

JAIME YOSHITOYO KIKUCHI

**ESTUDO E ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA DE UM SISTEMA
ALIMENTADO POR CÉLULAS FOTOVOLTAICAS PARA UTILIZAÇÃO EM
LUMINÁRIAS DO TIPO LED COM E SEM ETAPAS DE CONVERSÃO**

Guaratinguetá

2014

JAIME YOSHITOYO KIKUCHI

ESTUDO E ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA DE UM SISTEMA
ALIMENTADO POR CÉLULAS FOTOVOLTAICAS PARA UTILIZAÇÃO EM
LUMINÁRIAS DO TIPO LED COM E SEM ETAPAS DE CONVERSÃO

Trabalho de Graduação
apresentado ao conselho de
curso de Engenharia Elétrica, da
Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá,
Universidade Estadual Paulista,
como partes do requisito para
obtenção do diploma de
Graduação em Engenharia
Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Daniel
Julien B. da S. Sampaio

Guaratinguetá

2014

Kikuchi, Jaime Yoshitoyo

K47e Estudo e análise comparativa da eficiência de um sistema alimentado por células fotovoltaicas para utilização em luminárias do tipo LED com e sem etapas de conversão / Jaime Yoshitoyo Kikuchi – Guaratinguetá : [s.n], 2014.

61 f : il.

Bibliografia: f. 60-61

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Julien Barros da Silva Sampaio

1. Energia – Conservação
2. Geração de energia fotovoltaica
3. Energia – Conversão I. Título

CDU 620.91

JAIME YOSHITOYO KIKUCHI

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

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

Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. DANIEL JULIEN B. DA S. SAMPAIO
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. DURVAL LUIZ S. RICCIULLI
UNESP-FEG


Profª. Dra. DANIELA WOLTER FERREIRA
UNESP-FEG

Janeiro de 2015

Dedico este trabalho de conclusão de curso especialmente à minha mãe
Yoshiko Inoue Kikuchi e ao meu pai Yutaka Kikuchi que sempre me
apoiam na vida

KIKUCHI, J. Y. Estudo e Análise Comparativa da Eficiência de um Sistema Alimentado por Células Fotovoltaicas para Utilização em Luminárias do tipo LED com e sem Etapas de Conversão. 2014. 61f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

RESUMO

Eficiência energética é um tema cada vez mais relevante devido ao cenário atual onde o aumento da demanda cresce mais rapidamente que o da energia ofertada. É importante, portanto, analisar e minimizar as perdas do sistema elétrico. O presente estudo realiza um comparativo de um sistema formado por um gerador Fotovoltaico alimentando diretamente uma luminária LED sem etapas de conversão DC-AC-DC, e um sistema utilizando estas etapas de conversão para alimentação da mesma luminária. As perdas nas etapas de conversão são quantificadas e a degradação da qualidade de energia ocorrida devido à conversão é avaliada.

PALAVRA CHAVE: Energia Fotovoltaica, LED, Inversor, Qualidade de Energia, Eficiência, Conversão.

KIKUCHI, J. Y. Study and Analysis of System Efficiency of Comparative Powered by Solar Cells for Use in LED type lamps with and without Conversion Steps. 2014. 61f. Graduate Work (Graduate in Electrical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

ABSTRACT

Energy efficiency is an increasingly important issue due to the current scenario where increasing demand is growing faster than the energy supplied. It is important, therefore, analyze and minimize electrical system losses. This study conducts a comparison of a system formed by a photovoltaic generator feeding an LED lamp directly without steps DC-AC -DC conversion, and a system using these conversion steps for the same lamp power. Losses in conversion steps are quantified and the degradation of power quality occurred due to conversion is evaluated.

KEYWORDS: Photovoltaic Energy, LED, Inverter, Energy Quality, Efficiency, Conversion.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - a) Painel Fotovoltaica b) Estrutura Célula Fotovoltaica.....	16
Figura 2 - a) Painel Fotovoltaico Si-Monocristalino b) Estrutura Si-Monocristalino	18
Figura 3 - a) Painel Fotovoltaico Si-Policristalino b) Estrutura Si-Policristalino	19
Figura 4 - a) Célula Fotovoltaica de Si-Amorfo b) Estrutura Si-Amorfo.....	19
Figura 5 - Associação série painel fotovoltaico	20
Figura 6 - Associação série de painéis fotovoltaicos diferentes.....	21
Figura 7 - Associação paralelo painel fotovoltaico	21
Figura 8 - Lâmpadas LED.....	22
Figura 9 - Estrutura e Funcionamento LED	23
Figura 10 - LED alto brilho.....	24
Figura 11 - LED SMD	25
Figura 12 - Power LED.....	26
Figura 13 - Etapas de Conversão em Fonte de Alimentação CA-CC	27
Figura 14 - Circuito Inversor	28
Figura 15 - (a) Circuito (b) Formas de Onda (c) Espectro Harmônico	29
Figura 16 - Estrutura Pilha Galvânica	30
Figura 17 - Estrutura Bateria Chumbo Ácido.....	30
Figura 18 - Triângulo Potencia a) Carga Capacitiva b) Carga Indutiva	33
Figura 19 - Representação Potências com Distorções Harmônicas.....	37
Figura 20 - Luxímetro	38
Figura 21 - Malha de medição iluminância.....	40
Figura 22 - Esquemático configuração 1	41
Figura 23 - Esquemático configuração 2	42
Figura 24 - Esquemático configuração 3	42
Figura 25 - Experimento configuração 1	44
Figura 26 - Esquemático ambiente de testes iluminância	45
Figura 27 - Malha de medição de iluminância.....	46
Figura 28 - Plano de medição de iluminância	47
Figura 29 - Parâmetros configuração 1	48
Figura 30 - Forma da tensão e corrente saída do inversor.....	48
Figura 31 - Espectro harmônicos de tensão no inversor.....	49
Figura 32 - Harmônicos de corrente configuração 1	49
Figura 33 - Painéis solares experimento 2	51
Figura 34 - Parâmetros configuração 3	54
Figura 35 - Forma da tensão e corrente configuração 3	55
Figura 36 - Harmônicos de tensão saída do gerador senoidal	55
Figura 37 - Harmônicos de corrente configuração 3.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais de Fabricação e cores emitidas LED	24
Tabela 2 - Características Ópticas e Elétricas LED alto brilho	24
Tabela 3 - Características Ópticas e Elétricas LED SMD	25
Tabela 4 - Características Ópticas e Elétricas Power LED	26
Tabela 5 - Quantidade mínima de pontos a serem medidos	39
Tabela 6 - Especificações bateria	43
Tabela 7 - Especificação inversor	43
Tabela 8 - Especificação lâmpada de LED	44
Tabela 9 - Medições iluminância configuração 1	46
Tabela 10 - Medições entrada inversor	47
Tabela 11 - Informações técnicas painéis fotovoltaicos.....	50
Tabela 12 - Medições iluminância configuração 2	52
Tabela 13 - Comparativo configuração 1 e 2	52
Tabela 14 - Medições iluminância configuração 3	53
Tabela 15 - Comparativo configuração 1 e 3	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Àmpere

Ag – Prata

Ah – Àmpere Hora

CA – Corrente alternada

CC – Corrente contínua

CFI – Current fed inverter

FP – Fator de Potência

Ge – Germânio

LED – diodo emissor de luz

Pb – Chumbo

PRODIST – Procedimentos de distribuição energia elétrica

PWM – pulse width modulation

Si – Silício

THD – Distorção harmônica total

UPS – Uninterruptible power supply

V – Volt

VA – Volt àmpere

VAR - Volt àmpere reativo

VSI – voltage source inverter

W – Watt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO ESTUDO	15
2.1	PAINEL FOTOVOLTAICO	15
2.1.1	Efeito fotovoltaico	16
2.1.2	Tecnologias de painéis fotovoltaicos	16
2.1.3	Associação de painéis fotovoltaicos	19
2.2	LÂMPADA LED.....	21
2.2.1	LED (diodo emissor de luz)	21
2.2.1.1	Eletroluminescência em semicondutores.....	22
2.2.1.2	Tecnologias de iluminação LED	23
2.2.1.2.1	LED alto brilho	23
2.2.1.2.2	LED SMD	24
2.2.1.2.3	Power LED	25
2.2.2	Fonte de alimentação CA-CC	26
2.3	INVERSOR.....	26
2.3.1	Inversor onda quase-quadrada	27
2.4	BATERIA.....	28
2.4.1	Definição	28
2.4.2	Funcionamento	29
2.4.3	Capacidade (Ah)	30
3	FATOR DE POTÊNCIA	31

3.1	POTÊNCIA EM CA	31
3.2	TRIÂNGULO DE POTÊNCIAS.....	32
3.3	FATOR DE POTÊNCIA DEFINIÇÃO	33
4	DISTORÇÕES HARMÔNICAS.....	34
4.1	TAXA DE DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL (THD)	35
4.2	POTÊNCIAS EM SISTEMAS COM HARMÔNICAS.....	35
4.3	FATOR DE POTÊNCIA EM SISTEMAS COM HARMÔNICAS.....	36
4.3	PROBLEMAS RELACIONADOS COM HARMÔNICAS	36
5	ILUMINÂNCIA.....	37
5.1	LUXÍMETRO	37
5.2	MÉTODO DE MEDIÇÃO DE ILUMINAMENTO	38
6	EXPERIMENTOS.....	40
6.1	EXPERIMENTOS CONFIGURAÇÃO 1	42
6.1.1	Metodologia experimentos configuração 1	43
6.1.2	Dados dos experimentos configuração 1.....	46
6.2	EXPERIMENTOS CONFIGURAÇÃO 2	49
6.2.1	Metodologia experimentos configuração 2	51
6.2.2	Dados dos experimentos configuração 2.....	51
6.3	EXPERIMENTOS CONFIGURAÇÃO 3	52
6.3.1	Metodologia experimentos configuração 3	52
6.3.2	Dados dos experimentos configuração 3.....	53
7	CONCLUSÃO.....	58

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um bem essencial em nossa sociedade, ela trouxe mudanças importantes e permanentes, sendo um bem de extrema importância no desenvolvimento social e econômico de um país.

Dados mostram que o crescimento de um país está intimamente ligada ao consumo de energia elétrica, isso pode ser verificado na versatilidade que a energia elétrica nos traz hoje em dia, com ela pode-se fazer uma infinidade de coisas. São utilizadas desde a iluminação em nossas residências até na operação e automação de complexos processos industriais nas indústrias de transformação.

Outro avanço significativo em nossa sociedade foi o desenvolvimento dos semicondutores e conseqüente surgimento da eletrônica dos semicondutores. Basta olhar as mudanças ocorridas nas últimas décadas e concluir a influência que os equipamentos eletrônicos trouxeram em nossa sociedade.

A relação entre energia elétrica e a eletrônica foi fundamental para o desenvolvimento de novas tecnologias, a eletrônica possibilitou o controle e manipulação da energia elétrica, uma das aplicações mais utilizadas pela eletrônica é a conversão de corrente alternada (C.A.) distribuída pelas distribuidoras de energia elétrica em corrente contínua (C.C.) utilizada por muitos equipamentos eletrônicos.

A eletrônica permitiu também a conversão da corrente contínua (C.C.) em corrente alternada (C.A.), processo inverso e muito utilizado em sistemas de UPS (sistemas de alimentação ininterrupta) garantindo o fornecimento de energia sem interrupções em processos essenciais. Porém esses processos de conversões geram perdas e degradações na qualidade de energia, além de causarem problemas no funcionamento de alguns equipamentos em casos específicos.

O presente estudo realiza um comparativo de um sistema sendo alimentado diretamente por uma fonte geradora com tensões de operação convenientes e adequadas ao equipamento (em C.C.) e é realizada a comparação com um sistema em que há a necessidade de conversões dos níveis e formas de tensões de operação, simulando o uso comum da energia utilizado em residências (C.A.). São realizadas as medições das perdas ocasionadas pela conversão, além de verificar a degradação da qualidade de energia do sistema.

É realizado, também, um comparativo de um sistema alimentado por uma fonte puramente senoidal e um sistema formado por conversores CC-CA-CC. Identificando as perdas e a degradação de qualidade de energia dos dois sistemas.

