

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2013

FABIO RODRIGUES SILVA DE SOUSA

VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA NA UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO PARA ALIMENTAÇÃO DE LUMINÁRIAS LED NA
FACULDADE DE ENGENHARIA DO CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna

Guaratinguetá

2013

S725v Sousa, Fabio Rodrigues Silva de
Viabilidade técnica e econômica na utilização de um sistema
fotovoltaico para alimentação de luminárias LED na Faculdade de
Engenharia do Campus de Guaratinguetá SP / Fabio Rodrigues Silva de
Sousa – Guaratinguetá : [s.n], 2013.
60 f : il.
Bibliografia: f. 58-60

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013.
Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna

1. Energia solar 2. Geração de energia fotovoltaica I. Título

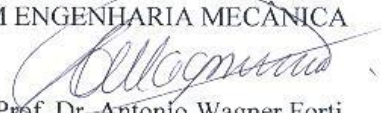
CDU 620.91

VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA NA UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO PARA ALIMENTAÇÃO DE LUMINÁRIAS LED NA
FACULDADE DE ENGENHARIA DO CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

FABIO RODRIGUES SILVA DE SOUSA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. Antonio Wagner Forti
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. JOSÉ LUZ SILVEIRA
UNESP-FEG


Prof. THIAGO AVERALDO BIMESTRE
UNESP/COTEC

Dezembro de 2013

de modo especial, pelo incentivo, pela paciência e suporte nos momentos mais difíceis, dedico esse trabalho de graduação aos meus pais Eulógio e Geni, ao meu irmão Marcel e a minha namorada Vanessa.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por ter me concebido a vida e por estar sempre comigo iluminando os meus caminhos,

ao meu pai *Eulógio*, que apesar das dificuldades financeiras, sempre fez de tudo para que eu concluísse meus estudos,

à minha mãe *Geni*, que sempre me incentivou e me apoiou nas minhas decisões,

ao meu irmão *Marcel*, que me inspirou a fazer o curso de Engenharia em uma faculdade pública,

à minha namorada *Vanessa*, que sempre esteve ao meu lado durante a elaboração desse Trabalho de Graduação,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna* que como excelente professor foi fundamental para definir o tema, tirar dúvidas e sugerir melhorias nesse Trabalho de Graduação,

a todos os professores da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, que com suas excelentes didáticas passaram todo o conhecimento que possuo atualmente,

aos meus irmãos de convivência da *República Taj Mahal*, pelas experiências e crescimento que me proporcionaram,

à empresa *Ernst & Young* e todos os meus colegas de trabalho, que foram flexíveis e compreensivos comigo nas horas que precisei,

a todos que torceram e continuarão torcendo pelo meu sucesso pessoal e profissional,

a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a elaboração desse Trabalho de Graduação.

*“Quando você quer alguma coisa, todo o universo
conspira para que você realize o seu desejo.”*

Paulo Coelho

SOUSA, F. R. S., Viabilidade Técnica e Econômica na Utilização de um Sistema Fotovoltaico para Alimentação de Luminárias LED na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá. 2013. 60 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

RESUMO

A energia solar pode ser considerada a maior fonte de energia disponível na Terra e tem atraído, nas últimas décadas, a atenção e o interesse pela sua utilização consciente e racional. O uso das fontes de energia de forma sustentável tem se tornado imprescindível para a sobrevivência das próximas gerações, por causa da escassez dos recursos naturais devido à sua exploração desordenada. Esse trabalho acadêmico visa trazer uma possível alternativa para a redução do consumo de energia elétrica, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, através da utilização de um sistema fotovoltaico interligado a lâmpadas de LED. Para isso, foram obtidos os dados necessários para o dimensionamento dos componentes do sistema fotovoltaico, seus respectivos custos de aquisição e foram elaborados três diferentes configurações, para escolher aquele que melhor se encaixa no caso estudado, considerando o tempo de retorno do investimento inicial (*payback*).

PALAVRAS-CHAVE: Energia solar. Sistema Fotovoltaico. Lâmpadas LED. Tempo de retorno.

SOUSA, F. R. S., Technical and Economic Feasibility on Use of a Photovoltaic Power System for LED luminaires in the University of Engineering - Campus de Guaratinguetá. 2013. 60 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

ABSTRACT

Solar energy can be considered the largest source of energy available on earth and has attracted in recent decades, attention and interest for its rational use. The use of energy sources in a sustainable way is essential to the survival of future generations, due to the scarcity of natural resources and their exploitation in a disorderly way. This academic work aims to bring a possible alternative to reduce the consumption of electrical energy, at the University of Engineering – Campus of Guaratinguetá, through the use of a photovoltaic system interconnected to the LED bulbs. For this, the necessary data for the design of the photovoltaic system components and their acquisition costs were obtained and three different configurations were developed to choose the one that best fits the studied case, considering the return time of the initial investment (payback).

KEYWORDS: Solar Energy. Photovoltaic System. LED Bulbs. Payback.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo de energia das principais fontes de energia nos EUA entre 1949 e 2009.....	20
Figura 2 - Consumo total de energia per capita de 1900 a 1978.....	21
Figura 3 - Satélite “Skylab” e seus painéis solares de 20 kW	24
Figura 4 - Esquema das camadas de uma célula solar	27
Figura 5 - Esquema da seção reta de uma célula solar convencional de silício.....	28
Figura 6 - Esquema da seção reta da estrutura de uma célula solar	29
Figura 7 - Estrutura de uma célula de silício monocristalina	30
Figura 8 - Estrutura de uma célula de silício policristalina	30
Figura 9 - Estrutura de uma célula de silício amorfo	31
Figura 10 - Componentes básicos de um LED	33
Figura 11 - Campus da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.....	35
Figura 12 - Exemplo de sistema fotovoltaico.....	36
Figura 13 - Radiação solar diária média	37
Figura 14 - Vista superior do trecho onde serão substituídas as luminárias	39
Figura 15 - Exemplo de bateria	44
Figura 16 - Exemplo de controlador de carga	45
Figura 17 - Exemplo de inversor	46
Figura 18 - Gráfico percentual dos custos dos itens do sistema fotovoltaico para o cenário A.....	51
Figura 19 - Gráfico percentual dos custos dos itens do sistema fotovoltaico para o cenário B	52
Figura 20 - Gráfico percentual dos custos dos itens do sistema fotovoltaico para o cenário C	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Capacidade instalada nos países mais avançados em 1902.....	18
Tabela 2 - Valores mínimos para os níveis médios de iluminância.....	38
Tabela 3 - Fator de utilização (Fu) e fator de depreciação (Fd).....	41
Tabela 4 - Catálogo adaptado de luminárias de LED.....	42
Tabela 5 - Catálogo adaptado de painel fotovoltaico.....	43
Tabela 6 - Exemplo de fabricante de controladores de carga.....	46
Tabela 7 - Exemplo de fornecedor de inversor.....	47
Tabela 8 - Custo dos painéis fotovoltaicos.....	48
Tabela 9 - Custo unitário das baterias.....	49
Tabela 10 - Custo unitário dos controladores de carga.....	49
Tabela 11 - Custo dos inversores.....	49
Tabela 12 - Custos das lâmpadas de LED.....	50
Tabela 13 - Custo total do sistema dimensionado para o cenário A.....	50
Tabela 14 - Custo total do sistema dimensionado para o cenário B.....	52
Tabela 15 - Custo total do sistema dimensionado para o cenário C.....	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Objetivo.....	13
1.2	Motivação.....	13
1.3	Atualidades.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	A Evolução da demanda de energia.....	16
2.2	História do efeito fotovoltaico.....	22
2.3	Célula solar e o efeito fotovoltaico.....	25
2.3.1	A Célula Solar.....	25
2.3.2	O efeito fotovoltaico no silício.....	26
2.3.3	Estrutura de uma célula solar.....	28
2.3.4	Tipos de célula solar.....	29
2.4	A tecnologia <i>Light Emitting Diodes</i> (LEDs).....	32
2.4.1	Princípio de funcionamento do LED e seus componentes.....	33
3	ESTUDO DE CASO.....	35
3.1	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.....	35
3.2	Dimensionamento do sistema com painel fotovoltaico.....	36
3.2.1	Levantamento da radiação solar.....	37
3.2.2	Dimensionamento da lâmpada de LED.....	38
3.2.2.1	Critérios e normas de iluminação pública.....	38
3.2.2.2	Seleção da lâmpada de LED.....	41
3.2.3	Dimensionamento do módulo solar.....	43
3.2.4	Dimensionamento da bateria.....	44
3.2.5	Dimensionamento do controlador de carga.....	45
3.2.6	Dimensionamento do inversor.....	46
4	ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	48
4.1	Custos dos itens do sistema dimensionado.....	48
4.1.1	Custo do painel fotovoltaico.....	48
4.1.2	Custo da bateria.....	48
4.1.3	Custo do controlador de carga.....	49
4.1.4	Custo do inversor.....	40
4.1.5	Custo da lâmpada de LED.....	50
4.2	Custo total do sistema dimensionado.....	50
4.2.1	Cenário A.....	50
4.2.2	Cenário B.....	51
4.2.3	Cenário C.....	53
4.3	<i>Payback</i> dos equipamentos dimensionados.....	54
4.3.1	<i>Payback</i> do cenário A.....	55
4.3.2	<i>Payback</i> do cenário B.....	55
4.3.3	<i>Payback</i> do cenário C.....	56
5	CONCLUSÃO.....	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo

O objetivo desse trabalho é oferecer uma possível solução para reduzir os gastos com relação ao consumo de energia elétrica pública nos postes de luz, através da análise de dados e dimensionamento de um sistema que utilize energia solar. Assim busca-se com o uso de painéis solares fotovoltaicos aquele sistema que melhor atende as necessidades, realizando-se um estudo em cima dos custos e benefícios dos diferentes tipos de painéis e também dos seus equipamentos auxiliares.

1.2 Motivação

No cenário atual em que vivemos é possível observar que cada vez mais o ser humano está interessado no futuro, buscando soluções para os problemas gerados no passado. Com isso, vem crescendo a ideia de sustentabilidade, preservação do meio ambiente e a utilização de diferentes fontes de energia não poluentes, renováveis, limpas e que não causem impactos ambientais.

A base científica para a utilização da energia solar pelo homem foi adquirida há alguns anos, mas faltava a vontade política para a extensão de sua exploração em larga escala. Não obstante, o congresso internacional “O Sol a Serviço da Humanidade” (UNESCO, julho de 1973) atraiu a atenção sobre a perspectiva de suprir – de maneira conveniente e econômica – uma parte significativa das necessidades de energia da humanidade antes do fim do século. As aplicações em pequena escala já estão em operação e constantemente ganhando novos mercados, assim como, em alguns países europeus já existem imensos parques de captação de energia solar para geração de eletricidade.

Junto com o progresso científico e tecnológico dos anos recentes, que trouxeram para mais perto a utilização em larga escala da energia solar, houve uma profunda mudança na economia da produção de energia por processos convencionais, e uma consciência crescente de seus efeitos ambientais adversos. Além disso, há uma necessidade social – especialmente nos países em desenvolvimento (caso do Brasil) – de técnicas que permitam a produção

descentralizada de energia em comunidades pequenas e dispersas; a energia solar presta-se bem à produção em pequena escala em áreas remotas.

O desenvolvimento das aplicações de energia solar não significa o começo de um novo mundo econômico: pelo contrário, os novos sistemas de energia primeiro devem conquistar seu lugar no mercado global de energia, devem se tornar competitivos com o petróleo, carvão ou energia nuclear, quer pela razão de esgotamento dos recursos naturais, da poluição térmica e química do ambiente natural, maior independência dos fornecedores estrangeiros, ou simplesmente pelos custos inferiores.

Assim, surge o tema abordado neste trabalho, para que descentralizemos a produção pelas hidroelétricas e tenhamos outras fontes para a geração de energia, como a solar. Nesse contexto, será feito um estudo de caso em uma empresa de médio de porte, mas na concepção do autor fica a ideia de que futuramente isto venha a se desenvolver mais, ganhando força para disseminar esta tecnologia para outros tipos de estabelecimentos, seja ele comercial ou residencial.

1.3 Atualidades

A exploração desenfreada das reservas esgotáveis de combustíveis fósseis e os prejuízos causados ao meio ambiente apresentam um cenário preocupante para o próximo século. Nesse contexto aparece com crucial importância a busca de fontes alternativas de energias renováveis e não poluentes, como a solar e a eólica.

