmas/PR (kWh/m ² .dia).	64
Tabela 9 - Consumo de um grupo focal com lâmpadas incandescentes.	69
Tabela 10 - Consumo de um grupo focal com tecnologia LED.	69
Tabela 11 - Consumo controlador semafórico.	69
Tabela 12 - Consumo para um cruzamento de 4 vias sinalizado com semáforo convencional.	70
Tabela 13 - Consumo para um cruzamento de 4 vias sinalizado com semáforo LED.	70
Tabela 14 - Consumo de cada semáforo LED durante período de 5 horas.	75
Tabela 15 - Tarifa para clientes do subgrupo B4a e B4b enquadrados na modalidade tarifária convencional.	77
Tabela 16 - Consumo anual do sistema semafórico de Pato Branco.	78
Tabela 17 - Cálculo do VPL para substituição dos semáforos convencionais por semáforos LED.	78
Tabela 18 - Cálculo do <i>payback</i> da substituição dos semáforos convencionais por semáforos LED.	79
Tabela 19 - Investimento inicial do projeto.	80
Tabela 20 - Valores do inversor de frequência transferidos para o tempo presente.	81
Tabela 21 - Valores da bateria estacionária transferidos para o tempo presente.	81
Tabela 22 - Valores do controlador de carga transferidos para o tempo presente.	81
Tabela 23 - Investimento necessário para fornecimento integral de energia solar com banco de baterias.	82

Tabela 24 - Economia anual por cruzamento com uso de semáforos LED e energia solar fotovoltaica.	82
Tabela 25 - Taxa de variação da tarifa de energia elétrica distribuída pela Copel. ...	83
Tabela 26 - Cálculo do VPL para o sistema fotovoltaico com fornecimento integral e com auxílio de um banco de baterias com autonomia de 4 horas.	84
Tabela 27 - Cálculo do <i>payback</i> para o sistema fotovoltaico com fornecimento integral e com auxílio de um banco de baterias com autonomia de 4 horas.	85
Tabela 28 - Investimento inicial do projeto de um sistema fotovoltaico para fornecimento de energia solar durante 5 horas e auxiliado por um banco de baterias com autonomia de 3 horas.	86
Tabela 29 - Investimento necessário para implementação de um sistema fotovoltaico com fornecimento de energia durante 5 horas e auxiliado por um banco de baterias com autonomia de 3 horas.	87
Tabela 30 - Energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico para fornecimento de energia solar durante 5 horas.	87
Tabela 31 - Cálculo do VPL para o sistema de geração fotovoltaica com fornecimento parcial de energia solar e com banco de baterias.	88
Tabela 32 - Cálculo do <i>payback</i> para o sistema de geração fotovoltaica com fornecimento parcial de energia solar e com banco de baterias.	89
Tabela 33 - Investimento inicial para o projeto com geração fotovoltaica parcial sem auxílio de baterias.	90
Tabela 34 - Cálculo do VPL para o sistema de geração fotovoltaica com fornecimento parcial de energia solar sem banco de baterias.	90
Tabela 35 - Cálculo do <i>Payback</i> para o sistema de geração fotovoltaica com fornecimento parcial de energia solar sem banco de baterias.	91
Tabela 36 - Cálculo do VPL para o sistema fotovoltaico com fornecimento integral e com auxílio de um banco de baterias com autonomia de 4 horas para atendimento do sistema semafórico LED.	92
Tabela 37 - Cálculo do <i>payback</i> para o sistema fotovoltaico com fornecimento integral e com auxílio de um banco de baterias com autonomia de 4 horas para atendimento do sistema semafórico LED.	93
Tabela 38 - Cálculo do VPL para o sistema fotovoltaico com fornecimento parcial e com auxílio de um banco de baterias com autonomia de 3 horas para atendimento do sistema semafórico LED.	94

Tabela 39 - Cálculo do <i>payback</i> para o sistema fotovoltaico com fornecimento parcial e com auxílio de um banco de baterias com autonomia de 3 horas para atendimento do sistema semafórico LED.	95
Tabela 40 - Cálculo do VPL para o sistema fotovoltaico com fornecimento parcial durante 5 horas para atendimento do sistema semafórico LED.	96
Tabela 41 - Cálculo do <i>payback</i> para o sistema fotovoltaico com fornecimento parcial durante 5 horas para atendimento do sistema semafórico LED.	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características do módulo Yingli Solar YL150P 150W.	72
Quadro 2 - Características do inversor de frequência Unitron iVolt 700W.....	72
Quadro 3 - Características da bateria Freedom DF2000 com capacidade de 105 Ah.	73
Quadro 4 - Características do controlador de carga Schneider Xandrex C35 35A. ..	74
Quadro 5 - Características do inversor de frequência Slocable IP67-300W-100.	75
Quadro 6 - Característica da bateria Freedom DF500 com 36 Ah.	76
Quadro 7 - Controlador de carga Epsolar Landstar LS1024E.	76
Quadro 8 - Projeção de custo por Wp.	84
Quadro 9 - Custo fixo por cruzamento.	84
Quadro 10 - Custo fixo para o estudo de caso B.	88

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. JUSTIFICATIVA	16
1.2. OBJETIVO GERAL	19
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2. REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1. ENERGIAS RENOVÁVEIS	24
2.2. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	31
2.2.1.1. Células e Módulos Fotovoltaicos.....	36
2.3. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	40
2.4. SISTEMAS SEMAFÓRICOS	41
2.4.1. Controle e Operação do Semáforo	45
2.5. ANÁLISE DE INVESTIMENTOS.....	47
2.5.1. Indicadores Financeiros para Análise de Projetos de Investimentos	48
2.5.1.1. Taxa Mínima de Atratividade (TMA)	49
2.5.1.2. Valor Presente Líquido (VPL)	49
2.5.1.3. Período de Recuperação do Investimento (<i>Payback</i>)	50
3. METODOLOGIA	52
3.1. ANÁLISE DO RECURSO SOLAR	52
3.2. CONSUMO DO SISTEMA SEMAFÓRICO	55
3.3. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	56
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1. LEVANTAMENTO DO RECURSO SOLAR	63
4.2. LEVANTAMENTO DA CURVA DE CARGA DO SISTEMA SEMAFÓRICO.....	65
4.3. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	70
4.3.1. Estudo de Caso A	70
4.3.2. Estudo de Caso B	71
4.3.3. Estudo de Caso C	74
4.3.4. Estudo de Caso D	76
4.4. ANÁLISE ECONÔMICA	77

4.4.1. Análise do Estudo de Caso A.....	77
4.4.2. Análise do Estudo de Caso B.....	80
4.4.3. Análise do Estudo de Caso C	86
4.4.4. Análise do Estudo de Caso D	90
4.4.5. Análise do Estudo de Caso B Aplicado ao Estudo de Caso A	92
4.4.6. Análise do Estudo de Caso C Aplicado ao Estudo de Caso A	94
4.4.7. Análise do Estudo de Caso D Aplicado ao Estudo de Caso A	95
5. SOFTWARE PARA ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA	98
6. CONCLUSÕES	102

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da humanidade está intimamente relacionado ao uso da energia elétrica, sendo este recurso fundamental para o desenvolvimento dos mais variados setores da economia, incluindo o setor residencial, industrial, comercial, transporte, iluminação pública, entre outros (BRAZIL ENERGY, [2012?]). De acordo com Rios, Teixeira e Akamatsu (2006), “o aumento da demanda de energia é um processo natural e irreversível baseado no crescimento populacional, na busca da melhoria da qualidade de vida das populações, e na democratização da energia”.

Nesse contexto, verifica-se que o aumento do consumo de energia elétrica está diretamente relacionado com o crescimento de um país conforme ilustra a Figura 1, em que é possível observar a evolução acumulada do Produto Interno Bruto (PIB) em função do consumo de energia elétrica no Brasil. A Figura 1 mostra que a tendência é que, quanto maior o consumo de energia elétrica, maior é o PIB de um país e, conseqüentemente, maior é o seu poder econômico (BRAZIL ENERGY, [2012?]).

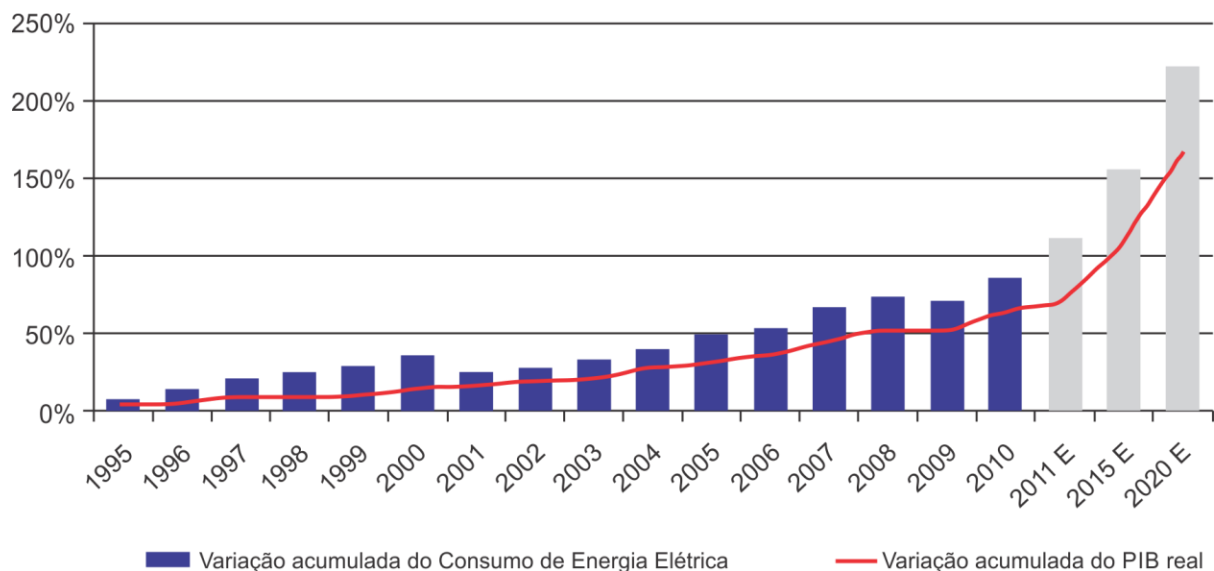


Figura 1 - Evolução acumulada do PIB e do consumo de energia elétrica no Brasil.
Fonte: Extraído de Brazil Energy (2016).

Em 2014, a oferta de energia no país aumentou o equivalente a 3,1%, atingindo uma demanda de 305,6 milhões de tep¹ enquanto o PIB brasileiro aumentou

¹ Tonelada equivalente de petróleo. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), a tep é uma unidade de energia utilizada na comparação do poder calorífico de diferentes formas

0,1% (EPE, 2015b). No contexto da energia elétrica, a oferta mundial foi de 23.782 TWh, enquanto a oferta brasileira atingiu 624 TWh (MME, 2015). Contudo, nos últimos anos, o baixo crescimento econômico verificado no Brasil não foi correspondente à evolução na oferta de energia elétrica (ABEEÓLICA, 2015).

Estima-se que a demanda de energia elétrica brasileira deverá crescer a uma taxa de 4,1% ao ano, atingindo um consumo de 786 TWh em 2024, o que representará um aumento de aproximadamente 50% em relação ao ano de 2014 em que o consumo foi de 525 TWh (EPE, 2015d). Esse aumento expressivo no consumo de energia elétrica exigirá altos investimentos na ampliação da oferta de energia elétrica (BRONZATTI; NETO, 2008). De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN), verifica-se que vários setores da economia têm apresentado aumento no consumo de energia elétrica, como mostra a Figura 2 (EPE, 2015c).

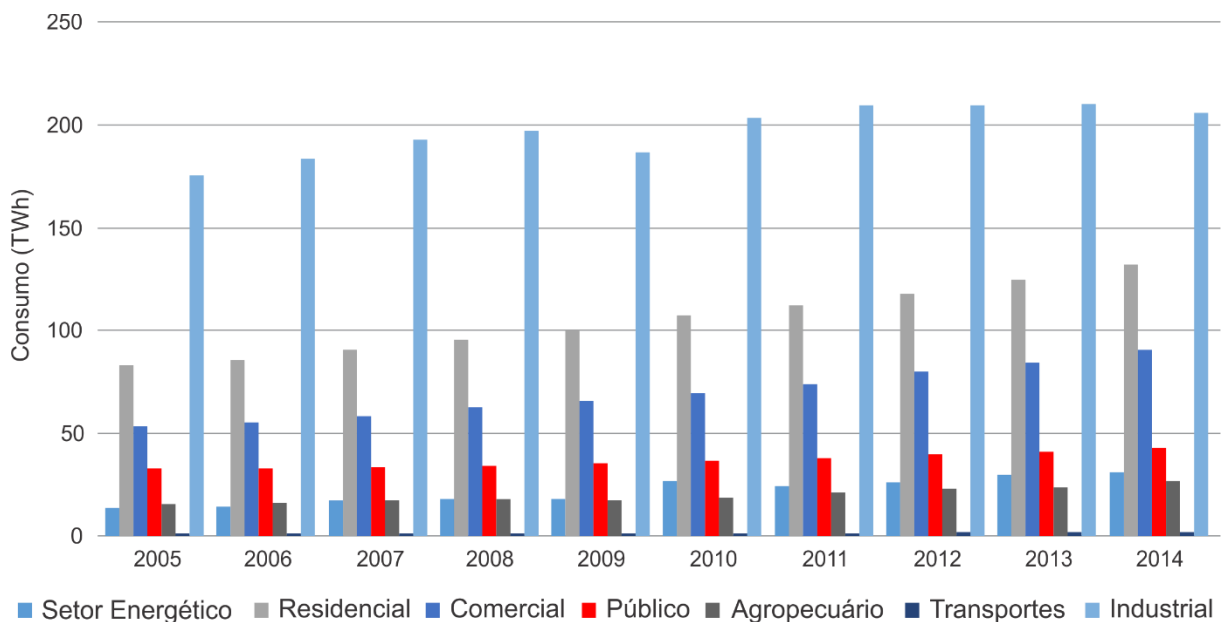


Figura 2 - Consumo de eletricidade por setor no Brasil.

Fonte: Adaptado de BEN (2015).

A Tabela 1 mostra o aumento no consumo de energia elétrica nos diversos setores da economia do Brasil. No setor público, o aumento no consumo de eletricidade foi de aproximadamente 9,92 TWh entre os anos de 2005 e 2014 (EPE, 2015c).

de energia com o petróleo. Uma tep corresponde à energia que se pode obter a partir de uma tonelada de petróleo padrão (ANEEL, 2008, p. 143).

Tabela 1 - Consumo de eletricidade por setor no Brasil (TWh).

Setor	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Energético	13,53	14,57	17,27	18,40	18,15	26,84	24,22	26,35	29,72	31,16
Residencial	83,19	85,81	90,88	95,59	100,64	107,22	111,97	117,65	124,90	132,05
Comercial	53,49	55,22	58,54	62,50	65,98	69,72	74,06	79,80	84,40	90,62
Público	32,73	33,05	33,72	34,55	35,25	36,98	38,17	39,82	41,33	42,65
Agropecuário	15,69	16,42	17,54	18,40	17,68	18,94	21,46	23,27	23,79	26,74
Transportes	1,19	1,46	1,58	1,61	1,59	1,66	1,70	1,89	1,88	1,94
Industrial	175,37	183,42	192,62	197,22	186,74	203,35	209,39	209,62	210,16	205,93

Fonte: Adaptado de BEN (2015).

Conforme o BEN 2015, 74,6% da matriz elétrica brasileira é composta por fontes renováveis, em que 65,2% correspondem a geração hidrelétrica conforme ilustra a Figura 3 (EPE, 2015b).

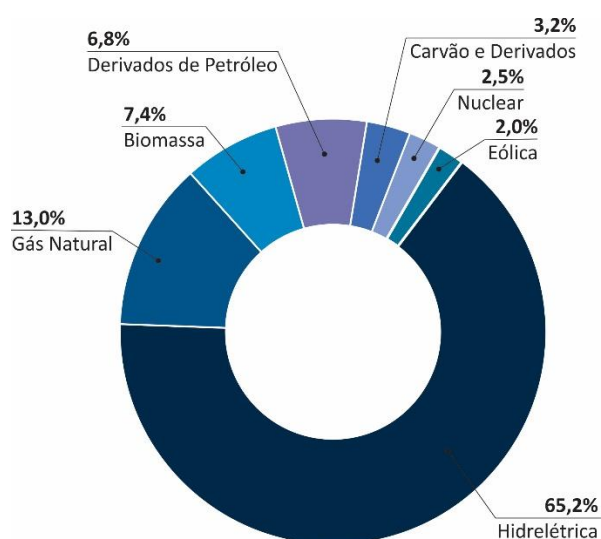


Figura 3 - Matriz de energia elétrica brasileira.

Fonte: Adaptado de BEN (2015).

No Brasil, a iluminação pública representou no ano de 2014 aproximadamente 3% do consumo de energia elétrica (14 TWh) (EPE, 2015a). Isso significa que o estudo adequado da luminotécnica² se faz importante como instrumento de aplicação da eficiência energética (PÓVOA, 2014).

A iluminação pública bem administrada contribui para a qualidade de vida da população e, conseqüentemente, permite que os cidadãos utilizem os espaços e

² Luminotécnica é o estudo minucioso das técnicas das fontes de iluminação artificial, através da energia elétrica (FREITAS, 2009, p. 5).

vias públicas com segurança e tranquilidade durante a noite (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2013).

Nesse sentido, destaca-se que a qualidade da energia elétrica, a continuidade de fornecimento e a eficiência energética são os principais fatores que as concessionárias de energia elétrica concentram suas pesquisas e investimentos, sendo que a aplicação da tecnologia LED (do inglês, *Light Emitting Diode*), concebido através de materiais semicondutores com capacidade de transformar energia elétrica em luz através do fenômeno da eletroluminescência, pode contribuir significativamente na redução do consumo de energia elétrica em sistemas de iluminação pública (GIANELLI *et al.*, [2009]; SALES, 2011).

Entretanto, durante muito tempo, os LEDs foram utilizados com a única função de indicar o status (ligado/desligado) dos eletrodomésticos. Recentemente, a tecnologia LED tem sido empregada na sinalização, em sistemas de iluminação de emergência e sistemas semafóricos, em substituição às tradicionais lâmpadas incandescentes (RIBEIRO *et al.*, 2012).

O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), criado em 1985, é um programa do governo federal que tem como objetivo promover o uso eficiente da energia elétrica e combater o seu desperdício. Ainda, por meio do subprograma Procel Reluz, promove o desenvolvimento de sistemas de iluminação pública e sinalização semafórica, contribuindo para a redução do consumo de energia elétrica e, conseqüentemente, melhorias são verificadas nas condições de segurança de vias públicas e a qualidade de vida nas cidades brasileiras (ELETROBRAS, 2015a). O Procel Reluz realiza projetos de melhoria, expansão e remodelagem dos sistemas de iluminação pública, melhoria dos sistemas de sinalização semafórica, iluminação especial (praças, monumentos, fachadas, etc.), iluminação de espaços públicos esportivos e inovação tecnológica na iluminação pública (PROCEL, [200-?]). Basicamente, o desenvolvimento dos sistemas é realizado por meio da substituição de lâmpadas incandescentes, mistas e a vapor de mercúrio, luminárias e outros equipamentos, por modelos com tecnologia mais eficiente, que resultam no aumento da durabilidade, na melhoria da iluminação e menor consumo de eletricidade. No caso da sinalização semafórica, substituem-se as lâmpadas incandescentes por sistemas que utilizam tecnologia LED, com maior eficiência, maior vida útil e consumo de energia de até 90% inferior à tecnologia de lâmpada incandescente utilizada nos semáforos convencionais (ELETROBRAS, 2015a).

Os semáforos dependem essencialmente de uma fonte de energia elétrica e de uma fonte luminosa para funcionamento. No caso dos sistemas de semáforos tradicionais, que utilizam lâmpadas incandescentes com filamento de tungstênio, além da baixa eficiência, a existência de um único filamento resulta em manutenções frequentes e no aumento de incidentes no trânsito devido a inatividade da lâmpada avariada. Nessas situações, o sistema pode ficar comprometido, funcionando de forma inadequada e piscando no amarelo de forma intermitente indicando falha da sinalização (PINTO, 2012). Nos módulos semaforicos baseados na tecnologia LED utilizam-se placas de circuito impresso nas quais são fixados vários LEDs (LIMA *et al.*, 2008).

Portanto, a substituição das lâmpadas incandescentes pela tecnologia LED possibilita que os problemas com queima do filamento de tungstênio das lâmpadas incandescentes sejam eliminados, tornando o sistema mais seguro, uma vez que a falha de um dos LEDs não compromete o funcionamento do sistema, pois a sinalização continua sendo realizada pelos demais LEDs do conjunto (LIMA *et al.*, 2008; PINTO, 2012). Nos semáforos tradicionais, baseados na tecnologia de lâmpadas incandescentes, quando a lâmpada apresenta defeito, o resultado é a ausência completa da indicação luminosa (LIMA *et al.*, 2008).

Nesse sentido, os LEDs constituem uma alternativa que apresenta inúmeros benefícios relacionados às questões de eficiência energética. Os LEDs possuem várias vantagens, dentre elas, pode-se destacar a longa durabilidade, alta eficiência luminosa, variedade de cores, dimensões reduzidas, baixo consumo de energia e pouca dissipação de calor (LIMA *et al.*, 2008). Pinto (2012) destaca a vantagem do sistema LED apresentar índice de reflexão da luz solar 50% menor em relação ao sistema convencional de lâmpadas incandescentes, eliminando a percepção de que o semáforo está aceso quando na realidade não está, implicando no aumento da segurança e na diminuição de acidentes no trânsito.

Semáforos com tecnologia LED alimentados com energia solar se tornaram uma realidade a nível mundial, embora ainda em pequena escala. Em 2001, foi instalado na Grã-Bretanha, o primeiro semáforo alimentado com energia solar no mundo. Através do banco de baterias, o sistema é capaz de operar de forma autônoma durante o período de até 5 dias (LESSA, 2001). Na cidade de Loures, em Portugal, foram instalados semáforos alimentados a energia solar em alguns pontos da cidade (REVISTA LOURES MUNICIPAL, 2006). No Brasil, vários projetos estão operando

em fase de teste e até mesmo leis que promovem o desenvolvimento voltado para o aumento da eficiência energética e conservação de energia dos sistemas semafóricos estão sendo criadas por algumas prefeituras (PROJETO..., 2014).

Em 2011, foi testado um novo modelo de semáforo em São Carlos, cidade do interior paulista. O projeto, coordenado por Luís Fernando Bettio Galli, propôs integrar três formas distintas de alimentação do sistema. A prioridade era operar o sistema apenas com energia solar proveniente do sistema fotovoltaico, sua principal fonte de energia. Diante da eventual baixa intensidade de radiação solar da região, caso necessário, o sistema utiliza a energia elétrica diretamente da rede de distribuição. Caso a intensidade de radiação solar seja baixa e ocorra a interrupção do fornecimento de energia elétrica proveniente da rede elétrica, o sistema passa a utilizar um banco de baterias como fonte de energia (ALISSON, 2011).

Considerando as características favoráveis à geração fotovoltaica citadas anteriormente, destaca-se que na ausência do fornecimento de energia elétrica pela rede de distribuição, torna-se possível ainda realizar a alimentação do sistema semafórico através de painéis fotovoltaicos utilizando um banco de baterias como complemento, tendo como resultado, a economia de energia e a garantia de funcionamento do sistema em caso de falta de energia elétrica no sistema (GODOI, 2011; LIMA *et al.*, 2008).

Diante do exposto, o estudo proposto neste trabalho tem por principal objetivo analisar a viabilidade técnica e econômica da substituição do sistema de semáforos da cidade de Pato Branco com o intuito de contribuir com o desenvolvimento sustentável local além de desenvolver um padrão que possivelmente poderá ser utilizado por outros municípios. Assim, em conjunto com a análise precedente e considerando os princípios da Lei de Eficiência Energética discutida adiante, faz-se importante o desenvolvimento de técnicas que possibilitem o aumento da eficiência energética do sistema explorado utilizando tecnologias alternativas para a geração de energia elétrica. Nesse sentido, destaca-se a recente utilização de painéis fotovoltaicos para aumentar a confiabilidade no suprimento desses sistemas bem como proporcionar a redução do consumo de energia elétrica. Para tanto, será estudado o impacto da inserção de painéis fotovoltaicos em conjunto com um banco de baterias para alimentação dos módulos semafóricos no sistema semafórico da cidade de Pato Branco, de forma que o sistema seja alimentado prioritariamente através de energia solar por meio das placas fotovoltaicas durante o dia. Havendo a

necessidade, o sistema passará a utilizar a energia elétrica da rede da concessionária. Durante os períodos com baixo índice de radiação solar e na eventual falta de energia elétrica na rede de distribuição, o sistema de semáforos passará a utilizar o banco de baterias. A configuração do sistema proposto é apresentada na Figura 4.

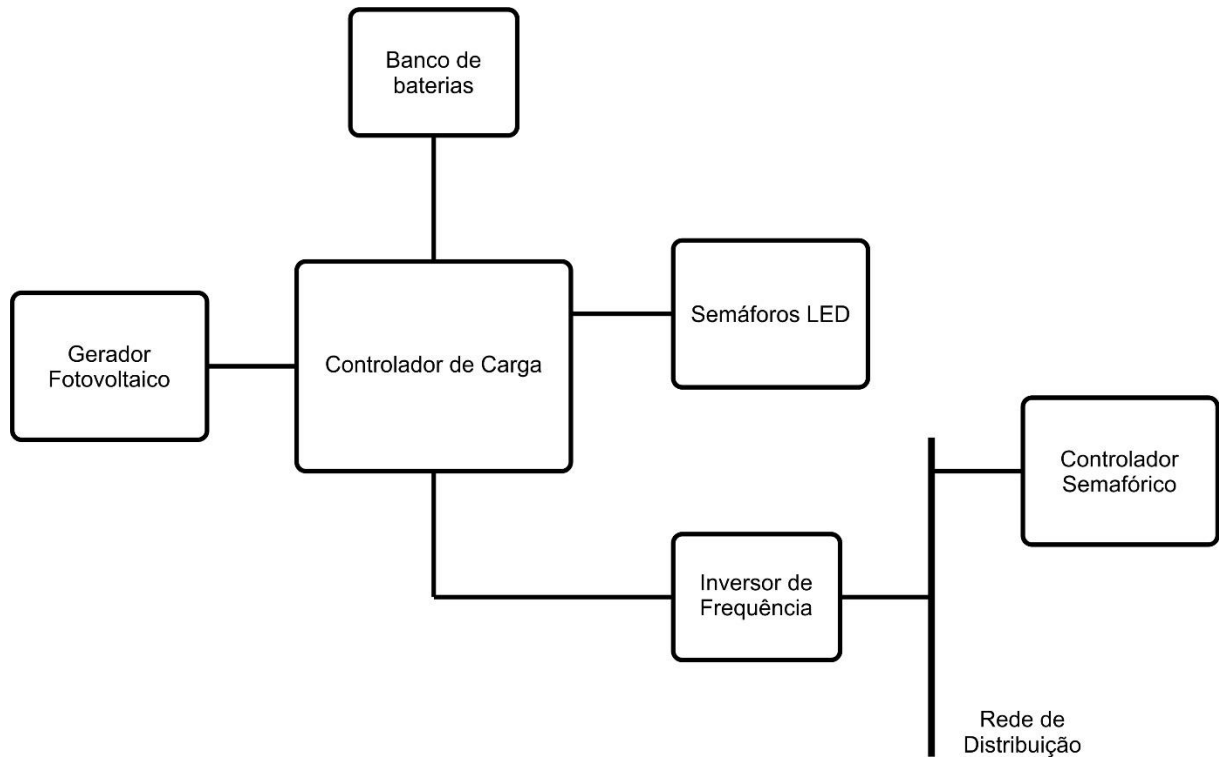


Figura 4 - Diagrama de bloco do sistema proposto.
 Fonte: Autoria própria.

Além do sistema ilustrado na Figura 4, será analisado a viabilidade técnica e econômica do sistema operando sem o auxílio do banco de baterias.

1.1. JUSTIFICATIVA

Segundo Bojic (2004), além do aumento da demanda de energia, o mundo necessita de soluções relacionadas ao esgotamento das fontes de energia não renováveis e o elevado índice de poluição ambiental. Nesse contexto, algumas iniciativas têm sido propostas, visando um modelo em que busca-se o equilíbrio entre as necessidades humanas, o uso de energia e um desenvolvimento ambientalmente sustentável (RIOS; TEIXEIRA; AKAMATSU, 2006). Bojic (2004), afirma que para a minimização dos problemas mencionados anteriormente, é necessário o uso, em

grande escala, de fontes renováveis de energia. Nessas circunstâncias, a energia proveniente de sistemas fotovoltaicos apresenta-se como uma tecnologia com potencial promissor. Segundo o Banco de Informações de Geração (Big) da Aneel, a potência de geração fotovoltaica instalada no Brasil é de 21 MW e ainda está previsto uma adição de aproximadamente 1,14 GW na capacidade atual, provenientes de empreendimentos com construção não iniciadas (ANEEL, 2015a).

À medida que a sociedade se torna mais desenvolvida, o consumo de energia tende a aumentar, porém nem sempre esse aumento é realizado de forma eficiente. Utilizar a energia de forma responsável significa aumentar a diversidade de serviço e conforto, sem ter que necessariamente aumentar o consumo de energia (GOVERNO DE PORTUGAL, 2013). O presidente da Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia (Abesco), Rodrigo Aguiar, ante a crise no setor elétrico, afirma ser a eficiência energética uma ferramenta que reduziria o impacto do aumento da tarifa de energia elétrica, promovendo a redução no consumo de energia elétrica e, por consequência, a menor utilização das usinas termelétricas (MOREIRA, 2014).