O capítulo 2 descreve os equipamentos utilizados no experimento, fornecendo informações descritivas e técnicas. No capítulo 3 é apresentado uma breve introdução sobre Fator de Potência, um indicativo importante da eficiência do uso de energia em C.A. No capítulo 4 é apresentado uma breve introdução sobre distorções harmônicas e

suas consequências na rede elétrica. No capítulo 5 são apresentados o conceito de iluminância e os métodos de medição de iluminância. No capítulo 6 são apresentados a metodologia e os dados coletados dos experimentos e finalmente no capítulo 7 é realizado as conclusões realizadas através dos experimentos.

2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO ESTUDO

Neste capítulo são apresentadas as principais características e funcionalidades dos equipamentos utilizados para o desenvolvimento dos experimentos. Abaixo a lista dos equipamentos utilizados no estudo.

- Painel Fotovoltaico
- Lâmpada LED
- Inversor
- Bateria

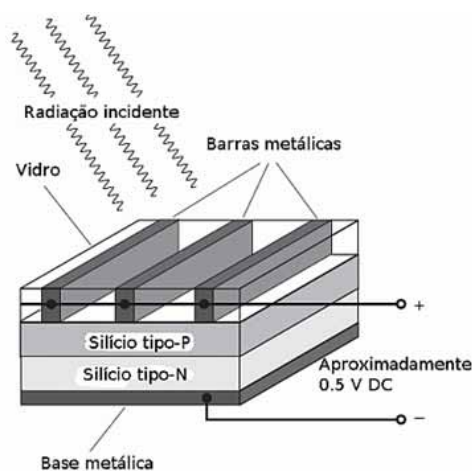
2.1 Painel fotovoltaico

O painel fotovoltaico é um dispositivo capaz de realizar a conversão de energia luminosa em energia elétrica, são compostas por pequenas unidades ou módulos denominados células fotovoltaicas. Cada célula fotovoltaica gera em média 0,5 V, as disposições das ligações e o tamanho das células fornecem os níveis de tensão e corrente projetadas pelo fabricante. (Solarterra) A Figura 1 ilustra o painel fotovoltaico, e a estrutura básica de uma célula fotovoltaica.

Figura 1 - a)Painel Fotovoltaica b)Estrutura Célula Fotovoltaica



(a)



(b)

Fonte: (Profelectro, 2009)

Os painéis fotovoltaicos podem ser empregados em sistemas de microgeração, podendo ser classificados como sistemas conectados à rede, quando se encontram conectados à rede da distribuidora de energia, fornecendo parte ou excedente da energia gerada ou podem ser classificados como sistemas autônomos, quando o sistema se encontra conectado a uma rede particular, sendo necessário o armazenamento de energia em baterias para uso posterior.

A energia produzida através de painéis fotovoltaicos é considerada uma fonte de energia limpa por não gerar nenhum resíduo durante processo de geração de energia. Podem ser instalados em locais diversos, devido ao seu formato compacto e a facilidade de montagem de seus módulos.

2.1.1 Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez pelo físico francês Alexandre-Edmond Becquerel em 1839, através de experimentos de eletroquímica utilizando eletrodos de cloreto de prata (AgCl) recobertos por platina (Ag). Ele observou que se um dos eletrodos fosse iluminado por uma fonte luminosa, a força eletromotriz entre os eletrodos aumentava. Isso ocorre devido a junção semicondutor (AgCl)/metal(Ag) do eletrodo. (Vallêra)

Uma célula fotovoltaica é composta pela junção de um semicondutor tipo P e outro do tipo N. Os semicondutores do tipo P são obtidos através da dopagem de um material semicondutor intrínseco com materiais com características receptoras de elétrons, os semicondutores do tipo N são obtidos a partir da dopagem com materiais com características doadoras de elétrons, a junção desses dois elementos formam os dispositivos semicondutores que possuem características elétricas distintas e são amplamente utilizadas na eletrônica atual.

Entre as junções P e N de uma célula fotovoltaica forma-se um campo elétrico devido aos elétrons livres do semicondutor tipo N ocupar os vazios da estrutura do semicondutor tipo P. Ao incidir luz, os fótons chocam-se a outros elétrons da estrutura do semicondutor fornecendo-lhes energia. Devido à orientação do campo elétrico entre as junções P e N, os elétrons fluem de acordo com a direção deste campo. A intensidade da corrente gerada é proporcional à irradiação de luz incidida sobre o painel fotovoltaico. (Fadigas)

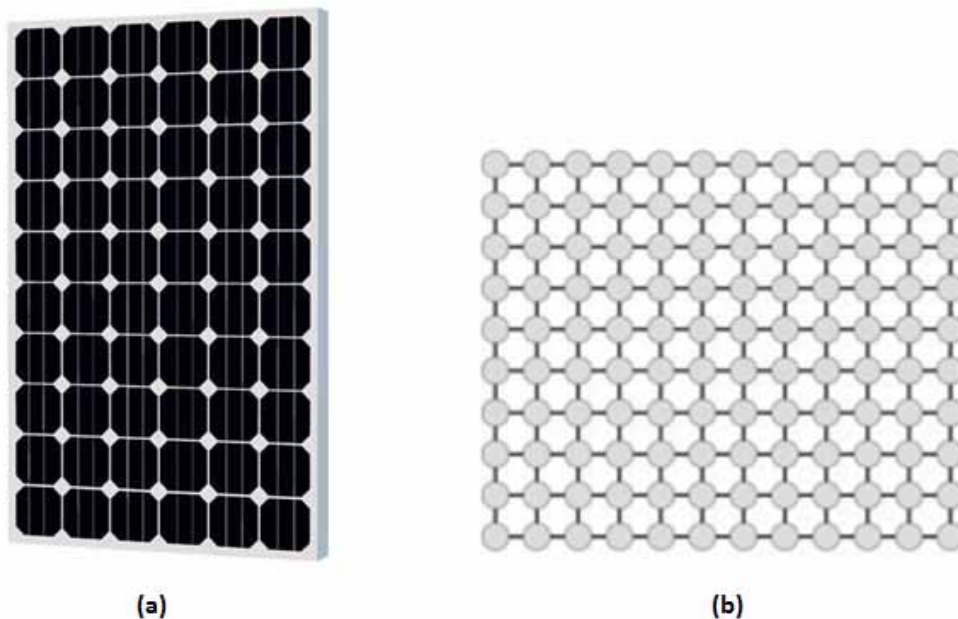
2.1.2 Tecnologias de painéis fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos são fabricados com materiais semicondutores, sendo o silício um dos elementos mais utilizado em sua fabricação. Existem varias formas de se fabricar os painéis fotovoltaicos, os tipos de materiais empregados e os métodos de fabricação irão fornecer a qualidade e conseqüentemente a eficiência de conversão do modulo fotovoltaico, além de refletir no custo final de fabricação do equipamento.

2.1.2.1 Silício monocristalino

O silício monocristalino é obtido através de processos que resultam em uma estrutura de silício com alta pureza (cerca de 99,99% de pureza) e alto grau de organização atômicas. Esta tecnologia apresenta alto grau de eficiência comparada às outras tecnologias (em média 14% a 20% de eficiência de conversão)(Portal solar). Porém como inconveniente possuem alto custo devido ao processo de fabricação mais complexo. A Figura 2 ilustra a estrutura atômica de um painel fabricado em silício monocristalino.

Figura 2 - a) Painel Fotovoltaico Si-Monocristalino b)Estrutura Si-Monocristalino

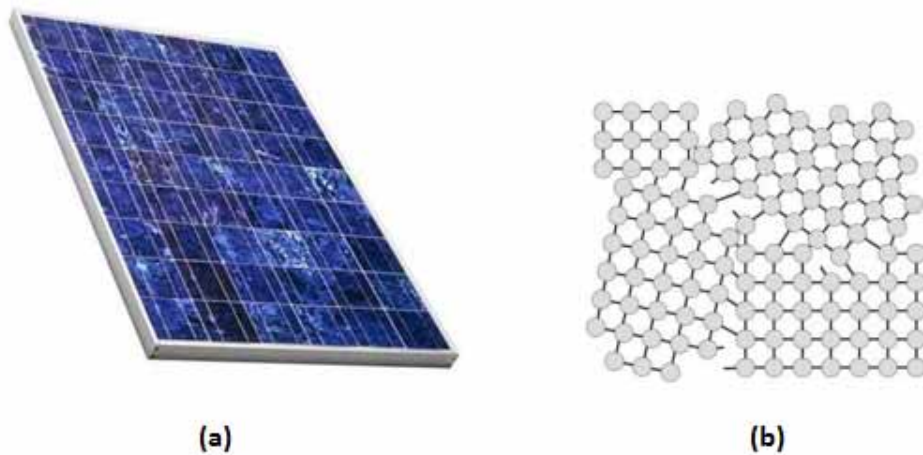


Fonte: (Portal Solar, 2009)

2.1.2.2 Silício policristalino

O silício policristalino, assim como o monocristalino são obtidos através da fundição de cristais de silício. Porém possuem estruturas atômicas desorganizadas em relação ao silício monocristalino. Possuem eficiência entre 13 a 19%. Além de ter um custo menor devido a menor complexidade de fabricação das células fotovoltaicas (Portal solar). A Figura 3 ilustra um painel fotovoltaico de silício policristalino e sua estrutura atômica.

Figura 3 - a) Painel Fotovoltaico Si-Policristalino b) Estrutura Si-Policristalino

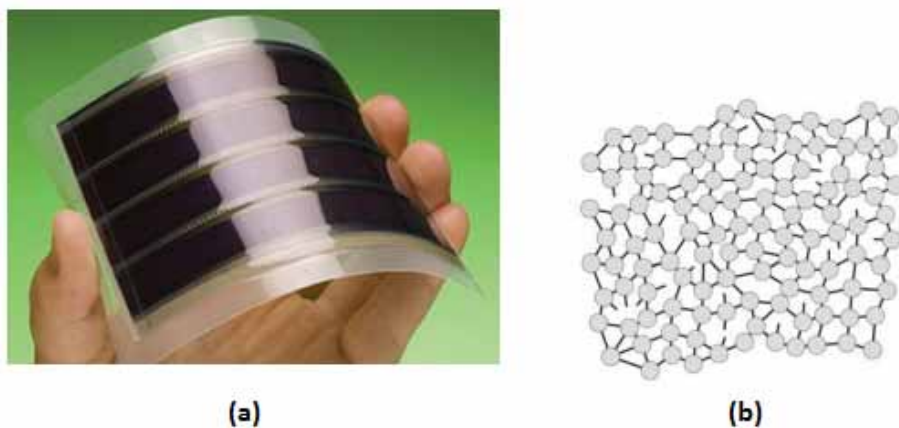


Fonte: (Portal Solar, 2009)

2.1.2.3 Silício amorfo e filmes finos

Os painéis fotovoltaicos de silício amorfo e filmes finos são tecnologias com menor custo que os de cristais, possuem estrutura atômica desorganizada e menor eficiência de conversão (eficiência de 6% a 10% de conversão). Podem ser fabricados utilizando-se de diversos materiais como vapor de silício, telureto de cádmio, arsenieto de gálio ou vários híbridos destes elementos (Portal solar). A Figura 4 ilustra um painel fotovoltaico de silício amorfo ou filmes finos e sua estrutura atômica.

Figura 4 - a) Célula Fotovoltaica de Si-Amorfo b) Estrutura Si-Amorfo



Fonte: (Newhome, 2012)

2.1.3 Associação de painéis fotovoltaicos

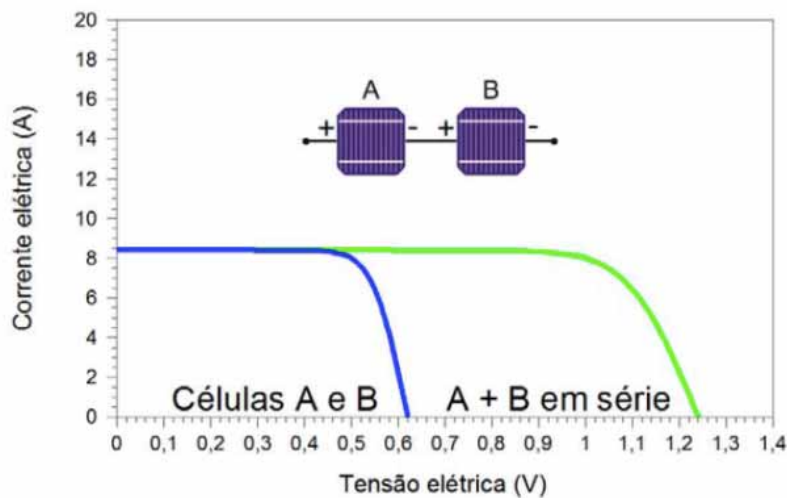
Painéis fotovoltaicos podem ser associados de forma a obterem tensões e correntes convenientes ao projeto, podendo ser ligados em série, paralelo ou em série-paralelo.