Vários países investem nas aplicações da energia solar, analisando desde as características do fluxo de radiação solar que chega a terra até a tecnologia necessária para viabilizar, em termos técnicos e econômicos, o máximo aproveitamento dessa energia.

O Brasil também busca soluções para o futuro, elaborando estudos para avaliar a eficácia de pequenos módulos solares, em regiões remotas e o mapeamento do potencial energético solar existente no país, para estabelecer uma política nacional ao setor.

Para a complementação da energia hidrelétrica é necessária uma fonte energética com várias características particulares: limpa (não poluente), não escassa, distributiva e que possa ser usada em residências, indústrias e em estabelecimentos comerciais. Uma das que possui todas essas características é a energia elétrica fotovoltaica.

Aspectos técnicos e econômicos muitas vezes inviabilizam suas utilizações para a geração de energia elétrica, mas não para a sua utilização de outra forma. As faltas de informação por parte dos consumidores e de uma política de incentivo adequada são os maiores obstáculos para a utilização dessa fonte de energia. Além disso, esses fatores contribuem fortemente para criar a concepção generalizada de inviabilidade econômica de todos os usos de energias não convencionais. Segundo a diretoria de operações da Eletrobrás, na hora do pico entre 17h30min e 20h30min, os chuveiros elétricos são responsáveis por mais de 20% do consumo nacional de eletricidade (ANEEL, 1998). A substituição dos chuveiros elétricos por aquecedor solar possibilitaria a diminuição da conta de energia do consumidor residencial.

A utilização da energia solar possui várias vantagens, como a economia na conta de energia, a diminuição da demanda pela energia do sistema nacional, adiando assim, a construção de novas barragens e usinas termelétricas e nucleares, que geram diversos impactos – ambientais e por ser uma fonte de energia renovável e limpa, sem produzir resíduos poluentes.

Utilizando a energia elétrica fotovoltaica para fornecer energia a um circuito responsável pela iluminação em residências, pequenas cargas como: rádios, televisores, vídeo cassete, DVD e outros, os sistemas aquecedor solar, fotovoltaico e energia convencional trabalhando de forma conjugada, proporcionaria uma maior economia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Evolução da demanda de energia

Há apenas duzentos e trinta anos, o homem retirava seus recursos energéticos quase exclusivamente do sol. Naquela época, há quatro ou cinco gerações, a madeira era de uso geral para aquecimento, e os animais eram usados para o transporte. Ambas estas espécies de energia são proporcionadas (direta ou indiretamente) pela fotossíntese, o processo pelo qual as plantas podem utilizar parte da energia do sol para converter o dióxido de carbono e água em substâncias combustíveis e alimento. Outras formas de energia derivada do Sol eram a do vento e a da água, suas aplicações mais conhecidas como sendo os moinhos de vento e as rodas d'água (PALZ, 1981).

O consumo de combustíveis fósseis era insignificante até o século XVIII. Esta é uma observação surpreendente, porque todos os combustíveis fósseis eram conhecidos desde a antiguidade. Os babilônios usavam petróleo, e Alexandre sabia disso, como nos foi relatado pelos gregos. O petróleo era usado para iluminação, e o asfalto (uma palavra grega) era empregado como material de construção. Os índios americanos também conheciam o petróleo. No que concerne ao carvão, sabemos, por Marco Polo, que os chineses o utilizavam há 2000 anos. Os gregos também usavam o carvão, especialmente na fundição do bronze. Na Europa a mineração de carvão é registrada a partir do século XII. Através da Idade Média e posteriormente, o carvão foi usado principalmente em forjas e fundições. O gás natural era há muito conhecido, na antiguidade, especialmente na Índia e Oriente Médio, onde intervinha nas práticas religiosas (PALZ, 1981).

Já no fim do século XVI, na Inglaterra, nos primeiros passos rumo à industrialização, a utilização mais geral do carvão para a fabricação do ferro, vidro e tijolos já começava. Mas foi a partir do século XIX que começou a substituição maciça da energia solar pelos recursos fósseis, e esta prática foi depois se intensificando. A exploração de carvão em grande escala começou por volta de 1820. O começo do uso em larga escala de petróleo é datado de 12 de agosto de 1859, quando foi achado acidentalmente numa perfuração na Pensilvânia (EUA). Mas por que a energia fóssil, que fora conhecida por tanto tempo, de repente tornou-se a energia mais cobiçada do século dezanove? A resposta é que este importante desenvolvimento

na história da humanidade resultou do aparecimento de nova espécie de demanda: era requerida energia para motores, que foram desenvolvidos durante o período singular de progresso técnico e científico, ocorrido ao fim do século retrasado nos países “industrializados”. O desenvolvimento dos motores aumentou a produtividade, e possibilitou um tremendo crescimento populacional (PALZ, 1981).

Tirando o moinho de vento e a roda d’água, o primeiro motor mecanicamente acionado que teve uso bem difundido, foi o motor a vapor. A primeira versão primitiva do motor a vapor foi inventada em 1706 pelo francês Papin, que então trabalhava na Alemanha. A eficiência deste motor era muito baixa (aproximadamente 75 vezes inferior aos motores de hoje em dia), e só em 1768 (com Watt, na Inglaterra) um motor a vapor ficou operacional. As aplicações práticas do motor a vapor se desenvolveram lentamente: o primeiro navio a vapor entrou em serviço em 1807 e a primeira ferrovia, em 1825. As primeiras caldeiras a vapor queimavam madeira, mas houve uma mudança progressiva para o carvão (PALZ, 1981).

O desenvolvimento de motores elétricos modernos seguiu-se à descoberta do dinamarquês Oersted, em 1819, da relação entre uma agulha magnética e um gerador transportando uma corrente. Em 1831, Faraday acrescentou o princípio da indução magnética. O primeiro gerador elétrico que se seguiu à invenção de Oersted foi construído por Pixxi em Paris, em 1832. Nas décadas seguintes, tentativas foram feitas, especialmente na França (a “máquina Alliance”, de 1863) para usar estes geradores para a eletrólise e iluminação elétrica, e em faróis, mas as máquinas se mostraram muito ineficientes. O grande progresso veio em 1867, quando Siemens e Wheatstone quase simultaneamente descobriram que o dínamo podia ser auto excitado através magnetismo residual dos núcleos de ferro-doce dos eletroímãs. Estes geradores foram mais aperfeiçoados pelo belga Gramme. Finalmente, diz-se que a primeira central geradora foi construída por Edison, 1882, em Nova Iorque, que tinha a potência de vários quilowatts. Este marco iniciou uma segunda fase de industrialização, em que a energia elétrica se tornou importante. Segundo PALZ (1981), em 1902 o primeiro ano para o qual se dispõe de estatísticas nacionais de eletricidade, a capacidade instalada nos seis países mais adiantados quanto à eletrificação, era conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Capacidade instalada nos países mais avançados em 1902.

EUA	3000 MW
Alemanha	1400 MW
Inglaterra	500 MW
França	370 MW
Espanha	200 MW
Suécia	100 MW

Fonte: PALZ, 1981.

Em comparação, a capacidade instalada na Comunidade Econômica Européia (CEE) em 1977 era de 284.000 MW.

Por volta de 1862, Otto construiu seu motor de combustão interna de quatro tempos, o que possibilitou o desenvolvimento do automóvel moderno e do avião, e estimulou grandemente a demanda de um novo tipo de combustível fóssil, o petróleo (PALZ, 1981).

Outro grande passo no progresso da energia mecânica foi o desenvolvimento das turbinas, cujo princípio fora descrito por Leonardo da Vinci. Nos séculos XVIII e XIX, vários cientistas pesquisaram turbinas, e os primeiros motores foram construídos. As turbinas hidráulicas modernas foram inventadas pelo americano Francis (1849) e pelo austríaco Kaplan (1912). A turbina a vapor foi inventada em 1884 pelo inglês Parsons e pelo sueco Laval. A turbina a gás data de 1850 (PALZ, 1981).

A turbina proporcionou a base para a invenção do motor a jato, por volta de 1930 (Sir Frank Whittle). O primeiro avião a jato voou com sucesso na Alemanha: o Heinkel He 178, 1939.

Finalmente, o homem descobriu a energia nuclear. Os primeiros estudos sobre materiais radioativos foram iniciados na França e na Alemanha, no fim do século passado. Mas foi só em 1938 que Hahn, na Alemanha, conseguiu a primeira fissão artificial de átomos de urânio; em 1942, Fermi construiu o primeiro reator atômico, em Chicago. Apesar das primeiras esperanças de rápido desenvolvimento, esta fonte de energia ocupa apenas fração mínima do quadro energético atual (PALZ, 1981).

A evolução do consumo de energia que resultou de todas essas invenções pode ser estudada, e o futuro desenvolvimento técnico e industrialização de vários países podem ser previstos tomando-se o caso dos Estados Unidos, onde as estatísticas mais completas são disponíveis (PALZ, 1981).

Em 1850, os EUA apoiavam-se quase completamente em energia solar renovável nas formas de lenha, tração animal, e energia hídrica e eólica. O carvão totalizava apenas 10% naquela época, mesmo já tendo se passado 70 anos desde a invenção de um motor a vapor operacional. Em termos absolutos, o consumo de energia solar permaneceu notavelmente constante até a atualidade, mas como fração do consumo total, decaiu. No entanto, durante a segunda metade do último século, as formas em que a energia solar foi usada sofreram uma mudança fundamental. O uso de madeira como combustível diminuiu, ao passo que a hidroeletricidade se tornou cada vez mais importante (PALZ, 1981).

Em 1949, os EUA consumiam praticamente três vezes menos energia do que atualmente, mostrando que na última metade do século passado o consumo de petróleo e gás natural aumentou consideravelmente, tornando-se as duas fontes mais cobiçadas de energia, junto também do carvão, como mostrado na Figura 1.

Setor Elétrico - Estados Unidos - 1949 - 2009

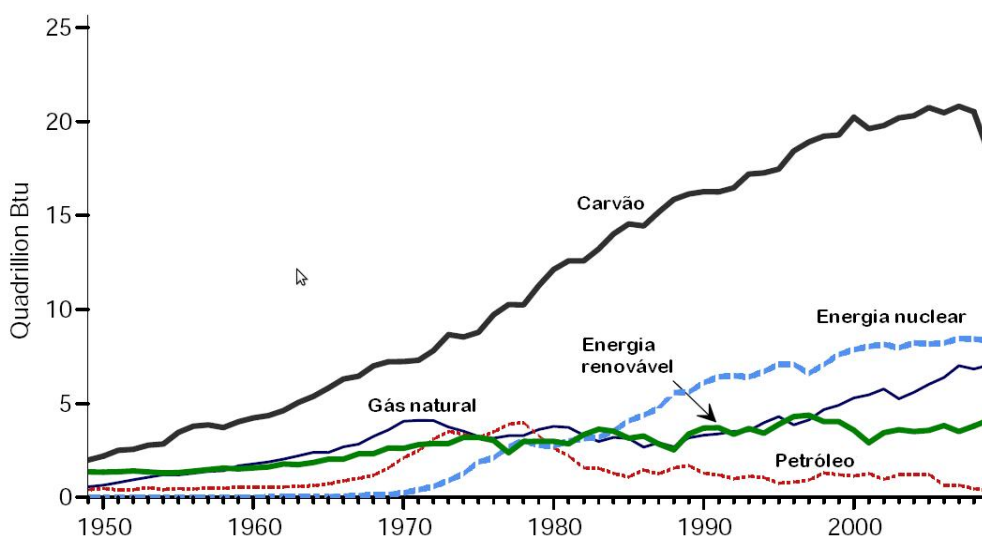


Figura 1 - Consumo de energia das principais fontes de energia nos EUA entre 1949 e 2009.

Fonte: Adaptado de www.eia.gov, out. 2011.

Hoje, se quisermos aumentar a fração da energia solar direta no consumo total de energia, o exemplo dado por nossos antepassados não pode ser seguido. Uma transformação irreversível ocorreu, e não pode haver dúvida que dirigir a energia solar para as necessidades futuras requer, em primeiro lugar, principalmente, um difícil trabalho de desenvolvimento técnico e um grande esforço industrial. Qualquer coisa inferior nos levaria de volta a uma civilização primitiva (PALZ, 1981).

Para termos uma boa visão dos mecanismos do crescimento da energia, examinaremos a evolução do consumo per capita. A Figura 2 mostra este consumo entre 1900 e 1978 para o mundo, para os EUA, para a CEE e África. Deve-se notar que o gráfico só leva em conta as energias ditas “comerciais”, à exceção da lenha, em grande ou pequena escala. Levando-se estas em conta, a curva da África deveria estar três vezes mais alta, pois dois terços da energia lá gerada são de origem não comercial. Entre 1850 e 1900, por exemplo, o consumo norte-americano per capita permaneceu quase constante, ao passo que o consumo total respondeu ao crescimento populacional de 23 milhões para 76 milhões.