Segundo Aguiar, o potencial de economia de energia elétrica no Brasil é de 52 mil GWh, o que corresponde uma economia equivalente a 17 mil MW em termos de demanda média, superior ao total de carga resultante das novas usinas hidrelétricas adicionadas ao sistema elétrico de potência (SEP) em 2014. Financeiramente, esse montante representa uma redução de R\$ 13,6 bilhões aos consumidores finais (indústria, comércio, serviço e residencial) (ELETROBRAS, 2015a). Isso significa que, a prática de ações de eficiência energética tem proporcionado grandes ganhos e pode ainda promover inúmeros benefícios, sobretudo, por meio de políticas de incentivo ao desenvolvimento eficiente, tanto das tecnologias já existentes como das tecnologias futuras (FAPESP, 2010).

Entretanto, sob outra perspectiva, porém não menos importante que a readequação da matriz energética brasileira, faz-se relevante o uso dos conceitos de conservação de energia elétrica através da eficiência energética dos equipamentos e mudança nos hábitos de consumo de energia (RIOS; TEIXEIRA; AKAMATSU, 2006). De acordo com a Secretaria de Energia do Estado de São Paulo, “Eficiência energética é a busca constante por melhoria na utilização dos insumos energéticos” (SECRETARIA DE ENERGIA, [201-?]).

Para Godoi (2011),

Eficiência energética significa racionalização de energia. Compreende ações ou medidas comportamentais, tecnológicas e econômicas, as quais, ao serem realizadas sobre sistemas e processos de conversão/produção, resultem em diminuição da demanda energética, sem prejuízo da quantidade ou da qualidade dos bens e serviços produzidos (GODOI, 2011b, p. 73).

Nesse cenário, ressalta-se que o governo federal instituiu no ano de 2001, a Lei nº 10.295, conhecida como Lei da Eficiência Energética, que tem como objetivo principal estimular o desenvolvimento tecnológico, a preservação ambiental e a introdução de produtos mais eficientes no mercado nacional (ELETROBRAS, 2015a). Um dos principais objetivos da Lei da Eficiência Energética é estimular a utilização dos métodos e tecnologias disponíveis com o objetivo de otimizar o uso das fontes de energia, visando o aumento da eficiência energética dos processos existentes e, assim, contribuir para a redução do consumo de energia elétrica e diminuir o risco de não atendimento a carga (risco de déficit) (SANTOS, 2013b).

Nesse contexto, em função principalmente da crise hídrica e do consequente aumento da parcela de geração de energia elétrica proveniente de fontes não renováveis através da queima de carvão, gás e petróleo, por exemplo, tem-se que as questões de eficiência energética serão cada vez mais fundamentais nos diversos setores, incluindo a administração pública (PINTO, 2012). Além disso, a Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010, da Aneel, através do artigo 218, estabelece que “a distribuidora deve transferir o sistema de iluminação pública registrado como Ativo Imobilizado em Serviço (AIS) à pessoa jurídica de direito público competente” o que torna ainda mais relevante a prática de políticas de eficiência energética no setor, pois de acordo com Rodrigo de Sá Funchal Barros, representante da Frente Nacional dos Prefeitos (FNP), assumir a responsabilidade sobre a iluminação pública, aumentará os custos operacionais aos municípios. Segundo Barros, quando financiado pelas prefeituras em conjunto com empresas terceirizadas, o valor médio com manutenção por ponto de luz passará de R\$ 1,50 para R\$ 10,00. Caso as prefeituras optem por realizar a manutenção com equipe própria, o valor estimado é de R\$ 24,50 (ANEEL, 2010; BRASIL, 2012).

A regulamentação específica de lâmpadas incandescentes, aprovada através da Portaria Interministerial nº 1007/2010, define níveis mínimos de eficiência energética para a tecnologia de lâmpadas incandescentes de uso geral. O inciso IV, parágrafo único do art. 1º, dentre outras lâmpadas incandescentes, isenta desta

regulamentação, a partir da alínea d, “as lâmpadas incandescentes para uso em sinalização de trânsito e semáforos” (BRASIL, 2010). Embora muitos estudos ainda estejam em desenvolvimento, em um futuro próximo, a substituição das lâmpadas incandescentes em sistemas semaforicos não será apenas uma questão de opção, mas uma necessidade. Segundo o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), deve ser interrompido a comercialização de lâmpadas incandescentes a partir de julho de 2016, estando os fabricantes, importadores e comerciantes sujeito a penalidades previstas em lei caso os requisitos de eficiência estabelecidos pelo Inmetro não sejam obedecidos (INMETRO, 2015).

1.2. OBJETIVO GERAL

Analisar a viabilidade econômica da substituição do sistema semaforico de Pato Branco utilizando sistemas LED e geração fotovoltaica.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analisar as características técnicas dos módulos semaforicos instalados baseados em lâmpadas incandescentes e dos módulos baseados em tecnologia LED;
2. Analisar as características dos painéis fotovoltaicos com aplicação específica na sinalização semaforica;
3. Verificar os índices médios de radiação solar na cidade de Pato Branco;
4. Obter informações sobre o sistema semaforico junto a prefeitura;
5. Verificar a estrutura tarifária aplicada aos órgãos públicos;
6. Realizar uma estimativa da redução do consumo de energia elétrica através da implantação do sistema proposto com tecnologia LED;
7. Realizar uma estimativa da redução do consumo de energia elétrica através da implantação do sistema com tecnologia LED em conjunto com painéis fotovoltaicos;

8. Analisar a viabilidade econômica através do método do Valor Presente Líquido³ (VPL) e/ou através do Sistema de Análise de Viabilidade Econômica de Projetos de Investimentos (SAVEPI);
9. Estudar a possibilidade da criação de uma interface gráfica através da ferramenta GUIDE do Matlab[®] para o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para auxílio dos órgãos responsáveis para análise da viabilidade econômica do investimento no sistema proposto em outras situações.

O trabalho foi desenvolvido em capítulos, nos quais foram abordados os conhecimentos necessários acerca do tema estudado para melhor compreensão do leitor.

O Capítulo 1 apresenta a problemática do trabalho e justificativa para sua realização, destacando os objetivos gerais e específicos propostos.

O Capítulo 2 contém o desenvolvimento teórico necessário e discorre sobre assuntos de geração distribuída, energias renováveis, funcionamento do sistema semafórico, estrutura tarifária e análise de investimento do projeto. Além disso, são apresentadas as possíveis configurações de sistemas de microgeração distribuída utilizando geração fotovoltaica para uso em sistemas semafóricos.

A metodologia utilizada no desenvolvimento do estudo e no dimensionamento do sistema, mostrando as características dos dispositivos necessários ao sistema proposto são apresentados no Capítulo 3.

No Capítulo 4 é mostrado como os recursos foram trabalhados e apresenta uma análise econômica da utilização de sistemas fotovoltaicos para fornecimento de energia elétrica em semáforos, apresentando o tempo de retorno de investimento analisado através do *Payback* e Valor Presente Líquido (VPL).

O Capítulo 5 apresenta a interface gráfica e os procedimentos necessários para análise econômica e dimensionamento do sistema fotovoltaico a partir da própria interface.

³ O Valor Presente Líquido (VPL) de um projeto de investimento pode ser definido como a soma algébrica dos valores descontados do fluxo de caixa a ele associado. Em outras palavras, é a diferença do valor presente das receitas menos o valor presente dos custos (SILVA; FONTES, 2005, p. 932).

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros envolvendo o uso de tecnologias fotovoltaica em sistemas semaforicos.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), estima-se que entre os anos de 2010 e 2015, a população do município de Pato Branco aumentou aproximadamente 9,2%, enquanto a frota de veículos registrados no município, segundo o Departamento de Trânsito do Paraná (DETRAN-PR), aumentou cerca de 35,7%, reduzindo o número de pessoas por veículos cadastrados no município (DETRAN-PR, 2016, IBGE, 2016).

O Código Brasileiro de Trânsito (CBT) estabelece que órgãos e executivos de trânsito dos municípios fiquem responsáveis por “planejar, projetar, regulamentar e operar o trânsito de veículos, de pedestres e de animais, e promover o desenvolvimento da circulação e da segurança de ciclistas; implantar, manter e operar o sistema de sinalização, os dispositivos e os equipamentos de controle viário; planejar e implantar medidas para redução da circulação de veículos e reorientação do tráfego, com o objetivo de diminuir a emissão global de poluentes” (CBT, 1997).

A utilização de sistemas de semáforos eficientes promove a segurança de pedestres e motoristas, e possibilita reduzir as possibilidades de acidente (JERONYMO; FRANCO; HERNANDEZ, 2006). Atualmente, os sistemas de semáforos são objetos de pesquisa e diversas tecnologias são exploradas para potencializar o sistema viário, promover a segurança e otimizar o fluxo de veículos, ciclistas e pedestres, além de impulsionar a redução dos custos energéticos e os custos com manutenção do sistema. Nesta perspectiva, muitos projetos voltados para a eficiência energética em semáforos utilizam LED como fonte luminosa em substituição às lâmpadas incandescentes dos semáforos convencionais (BORBA; CHRISTMANN, 2013).

Além de reduzir os impactos causados pelo descarte das lâmpadas incandescentes no meio ambiente, segundo Galli, os semáforos baseados na tecnologia LED desenvolvidos por um grupo de pesquisadores da Universidade de São Paulo (USP) possibilitam reduzir o consumo de energia elétrica em até 90% já que os sistemas baseados neste tipo de tecnologia utilizam conjuntos luminosos de 10 W com vida útil de 50 mil horas, enquanto os semáforos convencionais operam com lâmpadas incandescentes de 100 W e possuem apenas 4 mil horas de vida útil (ALISSON, 2011).

A explicação para utilização dos conjuntos luminosos com tecnologia LED vai além da redução dos custos com manutenção e operação do sistema, decorrente do ganho energético relacionado com sua baixa potência e seu elevado tempo de vida útil, possibilita melhora da sinalização semafórica e, conseqüentemente, aumento da segurança viária em função do menor número de intervenção no sistema e da elevada eficiência dos LEDs, que após sua vida útil, perde apenas 25% da sua eficiência luminosa (ALISSON, 2011; BORBA; CHRISTMANN, 2013).

Além disso, várias filosofias são apresentadas para suprir a demanda de energia elétrica dos sistemas de sinalização semafórica conforme mostra a Figura 5. Alguns autores propõe a utilização de um sistema de geração fotovoltaica conectado à rede de distribuição de energia elétrica auxiliado ou não por um banco de baterias. Desta forma, o sistema fotovoltaico é capaz de disponibilizar o excedente gerado à rede de distribuição (OLIVEIRA et al., 2014).

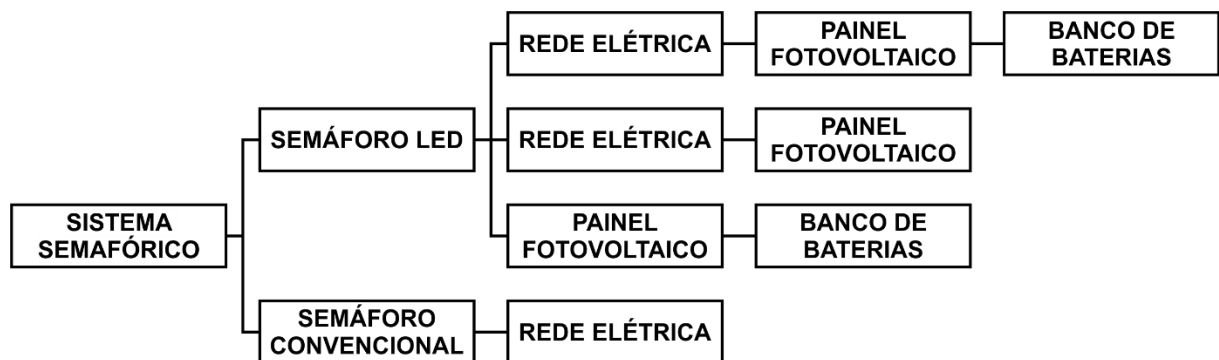


Figura 5 - Principais configurações de sistemas semafóricos.
Fonte: Autoria própria.

O projeto “Sinalizador de trânsito à base de LED com operação emergencial” financiado pela Fundação de Amparo à pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) integra três fontes de energia elétrica. A principal fonte de energia são as placas fotovoltaicas instaladas próxima ao equipamento. Nas situações em que as condições climáticas sejam desfavoráveis à geração fotovoltaica, o sistema é alimentado a partir da rede de distribuição de energia elétrica. Excepcionalmente, o funcionamento do equipamento semafórico é assegurado pelo banco de baterias com autonomia de 40 minutos. O semáforo conta com um “sistema de gerenciamento inteligente” responsável por determinar qual a melhor forma de alimentação para o equipamento (ALISSON, 2011).

Borba e Christmann (2013) propõem um sistema semelhante ao proposto por Galli. Neste caso, no entanto, o semáforo tem a rede de distribuição de energia

elétrica como fonte principal, enquanto o sistema de geração fotovoltaica em conjunto com o banco de baterias é responsável por alimentar o equipamento apenas durante o horário de ponta. Outra configuração sugerida por Borba e Christmann (2013) não utiliza banco de baterias e a rede de distribuição da concessionária é responsável por suprir a demanda do sistema no período noturno ou em condições de baixa incidência solar.

Outra possibilidade é a implementação de um sistema de geração fotovoltaica autônomo, ou seja, isolado da rede de distribuição de energia elétrica, mas com auxílio de um banco de baterias.

Nesse contexto, alguns estudos sugerem um sistema de sinalização semafórica independente da rede de distribuição de energia elétrica. Nesse caso, o sistema proposto opera com energia solar auxiliado por um banco de baterias com autonomia de um ou dois dias para fornecimento de energia elétrica durante a noite ou em períodos nublados (BORBA; CHRISTMANN, 2013; MUÑIZ; ROMERO, 2015). Muñiz e Romero (2015) destacam a vantagem do equipamento poder ser instalado em lugares remotos onde não exista conexão com a rede de distribuição de energia elétrica.

Embora cada tipologia tenha suas vantagens e desvantagens, é possível inferir por meio dos estudos apresentados anteriormente, que a configuração do sistema semafórico conectado à rede elétrica em conjunto com um sistema fotovoltaico e um banco de baterias consiste em uma das soluções mais utilizadas atualmente e que fornecem alto grau de confiabilidade ao sistema. Neste sentido, este trabalho propõe analisar a viabilidade econômica de um sistema de geração fotovoltaica conectado à rede de distribuição elétrica auxiliado por um banco de baterias para fornecimento de energia elétrica ao sistema semafórico.

2.1. ENERGIAS RENOVÁVEIS

A energia sempre esteve presente nas atividades do ser humano. O seu consumo se intensificou após a revolução industrial, impulsionado pelo crescimento urbano e da agricultura, mas sua utilização teve início a muito tempo atrás para

cozimento de alimento, aquecimento, funcionamento de moinhos, etc (FONTANA, 2015).

Juntamente com transportes, telecomunicações, águas e saneamento, a energia compõe a infraestrutura responsável por integrar o ser humano ao modelo de desenvolvimento atual (REIS, 2011).

As fontes de energia podem ser de origem fóssil (petróleo, carvão natural, gás natural, etc.), renovável (biomassa, hidrelétrica, solar e eólica) ou físsil (urânio, tório, etc.).

As primeiras formas de aproveitamento tecnológico das fontes primárias de energia utilizadas foram a energia eólica aplicada na moagem de grãos e na navegação e a biomassa, utilizada como lenha, sem restrição do consumo (FONTANA, 2015).

Segundo Goldemberg e Paleta (2012), o crescimento do consumo energético exigiu o uso de fontes energéticas mais eficientes, resultando no aumento do uso de combustíveis fósseis. Estes, ao serem processados causam impactos ao meio ambiente em função dos gases emitidos e pela redução das reservas (FONTANA, 2015).

De acordo com Bilgen (2014),

A incerteza sobre as reservas de energia fóssil global e sua disponibilidade a longo prazo está aumentando a consciência para o desenvolvimento de fontes de energia limpas e renováveis e otimização do uso da energia para evitar o seu desperdício (BILGEN, 2014, p. 895, tradução nossa).

Visto que as fontes não renováveis de energia são limitadas, é desnecessário mensurar quanto tempo será necessário para extinção das reservas energéticas de origem fóssil.

Todavia, o desenvolvimento da economia mundial está relacionado com o consumo de combustíveis fósseis para produção de eletricidade. De acordo com Goldemberg e Paleta (2012), “Carvão, petróleo e gás foram a base energética do desenvolvimento tecnológico do século XX, mas criaram problemas com os quais nos defrontamos hoje: exaustão das reservas, problemas geopolíticos e poluição” (FONTANA, 2015).

O uso de energia elétrica foi impulsionado pelo início da industrialização e ocupação dos grandes centros. A partir disso, grandes usinas hidrelétricas foram instaladas no país para suprir a demanda pelo insumo e com isso, foi criada a Aneel

para regulamentar o fornecimento de energia sendo o Ministério de Minas e Energia (MME) responsável por elaborar as políticas energéticas no Brasil (CARVALHO; NETO, 2012).

A energia elétrica tem importância significativa no desenvolvimento econômico e social. Entretanto, embora sua produção, transmissão e distribuição movimente aproximadamente um trilhão de dólares, cerca de 30% da população mundial não tem acesso ao serviço. Nesta perspectiva, o desafio é garantir o acesso ao sistema elétrico por toda população (CARVALHO; NETO, 2012; LOPEZ, 2012)

A eletricidade é a fonte de energia consumida que mais cresce no Brasil. Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia 2024, o aumento do consumo de eletricidade deverá ser de 50% até 2024, 4,1% ao ano (MME, 2015)

Para Borges Neto e Carvalho (2012), a diversificação da matriz energética é uma necessidade estratégica para atender o crescimento acentuado da demanda por energia elétrica, reduzindo a dependência por uma única fonte energética, promovendo a geração distribuída e a redução dos custos com sistemas centralizados.

A descentralização do sistema e a diversificação da matriz energética podem ser alcançadas mediante utilização de sistemas híbridos de geração, aproveitando duas ou mais fontes para geração de energia. Dentre as possibilidades existentes, Borges Neto e Carvalho (2012) citam a possibilidade de substituição de sistemas à diesel por sistemas fotovoltaicos, fonte de energia renovável e limpa.

Atualmente, a produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis é partilhada entre hidráulica (64,0%), biomassa (8,0%), eólica (3,5%) e solar fotovoltaica (0,01%), favorecendo estas como alternativa para consolidação do sistema energético brasileiro (EPE, 2016). De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2024, está previsto um incremento de 73.569 MW ao Sistema Interligado Nacional (SIN), representando um aumento de 55% da geração de energia elétrica, com grande participação das fontes renováveis de energia, com destaque para as fontes hidrelétrica, biomassa, eólica e solar (MME, 2015).

A energia elétrica pode ser transformada em diversas formas de energia (luminosa, térmica, mecânica, etc.). No entanto, para Goldemberg e Paletta (2012), o consumo de combustíveis fósseis não poderá permanecer como principal fonte para geração de energia elétrica devido aos fatores negativos da sua utilização (FONTANA,

2015). Contudo, é necessário o uso de fontes de energia renováveis capazes de atender a demanda energética atual sem prejuízo futuro.

A incerteza sobre a disponibilidade das reservas globais de energia fóssil aliada aos impactos ambientais causados pela sua utilização impulsiona o desenvolvimento das fontes de energia limpa e renováveis (BILGEN, 2014).

As fontes de energia renováveis são caracterizadas por fazerem uso de recursos naturais inesgotáveis para os padrões de consumo atual, ou seja, são naturalmente reabastecidos. Exemplos deste tipo de fonte são a energia hidrelétrica, oceânica, geotérmica, eólica e solar. Entretanto, a exemplo do petróleo, carvão e urânio, nem todos os recursos naturais são renováveis. Por sua vez, as fontes de energia limpa não causam prejuízo significativo ao meio ambiente.

A participação das fontes renováveis de energia na matriz energética mundial é de aproximadamente 13,5%. No Brasil, este número representa 41,2%, fazendo da matriz energética brasileira uma das mais limpas do mundo (EPE, 2016).

As fontes de energias renováveis estão continuamente disponíveis e os impactos causados pelo uso das energias renováveis são relativamente menores defronte às energias não renováveis, responsáveis pela emissão dos principais gases causadores do efeito estufa.

Nos países em desenvolvimento, o uso de energias renováveis como complemento ocorre para auxiliar no crescimento dos sistemas energéticos. Para Borges Neto e Carvalho (2012), a substituição dos combustíveis fósseis por energias renováveis pode reduzir a emissão de carbono pelos sistemas energéticos. Benito (2011) aponta as energias renováveis como uma alternativa, mas destaca a incapacidade destas atenderem a atual demanda por energia em sua totalidade.

Hoje existem várias formas de obtenção de energia através de fontes renováveis. Dentre as fontes existentes, destacam-se:

- Hidrelétrica: baseada no aproveitamento do potencial hidráulico armazenado em reservatórios. Nas centrais hidrelétricas, as turbinas hidráulicas realizam a transformação da energia hidráulica armazenada em energia mecânica e, conseqüentemente, movimentam o rotor do gerador acoplado ao eixo da turbina para geração de energia elétrica (REIS, 2011);

- Energia eólica: utiliza o mesmo princípio de conversão das usinas hidrelétricas. No entanto, neste caso, o rotor do gerador elétrico é acionado através

da energia mecânica produzida pelo fluxo de vento entre as pás da turbina (FONTANA, 2015).

- Energia solar fotovoltaica: através de dispositivos estáticos, realiza conversão da energia solar em energia elétrica baseada no efeito fotovoltaico (CEPEL, 2014).

Embora as fontes renováveis de energia estejam continuamente disponíveis, a produção de energia através do seu uso varia conforme a quantidade de energia disponibilizada. Portanto, assim como as centrais hidrelétricas podem ter sua produção afetada pelo nível dos reservatórios, a intensidade dos ventos e dos raios solares podem influenciar diretamente na produção de energia eólica e solar, respectivamente (CARVALHO; NETO, 2012).

Para Villalva e Gazoli (2013), a utilização de fontes de energia alternativas promove a segmentação do setor energético, oferecendo maior oportunidade para a sociedade, incentiva o desenvolvimento de pesquisas científicas e, conseqüentemente, o desenvolvimento tecnológico (FONTANA, 2015).

Apesar de representar apenas uma fração da matriz energética mundial, o desenvolvimento de novas tecnologias de energia renovável vem aumentando sua participação na matriz energética mundial. Segundo a *International Energy Agency* (IEA), até 2020, a adição de energia elétrica proveniente de fontes renováveis deverá ser superior a 700 GW, número que, segundo a entidade, equivale a mais que o dobro da atual potência instalada do Japão, sendo que a fonte eólica e solar fotovoltaica irão representar mais da metade deste aumento. No entanto, os governos devem remover todas as incertezas sobre as energias renováveis para explorar todo seu potencial e direcionar os sistemas para um caminho mais seguro e sustentável (IEA, 2015).

Alguns países possuem políticas energéticas bem definidas para o uso de fontes renováveis de energia, com destaque para a Alemanha onde as fontes renováveis de energia representam 20% da geração de eletricidade (FONTANA, 2015). No Brasil, a participação de renováveis na matriz elétrica representa 75,5% (EPE, 2016).

Os incentivos públicos e os investimentos privados possibilitam redução dos custos do uso de fontes renováveis aumentando a sua competitividade frente outras fontes. A eficiência, o investimento inicial, a viabilidade técnica e o custo de

geração são fatores determinantes para a escolha da tecnologia utilizada. A Tabela 2 apresenta os custos de geração por fonte.

Tabela 2 - Custo entre as tecnologias de energias renováveis.

Tecnologia	Viabilidade técnica	Investimento (U\$\$/kW)	Custo de geração (U\$\$/MWh)	Eficiência (%)
PCHs	Alta	1.000 a 3.000	35 a 102	60 a 85
Eólica	Alta	700 a 1.200	50 a 120	25 a 45
Biomassa	Alta	500 a 2.500	38 a 78	25 a 35
Solar Fotovoltaica	Alta	4.000 a 9.000	250 a 500	10 a 18

Fonte: Adaptado de Lopez (2012).

O Brasil destaca-se por possuir 75,5% da sua matriz elétrica composta por fontes renováveis, enquanto a médio mundial é de apenas 21,2%.

Devido ao alto índice de utilização das centrais hidrelétricas, o desenvolvimento de tecnologias alternativas à geração hidrelétrica no Brasil cresce relativamente devagar quando comparado com outros países do mundo. Entretanto, para que haja crescimento da economia nacional, é necessário aumentar a capacidade de geração do país através de fontes renováveis, possibilitando equiparar-se a países como EUA e China.

Nos países desenvolvidos, o consumo residencial de energia elétrica é aproximadamente dez vezes maior em relação aos países em desenvolvimento como o Brasil, evidenciando o abismo entre o consumo energético e a economia em várias regiões do mundo. Além disso, enquanto países da Europa Ocidental e EUA consomem 4 e 8 tep, respectivamente, alguns países da África e da Ásia consomem apenas 0,2 tep com ampla utilização de lenha. A diferença entre estes países fica evidente na Tabela 3, onde são apresentados os índices de consumo de energia e emissão de CO₂ por habitantes.

Tabela 3 - Consumo mundial de energia elétrica e emissão de CO₂.

País	Produção de energia (Mtep)	Consumo energético (tep/hab)	Consumo de eletricidade (kWh/hab)	Emissão de CO ₂ por habitante
EUA	1.686,40	7,03	12.884,00	16,9
Japão	93,79	3,71	7.788,00	8,38
Alemanha	127,09	3,89	6.781,00	9,16
Chile	9,3	1,70	3.228,00	3,84
China	2.085,00	1,70	2.648,00	5,14
Brasil	230,15	1,24	2.201,00	1,74
Índia	502,47	0,58	597,00	2,35
Etiópia	30,37	0,39	45,00	0,09

Fonte: Adaptado de Borges Neto e Carvalho (2012).

A matriz de oferta interna de energia elétrica do Brasil nas últimas décadas teve redução da participação relativa de petróleo e hidráulica. No entanto, apresentou aumento significativo de fontes renováveis de energia elétrica, como a eólica e a solar (MME, 2016).

Nos últimos dois anos, o aumento da capacidade instalada de geração hidrelétrica e térmica foi de 2,8% e 4,6%, respectivamente. Entretanto, a capacidade eólica aumentou 56,2%, enquanto a solar, impulsionada pelo aumento de 13,3 MW de geração distribuída apenas em 2015, aumentou 42,3% da capacidade instalada (EPE, 2016).

A geração de energia a partir de fontes renováveis deverá aumentar nos próximos 15 anos, com grande participação das energias eólica e solar, ao passo que a tendência é de redução da participação de combustíveis fósseis, conforme ilustra a Figura 6.

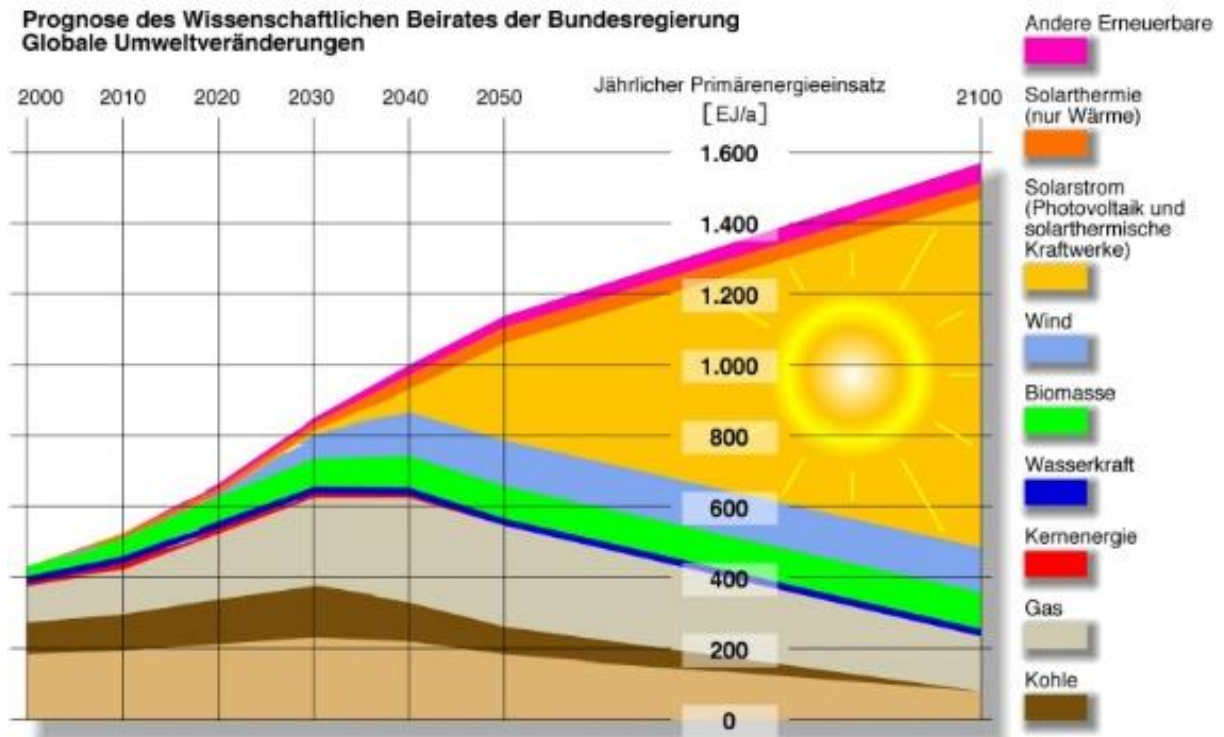


Figura 6 - Participação de fontes renováveis na matriz energética mundial.
Fonte: LAJEADO.

O crescimento da participação das fontes renováveis deverá continuar até 2040, quando o aumento das fontes eólica, de biomassa e hidráulica será estagnado. No entanto, a participação da energia solar fotovoltaica deverá aumentar continuamente a partir de 2050, destacando-se como principal fonte energética. Além disso, a utilização de combustíveis fósseis será reduzida e o emprego de fontes nucleares será suprimido.