Nas ligações em série, para painéis fotovoltaicos idênticos, as tensões do conjunto são somados, como mostra a equação (2.1), mantendo a corrente do sistema constante, como mostra a equação (2.2). A curva característica resultante é mostrado na Figura 5.

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_N \quad (2.1)$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_N \quad (2.2)$$

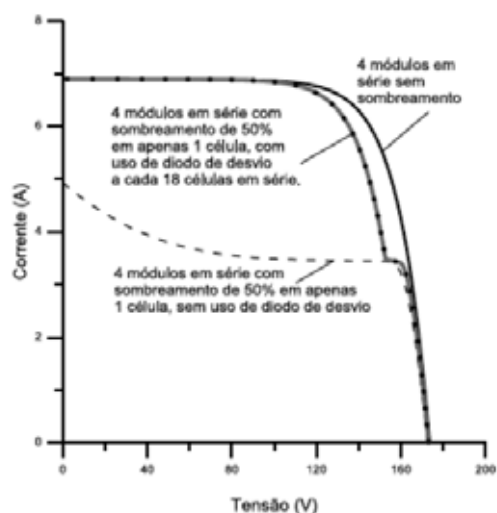
Figura 5 - Associação série painel fotovoltaico



Fonte: (Alexandro Rocha, 2014)

Para casos de sombreamento ou painéis fotovoltaicos com diferentes características ligados em série, a tensão resultante é a soma das tensões dos painéis, assim como mostrado na equação (2.1), anteriormente, porém a corrente do conjunto diminui (Alexandro Rocha, 2014), a Figura 6 ilustra este conceito.

Figura 6 - Associação série de painéis fotovoltaicos diferentes



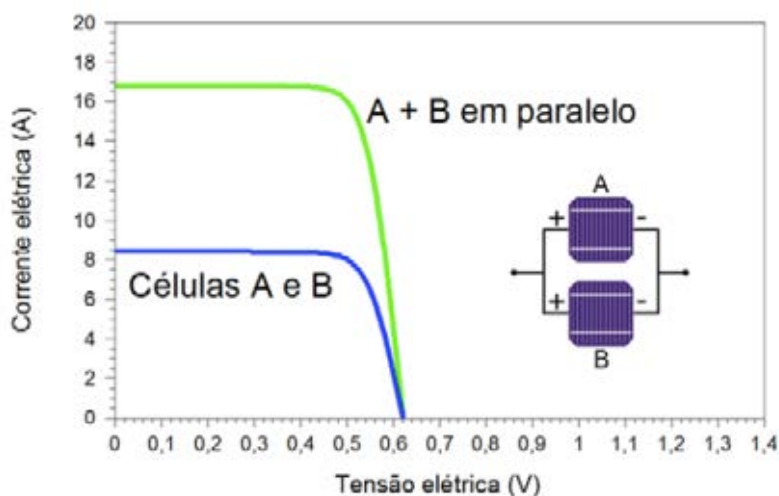
Fonte: (Alexandro Rocha, 2014)

Nas ligações em paralelo, para painéis fotovoltaicos idênticos, as correntes do conjunto são somadas, como mostra a equação (2.3), mantendo a tensão do sistema constante, como mostra a equação (2.4). A curva característica resultante é mostrado na Figura 7.

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_N \quad (2.3)$$

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_N \quad (2.4)$$

Figura 7 - Associação paralelo painel fotovoltaico



Fonte: (Alexandro Rocha, 2014)

Para casos de sombreamento ou painéis fotovoltaicos com diferentes características ligados em paralelo, a corrente resultante é a soma das correntes dos painéis, assim como mostrado na equação (2.3), porém a tensão do conjunto diminui.

2.2 Lâmpada LED

As lâmpadas de LED são caracterizadas pela alta eficiência luminosa, baixo consumo de energia e alta durabilidade.(Philips) Estas lâmpadas são compostas por diodos emissores de luz (light emission diode), normalmente montados em ligações série paralelo, possuem acopladas conversores de CA para CC. A Figura 8 ilustram alguns tipos de lâmpadas LED.

Figura 8 - Lâmpadas LED



Fonte: (Philips, 2012)

2.2.1 LED (diodo emissor de luz)

LED é um dispositivo semicondutor de junção P e N que quando polarizados corretamente emitem boa parte da energia na forma de luz. (Boylestad, Nashelsky; 1998) A luz emitida por um LED é monocromática, possuindo uma faixa de frequência bem definida no espectro eletromagnético.

O primeiro dispositivo LED surgiu por volta dos anos 60, sendo produzidos nos laboratórios da GE, apresentavam como características a emissão de luz na cor vermelha e de baixa intensidade luminosa, por volta dos anos 70 com o desenvolvimento de novos materiais semicondutores surgiram os LEDs de cor verde e amarelo, além de uma melhora significativa na intensidade luminosa emitida por estes dispositivos. No começo dos anos 90 surgiram os primeiros LEDs azuis e brancos, o

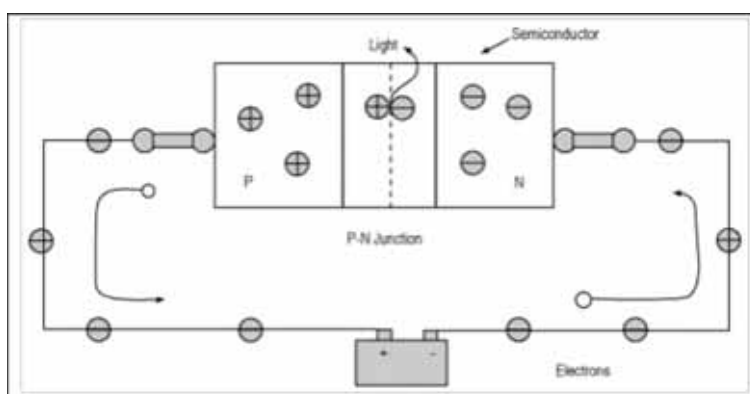
que permitiram a popularização da tecnologia para diversas aplicações em iluminação.(Lighting Research Center)

Os LEDs são amplamente utilizados em:

- Aparelhos Eletrônicos como indicadores e sinalizadores;
- Displays LCD;
- Iluminação em Veículos;
- Iluminação Residencial e decorativa;

Os LEDs possuem características elétricas semelhantes aos diodos, sendo considerado um caso especial desses dispositivos. As diferenças básicas estão no encapsulamento e na composição do material semicondutor, responsáveis também pela coloração e intensidade emitida por esses dispositivos.(Boylestad Nashelsky, 1998) A Figura 9 ilustra a estrutura e o funcionamento de um LED.

Figura 9 - Estrutura e Funcionamento LED



Fonte: (Lighting Research Center, 2003)

2.2.1.1 Eletroluminescência em semicondutores

O efeito da eletroluminescência é caracterizado pela absorção de energia e posterior reemissão da energia absorvida em forma de luz. Em dispositivos semicondutores como o LED, a liberação de luz ocorre devido às recombinações entre as junções P e N em um semicondutor (Boylestad; Nashelsky). Elétrons livres da camada N ao se recombinarem com buracos ou vazios da camada P transferem parte de sua energia durante a mudança de estado, ao retornarem ao estado inicial devolvem esta energia em forma de luz.

A cor emitida por um LED é dada pelo material utilizado em sua fabricação, normalmente são utilizados materiais como fosfeto de arsenieto de gálio (GaAsP) ou fosfeto de Gálio (GaP) pois estes elementos emitem a maior parte de energia em forma

de luz visível. (Boylestad; Nashelsky) A Tabela 1 descreve os materiais utilizados na fabricação de LED, suas cores e o comprimento de onda emitida.

Tabela 1 - Materiais de Fabricação e cores emitidas LED

Semicondutor	Cor	Comprimento de Onda
Arsenieto de Gálio e Alumínio	Vermelho	645nm
Fosfato de Alumínio, Índio e Gálio	Amarelo	595nm
Fosfato de Galio	Verde	565nm
Nitreto de Galio	Azul	430nm

2.2.1.2 Tecnologias de iluminação LED

2.2.1.2.1 LED alto brilho

Estes tipos de LEDs são muito semelhantes aos LEDs comuns, porém possuem um revestimento interno de silicone, proporcionando melhor eficiência de iluminação, pois concentram a luz emitida pelo dispositivo (Cromatek). A Figura 10 ilustra uma imagem de um LED de alto brilho e a Tabela 2 descreve algumas características ópticas e elétricas deste dispositivo.

Figura 10 - LED alto brilho



Fonte: (Vishay, 2012)

Tabela 2 - Características Ópticas e Elétricas LED alto brilho

Características ópticas e elétricas LED alto brilho ($T_{amb}=25^{\circ}\text{C}$)				
PARÂMETRO	CONDIÇÃO AMBIENTE	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADE
Intensidade luminosa	$I_F = 25\text{mA}$	I_V	65000	Mcd
Comprimento de Onda	$I_F = 25\text{mA}$	λ_d	624	Nm
Tensão Direta	$I_F = 25\text{mA}$	V_F	2,2-3	V
Tensão Reversa	$I_F = 25\text{mA}$	V_R	5	V
Corrente Direta	$T_{amb} \leq 85^{\circ}\text{C}$	I_F	50	mA
Potência Dissipada	-	P_D	150	mW

Fonte: (Vishay, 2012)

2.2.1.2.2 LED SMD

Estes tipos de LEDs são montados em placas de circuitos, possuem dimensões menores que os leds comuns. Possuem um amplo ângulo de iluminação, dispensam o encapsulamento de epóxi utilizado em leds comuns e consomem menos energia (Cromatek). A Figura 11 ilustra uma imagem de um LED SMD e a Tabela 3 descreve algumas de suas características ópticas e elétricas.

Figura 11 - LED SMD



Fonte: (Samsung, 2014)

Tabela 3 - Características Ópticas e Elétricas LED SMD

Características ópticas e elétricas LED SMD ($T_{amb}=25^{\circ}\text{C}$)				
PARÂMETRO	CONDIÇÃO AMBIENTE	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADE
Intensidade luminosa	$I_F = 50\text{mA}$	I_V	6000	Mcd
Tensão Direta	$I_F = 50\text{mA}$	V_F	2,9 - 3,3	V
Tensão Reversa	$I_F = 5\text{mA}$	V_R	0,7 - 1,2	V
Corrente Direta	-	I_F	150	mA

Fonte: (Samsung, 2014)

2.2.1.2.3 Power LED

Os Power LED permitem utilizar altas potências em único encapsulamento, nestes dispositivos são obrigatórios o uso de dissipadores de calor (Cromatek). A Figura 12 ilustra uma imagem de um Power LED e a Tabela 4 descreve algumas de suas características ópticas e elétricas.

Figura 12 - Power LED



Fonte: (Samsung, 2014)

Tabela 4 - Características Ópticas e Elétricas Power LED

Características ópticas e elétricas Power LED ($T_{amb}=25^{\circ}\text{C}$)				
PARÂMETRO	CONDIÇÃO AMBIENTE	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADE
Intensidade luminosa	$I_F = 350\text{mA}$	Φ_V	100 – 120	Lm
Tensão Direta	$I_F = 350\text{mA}$	V_F	2,9-3,7	V
Tensão Reversa	$I_F = 350\text{mA}$	V_R	5	V
Corrente Direta	-	I_F	350	mA
Potência Dissipada	-	P_D	1365	mW

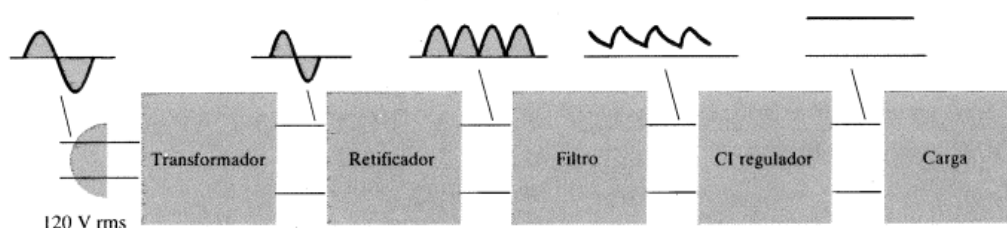
Fonte: (Samsung, 2014)

2.2.2 Fonte de alimentação CA-CC

As fontes de alimentação de CA-CC são utilizadas para fornecer tensões adequadas ao funcionamento de equipamentos alimentados por corrente contínua.