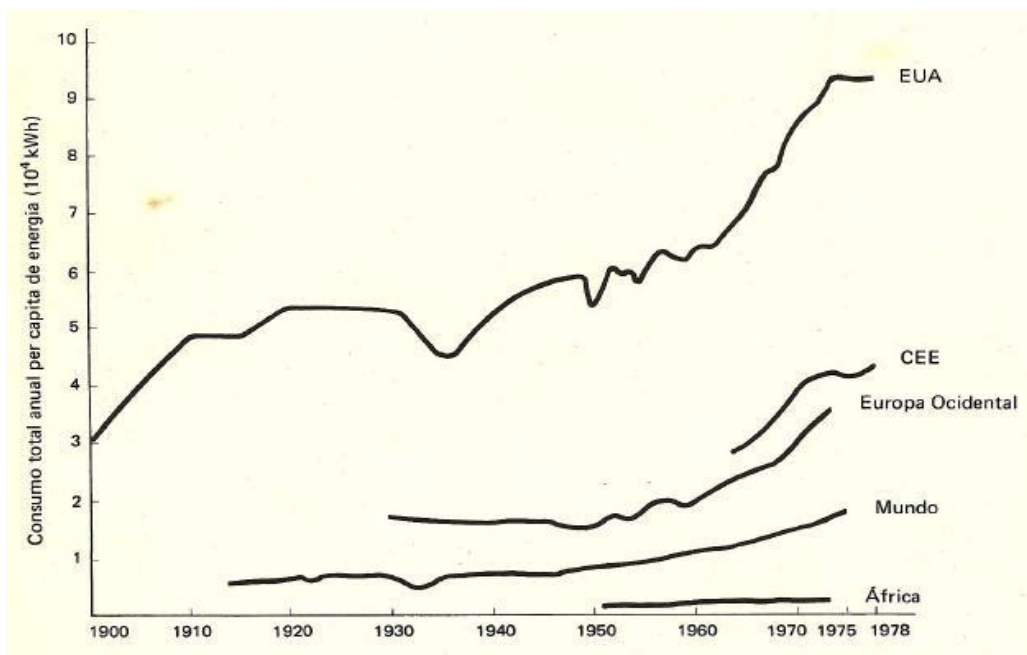


Figura 2 - Consumo total de energia per capita de 1900 a 1978.

Fonte: PALZ, 1981.

Um rápido crescimento do consumo per capita, usualmente ocorre durante as guerras, mas, como pode ser visto na Figura 2, um crescimento substancial também pode aparecer em tempos de paz. Todos os períodos pós-guerras são marcados por um decréscimo na taxa de crescimento energético: em 1971, depois da guerra do Vietnã, a taxa de crescimento energético norte-americano foi de 2,3% contra 6% em 1968. A crise do petróleo, de 1973, revolucionou a situação. O consumo começou a cair na maioria dos países industrializados, e só em 1979 atingiu um nível mais ou menos equivalente ao de 1973.

De acordo com PALZ (1981), as estatísticas mostram que:

1. A taxa de crescimento do consumo de energia tem sido exponencial. Por exemplo, o consumo nos EUA aumentou absurdamente entre 1850 e 1979;
2. A taxa de consumo per capita não cresceu exponencialmente. Entre 1910 e 1960, o consumo per capita nos países industrializados variou tipicamente de não mais de 30%. Um crescimento excepcionalmente rápido começou em 1960 e terminou em 1973;

3. O crescimento energético total, particularmente nos EUA, deveu-se a um crescimento quase exponencial da população. Outros fatores como, a vigorosa industrialização durante aquele período, tiveram impacto surpreendentemente pequeno.

2.2 História do Efeito Fotovoltaico

Efeito fotovoltaico é o nome dado para a conversão da energia solar em energia elétrica, fenômeno constatado por Edmond Becquerel em 1839. Foi observada uma diferença de potencial nas extremidades de uma estrutura semicondutora, quando incidia uma luz sobre ela (PALZ, 1981).

No período entre as duas guerras mundiais, um esforço significativo foi empreendido em muitos países, notavelmente EUA, Alemanha, França e Inglaterra. Contribuições importantes também vieram das pesquisas russas. Os materiais estudados eram principalmente o selênio e o Cu_2O (óxido cuproso). Os materiais como o silício, que são do maior interesse para a conversão fotovoltaica, não existiam como monocristais de elevada pureza naquela época. Em retrospectiva, pode-se ver que o trabalho de pesquisa daqueles dias não levaria a células solares de desempenho razoável, porque a metalurgia dos materiais semicondutores ainda não havia progredido o bastante. Por outro lado, grandes progressos puderam ser feitos na teoria do efeito fotovoltaico menos ligado à perfeição metalúrgica. A primeira compreensão completa de uma célula solar de junção origina-se daquele tempo, e é devida a W. Schottky (PALZ, 1981).

Segundo PALZ (1981), a primeira célula solar de eficiência razoável, de silício, foi feita em 1954 por Pearson, Fuller e Chapin. Não foi coincidência que em 1954 foi também o ano em que pela primeira vez foi desenvolvido um processo para a purificação de monocristais de silício. Com base neste processo, não só o desenvolvimento de células solares de silício, mas o impulso para a tecnologia do transistor e a moderna indústria eletrônica tornou-se possível.

Desde 1954, vem sendo aperfeiçoada progressivamente a tecnologia da célula de silício. As malhas de coleta foram usadas primeiramente em 1960. Pouco depois disso, a difusão da camada n por meio de uma atmosfera de P_2O_5 (pentóxido de fósforo), e posteriormente foi

introduzida a prática padrão. Através da década de 1960, o rendimento das células solares de silício com iluminação AM1 permaneceu entre 12 e 13%. A célula violeta de 16% de rendimento foi anunciada em 1972. Finalmente, em 1974, uma célula de 18 a 19% de rendimento, chamada célula negra, foi apresentada (PALZ, 1981).

A partir de 1974 que o desenvolvimento das fotopilhas tomou nova dimensão. Foram lançados programas ambiciosos, sobretudo nos EUA. O principal beneficiário deste esforço foi o silício. O desafio era transpor os dois obstáculos principais que se opunham ao estabelecimento de uma nova tecnologia barata: o alto grau de pureza do silício, e sua transformação em monocristais. Entre 1976 e 1978, estas pesquisas mostraram resultado, determinando que as fotopilhas de silício de rendimento superior a no Máximo 8% poderiam ser construídas a partir de um silício de qualidade metalúrgica, transformado em semicristal, após refino. O silício estava então em boa posição para se tornar o material de base para os geradores solares do futuro (PALZ, 1981).

Em 1954, foi revelado o efeito fotovoltaico do arsenieto de gálio (GaAs). Além das pilhas de estrutura monocristalina, as pilhas de películas finas de GaAs foram igualmente estudadas. A maioria dos esforços desenvolvidos sobre estas foi interrompida nos EUA em meados da década de 60, por causa da falta de resultados. No início dos 70, foram realizados progressos no domínio da metalurgia do GaAs, e os trabalhos sobre as pilhas de GaAs de estrutura monocristalina foram retomados, dando rendimentos que chegaram a 23% (PALZ, 1981).

Com o avanço das pesquisas esses rendimentos seriam ainda mais aperfeiçoados. Em 1978, atingiu-se um rendimento de 28,5% em laboratório. Tratava-se de um dispositivo de concentração de radiação no qual a luz era separada com o auxílio de um espelho dielétrico, em dois feixes distintos, tendo espectros diferentes um do outro. Iluminando uma pilha de silício com o feixe mais rico em luz vermelha, e uma pilha de GaAs com o feixe mais rico em luz azul, obtiveram-se duas potências que somadas representam um rendimento de 28,5%. O fator de concentração que deu melhores resultados foi de 400. Com isso, seria possível alcançar rendimentos superiores a 30% (PALZ, 1981)

Quando o primeiro satélite foi lançado, as células de silício tornaram-se quase a fonte exclusiva de energia satélites. A Figura 3 mostra o Skylab no espaço, que durante seu voo entre 1973 e 1979, seu gerador de 20 kW foi o mais poderoso (PALZ, 1981).



Figura 3 - Satélite “Skylab” e seus painéis solares de 20 kW.

Fonte: <http://space.about.com>, out. 2011.

A razão desse grande sucesso das células solares para a astronáutica é que os geradores solares apresentavam-se como os de menor massa do que qualquer outra fonte, considerando-se a massa de combustível (que no caso do gerador solar é zero). O peso é o parâmetro que mais limita as aplicações astronáuticas, porque nas condições técnicas e econômicas de 1970, custava mais de US\$ 20.000 para colocar 1 kg de satélite em órbita síncrona da Terra (PALZ, 1981).

Na concepção de NASCIMENTO (2004), outro agente impulsionador das pesquisas dessa tecnologia para aplicações diversas, inclusive para complementação do sistema elétrico existente, foi a crise do petróleo em 1973. A energia solar passou a atrair o interesse do governo, com a possibilidade real do esgotamento das reservas petrolíferas.

Mas o custo de produção das células era um fator preocupante em relação à quantidade de energia produzida por ela. Era preciso reduzir o custo significativamente. Por isso o desenvolvimento do mercado foi muito lento. Mas em 1978 a produção já chegava a um MWp/ano. Com o aumento da escala de produção e a pesquisa de tecnologia em materiais usados na fabricação das células o custo e o preço começaram a diminuir. Após quinze anos a produção já alcançava 60 MWp/ano (NASCIMENTO, 2004).

A década de 90 marca o desenvolvimento acelerado da indústria fotovoltaica. Visando ampliar os horizontes para utilização em massa da energia solar como opção energética, inúmeros programas mundiais foram lançados para a demonstração da viabilidade técnica e

comercial da energia solar fotovoltaica em projetos de eletrificação rural nos países em desenvolvimento (NASCIMENTO, 2004).

Hoje um dos maiores desafios que o setor enfrenta é a redução de custos dos sistemas fotovoltaicos. Com as novas tecnologias em desenvolvimento, principalmente a dos filmes finos, poderão provocar reduções significativas nos custos dos módulos fotovoltaicos. O desenvolvimento de modelos autossustentados de eletrificação rural com sistemas fotovoltaicos é o maior desafio. O baixo nível cultural e econômico da maior parte das populações limita o desenvolvimento do mercado (NASCIMENTO, 2004).

Estudos levam a crer que cerca de 30% da população mundial, algo como dois bilhões de pessoas, ainda viva em condições dependentes do carvão ou biomassa tradicional para cozinhar alimentos e usando velas, pilhas, querosene e diesel para geração de eletricidade (NASCIMENTO, 2004).

A energia solar fotovoltaica tem como “vocação” a utilização em pequenas instalações (pequenas cargas) o que a torna, econômica, eficiente e segura. O Brasil dispõe de um dos maiores potenciais do mundo para o aproveitamento de energias renováveis principalmente a energia solar, que além de ecologicamente correto, é uma fonte inesgotável de energia (NASCIMENTO, 2004).

2.3 Célula solar e o efeito fotovoltaico

2.3.1 A Célula solar

A conversão direta da luz solar em energia elétrica é conseguida por meio de painéis solares, constituídos de células solares, pelo processo de conversão conhecido como *efeito fotovoltaico*, citado anteriormente. Deve-se sublinhar que este processo não depende do calor, pelo contrário, o rendimento da célula solar cai quando sua temperatura aumenta. Uma ilustração é proporcionada pelas células fotovoltaicas que foram instaladas em 1980 no Pólo Sul, elas funcionaram perfeitamente bem, além de terem gerado mais potência do que seria esperado para um clima temperado. Este comportamento é explicado pelo fato de que os fótons da luz solar transferem sua energia diretamente aos elétrons sem etapa térmica intermediária (PALZ, 1981).

Consequentemente, as células solares não só são apropriadas para regiões ensolaradas, mas também parecem promissoras para áreas em que outros tipos de sistemas de energia solar parecem sem perspectivas, ainda mais naquelas partes da região equatorial e zonas temperadas, que sofrem de baixa insolação. As células solares continuam a operar com o mesmo rendimento sob o céu nublado, como sob a luz direta do Sol (PALZ, 1981).

Um efeito de conversão fotovoltaico pode ser obtido em todos os semicondutores. Os isolantes são inadequados por causa da sua baixa condutividade, e os metais são insensíveis à luz por causa de sua elevada concentração de elétrons, no escuro (PALZ, 1981).