2.2. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O sol é a principal fonte de energia existente no planeta. Com algumas exceções, praticamente todas as outras fontes de energia na terra derivam da energia do sol. Atualmente, é a fonte mais abundante e menos poluente conhecida, sendo a energia solar incidente sobre a terra durante três dias, proporcional a toda energia armazenada pelas reservas de combustíveis fósseis. Diariamente, a energia disponibilizada pelo sol equivale a toda energia consumida mundialmente durante 27 anos (CEPEL, 2014; LOPEZ, 2012).

A energia do sol promove a evaporação, origem do ciclo das águas, e possibilita o armazenamento de água em reservatórios para geração de energia elétrica (hidroeletricidade). Além disso, a energia solar é responsável pela variação de temperatura e pressão na atmosfera, causando os ventos necessários à geração eólica. A matéria orgânica para produção de biomassa e combustíveis fósseis realiza fotossíntese e, portanto, utiliza a energia solar como fonte indireta para geração de energia elétrica. Os raios solares podem ser aproveitados de forma direta para geração de energia elétrica e térmica (CEPEL, 2014; FONTANA, 2015).

A energia do sol é transmitida até a terra pelo espaço através de ondas eletromagnéticas, com diferentes comprimentos e frequências. Ao chegar até a atmosfera, uma parcela dos raios sofre difusão, enquanto a outra segue seu trajeto sem sofrer desvios, resultando, respectivamente, na radiação difusa e radiação direta (FONTANA, 2015).

A quantidade de potência disponibilizada pelo sol é quantificada pela irradiância como unidade de potência por área, normalmente expressada em W/m^2 . O movimento da terra em relação ao sol descreve uma trajetória elíptica. Em relação ao plano normal à elipse, a terra apresenta uma inclinação de aproximadamente $23,45^\circ$. Devido esta inclinação e ao movimento de rotação da terra, a curva de irradiação solar durante o dia tem seu pico ao meio dia solar, quando o ângulo azimutal é zero (CEPEL, 2014; FONTANA, 2015)

Segundo Lopez (2012), a energia solar é amplamente utilizada em sistemas de aquecimento de água e fornecimento de energia elétrica para sistemas isolados de telecomunicação, iluminação, eletrodomésticos, eletrônicos e telefones.

Para determinar o aproveitamento de energia solar, é necessário conhecer a potência incidente por unidade de superfície no local de instalação dos sistemas de captação e conversão da energia solar. Em algumas regiões, o índice de irradiação pode chegar a $5000 W/m^2$ (LOPEZ, 2012).

Devido a característica intermitente da energia solar, a disponibilidade de energia varia durante o dia, de maneira que a energia produzida pode sofrer variação ao longo do tempo. Portanto, para Villalva e Gazoli (2013), a energia solar pode ser utilizada como bom complemento a outros tipos de fontes com geração mais estável (FONTANA, 2015).

A conversão da energia solar em energia elétrica ocorre diretamente utilizando-se das tecnologias de células ou módulos fotovoltaicos. A energia solar

fotovoltaica é convertida através do fenômeno denominado efeito fotovoltaico (REIS, 2011).

O efeito fotovoltaico é a conversão de energia luminosa em energia elétrica associada a corrente elétrica resultante da diferença de potencial nos terminais de uma célula fotovoltaica quando exposta aos raios luminosos do sol, portanto, permite a obtenção de energia elétrica de forma limpa (CEPEL, 2014; REIS, 2011; VILLALVA; GAZOLI, 2013)

Um sistema fotovoltaico integra um bloco gerador constituído de módulos fotovoltaicos associados entre si, cabos condutores para interliga-los e a estrutura de suporte; um bloco de condicionamento de potência contendo conversores CC-CC, inversores de frequência, controladores de carga, MPPT (do inglês, *maximum power point tracking*) e dispositivos de proteção, supervisão e controle; e um bloco de armazenamento, que basicamente consiste em um banco de baterias (CEPEL, 2014).

A produção de eletricidade a partir de um sistema fotovoltaico depende do recurso solar disponível e é influenciada pela inclinação e orientação dos módulos fotovoltaicos e eficiência dos equipamentos do sistema. Além disso, a performance do sistema pode ser influenciada pelo clima (FUSANO, 2013).

O clima local apresenta a sua influência na performance do sistema, uma vez que a temperatura ambiente combinada com a irradiância afetam a temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos. O aumento da temperatura do módulo fotovoltaico implica em uma diminuição da energia convertida considerando a mesma radiação solar disponível (MELLO, 2016).

O aumento da temperatura dos módulos fotovoltaicos implica na redução da tensão dos módulos fotovoltaicos e num aumento insignificante da corrente, conseqüentemente, a potência fornecida pelos módulos é reduzida, comprometendo a geração de energia elétrica (ALMEIDA, 2012).

Uma das vantagens dos sistemas fotovoltaicos é a inexistência de partes móveis, apresentando baixa manutenção. Possuem característica modular (desde mW até MW), instalação rápida e elevado grau de confiabilidade. Além disso, possibilitam integração com o meio urbano, é silenciosa, limpa e renovável. Outra vantagem é a possibilidade de redução das perdas por transmissão e distribuição de energia em função da proximidade entre geração e consumo (MELLO, 2016; ZOMER, 2014).

As desvantagens dos sistemas fotovoltaicos são o custo elevado de implementação, produção intermitente e a variação da performance devido ao sombreamento (MELLO, 2016).

Embora a capacidade total instalada seja relativamente pequena, em relação à disponibilidade de energia solar para produção de energia elétrica, nos países desenvolvidos, o cenário internacional apresentou significativa mudança nos últimos anos, impulsionada pelas políticas de governo para redução da emissão de CO₂ e desenvolvimento da tecnologia para exportação (CEPEL, 2014; EPE, 2014).

Em 2015, a capacidade global de energia fotovoltaica chegou a aproximadamente 227,1 GW, tendo sido instalada 48,1 GW no mesmo ano, com destaque para sistemas conectados à rede. Nos últimos três anos, a China apresentou um crescimento significativo na capacidade instalada de energia fotovoltaica, passando de 10,95 GW instalados em 2013 para 15,3 GW em 2015. Atualmente, a China é responsável por 43,6 GW de capacidade instalada, seguida da Alemanha com 39,7 GW, Japão (34,4 GW), EUA (25,6 GW) e Itália (18,9 GW).

A Figura 7 mostra os maiores incrementos na capacidade instalada de energia fotovoltaica em 2015.

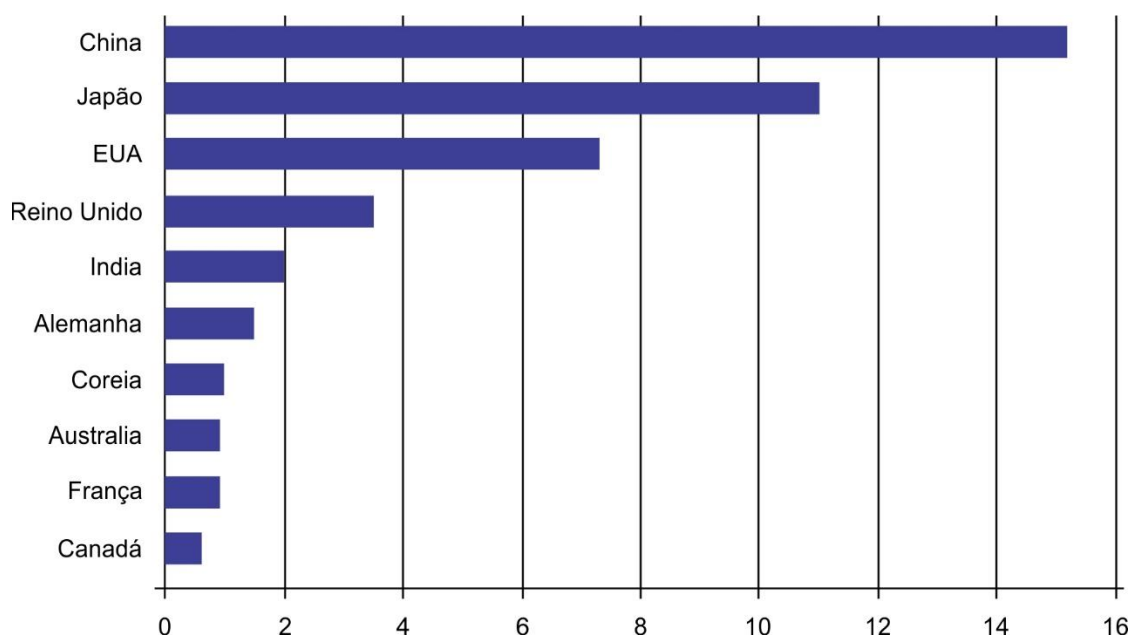


Figura 7 - Dez maiores incrementos na capacidade instalada de energia fotovoltaica em 2015.
Fonte: Adaptado de IEA (2015).

A Figura 8 apresenta a evolução da produção global de células fotovoltaicas, tendo a China como a principal fornecedora.

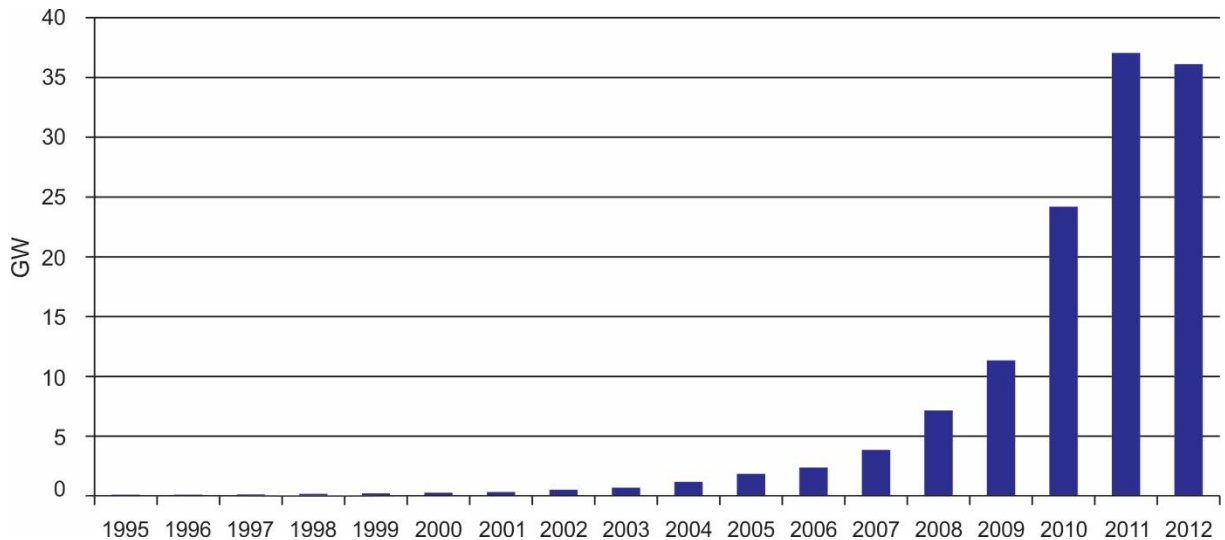


Figura 8 - Produção mundial de células fotovoltaicas.

Fonte: Adaptado do Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos (2014).

No Brasil, o elevado custo da eletricidade gerada com energia fotovoltaica é apontado como o principal obstáculo para o desenvolvimento e inserção da energia fotovoltaica no país (GAZOLI; VILLALVA; GUERRA, 2012)

A rápida expansão da energia fotovoltaica contribui para redução dos custos da fonte, estimulando o crescimento da capacidade instalada. Segundo a *International Energy Agency*, deve ocorrer um aumento de 26% a.a. da capacidade instalada de energia fotovoltaica entre 2010 e 2020, conforme a Figura 9 (EPE, 2014).

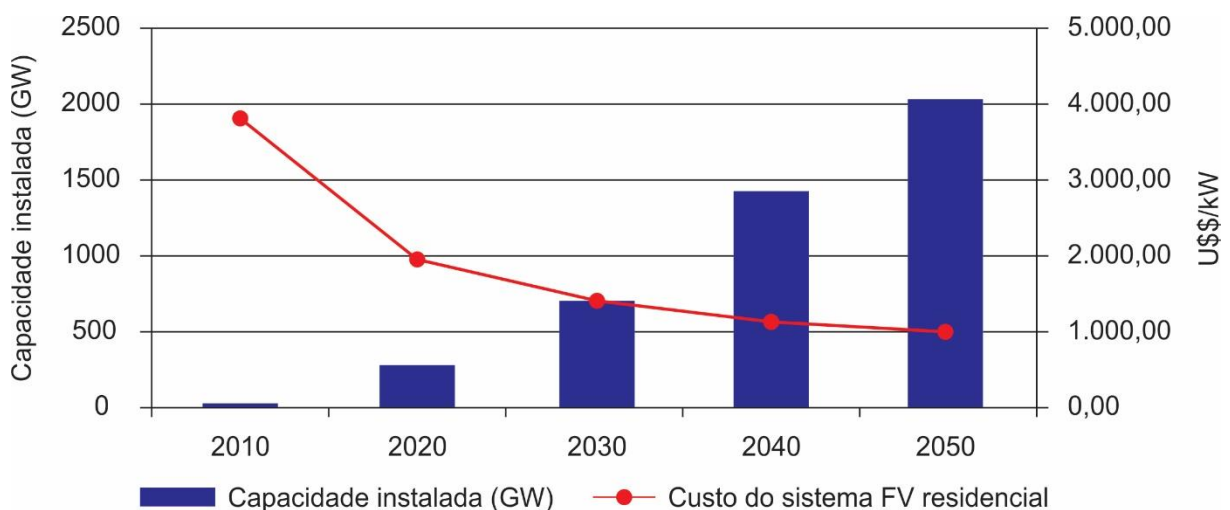


Figura 9 - Projeção do crescimento da capacidade instalada e custos até 2050.

Fonte: Adaptado de *International Energy Agency* (2012).

De acordo com os dados da IEA, deve ocorrer redução de aproximadamente 40% do custo de instalação dos sistemas fotovoltaicos até 2020 (EPE, 2014).

2.2.1.1. Células e Módulos Fotovoltaicos

O efeito fotovoltaico ocorre através de uma célula fotovoltaica constituída de material semicondutor. Uma célula fotovoltaica é composta por duas camadas de material semicondutor dos tipos P e N e representam a unidade fundamental de um módulo fotovoltaico (CEPEL, 2014; GAZOLI; VILLALVA; GUERRA, 2012)

As principais tecnologias de células e módulos fotovoltaicos podem ser divididas em três gerações. A primeira geração representa 85% do mercado, apresenta a melhor eficiência dentre as tecnologias disponíveis e consiste na utilização de silício monocristalino (m-Si) e policristalino (p-Si) (CEPEL, 2014). As células monocristalinas são fabricadas a partir de fatias de silício monocristalino com espessura de 200 μm extraídas a partir do silício purificado submetido ao processo de dopagem para adquirir as propriedades fotovoltaicas, recebem tratamento antirreflexo e apresentam aspecto uniforme. As células de silício policristalinos são produzidas de forma mais simples, sendo concebido através de inúmeros cristais, com tamanhos e propriedades diferentes, apresentando aparência heterogênea. Além disso, possuem eficiência ligeiramente inferior às células de silício monocristalino. Contudo, ambas as tecnologias apresentam custo/benefício semelhantes (CEPEL, 2014; GAZOLI; VILLALVA; GUERRA, 2012; ZOMER, 2014).

A segunda geração compreende as células de filmes finos produzidas a partir do silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe). Esta geração é pouco difundida no mercado e o seu diferencial está na produção de células fotovoltaicas a partir de fina camada de material semicondutor com espessura de 5 a 10 μm depositada sobre um substrato (GAZOLI; VILLALVA; GUERRA, 2012; ZOMER, 2014).

O processo de fabricação dos filmes finos é mais simples quando comparado às tecnologias da primeira geração e apresenta menos desperdício de matéria prima, pois não há corte do material utilizado, conseqüentemente, o seu custo é reduzido. No entanto, possuem baixa eficiência e exigem maior área para produzir a mesma energia produzida pelas células cristalinas, elevando o custo com instalação (GAZOLI; VILLALVA; GUERRA, 2012).

Ainda em fase de pesquisa e desenvolvimento, a terceira geração de células fotovoltaicas utiliza duas ou mais camadas de tecnologias fotovoltaicas para

aumentar a eficiência dos módulos fotovoltaicos. Também chamadas de tecnologia híbrida, esta geração é dividida em três cadeias produtivas: célula fotovoltaica multijunção e célula fotovoltaica para concentração (CPV – *Concentrated photovoltaics*), células sensibilizadas por corante (DSSC – *Dye-sensitized solar cell*) e células orgânicas ou poliméricas (CEPEL, 2014; ZOMER, 2014).

A Figura 10 apresenta três tecnologias de células fotovoltaicas disponíveis no mercado.

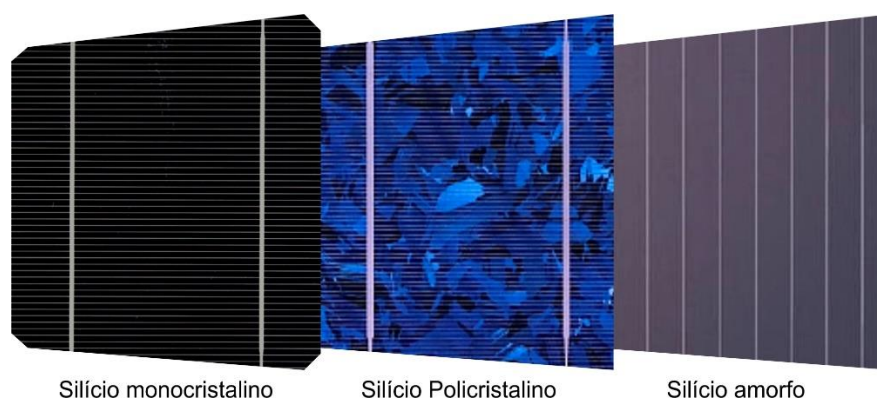


Figura 10 - Células fotovoltaicas de silício monocristalino, policristalino e amorfo.
Fonte: Autoria própria.

As células de silício monocristalino possuem coloração uniforme, enquanto as de silício policristalino tem aparência heterogênea. Os módulos fotovoltaicos de filmes finos são produzidos a partir de uma única célula de silício amorfo possuindo a mesma aparência da célula mostrada na Figura 10.

Cada tecnologia de célula fotovoltaica atua em uma faixa diferente do espectro solar e possui uma eficiência específica definida pelo elemento utilizado. A tecnologia de silício amorfo atua com maior intensidade sobre os comprimentos de onda de até 800 nm. As células de silício cristalino atuam entre 400 e 1200 nm do espectro solar, com maior intensidade a partir de ondas com comprimento de 800 nm. Logo, a junção de várias tecnologias possibilita aumentar a eficiência dos módulos fotovoltaicos. A Figura 11 apresenta a resposta espectral para várias tecnologias de células utilizadas em módulos fotovoltaicos (ZOMER, 2014).

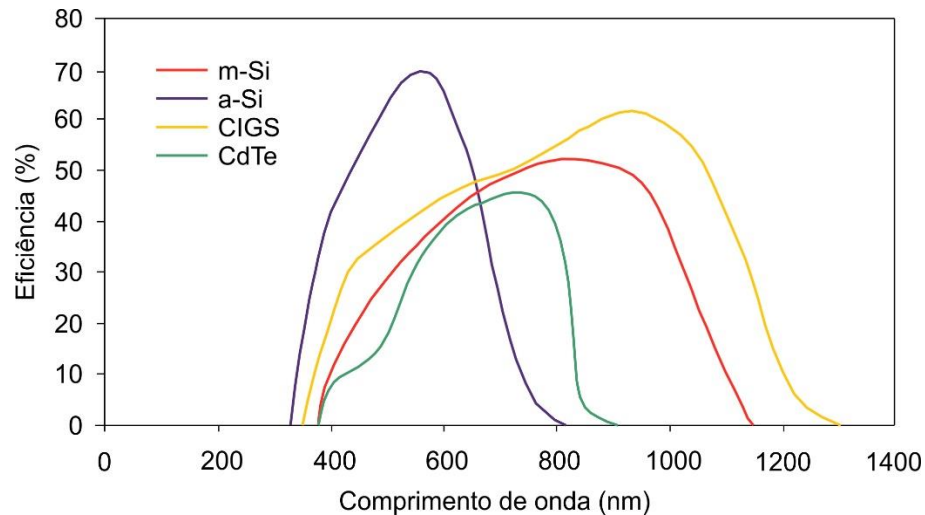


Figura 11 - Resposta espectral para várias tecnologias fotovoltaicas.
Fonte: Adaptado de Pérez, Lopez apud Zomer (2014).

A eficiência de cada tecnologia está relacionada com o tipo de material utilizado e com a área necessária para fornecer a potência desejada. Desta forma, é possível definir qual a melhor opção para cada projeto. Quando um projeto é limitado pela área, é necessário optar pela tecnologia mais eficiente e com uma pequena região produzir a energia necessária. No entanto, o custo de um sistema fotovoltaico está intimamente relacionado com a potência instalada, ficando em segundo plano a relação entre custo e a eficiência da tecnologia e, portanto, quando o projeto é limitado pelo custo, pode-se optar por uma tecnologia menos eficiente e mais atrativa financeiramente (ZOMER, 2014). A Tabela 4 apresenta um comparativo entre as eficiências para várias tecnologias fotovoltaicas (GAZOLI; VILLALVA; GUERRA, 2012).

Tabela 4 - Comparação da eficiência energética das diversas tecnologias de células fotovoltaicas.

Tecnologia	Eficiência da célula em laboratório	Eficiência da célula comercial	Eficiência dos módulos comerciais
Silício Monocristalino	24,7%	18%	14%
Silício Policristalino	19,8%	15%	13%
Silício cristalino (filme fino)	19,2%	9,5%	7,9%
Silício amorfo	13%	10,5%	7,5%
Silício micromorfo	12%	10,7%	9,1%
Célula solar híbrida	20,1%	17,3%	15,2%
CIS/CIGS	18,8%	14%	10%
Telureto de cádmio	16,4%	10%	9%

Fonte: Adaptado de Gazoli, Villalva e Guerra (2012).

Entretanto, o desafio está em desenvolver tecnologias fotovoltaicas com qualidade e vida útil compatível com os módulos fotovoltaicos (CEPEL, 2014).

As células fotovoltaicas podem ser associadas e encapsuladas em módulos fotovoltaicos para atender as necessidades de projeto. Além disso, os módulos fotovoltaicos podem ser associados para formar os arranjos fotovoltaicos. Estas associações dependem da tensão, corrente e potência desejada e consiste em conectar células fotovoltaicas em série e/ou paralelo conforme ilustrado na Figura 12 (CEPEL, 2014).

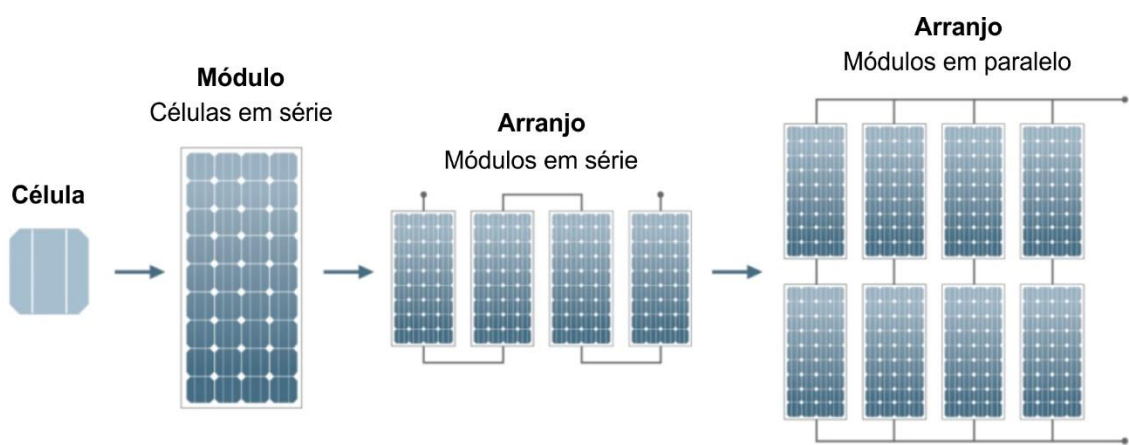


Figura 12 - Associações de células e módulos fotovoltaicos.
 Fonte: *Your Home* (2013).

Os módulos fotovoltaicos são encapsulados em uma moldura de alumínio anodizado com os terminais elétricos. Este encapsulamento é composto por uma camada de vidro temperado com alta transparência, dois revestimentos de acetato de etil vinila (EVA, do inglês *Ethylene-vinyl acetate*) estabilizado para a radiação ultravioleta, células fotovoltaicas eletricamente conectadas e um filme isolante. A Figura 13 apresenta a estrutura de um módulo fotovoltaico (CEPEL, 2014).

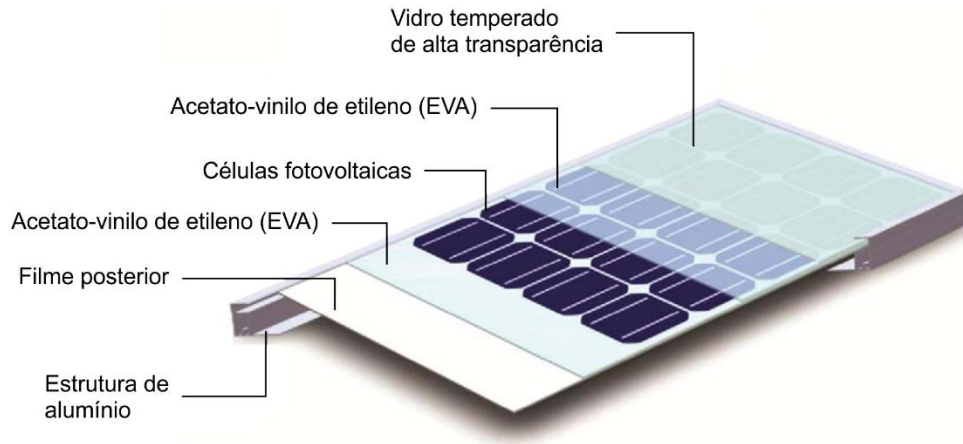


Figura 13 - Componentes de um módulo fotovoltaico com células de silício cristalino.
Fonte: Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos (2014).

2.3. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A geração distribuída (GD) é caracterizada pela produção de energia a partir de fontes renováveis ou combustíveis fósseis, de forma descentralizada próxima do centro de consumo (ANEEL, 2016a; CEMIG, 2016). A GD pode ser definida como uma “terminologia usada para um conjunto de tecnologias de geração elétrica eficiente e de porte reduzido, de equipamentos de controle e de armazenamento de eletricidade que aproximam a geração elétrica do consumidor” (ANEEL, 2016b). De acordo com o Módulo 1 dos Procedimentos de Distribuição (Prodist) de energia elétrica do sistema elétrico nacional, a geração distribuída é compreendida como:

Centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas – ou não – pelo ONS (ANEEL, 2016b).

O *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) define a GD como uma forma de geração de pequeno porte instalada próxima ao centro de consumo e conectada ao sistema de distribuição (IEEE, 2008 *apud* UNB).

O conceito de geração distribuída foi aplicado até meados do século XX, período em que toda a energia motriz consumida pela indústria era gerada localmente. No entanto, a partir da década de 1940, a geração local de energia passou a ficar relativamente mais cara frente às grandes centrais geradoras, reduzindo o interesse pelo desenvolvimento da geração distribuída e consolidando a geração centralizada

de energia como a principal forma de geração de eletricidade no mundo. Com isso, o aumento da demanda de energia elétrica é atendido quase que inteiramente através da construção de grandes usinas geradoras (GALHARDO *et al.*, 2016).

Em geral, as grandes centrais geradoras estão instaladas distantes das cargas e, portanto, faz-se necessário o transporte de energia através de extensas linhas de transmissão e complexa rede de distribuição (GALHARDO *et al.*, 2016).

De acordo com Galhardo *et al.*(2012),

Essa solução resolveu o equacionamento entre oferta e demanda até o fim do século XX, quando diversos fatores pressionaram a busca por formas diferentes de aumentar a oferta de energia. Os principais fatores que criaram o contexto para busca de outras formas de abastecimento energético foram: (i) problemas como as crises do petróleo, iniciadas no década de 1970; (ii) restrições ambientais associadas aos setores energéticos; (iii) escassez de potenciais para a instalação de grandes empreendimentos energéticos; (iv) extensos prazos para a construção dessas usinas; (v) os fortes impactos ambientais que grandes empreendimentos geralmente provocam e (vi) o grande endividamento que resulta da instalação de uma grande usina, o que o torna cada vez mais inviável, uma vez que é cada vez mais difícil conseguir grandes empréstimos para investir em obras gigantes, com dificuldades de cumprimentos de cronogramas e de obtenção de licenças ambientais (GALHARDO *et al.*, 2016).

As dificuldades encontradas promoveram o desenvolvimento de pesquisas na busca de alternativas energéticas para contorná-las e impulsionou o desenvolvimento de tecnologias de conversão energética de pequeno porte com baixo impacto ambiental, aumentando o interesse pela geração distribuída (GALHARDO *et al.*, 2016).

2.4. SISTEMAS SEMAFÓRICOS

A sinalização semafórica é um sistema de sinalização composta, basicamente, por um conjunto de indicadores luminosos denominado grupo focal ou semáforo, acionados alternada ou intermitentemente através de um sistema de controle eletromecânico ou eletrônico. Através da mensagem luminosa emitida, o sistema promove o fluxo de veículos (motorizados ou não motorizados) e/ou pedestres, informando aos usuários o direito de passagem em intersecções e/ou seções de via onde o espaço viário é compartilhado entre dois ou mais usuários, ou advertindo sobre situações comprometedoras nas vias (CONTRAN, 2014).

A sinalização semafórica é categorizada em dois grupos, conforme a sua finalidade:

- **Sinalização semafórica de regulamentação:** responsável por controlar o trânsito e regulamentar o direito de passagem dos usuários das interseções ou seções das vias através de indicações luminosas;
- **Sinalização semafórica de advertência:** tem a finalidade de advertir os usuários das vias quanto a existência de obstáculos ou situações perigosas nas vias.