O fornecimento de energia elétrica pelas concessionárias é realizado através de CA, equipamentos que necessitem de alimentação em CC devem possuir conversores capazes de fornecer os níveis e formas de tensão e corrente adequadas à sua alimentação. A Figura 13 ilustra os processos de conversão em uma fonte de alimentação CA-CC.

Figura 13 – Etapas de Conversão em Fonte de Alimentação CA-CC



Fonte: (Boylestad; Nashlesky, 2004)

Como mostrado na figura 13, um conversor CA-CC pode ser dividido em 4 blocos principais:

Transformador – responsável por diminuir ou aumentar os níveis de tensão do sistema.

Retificador – permite a circulação de corrente em apenas um sentido.

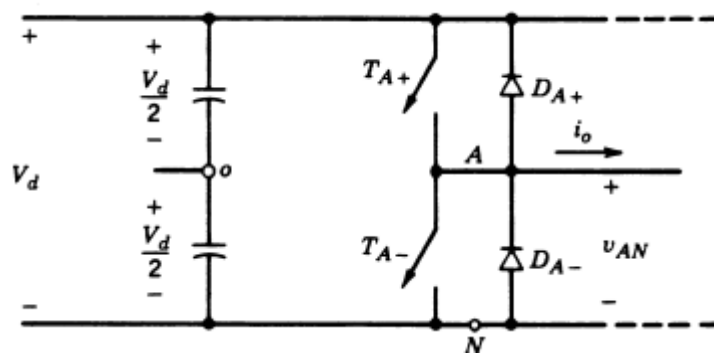
Filtro – tem como função suavizar a forma de onda.

Regulador – responsável por manter a tensão em níveis pré estabelecidos, mesmo com pequenas variações na carga.

2.3 Inversor

O inversor é um equipamento capaz de converter uma tensão de entrada CC em uma tensão de saída CA simétrica em amplitude e frequência (Rashid, 1999), é composto basicamente por circuitos de chaveamento, filtros, além de circuitos de controle. A Figura 14 ilustra uma configuração básica de um inversor.

Figura 14 - Circuito Inversor



Fonte: (Mohan, Undeland, Robbins; 1994)

Os inversores são amplamente utilizados em aplicações industriais, principalmente em acionamentos de máquinas de CA em velocidade variável, aquecimento indutivo, fontes auxiliares, sistema de energia ininterrupta, entre outros. (Rashid, 1999)

O inversor pode ser classificado como inversor alimentado por tensão (VSI) se a tensão de entrada do inversor for constante, inversor alimentado por corrente (CFI) se a corrente de entrada do inversor for constante e inversor com interligação CC variável, se a tensão de saída do inversor for controlável (Rashid, 1999).

Neste trabalho serão discutidos apenas os inversores VSI, eles podem ser divididos em 3 grupos principais (Mohan, Undeland, Robbins; 1994):

- Inversor modulado por largura de pulso (PWM): nestes inversores a tensão CC de entrada é constante em magnitude, o controle da magnitude e frequência na tensão de saída CA é realizada através de um controle PWM.
- Inversor de onda quadrada: Nestes inversores a tensão de saída AC é proporcional a magnitude da tensão de entrada CC, o inversor controla apenas a frequência do sinal de saída AC.
- Inversor monofásico com cancelamento de voltagem: nestes inversores a magnitude e frequência do sinal de saída AC, pode ser controlado sem o uso de controlador PWM, estes inversores combinam as características do inversor PWM e de onda quadrada. Só podem ser utilizadas em sistemas monofásicos.

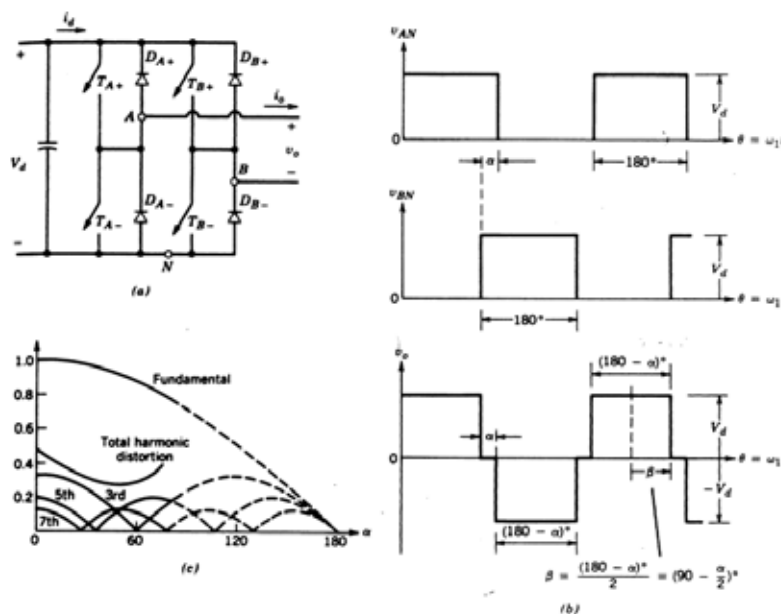
2.3.3 Inversor onda quase-quadrada

Este tipo de controle pode ser utilizado apenas em inversores monofásicos em ponte, sendo uma combinação dos comandos por onda quadrada e PWM Unipolar. No circuito da Figura 26(a), os interruptores eletrônicos nos dois ramos do inversor são

controlados de forma independente (tal como na estratégia PWM Unipolar). No entanto, todos os interruptores eletrônicos possuem um ciclo de trabalho de 0.5 (tal como no caso do comando por onda quadrada). Com este tipo de comando, obtém-se as formas de onda de V_{AN} e V_{BN} ilustradas na Figura 26(b), onde o ângulo de sobreposição α pode ser controlado. (Mohan, Undeland, Robbins; 1994)

A Figura 15 (b) ilustra o processo de obtenção da onda quase quadrada e a Figura 15 (c) ilustra a variação da tensão de saída da componente fundamental e os harmônicos relevantes em função de α .

Figura 15 - (a) Circuito (b) Formas de Onda (c) Espectro Harmônico



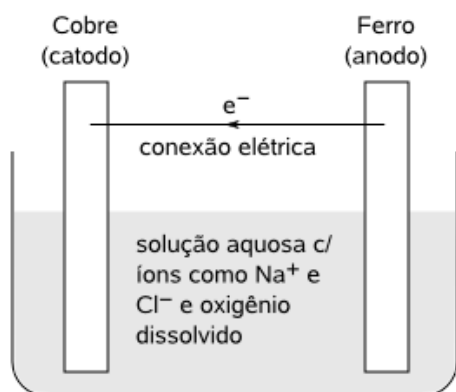
Fonte: (Mohan, Undeland, Robbins; 1994)

2.4 Bateria

2.4.1 Definição

A bateria é um equipamento capaz de converter energia química em energia elétrica. São formadas por conjuntos de células ou pilhas, podendo ser classificadas como primário ou secundário. Nas pilhas primárias as reações químicas que convertem energia química em energia elétrica não podem ser revertidas, portanto elas não podem ser reutilizadas. Já nas pilhas secundárias as reações de conversão podem ser revertidas, podendo ser reutilizadas. Cada célula ou pilha é formada por pelo menos um anodo, catodo e eletrólito. A Figura 16 ilustra a composição de uma célula ou pilha.

Figura 16 – Estrutura Pilha Galvânica

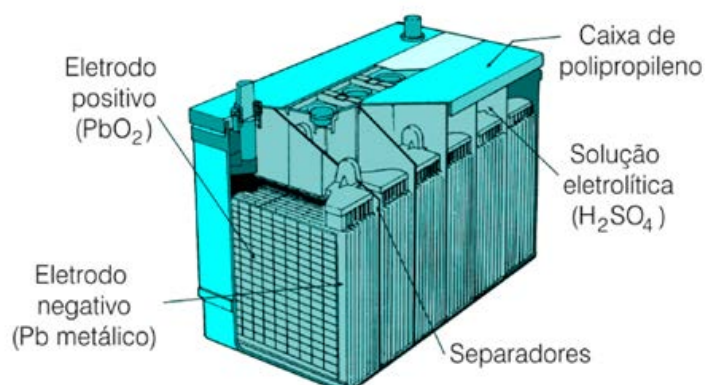


Fonte: (MSPC, 2007)

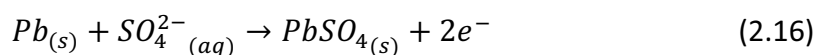
2.4.2 Funcionamento

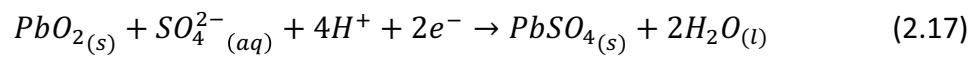
O catodo normalmente uma placa de metal, possui número de oxidação maior que o anodo e é responsável por coletar os elétrons resultantes das reações químicas da pilha. O anodo tem como função doar elétrons ao sistema. A solução eletrolítica ou eletrólito é uma solução aquosa que contém íons e cátions responsáveis por manter as reações químicas (Química Nova Interativa, 2011). A Figura 28 ilustra a estrutura de uma bateria chumbo ácido e as equações 2.16 e 2.17 descrevem as reações químicas resultantes no anodo e catodo respectivamente.

Figura 17 – Estrutura Bateria Chumbo Ácido



Fonte: (Química Nova Interativa, 2011)





2.4.3 Capacidade (Ah)

Os fabricantes de baterias especificam a capacidade de uma bateria através da sigla Ah (ampère hora), ela representa a quantidade de corrente fornecida durante uma hora de uso contínuo. A capacidade de armazenamento de cargas de uma bateria depende principalmente da composição e do tamanho das baterias. É importante notar que a capacidade de uma bateria diminui com o decorrer do tempo, devido à própria degradação dos componentes da bateria.

3 FATOR DE POTÊNCIA

O fator de potência tem um significado importante em sistemas de CA, pois indica a eficiência da utilização da energia elétrica, um alto fator de potência indica uma alta eficiência do uso de energia, um baixo fator de potência indica uma baixa eficiência no uso de energia elétrica. O fator de potência só pode ser analisado caso existam defasamentos entre corrente e tensão em um sistema elétrico. A seguir serão apresentadas algumas informações para melhor compreensão do significado de fator de potência.

3.1 Potência em CA

Para conceituar o significado de Fator de Potência, será apresentada uma análise sucinta de potência em CA. Para isso considere uma onda senoidal de tensão e corrente apresentados na equação (3.1) e equação (3.2).

$$V = V_p \cdot \text{sen}(wt + \theta_v) \quad (3.1)$$

$$I = I_p \cdot \text{sen}(wt + \theta_i) \quad (3.2)$$

Sendo:

V_p - tensão de pico, em Volts

I_p - corrente de pico, em Ampere

θ_v – ângulo da tensão, em radianos

θ_i - ângulo da corrente, em radianos

A potência em um circuito elétrico pode ser calculada através do produto da corrente pela tensão, para os valores de tensão e corrente apresentadas na equação (3.1) e (3.2) tem-se o resultado apresentado na equação (3.3).

$$P = V_p \cdot I_p \cdot \text{sen}(wt + \theta_v) \cdot \text{sen}(wt + \theta_i) \quad (3.3)$$

Aplicando identidades trigonométricas na equação 3.3 obtém-se a equação 3.4

$$P = \frac{V_p \cdot I_p}{2} \cos(\theta_v - \theta_i) - \frac{V_p \cdot I_p}{2} \cdot \cos(2wt + \theta_v + \theta_i) \quad (3.4)$$

A equação (3.4) é composta por dois termos, um termo de valor fixo que independe do tempo e outro termo variante que é dependente do tempo. O primeiro termo representa a potência média do circuito que corresponde à potência real ou consumida e conseqüentemente dissipada pela carga. O segundo termo possui valor

líquido nulo, portanto não apresentando informações da potência consumida pelo circuito.