Os semicondutores mais apropriados à conversão da luz solar são os mais sensíveis, em outras palavras, aqueles que dão o maior produto corrente-voltagem para a luz visível. De fato, o maior volume de energia transmitida pelos raios do Sol está dentro da faixa visível do espectro. Semicondutores assim como o PbS (sulfeto de chumbo), que são sensíveis ao infravermelho, são inadequados para a conversão de energia, mas são úteis para a detecção de infravermelha. O ZnS (sulfeto de zinco), como uma sensibilidade máxima na faixa ultravioleta do espectro da radiação solar, também é inadequado (PALZ, 1981).

Atualmente, o material semicondutor que mais tem sido adotado nas aplicações de painéis solares, é o silício.

2.3.2 O Efeito Fotovoltaico no Silício

Segundo NASCIMENTO (2004), o silício apresenta-se normalmente como areia. Através de métodos adequados obtém-se o silício em forma pura. O cristal de silício puro não possui elétrons livres e, portanto não é um bom condutor elétrico. Para alterar isto se acrescentam porcentagens de outros elementos. Este processo denomina-se dopagem. A dopagem do silício com o fósforo obtém-se um material com elétrons livres ou materiais com portadores de carga negativa (silício tipo N).

Realizando o mesmo processo, mas agora acrescentado Boro ao invés de Fósforo, obtém-se um material com características inversas, ou seja, falta de elétrons ou material com cargas positivas livres (silício tipo P).

A Figura 4 mostra uma célula solar composta por uma camada fina de material tipo N e outra com maior espessura de material tipo P (NASCIMENTO, 2004).

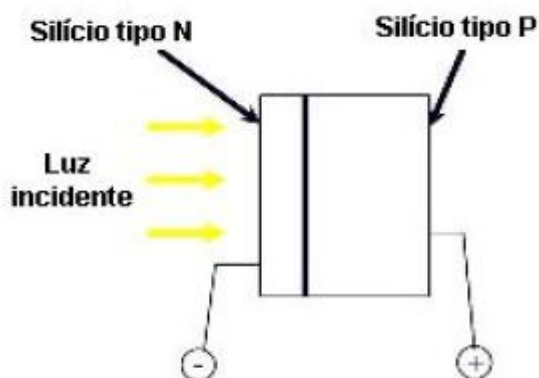


Figura 4 – Esquema das camadas de uma célula solar.
Fonte: NASCIMENTO, 2004.

Separadamente, ambas as capas são eletricamente neutras. Mas ao serem unidas, na região P-N, forma-se um campo elétrico devido aos elétrons livres do silício tipo N que ocupam os vazios da estrutura do silício tipo P. Ao incidir luz sobre a célula fotovoltaica, os fótons chocam-se com outros elétrons da estrutura do silício fornecendo-lhes energia e transformando-os em condutores. Devido ao campo elétrico gerado pela junção P-N, os elétrons são orientados e fluem da camada “P” para a camada “N” (NASCIMENTO, 2004).

Por meio de um condutor externo, ligando a camada negativa à positiva, gera-se um fluxo de elétrons (corrente elétrica). Enquanto a luz incidir na célula, manter-se-á este fluxo.

A intensidade da corrente elétrica gerada irá variar na mesma proporção conforme a intensidade da luz incidente. Uma célula fotovoltaica não armazena energia elétrica, apenas mantém um fluxo de elétrons estabelecidos num circuito elétrico enquanto houver incidência de luz sobre ela (Figura 5). Este fenômeno é denominado “Efeito fotovoltaico”.

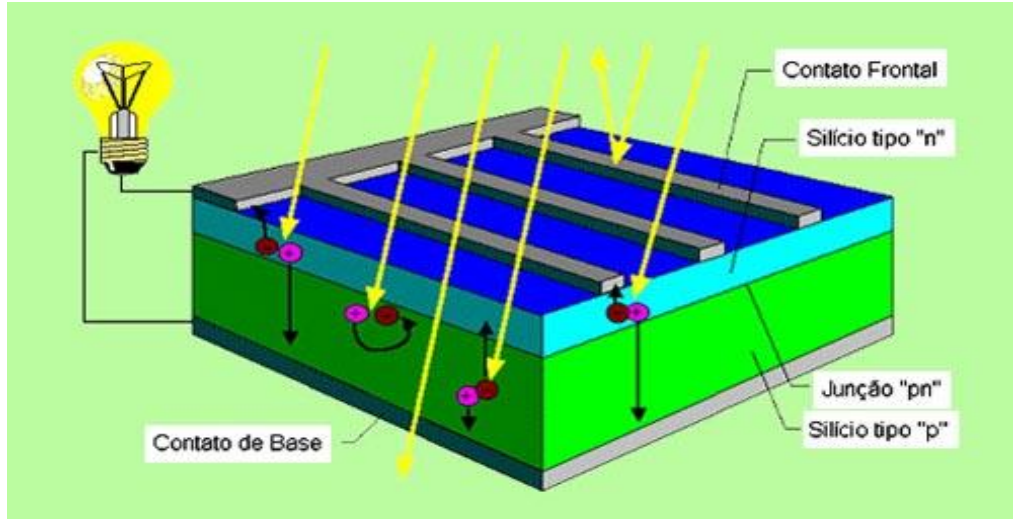


Figura 5 – Esquema da seção reta de uma célula solar convencional de silício.
Fonte: CRESESB, 1999.

2.3.3 Estrutura de uma célula solar

Ao contrário da maioria dos outros semicondutores, o dispositivo fotovoltaico não usa a estrutura normal do silício, como nos diodos, ao invés disso usa uma fina camada de óxido transparente. Estes óxidos são altamente transparentes e tem alta condutividade elétrica. Camadas contra o reflexo podem ser usadas para cobrir uma célula fotovoltaica (NASCIMENTO, 2004).

Os cristais poli cristalinos são grãos minúsculos de material semicondutor. As propriedades dos filmes poli cristalinos são diferentes do silício normal. Ele provou ser melhor para criar um campo elétrico entre dois materiais semicondutores diferentes. A Figura 6 mostra bem a estrutura de uma célula.

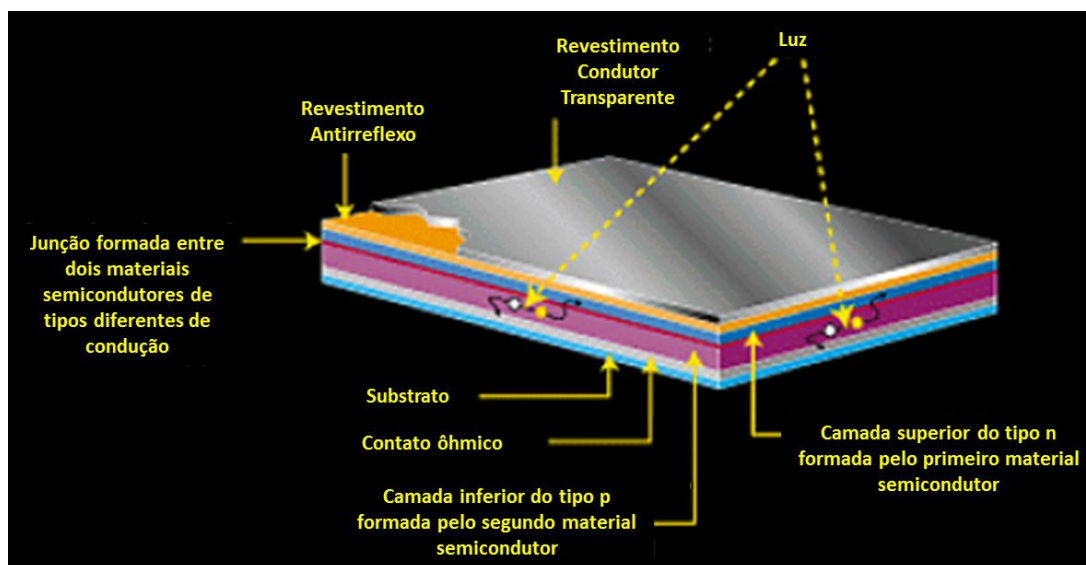


Figura 6 – Esquema da seção reta da estrutura de uma célula solar.
 Fonte: Adaptado de NASCIMENTO, 2004.

2.3.4 Tipos de célula solar

Basicamente, existem três tipos diferentes de células solares, que são divididas da seguinte forma, segundo NASCIMENTO (2004):

- **Células monocristalinas:** representam a primeira geração. O seu rendimento elétrico é relativamente elevado (acima de 12%, podendo subir até cerca de 23% em laboratório), mas as técnicas utilizadas na sua produção são complexas e caras. Por outro lado, é necessária uma grande quantidade de energia na sua fabricação, devido à exigência de utilizar materiais em estado muito puro e com uma estrutura de cristal perfeita. No caso do silício as células são obtidas a partir de barras cilíndricas de silício monocristalino produzidas em fornos especiais. As células são obtidas por cortes das barras em forma de pastilhas finas (0,4 – 0,5 mm de espessura). A Figura 7 mostra uma célula de silício monocristalina.

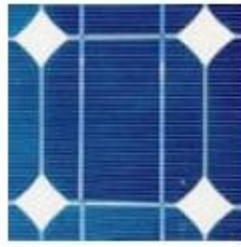


Figura 7 – Estrutura de uma célula de silício monocristalina.
Fonte: NASCIMENTO, 2004.

- **Células policristalinas:** têm um custo de produção inferior por necessitarem de menos energia no seu fabrico, mas apresentam um rendimento elétrico inferior (entre 11% e 13%, obtendo-se até 18% em laboratório). Esta redução de rendimento é causada pela imperfeição do cristal, devido ao sistema de fabricação. Para o silício elas são obtidas a partir de blocos de silício, oriundos da fusão de silício puro em moldes especiais. Uma vez nos moldes, o silício esfria lentamente e solidifica-se. Neste processo, os átomos não se organizam num único cristal. Forma-se uma estrutura policristalina com superfícies de separação entre os cristais. A Figura 8 ilustra este tipo de célula.

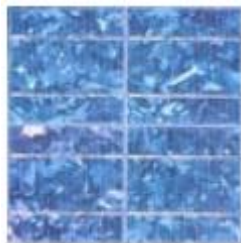


Figura 8 – Estrutura de uma célula de silício policristalina.
Fonte: NASCIMENTO, 2004.

- **Células de silício amorfo:** são as que apresentam o custo mais reduzido, mas em contrapartida o seu rendimento elétrico é também o mais reduzido (aproximadamente 5% a 8%, ou 13% em laboratório). As células de silício amorfo são películas muito finas, o que permite serem utilizadas como material de construção, tirando ainda o proveito energético. No silício elas são obtidas por meio

da deposição de camadas finas de silício sobre superfícies de vidro ou metal. A Figura 9 apresenta a estrutura da célula de silício amorfo.

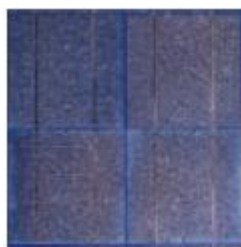


Figura 9 – Estrutura de uma célula de silício amorfo.
Fonte: NASCIMENTO, 2004.

- **Tecnologia das películas finas:** dentre as aplicações de células de silício amorfo, podemos encontrar uma tecnologia fotovoltaica em filmes finos, como é o caso do Silício Amorfo Hidrogenado ($a\text{-Si}^3$).

A melhor aplicação para essa tecnologia está em calculadoras, relógios e outros produtos onde o consumo de energia é baixo. Tais células são eficientes sob a iluminação artificial (principalmente sob as lâmpadas fluorescentes). Estes filmes finos são depositados sobre substratos de baixo custo, como vidro, aço, inox e alguns plásticos.

Foram desenvolvidos painéis solares, disponíveis no mercado que são flexíveis, inquebráveis, mais leves, semitransparentes, com superfícies curvas, que estão ampliando o mercado fotovoltaico por sua maior versatilidade. Por sua aparência estética mais atraente, o $a\text{-Si}$ tem encontrado aplicações arquitetônicas diversas, substituindo materiais de cobertura de telhados e fachadas na construção civil.

O recorde de eficiência em células de $a\text{-Si}$ individuais disponível no mercado está na faixa de 8-9%. Em algumas aplicações arquitetônicas como material de revestimento é que o $a\text{-Si}$ leva grande vantagem sobre as células convencionais de silício, pois o custo por metro quadrado, e não o custo por Wp (Watt-pico), é a grandeza de interesse e neste aspecto, hoje o $a\text{-Si}$ tem custo inferior à metade do custo da tecnologia convencional do silício.