De acordo com o Conselho Nacional de Trânsito (Contran), a sinalização semafórica deve atender as condições de percepção dos usuários das vias e garantir a eficácia dos sinais. Portanto, deverá estar de acordo com o CTB; ser de fácil percepção e sinalizada de forma compatível com a necessidade; deve ser clara, apresentar mensagens objetivas de fácil compreensão e prevenir informações que possam causar conflito no direito de passagem; ser precisa, confiável e apresentar credibilidade, atender aos requisitos técnicos mínimos de segurança viária e fluidez, alternando o direito de passagem de movimentos conflitantes; deve apresentar visibilidade e legibilidade à uma distância segura para tomada de decisão; deve estar bem conservada, permanecer limpa e visível (CONTRAN, 2014).

Os semáforos apresentam diferentes formas, cores e sinais. As possíveis combinações entre estas características possuem significados diferentes e possibilitam indicar informações específicas aos condutores de veículos e pedestres (CONTRAN, 2014).

A sinalização semafórica é realizada por com um conjunto de componentes instalados nas interseções viárias formando uma estrutura capaz de gerar e projetar a informação luminosa sobre as vias. Os componentes que integram esta estrutura são:

- Semáforo ou grupo focal: formado por um conjunto de focos responsáveis pela indicação luminosa aos condutores de veículos e pedestres;
- Elementos de sustentação: consiste em colunas, braços projetados, cordoalhas e pórticos instalados com a função de sustentação dos semáforos;
- Controladores semafóricos: são equipamentos programáveis responsáveis por comandar as trocas das indicações luminosas dos grupos focais e supervisionar o fluxo da via;

- Detectores de tráfego: são dispositivos utilizados para monitorar o tráfego de veículos motorizados, não motorizados e pedestres em um local específico da via.

O conjunto óptico constituinte de cada foco semafórico é instalado em uma caixa porta-foco e possui uma lente instalada à frente da fonte de luz com objetivo de protegê-lo contra impactos, sujeira e intempéries. Em alguns casos, a lente também é responsável por distribuir a luz de maneira homogênea e definir a cor indicada pelo foco. Frequentemente, as fontes de luz empregadas em semáforos utilizam a tecnologia de lâmpadas incandescentes com filamento reforçado, lâmpadas halógenas ou módulos de LED. O elemento óptico pode conter um refletor para direcionar o fluxo luminoso emitido pela fonte de luz (CONTRAN, 2014).

Além disso, o foco semafórico pode ser equipado com uma máscara para definir o símbolo ou pictograma (seta, silhueta, bonecos, mão ou bicicleta) a ser visualizado. No entanto, nos focos semafóricos que utilizam módulos de LED como fonte luminosa, é facultativo o uso de máscara, uma vez que o símbolo sinalizado pode ser formado com o arranjo dos LEDs do módulo (CONTRAN, 2014).

O semáforo deve possuir uma pestana (cobre-foco) instalada sobre cada foco. A função da pestana é reduzir a incidência de luz solar sobre a lente e, conseqüentemente, melhorar a visibilidade da sinalização e limitar a visibilidade apenas aos usuários da via para a qual o equipamento foi instalado (CONTRAN, 2014).

A Figura 14 mostra os elementos dos focos semafóricos com LED e com lâmpada incandescente.

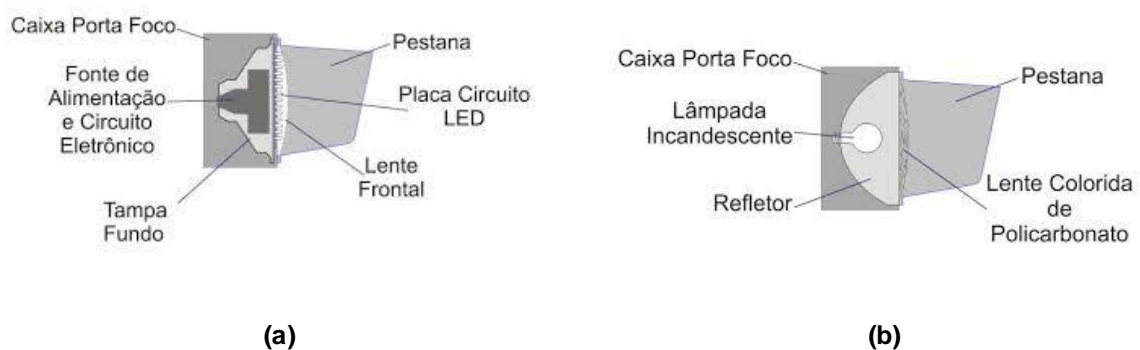


Figura 14 - Elementos constituintes dos focos semafóricos com (a) LED e (b) lâmpada incandescente.

Fonte: Extraído do manual brasileiro de sinalização de trânsito (2014).

Os semáforos instalados sobre as vias devem ser equipados com um anteparo para destacar e/ou melhorar a visualização da sinalização. Entretanto, seu uso é opcional nos semáforos instalados em coluna simples na lateral da via. O anteparo é instalado atrás do grupo focal e na Figura 15 é possível observar alguns modelos (CONTRAN, 2014).

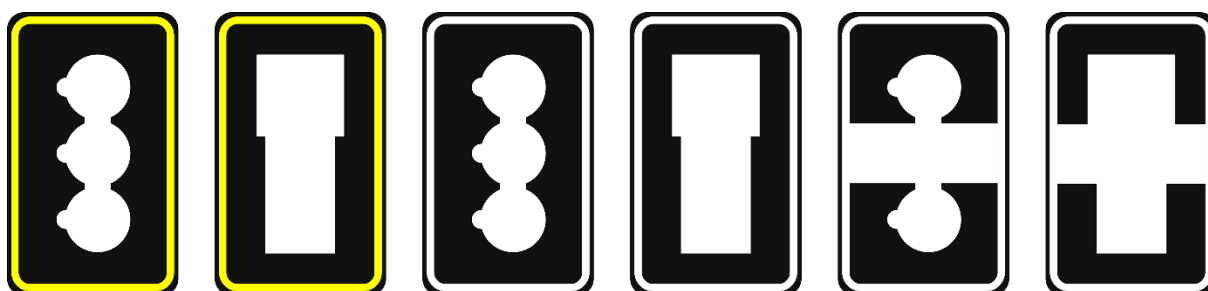


Figura 15 - Exemplos de anteparos com orla.

Fonte: Adaptado do manual brasileiro de sinalização de trânsito (2014).

O tipo de estrutura responsável pela sustentação dos semáforos depende de alguns fatores, tais como velocidade do vento, esforço aplicado pelos grupos focais, necessidade de projeção da sinalização semafórica sobre a via, condições geométricas do local, condições de visibilidade, composição do tráfego e largura da pista da via. Contudo, os semáforos podem ser instalados em colunas, braços projetados, cordoalhas ou pórticos (CONTRAN, 2014).

A coordenação dos semáforos é realizada por um controlador que determina a lógica de funcionamento do grupo focal por meio da sua programação. Estes controladores podem ser do tipo eletromecânico ou eletrônico. O Controlador eletromecânico atua por meio da associação de recursos mecânicos e muitas vezes suportam apenas um modo de operação. Em contrapartida, a programação dos controladores eletrônicos “é implementada a partir de recursos computacionais do equipamento”. Esta tecnologia permite o uso de recursos mais avançados na programação do dispositivo, conferindo maior flexibilidade na operação do equipamento (CONTRAN, 2014).

O sistema semafórico pode ser otimizado com o uso de detectores de tráfego em complemento ao controlador semafórico e tem a função de detectar o fluxo de veículos e pedestres. Estes dispositivos podem ser implementados utilizando diferentes tecnologias. É possível detectar o fluxo de veículos através da variação de fluxo magnético em laços detectores indutivos instalados na via, através do tratamento de imagem utilizando laços virtuais para detecção da mudança do padrão de imagem

de vídeo, por meio de detectores por micro-ondas, detecção magnética através da perturbação no campo magnético terrestre provocada pelos veículos, detecção por radiação infravermelha utilizando o princípio da reflexão de ondas e por meio da detecção ultrassônica que consistem em captar a energia com frequência ultrassônica emitida pelo sensor e refletida pelos veículos. Por sua vez, a detecção de solicitação de pedestres pode ser realizada por botoeiras instaladas nos cruzamentos (CONTRAN, 2014).

A Figura 16 ilustra os principais componentes da sinalização semafórica.

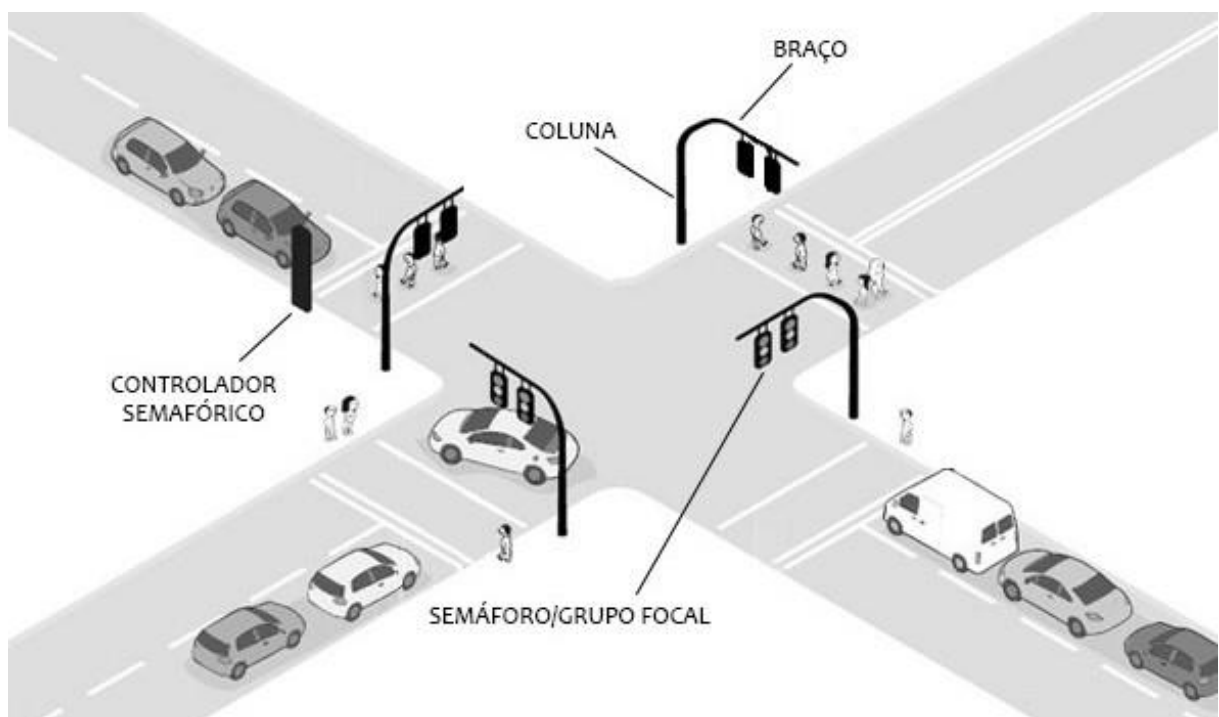


Figura 16 - Principais componentes da sinalização semafórica.
Fonte: Adaptado do jornal Folha de S. Paulo.

2.4.1. Controle e Operação do Semáforo

O funcionamento do semáforo acontece com base no plano semafórico elaborado para programação da sinalização semafórica das interseções sinalizadas. O plano semafórico é representado por diagramas de estágios e de intervalos luminosos (CONTRAN, 2014).

O diagrama de estágio representa os movimentos possíveis durante cada estágio completo da sinalização semafórica, compreendido pelo tempo de verde e de

entrevéde subsequente. A Figura 17 mostra um exemplo de diagrama de estágio para o controle dos movimentos em uma interseção de vias (CONTRAN, 2014).

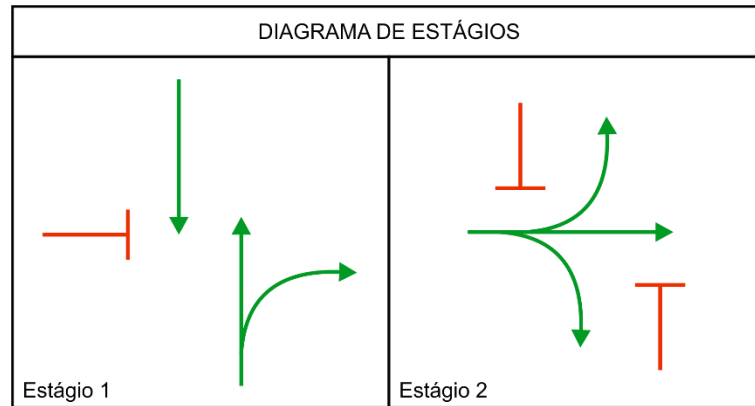


Figura 17 - Exemplo de diagrama de estágio.
 Fonte: Adaptado do manual brasileiro de sinalização de trânsito.

O diagrama de intervalos luminosos representa a duração e sequência dos intervalos luminosos e estágios de cada grupo semafórico através de barras conforme mostrado na Figura 18.

DIAGRAMA DE INTERVALOS LUMINOSOS						
Instante (s)	0	30	34	36	74	78 80
Grupo 1	[Green bar]		[Yellow bar]	[Red bar]		
Grupo 2	[Red bar]			[Green bar]		[Yellow bar]
Intervalos	1	2	3	4	5	6
Duração (s)	30	4	2	38	4	2
Ciclo (%)	38	5	2	48	5	2
Estágios	1			2		

Figura 18 - Exemplo de diagrama de intervalos luminosos.
 Fonte: Adaptado do manual brasileiro de sinalização de trânsito.

A sinalização semafórica pode controlar o tráfego de acordo com vários tipos e estratégias de controle.

Os tipos de controle baseiam-se no controle em tempo fixo ou no controle atuado pelo tráfego. O controle em tempo fixo é fundamentado em apenas um plano semafórico, ou em vários planos semafóricos elaborados para períodos distintos do dia ou para diferentes dias da semana. Desta forma, a duração de cada indicação luminosa é fixa para cada um dos planos semafóricos (CONTRAN, 2014).

O controle atuado pelo tráfego é subdividido em duas categorias: totalmente atuados e semiatuados. O primeiro utiliza as informações obtidas pelos detectores de tráfego e permite alteração em tempo real no tempo dos estágios. O controle semiatuado concede o direito de passagem à via principal (maior volume) continuamente até que as botoeiras de detecção de pedestres sejam acionadas ou até que os sensores instalados nas aproximações da via secundária indiquem a presença de veículos motorizados (CONTRAN, 2014).

O controle pode ser feito de forma isolada ou em rede. O controle isolado consiste em controlar o tráfego de cada interseção independentemente das demais, considerando apenas os indicadores históricos do tráfego local. O controle em rede consiste na coordenação semafórica entre várias interseções com a finalidade de privilegiar o tráfego em uma via ou em uma região específica (CONTRAN, 2014).

A programação semafórica ocorre de forma local ou centralizada. O modo de controle local consiste na programação direta e manual do controlador semafórico em campo. Entretanto, o modo de controle centralizado é caracterizado pelo gerenciamento dos controladores semafóricos por um servidor através de uma rede de comunicação (CONTRAN, 2014).

Contudo, a duração dos intervalos luminosos de cada grupo focal depende tanto do tipo de controle como da estratégia de controle adotada. No entanto, estes intervalos são definidos através do estudo detalhado do tráfego local, considerando o volume do tráfego, tipo de veículo, tempo perdido em um ciclo da sinalização semafórica, capacidade da via, etc.

2.5. ANÁLISE DE INVESTIMENTOS

O processo de análise de investimento baseia-se em técnicas de engenharia econômica, fundamentada na ciência denominada matemática financeira. A avaliação do desempenho de um investimento pode envolver desde critérios monetários, até vantagens estratégicas e impacto ambiental. Entretanto, as técnicas de engenharia econômica permite analisar o investimento em termos monetários, relacionando-os ao tempo, mensurando os fatores envolvidos em dinheiro (CASAROTTO FILHO; KOPITKE, 2000).

Frente a escassez de recursos e a necessidade da sua utilização, a análise prévia de investimentos procura otimizar a sua utilização e, conseqüentemente, permite a racionalização desses recursos, ou seja, possibilita que o mesmo serviço seja oferecido e produzido minimizando a utilização dos recursos de capital (CASAROTTO FILHO; KOPITTKKE, 2000).

Para Casarotto Filho e Kopittke (2000), “A Engenharia Econômica objetiva a análise econômica de decisões sobre investimentos. E tem aplicações bastante amplas, pois os investimentos poderão tanto ser de empresas, como de particulares ou de entidades governamentais”.

A decisão de se fazer investimento de capital avalia diversas alternativas tecnicamente viáveis com auxílio de indicadores de análise de projetos para analisar a viabilidade financeira individual de cada projeto (SOUZA; CLEMENTE, 2008).

Clemente e Souza (2008) propõe para análise da viabilidade econômica de projetos de investimento de capital a utilização da metodologia multi-índice. Esta metodologia relaciona vários indicadores financeiros e auxilia no processo decisório através da relação entre a rentabilidade e o risco do projeto.

2.5.1. Indicadores Financeiros para Análise de Projetos de Investimentos

Para Clemente e Souza (2008), os indicadores financeiros de análise de projeto de investimento podem ser classificados em dois grupos: indicadores de retorno do projeto e indicadores de risco do projeto. A categoria de indicadores de retorno do projeto abrange os métodos de análise de investimento de Valor Presente Líquido (VPL), Valor Presente Líquido Anualizado (VPLA), Índice de Benefício/Custo (IBC) e o Retorno Adicional sobre o Investimento (ROIA). Por sua vez a categoria de indicadores de risco do projeto compreende a Taxa Interna de Retorno (TIR), o Período de Recuperação do Investimento (*Payback*) e o Ponto de Fisher.

Contudo, o presente estudo será baseado apenas nos métodos de VPL e *Payback*.

2.5.1.1. Taxa Mínima de Atratividade (TMA)

Basicamente, a atratividade financeira de um projeto de investimento é verificada caso o fluxo esperado de benefícios, aferidos em valores monetários, seja superior ao valor do investimento como mostra a Equação (1).

$$- \text{Valor do investimento} + \sum \text{Fluxo esperado de benefícios} > 0 \quad (1)$$

No entanto, o fluxo esperado de benefícios ocorre em períodos distintos e, portanto, devem possuir a mesma referência temporal, pois valores monetários em tempos distintos possuem significados diferentes (SOUZA; CLEMENTE, 2008). Logo, fixando todos os valores para um mesmo referencial no tempo, o critério básico de atratividade pode ser reescrito pela Equação (2).

$$-FC_0 + \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} > 0 \quad (2)$$

Em que FC_0 é o investimento inicial, FC_t corresponde ao fluxo de caixa no tempo “t” e n representa o período analisado. Para descapitalização do fluxo de caixa, deve-se então definir o valor da taxa “i” conhecida como Taxa Mínima de Atratividade (TMA). A TMA pode ser entendida como a taxa mínima de retorno de um investimento (FILHO; KOPITKE, 2000; SOUZA; CLEMENTE, 2008).

2.5.1.2. Valor Presente Líquido (VPL)

O VPL concentra todos os valores esperados do fluxo de caixa na data inicial, utilizando a TMA como taxa de descapitalização. O VPL pode ser calculado através da Equação (3) (SOUZA; CLEMENTE, 2008).

$$VPL = -FC_0 + \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1 + TMA)^t} \quad (3)$$

Um VPL positivo significa que o fluxo esperado de benefícios deve superar os investimentos. Entretanto, não é suficiente para determinar a atratividade do projeto, sendo que para isso, deve-se analisar outros indicadores. Contudo, o VPL pode ser utilizado para comparar a rentabilidade entre diferentes investimentos (SOUZA; CLEMENTE, 2008).

2.5.1.3. Período de Recuperação do Investimento (*Payback*)

Enquanto o VPL está associado a rentabilidade do projeto, o *Payback* está relacionado com o risco do projeto. Basicamente, o *Payback* indica o número de períodos necessários para que o fluxo de benefícios supere o capital investido (SOUZA; CLEMENTE, 2008).

O *Payback* pode ser simples ou descontado. O *Payback* simples caracteriza-se por identificar o número de períodos necessários para que o fluxo de caixa líquido ao longo do tempo seja zero. Embora o método do *Payback* simples seja muito utilizado pela sua simplicidade e aplicabilidade, este método não considera o valor do dinheiro no tempo e desconsidera as receitas após o período de recuperação do capital investido (GITMAN, 2004).

O *Payback* descontado identifica o tempo necessário para recuperação do investimento considerando a TMA como taxa de descapitalização. Segundo Rasoto et al. (2012), o *Payback* descontado é calculado a partir da Equação (4).

$$Payback = \text{mínimo } \{n\}, \text{ tal que } \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TMA)^t} \geq -FC_0 \quad (4)$$

Mesmo considerando a TMA como taxa de descapitalização, este método não analisa os fluxos de caixa após o período de recuperação do capital investido. Para isso, Kassai et al. (2007) propõe utilizar o método do *Payback* total, que

considera os fluxos existentes após o período de recuperação do investimento e a descapitalização do fluxo de caixa total do projeto.

Em resumo, quanto maior o Payback, isto é, quanto mais o *Payback* se aproxima do final do horizonte de planejamento, maior é o risco associado ao projeto (RASOTO *et al.*, 2012; SOUZA; CLEMENTE, 2008).

3. METODOLOGIA

3.1. ANÁLISE DO RECURSO SOLAR

Para dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos, é imprescindível quantificar o recurso solar disponível no local da instalação. As medições em questão podem ser realizadas com instrumentos solarimétricos equipados com sensores específicos e são de grande importância para o estudo da influência das condições climáticas e atmosféricas. A medição padrão consiste em mensurar tanto a radiação global como as componentes direta e difusa (CARVALHO; NETO, 2012; CEPEL, 2000, 2014).

De acordo com o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel),

Com um histórico dessas medidas, pode-se viabilizar a instalação de sistemas fotovoltaicos em uma determinada região, garantindo o máximo aproveitamento do recurso ao longo do ano, onde as variações da intensidade da radiação solar sofrem significativas alterações (CEPEL, 2014).

A medição da duração da insolação é realizada pelo heliógrafo. O actinógrafo é um equipamento de baixo custo utilizado para aferir a radiação solar total ou sua componente difusa. O piranômetro termoeletrico e o piranômetro fotovoltaico são utilizados para medir a irradiância solar global. A medição da irradiância direta com incidência normal à superfície pode ser efetuada por um pireliômetro, dispositivo com uma pequena abertura para focar apenas o disco solar e uma região adjacente denominada circunsolar (CEPEL, 2000).

Alguns autores propõem analisar a velocidade e direção dos ventos, temperatura, índices pluviométricos e umidade relativa do ar juntamente com a radiação solar durante 11 anos, tempo necessário para completar um ciclo solar principal. No entanto, devido ao custo e o número de equipamentos ser insuficiente para coleta de dados consistentes, em geral, utilizam-se na atualidade sistemas de sensoriamento remoto através de satélites geoestacionários para aquisição das informações necessárias (CARVALHO; NETO, 2012). Alguns *sites* especializados disponibilizam mapas e tabelas com as informações de radiação global diária semelhante ao apresentado na Figura 19.

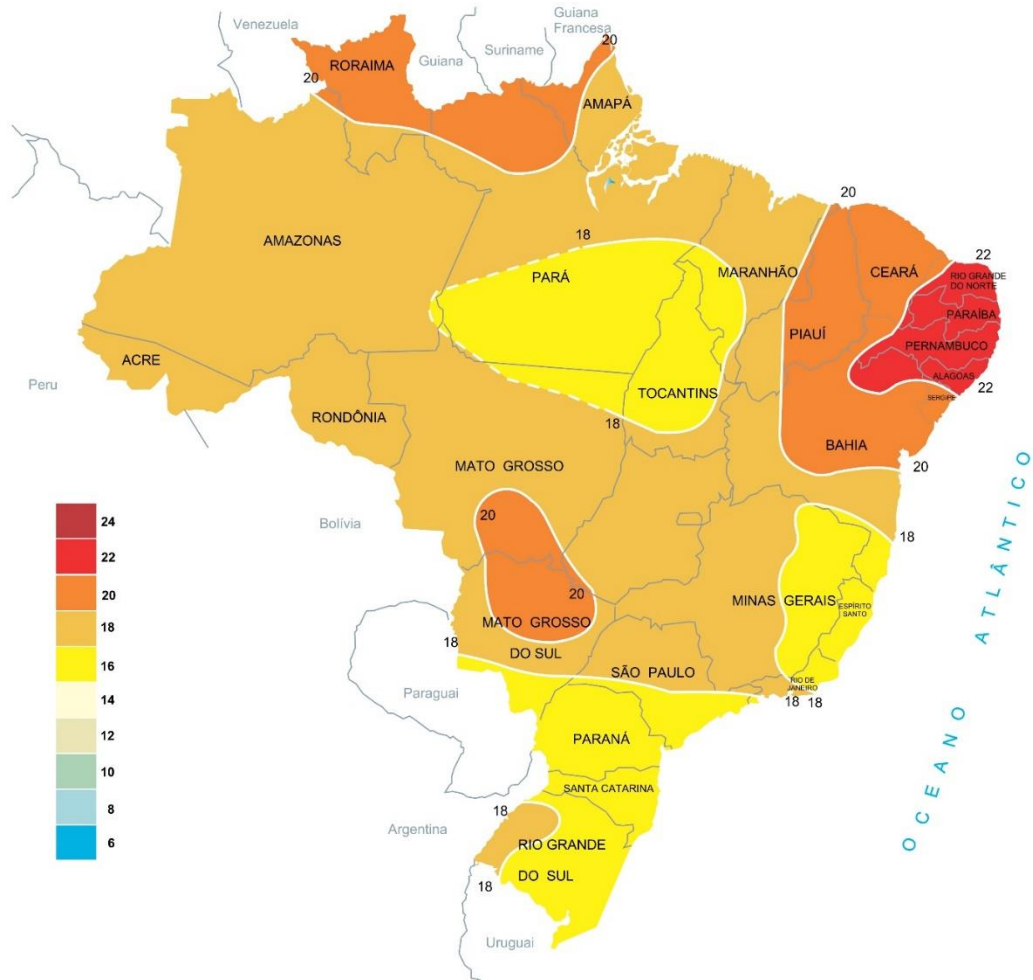


Figura 19 - Radiação solar global diária, média mensal (MJ/m².dia)
Fonte: Atlas solarimétrico do Brasil (2000).

Uma das formas para realizar o levantamento do recurso solar disponível é por meio da utilização dos dados disponibilizados pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB) através do programa *SunData*. O programa *SunData* disponibiliza os valores de irradiação solar diária média mensal no plano horizontal para cerca de 350 pontos no Brasil e em países próximos, de acordo com as coordenadas geográficas do local (CEPEL, 2014; CRESESB, 2016).

Os índices de radiação solar podem ser especificados como valores instantâneos do fluxo de potência ou valores de energia por unidade de área, caracterizando a irradiância e irradiação, respectivamente. No entanto, os dados de radiação solar comumente são apresentados em valores médios mensais para a energia acumulada durante o período de um dia. É comum determinar os índices de radiação solar utilizando-se um histórico de informações registradas durante um intervalo de tempo (CEPEL, 2014). Os dados disponibilizados pelo programa *SunData* correspondem aos valores de irradiação solar diárias médias mensais para os 12

meses do ano e são fornecidos em kWh/m². No caso da cidade de Pato Branco, o programa fornece valores para três localidades próximas ao local de interesse (CRESESB, 2016).

A influência da irradiância solar sobre um gerador fotovoltaico é relativamente maior se comparado com a temperatura nos módulos, pois está amortecida pela capacidade térmica dos módulos. Porém, em geral, nos projetos de sistemas fotovoltaicos, ignora-se a variação instantânea da irradiação solar, considerando apenas a energia elétrica convertida durante o intervalo de tempo de uma hora. A forte linearidade entre a produção de energia e a irradiação horária possibilita expressar o valor diário acumulado de energia solar em Horas de Sol Pleno (HSP). Isto significa representar o número de horas em que a irradiância solar permanece constante e igual a 1 kWh/m² de forma que a energia resultante é equivalente a energia acumulada disponibilizada pelo sol ao longo do dia, conforme ilustrado na Figura 20 (CEPEL, 2014).