O termo encontrado na equação (3.4) e apresentado na equação (3.5) é denominado potência ativa, e é representado pela letra P.

$$P = V_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (3.5)$$

A potência total solicitada continua sendo o produto das tensões e correntes eficazes do sistema, representada pela equação (3.6):

$$S = V_{ef} \cdot I_{ef} \quad (3.6)$$

Esta potência é denominada potência aparente, e é representada pela letra S.

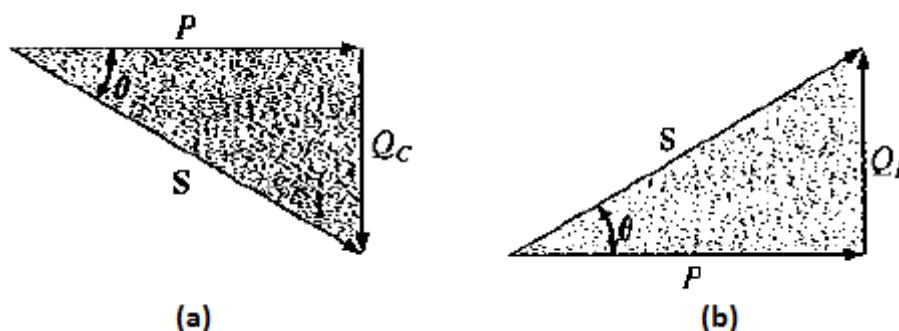
O terceiro componente é denominado potência reativa representada pela letra Q e apresentada na equação (3.7).

$$Q = V_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \sen(\theta_v - \theta_i) \quad (3.7)$$

3.2 Triângulo de potências

O triângulo de potências é uma relação trigonométrica das potências ativa, reativa e aparente em sistema elétrico. A Figura 18 ilustra o triângulo de potências e as suas componentes.

Figura 18 – Triângulo Potencia a) Carga Capacitiva b) Carga Indutiva



Fonte: (Boylestad; Nashelsky, 1998)

Constata-se que a potência aparente é a soma vetorial das potências ativas e reativas do sistema. Esta representação é de extrema importância na análise de circuitos de CA.

3.3 Fator de potência definição

Defini-se fator de potência como a razão entre a potência ativa pela potência aparente, a equação (3.8) descreve o fator de potência.

$$FP = \frac{P}{S} = \cos\theta \quad (3.8)$$

O fator de potência é um parâmetro importante para identificar a eficiência de um sistema elétrico. Considerando que as perdas de energia elétrica decorrentes do efeito joule são proporcionais ao quadrado da corrente, e que a potência total enxergada pelo sistema corresponde à potência aparente, um aumento na potência reativa, causa um aumento na potência aparente do sistema e conseqüentemente aumento da corrente solicitada pelo sistema e maiores perdas por efeito joule.

4 DISTORÇÕES HARMÔNICAS

As distorções harmônicas são componentes senoidais de tensão ou corrente que possuem frequências múltiplas da frequência fundamental. É possível descrever matematicamente este fenômeno através das séries de Fourier. As séries de Fourier representam matematicamente uma função periódica através da soma infinita de funções senoidais e cossenoidais, a equação (4.1) representa as séries de Fourier em sua forma trigonométrica.

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos\left(\frac{2n\pi x}{T}\right) + b_n \cdot \text{sen}\left(\frac{2n\pi x}{T}\right) \quad (4.1)$$

Sendo:

T – período da função

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) dx$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \cos(nw_0 x) dx$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \text{sen}(nw_0 x) dx$$

As distorções harmônicas podem ser decompostas como mostra as séries de Fourier, por espectros de frequências. Para fins práticos eles são limitados para análise até a ordem 50ª (PRODIST), teoricamente o espectro de frequências de um sinal deformado é infinito, porém ordens maiores que 50ª contribuem pouco na composição das distorções harmônicas.

As distorções harmônicas são geradas devido à presença de cargas não lineares conectadas ao sistema. As correntes geradas por essas cargas distorcem a tensão ao percorrerem as impedâncias presentes no caminho, podendo prejudicar o funcionamento de equipamentos conectados à rede. Por propagarem distorções no sistema, as harmônicas são consideradas fenômenos contínuos, diferentes dos fenômenos de curta duração, que duram apenas alguns ciclos.

4.1 Taxa Distorção harmônica total (THD)

A THD é uma forma de mensurar a influência de harmônicas em um sistema elétrico. A equação (4.2) define a THD.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} y_h^2}}{y_1} \quad (4.2)$$

Sendo:

y_h - valor da harmônica

y_1 - valor da fundamental

4.2 Potência em sistemas com harmônicas

A potência em sistemas elétricos na presença de harmônicos não pode ser representado através do triângulo de potências apresentado no capítulo 3. Devido às contribuições de outros componentes de diferentes frequências no sistema. É definido através da equação (4.3) as relações entre potências em um sistema na presença de harmônicos.

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (4.3)$$

Sendo:

S – Potência Aparente

P – Potência Ativa

Q- Potência Reativa

D – Potência de Distorção

A Figura 19 representa as relações de potências do sistema na presença de harmônicas.

Figura 19 – Representação Potências com Distorções Harmônicas

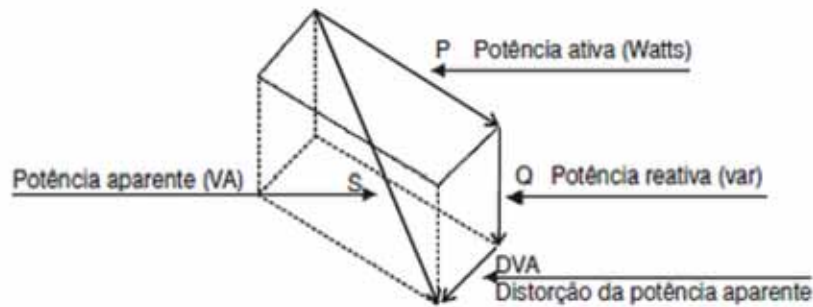


Figura do Paralelepípedo

Fonte: (Engelétrica, 2014)

4.3 Fator de potência em sistemas com harmônicas

Em sistemas puramente senoidais, o fator de potência é obtido pela razão entre a potência ativa e potência aparente, que corresponde ao cosseno do defasamento entre o ângulo da tensão e corrente do sistema. Porém na presença de harmônicos devido as componentes de outras frequências contribuírem na composição das potências do sistema, essa afirmação passa a não ser válida.

Uma forma simples de verificar a presença de harmônicos e o seu grau de contaminação é verificando o defasamento angular e o fator de potência do sistema, caso estas informações estejam divergentes, a probabilidade de contaminação por harmônicas no sistema é quase certa.

4.4 Problemas relacionados com harmônicas

As distorções harmônicas podem causar uma série de problemas nos equipamentos conectados à rede, dentre eles podem-se destacar:

- Aquecimento em condutores;
- Mal funcionamento de motores de indução;
- Mal funcionamento em Equipamentos de Precisão que utilizam sincronização com a frequência da rede;
- Mal funcionamento em transformadores de energia;
- Mal funcionamento de equipamentos de proteção;
- Mal funcionamento em equipamentos de Medição;
- Interferência em sistemas de telecomunicação;

5 ILUMINÂNCIA

Iluminância é definida como a razão entre o fluxo luminoso emitida por uma fonte e a superfície iluminada a certa distância da fonte (NBR15215). Ela é representada pela letra E e a sua unidade é o lux, a equação (5.1) descreve o conceito.

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (5.1)$$

Sendo:

E – Iluminância (lux)

Φ - fluxo luminoso emitido por uma fonte luminosa (lúmens)

A - área ou superfície iluminada (m²)

5.1 Luxímetro

O luxímetro é um aparelho utilizado para medições de iluminância. Ela consiste em um sensor fotométrico, geralmente de silício ou selênio, com um filtro de correção óptico conectado a um circuito de tratamento de sinal (linearização e amplificação)(NBR 15215-4). A Figura 20 ilustra um luxímetro.

Figura 20 - Luxímetro



Fonte: (Minipa, 2014)

5.2 Método de medição de iluminamento em planos de trabalho

Para as medições de iluminamento em ambientes reais, segundo a norma NBR15215-4, devem ser consideradas as seguintes condições:

- considerar a quantidade de luz no ponto e no plano onde a tarefa for executada, seja horizontal, vertical ou em qualquer outro ângulo; (NBR15215-4)
- manter o sensor paralelo à superfície a ser avaliada ou deixá-lo sobre a superfície cujos níveis de iluminação estão sendo medidos; (NBR15215-4)
- realizar as medições num plano horizontal a 75 cm do piso quando a altura da superfície de trabalho não é especificada ou conhecida; (NBR15215-4)
- para avaliação de iluminância em postos de trabalhos, deve-se fazer medições em uma quantidade de pontos suficiente para caracterizar adequadamente tal plano. Para determinar o número mínimo de pontos necessários, deve-se determinar o índice do local (k) pela equação (5.2) e recorrer a Tabela 5. (NBR15215-4)

$$k = \frac{C \cdot L}{H_m \cdot (C + L)} \quad (5.2)$$

Onde:

L é a largura do ambiente, em metros;

C é o comprimento do ambiente, em metros;

H_m é a distância vertical, em metros, entre a superfície de trabalho e a fonte luminosa;

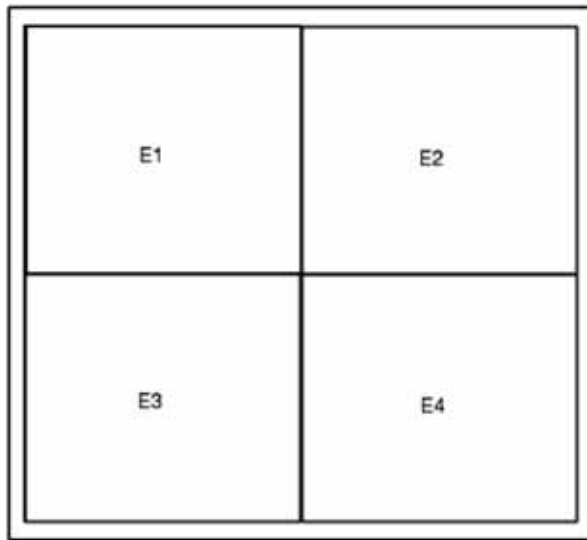
Tabela 5 - Quantidade mínima de pontos a serem medidos

K	Número de Pontos
K<1	9
1k<2	16
2<k<3	25
k>3	36

Fonte: (NBR15215-4)

- O ambiente a ser medido deve ser dividido em áreas iguais, com formato próximo ou igual a um quadrado. A iluminância E é medida no centro de cada área (NBR15215-4), conforme mostra a Figura 21.

Figura 21 - Malha de medição iluminância



Fonte: (Próprio autor)

A iluminância do local é medida através das médias das iluminâncias medidas, a equação (5.3) descreve este conceito.

$$\bar{E} = \frac{E_1 + E_2 + \dots + E_N}{N} \quad (5.3)$$

Sendo:

\bar{E} – Iluminância média (lux);

N – número de pontos a serem medidos;

E_N – iluminância medida no enésimo ponto (lux);

6 EXPERIMENTOS

Os experimentos tem como objetivo avaliar as perdas nos sistemas de conversão e compará-los com sistemas de referências. Para isto, os experimentos foram divididos em 3 configurações.

A configuração 1 é composta por uma bateria de chumbo ácido, lâmpada LED com driver de tensão (conversor AC-DC), inversor veicular (conversor CC-CA) de 200W, além de componentes auxiliares, tais como cabos e conectores.

Esta configuração é utilizada para medir o sistema sendo alimentado através de etapas de conversão. A Figura 22 ilustra o esquemático utilizado na configuração 1.