O mais recente competidor no mercado fotovoltaico para geração de energia elétrica é o CdTe_4 , também na forma de filmes finos. Outro competidor do mercado no

futuro próximo são os compostos baseados no disseleneto de Cobre e Índio (CIS5), principalmente por seu potencial atingir eficiência relativamente elevada. Pequenas áreas produzidas em laboratório apresentam no momento eficiência em torno de 18%.

2.4 A tecnologia *Light Emitting Diodes* (LEDs)

Um novo conceito em iluminação vem se mostrando uma forma que progressivamente está ganhando seu espaço no mercado. Trata-se do uso de diodos emissores de luz, ou LEDs (*light emitting diodes*), em sistemas de iluminação domésticos, comerciais, industriais e locais públicos (RIBEIRO, ROSA, CORREA E SILVA, 2012).

Os materiais semicondutores apresentam-se com uma recente alternativa para emitir luz. A geração de luz nesses materiais acontece através da recombinação de elétrons e lacunas em excesso que são produzidos por injeção decorrente com pequenas perdas de energia.

Segundo SCHUBERT (2003), esse fenômeno é conhecido como eletroluminescência sendo à base de funcionamento de todos os LEDs. Os atuais LEDs geralmente emitem baixos níveis de radiação infravermelha ou ultravioleta. Durante várias décadas os LEDs foram empregados com a única função de indicar o estado de funcionamento de produtos eletrônicos. Mais recentemente, também foram usados como elementos sinalizadores (lâmpadas de emergência, semáforos e etc.). No entanto, para iluminação de ambientes internos e externos o seu emprego é muito recente.

Pelo fato dos LEDs serem dispositivos de estado sólido, um dos grandes benefícios que possivelmente virá com a sua utilização em larga escala para iluminação em geral é a diminuição do consumo de energia. De acordo com TSAO, cerca de 50% da energia consumida com iluminação poderia ser poupada, com a utilização de dispositivos de estado sólido em todo o mundo. Isso representaria um decréscimo de mais de 10% no consumo total de energia.

Analisando pelo lado ambiental, além da redução do consumo de energia elétrica podemos citar também a diminuição da emissão de poluentes na atmosfera, visto que as lâmpadas com LEDs não utilizam elementos químicos pesados ao contrário de algumas

lâmpadas de descarga que usam, por exemplo, o mercúrio (RIBEIRO, ROSA, CORREA e SILVA, 2012).

2.4.1 Princípio de funcionamento do LED e seus componentes

De acordo com RIBEIRO, ROSA, CORREA e SILVA (2012), o princípio de funcionamento do LED está baseado no efeito da passagem de uma corrente elétrica através de uma junção PN com uma camada ativa. A interação dos elétrons ao atravessarem a camada de valência, pela imposição de uma diferença de potencial, libera fótons criando um feixe luminoso. Este efeito pode ser adaptado para emitir sob a forma de luz branca. Algumas das características mais importantes das fontes luminosas que recorrem à tecnologia semicondutora são: a elevada eficiência e a elevada longevidade.

Segundo GIANELLI *et. al.* (2009), a qualidade e a eficiência energética são alguns dos pontos centrais de pesquisa e melhoramento de muitas concessionárias de energia elétrica, sendo que o emprego da tecnologia LED, principalmente no que diz respeito à iluminação pública, pode vir a contribuir significativamente na melhoria desses resultados.

Conforme a literatura de ZUKAUSKAS, SHUR e GASKA (2002), os componentes básicos de uma lâmpada LED são: lente plástica protetora; eletrodo, fio de ouro e conexão; dissipador de calor; silicone para proteção contra descargas eletrostáticas e o chip LED (Figura 10).

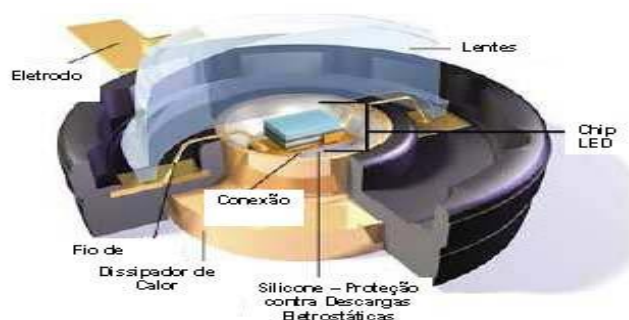


Figura 10 – Componentes básicos de um LED.

Fonte: HANSELER, 2007.

Segundo SCHUBERT (2003), embora o emprego da tecnologia LED ainda possua alguns desafios a serem vencidos, principalmente no que diz respeito ao seu alto custo inicial e na regulamentação de sua fabricação, a mesma apresenta grandes vantagens, tais como a qualidade na emissão de sua luz e a sua alta eficiência energética.

3 ESTUDO DE CASO

3.1 Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

A Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG – UNESP) será o objeto de estudo desse trabalho. Fundada em quatro de dezembro de 1964, porém com início de suas atividades apenas em 1966 com o curso de Engenharia Mecânica, devido a impasses criados pelo Conselho Estadual de Educação. Atualmente a FEG conta com cinco cursos de graduação, Engenharia Mecânica, Engenharia de Produção, Engenharia de Materiais, Engenharia Elétrica e Engenharia Civil, além dos cursos de bacharelado e licenciatura em Matemática e Física. A Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá está situada na Avenida Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, município de Guaratinguetá, conforme podemos ver na Figura 11.



Figura 11 – Campus da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (Fonte: FEG - UNESP).

O campus da FEG possui vias asfaltadas para o trânsito de veículos onde a iluminação é feita por postes que utilizam lâmpadas de vapor de sódio com potência de 250 W, distribuídos uniformemente pela sua extensão. Atualmente toda a alimentação desses postes é feita através da rede de energia elétrica em 220V por um sistema bifásico.

3.2 Dimensionamento do sistema com painel fotovoltaico

Para a alimentação de energia elétrica da luminária com lâmpadas de LED será feito um dimensionamento adaptado do “Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos”, desenvolvido pelo CRESESB (1999), de um sistema fotovoltaico com os itens ilustrados na Figura 12, porém na parte onde consta “eletrodomésticos” usaremos apenas as lâmpadas de LED. Também serão usados conceitos de luminotécnica e fotometria, encontrados no livro de CREDER (2007).

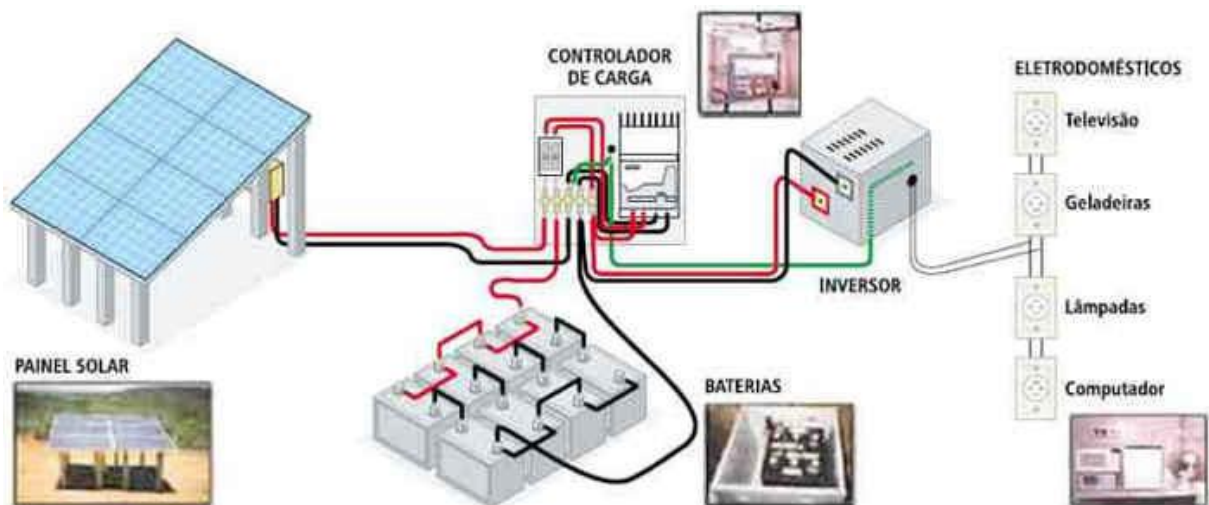


Figura 12 – Exemplo de sistema fotovoltaico.

Fonte: CRESESB, 1999.

3.2.1 Levantamento da radiação solar

Para o cálculo da radiação solar diária média mensal utilizamos o programa *Sundata* disponível no site do CRESESB. Esse programa fornece através das coordenadas geográficas do local em análise um valor para radiação diária média em kWh/m².dia. A cidade de Guaratinguetá está localizada na latitude 22° 48' 57" S e longitude 45° 11' 34", porém o programa não fornece os dados para essas coordenadas, mas sim para a cidade de Lorena que fica a aproximadamente 12 km de distância, como podemos ver na Figura 13. Com isso, para um melhor aproveitamento adotaremos um ângulo de instalação dos painéis igual ao da latitude de 23° e virados para o Norte, onde a radiação solar média é de 4,54 kWh/m².dia. Nesse caso, o número de horas de Sol Pleno é de 4,54 h/dia.

Município: Lorena - SP
 Latitude: 22.730833° Sul
 Longitude: 45.124722° Oeste
 Distância: 11,8 km

#	Ângulo	Inclinação	Radiação diária média mensal [kWh/m ² .dia]													
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	5,35	5,23	4,65	4,07	3,49	3,02	3,49	3,95	3,95	4,65	5,35	5,12	4,36	2,33
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	23° N	4,85	4,99	4,77	4,57	4,28	3,84	4,42	4,62	4,16	4,54	4,91	4,59	4,54	1,15
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	20° N	4,94	5,05	4,78	4,54	4,20	3,76	4,33	4,56	4,16	4,58	5,00	4,69	4,55	1,29
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	35° N	4,40	4,65	4,61	4,62	4,48	4,09	4,69	4,75	4,09	4,28	4,48	4,15	4,44	,66

Marque as caixas de seleção para atualizar a visualização das curvas de radiação no gráfico.

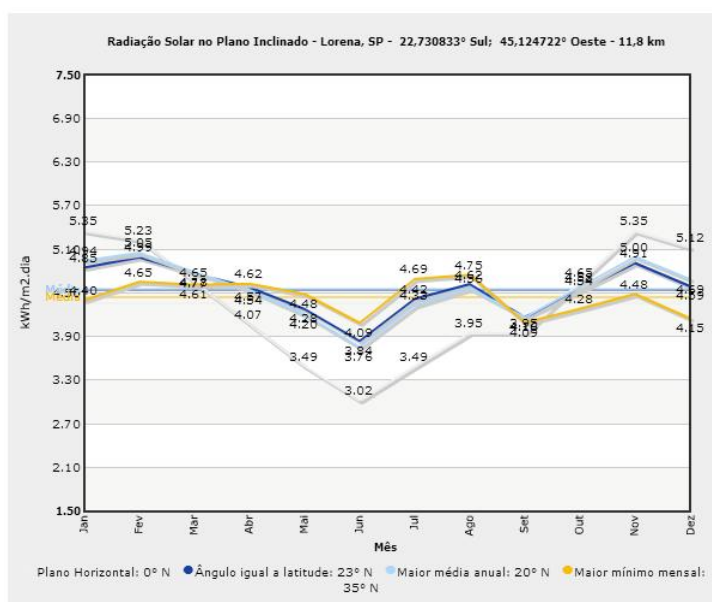


Figura 13 – Radiação solar diária média (Fonte: CRESESB – Sundata).

3.2.2 Dimensionamento da lâmpada de LED

3.2.2.1 Critérios e normas de iluminação pública

Antes de selecionarmos a lâmpada de LED, primeiro precisamos atender algumas normas de iluminação pública. Para isso nos basearemos na norma brasileira ABNT NBR 5101 com sua última atualização de 2012, que estabelece uma classificação para os diversos tipos de vias, bem como uma classificação para o volume de tráfego de veículos e pedestres nestas vias, e os respectivos critérios de iluminância conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Valores mínimos para os níveis médios de iluminância.