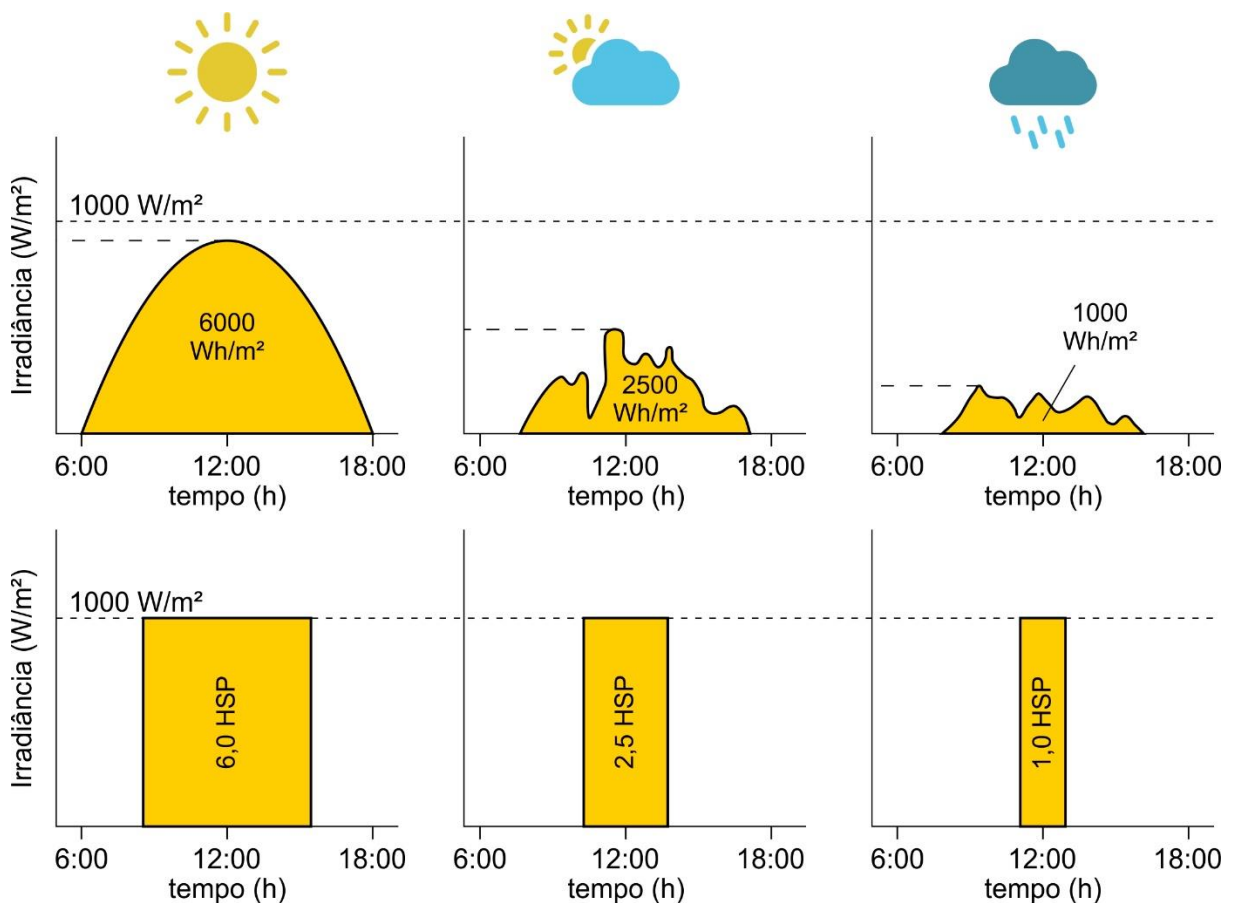


Figura 20 - Perfis de radiação solar diária e equivalentes em HSP.

Fonte: Adaptado do Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (2014).

Portanto, nos projetos envolvendo dados mensais ou anuais, a irradiação incidente no plano dos módulos fotovoltaicos pode ser representada pelo valor médio diário em kWh/m² e, posteriormente, pelo valor de HSP a partir da conversão para o plano inclinado (CEPEL, 2014).

Existem muitas ferramentas na *internet* para obtenção das informações de radiação solar global (FONTANA, 2015). No entanto, para Villalva e Gazoli (2012), é conveniente realizar o dimensionamento dos sistemas baseado em medições realizadas por equipamentos específicos para maior fidelidade dos dados levantados e melhor aproveitamento da energia solar disponível.

3.2. CONSUMO DO SISTEMA SEMAFÓRICO

O levantamento da demanda e do consumo de energia elétrica é essencial para o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos. A demanda normalmente é determinada somando a energia consumida por cada equipamento da instalação. Geralmente, os equipamentos são listados em planilhas contendo potência e tempo de operação para então determinar o consumo diário de energia para cada dispositivo, em Wh/dia (CEPEL, 2014). O consumo diário (em Wh/dia ou kWh/dia) é obtido realizando o produto entre a potência do dispositivo e o seu tempo de operação. Desta forma, a energia gerada pelo sistema fotovoltaico é determinada pela soma do consumo de todos os equipamentos da instalação (SOUZA, [2010?]).

O consumo médio mensal de energia pode ser calculado em função do regime de funcionamento e da potência demandada conforme Equação (5) (CEPEL, 2014).

$$C_m = \frac{P_e \cdot N_d \cdot D_m}{1000} \quad (5)$$

É importante ressaltar que, alguns equipamentos consomem energia elétrica de forma intermitente e, nestes casos, devem ser utilizados valores de consumo disponibilizados pelo seu fabricante.

O dimensionamento simplificado do sistema fotovoltaicos pode ser baseado no consumo diário de cada equipamento. No entanto, para maior fidelidade, é possível dimensionar o sistema a partir de uma curva de carga (CEPEL, 2014).

O levantamento preciso da curva de carga, identificando as possíveis sazonalidades mensais e anuais, pode implicar uma redução importante do custo do sistema e reduzir o risco de falta de energia (CEPEL, 2014).

A curva de carga é uma importante ferramenta no desenvolvimento de projetos de sistemas fotovoltaicos envolvendo sistemas isolados e sistemas conectados à rede elétrica, em que é necessário definir a parcela da carga atendida pelo sistema de geração fotovoltaica (CEPEL, 2014).

A Figura 21 ilustra uma curva de carga típica para uma comunidade da Amazônia.

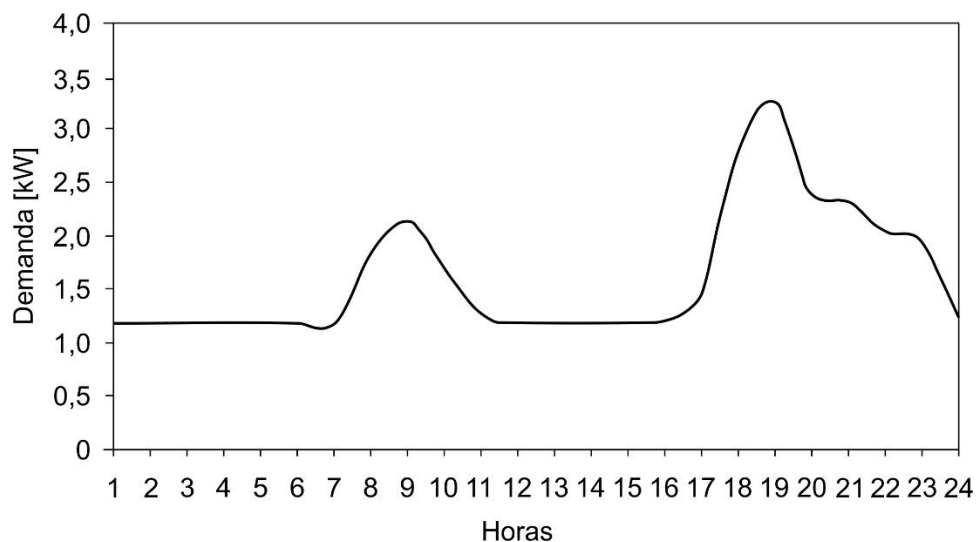


Figura 21 - Exemplo de curva de carga para uma comunidade da Amazônia.
Fonte: Adaptado de Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (2014).

Além da potência elétrica, a especificação da carga deve conter os valores de eficiência, a tensão e a corrente nominal.

3.3. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Dentre outros fatores, o projeto de um sistema fotovoltaico envolve a correta direção e inclinação dos módulos fotovoltaicos, disponibilidade de área para

instalação, disponibilidade do recurso solar e da demanda a ser atendida (CEPEL, 2014).

Existem duas configurações básicas de sistemas fotovoltaicos: Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFI) e Sistemas Conectados à Rede (SFCR). No primeiro caso, o sistema fotovoltaico deve atender toda a demanda de energia. Nos SFCR, a demanda de energia pode ser complementada pela rede de distribuição. Contudo, o dimensionamento dos SFCR utiliza alguns dos procedimentos utilizados no dimensionamento dos SFI (CEPEL, 2014).

Basicamente, o sistema deve possuir um bloco de geração fotovoltaica, equipamentos de controle e condicionamento de potência e um banco de baterias para armazenamento de energia (CEPEL, 2014).

De acordo com o Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (2014), as principais etapas do projeto de um sistema fotovoltaico são:

1. Levantamento adequado do recurso solar disponível no local da instalação;
2. Definição da localização e configuração do sistema;
3. Levantamento adequado de demanda e consumo de energia elétrica;
4. Dimensionamento do gerador fotovoltaico;
5. Dimensionamento dos equipamentos de condicionamento de potência;
6. Dimensionamento do sistema de armazenamento de energia elétrica.

Uma das formas para realizar o levantamento do recurso solar disponível é por meio da utilização dos dados disponibilizados pelo CRESESB através do programa SunData. O programa disponibiliza os valores de irradiação solar diária média mensal no plano horizontal para cerca de 350 pontos no Brasil e em países próximos, de acordo com as coordenadas geográficas do local (CRESESB, 2016).

Como os módulos fotovoltaicos normalmente são instalados em planos inclinados e a posição solar varia instantaneamente, o correto dimensionamento de um sistema fotovoltaico necessita conhecer os valores da irradiação solar no local da instalação e no plano dos módulos. “Em geral, o valor da latitude local é usado como ângulo de inclinação do módulo fotovoltaico” (CEPEL, 2014; CRESESB, 2016).

Os valores de radiação solar podem ser representados com diversos períodos de integração em termos do fluxo de potência instantâneo ou valores por unidade de área. Comumente, esses dados são representados através de valores

médios mensais para a energia acumulada durante o dia e, portanto, possibilitam determinar o potencial de conversão de energia (CEPEL, 2014).

Como discutido no item 3.1, a forte linearidade entre a produção de energia e a irradiação horária possibilita expressar o valor diário acumulado de energia solar em HSP. Isto significa representar o número de horas em que a irradiância solar permanece constante e igual a 1 kW/m^2 de forma que a energia resultante equivale a energia acumulada disponibilizada pelo sol ao longo do dia (CEPEL, 2014).

Contudo, a estratégia adotada para dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos define os dados de radiação solar e o período analisado. Desta forma, o dimensionamento dos SFI e SFCR deve considerar o valor de radiação solar para atender a potência desejada de acordo com o projeto e os dados solarimétricos devem ser analisados em escala de tempo compatíveis com o período de consumo do sistema atendido. Além disso, a estratégia para dimensionamento deve considerar se o sistema fotovoltaico possui banco de baterias e se este está associado ao sistema de compensação de energia regulamentado pela Resolução Normativa nº 482, de abril de 2012 da Aneel. No primeiro caso (SFI), utilizar um banco de baterias possibilita aumentar a autonomia do sistema e, ainda contribui para complementar a geração fotovoltaica ao longo do dia, devido a estocasticidade da fonte. No segundo caso (SFCR), o excedente gerado pode ser injetado à rede de distribuição e convertido como crédito futuro ao consumidor.

Desse modo, é comum no dimensionamento dos SFI, considerar-se o valor da menor média mensal (pior caso) de radiação solar para atender toda a potência da carga instalada. Os SFCR, por sua vez, podem ser especificados para atender a demanda durante um período de tempo definido, considerando a média dos valores de irradiação solar média. Para os SFI, utilizar banco de baterias e o valor máximo de radiação solar local no dimensionamento consiste em aumentar a autonomia do sistema e, conseqüentemente, reduzir o consumo de energia elétrica da rede de distribuição. Por outro lado, os investimentos serão maiores. Desta forma, o valor de radiação solar adotado para projeto impacta diretamente no custo de implementação de um projeto devido a quantidade de módulos necessários para atendimento a carga. Portanto, em ambos os casos deve ser considerado um valor de radiação solar adequado ao objetivo do projeto.

O dimensionamento dos SFI é baseado no consumo mínimo estabelecido pelo sistema atendido, garantindo o atendimento a demanda elétrica num determinado

período de tempo, mesmo quando não há geração (CEPEL, 2014). Assim, é possível especificar os módulos fotovoltaicos e, quando necessário, o inversor de frequência, banco de baterias e controlador de carga. A energia fornecida pelo gerador fotovoltaico é determinada em função das cargas atendidas em corrente alternada e em corrente contínua. Além disso, deve ser considerada a eficiência dos equipamentos de armazenamento e condicionamento de potência, conforme a Equação (6).

$$E = \frac{E_{cc}}{\eta_{bat}} + \frac{E_{ca}}{\eta_{bat} \cdot \eta_{inv}} \quad (6)$$

Portanto, a potência total fornecida pelo gerador fotovoltaico pode ser determinada em função do valor acumulado de energia solar durante um dia (HSP) e pelo consumo diário de energia. Desta forma, a potência mínima fornecida pelo gerador fotovoltaico para atender o consumo diário da instalação é determinada pela Equação (7) (FIGUEIRA, 2014).

$$P_{SFV} = \frac{E}{HSP} \quad (7)$$

As informações técnicas dos módulos fotovoltaicos são fornecidas pelos próprios fabricantes.

A utilização de dispositivos atendidos em corrente contínua dispensa o uso de inversores de frequência. Por outro lado, para conexão do sistema fotovoltaico com a rede de distribuição e para atendimento à cargas em corrente alternada, é necessário especificar um inversor de frequência para fazer a conversão da energia gerada pelos módulos ou painéis fotovoltaicos (CEPEL, 2014).

Nos sistemas isolados, o inversor de frequência deve ser dimensionado conforme a demanda máxima da instalação. Desta forma, a potência do inversor deve ser igual ou superior a potência máxima da curva de carga. Caso a probabilidade das cargas instaladas operar simultaneamente seja alta, então é possível considerar o somatório da potência de todas as cargas. Além disso, é recomendável especificar inversores com eficiência elevada para reduzir as perdas do sistema, sobretudo

quando, na maior parte do tempo, o regime de funcionamento das cargas corresponde a uma pequena parcela da potência nominal do inversor, na qual, geralmente, este apresenta baixa eficiência (CEPEL, 2014).

Dentre outros fatores, o dimensionamento do inversor depende da tecnologia e potência do gerador fotovoltaico, além da topologia de instalação escolhida (CEPEL, 2014). Segundo Cechinel, Yoshida e Sá (2014), os inversores devem ser especificados com potência 10% superior à potência total das cargas instaladas. O Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (2014) recomenda a utilização da eficiência indicada pelo fabricante do inversor para sua especificação. A potência nominal do inversor pode ser determinada através da Equação (8) (ALVES *et al.*, 2015).

$$0,7 \cdot P_{SFV} < P_{inv} < 1,2 \cdot P_{SFV} \quad (8)$$

Para o dimensionamento do banco de baterias, utiliza-se o valor máximo de energia solicitada diariamente pela carga resultante da Equação (6). Desta forma, adotando uma autonomia de N dias, a capacidade de armazenamento (em Ah) do sistema de acumulação pode ser determinada de acordo com a Equação (9) (PEREIRA, 2012).

$$C_{bat} = \frac{E \cdot N}{V_{sist}} \quad (9)$$

Entretanto, a capacidade real do banco de baterias varia em função da profundidade de descarga máxima e pode ser determinada através da Equação 10 (PEREIRA, 2012)

$$C_{real} = \frac{C_{bat}}{P_d} \quad (10)$$

O número de baterias necessárias ao banco de baterias é determinado pela Equação 11.

$$N_{bat} = \frac{C_{real}}{C_{individual}} \quad (11)$$

O gerenciamento da energia armazenada e consumida do banco de baterias é realizado pelo controlador de carga, evitando o desgaste das baterias. O dimensionamento do controlador de carga deve considerar a corrente de curto circuito do módulo ou painel fotovoltaico, devendo suportá-la. No entanto, depende das associações realizadas entre os módulos instalados (PEREIRA, 2012). A Equação 12 determina a corrente de curto circuito suportável pelo controlador de carga.

$$I_{cc} = M_p \cdot I_{cc\text{módulos}} \quad (12)$$

Geralmente, o sistema de geração distribuída fotovoltaica é instalado próximo ao centro carga (ANEEL, 2016a). Os painéis fotovoltaicos, por sua vez, devem estar orientados em direção à linha do equador para maximizar a captação de energia ao longo do ano, devendo os módulos instalados no hemisfério sul estar orientados ao norte geográfico (CEPEL, 2014). Entretanto, nem sempre a direção do norte verdadeiro coincide com o norte magnético da terra, sendo necessário realizar a correção do referencial magnético através da declinação magnética do local de instalação obtida computacionalmente ou através de mapas específicos. No Brasil, estes dados são disponibilizados para *download* pelo Observatório Nacional e podem ser consultados conhecendo as coordenadas geográficas do local (CEPEL, 2014). A *National Oceanic and Atmospheric Administration* disponibiliza os valores de declinação magnética para qualquer local do mundo através da sua *homepage*.

A Figura 22 ilustra a correção do referencial magnético para uma declinação magnética local de 20° negativos.

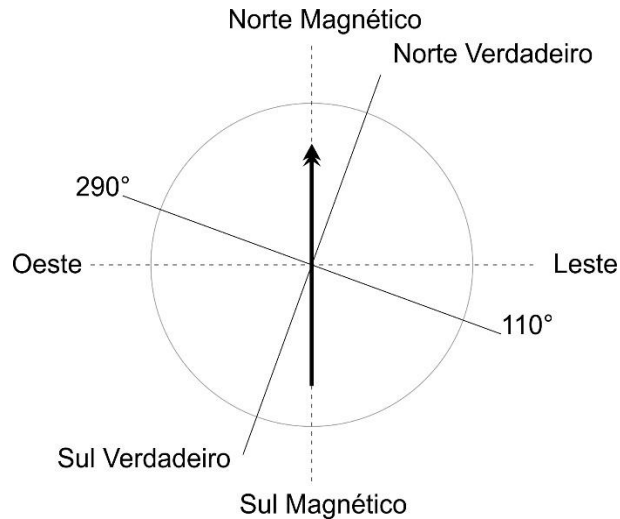


Figura 22 - Exemplo de correção da declinação magnética.
Fonte: Adaptado do Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (2014).

Além da correta orientação, os módulos devem ser instalados com inclinação semelhante a latitude do local de instalação, sem perda significativa da energia gerada para uma variação de 10° em torno da latitude local. No entanto, nos locais próximos da linha do equador, aconselha-se instalar os módulos e painéis fotovoltaicos com inclinação mínima de 10° para favorecer a limpeza natural dos módulos pela ação da água da chuva (CEPEL, 2014).

Os geradores fotovoltaicos podem ser equipados com sistema de rastreamento manual ou automático do movimento (combinação entre a variação da inclinação ou do ângulo azimutal) aparente do sol, visando a maximização da potência gerada. Os sistemas automáticos apresentam desempenho melhor em relação aos sistemas manuais de rastreamento, no entanto, seu custo é elevado e estão sujeitos a falhas devido a utilização de peças móveis (CEPEL, 2014).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. LEVANTAMENTO DO RECURSO SOLAR

O recurso solar disponível para a cidade de Pato Branco foi verificado através do programa *SunData* disponibilizado pelo Cresesb e a busca realizada a partir das coordenadas geográficas do município.

A latitude e a longitude foram obtidas através do programa *Google Earth*. De acordo com o programa, a latitude e a longitude do município de Pato Branco são, respectivamente, 26° 13' 44" ao sul e 52° 40' 15" a oeste. No entanto, devido a indisponibilidade dos dados referente a cidade de Pato Branco, considerou-se os valores de irradiação solar diária média para os municípios de Palmas, Xanxerê e Chapecó. Segundo o Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos 2014, se a instalação estiver afastada 50 km ou mais da estação de origem dos dados, as estimativas de radiação solar através dos dados de satélite são mais precisas do que uma extrapolação de dados (CEPEL, 2014).

Os valores de irradiação solar diária média mensal no plano horizontal para cada um dos municípios são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Irradiação Solar no Plano Horizontal para localidades próximas a Pato Branco (kWh/m ² .dia).														
Município	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
Xanxerê	5,5	5,4	5,1	4,2	3,5	2,6	3,3	3,6	4,6	5,3	6	6,1	4,6	3,5
Palmas	5,3	4,7	4,5	4	3,5	2,8	3,1	3,6	4,1	4,9	5,7	5,8	4,33	3,05
Chapecó	5,7	5,9	5,1	4,4	3,6	3	3,3	3,8	4,2	5,6	6,3	6,6	4,78	3,59

Fonte: Adaptado de Cresesb (2016).

A Tabela 5 evidencia a diferença de irradiação solar durante todo o ano, sendo os menores valores médios correspondentes ao mês de junho. Ainda, o programa *SunData* disponibiliza os valores de irradiação solar no plano inclinado para cada um dos três municípios. A Tabela 6 fornece a irradiação solar diária média mensal para Xanxerê.

Tabela 6 - Irradiação Solar no Plano Inclinado para Xanxerê/SC (kWh/m².dia).

Inclinação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Plano horizontal 0° N	5,50	5,44	5,06	4,19	3,53	2,58	3,28	3,61	4,58	5,33	6,00	6,08
Igual a latitude 26° N	4,95	5,20	5,28	4,89	4,58	3,41	4,38	4,36	4,98	5,23	5,46	5,36
Maior média anual 22° N	5,08	5,28	5,30	4,83	4,47	3,31	4,26	4,28	4,96	5,30	5,59	5,52
Maior mínimo mensal 46° N	4,13	4,53	4,91	4,91	4,90	3,69	4,76	4,47	4,77	4,65	4,57	4,38

Fonte: Adaptado de Cresesb (2016).

Em Xanxerê, a maior irradiação solar diária média mensal no plano inclinado (26°) ocorre no mês de novembro (5,46 kWh/m².dia), ao passo que no mês de junho acontece a menor irradiação diária média mensal (3,41 kWh/m².dia).

A irradiação solar diária média mensal para o município de Chapecó pode ser observada na Tabela 7.

Tabela 7 - Irradiação Solar no Plano Inclinado para Chapecó/SC (kWh/m².dia).

Inclinação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Plano horizontal 0° N	5,72	5,86	5,06	4,36	3,61	2,97	3,33	3,75	4,22	5,64	6,25	6,56
Igual a latitude 26° N	5,14	5,60	5,28	5,11	4,71	4,03	4,46	4,55	4,56	5,54	5,68	5,76
Maior média anual 22° N	5,27	5,69	5,30	5,04	4,58	3,91	4,33	4,47	4,55	5,61	5,82	5,93
Maior mínimo mensal 46° N	4,42	5,00	5,00	5,17	5,02	4,38	4,82	4,69	4,41	5,04	4,91	4,86

Fonte: Adaptado de Cresesb (2016).

Neste caso, a maior irradiação diária média mensal ocorre no mês de dezembro (5,76 kWh/m².dia) e a menor acontece em junho (4,03 kWh/m².dia).

Por fim, a partir da Tabela 8, pode-se verificar os níveis de irradiação do município de Palmas, no Paraná.

Tabela 8 - Irradiação Solar no Plano Inclinado para Palmas/PR (kWh/m².dia).

Inclinação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Plano horizontal 0° N	5,25	4,69	4,50	4,00	3,53	2,78	3,11	3,64	4,08	4,92	5,67	5,83
Igual a latitude 26° N	4,74	4,48	4,67	4,64	4,58	3,73	4,12	4,40	4,39	4,82	5,17	5,15
Maior média anual 22° N	4,83	4,54	4,68	4,60	4,50	3,64	4,03	4,34	4,39	4,87	5,27	5,27
Maior mínimo mensal 46° N	4,09	4,03	4,41	4,68	4,88	4,03	4,43	4,53	4,25	4,39	4,49	4,38

Fonte: Adaptado de Cresesb (2016).

Da mesma forma como ocorre no município catarinense de Xanxerê, em Palmas, a maior irradiação diária média mensal ocorre no mês de novembro (5,17 kWh/m².dia) e a menor em junho (3,73 kWh/m².dia).

Portanto, os valores de irradiação diária média mensal no plano horizontal e inclinado (26°) dos três municípios analisados é 4,57 kWh/m².dia e 4,81 kWh/m².dia, respectivamente.

4.2. LEVANTAMENTO DA CURVA DE CARGA DO SISTEMA SEMAFÓRICO

Algumas das características do sistema semafórico implantado na cidade de Pato Branco foram disponibilizadas, através de entrevista, pelo setor responsável pela iluminação pública do município e pelo fabricante de alguns dos módulos semafóricos de LED utilizados na cidade. No entanto, devido a objeção encontrada na busca de algumas informações, o consumo do sistema semafórico foi estimado com base nos valores nominais da rede, dos dispositivos instalados e no ciclo de funcionamento do semáforo.

Por simplicidade, é adotado apenas um plano semafórico para estimativa do consumo, não levando em consideração a diferença de programação entre um semáforo e outro. Contudo, conforme analisado em campo, o sistema semafórico da cidade deve operar no amarelo intermitente diariamente entre as 0 horas e 5 horas. No entanto, no restante do período, o semáforo convencional instalado no cruzamento entre as ruas Itabira e Aimoré permanece 32 segundos no vermelho, 3 segundos no amarelo e 19 segundos no verde. Nos cruzamentos entre a rua Tocantins e as ruas Ibiporã e Iguaçu, os semáforos de LED instalados indicam 55 segundos no vermelho, 3 segundos no amarelo e 22 segundos no verde.

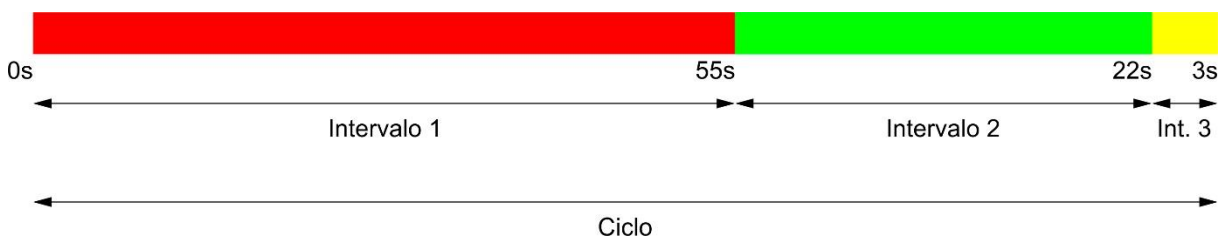


Figura 23 - Plano semafórico adotado para análise.

Fonte: Autoria própria.

De acordo com o responsável pelo sistema semafórico, os semáforos convencionais instalados no município são equipados com lâmpadas incandescentes com potência de 100 W conectadas em 127 V.

A Figura 24 apresenta o modelo de semáforo com tecnologia de lâmpadas incandescentes presentes no sistema semafórico de Pato Branco.



**Figura 24 - Semáforo convencional instalado no cruzamento entre as ruas Itabira e Aimoré.
Fonte: Autoria própria.**

Ressalta-se que, recentemente, a prefeitura da cidade instalou alguns módulos semafóricos baseados na tecnologia LED. De acordo com o fabricante desses módulos, estes são conectados em 12 V e possuem variação da potência elétrica em função da cor indicada e do foco iluminado.

Os semáforos de LED instalados no município são sinalizados por 3 focos principais e 10 auxiliares para contagem regressiva de tempo. Desta forma, quando as cores verde ou vermelha são indicadas, um dos focos auxiliares permanece ativo junto com o foco principal. A potência do foco vermelho principal é de 18 W ao passo que os focos auxiliares são menores e possuem uma potência de 9 W. Os focos principais das cores verde e amarelo possuem 12 W de potência e assim como os

focos auxiliares vermelho, os focos auxiliares da cor verde possuem potência reduzida, neste caso, correspondente a 6W.

A Figura 25 mostra o modelo de semáforo com tecnologia LED instalado no município.



**Figura 25 - Semáforo de LED instalado no cruzamento entre as ruas Itabira e Tocantins.
Fonte: Autoria própria.**

Além dos grupos focais, para controle e programação dos planos semaforicos, a sinalização semaforica é equipada com controladores semaforicos conectados à rede de distribuição. O fornecimento de energia elétrica para os semáforos convencionais é realizado de forma direta. Por outro lado, os semáforos de LED são alimentados através de uma fonte chaveada interna ao controlador. Esta fonte chaveada limita a tensão fornecida aos módulos de LED em 12 V a partir da rede de distribuição. Um controlador semaforico instalado entre a avenida Tupi e a rua Itabira é mostrado na Figura 26.



Figura 26 - Controlador semafórico instalado no cruzamento entre a Avenida Tupi e a rua Itabira.

Fonte: Autoria própria.

Os controladores semafóricos instalados no município são conectados em 127 V e possuem 37 W de potência nominal. Considerando o plano semafórico com ciclo de 80 segundos, conforme ilustrado na Figura 23 e utilizando os valores de potência nominal das lâmpadas utilizadas nos semáforos, é possível estimar o consumo de cada conjunto semafórico.

Ressalta-se que os semáforos indicam amarelo intermitente com frequência de 1 Hz durante 5 horas e operam normalmente por 19 horas entre as 5:00 e 0:00 horas, representando 855 ciclos de operação normal. De acordo com a programação semafórica, isso significa 13,06 horas de indicação vermelha, 5,23 horas de indicação verde e 0,71 horas de indicação amarela. No entanto, devido a frequência com que o foco amarelo é acionado durante a operação intermitente, o sistema consome energia apenas durante metade do tempo programado. Desta forma, soma-se 2,5 horas ao tempo de operação normal de indicação amarela, totalizando 3,21 horas.

A Tabela 9 apresenta o consumo diário de um módulo semafórico convencional calculado com base na potência de cada lâmpada incandescente em função do tempo sinalizado.

Tabela 9 - Consumo de um grupo focal com lâmpadas incandescentes.

Cor	Potência (W)	Tempo sinalizado (h)	Consumo diário (kWh)	Consumo mensal (kWh)	Consumo anual (kWh)
Vermelho	100	13,06	1,306	39,180	470,160
Verde	100	5,23	0,523	15,690	188,280
Amarelo	100	3,21	0,321	9,630	115,560
Total		21,50	2,150	64,500	774,000

Fonte: Autoria própria.

O consumo diário do grupo focal utilizando LED pode ser calculado de forma semelhante à metodologia utilizada para os semáforos convencionais. Desta forma, a Tabela 10 apresenta o consumo de energia elétrica pelo semáforo considerando a diferença de potência entre as tecnologias de lâmpadas e cor do foco sinalizado.

Tabela 10 - Consumo de um grupo focal com tecnologia LED.

Cor	Potência (W)	Tempo sinalizado (h)	Consumo diário (kWh)	Consumo mensal (kWh)	Consumo anual (kWh)
Vermelho	27	13,06	0,353	10,579	126,943
Verde	18	5,23	0,094	2,824	33,890
Amarelo	12	3,21	0,038	1,156	13,867
Total		21,50	0,485	14,559	174,700

Fonte: Autoria própria.

O controlador semafórico opera ininterruptamente durante 24 horas e, portanto, possui consumo de energia elétrica praticamente constante. A Tabela 11 apresenta o consumo estimado para o controlador semafórico.