Figura 22 - Esquemático configuração 1

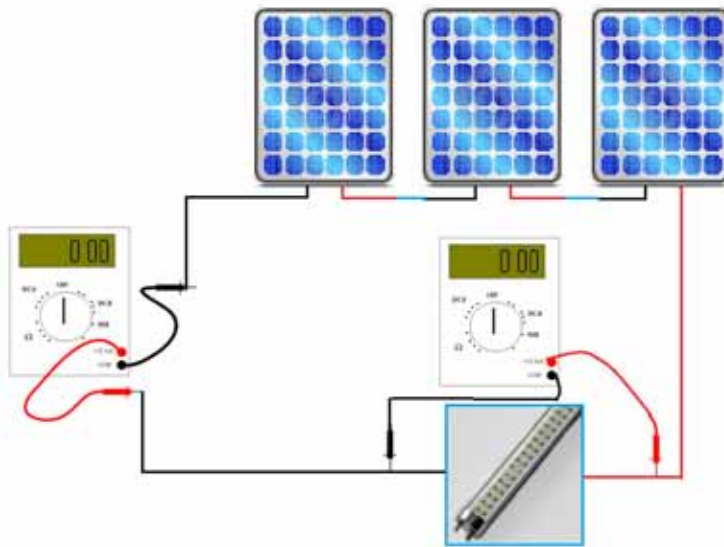


Fonte: (Próprio autor)

A configuração 2, composta por painéis fotovoltaicos, lâmpadas de LED e componentes auxiliares, tais como cabos e conectores.

Esta configuração é utilizada para medir o sistema sendo alimentado apenas por uma fonte CC, não possuindo nenhuma etapa de conversão, esta configuração é comparada com a configuração 1, sendo medidos e comparados as perdas devido a conversão. A Figura 23 ilustra o esquemático utilizado para o experimento da configuração 2.

Figura 23 - Esquemático configuração 2

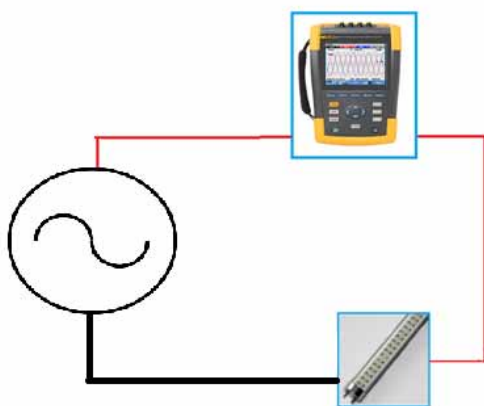


Fonte: (Próprio autor)

A configuração 3 é composta por um gerador puramente senoidal, lâmpada de LED com driver de tensão (AC-DC), além dos componentes auxiliares, cabos e conectores.

Esta configuração é utilizada para medir a influência dos harmônicos no sistema, comparando-o com o sistema da configuração 1. É comparada as perdas e a influência das distorções harmônicas, uma vez que as formas de onda de alimentação dos dois sistemas são diferentes. A Figura 24 ilustra o esquemático utilizado na configuração 3.

Figura 24 - Esquemático configuração 3



Fonte: (Próprio autor)

6.1 Experimentos Configuração 1

A configuração 1 é composta pelos seguintes equipamentos:

a) Bateria 12V

A bateria utilizada foi ligada diretamente ao inversor, fornecendo a potência necessária ao seu funcionamento. A Tabela 6 descreve as características da bateria utilizada.

Tabela 6 - Especificações bateria

Modelo	Tensão	Capacidade (Ah) até 1,75V/célula 25°C			Peso (Kg)
	(V)	10h	20h	100h	
TUDOR 12TE45	12	40,5	45	50	11,6

Fonte: (Tudor, 2014)

b) Inversor veicular 200W

O inversor utilizado no experimento é responsável por converter CC fornecida pela bateria em CA utilizada pela luminária LED. Neste caso não foi retirado o conversor CA-CC acoplado a luminária. A tabela x descreve as características do inversor utilizado.

Tabela 7 - Especificação inversor

Modelo	FEASSO FCA-58
Tensão de entrada	11V-14,5V
Tensão de saída	110V (+/- 5%) 60Hz
Potencia Entrada	200W
Potencia Máxima de Entrada	400W
Eficiência	>90%

Fonte: (FEASSO)

c) Lâmpada LED com conversor CA-CC

A lâmpada LED é composta originalmente pelo conversor CA-CC e o conjunto de LED SMD. A tabela x descreve as características especificadas pelo fabricante da lâmpada.

Tabela 8 - Especificação lâmpada de LED

Modelo	LED SMD 3528
Potência (W)	18
Tensão(V)	100-265V
Fluxo luminoso (lúmens)	1440
Temperatura cor (Kelvin)	5500 – 6500
Ângulo de iluminação	120

Fonte: (Drlux, 2015)

A Figura 25 ilustra a composição dos equipamentos utilizados na configuração 1.

Figura 25 - Experimento configuração 1



Fonte: (Próprio autor)

6.1.1 Metodologia experimentos configuração 1

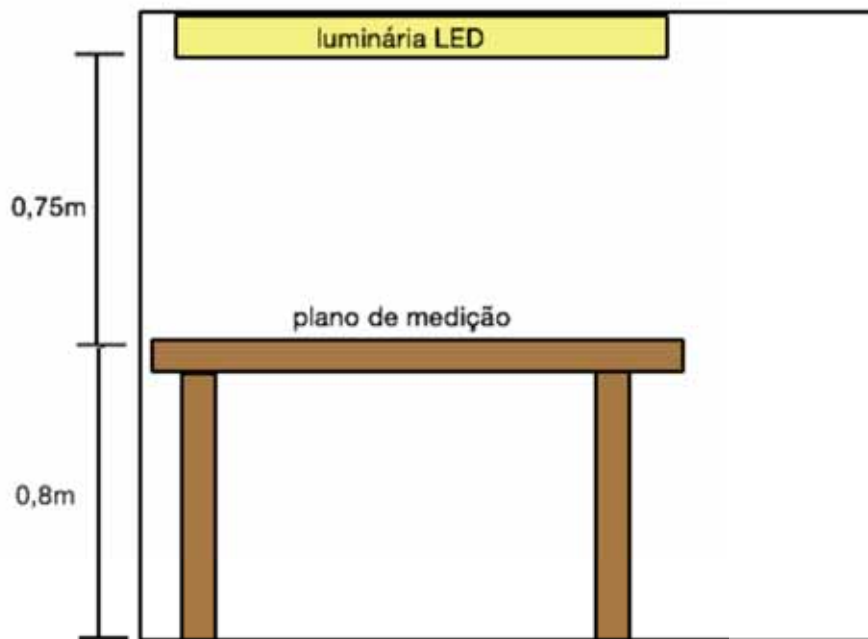
Para as medições de corrente e tensão em CC foram utilizados multímetros na entrada do inversor, ligado em paralelo para as medições de tensão e em série para as medições de corrente.

Na saída do inversor foram medidos através de um analisador de qualidade de energia, a potência e as formas de onda de corrente e tensão fornecidas pelo inversor em CA.

Para as medições de iluminamento foi utilizado um luxímetro, seguindo os procedimentos descritos abaixo:

- Foi utilizado um plano com dimensões de 58cmx58cm, com altura entre o plano e o solo de 0,8m e da fonte e o plano de 0,75m, conforme ilustrado na figura 26.

Figura 26 - Esquemático ambiente de testes iluminância



Fonte: (Próprio Autor)

- Considerando o índice do local (k) descrito no capítulo 5 e a equação (5.2), tem-se:

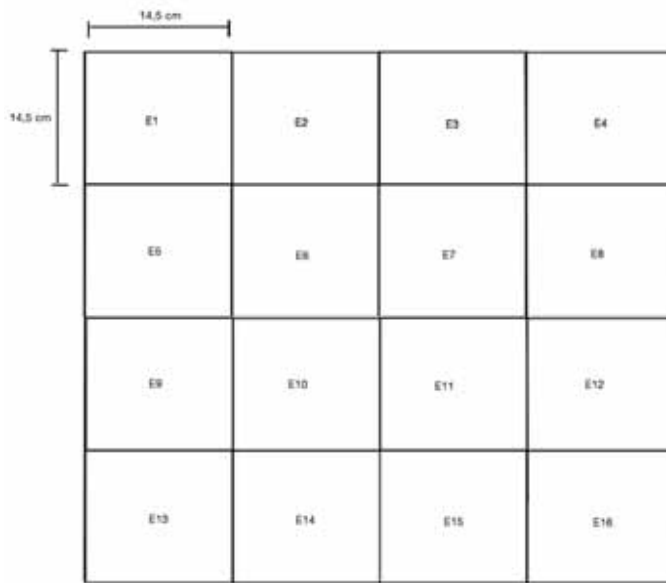
$$k = \frac{0,58 \cdot 0,58}{0,75 \cdot (0,58 + 0,58)}$$

$$k = 0,39$$

Da Tabela 5, tem-se que o número de medições mínimas são de 9 medições.

- Para fins práticos foram realizados 16 medições no total, dividindo o plano em quadrados de lado de 14,5cm, como mostrado na Figura 27.

Figura 27 - Malha de medição de iluminância



Fonte: (Próprio autor)

A Tabela 9 descreve os resultados obtidos através das medições com o luxímetro.

Tabela 9 - Medições iluminância configuração 1

Ponto	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16
Iluminância (lux)	868	902	902	868	868	902	902	868	868	902	902	868	868	902	902	868

Da equação (5.3) apresentada no capítulo 5, tem-se que o iluminamento médio é de:

$$\bar{E} = \frac{868 + 902 + 902 + 868 + \dots + 868}{16}$$

$$\bar{E} = 885 \text{ lux}$$

- As medições foram realizadas perpendiculares à fonte luminosa e o sensor posicionado no centro de cada quadrado. A Figura 28 mostra este procedimento.

Figura 28 - Plano de medição de iluminância



Fonte: (Próprio autor)

6.1.2 Dados dos experimentos configuração 1

A Tabela 10 descreve os valores em C.C. obtidos através dos multímetros ligados na entrada do inversor.

Tabela 10 - Medições entrada inversor

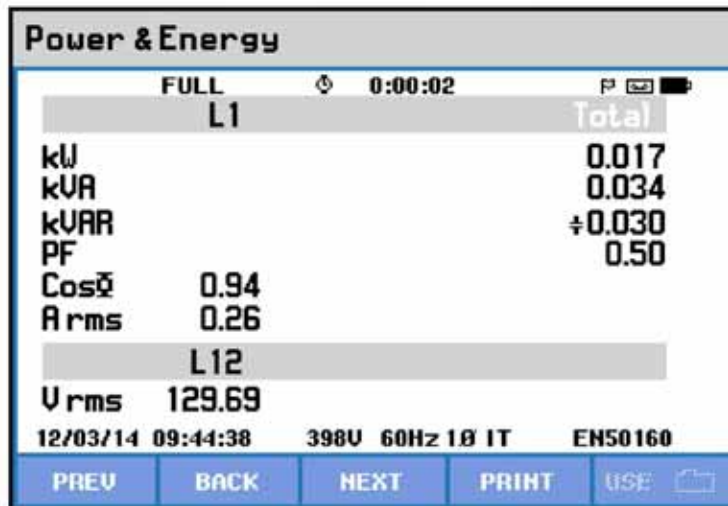
Medição	Tensão(V)	Corrente(A)	Potência(W)
Entrada do Inversor	12,1	2,2	26,62

Fonte: (Próprio autor)

A potencia solicitada pelo inversor é de 26,62W. Esse valor corresponde a potencia solicitada pelo conjunto lâmpada e inversor.

Na saída do inversor foram medidos através de um analisador de qualidade de energia as potencias solicitadas pela lâmpada. A Figura 29 ilustra os dados de potencia fornecidas pelo analisador de qualidade de energia.

Figura 29 - Parâmetros configuração 1

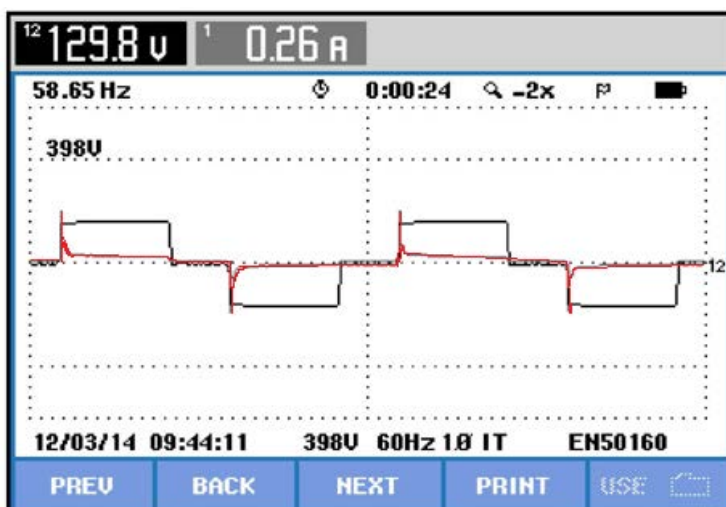


Fonte: (Próprio autor)

A lâmpada de LED solicitou do inversor uma potencia de 17W com um baixo fator de potencia de apenas 0,5.