Tipo de via	Classificação do tráfego		E med.min. (lux)	U min.
	Veículo	Pedestre		
Trânsito rápido	Qualquer		20	0,50
Arterial				0,30
Coletora	Leve	Leve	2	0,20
		Médio	5	
		Intenso	10	
	Médio	Leve	5	
		Médio	10	
		Intenso	14	
Local	Leve	Leve	2	0,20
		Médio	5	
		Intenso	10	
	Médio	Leve	5	
		Médio	10	
		Intenso	14	
	Intenso	Leve	10	
		Médio	14	
		Intenso	17	
Irregular	Leve	Leve	2	Não fixado

Fonte: NBR 5101, 2012.

Com o auxílio da Tabela 2 adaptada da NBR 5101 e através de observações feitas dentro do campus da FEG, podemos dizer que se trata de vias locais com tráfego leve de veículos e médio de pedestres. Sendo assim, a iluminação deverá ter um fluxo luminoso médio mínimo ($E_{med.min.}$) de 5 lux.

Para efeitos de cálculo e projeto iremos considerar apenas as vias de tráfego compreendidas entre o trecho da entrada da Guarita II até um pouco depois do Bloco de Matemática e Física, conforme podemos ver no esquema da Figura 14.

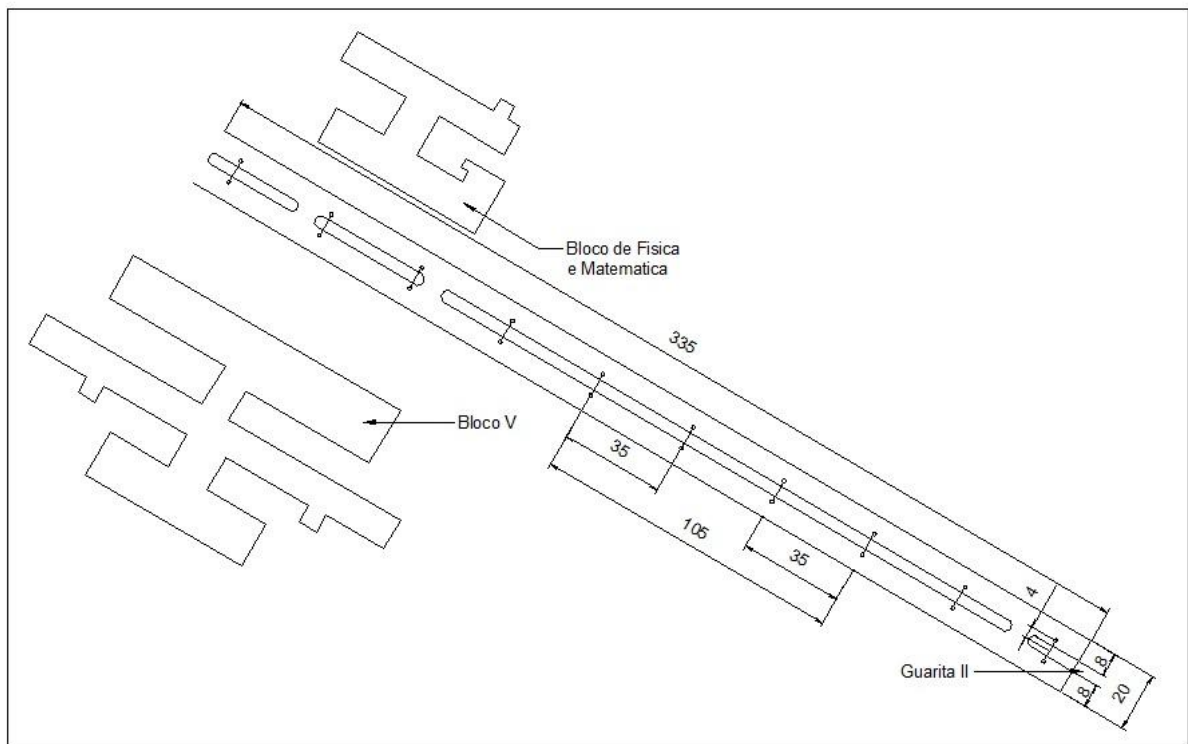


Figura 14 – Vista superior do trecho onde serão substituídas as luminárias.

Fonte: Adaptado de <http://ftp.feg.unesp.br>, ago. 2013.

A Figura 14 foi adaptada de uma planta planialtimétrica de todo o campus da FEG e mostra o esquema de como ficará a nova distribuição dos postes dentro do trecho analisado. Sendo assim, temos:

- Largura das vias de tráfego = 8 m
- Largura do canteiro central = 4 m

- Comprimento total do trecho analisado = 335 m
- Distância entre os postes = 35 m
- Distância entre o ponto de instalação do poste e o centro da luminária = 4 m

De posse desses dados, utilizaremos a Equação (1) para calcular qual será o fluxo luminoso mínimo em lumens (lm) que a lâmpada deverá atender.

$$\Phi = \frac{S.E}{Fu.Fd} \rightarrow \frac{(8.17,5).5}{0,75.0,75} \rightarrow \Phi = 1244,44 \text{ lm} \quad (1)$$

Onde:

Φ = fluxo luminoso necessário em lm.

S = área a ser iluminada em m².

E = Iluminamento requerido em lux.

Fu = fator de utilização

Fd = fator de depreciação

Para selecionarmos os fatores de utilização e depreciação será utilizada a Tabela 3 (adaptada de CREDER, 2007). Sabendo que mais de 50% do fluxo cai sobre a área a iluminar e as luminárias são fechadas, então teremos tanto o fator de utilização (Fu) como o fator de depreciação (Fd) igual a 0,75.

Tabela 3 – Fator de utilização (Fu) e fator de depreciação (Fd)

Fatores de utilização e depreciação		
Fu	Todo fluxo cai sobre a área a iluminar	1
	Mais de 50% do fluxo cai sobre a área a iluminar	0,75
	De 25% a 50% do fluxo cai sobre a área a iluminar	0,60
	Menos de 25% do fluxo cai sobre a área a iluminar	0,40
Fd	Para refletores/luminárias abertos	0,65
	Para refletores/luminárias fechados	0,75

Fonte: CREDER, 2007.

3.2.2.2 Seleção da lâmpada de LED

Através do cálculo feito no item anterior do fluxo luminoso mínimo, iremos primeiramente selecionar a lâmpada de LED que irá compor o sistema, pois para dimensionarmos os outros componentes do sistema fotovoltaico precisaremos conhecer a potência consumida pela lâmpada. Para isso será utilizada a Tabela 4 adaptada daquela que foi fornecida no site do fabricante OSRAM.

Tabela 4 – Catálogo adaptado de luminárias de LED.

Característica	Parâmetro	HP MSL - 4	HP MSL - 6	HP MSL - 7	HP MSL - 8
Iluminação	Fluxo Lum. Nominal	6000 lm	9000 lm	10500 lm	12000 lm
	Fluxo Lum. Máximo	6800 lm	10200 lm	11900 lm	13600 lm
	Potência Nominal	89 W	133 W	156 W	177 W
	Eficiência	67-76 lm/W	68-77 lm/W	67-76 lm/W	68-77 lm/W
	Eficiência média	72 lm/W	73 lm/W	72 lm/W	73 lm/W
	Temperatura da cor	5700K - 6500K	5700K - 6500K	5700K - 6500K	5700K - 6500K
	IRC	~ 70			
Vida útil (Tamb = 25°C)	> 50.000 horas				
Elétrica	Tensão de Entrada	100-240 VCA +/- 10% 50/60Hz			
	Corrente Máxima	10 ^a			
	Fator de Potência	> 0,90			

Fonte: OSRAM, ago. 2013.

Foi escolhida a lâmpada de LED modelo HP MSL – 4 com fluxo luminoso nominal de 6000 lm e potência nominal de 89 W. Sendo assim, podemos calcular o consumo médio diário (CMD) dessa lâmpada através da Equação (2), sabendo que ela terá uma utilização diária de 12 horas (das 18h00min as 06h00min).

$$\text{CMD} = (P_{\text{nom}}/U).12 \rightarrow (89/127).12 \rightarrow 8,41\text{Ah/dia} \quad (2)$$

Onde:

CMD = consumo médio diário (Ah/dia)

P_{nom} = potência nominal da lâmpada (W)

U = tensão de alimentação (V)

Já a potência total consumida por dia (PT) será dada pela Equação (3):

$$\text{PT} = P_{\text{nom}}.12 \rightarrow 89.12 \rightarrow \text{PT} = 1068 \text{ Wh/dia} \quad (3)$$

Onde:

PT = potência total consumida em Wh/dia.

Porém, para o dimensionamento da bateria devemos levar em consideração dois dias sem sol, ou seja, o número de dias em que se prevê a diminuição ou a não geração de energia pelos painéis fotovoltaicos. Com isso, o consumo médio diário (CMD) será multiplicado por dois, resultando em 16,82 Ah/dia. Como também temos perdas no processo e a eficiência da bateria não é de 100%, utilizaremos um fator de segurança de 1,2. Então o consumo total médio diário (CTMD) fica igual a 20,18 Ah/dia.

3.2.3 Dimensionamento do módulo solar

De posse dos dados elétricos da lâmpada de LED o próximo passo será dimensionar os painéis fotovoltaicos. Como existem diversos fabricantes e modelos disponíveis no mercado, utilizaremos a Tabela 5 adaptada do fornecedor Kyocera, para escolher qual módulo atenderá melhor as necessidades do sistema.

Tabela 5 – Catálogo adaptado de painel fotovoltaico.

Modelos	KD 245 GH-4FB	KD 140 SX-UFBS	KD 135 SX-UFBS	KS 90 T
Máxima potência	245 W	140 W	135 W	90 W
Tensão de máxima potência	29,8 V	17,7 V	17,7 V	17,8 V
Corrente de máxima potência	8,23 A	7,91 A	7,63 A	5,10 A
Corrente de curto circuito	8,91 A	8,68 A	8,37 A	5,60 A

Fonte: KYOCERA, ago. 2013.

Devido a limitações de espaço e peso nos postes onde serão instalados os módulos solares, e como deveremos ter apenas um painel, escolheremos o modelo KD 135 SX-UFBS de 135 W que gera 7,63 A de corrente a máxima potência (I_{mp}).

A capacidade do módulo é dada pela Equação (4):

$$Cap_{mod} = N_h \cdot I_{mp} \rightarrow 4,54 \cdot 7,63 \rightarrow Cap_{mod} = 34,64 \text{ Ah/dia} \quad (4)$$

Onde:

Cap_{mod} = capacidade do modulo (Ah/dia)

Nh = número de horas de Sol Pleno (h/dia)

I_{mp} = corrente a máxima potência (A)

Poderíamos ter utilizado o módulo KS 90T que forneceria 23,15 Ah/dia. No entanto, pensando na segurança, nos dias nublados e chuvosos sem sol e também na redução da eficiência do painel por tempo de uso, usaremos o módulo KD 135 SX-UFBS.

3.2.4 Dimensionamento da bateria

A bateria tem a função de armazenar energia, pois em horas matutinas os módulos começam a gerar, mas se a corrente que fornecerem for menor que aquela que a luminária exige, a bateria da Figura 15 deverá contribuir. No caso em questão, o sistema permanecerá desligado durante o dia e toda energia gerada será direcionada para recarregar as baterias. Lembrando que temos limitações de espaço e peso nos postes, usaremos apenas uma bateria.



Figura 15 – Exemplo de bateria (fonte: Freedom)

Utilizando os dados do catálogo do fornecedor de bateria, é possível calcular a capacidade mínima da bateria com a Equação (5):

$$\text{Bateria}_{\text{cap}} = \text{CTMD}.6,25 \rightarrow 20,18.6,25 \rightarrow \text{Bateria}_{\text{cap}} = 126,16 \text{ Ah} \quad (5)$$

Onde:

$\text{Bateria}_{\text{cap}}$ = capacidade mínima da bateria (Ah)

Assim, através do Manual Técnico do fabricante Freedom, escolhemos a bateria estacionária modelo DF2500 com capacidade nominal (C10) de 130 Ah e (C20) de 150 Ah.

3.2.5 Dimensionamento do controlador de carga

O controlador de carga da Figura 16 tem a função de controlar a utilização da energia gerada e permitir que a bateria funcione bem, sem desgastes desnecessários e com a mínima redução de sua vida útil.



Figura 16 – Exemplo de controlador de carga
Fonte: KYOCERA, ago. 2013.