Tabela 11 - Consumo controlador semafórico.

Potência (W)	Tempo de operação (h)	Consumo diário (kWh)	Consumo mensal (kWh)	Consumo anual (kWh)
37	24	0,888	26,640	319,680

Fonte: Autoria própria.

4.3. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

O dimensionamento do sistema fotovoltaico foi realizado conforme o consumo estimado dos dispositivos (grupo focal e controlador) do sistema semafórico e as configurações do sistema baseiam-se em outros projetos existentes no Brasil e no mundo, conforme ilustrado na Figura 4.

4.3.1. Estudo de Caso A

Um cruzamento de 4 vias com sinalização semafórica é equipado com 4 semáforos (grupos focais) e 1 controlador semafórico. De acordo com a Tabela 9, um semáforo convencional consome 2,15 kWh diariamente, enquanto o semáforo LED consome 0,485 kWh. Além disso o consumo diário do controlador semafórico é 0,888 kWh. Desta forma, considerando o regime de funcionamento descrito na seção 4.2, um cruzamento sinalizado com semáforos convencionais consome 9,488 kWh diariamente e os cruzamento sinalizados com semáforos LED consomem, individualmente, 2,828 kWh.

As Tabela 12 e Tabela 13 apresentam o consumo de cada cruzamento.

Tabela 12 - Consumo para um cruzamento de 4 vias sinalizado com semáforo convencional.

Quantidade	Descrição	Consumo Unitário (kWh)	Consumo Total (kWh)
4	Grupo focal com lâmpadas incandescentes	2,150	8,6
1	Controlador semafórico	0,888	0,888
Total			9,488

Fonte: Autoria própria.

Tabela 13 - Consumo para um cruzamento de 4 vias sinalizado com semáforo LED.

Quantidade	Descrição	Consumo Unitário (kWh)	Consumo Total (kWh)
4	Grupo focal com lâmpadas LED	0,485	1,940
1	Controlador semafórico	0,888	0,888
Total			2,828

Fonte: Autoria própria.

4.3.2. Estudo de Caso B

A proposta deste trabalho consiste em instalar painéis fotovoltaicos conectados à rede elétrica sobre a estrutura do próprio semáforo, definindo desta forma, a localização de cada painel fotovoltaico. É importante ressaltar que “em geral, o valor da latitude local é usado como ângulo de inclinação do módulo fotovoltaico”. Desse modo, utilizar-se-á o ângulo da latitude do local para a instalação dos painéis fotovoltaicos (CRESESB, 2016).

Os cruzamentos sinalizados por semáforos com lâmpadas incandescentes são atendidos em corrente alternada, assim como os cruzamentos sinalizados por semáforos LED. No entanto, as fontes chaveadas instaladas internamente ao controlador tem a função de converter a corrente alternada em corrente contínua para fornecer energia às lâmpadas de LED.

Os cruzamentos sinalizados por semáforos LED consomem 2,828 kWh diariamente e o valor de HSP considerado corresponde à média diária mensal de energia solar no plano inclinado entre Chapecó, Palmas e Xanxerê, logo, a potência do gerador fotovoltaico determinada pela Equação (7) deve ser aproximadamente 588 W, conforme calculado na Equação (13).

$$P_{SFV} = \frac{2,828 \text{ kWh/dia}}{4,81 \text{ h/dia}} = 0,588 \text{ kW} \quad (13)$$

No entanto, considerando o módulo fotovoltaico Yingli Solar YL150P-17b, com potência máxima de 150 W_p, cuja as características são apresentadas no Quadro 1, serão necessários 4 módulos fotovoltaicos associados em paralelo, totalizando 600 W_p de potência instalada.

Como o sistema deverá atender cargas CA (controladores semaforicos) e CC (semáforos de LED), é necessário um inversor de frequência para fornecer energia elétrica em corrente alternada a partir do gerador fotovoltaico às cargas CA. Por se tratar de um sistema conectado à rede elétrica, os inversores devem atender às exigências de segurança e qualidade exigidas pela distribuidora local, e ainda devem possuir um sistema de proteção anti-ilhamento. Neste caso, é necessário considerar

a eficiência média do inversor para garantir o fornecimento contínuo da potência demandada pelo sistema (CEPEL, 2014).

FABRICANTE	Yingli Solar
MODELO	YL150P
POTÊNCIA MÁXIMA (W)	150
TENSÃO DE MÁXIMA POTÊNCIA (V)	18,5
CORRENTE DE MÁXIMA POTÊNCIA (A)	8,12
TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO (V)	22,9
CORRENTE DE CURTO CIRCUITO (A)	8,61
VIDA ÚTIL* (anos)	20
EFICIÊNCIA (%)	15
DIMENSÕES (mm)	1470 x 680 x 35
PREÇO (R\$)	599,00

Quadro 1 - Características do módulo Yingli Solar YL150P 150W.

Fonte: Autoria própria.

De acordo com a especificação do controlador semafórico, a tensão de saída do inversor deve ser 127 V e a tensão de entrada deve ser igual a tensão do banco de baterias ou dos módulos fotovoltaicos e, portanto, deve ser igual a 12 V. Além disso, a potência do inversor deve ser superior a 70% e inferior 120% à potência fornecida pelos módulos fotovoltaicos, conforme relação apresentada pela Equação (8). Portanto, foi especificado o inversor Unitron iVolt 700 W conforme as características apresentadas no Quadro 2.

FABRICANTE	Unitron
MODELO	iVolt 700W
POTÊNCIA MÁXIMA DE SAÍDA (W)	700
POTÊNCIA DE SURTO (W)	1400
TENSÃO DE SAÍDA (V_{RMS})	115
FREQUÊNCIA DE SAÍDA (Hz)	60
EFICIÊNCIA (%)	90
VIDA ÚTIL* (anos)	10
DIMENSÕES (mm)	230 x 97 x 55,5
PREÇO (R\$)	729,00

Quadro 2 - Características do inversor de frequência Unitron iVolt 700W.

Fonte: Autoria própria.

O uso de dispositivos de armazenamento de energia possibilita atender a demanda em períodos em que a irradiação solar é baixa ou em períodos nublados. Entretanto, em geral, o uso de baterias para armazenamento de energia elétrica é utilizado na configuração de sistemas isolados.

Considerando que o sistema é dimensionado para operar preferencialmente com energia solar, o banco de baterias foi dimensionado para

augmentar a autonomia do sistema quanto à rede de distribuição e, desta forma, atender as especificações do projeto. Logo, considerando uma autonomia de 4 horas, determina-se a capacidade de armazenamento do banco de baterias a partir da Equação (9). Assim, a capacidade útil do banco de bateria é determinada em função do consumo médio de energia e pela tensão máxima do arranjo fotovoltaico, conforme Equação (14).

$$C_{bat} = \frac{2828 \cdot 0,167}{12} \cong 39,28 \text{ Ah} \quad (14)$$

As baterias utilizadas em sistemas fotovoltaicos são especificadas para apresentar ciclos diários de profundidade rasa a moderada. No entanto, devido à diminuição da radiação solar em dias nublados, por exemplo, esporadicamente o banco de baterias deve suportar descargas profundas.

O tempo de vida útil de uma bateria é inversamente proporcional a profundidade de descarga. Contudo, a capacidade real das baterias utilizadas para composição do banco de baterias, considerando a profundidade de descarga de 20%, deve ser, de acordo com a Equação (10), 196,4 Ah.

Portanto, nestas condições, o banco de baterias deve apresentar 1500 ciclos de vida, ou seja, aproximadamente 4 anos. Para este caso, a bateria especificada é do tipo estacionária, própria para utilização em sistemas fotovoltaicos e suas especificações são apresentadas no Quadro 3.

FABRICANTE	Freedom
MODELO	DF 2000
TIPO	Estacionária
TENSÃO (V)	12
CAPACIDADE NOMINAL (Ah)	105
PROFUNDIDADE DE DESCARGA (%)	20
VIDA ÚTIL (anos)	4
PESO (Kg)	27,10
DIMENSÕES (mm)	330 x 172 x 240
PREÇO (R\$)	669,00

Quadro 3 - Características da bateria Freedom DF2000 com capacidade de 105 Ah.
Fonte: Autoria própria.

Contudo, o número de baterias necessárias para atender a autonomia do sistema é determinado relacionando a capacidade real do banco de baterias com a capacidade do modelo de bateria utilizado, de acordo com a Equação (11). Então,

$$N_{bat} = \frac{196,4 Ah}{105 Ah} = 1,87 \quad (15)$$

Desse modo, será necessário no mínimo 2 baterias para atender a autonomia desejada do sistema.

O controlador de carga utilizado para o controle de carga e descarga do banco de baterias deve suportar a corrente de curto circuito dos módulos fotovoltaicos. Os módulos fotovoltaicos especificados devem ser associados em paralelo para atender as necessidades de tensão, corrente e potência do projeto. Desta forma, é possível determinar a corrente máxima de curto circuito por meio da Equação (12).

$$I_{cc} = 4 \cdot 8,61 A = 34,44 A \quad (16)$$

Logo, o controlador de carga especificado deve suportar pelo menos 35 A e apresentar 12 V de tensão de saída. O Quadro 4 apresenta o controlador especificado.

FABRICANTE	Schneider
MODELO	Xantrex C35
TENSÃO DE SAÍDA (V)	12 / 24
CORRENTE DE DESCARGA (A)	35
VIDA ÚTIL* (anos)	7
PESO (Kg)	1,2
DIMENSÕES (mm)	20,3 x 127 x 64
PREÇO (R\$)	609,00

Quadro 4 - Características do controlador de carga Schneider Xantrex C35 35A.

Fonte: Autoria própria.

4.3.3. Estudo de Caso C

O fornecimento de energia solar para o sistema semafórico pode ser limitado durante um período de tempo e a autonomia do banco de baterias pode ser reduzida para atender apenas ao horário de ponta, desta forma, o sistema pode

apresentar economia de energia elétrica consumida da rede de distribuição e exigir um investimento menor.

Portanto, será apresentado o dimensionamento do sistema fotovoltaico para atender a demanda diária durante 5 horas, auxiliado por um banco de bateria com autonomia de 3 horas. A Tabela 14 mostra o consumo realizado por cada semáforo LED entre 10 e 15 horas de cada dia.

Tabela 14 - Consumo de cada semáforo LED durante período de 5 horas.

Cor	Potência (W)	Tempo sinalizado (h)	Consumo diário (kWh)	Consumo mensal (kWh)	Consumo anual (kWh)
Vermelho	27	3,44	0,093	2,790	33,480
Verde	18	1,38	0,025	0,750	9,000
Amarelo	12	0,19	0,002	0,060	0,720
Total			0,120	3,600	43,200

Fonte: Aatoria própria.

O controlador semafórico consome aproximadamente 0,888 kWh/dia, no entanto, seu consumo durante o período de 5 horas é de aproximadamente 0,185 kWh. Assim, no período analisado, cada cruzamento consome cerca de 0,665 kWh. Logo, de acordo com a Equação (7), o sistema fotovoltaico deve fornecer 0,138 kW diariamente, sendo necessário apenas um módulo fotovoltaico com potência máxima de 150 Wp conforme características apresentadas no Quadro 1.

O inversor de frequência especificado possui as características mostradas no Quadro 5.

FABRICANTE	Slocable
MODELO	IP67-300W-100
POTÊNCIA MÁXIMA DE SAÍDA (W)	300
POTÊNCIA DE SURTO (W)	300
TENSÃO DE SAÍDA (V _{RMS})	115
FREQUÊNCIA DE SAÍDA (Hz)	50/60
EFICIÊNCIA (%)	99
VIDA ÚTIL* (anos)	10
PREÇO (R\$)	949,00

Quadro 5 - Características do inversor de frequência Slocable IP67-300W-100.

Fonte: Aatoria própria.

Como o sistema deverá fornecer energia solar a partir de um único módulo fotovoltaico, foi especificado um micro inversor de frequência para conexão direta com o módulo fotovoltaico.

Para autonomia de 3 horas, a capacidade real do banco de baterias deve ser de 34,65 Ah, o que torna necessário a utilização de apenas uma bateria Freedom DF500 com 36 Ah de capacidade conforme Quadro 6.

FABRICANTE	Freedom
MODELO	DF 500
TIPO	Estacionária
TENSÃO (V)	12
CAPACIDADE NOMINAL (Ah)	36
PROFUNDIDADE DE DESCARGA (%)	20
VIDA ÚTIL (anos)	4
PESO (Kg)	9,70
DIMENSÕES (mm)	175 x 175 x 175
PREÇO (R\$)	287,04

Quadro 6 - Característica da bateria Freedom DF500 com 36 Ah.

Fonte: Autoria própria.

Para o controle do banco de baterias, é especificado o controlador de carga com as características apresentadas no Quadro 7.

FABRICANTE	Epsolar
MODELO	Landstar LS1024E
TENSÃO DE SAÍDA (V)	12 / 24
CORRENTE DE DESCARGA (A)	10
VIDA ÚTIL* (anos)	7
PESO (Kg)	0,5
DIMENSÕES (mm)	101,2 x 67 x 21,8
PREÇO (R\$)	100,80

Quadro 7 - Controlador de carga Epsolar Landstar LS1024E.

Fonte: Autoria própria.

4.3.4. Estudo de Caso D

Além das configurações propostas anteriormente, um terceiro caso desconsidera o uso do sistema de armazenamento, reduzindo os custos com bateria e controlador de carga, no entanto, o sistema fotovoltaico também deve ser capaz de fornecer energia solar durante um período de 5 horas. Logo, o painel fotovoltaico e o inversor de frequência especificado podem ser os mesmos descritos no Quadro 1 e Quadro 5.

4.4. ANÁLISE ECONÔMICA

No Brasil, os consumidores são divididos em grupos e subgrupos de acordo com o nível de tensão em que são atendidos e em função da demanda (kW). Os consumidores são divididos em dois grupos: A (alta tensão) e B (baixa tensão). A iluminação pública pertence ao grupo B e é subdividida em subgrupo B4a e B4b, em função da administração. Quando a iluminação pública é de responsabilidade do município, a tarifa aplicada corresponde ao subgrupo B4a, caso contrário, a tarifa deve ser baseada no subgrupo B4b conforme a Resolução Normativa nº 414/2010.

De acordo com a tarifação praticada pela Companhia Paranaense de Energia (Copel), a tarifa vigente para clientes do subgrupo B4a é aproximadamente 8% menor em relação a tarifa aplicada aos clientes do subgrupo B4b. A Tabela 15 apresenta as tarifas para clientes dos subgrupos B4a e B4b aplicadas pela Copel no estado do Paraná.

Tabela 15 - Tarifa para clientes do subgrupo B4a e B4b enquadrados na modalidade tarifária convencional.

Subgrupo	Tarifa em R\$/kWh ⁴
B4a	0,35499
B4b	0,38725

Fonte: Adaptado de Copel (2016).

Nesta seção, serão apresentados os resultados da análise econômica, considerando a tarifa de energia para consumidores do grupo B, subgrupo B4a. Além disso, deve ser considerado o tempo de vida útil de cada equipamento especificado, bem como a energia deixada de consumir da rede elétrica de distribuição e a energia gerada pelo gerador fotovoltaico.

4.4.1. Análise do Estudo de Caso A

Considerando o consumo diário individual por cruzamento apresentado na Tabela 12 e Tabela 13 e o número de cruzamentos sinalizados no município, foi

⁴ Tarifa com impostos ICMS PIS/COFINS.

estimado o consumo anual para todo o sistema semafórico do município conforme apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 - Consumo anual do sistema semafórico de Pato Branco.

Tipo de semáforo	Consumo anual total (kWh)	Consumo anual total (R\$)
Semáforos convencionais	122.964,48	43.651,16
Semáforos LED	36.650,88	13.010,69

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 16 evidencia uma diferença anual de aproximadamente R\$ 30.640,46 entre o consumo dos cruzamentos sinalizados com semáforos convencionais e os cruzamentos sinalizados por semáforos LED.

A viabilidade econômica da troca do sistema semafórico convencional pelos semáforos sinalizados por LED é analisada através do VPL e *Payback* considerando o investimento inicial (saídas) de R\$ 432.000,00 com semáforos LED e a economia com energia elétrica (entradas). A Tabela 17 mostra o VPL calculado para a substituição dos semáforos convencionais por semáforos LED.

Tabela 17 - Cálculo do VPL para substituição dos semáforos convencionais por semáforos LED.

(continua)

Período (anos)	Ano	Entradas (R\$)	Saídas (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)
0	2016	0,00	-432.000,00	-432.000,00
1	2017	30.640,46	0,00	30.640,46
2	2018	32.812,87	0,00	32.812,87
3	2019	35.139,30	0,00	35.139,30
4	2020	37.630,68	0,00	37.630,68
5	2021	40.298,69	0,00	40.298,69
6	2022	43.155,87	0,00	43.155,87
7	2023	46.215,62	0,00	46.215,62
8	2024	49.492,31	0,00	49.492,31
9	2025	53.001,31	0,00	53.001,31
10	2026	56.759,11	0,00	56.759,11
11	2027	60.783,33	0,00	60.783,33
12	2028	65.092,86	0,00	65.092,86
13	2029	69.707,95	0,00	69.707,95
14	2030	74.650,24	0,00	74.650,24
15	2031	79.942,94	0,00	79.942,94
16	2032	85.610,90	0,00	85.610,90

(conclusão)

Período (anos)	Ano	Entradas (R\$)	Saídas (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)
17	2033	91.680,71	0,00	91.680,71
18	2034	98.180,87	0,00	98.180,87
19	2035	105.141,90	0,00	105.141,90
20	2036	112.596,46	0,00	112.596,46

Fonte: Autoria própria.

O VPL encontrado na análise realizada através do fluxo de caixa da Tabela 17 é de aproximadamente R\$ R\$ 116.719,94 negativo.

O cálculo do *payback* para a substituição da tecnologia utilizada na sinalização semafórica do município é apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 - Cálculo do *payback* da substituição dos semáforos convencionais por semáforos LED.

Período (anos)	Ano	Entradas (R\$)	Saídas (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)	Valor Presente (R\$)	Saldo (R\$)
0	2016	0,00	-432.000,00	-432.000,00	-432.000,00	0,00
1	2017	30.640,46	0,00	30.640,46	26.865,81	-405.134,19
2	2018	32.812,87	0,00	32.812,87	28.770,60	-376.363,59
3	2019	35.139,30	0,00	35.139,30	30.810,43	-345.553,15
4	2020	37.630,68	0,00	37.630,68	32.994,89	-312.558,26
5	2021	40.298,69	0,00	40.298,69	35.334,23	-277.224,02
6	2022	43.155,87	0,00	43.155,87	37.839,43	-239.384,60
7	2023	46.215,62	0,00	46.215,62	40.522,25	-198.862,35
8	2024	49.492,31	0,00	49.492,31	43.395,27	-155.467,08
9	2025	53.001,31	0,00	53.001,31	46.472,00	-108.995,08
10	2026	56.759,11	0,00	56.759,11	49.766,86	-59.228,22
11	2027	60.783,33	0,00	60.783,33	53.295,33	-5.932,88
12	2028	65.092,86	0,00	65.092,86	57.073,97	51.141,09
13	2029	69.707,95	0,00	69.707,95	61.120,52	112.261,60
14	2030	74.650,24	0,00	74.650,24	65.453,96	177.715,56
15	2031	79.942,94	0,00	79.942,94	70.094,65	247.810,21
16	2032	85.610,90	0,00	85.610,90	75.064,36	322.874,57
17	2033	91.680,71	0,00	91.680,71	80.386,42	403.260,99
18	2034	98.180,87	0,00	98.180,87	86.085,82	489.346,81
19	2035	105.141,90	0,00	105.141,90	92.189,30	581.536,11
20	2036	112.596,46	0,00	112.596,46	98.725,52	680.261,63

Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Tabela 18, o tempo de retorno do investimento é de aproximadamente 12 anos, período necessário para que o projeto apresente ganho financeiro de aproximadamente R\$ 51.141,09.

4.4.2. Análise do Estudo de Caso B

Para análise econômica da substituição do sistema semafórico convencional pelo sistema semafórico LED alimentados com energia solar fotovoltaica, é necessário relacionar o investimento exigido com o tempo de investimento para verificar a viabilidade de implementação do sistema proposto e considerar o custo anual do projeto ao longo de 20 anos, tempo de vida útil dos módulos fotovoltaicos especificados. Desta forma, como o inversor de frequência tem vida útil de 10 anos, torna-se necessário trocá-lo apenas 2 vezes nesse período. Além disso, é necessário trocar 5 vezes o banco de baterias e 2 vezes o controlador de carga. A Tabela 19 mostra o investimento inicial necessário.

Tabela 19 - Investimento inicial do projeto.

Equipamento	Quantidade necessária	Preço unitário (R\$)	Total (R\$)
Módulo fotovoltaico	144	599,00	86.256,00
Inversor de frequência	36	729,00	26.244,00
Baterias	72	669,00	48.168,00
Controlador de carga	36	609,00	21.924,00
Total			182.592,00

Fonte: Autoria própria.

Além disso, é necessário converter o valor dos equipamentos para o valor presente em função da necessidade de fazer substituição dos equipamentos da instalação. Tendo em vista que será necessário investimento adicional ao longo do projeto, este poderá ser convertido através da Equação (17).

$$VP = \frac{VF}{(1 + TMA)^n} \quad (17)$$

Desta forma, para o inversor com previsão de substituição no décimo e no vigésimo ano, e considerando a TMA como sendo a taxa de juros praticada pela FINAME igual a 7,5% ao ano, os valores de compra do equipamento nos anos de substituição é mostrado na Tabela 20.

Tabela 20 - Valores do inversor de frequência transferidos para o tempo presente.

Ano	Troca	Valor (R\$)
10	1	353,71
20	2	171,62

Fonte: Autoria própria.

De forma semelhante, o cálculo pode ser realizado para aferir o preço do banco de baterias e do controlador de carga quando necessário a substituição destes equipamentos. A Tabela 21 apresenta os valores do banco de baterias transferidos para o tempo presente de acordo com o ano de troca.

Tabela 21 - Valores da bateria estacionária transferidos para o tempo presente.

Ano	Troca	Valor (R\$)
4	1	500,95
8	2	375,11
12	3	280,88
16	4	210,32
20	5	157,49

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 22 aponta os valores do controlador de carga atualizados para o tempo presente.

Tabela 22 - Valores do controlador de carga transferidos para o tempo presente.

Ano	Troca	Valor (R\$)
7,5	1	367,08
15	2	221,26

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 23 apresenta o investimento necessário para manutenção do sistema durante 20 anos de projeto considerando a atualização de valores dos equipamentos.

Tabela 23 - Investimento necessário para fornecimento integral de energia solar com banco de baterias.

Equipamento (troca)	Número de trocas	Preço unitário (R\$)	Total (R\$)
Inversores de frequência (1)	36	353,71	12.733,56
Inversores de frequência (2)	36	171,62	6.178,32
Baterias (1)	72	500,95	36.068,40
Baterias (2)	72	375,11	27.007,92
Baterias (3)	72	280,88	20.223,36
Baterias (4)	72	210,32	15.143,04
Baterias (5)	72	157,49	11.339,28
Controladores de carga (1)	36	367,08	13.214,88
Controladores de carga (2)	36	221,26	7.968,96
Custo total			149.877,72

Fonte: Autoria própria.

Além disso, com o sistema fotovoltaico instalado, deixa-se de consumir energia da rede elétrica parcialmente. No entanto, como o valor de HSP considerado é a média diária mensal de energia solar no plano inclinado entre Chapecó, Palmas e Xanxerê, com valor de 4,81 h/dia e a autonomia do banco de baterias é 4 h/dia, o sistema deverá ser atendido diariamente através da rede de distribuição durante 15,19 horas (na média).

Devido ao regime de funcionamento do sistema semafórico, sabe-se que durante a operação em amarelo intermitente o sistema deverá operar com energia elétrica fornecida pela rede de distribuição devido ao período noturno. Portanto, o tempo em que o sistema deve operar conectado à rede de distribuição inclui o período de 5 horas de operação do sistema semafórico no amarelo intermitente com frequência de acionamento de 1 Hz, desta forma, neste modo de operação, o sistema irá consumir energia apenas durante metade do tempo.

Considerando a energia gerada pelo sistema fotovoltaico e o valor da tarifa para consumidores do subgrupo B4a, é possível contabilizar a economia financeira anual alcançada por cruzamento, conforme descrito na Tabela 24.

Tabela 24 - Economia anual por cruzamento com uso de semáforos LED e energia solar fotovoltaica.

Potência Instalada (kW)	HSP (kWh/m ² /dia)	Produção diária (kWh)	Produção anual (kWh)	Tarifa B4a (R\$/kWh)	Economia anual (R\$)
0,600	4,81	2,886	1.038,96	0,35499	368,48

Fonte: Autoria própria.

Portanto, a economia total do sistema considerando todos os 36 cruzamentos utilizando semáforos LED com energia solar fotovoltaica é de aproximadamente R\$ 13.265,27.

Além da variação anual do preço dos equipamentos da instalação, para realização da análise econômica, é necessário considerar a variação da tarifa de energia elétrica ao longo dos anos. Com base no histórico de reajuste aplicados pela distribuidora local, considerou-se a variação média anual da tarifa de energia para os últimos 5 anos, conforme a Tabela 25.

Tabela 25 - Taxa de variação da tarifa de energia elétrica distribuída pela Copel.

Portaria/Resolução	Vigência	Varição percentual
Resolução 2096/2016	24/06/2016	-12,87
Resolução 1897/2015	24/06/2015	15,32
Resolução 1858/2015	02/03/2015	36,79
Resolução 1763/2014	24/06/2014	24,86
Resolução 1565/2013	24/06/2013	9,55
Resolução 1431/2013	24/01/2013	-19,28
Resolução 1296/2012	24/06/2012	-0,65
Resolução 1158/2011	24/06/2011	2,99

Fonte: Autoria própria.

As variações percentuais apresentadas na Tabela 25 evidenciam um aumento médio de 7,09% da tarifa de energia elétrica nos últimos 5 anos.

De acordo com Nogueira (2009), a determinação da taxa de juros é um importante ponto na análise de projetos de investimento. Para Casarotto e Kopittke (2000), pode ser utilizada a taxa de juros do Sistema Especial de Liquidação e de Custódia (Selic) como taxa de descapitalização. Neste caso, por não conhecer a TMA praticada pelo órgão público, utilizou-se como referência a taxa Selic anual, estimada em 14,05% atualmente.

Para análise da viabilidade econômica do projeto, deve ser considerado o custo com cabos e proteções, sistema de fixação e outros (conexões, projeto, etc.). O Quadro 8 mostra uma estimativa para esses custos segundo publicação da Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE).

APLICAÇÃO	Residencial	Comercial	Usina
CAPACIDADE (kW)	3	30	30.000
CUSTO DOS CABOS E PROTEÇÕES (R\$)	2.250	18.000	13.100.000
CUSTO DO SISTEMA DE PROTEÇÕES (R\$)	3.750	24.000	14.000.000
OUTROS (CONEXÃO, PROJETO, ETC.) (R\$)	3.750	30.000	18.000.000
TOTAL (R\$)	21.359	188.047	161.147.414
TOTAL (R\$/W)	7,12	6,27	5,37

Quadro 8 - Projeção de custo por Wp.
Fonte: Adaptado de ABINEE (2012).

O custo fixo relativo à instalação da sinalização em cada cruzamento é calculado realizando uma interpolação linear baseada nos valores apresentados no Quadro 8 e o custo fixo para 600W de potência instalada é mostrado no Quadro 9.

CAPACIDADE (W)	600
CUSTO DOS CABOS E PROTEÇÕES (R\$)	850
CUSTO DO SISTEMA DE FIXAÇÃO (R\$)	1.950
OUTROS (CONEXÃO, PROJETO, ETC.) (R\$)	1.417
TOTAL (R\$)	4.217
TOTAL (R\$/W)	7,03

Quadro 9 - Custo fixo por cruzamento.
Fonte: Autoria própria.

Portanto, o custo fixo para todo o sistema semaforico da cidade é de aproximadamente R\$ 151.812,00.

O VPL foi calculado para os próximos 20 anos em função do fim da vida útil dos módulos fotovoltaicos especificados e considerando o aumento percentual médio da tarifa durante os últimos 5 anos e a taxa Selic praticada atualmente no mercado.

A Tabela 26 apresenta o VPL calculado para a proposta de atendimento de todo o sistema semaforico da cidade de Pato Branco com geração fotovoltaica.

Tabela 26 - Cálculo do VPL para o sistema fotovoltaico com fornecimento integral e com auxílio de um banco de baterias com autonomia de 4 horas.

(continua)

Período (anos)	Ano	Entradas (R\$)	Saídas (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)
0	2016	0,00	-334.404,00	-334.404,00
1	2017	13.265,27	0,00	13.265,27
2	2018	14.205,78	0,00	14.205,78
3	2019	15.212,97	0,00	15.212,97
4	2020	16.291,57	-36.068,40	-19.776,83
5	2021	17.446,64	0,00	17.446,64
6	2022	18.683,61	0,00	18.683,61
7	2023	20.008,27	-13.214,88	6.793,39

(conclusão)

Período (anos)	Ano	Entradas (R\$)	Saídas (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)
8	2024	21.426,86	-27.007,92	-5.581,06
9	2025	22.946,02	0,00	22.946,02
10	2026	24.572,90	-12.733,56	11.839,34
11	2027	26.315,12	0,00	26.315,12
12	2028	28.180,86	-20.223,36	7.957,50
13	2029	30.178,88	0,00	30.178,88
14	2030	32.318,56	0,00	32.318,56
15	2031	34.609,95	-7.968,96	26.640,99
16	2032	37.063,79	-15.143,04	21.920,75
17	2033	39.691,62	0,00	39.691,62
18	2034	42.505,75	0,00	42.505,75
19	2035	45.519,41	0,00	45.519,41
20	2036	48.746,74	-17.517,60	31.229,14

Fonte: Autoria própria.

O VPL foi calculado a partir do fluxo de caixa apresentado na Tabela 26. No entanto, não foi satisfatório, uma vez que o VPL calculado para o sistema proposto obteve o valor R\$ 201.358,87 negativo como resultado.