A Figura 30 ilustra as formas de onda de corrente (em vermelho) e tensão (em preto) medidas pelo analisador de qualidade de energia.

Figura 30 - Forma da tensão e corrente saída do inversor

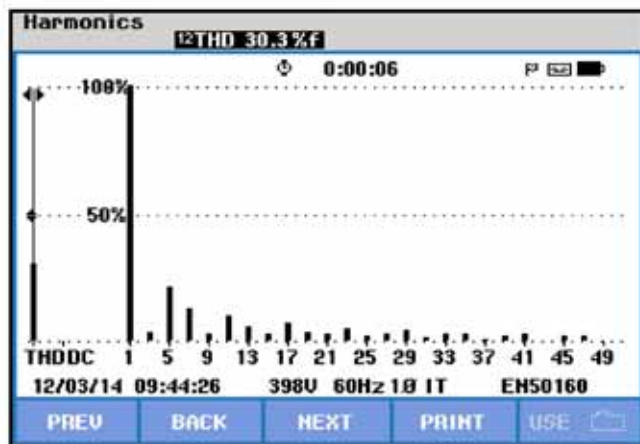


Fonte: (Próprio autor)

Da Figura 30 é possível verificar que a onda de tensão fornecida pelo inversor é de uma onda quase quadrada. Os valores RMS de tensão e corrente são respectivamente de 129,8V e 0,26A.

A Figura 31 ilustra os componentes harmônicos de tensão do inversor utilizado no experimento.

Figura 31 - Espectro harmônicos de tensão no inversor

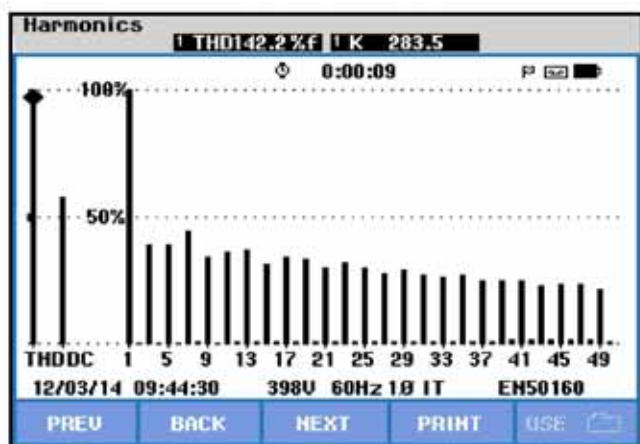


Fonte: (Próprio autor)

Da Figura 31 é possível verificar uma significativa presença de harmônicos de 5°, 7°, 11°, 17° ordem. A distorção harmônica total medida é de 30,3%.

A Figura 32 ilustra os componentes harmônicos de corrente na saída do inversor utilizado no experimento.

Figura 32 - Harmônicos de corrente configuração 1



Fonte: (Próprio autor)

Da Figura 32 é possível observar um alto grau de contaminação por harmônicos, o valor da distorção harmônica total medida é de 142,2%.

6.2 Experimentos configuração 2

A configuração 2 é composta pelos seguintes equipamentos :

a) Painel solar

Foram utilizados 4 painéis fotovoltaicos diferentes, ligados na configuração série, a Tabela 11 descreve as especificações fornecidas pelo fabricantes dos painéis fotovoltaicos.

Tabela 11 - Informações técnicas painéis fotovoltaicos

Fabricante/Modelo	Astro Solar/ não informado	Solar Terra/ HG135	Solar Terra/ HG125	Unisol/ PVL-68
Tecnologia	Si Monocristalino	Si Monocristalino	Si Monocristalino	Filmes Finos
Potência Máxima (W)	247,2	135	25	68
Corrente Potência Máxima (A)	7,93	7,45	1,47	4,13
Tensão Potência Máxima (V)	31,08	18,14	17	16,5
Corrente Curto Circuito (A)	8,45	8,04	1,59	5,1
Tensão Circuito Aberto (V)	37,2	21,74	21,1	23,1

Para calcular a tensão resultante dos painéis fotovoltaicos, considerando a tensão na potência máxima, é utilizado a equação (2.1) apresentada no capítulo 2.

$$V = 31,08 + 18,14 + 17 + 16,5$$

$$V = 82,72V$$

A Figura 33 ilustra o conjunto de painéis solares utilizados no experimento.

Figura 33 - Painéis solares experimento 2



Fonte: (Próprio autor)

b) Lâmpada LED sem conversor CA-CC

A lâmpada utilizada possui acoplado um conversor CA-CC. Para o experimento da configuração 2, foi retirado o conversor e ligado diretamente o painel fotovoltaico ao conjunto de LED da lâmpada.

O modelo de lâmpada é o mesmo utilizado na configuração 1.

6.2.1 Metodologia experimentos configuração 2

Para as medições de corrente e tensão são utilizados multímetros na entrada da lâmpada de LED, ligados em paralelo para medições de tensão e ligados em série para as medições de corrente.

Para as medições de iluminância são utilizados os mesmos procedimentos utilizados na configuração 1.

Para obter um iluminamento próximo ao da configuração 1, foi variado a tensão fornecida pelos painéis fotovoltaicos, sombreando partes dos painéis. A Tabela 12 mostra os dados obtidos (para valores de iluminância próximos ao do experimento 1) nas medições com o luxímetro.

Tabela 12 - Medições iluminância configuração 2

Ponto	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16
Iluminância (lux)	872	906	906	872	872	906	906	872	872	906	906	872	872	906	906	872

A iluminância resultante é calculada através da equação (5.3) apresentada no capítulo 5.

$$\bar{E} = \frac{872 + 906 + 906 + 872 + \dots + 872}{16}$$

$$\bar{E} = 889 \text{ lux}$$

Nas medições com os multímetros foram obtidos tensão e corrente de 77,6V e 0,25A respectivamente. Portanto a potencia consumida foi de:

$$P = V \cdot I$$

$$P = 77,6 \cdot 0,25$$

$$P = 19,4 \text{ W}$$

6.2.2 Dados dos experimentos configuração 3

As medições foram realizados de forma a obterem o mesmo iluminamento obtido na configuração 1, comparando o consumo de energia do sistema para um mesmo iluminamento.

A medição que mais se aproximou da medição da configuração 1 foi obtida com valor de iluminância de 889 lux e potencia consumida de 19,4W. A Tabela 13 mostra o comparativo entre os dois sistemas.

Tabela 13 - Comparativo configuração 1 e 2

	Configuração 1	Configuração 2
Composição	Bateria, inversor, lâmpada LED com conversor AC-DC	Painel fotovoltaico, lâmpada LED sem conversor AC-DC
Iluminância medida (lux)	885	889
Potência solicitada pela luminária.(W)	17	19,4
Potência total solicitada pelo sistema (conjunto de componentes em Watts)	26,62	19,4
Potência consumida nas etapas de conversão.	9,62	0

As perdas nas etapas de conversão são obtidas pela diferença entre a potência total solicitada pelo sistema (conjunto inversor lâmpada) e a potência solicitada pela luminária. Sendo obtido o valor de 9,62W.

6.3 Experimentos Configuração 3

A configuração 3 é composta pelos seguintes equipamentos:

- a) Gerador senoidal: equipamento que fornece uma onda senoidal, com baixo nível de distorção.

Este equipamento foi ligado diretamente a lâmpada LED com conversor AC-CC.

- b) Lâmpada LED com conversor CA-CC

A lâmpada utilizada é a mesma da configuração 1.

6.3.1 Metodologia experimentos configuração 3

Para as medições de potências, harmônicos e aquisição das formas de onda de tensão e corrente foi utilizado um analisador de qualidade de energia na saída do gerador senoidal.

Para as medições de iluminância foi utilizado os mesmos procedimentos utilizados na configuração 1. A Tabela 14 mostra os dados obtidos pelo luxímetro na configuração 3.

Tabela 14 - Medições iluminância configuração 3

Ponto	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16
Iluminância (lux)	856	904	904	856	856	904	904	856	856	904	904	856	856	904	904	856

A iluminância resultante é calculada através da equação (5.3) apresentada no capítulo 5.

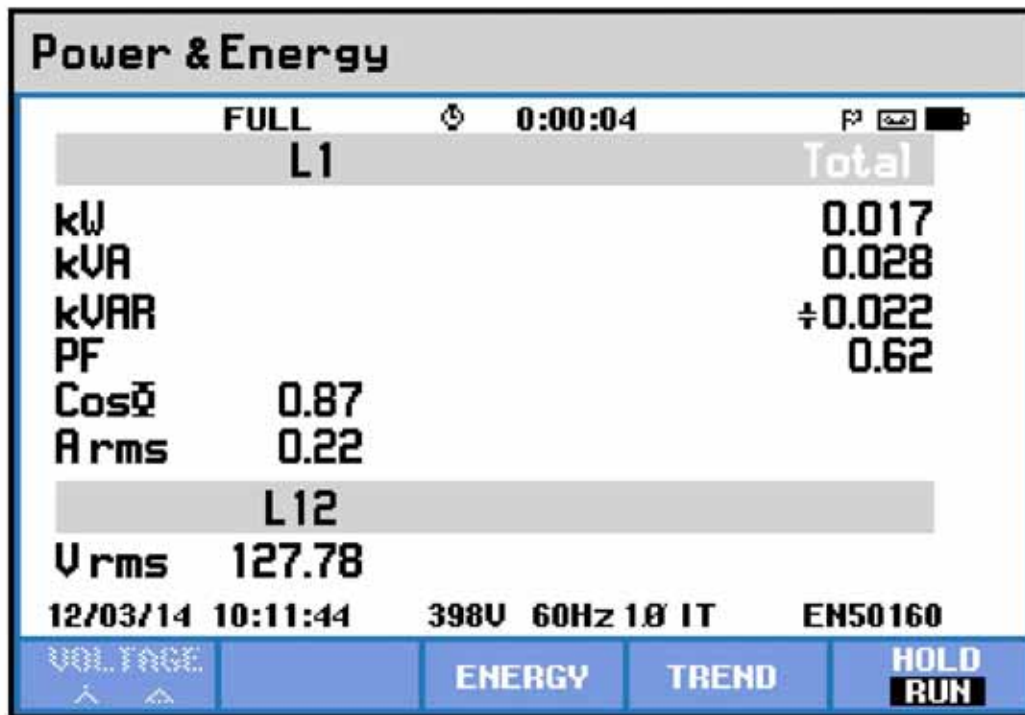
$$\bar{E} = \frac{856 + 904 + 904 + 856 + \dots + 856}{16}$$

$$\bar{E} = 880 \text{ lux}$$

6.3.2 Dados dos experimentos configuração 3

A Figura 34 ilustra os dados de potencias fornecidas pelo analisador de energia.

Figura 34 - Parâmetros configuração 3

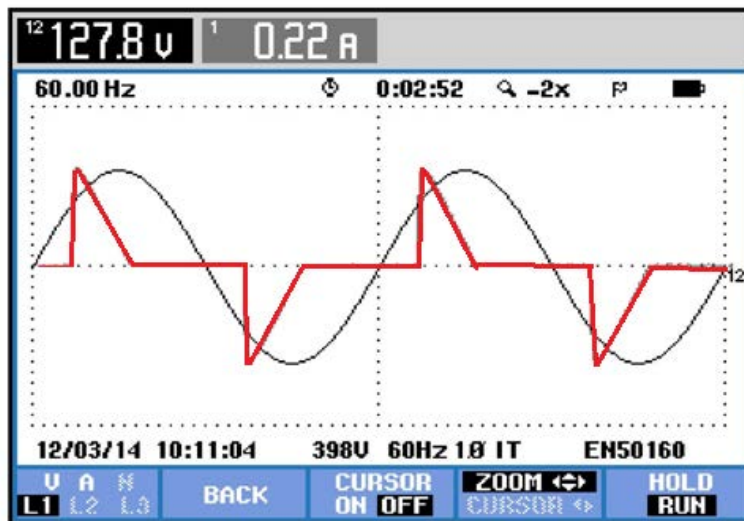


Fonte: (Próprio autor)

A lâmpada de LED solicitou do gerador senoidal 17W com um baixo fator de potencia de apenas 0,62. Comparando com os valores obtidos no experimento 1, tem-se um fator de potencia maior (0,62 contra 0,5) representando um melhor aproveitamento da potencia CA.