O controlador de cargas será dimensionado de acordo com a corrente que será conduzida do painel para a bateria. Primeiramente calcula-se a corrente a máxima potência com fator de segurança ($\text{Imp}_{\text{fator}}$) multiplicando-se a corrente Imp (7,63 A) encontrada no catálogo do painel (Tabela 5) pelo fator de segurança 1,1 que resulta em 8,4 A. Após isso, calcula-se através da Equação (6) a corrente de curto circuito do módulo solar (I_{sc}).

$$I_{\text{sc}} = \text{Imp}_{\text{fator}}.1,3 \rightarrow 8,4.1,3 \rightarrow I_{\text{sc}} = 10,92 \text{ A} \quad (6)$$

Onde:

$\text{Imp}_{\text{fator}}$ = corrente a máxima potência com fator de segurança (A)

I_{sc} = corrente de curto circuito do módulo solar (A)

Com base na Tabela 6, o controlador de carga selecionado é o modelo CCD1215 com corrente máxima de 15A e potência de 180 W.

Tabela 6 – Exemplo de fabricante de controladores de carga.

Controladores de carga e descarga inteligentes				
Código	Modelo	Corrente máxima	Potência	Tensão de trabalho
91101	CCD1205	5 A	60 W	12 V
91102	CCD1210	10 A	120 W	12 V
91105	CCD1215	15 A	180 W	12 V
91106	CCD1220	20 A	240 W	12 V
91110	SR30	30 A	450 W	12 OU 24 V
91111	PPC 1250	50 A	600 W	12 V
91112	PPC 4830	30 A	1440 W	48 V

Fonte: KOYAMA, 2011.

Para calcular a potência de surto do controlador ($CT_{potsurto}$), multiplica-se a potência do controlador por dois o que resulta em 360 W.

3.2.6 Dimensionamento do Inversor

Para que seja possível alimentar as lâmpadas em corrente alternada (CA), faz necessário o uso de um inversor como o da Figura 17.



Figura 17 – Exemplo de inversor.

Fonte: KYOCERA, ago. 2013.

De acordo com a Equação (3), sabemos que a potência total (PT) é de 1068 W por dia. Sendo assim, o cálculo da potência de surto do inversor é dado pela Equação (7):

$$Inv_{surto} = PT.2 \rightarrow 1068.2 \rightarrow Inv_{surto} = 2136 \text{ W} \quad (7)$$

Portanto, é escolhido um inversor que tenha a potência maior do que a potência de surto, mas isso depende dos tipos de inversores fornecidos pelo fabricante, como por exemplo, a Tabela 7 que mostra os dados nominais de alguns modelos de inversores. Sendo assim, inversor escolhido é o modelo XPower Inverter 3000 com potência máxima de 2500W.

Tabela 7 – Exemplo de fornecedor de inversor.

Inversores Senóide Modificada Xpower – Xantrex			
Modelo	Descrição Entrada X Saída	Eficiência	Potência máxima de trabalho
Inverter 1000	Entrada (IN) = 12 VDC	90%	1000 W
Inverter 1500			1500 W
Inverter 3000	Saída (OUT) = 115 VAC		2500 W
Inverter 5000			4000 W

Fonte: XANTREX, ago. 2013.

4 ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

4.1 Custos dos itens do sistema dimensionado

Para calcularmos a viabilidade econômica do projeto, foi feito um levantamento do custo de cada equipamento dimensionado para o sistema no item anterior, através dos custos informados nos sites dos fornecedores e orçamentos solicitados por e-mail.

4.1.1 Custo do painel fotovoltaico

Através dos modelos de painéis fotovoltaicos apresentados na Tabela 5, elaboramos a Tabela 8 com os seus respectivos custos.

Tabela 8 – Custo dos painéis fotovoltaicos.

Modelos	KD 245 GH-4FB	KD 140 SX-UFBS	KD 135 SX-UFBS	KS 90 T
Custo unitário (R\$)	1.350,00	890,00	820,00	610,00

Levando em consideração os preços apresentados na Tabela 8 e também através das informações encontradas nos sites dos fornecedores, podemos concluir que o custo médio é de aproximadamente R\$ 6,00/W.

4.1.2 Custo da bateria

Na Tabela 9 encontramos os custos unitários das baterias do fabricante Freedom, identificadas pela sua respectiva capacidade C20.

Tabela 9 – Custo unitário das baterias.

Modelos	Custo Unitário (R\$)
Bateria Freedom 45 Ah	269,00
Bateria Freedom 60 Ah	310,00
Bateria Freedom 105 Ah	499,00
Bateria Freedom 150 Ah	719,00
Bateria Freedom 170 Ah	789,00

4.1.3 Custo do controlador de carga

A Tabela 10 apresenta os valores dos controladores de carga do fabricante Morningstar para os diferentes modelos.

Tabela 10 – Custo unitário dos controladores de carga.

Modelos	Custo Unitário (R\$)
Morningstar 10A	225,00
Morningstar 15A	275,00
Morningstar 20A	310,00
Morningstar 30A	515,00

4.1.4 Custo do inversor

Através dos inversores mostrados na Tabela 7, elaboramos a Tabela 11 com os seus respectivos custos de aquisição.

Tabela 11 – Custo dos inversores.

Modelos	Custo Unitário (R\$)
Inverter 1000	850,00
Inverter 1500	1299,00
Inverter 3000	2550,00
Inverter 5000	3499,00

4.1.5 Custo da lâmpada de LED

Com as informações apresentadas na Tabela 4 referentes aos modelos de lâmpadas LED, montamos a Tabela 12 com os seus respectivos custos de aquisição.

Tabela 12 – Custos das lâmpadas de LED.

Modelos	HP MSL – 4	HP MSL - 6	HP MSL - 7	HP MSL - 8
Custo unitário (R\$)	1435,00	1796,00	2683,00	3387,00

4.2 Custo total do sistema dimensionado

4.2.1 Cenário A

De posse dos valores de cada componente que irá compor o sistema de geração de energia elétrica para as lâmpadas de LED através da energia solar, montamos o cenário A com 18 unidades de cada componente e calculamos qual será o custo total de instalação de um poste, conforme podemos ver na Tabela 13. Além disso, essa tabela também mostra o custo total para a instalação de dois postes em cada um dos nove pontos com distância de 35m entre eles (Figura 15), somando um total de 18 postes ao longo do trecho analisado.

Tabela 13 – Custo total do sistema dimensionado para o cenário A.

Componente	Modelo	Custo unitário (R\$)	Custo para 18 postes (R\$)
Painel Fotovoltaico	KD 135 SX-UFBS	820,00	14.760,00
Bateria	Freedom 150 Ah	719,00	12.942,00
Controlador de Carga	Morningstar 15 A	275,00	4.950,00
Inversor	Inverter 3000	2.550,00	45.900,00
Lâmpada de LED	HP MSL – 4	1.435,00	25.830,00
Total		5.799,00	104.382,00

É importante salientar que o sistema dimensionado, para todos os cenários, não está levando em consideração os custos com a estrutura metálica que comportará os equipamentos e também os custos com cabos e fios que conectarão os componentes do conjunto.

Na Figura 18 podemos ver, para o cenário A, o valor percentual de cada componente em relação ao sistema completo. O inversor é o que apresenta o maior custo e vem seguido pela lâmpada de LED e depois pelo painel fotovoltaico.

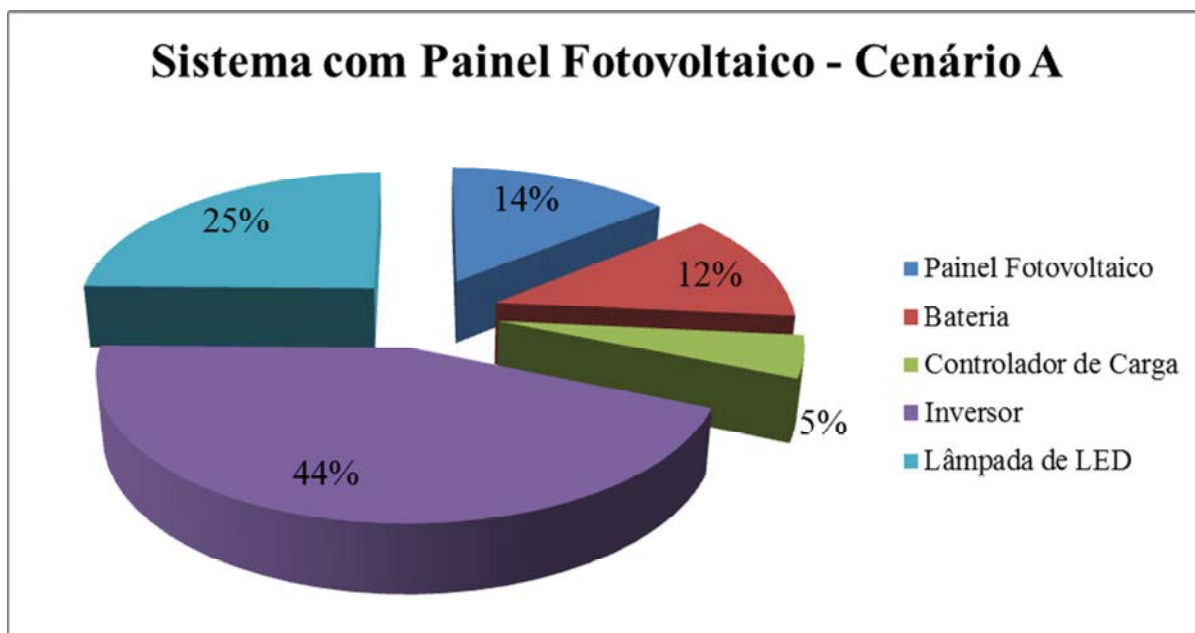


Figura 18 – Gráfico percentual dos custos dos itens do sistema fotovoltaico para o cenário A.

4.2.2 Cenário B

Para o cenário B consideraremos os mesmos 18 postes, porém utilizaremos apenas nove inversores, sendo que cada um deles irá suportar dois postes. Dessa maneira, podemos ver na Tabela 14 o custo para cada dois postes e também o custo total para os 18 postes.

Tabela 14 – Custo total do sistema dimensionado para o cenário B.

Componente	Modelo	Custo para dois postes (R\$)	Custo para 18 postes (R\$)
Painel Fotovoltaico	KD 135 SX-UFBS	1.640,00	14.760,00
Bateria	Freedom 150 Ah	1.438,00	12.942,00
Controlador de Carga	Morningstar 15A	550,00	4.950,00
Inversor	Inverter 3000	2.550,00	22.950,00
Lâmpada de LED	HP MSL - 4	2.870,00	25.830,00
Total		9.048,00	81.432,00

Na Figura 19 podemos ver, para o cenário B, o valor percentual dos componentes em relação ao sistema completo. Sendo assim, as lâmpadas de LED são as que apresentam o maior custo, seguidas pelos inversores e depois pelos painéis fotovoltaicos.

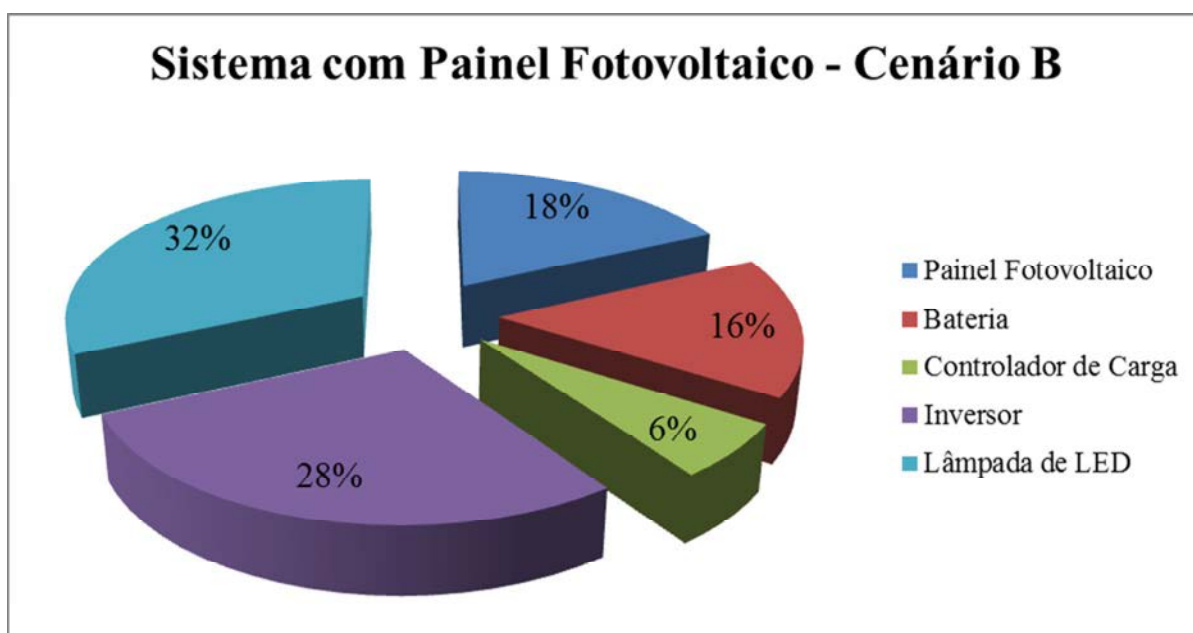


Figura 19 – Gráfico percentual dos custos dos itens do sistema fotovoltaico para o cenário B.