De forma semelhante ao cálculo do VPL, obteve-se o *Payback* relacionado ao sistema proposto considerando o tempo de vida útil dos módulos (20 anos), taxa Selic anual igual a 14,05% e Variação de 7,09% da fatura de energia elétrica ao ano.

O *payback* é calculado baseado nos conceitos discutidos no item 2.5.1.3 e apresentado na Tabela 27.

Tabela 27 - Cálculo do *payback* para o sistema fotovoltaico com fornecimento integral e com auxílio de um banco de baterias com autonomia de 4 horas.

(continua)

Período (anos)	Ano	Entradas (R\$)	Saídas (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)	Valor Presente (R\$)	Saldo (R\$)
0	2016	0,00	-334.404,00	-334.404,00	-334.404,00	0,00
1	2017	13.265,27	0,00	13.265,27	11.631,10	-322.772,90
2	2018	14.205,78	0,00	14.205,78	12.455,75	-310.317,15
3	2019	15.212,97	0,00	15.212,97	13.338,86	-296.978,30
4	2020	16.291,57	-36.068,40	-19.776,83	-17.340,49	-314.318,79
5	2021	17.446,64	0,00	17.446,64	15.297,36	-299.021,43
6	2022	18.683,61	0,00	18.683,61	16.381,94	-282.639,49
7	2023	20.008,27	-13.214,88	6.793,39	5.956,50	-276.682,98
8	2024	21.426,86	-27.007,92	-5.581,06	-4.893,52	-281.576,50

(conclusão)

Período (anos)	Ano	Entradas (R\$)	Saídas (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)	Valor Presente (R\$)	Saldo (R\$)
9	2025	22.946,02	0,00	22.946,02	20.119,27	-261.457,24
10	2026	24.572,90	-12.733,56	11.839,34	10.380,83	-251.076,41
11	2027	26.315,12	0,00	26.315,12	23.073,31	-228.003,09
12	2028	28.180,86	-20.223,36	7.957,50	6.977,20	-221.025,89
13	2029	30.178,88	0,00	30.178,88	26.461,10	-194.564,80
14	2030	32.318,56	0,00	32.318,56	28.337,19	-166.227,61
15	2031	34.609,95	-7.968,96	26.640,99	23.359,04	-142.868,57
16	2032	37.063,79	-15.143,04	21.920,75	19.220,30	-123.648,26
17	2033	39.691,62	0,00	39.691,62	34.801,94	-88.846,32
18	2034	42.505,75	0,00	42.505,75	37.269,40	-51.576,92
19	2035	45.519,41	0,00	45.519,41	39.911,80	-11.665,12
20	2036	48.746,74	-17.517,60	31.229,14	27.381,97	15.716,85

Fonte: Autoria própria.

Portanto, de acordo com os dados apresentados na Tabela 27, o projeto apresenta benefício financeiro apenas no último ano do ciclo do projeto.

Além dos indicadores VPL e *payback*, calculou-se a TIR para efeito de comparação com a TMA considerada (taxa Selic). No entanto, o valor calculado foi 1,33% e, portanto, inferior à taxa Selic anual adotada (14,05%). Assim sendo, o projeto apresenta alto risco e tende a ser economicamente inviável.

4.4.3. Análise do Estudo de Caso C

O estudo de caso C restringe o fornecimento de energia solar para 5 horas. Desta forma, são necessários 144 módulos fotovoltaicos, 36 inversores de frequência, 36 baterias estacionárias e 36 controladores de carga para execução do projeto. Desta forma, o investimento inicial é de aproximadamente R\$ 134.382,24 conforme mostra a Tabela 28.

Tabela 28 - Investimento inicial do projeto de um sistema fotovoltaico para fornecimento de energia solar durante 5 horas e auxiliado por um banco de baterias com autonomia de 3 horas.

(continua)

Equipamento	Quantidade	Preço unitário (R\$)	Total (R\$)
Módulo fotovoltaico Yingli Solar 150 W	144	599,00	86.256,00

(conclusão)

Equipamento	Quantidade	Preço unitário (R\$)	Total (R\$)
Inversor de frequência Slocable 300 W	36	949,00	34.164,00
Baterias Freedom DF500 36 Ah	36	287,04	10.333,44
Controlador de carga Epsolar 10 A	36	100,80	3.628,80
Total			134.382,24

Fonte: Autoria própria.

Considerando que o sistema fotovoltaico precisa de manutenção na mesma frequência da proposta inicial (estudo de caso B), é necessário calcular o investimento ao longo do ciclo de vida do projeto de acordo com o valor presente de cada equipamento necessário para substituição. A Tabela 29 apresenta o investimento necessário durante os próximos 20 anos do projeto.

Tabela 29 - Investimento necessário para implementação de um sistema fotovoltaico com fornecimento de energia durante 5 horas e auxiliado por um banco de baterias com autonomia de 3 horas.

Equipamento (troca)	Número de trocas	Preço unitário (R\$)	Total (R\$)
Inversores de frequência (1)	36	460,45	16.576,20
Inversores de frequência (2)	36	223,41	8.042,65
Baterias (1)	36	214,94	7.737,84
Baterias (2)	36	160,94	5.793,84
Baterias (3)	36	120,51	4.338,36
Baterias (4)	36	90,24	3.248,64
Baterias (5)	36	67,57	2.432,52
Controladores de carga (1)	36	58,60	2.109,60
Controladores de carga (2)	36	34,07	1.226,52
Custo total			51.506,17

Fonte: Autoria própria.

A economia de energia elétrica consumida da rede elétrica por cada cruzamento é apresentada na Tabela 30 a partir da produção de energia pelo sistema fotovoltaico proposto.

Tabela 30 - Energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico para fornecimento de energia solar durante 5 horas.

Potência Instalada (kW)	HSP (kWh/m ² /dia)	Produção diária (kWh)	Produção anual (kWh)	Tarifa B4a (R\$/kWh)	Economia anual (R\$)
0,150	4,81	0,722	259,92	0,35499	92,27

Fonte: Autoria própria.

No entanto, a economia anual de todo o sistema semafórico é de aproximadamente R\$ 3.321,68.

O custo fixo com estrutura para implementação de um sistema de geração com 150W de potência instalada é de aproximadamente R\$ 3.179,00 conforme apresentado no Quadro 10.

CAPACIDADE (W)	150
CUSTO DOS CABOS E PROTEÇÕES (R\$)	588
CUSTO DO SISTEMA DE FIXAÇÃO (R\$)	1.613
OUTROS (CONEXÃO, PROJETO, ETC.) (R\$)	979
TOTAL (R\$)	3.179
TOTAL (R\$/W)	21,19

Quadro 10 - Custo fixo para o estudo de caso B.

Fonte: Autoria própria.

Contudo, o custo estrutural para todo o sistema semafórico é aproximadamente R\$ 114.444,00.

Desta forma, a Tabela 31 mostra o VPL calculado para inserção da geração fotovoltaica parcial com auxílio de um banco de baterias ao sistema semafórico LED.

Tabela 31 - Cálculo do VPL para o sistema de geração fotovoltaica com fornecimento parcial de energia solar e com banco de baterias.

(continua)

Período (anos)	Ano	Entradas (R\$)	Saídas (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)
0	2016	0,00	-248.826,24	-248.826,24
1	2017	3.321,68	0,00	3.321,68
2	2018	3.557,19	0,00	3.557,19
3	2019	3.809,39	0,00	3.809,39
4	2020	4.079,48	-7.737,84	-3.658,36
5	2021	4.368,71	0,00	4.368,71
6	2022	4.678,45	0,00	4.678,45
7	2023	5.010,16	-2.109,60	2.900,56
8	2024	5.365,38	-5.793,84	-428,46
9	2025	5.745,78	0,00	5.745,78
10	2026	6.153,16	-16.576,20	-10.423,04
11	2027	6.589,42	0,00	6.589,42
12	2028	7.056,61	-4.338,36	2.718,25
13	2029	7.556,92	0,00	7.556,92
14	2030	8.092,71	0,00	8.092,71
15	2031	8.666,48	-1.226,52	7.439,96
16	2032	9.280,93	-3.248,64	6.032,29
17	2033	9.938,95	0,00	9.938,95

(conclusão)

Período (anos)	Ano	Entradas (R\$)	Saídas (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)
18	2034	10.643,62	0,00	10.643,62
19	2035	11.398,25	0,00	11.398,25
20	2036	12.206,39	-10.475,17	1.731,22

Fonte: Autoria própria.

A análise realizada na Tabela 31 resulta num VPL negativo de aproximadamente R\$ 215.664,83.

O *payback* calculado para o estudo de caso C é mostrado na Tabela 32.

Tabela 32 - Cálculo do *payback* para o sistema de geração fotovoltaica com fornecimento parcial de energia solar e com banco de baterias.

Período (anos)	Ano	Entradas (R\$)	Saídas (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)	Valor Presente (R\$)	Saldo (R\$)
0	2016	0,00	-248.826,24	-248.826,24	-248.826,24	0,00
1	2017	3.321,68	0,00	3.321,68	2.912,48	-245.913,76
2	2018	3.557,19	0,00	3.557,19	3.118,97	-242.794,79
3	2019	3.809,39	0,00	3.809,39	3.340,11	-239.454,68
4	2020	4.079,48	-7.737,84	-3.658,36	-3.207,68	-242.662,37
5	2021	4.368,71	0,00	4.368,71	3.830,52	-238.831,84
6	2022	4.678,45	0,00	4.678,45	4.102,11	-234.729,74
7	2023	5.010,16	-2.109,60	2.900,56	2.543,23	-232.186,50
8	2024	5.365,38	-5.793,84	-428,46	-375,68	-232.562,18
9	2025	5.745,78	0,00	5.745,78	5.037,95	-227.524,23
10	2026	6.153,16	-16.576,20	-10.423,04	-9.139,01	-236.663,24
11	2027	6.589,42	0,00	6.589,42	5.777,66	-230.885,59
12	2028	7.056,61	-4.338,36	2.718,25	2.383,38	-228.502,21
13	2029	7.556,92	0,00	7.556,92	6.625,97	-221.876,24
14	2030	8.092,71	0,00	8.092,71	7.095,75	-214.780,48
15	2031	8.666,48	-1.226,52	7.439,96	6.523,42	-208.257,07
16	2032	9.280,93	-3.248,64	6.032,29	5.289,16	-202.967,90
17	2033	9.938,95	0,00	9.938,95	8.714,55	-194.253,35
18	2034	10.643,62	0,00	10.643,62	9.332,42	-184.920,93
19	2035	11.398,25	0,00	11.398,25	9.994,08	-174.926,85
20	2036	12.206,39	-10.475,17	1.731,22	1.517,95	-173.408,90

Fonte: Autoria própria.

4.4.4. Análise do Estudo de Caso D

O estudo de caso D consiste na exclusão do sistema de armazenamento do estudo de caso C. Desta forma, o custo inicial do projeto se reduz ao apresentado na Tabela 33.

Tabela 33 - Investimento inicial para o projeto com geração fotovoltaica parcial sem auxílio de baterias.			
Equipamento	Quantidade	Preço unitário (R\$)	Total (R\$)
Módulo fotovoltaico Yingli Solar 150 W	144	599,00	86.256,00
Inversor de frequência Slocable 300 W	36	949,00	34.164,00
Total			120.420,00

Fonte: Autoria própria.

Contudo, o único custo com substituição de equipamento durante o ciclo do projeto é de R\$ 24.618,85 referente as trocas dos inversores de frequência. No entanto, como o custo fixo com instalação do sistema fotovoltaico depende da potência do sistema instalado, este valor é de aproximadamente R\$ 114.444,00, semelhante ao apresentado no estudo de caso C.

O VPL calculado, considerando apenas o sistema fotovoltaico sem sistema de armazenamento de energia é apresentado na Tabela 33.

Tabela 34 - Cálculo do VPL para o sistema de geração fotovoltaica com fornecimento parcial de energia solar sem banco de baterias.				
(continua)				
Período (anos)	Ano	Entradas (R\$)	Saídas (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)
0	2016	0,00	-234.864,00	-234.864,00
1	2017	3.321,68	0,00	3.321,68
2	2018	3.557,19	0,00	3.557,19
3	2019	3.809,39	0,00	3.809,39
4	2020	4.079,48	0,00	4.079,48
5	2021	4.368,71	0,00	4.368,71
6	2022	4.678,45	0,00	4.678,45
7	2023	5.010,16	0,00	5.010,16
8	2024	5.365,38	0,00	5.365,38
9	2025	5.745,78	0,00	5.745,78
10	2026	6.153,16	-16.576,20	-10.423,04
11	2027	6.589,42	0,00	6.589,42

(conclusão)

Período (anos)	Ano	Entradas (R\$)	Saídas (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)
12	2028	7.056,61	0,00	7.056,61
13	2029	7.556,92	0,00	7.556,92
14	2030	8.092,71	0,00	8.092,71
15	2031	8.666,48	0,00	8.666,48
16	2032	9.280,93	0,00	9.280,93
17	2033	9.938,95	0,00	9.938,95
18	2034	10.643,62	0,00	10.643,62
19	2035	11.398,25	0,00	11.398,25
20	2036	12.206,39	-8.042,65	4.163,74

Fonte: Autoria própria.

O fluxo de caixa utilizado para cálculo do *payback* para o sistema de geração fotovoltaica com fornecimento parcial de energia solar sem banco de baterias é mostrado na Tabela 34.

Tabela 35 - Cálculo do *Payback* para o sistema de geração fotovoltaica com fornecimento parcial de energia solar sem banco de baterias.

(continua)

Período (anos)	Ano	Entradas (R\$)	Saídas (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)	Valor Presente (R\$)	Saldo (R\$)
0	2016	0,00	-234.864,00	-234.864,00	-234.864,00	0,00
1	2017	3.321,68	0,00	3.321,68	2.912,48	-231.951,52
2	2018	3.557,19	0,00	3.557,19	3.118,97	-228.832,55
3	2019	3.809,39	0,00	3.809,39	3.340,11	-225.492,44
4	2020	4.079,48	0,00	4.079,48	3.576,92	-221.915,52
5	2021	4.368,71	0,00	4.368,71	3.830,52	-218.085,00
6	2022	4.678,45	0,00	4.678,45	4.102,11	-213.982,89
7	2023	5.010,16	0,00	5.010,16	4.392,95	-209.589,95
8	2024	5.365,38	0,00	5.365,38	4.704,41	-204.885,54
9	2025	5.745,78	0,00	5.745,78	5.037,95	-199.847,59
10	2026	6.153,16	-16.576,20	-10.423,04	-9.139,01	-208.986,60
11	2027	6.589,42	0,00	6.589,42	5.777,66	-203.208,94
12	2028	7.056,61	0,00	7.056,61	6.187,29	-197.021,65
13	2029	7.556,92	0,00	7.556,92	6.625,97	-190.395,68
14	2030	8.092,71	0,00	8.092,71	7.095,75	-183.299,93
15	2031	8.666,48	0,00	8.666,48	7.598,84	-175.701,09
16	2032	9.280,93	0,00	9.280,93	8.137,60	-167.563,49
17	2033	9.938,95	0,00	9.938,95	8.714,55	-158.848,93
18	2034	10.643,62	0,00	10.643,62	9.332,42	-149.516,52

(conclusão)

Período (anos)	Ano	Entradas (R\$)	Saídas (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)	Valor Presente (R\$)	Saldo (R\$)
19	2035	11.398,25	0,00	11.398,25	9.994,08	-139.522,43
20	2036	12.206,39	-8.042,65	4.163,74	3.650,80	-135.871,63

Fonte: Autoria própria.

4.4.5. Análise do Estudo de Caso B Aplicado ao Estudo de Caso A

O VPL calculado para implementação de um sistema semafórico com semáforo LED atendidos por um sistema de geração fotovoltaico com fornecimento integral de energia solar com auxílio de um banco de baterias com autonomia de 4 horas é representado na Tabela 36.

Tabela 36 - Cálculo do VPL para o sistema fotovoltaico com fornecimento integral e com auxílio de um banco de baterias com autonomia de 4 horas para atendimento do sistema semafórico LED.

Período (anos)	Ano	Entradas (R\$)	Saídas (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)
0	2016	0,00	-766.404,00	-766.404,00
1	2017	43.905,73	0,00	43.905,73
2	2018	47.018,65	0,00	47.018,65
3	2019	50.352,27	0,00	50.352,27
4	2020	53.922,24	-36.068,40	17.853,84
5	2021	57.745,33	0,00	57.745,33
6	2022	61.839,48	0,00	61.839,48
7	2023	66.223,89	-13.214,88	53.009,01
8	2024	70.919,17	-27.007,92	43.911,25
9	2025	75.947,34	0,00	75.947,34
10	2026	81.332,00	-12.733,56	68.598,44
11	2027	87.098,44	0,00	87.098,44
12	2028	93.273,72	-20.223,36	73.050,36
13	2029	99.886,83	0,00	99.886,83
14	2030	106.968,80	0,00	106.968,80
15	2031	114.552,89	-7.968,96	106.583,93
16	2032	122.674,69	-15.143,04	107.531,65
17	2033	131.372,33	0,00	131.372,33
18	2034	140.686,63	0,00	140.686,63
19	2035	150.661,31	0,00	150.661,31
20	2036	161.343,20	-17.517,60	143.825,60

Fonte: Autoria própria.

O VPL encontrado para implementação deste sistema é de aproximadamente -R\$ 318.078,81.

Neste caso, o *payback* para o sistema é mostrado na Tabela 37.

Tabela 37 - Cálculo do *payback* para o sistema fotovoltaico com fornecimento integral e com auxílio de um banco de baterias com autonomia de 4 horas para atendimento do sistema semafórico LED.

Período (anos)	Ano	Entradas (R\$)	Saídas (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)	Valor Presente (R\$)	Saldo (R\$)
0	2016	0,00	-766.404,00	-766.404,00	-766.404,00	0,00
1	2017	43.905,73	0,00	43.905,73	38.496,91	-727.907,09
2	2018	47.018,65	0,00	47.018,65	41.226,34	-686.680,74
3	2019	50.352,27	0,00	50.352,27	44.149,29	-642.531,45
4	2020	53.922,24	-36.068,40	17.853,84	15.654,40	-626.877,05
5	2021	57.745,33	0,00	57.745,33	50.631,59	-576.245,46
6	2022	61.839,48	0,00	61.839,48	54.221,37	-522.024,08
7	2023	66.223,89	-13.214,88	53.009,01	46.478,75	-475.545,33
8	2024	70.919,17	-27.007,92	43.911,25	38.501,75	-437.043,58
9	2025	75.947,34	0,00	75.947,34	66.591,26	-370.452,32
10	2026	81.332,00	-12.733,56	68.598,44	60.147,69	-310.304,62
11	2027	87.098,44	0,00	87.098,44	76.368,65	-233.935,98
12	2028	93.273,72	-20.223,36	73.050,36	64.051,17	-169.884,81
13	2029	99.886,83	0,00	99.886,83	87.581,61	-82.303,19
14	2030	106.968,80	0,00	106.968,80	93.791,15	11.487,96
15	2031	114.552,89	-7.968,96	106.583,93	93.453,69	104.941,65
16	2032	122.674,69	-15.143,04	107.531,65	94.284,66	199.226,30
17	2033	131.372,33	0,00	131.372,33	115.188,36	314.414,67
18	2034	140.686,63	0,00	140.686,63	123.355,22	437.769,89
19	2035	150.661,31	0,00	150.661,31	132.101,10	569.870,99
20	2036	161.343,20	-17.517,60	143.825,60	126.107,49	695.978,48

Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Tabela 37, o *payback* do projeto torna-se positivo a partir de 2030.

4.4.6. Análise do Estudo de Caso C Aplicado ao Estudo de Caso A

A Tabela 38 mostra o VPL calculado para fornecimento parcial durante 5 horas de energia solar para o sistema semafórico com semáforo LED auxiliado por um banco de baterias com autonomia de 3 horas.

Tabela 38 - Cálculo do VPL para o sistema fotovoltaico com fornecimento parcial e com auxílio de um banco de baterias com autonomia de 3 horas para atendimento do sistema semafórico LED.

Período (anos)	Ano	Entradas (R\$)	Saídas (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)
0	2016	0,00	-680.826,24	-680.826,24
1	2017	33.962,14	0,00	33.962,14
2	2018	36.370,06	0,00	36.370,06
3	2019	38.948,69	0,00	38.948,69
4	2020	41.710,15	-7.737,84	33.972,31
5	2021	44.667,40	0,00	44.667,40
6	2022	47.834,32	0,00	47.834,32
7	2023	51.225,78	-2.109,60	49.116,18
8	2024	54.857,69	-5.793,84	49.063,85
9	2025	58.747,10	0,00	58.747,10
10	2026	62.912,26	-16.576,20	46.336,06
11	2027	67.372,74	0,00	67.372,74
12	2028	72.149,47	-4.338,36	67.811,11
13	2029	77.264,87	0,00	77.264,87
14	2030	82.742,95	0,00	82.742,95
15	2031	88.609,42	-1.226,52	87.382,90
16	2032	94.891,83	-3.248,64	91.643,19
17	2033	101.619,66	0,00	101.619,66
18	2034	108.824,50	0,00	108.824,50
19	2035	116.540,15	0,00	116.540,15
20	2036	124.802,85	-10.475,17	114.327,68

Fonte: Autoria própria.

Da análise realizada através da Tabela 38, tem-se que o VPL calculado para o projeto é de aproximadamente -R\$ 332.384,77.

A Tabela 39 representa o *Payback* para o sistema de geração parcial de energia solar auxiliado por um banco de baterias com autonomia de 3 horas para o sistema semafórico com semáforos LED.

Tabela 39 - Cálculo do *payback* para o sistema fotovoltaico com fornecimento parcial e com auxílio de um banco de baterias com autonomia de 3 horas para atendimento do sistema semafórico LED.

Período (anos)	Ano	Entradas (R\$)	Saídas (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)	Valor Presente (R\$)	Saldo (R\$)
0	2016	0,00	-680.826,24	-680.826,24	-680.826,24	0,00
1	2017	33.962,14	0,00	33.962,14	29.778,29	-651.047,95
2	2018	36.370,06	0,00	36.370,06	31.889,57	-619.158,38
3	2019	38.948,69	0,00	38.948,69	34.150,54	-585.007,84
4	2020	41.710,15	-7.737,84	33.972,31	29.787,21	-555.220,63
5	2021	44.667,40	0,00	44.667,40	39.164,76	-516.055,87
6	2022	47.834,32	0,00	47.834,32	41.941,54	-474.114,33
7	2023	51.225,78	-2.109,60	49.116,18	43.065,48	-431.048,85
8	2024	54.857,69	-5.793,84	49.063,85	43.019,59	-388.029,26
9	2025	58.747,10	0,00	58.747,10	51.509,95	-336.519,31
10	2026	62.912,26	-16.576,20	46.336,06	40.627,85	-295.891,46
11	2027	67.372,74	0,00	67.372,74	59.072,99	-236.818,47
12	2028	72.149,47	-4.338,36	67.811,11	59.457,35	-177.361,12
13	2029	77.264,87	0,00	77.264,87	67.746,49	-109.614,63
14	2030	82.742,95	0,00	82.742,95	72.549,71	-37.064,92
15	2031	88.609,42	-1.226,52	87.382,90	76.618,06	39.553,14
16	2032	94.891,83	-3.248,64	91.643,19	80.353,52	119.906,67
17	2033	101.619,66	0,00	101.619,66	89.100,97	209.007,64
18	2034	108.824,50	0,00	108.824,50	95.418,23	304.425,87
19	2035	116.540,15	0,00	116.540,15	102.183,39	406.609,26
20	2036	124.802,85	-10.475,17	114.327,68	100.243,47	506.852,73

Fonte: Autoria própria.

Neste caso, o projeto apresenta um saldo de R\$ 39.553,14 no décimo quinto ano.

4.4.7. Análise do Estudo de Caso D Aplicado ao Estudo de Caso A

O fornecimento parcial de energia solar durante 5 horas sem auxílio do banco de baterias apresenta o VPL mostrado na Tabela 40.

Tabela 40 - Cálculo do VPL para o sistema fotovoltaico com fornecimento parcial durante 5 horas para atendimento do sistema semafórico LED.

Período (anos)	Ano	Entradas (R\$)	Saídas (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)
0	2016	0,00	-666.864,00	-666.864,00
1	2017	33.962,14	0,00	33.962,14
2	2018	36.370,06	0,00	36.370,06
3	2019	38.948,69	0,00	38.948,69
4	2020	41.710,15	0,00	41.710,15
5	2021	44.667,40	0,00	44.667,40
6	2022	47.834,32	0,00	47.834,32
7	2023	51.225,78	0,00	51.225,78
8	2024	54.857,69	0,00	54.857,69
9	2025	58.747,10	0,00	58.747,10
10	2026	62.912,26	-16.576,20	46.336,06
11	2027	67.372,74	0,00	67.372,74
12	2028	72.149,47	0,00	72.149,47
13	2029	77.264,87	0,00	77.264,87
14	2030	82.742,95	0,00	82.742,95
15	2031	88.609,42	0,00	88.609,42
16	2032	94.891,83	0,00	94.891,83
17	2033	101.619,66	0,00	101.619,66
18	2034	108.824,50	0,00	108.824,50
19	2035	116.540,15	0,00	116.540,15
20	2036	124.802,85	-8.042,65	116.760,20

Fonte: Autoria própria.

Com a eliminação do banco de baterias, o sistema apresenta VPL de -R\$ 317.767,89.

Na mesma configuração, o sistema apresenta o *Payback* representado na Tabela 41.

Tabela 41 - Cálculo do *payback* para o sistema fotovoltaico com fornecimento parcial durante 5 horas para atendimento do sistema semafórico LED.

(continua)

Período (anos)	Ano	Entradas (R\$)	Saídas (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)	Valor Presente (R\$)	Saldo (R\$)
0	2016	0,00	-666.864,00	-666.864,00	-666.864,00	0,00
1	2017	33.962,14	0,00	33.962,14	29.778,29	-637.085,71
2	2018	36.370,06	0,00	36.370,06	31.889,57	-605.196,14
3	2019	38.948,69	0,00	38.948,69	34.150,54	-571.045,60
4	2020	41.710,15	0,00	41.710,15	36.571,81	-534.473,78

(conclusão)

Período (anos)	Ano	Entradas (R\$)	Saídas (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)	Valor Presente (R\$)	Saldo (R\$)
5	2021	44.667,40	0,00	44.667,40	39.164,76	-495.309,03
6	2022	47.834,32	0,00	47.834,32	41.941,54	-453.367,49
7	2023	51.225,78	0,00	51.225,78	44.915,19	-408.452,29
8	2024	54.857,69	0,00	54.857,69	48.099,68	-360.352,61
9	2025	58.747,10	0,00	58.747,10	51.509,95	-308.842,67
10	2026	62.912,26	-16.576,20	46.336,06	40.627,85	-268.214,82
11	2027	67.372,74	0,00	67.372,74	59.072,99	-209.141,83
12	2028	72.149,47	0,00	72.149,47	63.261,26	-145.880,56
13	2029	77.264,87	0,00	77.264,87	67.746,49	-78.134,08
14	2030	82.742,95	0,00	82.742,95	72.549,71	-5.584,36
15	2031	88.609,42	0,00	88.609,42	77.693,49	72.109,12
16	2032	94.891,83	0,00	94.891,83	83.201,96	155.311,08
17	2033	101.619,66	0,00	101.619,66	89.100,97	244.412,06
18	2034	108.824,50	0,00	108.824,50	95.418,23	339.830,29
19	2035	116.540,15	0,00	116.540,15	102.183,39	442.013,68
20	2036	124.802,85	-8.042,65	116.760,20	102.376,33	544.390,00

Fonte: Autoria própria.

Contudo, a eliminação do sistema de armazenamento de energia para atendimento do sistema semafórico com semáforo LED com energia solar fotovoltaica apresenta um *Payback* de R\$ 72.109,12 após 15 anos do projeto.

5. SOFTWARE PARA ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA

O desenvolvimento da interface gráfica para auxílio nos projetos de sistemas semafóricos alimentados com energia solar é realizado utilizando o ambiente de desenvolvimento GUIDE (*Graphical User Interface Development Environment*) do software Matlab®. Ressalta-se que o programa em questão deve fornecer resultados específicos para projetos de substituição de sistemas semafóricos e que a análise econômica apresentada pela interface gráfica apresenta os principais resultados relacionados a análise econômica (*Payback* e VPL).

A interface desenvolvida fornece o dimensionamento do sistema baseado nas características do sistema informadas pelo usuário e realiza uma análise econômica baseada nos indicadores econômicos *Payback* e VPL. Este dimensionamento ocorre em função do consumo do sistema semafórico, da porcentagem da carga atendida pelo sistema fotovoltaico, do valor de irradiação solar local e da tarifa de energia elétrica. O fluxograma da Figura 28 ilustra os processos executados pelo programa para fornecer o dimensionamento do sistema fotovoltaico e a análise da viabilidade econômica ao usuário.

Além disso, a interface realiza o dimensionamento dos equipamentos do sistema fotovoltaico. A Figura 27 apresenta as variáveis de entrada, os métodos utilizados e as variáveis de saída do sistema.