A Figura 35 ilustra as formas de onda de corrente (em vermelho) e tensão (em preto) medidas pelo analisador de qualidade de energia na configuração 3.

Figura 35 - Forma da tensão e corrente configuração 3

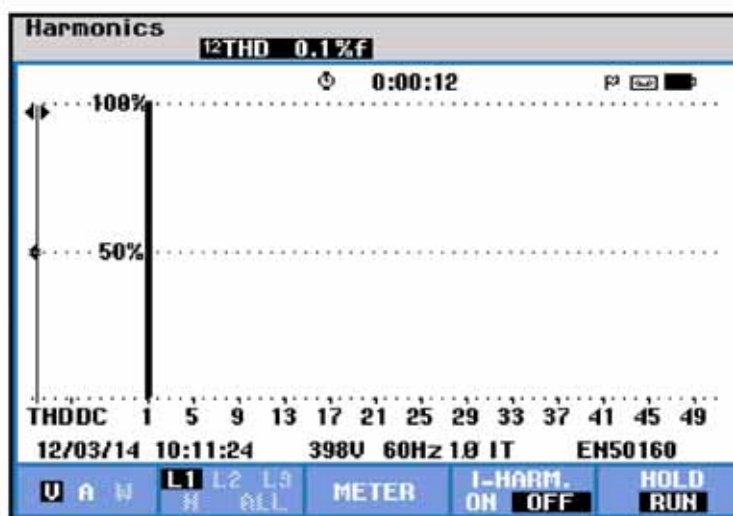


Fonte: (Próprio autor)

Da Figura 35 é possível verificar que a onda de tensão fornecida pelo gerador é de uma onda senoidal. Os valores RMS de tensão e corrente são respectivamente de 127,8V e 0,22A. Comparando com os valores obtidos na configuração 1, observa-se que a corrente solicitada é menor (0,22A contra 0,26A) e a tensão fornecida também é menor (127,8V contra 129,8V).

A Figura 36 ilustra os componentes harmônicos de tensão do gerador senoidal utilizado no experimento.

Figura 36 - Hamônicos de tensão saída do gerador senoidal

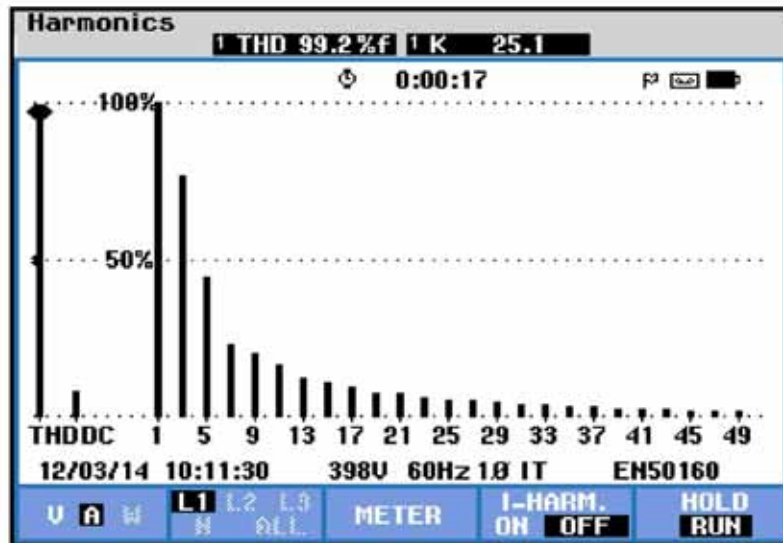


Fonte: (Próprio autor)

Da Figura 36 é possível verificar que a distorção harmônica do gerador senoidal é quase nula, de apenas 0,1% de distorção harmônica total.

A Figura 37 ilustra os componentes harmônicos de corrente do gerador senoidal utilizado no experimento.

Figura 37 - Harmônicos de corrente configuração 3



Fonte: (Próprio autor)

Da Figura 37 é possível observar um alto grau de contaminação por harmônicos, há grandes quantidades de componentes harmônicos de 3°, 5°, 7°, 9°, 11° ordem. A distorção harmônica total medida é de 99,2%.

A Tabela 15 mostra um comparativo da configuração 1 e da configuração 3.

Tabela 15 - Comparativo configuração 1 e 3

	Configuração 1	Configuração 3
Composição	Bateria, inversor, lâmpada LED com conversor AC-DC	Gerador senoidal, lâmpada LED com conversor AC-DC
Iluminância E (lux)	885	880
Potencia ativa P (W)	17	17
Potencia reativa Q (VAR)	30	22
Potencia aparente S (VA)	34	28
Fator de potencia FP	0,5	0,62
Tensão alimentação (V)	129,7	127,8
Corrente (A)	0,26	0,22
THD de tensão	30,3%	0,1%
THD de corrente	142,2%	99,2%

Da Tabela 15 observa-se que as iluminâncias e as potências ativa consumida pela luminária de LED são aproximadamente iguais. Porém as potências reativas e aparentes do sistema são diferentes, e conseqüentemente há diferenças no fator de potência nas duas configurações.

A configuração 1 possui um fator de potência mais baixo que a configuração 2, fazendo com que ela solicite uma corrente maior.

Observa-se também uma distorção harmônica total de tensão e corrente maiores na configuração 1.

7 CONCLUSÃO

Através do estudo verifica-se que as perdas obtidas nas etapas de conversão foram significativas, principalmente devido ao inversor.

Para o inversor utilizado no experimento a perda foi de aproximadamente 50% a mais, em comparação ao sistema sem etapas de conversão, considerando o mesmo iluminamento das luminárias de LED. Ou seja para cada 3 lâmpadas sem etapas de conversão DC-AC-DC, é possível alimentar apenas 2 lâmpadas com sistema de conversão.

Comparando as configurações 1 e 3, tem-se que as potências ativas consumidas pelas luminárias foram praticamente idênticas, para um mesmo iluminamento. Porém a potência aparente solicitada pelo sistema formado pelo inversor foi maior que o do gerador senoidal.

A degradação da qualidade de energia tem um impacto relativamente grande no sistema utilizado (principalmente devido à qualidade do inversor utilizado), gerando uma distribuição de componentes harmônicos com alto grau de poluição para o conjunto inversor e luminária LED. Estes harmônicos representam grande risco a equipamentos sensíveis à harmônicos, causando o mau funcionamento e a baixa eficiência do sistema.

De um modo geral, para o experimento, verifica-se que as vantagens do sistema de distribuição CC fotovoltaico é interessante, uma vez que as perdas de conversão verificadas foram significativamente altas.

Para sistemas que necessitem de alimentação por tensão senoidal, o inversor utilizado no experimento mostrou-se pouco eficaz, principalmente por gerar distorções significativas, na ordem de 30%, com isso equipamentos sensíveis a harmônicos tornam-se ineficientes ou até mesmo falhos quando alimentados pelo inversor.

8 REFERÊNCIAS

Alguns Fundamentos da Corrosão. MSPC - Informações Técnicas, 2007. Disponível em: <http://www.mspc.eng.br/tecdiv/corr_110.shtml>. Acesso em: 09 de Novembro 2014

Boylestad, R.; Nashelsky, L. Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos, Pearson Prentice Hall, 6ª edição, 1998.

Boylestad, R.; Nashelsky, L. Introdução à Análise de Circuitos, Pearson Prentice Hall, 10ª edição, 2004.

Catálogo Técnico 2015 – 2016. Baterias Tudor, 2015. Disponível em:<http://tudor.com.br/assets/upload/layout_cat_logo_tudor_estacion_rias.pdf>. Acesso em: 25 de Janeiro 2015.

Cromatek. Cromatek, 2015. Disponível em: <<http://www.cromatek.com.br>>. Acesso em: 23 de Janeiro 2015.

Energia Solar / Célula Fotovoltaica – ligados à corrente. Profelectro, 2009. Disponível em: <<http://www.profelectro.info/?p=1368>>. Acesso em: 09 de Novembro 2014.

Fadigas, E. A. F. A. Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica. Disponível em: <http://disciplinas.stoa.usp.br/pluginfile.php/56337/mod_resource/content/2/Apostila_solar.pdf> Acesso em: 22 de Janeiro 2015

High Brightness LED Datasheet . Vishay Semiconductor, 2012. Disponível em: <<http://www.vishay.com/docs/81892/vlcs5830.pdf>>. Acesso em: 09 de Novembro 2014

Iluminação natural – Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações – Método de medição. Rio de Janeiro. NBR15215-4, 2004

Lâmpadas Master Led. Philips, 2012. Disponível em: <http://www.lighting.philips.com/br_pt/lightcommunity/assets/Brochura_MASTER_LED_3_LR.pdf> Acesso em: 09 de Novembro 2014

Manual de Correção do Fator de Potência. Engelétrica, São Paulo. Disponível em: <<http://www.engeletrica.com.br/manual-Fator-de-Pot%C3%Aancia-Real.html>>. Acesso em: 09 de Novembro 2014

Mohan, Undeland, Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 2nd Edition, John Wiley & Sons Inc., 1994.

Pilhas e Baterias. Química Nova Interativa, Campinas, 2011. Disponível em: <<http://qnint.sbq.org.br/qni/visualizarConceito.php?idConceito=45>>. Acesso em: 09 de Novembro 2014

Primeiros Passos Geradores Fotovoltaicos. Newhome, 2012. Disponível em:

<http://www.newhome.com.br/HTMLs/Ekohome/Solar/Fotovoltaico/Cristalino/primeiros_passos_ger_fotovolt.htm> . Acesso em: 09 de Novembro 2014.

Produto. Drlux, 2015. Disponível em:< <http://www.drlux.com.br/lampada-super-led-tubular-t8-120cm-leitosa.html>> . Acesso em: 25 de Janeiro de 2015

Produto. Feasso, 2015. Disponível em:< <http://www.feassobrasil.com.br/home/produto/codigo:179/fonte-inversora-de-tensao-fca-58-entr-12vdc-saida-110vac-usb-potencia-200w>> . Acesso em: 25 de Janeiro de 2015

Produto. Minipa, 2015. Disponível em:< <http://www.minipa.com.br/5/20/156-Minipa-Luxímetros-MLM-1011>> . Acesso em: 25 de Janeiro de 2015

Rashid, M. H. Eletrônica de Potência: circuitos dispositivos e aplicações. Makron Books, 1ª edição, 1999.

Rocha, A. V. Energia Solar Fotovoltaica Unidade III – Módulos Fotovoltaicos. Rio Grande do Norte, 2014. Disponível em:
<http://docente.ifrn.edu.br/alexandrorocha/energias-renovaveis/energia-solar-fotovoltaica/energia-solar-unidade-3_1-modulos-fotovoltaicos/view> Acesso em: 22 de Janeiro de 2015

Samsung LED Global. Samsung, 2014. Disponível em:
<<http://www.samsung.com/global/business/led/>>. Acesso em: 09 de Novembro 2014

Solar. Portal solar, 2015. Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br>>. Acesso em: 22 de Janeiro 2015

Solar terra energias alternativas. Solar terra, 2015. Disponível em:
<<http://www.solarterra.com.br>>. Acesso em: 22 de Janeiro 2015

Tipos de Painel Solar Fotovoltaico. Portal Solar, 2009. Disponível em:
<<http://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>> . Acesso em: 09 de Novembro 2014.

Vallêrra, A. M. Meio século de história fotovoltaica, 2006. Disponível em:<<http://www.solar.fc.ul.pt/gazeta2006.pdf>> . Acesso em: 22 de Janeiro 2015.

What is na LED? Lighting Research Center, 2003. Disponível em:<<http://www.lrc.rpi.edu/programs/nlpip/lightinganswers/led/whatisanled.asp>>. Acesso em: 09 de Novembro 2014