4.2.3 Cenário C

Para o cenário C, continuaremos considerando os 18 postes, mas dessa vez utilizaremos um sistema modular, onde haverá uma estação fechada para armazenar o banco de baterias, os controladores de carga, os inversores e os painéis fotovoltaicos, que ficarão dispostos sobre a estação. Com base no catálogo de especificações do fabricante de inversores Xantrex, observou-se que a máxima corrente de saída, para o modelo XPower Inverter 3000, é de 21 Ah em corrente alternada (CA). Da Equação (2), vimos que cada lâmpada de LED consome 0,7 Ah e que o sistema dimensionado com 18 lâmpadas consumirá 12,6 Ah, carga essa que será suportada por apenas um inversor. Portanto, podemos ver na Tabela 15 o custo total para os 18 postes, levando em consideração apenas dois inversores, sendo um ativo e um reserva.

Tabela 15 – Custo total do sistema dimensionado para o cenário C.

Componente	Modelo	Custo para 18 postes (R\$)
Painel Fotovoltaico	KD 135 SX-UFBS	14.760,00
Bateria	Freedom 150 Ah	12.942,00
Controlador de Carga	Morningstar 15A	4.950,00
Inversor	Inverter 3000	5.100,00
Lâmpada de LED	HP MSL - 4	25.830,00
Total		63.582,00

Na Figura 20 podemos ver, para o cenário C, o valor percentual dos componentes em relação ao sistema completo. Portanto, as lâmpadas de LED são as que apresentam o maior custo, seguidas pelos painéis fotovoltaicos, baterias e os inversores se tornaram os componentes com o menor custo junto com os controladores de carga.

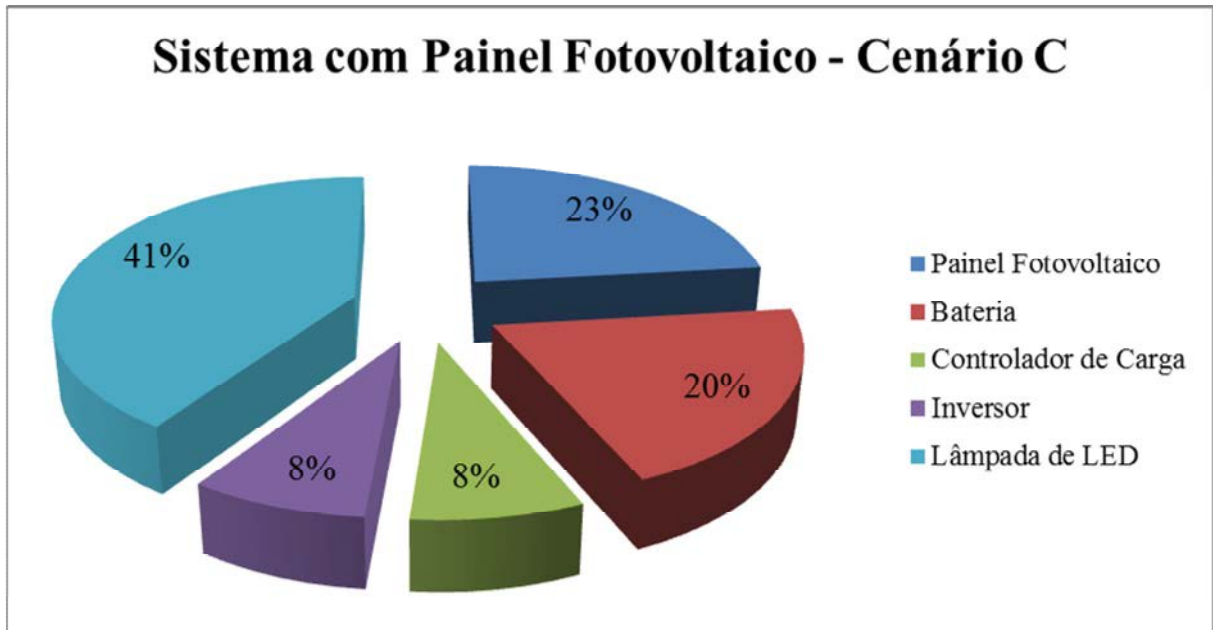


Figura 20 – Gráfico percentual dos custos dos itens do sistema fotovoltaico para o cenário C.

4.3 Payback dos equipamentos dimensionados

O cálculo do *payback* tem a finalidade de saber quantos meses ou anos serão necessários para recuperar o investimento realizado em todo o sistema que foi dimensionado. Para isso, consideraremos apenas os gastos com energia elétrica que a FEG tem atualmente utilizando lâmpadas de vapor de sódio de 250 W, levando em conta os 14 postes duplos instalados no trecho que está sendo analisado, somando um total de 28 lâmpadas. Sendo assim, a Equação (8) mostra o consumo total mensal dessas lâmpadas, tendo em vista que elas funcionam 12 horas por dia.

$$PT_{\text{lamp}} = P_{\text{nl}} \cdot n \cdot p \cdot m \rightarrow PT_{\text{lamp}} = 250 \cdot 28 \cdot 12 \cdot 30 \rightarrow PT_{\text{lamp}} = 2,52 \text{ MWh/mês} \quad (8)$$

Onde:

PT_{lamp} = potência total consumida pelas 28 lâmpadas (MWh/mês)

n = número de lâmpadas

p = quantidade de horas em que a lâmpada fica ligada diariamente (h)

m = quantidade de dias em um mês

Sabendo que para as luminárias atualmente utilizadas no campus da FEG a energia elétrica é fornecida pela distribuidora EDP Bandeirantes sob a tarifação do grupo B, subgrupo B4a, tem-se que o valor cobrado é de 191,42 R\$/MWh. A Equação (9) mostra o cálculo do gasto total mensal com energia elétrica para manter essas lâmpadas ligadas:

$$GE = PT_{lamp} \cdot VC \rightarrow GE = 2,52 \cdot 191,42 \rightarrow GE = 482,38 \text{ R\$/mês} \quad (9)$$

Onde:

GE = gasto total mensal (R\$/mês)

VC = valor cobrado pela energia elétrica (R\$/MWh)

4.3.1 *Payback* do cenário A

De posse dos dados obtidos no item anterior, agora podemos calcular o nosso tempo de *payback* para o cenário A, através da Equação (10):

$$PB = CE/GE \rightarrow PB = 104382 / 482,38 \rightarrow PB = 217 \text{ meses ou } 18,1 \text{ anos} \quad (10)$$

Onde:

PB = tempo de *payback* (meses ou anos)

CE = custo inicial com os equipamentos (R\$)

4.3.2 *Payback* do cenário B

Para o cenário B, calculamos o *payback* através da Equação (11):

$$PB = CE/GE \rightarrow PB = 81432 / 482,38 \rightarrow PB = 169 \text{ meses ou } 14,1 \text{ anos} \quad (11)$$

4.3.3 *Payback* do cenário C

Para o cenário C, calculamos o *payback* através da Equação (12):

$$PB = CE/GE \rightarrow PB = 63582 / 482,38 \rightarrow PB = 132 \text{ meses ou } 11 \text{ anos} \quad (12)$$

5 CONCLUSÃO

Como foi verificado através do cálculo do *payback*, o sistema dimensionado com painel fotovoltaico para os cenários A e B não parece ser vantajoso, pois o tempo de retorno será de 18 anos e dois meses, para o cenário A, e de 14 anos e um mês, para o cenário B, com um custo inicial elevado de aquisição e instalação dos equipamentos. Contudo, o cenário C apresenta um tempo de retorno de 11 anos e se mostra mais favorável quando comparado aos outros cenários. Se fizermos uma análise em longo prazo, percebe-se que o custo-benefício desse sistema dimensionado para o cenário C é viável, tendo em vista que segundo os fabricantes, os painéis fotovoltaicos tem vida útil média de 25 anos. Além disso, pelo fato de lidarmos com uma tecnologia que utiliza energia limpa, renovável e que causa o mínimo impacto para a natureza, podemos considerar o sistema dimensionado como uma alternativa para as tecnologias atualmente empregadas em iluminação pública.

Adicionalmente, vendo pelo aspecto qualitativo, podemos citar outras vantagens da utilização desse sistema tais como, a diminuição do consumo nacional com energia elétrica, a redução dos riscos de futuros “apagões” e a redução da emissão de dióxido de carbono (CO₂) com a eliminação das lâmpadas de vapor de mercúrio.

Em suma, estamos vivendo um período de transição onde buscamos e investimos cada vez mais em sustentabilidade. Com isso, esse trabalho de graduação enfocou-se em ideias autossustentáveis, tendo em vista que no futuro haverá um maior incentivo na fabricação dessas tecnologias. Isso nos leva a concluir que o sistema ficará ainda mais atrativo, pois os custos de projeto irão reduzir e conseqüentemente o *payback* também.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5101: Iluminação Pública**. Rio de Janeiro, 2012.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, CRESESB, 1999. 204p.

CREDER, H.; **Instalações elétricas**. Rio de Janeiro: livros técnicos e científicos, 2007. 427p.

FREEDOM: baterias estacionárias. Disponível em: <http://www.solenerg.com.br/files/ManualTecnicoFreedom.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2013.

GIANELLI, B. F.; SILVEIRA, M. C. F.; THAUMATURGO, R. L. Y.; ASTORGA, O. A. M.; FILHO M. B. M. **O emprego de tecnologia LED na iluminação pública: seus impactos na qualidade de energia e no meio ambiente**. The 8th latin american congress on electricity generation and transmission – CLAGTEE, 2009. LATQEEE – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG – UNESP), out. 2008, p. 15.

HANSALER, P.; *Optical Characterization of Leds*, 2007, p.112.

KYOCERA: módulos solares. Disponível em: <http://www.kyocerasolar.com.br/modulos-solares.html>. Acesso em 26 ago. 2013.

KOYAMA, S. C.; **Análise técnica e econômica da utilização da energia solar e eólica em uma propriedade rural para geração de eletricidade, bombeamento e aquecimento de água**. 2011. 63 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

LEVANTAMENTO PLANIALTIMÉTRICO: planta do campus da FEG. Disponível em: http://ftp.feg.unesp.br/Levantamento_Planialtimetrico/. Acesso em 29 ago. 2013.

NASCIMENTO, Cássio Araújo do. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica.** 2004. 23 f. Monografia (Especialização em Fontes Alternativas de Energia) – Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2004. Disponível em: http://www.solenerg.com.br/files/monografia_cassio.pdf. Acesso em: 22 ago. 2013.

OSRAM: catálogo de produtos. Disponível em: http://www.osram.com.br/osram_br/. Acesso em: 29 ago. 2013.

PALZ, Wolfgang. **Energia solar e fontes alternativas.** São Paulo: Editora Hemmus, 1981. 358 p.

RIBEIRO, A. C. C.; ROSA, H. C. P.; CORREA, J. D. S.; SILVA, A. V. O emprego da tecnologia LED na iluminação pública. **E-xacta**, Belo Horizonte, v. 5, n. 1, p. 111-132, dez. 2012. Disponível em: <http://www.unibh.br/revistas/exacta/>. Acesso em: 6 set. 2013.

SCHUBERT, E. R. **Light Emitting Diodes.** Cambridge: University Press, 2003.

Skylab Satellite: satélite “Skylab” com seus painéis solares de 20 kW. Disponível em <http://space.about.com>. Acesso em: 19 out. 2011.

TSAO, J. Y. Solid State Lighting: lamps, chips and materials for tomorrow. **IEEE Circuits & Devices**, v. 20, n. 3, p. 28-37.

U.S. Energy Information Administration: consumption of main energy sources in the U.S. from 1949 to 2009. Disponível em: <http://www.eia.gov>. Acesso em: 18 out. 2011.

XANTREX: power inverters. Disponível em: <http://www.xantrex.com/power-products/power-inverters/xpower-inverters-high-power.aspx>. Acesso em: 28 ago. 2013.

ZUKAUSKAS, A.; SHUR, M. S.; GASKA, R. **Introduction to Solid State Lighting**. 2002, p. 29.