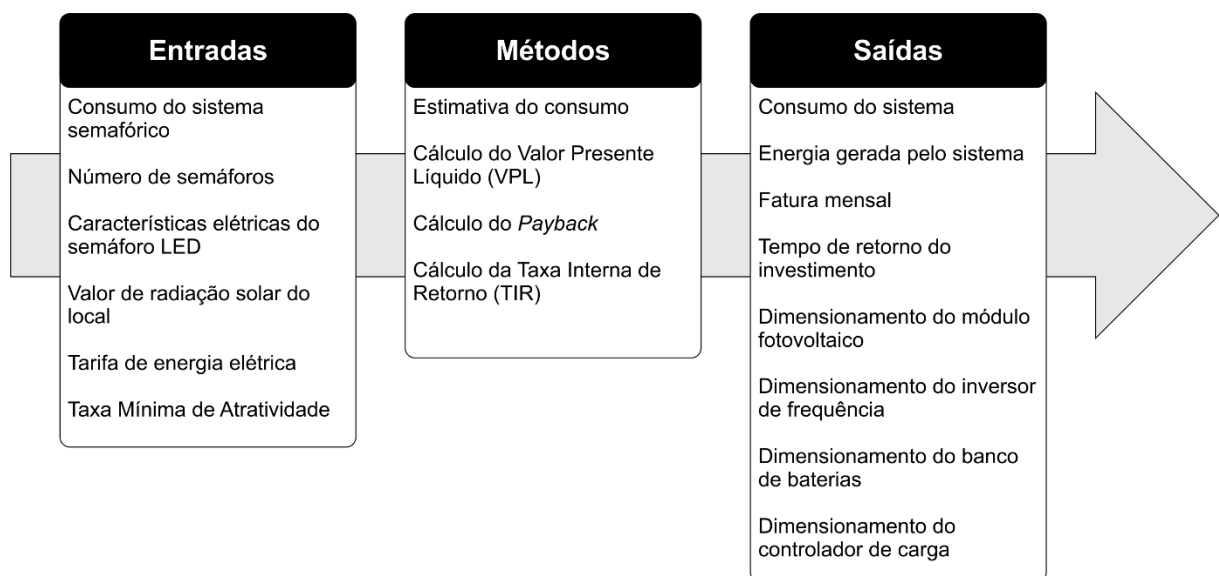


Figura 27 - Estrutura da interface gráfica.
 Fonte: Autoria própria.

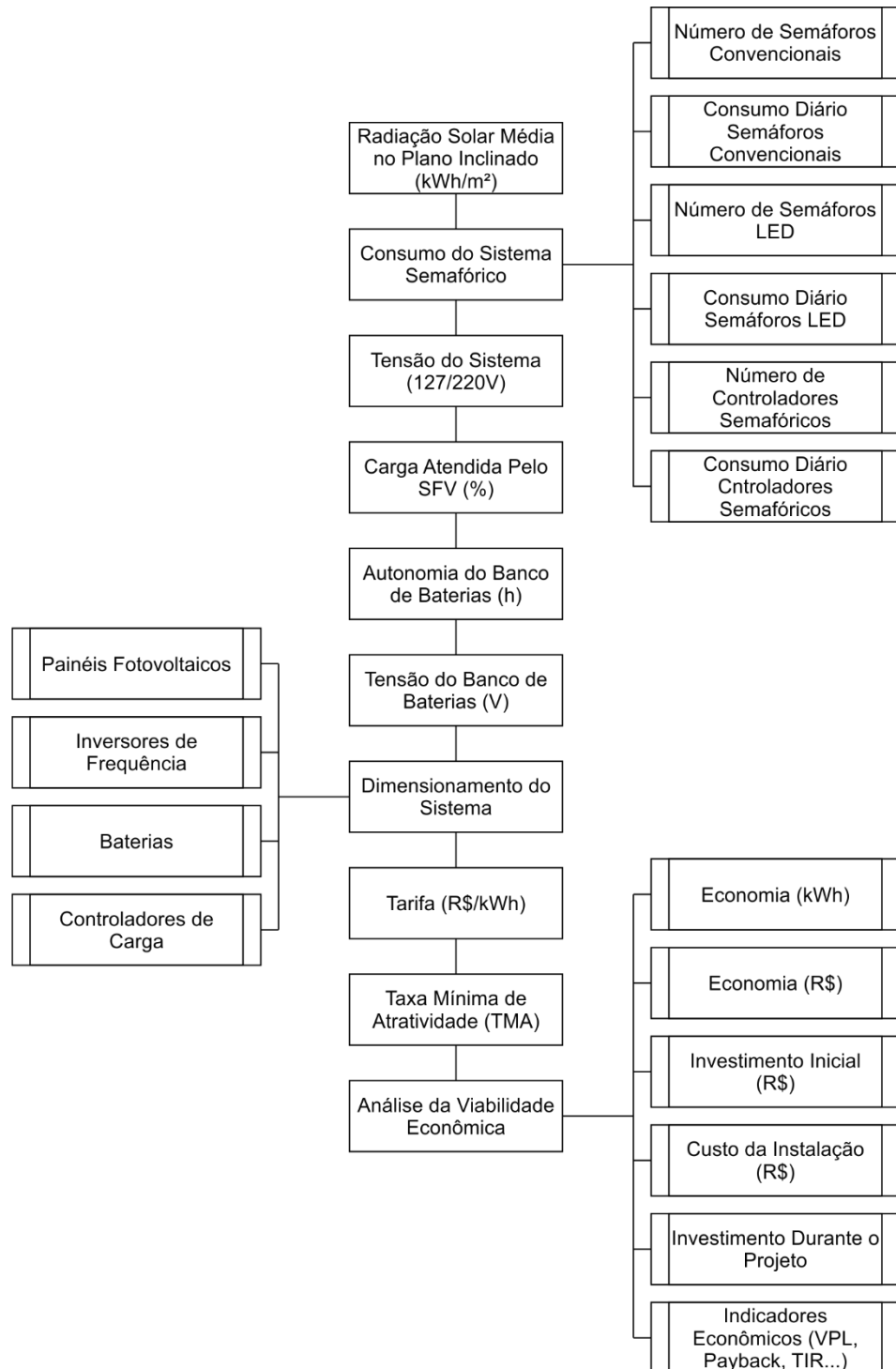


Figura 28 - Fluxograma dos processos realizados pela interface gráfica.
Fonte: Autoria própria.

A interface gráfica em desenvolvimento pode auxiliar os usuários na tomada de decisão em projetos de eficiência energética aplicados a sistemas semafóricos em substituição aos semáforos convencionais de lâmpadas incandescentes.

A Figura 29 apresenta a interface gráfica proposta e que encontra-se em fase de desenvolvimento para análise da viabilidade econômica em projetos envolvendo sistemas semaforicos alimentados com energia solar fotovoltaica.

Análise de Viabilidade Econômica

Dados Solar

Irradiação solar média no plano inclinado [kWh/m²]:

Consumo do sistema

Consumo do controlador semafórico [kWh]: Quant. [und.]:

Consumo semáforos convencionais [kWh]: Quant. [und.]:

Consumo semáforos LED [kWh]: Quant. [und.]:

Atendimento

Porcentagem de carga atendida pelo SFV:

Banco de Baterias:

Autonomia do banco de baterias [h]:

Tensão do banco de baterias:

Tarifação

Tarifa com impostos [R\$/kWh]:

Tensão do sistema

127 V 220 V

Taxa Mínima de Atratividade

TMA [%]:

Variáveis de saída

Características do sistema fotovoltaico

Consumo do sistema [kWh]:

Média de horas de sol pleno (HSP)

Potência do sistema fotovoltaico [kW]:

Painéis Fotovoltaicos

Fabricante:

Modelo:

Número de painéis:

Potência máxima [kW/unidade]:

Dimensão [m²/unidade]:

Área para instalação [m²]:

Potência instalada [kW]:

Produção mensal de energia [kWh/mês]:

Inversores de Frequência

Fabricante:

Modelo:

Potência nominal:

Quantidade:

Banco de Baterias

Fabricante:

Modelo:

Número de baterias:

Controlador de carga

Fabricante:

Modelo:

Quantidade:

Valor:

Painéis Fotovoltaicos

Inversores

Baterias

Controladores

VPL

Payback

Simulação

UFRPR

POR 12:52
PTB 15/12/2016

Figura 29 - Interface gráfica para auxílio nos projetos de análise da viabilidade econômica de sistemas semafóricos alimentados com energia fotovoltaica. Fonte: Autoria própria.

6. CONCLUSÕES

O objetivo desse trabalho foi apresentar algumas alternativas ao consumo de energia elétrica pelo sistema semaforico do município de Pato Branco, analisando a viabilidade econômica da substituição dos semáforos com lâmpadas incandescentes utilizados atualmente por semáforos LED e utilização de energia solar como alternativa à energia elétrica consumida da rede de distribuição.

A geração solar fotovoltaica é uma fonte de energia com grande potencial. No entanto, o custo das tecnologias para aproveitamento da energia solar disponível ainda é relativamente elevado, necessitando ainda de investimento em pesquisa e desenvolvimento para promover esse tipo de tecnologia e a consequente redução desses custos.

Nesse contexto, o trabalho apresenta os procedimentos para dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede para atender a demanda do sistema semaforico de Pato Branco. Além disso, realiza-se uma análise econômica através dos indicadores de VPL, *Payback* e TIR para verificar a viabilidade da implementação de cada sistema proposto.

A análise inicial realizada considerou apenas a troca dos semáforos convencionais por semáforos LED independente da geração fotovoltaica. Posteriormente, foi realizada uma análise da inserção da geração fotovoltaica ao sistema semaforico com semáforos LED. Entretanto, também foi analisada a viabilidade da inserção conjunta de semáforos LED com geração fotovoltaica em substituição aos sistemas semaforicos com semáforos convencionais de lâmpadas incandescentes.

A princípio, a substituição dos semáforos convencionais por semáforos LED exige um investimento inicial de aproximadamente R\$ 432.000,00, no entanto, o consumo de energia elétrica passa de 122.964,48 kWh/ano para 36.650,88 kWh/ano, o que proporciona redução de R\$ 30.640,46/ano. Neste caso, o sistema apresenta VPL de -R\$ 116.719,94, TIR de 10,13% e *Payback* de R\$ 51.141,09 no décimo segundo ano do projeto.

A inserção da geração fotovoltaica para atender integralmente o consumo do sistema semaforico durante o dia com auxílio de um banco de baterias com autonomia de 4 horas significa redução de aproximadamente R\$ 13.265,17/ano

atendendo toda a carga demandada pelo sistema semafórico com semáforo LED, no entanto, requer investimento inicial de R\$ 334.404,00 com equipamento e instalação do sistema. Desta forma, mesmo apresentando redução significativa do consumo de energia elétrica da rede de distribuição, o sistema apresenta VPL de -R\$ 318.078,81, TIR de apenas 6,76% e 14 anos para retorno do investimento segundo o *Payback* calculado.

A redução do sistema fotovoltaico para atender apenas uma parcela da demanda do sistema semafórico com semáforos LED proporciona redução dos investimentos financeiros necessários, no entanto, o ganho energético também é reduzido. Desta forma, um sistema fotovoltaico com auxílio de um banco de baterias com autonomia de 3 horas para atender o consumo num intervalo de 5 horas fornece energia para atender 9.357,12 kWh/ano, o que significa economia de R\$ 3.321,68/ano. Contudo, é necessário um investimento inicial de R\$ 248.826,24 para execução do projeto o que segundo o *Payback*, teria um saldo positivo apenas em 15 anos, e de acordo com o VPL de -R\$ 332.384,77, seria um projeto pouco atrativo.

Ao desconsiderar o uso do sistema de armazenamento de energia elétrica, os custos são reduzidos ainda mais. Neste caso, seria necessário apenas investimento com painéis fotovoltaicos, inversores de frequência e com custos de cabos, proteções, sistemas de fixação, conexões e projeto. Neste caso, requer investimento inicial de R\$ 234.864,00 obtendo-se uma economia de 9.357,12 kWh/ano. Assim como no estudo de caso C, o tempo de retorno de investimento é de 15 anos. O VPL para este caso é de aproximadamente -R\$ 317.767,89 com TIR de 6,43%.

Para cada estudo de caso, considerou-se um cruzamento com quatro semáforos e um controlador semafórico. No entanto, o custo durante o ciclo de vida do projeto varia conforme a configuração e autonomia do sistema de geração fotovoltaico. Assim, para o primeiro caso em que o sistema atende à demanda do sistema semafórico de forma integral e possui uma bateria com autonomia de 4 horas, o custo com a substituição dos equipamentos é de aproximadamente R\$ 149.877,72. No caso do sistema fotovoltaico para atendimento parcial da carga do sistema e com baterias com autonomia de 3 horas, o custo durante o ciclo de vida do projeto representa R\$ 51.506,17. Com a exclusão do banco de baterias, este valor é de R\$ 24.618,85.

Ressalta-se que a inserção da geração fotovoltaica após a substituição dos semáforos é um projeto de grande investimento financeiro, com pequeno retorno a longo prazo. Desta forma, dos três casos analisados, apenas o sistema com atendimento integral da carga mostrou-se com possibilidade de atratividade a longo prazo, pois apesar de apresentar um VPL negativo, tem uma taxa interna de retorno de 1,33% com um elevado tempo de retorno, enquanto que os sistemas com atendimento parcial analisados individualmente apresentam taxa interna de retorno negativa e tempo de retorno de investimento superior a 20 anos.

O uso de banco de baterias é amplamente utilizado em sistemas isolados, no entanto, são usualmente utilizados em sistemas conectados à rede com o objetivo de aumentar a confiabilidade dos sistemas quando necessário. Neste estudo, a utilização do sistema de armazenamento de energia pode ajudar a reduzir a carga do sistema no horário de ponta e proporcionar maior confiabilidade ao sistema, aumentando o tempo disponível para equipes especializadas realizar a manutenção da sinalização e manter a organização do trânsito, entretanto, exige grande investimento.

Devido a grandeza dos projetos envolvendo eficiência energética em sistemas semaforicos com tecnologia LED e geração fotovoltaica, a análise econômica mostrou-se uma ferramenta importante para tomada de decisão. Em função disso, o desenvolvimento da interface gráfica iniciada neste estudo para auxílio nos projetos de análise de viabilidade econômica de sistemas semaforicos alimentados com energia solar fotovoltaica é uma pesquisa a ser continuada. A partir da interface e através de indicadores econômicos é possível auxiliar na análise da viabilidade e redução dos riscos para outras situações.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA ESTADO. PIB é afetado por menor consumo de água e uso de térmicas. **Exame.com**, São Paulo, 2015. Disponível em: <<http://goo.gl/cTSp74>>. Acesso em: 6 set. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **A tarifa de energia elétrica**. 2016c. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/tarifas>>. Acesso em: 25 Out. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil. 3. Ed.** Brasília: TODA Editorial, 2008, 236 p. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>>. Acesso em: 30 ago. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Banco de Informações de Geração**. Capacidade de geração do Brasil, 2015. Disponível em: <<http://goo.gl/R3gMml>>. Acesso em: 6 set. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Entendendo a tarifa**. 2016c. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/entendendo-a-tarifa>>. Acesso em: 25 Out. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Glossário**. 2016b. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/glossario.cfm?att=G>>. Acesso em: 20 Out. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Micro e minigeração distribuída**. Cadernos temáticos Aneel. 2 ed. Brasília: ANEEL, 2016a.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010. **Estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica de forma atualizada e consolidada**. Brasília, 2010. Disponível em: <<http://goo.gl/H67t4r>>. Acesso em: 10 set. 2015.

ALISSON; E. Semáforos de LED. **Agência FAPESP**, 2011. Disponível em: <http://agencia.fapesp.br/semaforo_de_led/13432/>. Acesso em: 16 set. 2015.

ALMEIDA, Marcelo Pinho. **Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. 2012. 171 f. Dissertação (Pós-Graduação em Energia) – EP/FEA/IEE/IF da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

ALVES, Carlos Antonio, SANTOS, Nicolas Bertolino Fioramonti dos, BERTON, Celso Sanches, MACHADO, Luiz Otavio Manhani, RIBEIRO, Jean Marcos De Souza. **Dimensionamento de sistema de geração fotovoltaica Grid-tie e Instalação de planta de 3 kWp na usina ecoelétrica.** 2015. Ilha Solteira: Congresso de extensão universitária da UNESP.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. Brasil está preparado para crescer do ponto de vista energético, diz especialista. **Portal ABEEólica**, 2015. Disponível em: <<http://goo.gl/azCuo4>>. Acesso em: 31 ago. 2015.

BENITO, Tomás P. **Práticas de energia solar fotovoltaica.** Porto: Editora Publindústria, 2011. 110p.

BILGEN, Semih. **Structure and enviromental impact of global energy consumption.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. v. 38, p. 890-902, 2014.

BOJIC, Milorad. Education and training in renewable energy soucers in Serbia and Montenegro. **Renewable Energy.** Kragujevac, v. 29, n. 10, p. 1631-1642, 2004.

BORGES NETO, Manuel R.; CARVALHO, Paulo C.M. **Geração de Energia Elétrica: fundamentos.** São Paulo: Editora Érica, 2012. 160 p.

BRASIL. Portaria interministerial nº 1.007, de 31 de dezembro de 2010. **Regulamentação específica que define os níveis mínimos de eficiência energética de lâmpadas incandescentes.** Ministério de minas e energia (MME): Brasília, DF, 2010. Disponível em: <<http://goo.gl/4lrUUP>>. Acesso em: 19 set. 2015.

BRASIL. Prefeitos divergem sobre responsabilidade por iluminação pública. **Câmara dos Deputados, 2012.** Disponível em: <<http://goo.gl/qgf5fu>>. Acesso em: 10 set. 2015.

BRAZIL ENERGY. Perfil do setor. **Brazil Energy S.A.**, [2012?]. Disponível em: <<http://brazilenergy.com.br/quem-somos/perfil-do-setor/>>. Acesso em: 31 ago. 2015.

BRONZATTI, Fabricio Luiz; IAROZINSKI NETO, Alfredo. Matrizes energéticas do Brasil: cenário 2010-2030. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28. 2008, Rio de Janeiro. **Anais Eletrônicos...** Rio de Janeiro: Abrepo, 2008. Disponível em: <<http://goo.gl/yfxSnq>>. Acesso em: 30 ago. 2015.

CASAROTTO FILHO, Nelson; KOPITKE, Bruno Hartmut. **Análise de investimentos:** matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2000. 458 p.

CECHINEL, Aurélio; YOSHIDA, Douglas Iha; SÁ, João Danial. **Estudo da viabilidade econômica da implementação de células fotovoltaicas para iluminação a LED da estufa do jardim botânico de Curitiba**. 2014. 127 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

CEMIG. **Tecnologia de geração distribuída**. Companhia Energética de Minas Gerais S.A., 2016. Disponível em: <<https://goo.gl/35BbKH>>. Acesso em: 25 Set. 2016.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA (CEPEL). **Atlas solarimétrico do Brasil – Banco de dados terrestres**. Recife: Editora universitária da UFPE: 2000.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA (CEPEL). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESESB, 2014. 206 p.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). **Manual brasileiro de sinalização de trânsito. Vol. V – Sinalização de trânsito**. Brasília: 2014. 308 p.

CURY, Anay; CARDOSO, Cristiane. Economia Brasileira cresce 0,1% em 2014, diz IBGE. **Portal G1**, 2015. Disponível em: <<http://goo.gl/feGc9V>>. Acesso em: 6 set. 2015.

ELETROBRAS. **Manual de tarifação de energia elétrica**. Rio de Janeiro: PROCEL/PROCEL EDIFICA, 2011. 56 p.

ELETROBRAS. Potencial de economia de energia no país é de R\$ 30 bilhões, aponta Abesco. **Procel Info**, 2015a. Disponível em: <<http://goo.gl/9C3DIm>>. Acesso em: 17 set. 2015.

ELETROBRAS. **Resultados Procel 2015 - ano base 2014**. Procel. Rio de Janeiro: 2015b. 74 p. Disponível em: <<http://goo.gl/HrqOfH>>. Acesso em: 30 ago. 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Anuário estatístico de energia elétrica: ano base 2014**. Ministério de minas e energia (MME). Rio de Janeiro: EPE, 2015a. Disponível em: <<http://goo.gl/iMiMzO>>. Acesso em: 12 set. 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2015 (BEN 2015), ano base 2014: Relatório Síntese**. Ministério de minas e energia (MME). Rio de Janeiro: EPE, 2015b, 62 p. Disponível em: <<https://goo.gl/KTKSU3>>. Acesso em: 30 ago. 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço Energético Nacional 2015 (BEN 2015), ano base 2014.** Ministério de minas e energia (MME). Rio de Janeiro: EPE, 2015c, 292 p. Disponível em: <<https://goo.gl/AWi8HK>>. Acesso em: 30 ago. 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço Energético Nacional 2016 (BEN 2016), ano base 2015: Relatório Síntese.** Ministério de minas e energia (MME). Rio de Janeiro: EPE, 2016, 62 p. Disponível em: <<https://goo.gl/z9gR7f>>. Acesso em: 30 set. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Estudos da demanda: Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2015-2024). Nota técnica DEA 03/15.** Ministério de minas e energia (MME). Rio de Janeiro: EPE, 2015d, 90 p. Disponível em: <<http://goo.gl/WycOVZ>>. Acesso em: 30 ago. 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Inserção da geração fotovoltaica distribuída no Brasil – Condicionantes e impactos. Nota técnica DEA 19/14.** Ministério de minas e energia (MME). Rio de Janeiro: EPE, 2014, 64 p. Disponível em: <<https://goo.gl/nQey6z>>. Acesso em: 15 ago. 2016.

EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS (EPE). **Estudos da Eficiência Energética: Consumo de energia no Brasil - análises setoriais. Nota técnica DEA 10/14.** Ministério de minas e energia (MME). Rio de Janeiro: EPE, 2014, 116 p. Disponível em: <<http://goo.gl/UOWcB4>>. Acesso em: 30 ago. 2015.

FIGUEIRA, Fabio Fernandes. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede para alimentar a sala de computação da escola municipal tenente Antônio João.** 2014. 52 p. Projeto de Graduação (Curso de Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

FONTANA, Luís Eduardo. **Avaliação da eficiência energética de um sistema fotovoltaico na cidade de Lajeado, RS.** Lajeado: UNIVATES, 2015, 109 p. Trabalho de Conclusão de Curso II (Curso de Engenharia Civil) – Centro universitário UNIVATES, Rio Grande do Sul, 2015.

FREITAS, P. C. F. de. **Luminotécnica e lâmpadas elétricas.** Uberlândia: UFU - Faculdade de Engenharia Elétrica, 2009.

FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO (FAPESP). **Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho.** Tradução Maria Cristina Vidal Borba, Neide Ferreira Gaspar. São Paulo: FAPESP; Amsterdam: InterAcademy Council; Rio de Janeiro: Academia brasileira de letras, 2010, 300p.

Disponível em: <<http://www.fapesp.br/publicacoes/energia.pdf>>. Acesso em 17 set. 2015.

FUSANO, Renato Hideo. **Análise Dos Índices De Mérito Do Sistema Fotovoltaico Conectado À Rede Do Escritório Verde Da Utfpr**. 2013. 94 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

GAZOLI, Jonas Rafael; VILLALVA, Marcelo Grandella; GUERRA, Juarez. Energia solar fotovoltaica – introdução. **O Setor Elétrico**, Santa Cecília, n. 106, p. 48-59, Out. 2012.

GIANELLI, Bruno Fernando *et al.* **O emprego de tecnologia LED na iluminação pública: seus impactos na qualidade de energia e no meio ambiente**. [2009]. Disponível em: <<http://goo.gl/6HWSfs>>. Acesso em: 30 ago. 2015.

GITMAN, Lawrence Jeffrey. **Princípios de administração financeira**. 10. ed. São Paulo, SP: Pearson Addison-Wesley, c2004. 745 p.

GODOI, José Maria Alves. **Eficiência Energética Industrial: Um modelo de governança de energia para a indústria sob requisitos de sustentabilidade**. 2011. 126 f. Dissertação (Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) – EP/FEA/IEE/IF da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GOLDEMBERG, José; PALETTA, Francisco Carlos. **Energias renováveis**. São Paulo: Edgard Blucher, 2012. 110 p.

GOVERNO DE PORTUGAL. **Guia da eficiência energética**. 4 ed. Ministério da economia e do emprego. Miraflores: Adene, 2013, 94 p. Disponível em: <http://www.adene.pt/sites/default/files/guiaee_v1310.pdf>. Acesso em 17 set. 2015.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Iluminação pública: guia do gestor**. Secretaria de energia do estado de São Paulo. São Paulo: 2013, 36 p. Disponível em: <<http://goo.gl/brX3Yb>>. Acesso em 12 set. 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **1º de julho: lâmpadas incandescentes de 60W deixam o mercado**. Disponível em: <<http://goo.gl/gh9hBA>>. Acesso em: 30 ago. 2015.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Renewables to lead world power market growth to 2020. **IEA**, 2015. Disponível em: < <https://goo.gl/iJb8wT>>. Acesso em: 15 set. 2016.

KASSAI, José Roberto. **Retorno de investimento**: abordagens matemática e contábil do lucro empresarial: cálculos financeiros, contabilidade. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2007. 273p.

LEITE, Nelson Fonseca. A geração térmica e seus efeitos na tarifa de energia. **Valor**, São Paulo, 2013. Opinião, p. A12.

LESSA, Ivan. Grã-Bretanha instala semáforos movidos a energia solar. **BBC Brasil**, 2001. Disponível em: <<http://goo.gl/xA0ryr>>. Acesso em: 16 ago. 2015.

LIMA, Anderson L. de et al. **Uso de LEDs em semáforos de trânsito: um estudo da viabilidade técnico-econômica**. Curitiba: UFPR, 2008, 13 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2008.

LOPEZ, Ricardo Aldabo. **Energia solar para produção de eletricidade**. 1 ed. São Paulo: Artliber, 2012. 229 p.

MELLO, Arthur Durigon. **Análise de desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede a partir da determinação de índices de mérito**. Araranguá: UFSC, 2016, 46 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Plano decenal de expansão de energia 2024**. Brasília: MME, 2015, 467 p. Disponível em: <<https://goo.gl/mabnUL>>. Acesso em: 27 ago. 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Resenha energética brasileira: exercício 2014**. Brasília: MME, 2015, 32 p. Disponível em: <<http://goo.gl/CikJo6>>. Acesso em: 30 ago. 2015.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Resenha energética brasileira: exercício 2015**. Brasília: MME, 2016, 31 p. Disponível em: <<https://goo.gl/hpPoZu>>. Acesso em: 27 ago. 2016.

MOREIRA, Bruno. Consumo Eficiente é Saída Ante Altas Tarifas. **O Setor Elétrico**, Santa Cecília, n. 106, p. 68-75, nov. 2014. Disponível em: <<http://goo.gl/BNfMnY>>. Acesso em: 16 set. 2015.

PEREIRA, Alisson Cruz. **Geração de energia para condomínio utilizando sistema fotovoltaico autônomo - Estudo de caso em edifício residencial com seis pavimentos**. 2012. Monografia apresentada ao Curso de Especialização em

construção civil da escola de engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 46 p.

PINTO, Ana Mafalda. **Modelo de financiamento para a eficiência energética dos semáforos no município de Lisboa**. 2012. 78 p. Dissertação (Mestrado em Administração Pública) – ISCTE - Instituto Universitário de Lisboa, Lisboa, 2012.

PÓVOA, Marcos Cortez Brito Leite. **Fatores de influência na eficiência energética**. 2014. 73 p. Projeto de Graduação (Curso de Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

PROCEL. Programa nacional de iluminação pública e sinalização semaforica eficientes. **Procel Info**, [200-?]. Disponível em: <<http://goo.gl/wbXwUU>>. Acesso em: 6 set. 2015.

PROJETO obriga prefeitura a instalar semáforos que usem energia solar. **Câmara Municipal de São Paulo**, 2014. Disponível em: <<http://goo.gl/ip1vwx>>. Acesso em: 16 set. 2015.

RASOTO, Armando et al. **Gestão financeira: enfoque em inovação**. Curitiba, PR: Aymar, 2012. 144 p.

REIS, Lineu Belico dos. **Geração de energia elétrica**. 2 ed. rev. e ampl. Barueri: Manole, 2011. 460 p.

REVISTA LOURES MUNICIPAL. Loures: Câmara Municipal de Lourdes, 2006. Bimestral. Disponível em: <<http://goo.gl/wmPqHf>>. Acesso em: 16 set. 2015.

RIBEIRO, Ana Cristina Cota et al. O emprego da tecnologia LED na iluminação pública. **E-xacta**. Belo Horizonte: UniBH, v. 5, n.1, p. 111-132, 2012.

RIOS, Antonio Wellington Sales; TEIXEIRA, Robinson Carlos; AKAMATSU, Janio Itiro. Educação em energia: fator essencial de mudança comportamental para o uso racional de energia. **Revista Ciências Exatas**. Taubaté: v. 12, n. 2, p. 63-67, 2006.

SALES, Roberto Pereira. **LED, o novo paradigma da iluminação pública**. 2011. 133 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia) – Instituto de tecnologia para o desenvolvimento (LACTEC) e Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), Curitiba, 2011.

SANTOS, Fernando Junqueira. **Planejamento de redes de distribuição considerando geração distribuída**. 2013. Dissertação de mestrado em Engenharia

Elétrica, Publicação PPGEE.DM-536/2013, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 116 p.

SANTOS, Pedro Paulo dos. Eficiência energética na iluminação pública. In: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, 9. 2013, Niterói, RJ. **Anais Eletrônicos...** Rio de Janeiro: Abrepo, 2013. Disponível em: <<http://goo.gl/ZI3sCe>>. Acesso em: 31 ago. 2015.

SECRETARIA DE ENERGIA. **Eficiência energética**. São Paulo, [201-?]. Disponível em: <<http://goo.gl/RrbJs8>>. Acesso em: 31 ago. 2015.

SILVA, Marcio Lopes da; FONTES, Alessandro Albino. Discussão sobre os critérios de avaliação econômica: valor presente líquido (VPL), valor anual equivalente (VAE) e valor esperado da terra (VET). **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 29, n. 6, p. 931-936, 2005.

SOUZA, Alceu; CLEMENTE, Ademir. **Decisões financeiras e análise de investimentos**: fundamentos, técnicas e aplicações. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008. 178 p.

SOUZA, Ronilson di. **Os sistemas de energia solar fotovoltaica**. BLUESOL. Riberão Preto, SP. [2010?]. 114 p.

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia solar fotovoltaica**: conceitos e aplicações. 1. ed. São Paulo: Érica, 2013. 224 p.

ZILLES, Roberto et al. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2012. 208 p

ZOMER, Clarissa Debiazi. **Método de estimativa da influência do sombreamento parcial na geração energética de sistemas solares fotovoltaicos integrados em edificações**. 2014. 258 f. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Civil) – PPGECC da Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2014.